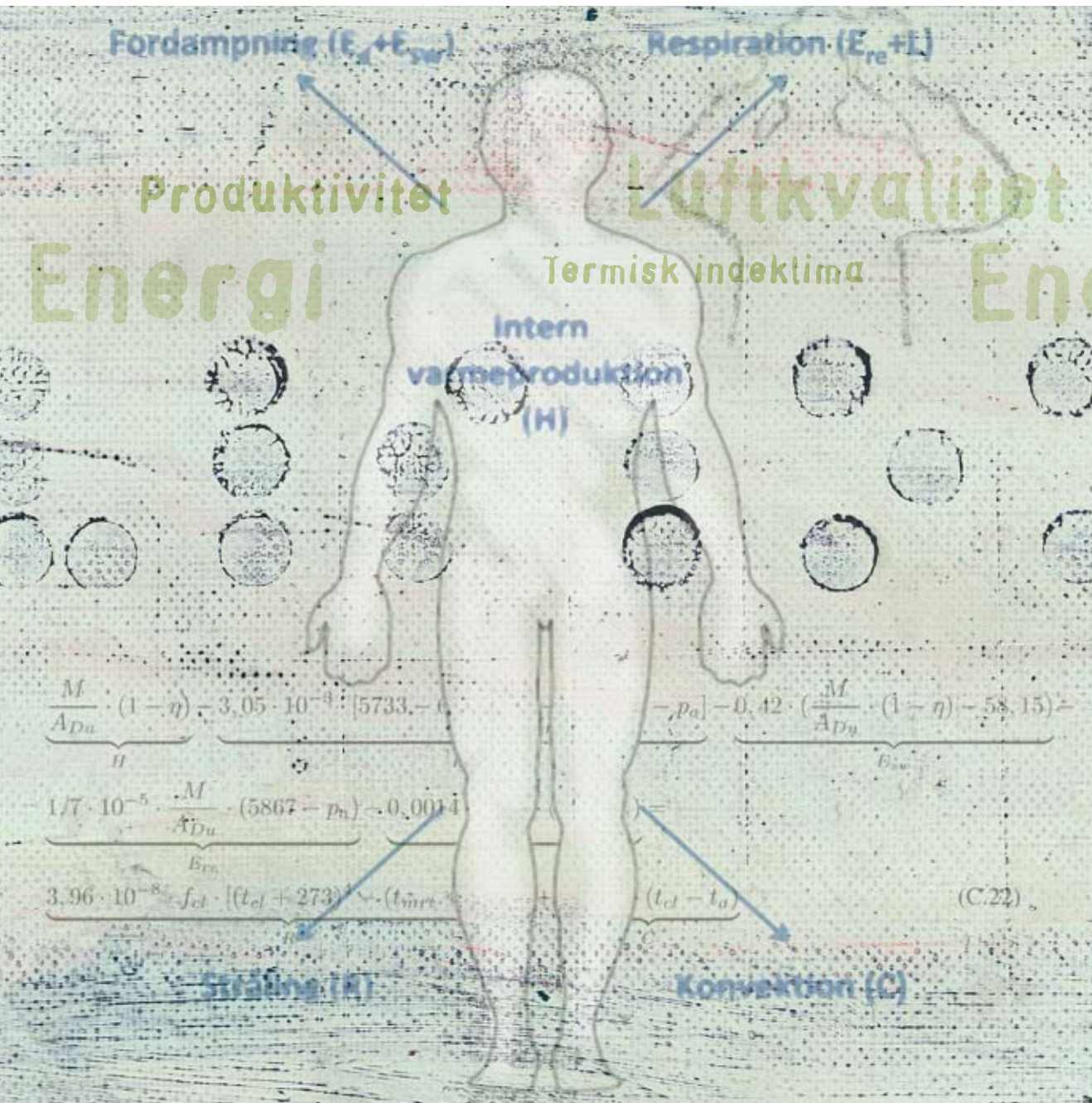


Langtidsevaluering af termisk komfort

Komfortindikatorer og menneskelig adaptivitet



Titel:

Langtidsevaluering af termisk komfort

Undertitel:

Komfortindikatorer og menneskelig adaptivitet

Projektperiode:

Indeklima og Energi, Afgangprojekt
3. september 2007 - 11. juni 2008

Projektgruppen:

Steffen E. Maagaard
Rasmus Lautrup

Vejledere:

Henrik Brohus
Rasmus Lund Jensen

Oplag: 6

Rapport sideantal: 513

Appendiks sideantal: 151

Vedlagt: 1 DVD

Synopsis:

Denne rapport er et afgangprojekt udarbejdet som afslutning af uddannelsen til civilingeniør i indeklimate og energi ved Aalborg Universitets Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakulteter.

Rapporten er indledt med et grundigt litteraturstudie, hvor eksisterende metoder til evaluering af en bygnings indeklimateevne er undersøgt. Fokus er hovedsageligt rettet mod evaluering af termisk indeklimate, men også luftkvalitet samt indeklimateets indflydelse på energiforbrug, produktivitet og økonomi er behandlet.

Baseret på litteraturstudiet, er eksisterende metoder til evaluering af en bygnings indeklimateevne, såvel momentant som langsigtet, udbygget og optimeret. Metoderne omfatter ydeevneindikatorer for såvel termisk og atmosfærisk indeklimate som energi med udgangspunkt i Eco-factor-metoden. Udvidelsen af Eco-factor-metoden for langtidsevaluering af termisk komfort giver mere detaljeret information om det oplevede termiske indeklimate og er i nærværende projekt benyttet på to udvalgte bygninger. På baggrund af importerede data fra termiske bygningssimuleringsprogrammer indeholder den udvidede Eco-factor endvidere evalueringmetoder i form af statistiske analyser.

Foruden dette er der i samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) udfærdiget en kobling mellem programmerne BSim og Matlab. Denne er, foruden følsomheds- og usikkerhedsanalyser af de udvalgte bygninger, benyttet til undersøgelse af en adaptiv kontrolalgoritme, der styrer setpunktet for såvel opvarmning som køling som funktion af udelufttemperaturen. Baggrunden herfor er empiriske undersøgelser hvor det er fundet, at en sådan styring vil medføre store energibesparelser uden forringelse af det termiske indeklimate. Potentielle energibesparelser, sammen med den teoretiske indflydelse på det oplevede termiske indeklimate, er undersøgt ved simuleringer af en udvalgt bygning. Det blev fundet, at en styring af setpunkterne for hhv. opvarmning og køling efter denne algoritme i den udvalgte bygning medfører et øget energiforbrug sammenlignet med en traditionel styringsstrategi. Simuleringerne af det forventede antal tilfredse med det termiske indeklimate viste imidlertid en klar forbedring heraf ved styring efter kontrolalgoritmen ift. konventionelle faste setpunkter for opvarmning og køling.

Abstract

This report is a final thesis documenting the finalization of a degree in Master of Science in Indoor Environmental Engineering at The Faculties of Engineering, Science and Medicine at Aalborg University.

The report begins with a thorough literature review on existing methods for evaluation of the performance of the indoor environment. The focus is mainly directed at the evaluation of the thermal indoor environment, but also indoor air quality together with the influence from the indoor climate on energy consumption, productivity and economy are dealt with.

Based on the literature review, existing methods for evaluation of a buildings indoor climate performance, momentary as well as long-term, has been expanded and optimized. The methods consists of performance indicators for the thermal and atmospheric indoor climate as well as energy consumption based on the Eco-factor method. The extension of the Eco-factor method for long-term evaluation of thermal comfort gives more detailed information on the perceived indoor climate, and has in this project been applied on to buildings. Using data from thermal building simulation programmes, the extended Eco-factor contains furthermore statistical evaluation methods.

Furthermore, a coupling between the programmes BSim and Matlab has been carried out in cooperation with the Danish Building Research Institute (SBI). This coupling has, besides sensitivity and uncertainty analysis on the chosen buildings, been used for investigating an adaptive control algorithm that calculates the set point for heating and cooling as a function of the outdoor air temperature. The background for this are empirical investigations which has shown a large energy saving potential without reducing the thermal indoor climate. Potential energy savings together with the theoretical influence on thermal indoor environment has been investigated through simulations of a chosen building. It was found, that calculating the set points for heating and cooling after this algorithm will lead to an increased energy consumption for the chosen building compared with a traditional control strategy. The simulations however showed a decrease in the predicted percentage of dissatisfied with the thermal indoor environment when using the adaptive control algorithm compared with conventional heating and cooling set points.

Forord

Nærværende rapport er resultatet af et langt afgangsprøveprojekt på Aalborg Universitets Indeklima- & Energilinje under de Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakulteter.

Formål og målgruppe

Formålet med rapporten er, gennem et grundigt litteraturstudie, at undersøge eksisterende metoder til brug ved evaluering af en bygnings indeklime. Med baggrund heri søges en optimering af de eksisterende metoder til såvel momentan som langsigtet evaluering af en bygnings indeklimaydeevne. I projektet er fokus hovedsageligt rettet mod evaluering af termisk indeklime, men der vil sporadisk fremkomme diskussioner vedr. andre indeklimaparametre såsom luftkvalitet samt indflydelsen på energi og økonomi herunder produktivitet.

Rapporten fordrer at læseren besidder faglig viden svarende til ingeniørniveau indenfor indeklime og energi.

Opbygning og læsevejledning

Nærværende rapport er opdelt i tre sektioner med overskrifterne:

- I. Litteraturstudie
- II. Udvikling af koncepter
- III. Konklusion og perspektivering

Sektion I danner teoretisk baggrund for anden sektion, hvorefter der i sektion III foretages en diskussion og konklusion på hele projektet. Samtlige beregninger, tegninger, data mv. der er udført i forbindelse med nærværende projekt kan findes på den vedlagte DVD placeret bagerst i denne rapport.

Figurer og tabeller er i rapporten nummereret ved hhv. kapitel og figur-/tabelnummer. F.eks. vil figur 1 i kapitel 2 blive benævnt figur 2.1. Samme princip er benyttet ved formelnummerering dog yderligere angivet med omsluttende parentes således at formel 1 i kapitel 2 benævnes (2.1). Appendiks er placeret bagerst i rapporten, og henvisninger hertil er benævnt alfabetisk. Fodnoter er angivet med hævet tal og selve noten er anført nederst på samme side.

Kildehenvisninger er foretaget ved efternavn og årstal og angivet i firkantede parenteser, eksempelvis [Fanger, 1972] eller Fanger [1972]. Henvisninger til standarder er foretaget efter nummeret for standarden samt årstal, eksempelvis [DS/EN ISO 7730, 2006]. Litteraturfortegnelsen er placeret bagerst i rapporten umiddelbart før appendiks.

Symboler skrives i kursiv, f.eks. t_{op} , med angivelse af enheden herfor omsluttet i firkantet parentes, f.eks. [$^{\circ}C$]. Samtlige benyttede symboler, herunder konstanter, med tilhørende enheder er angivet i nomenklaturlisten umiddelbart efter indholdsfortegnelsen. Akronymmer beskrives første gang de forekommer i rapporten, hvorefter der henvises til nomenklaturlisten, hvor samtlige benyttede akronymmer med tilhørende forklaringer er angivet.

Der skal rettes en særlig tak til Frank Pedersen fra Statens Byggeforskningsinstitut, der er ydet stor hjælp i forbindelse med den tekniske del af koblingen mellem BSim og Matlab samt en stor tak til Tage Maagaard Hjelm fra Grontmij | Carl Bro A/S for hjælp i forbindelse med indhentning af CTS-data, tegninger, beskrivelser mv. Ydermere skal der rettes en stor tak til Tine Bagge Lautrup, Manz' Art, der har udfærdiget omslaget til nærværende projekt.

Illustrationerne på omslagets forside viser den fysiologiske tilgang til beskrivelsen af menneskets termiske komfort ved betragtning af varmebalancen med omgivelserne, mens bagsideillustrationerne viser den adaptive tilgang. Nærværende projekt forbinder disse tilgange med henblik på opstilling af metoder for langtidsevaluering af termisk komfort under hensyntagen til menneskelig adaptivitet.

Aalborg Universitet
Det Teknisk-Naturvidenskabelige Fakultet

d. 11/6 2008

Steffen E. Maagaard

Rasmus Lautrup

Indholdsfortegnelse

Titelside	ii
Forord	vi
Indholdsfortegnelse	vii
Nomenklaturliste	xiii
1 Indledning	1
1.1 Afgrænsning af problem	1
1.2 Problemanalyse	2
1.2.1 Bygningsreglementets krav	2
1.2.2 Komfort- & ydeevneindikatorer	3
1.2.3 Adaptive modeller	5
1.2.4 Indeklima, energiforbrug og produktivitet	6
1.2.5 Status	6
1.3 Problemformulering	8
I Litteraturstudie	9
2 Evaluering af indeklima - krav og vejledninger	11
2.1 Indledning	11
2.2 DS/EN ISO 7730	12
2.2.1 Evaluering af det termiske indeklima i stationære tilstande	12
2.2.2 Øget lufthastighed	12
2.2.3 Dynamiske termiske omgivelser	14
2.2.4 Langsigtet evaluering af termisk indeklima	15
2.2.5 Adaptivitet	15
2.2.6 Dynamisk beklædningsisolans	15
2.3 DS/EN 15251	16
2.3.1 Termisk miljø	16
2.4 ASHRAE 55	27
2.4.1 Grafisk metode	27
2.4.2 PMV-baseret metode	28
2.4.3 Forøgelse af øvre operativ temperaturgrænse	29
2.4.4 Lokal diskomfort	30
2.4.5 Krav om tidlig temperaturvariation	31

2.4.6	Alternativ metode for naturligt ventilerede bygninger	31
2.4.7	Toleranceoverskridelser	32
2.5	Langsigtet evaluering - indikatorer for det termiske miljø	33
2.5.1	Anbefalede kriterier for acceptable afvigelser	40
2.5.2	Samlet vurdering af indeklimaet	42
2.6	Opsummering og diskussion	44
3	Termisk komfort	47
3.1	Termisk komfort - generelt	47
3.2	Predicted Mean Vote - PMV	48
3.3	Predicted Percentage of Dissatisfied - PPD	48
3.4	Lokal diskomfort	48
3.5	PMV-modellens validitet	49
3.5.1	Undersøgelser af PMV-indekset	49
3.5.2	Opfattelse af termisk komfort	51
3.5.3	PMV-ligningen	51
3.5.4	Estimering af indgående parametre	52
3.5.5	Udeklimaets indflydelse på opfattelse af termisk komfort	59
3.5.6	Interaktion mellem generel og lokal diskomfort	60
3.5.7	Opsummering	60
3.6	Usikkerhed ved estimering af lokal diskomfort	62
3.7	Opsummering	66
3.8	Komfortmodeller	66
3.8.1	New Effective Temperature - ET*	67
3.9	2-knude-modellen - TSENS & DISC	71
3.10	Skalaer for termisk komfort og præference	72
4	Adaptive modeller	81
4.1	Empiriske undersøgelser af adaptivitet	83
4.1.1	RP-884 - Udvikling af adaptive modeller for termisk komfort og præference	83
4.1.2	RP-1161 - Anvendelige vinduer, personlig kontrol og termisk komfort	93
4.1.3	PMV_e - Udvidelse til PMV-modellen	101
4.1.4	SCATs	105
4.1.5	Adaptive temperaturgrænser (ATG)	118
4.2	Tidslig variation af indgående parametre	125
4.2.1	Beklædningsisolans	125
4.2.2	Aktivitetsniveau	131
4.2.3	Lufthastighed	134
4.3	Opsummering	136
4.4	Diskussion	142
4.5	Opsummering og diskussion af modeller for tidslig variation af indgående parametre	149
5	Indeklima og produktivitet	155
5.1	Indledning	155
5.2	Indeklimaets påvirkning af mennesket	155
5.3	Produktivitetsens indflydelse	157
5.3.1	Relation mellem omkostninger og produktivitet	159
5.4	Indeklimaets betydning for præstationsevnen	162
5.4.1	Termiske kriterier & præstationsevne	162
5.4.2	Ventilation & præstationsevne samt dens indvirkning på sygdomsfraværet	165

5.4.3	Luftkvalitet (IAQ) & præstationsevne	171
5.4.4	SBS-symptomer & præstationsevne	173
5.4.5	Kontrolmuligheder & præstationsevne	174
5.5	Diskussion	174
5.5.1	Hvordan overbevises kunden?	176
5.6	Opsummering og konklusion	177
6	Beskrivelse af eksisterende koncepter	179
6.1	By og Byg Miljødeklarering	179
6.2	Eco-factor	182
II	Udvikling af koncepter	185
7	Indledning	187
8	Nye og eksisterende koncepter	191
8.1	Koncept 1 - Generel metode	191
8.1.1	Generelt	191
8.1.2	By og Byg Miljødeklarering - Optimering af indeklimaldel	193
8.2	Koncept 2 - Langsigtet komfortindikator-metode	194
8.3	Koncept 3 - Adaptiv kontrolalgoritme (ACA)	195
8.4	Koncept 4 - Indeklimamærkning	196
8.5	Koncept 5 - Eco-factor-baserede koncepter	198
8.5.1	Koncept 5a - Optimering af indeklimaldel	199
8.5.2	Koncept 5b - Udvidelse med produktivitet	200
8.5.3	Koncept 5c - Dynamisk beregning	202
8.5.4	Koncept 5d - Samlet udvidelse af Eco-factoren	203
8.6	Opsummering og diskussion	204
9	Analyse og implementering af valgte koncepter	209
9.1	Eco-factor med optimeret indeklimaldel samt dynamisk beregning	209
9.1.1	Komfortmodeller	211
9.1.2	Beregning af energiforbrug for importerede data	236
9.1.3	Ydeevneindikator	238
9.1.4	Eco-factor-værktøjets opbygning	242
9.2	Implementering af adaptiv kontrolalgoritme (ACA)	245
9.2.1	Implementering i BSim	245
10	Vurdering af bygningers ydeevne med den udvidede Eco-factor	249
10.1	Indledning	249
10.2	Københavns Energi	249
10.2.1	Energiforbrug	251
10.2.2	Indeklima	253
10.2.3	Eco-factor	271
10.3	Grontmij Carl Bro	275
10.3.1	Energiforbrug	277
10.3.2	Indeklima	278
10.3.3	Eco-factor	288
10.4	Diskussion	291

11 Simuleringer med adaptiv kontrolalgoritme	293
11.1 Modificering af BSim-model for simulering med ACA	293
11.2 Simuleringsrutiner og scenarier	294
11.3 Resultater - Scenario 1	295
11.3.1 Energi	297
11.3.2 Termisk indeklima	298
11.4 Resultater - Scenario 2	302
11.4.1 Energi	304
11.4.2 Termisk indeklima	305
11.5 Resultater - Scenario 3	308
11.5.1 Energi	309
11.5.2 Termisk indeklima	310
11.6 Konklusion - adaptiv kontrolalgoritme	313
12 Følsomheds- og usikkerhedsanalyse	317
12.1 Indledning	317
12.2 Parameteranalyse	317
12.3 Følsomhedsanalyse (screening)	320
12.3.1 Energiforbrug	320
12.3.2 Indeklima	323
12.3.3 Eco-factor	327
12.3.4 Opsummering og vurdering	330
12.4 Usikkerhedsanalyse	330
12.4.1 Energiforbrug	331
12.4.2 Indeklima	333
12.4.3 Eco-factoren	337
12.4.4 Opsummering og vurdering	339
III Konklusion og perspektivering	341
13 Konklusion	343
14 Perspektivering	351
Litteratur	355
Appendiks	362
A Skematisk opstilling af krav i BR08	363
B Termisk komfort	365
B.1 Model for termisk komfort	365
B.1.1 Varmebalance	366
B.1.2 Betingelser for termisk komfort	374
B.1.3 Komfortligning	375
B.2 Termiske indekser	376
B.2.1 PMV	376

B.2.2	PPD	378
B.2.3	Gyldighedsområde for PMV	379
B.3	Lokal diskomfort	380
B.3.1	Træk	380
B.3.2	Vertikal lufttemperatur	380
B.3.3	Varme og kolde gulve	381
B.3.4	Strålingstemperaturasymmetri	381
B.3.5	Gyldighedsområde for lokal diskomfort	382
C	2-knude-modellen	385
C.1	2-knude-modellen - TSENS & DISC	385
D	Notater - Adaptive modeller	391
D.1	RP-884 - 1997	391
D.2	SCATs - 2001	394
D.3	ATG - Adaptive TemperaturGrænser- 2003	396
D.4	PMV _e - 2002	399
E	By og Byg Miljødeklarering og -klassificering	403
E.1	Forklaringsskemaer	403
F	Københavns Energi	411
F.1	Bygningsbeskrivelse	411
F.2	Opbygning af BSim-model	415
F.2.1	Generelle forhold	415
F.2.2	Konstruktioner	416
F.2.3	Indeklimamålinger	417
F.2.4	Generering af vejrdata for simulering	418
F.2.5	Opsætning af systemer	424
F.2.6	Endelig BSim-model	432
F.2.7	Validering af model	433
G	Grontmij Carl Bro	443
G.1	Bygningsbeskrivelse	443
G.2	Opbygning af BSim-model	448
G.2.1	Generelle forhold	448
G.2.2	Konstruktioner	449
G.2.3	CTS-data	451
G.2.4	Generering af vejrdata for simulering	451
G.2.5	Opsætning af systemer	457
G.2.6	Endelig BSim-model	464
G.2.7	Validering af model	465
H	Beregning af diffus solstråling	471
H.1	Forudsætninger og formler	471
H.2	Beregning	471
H.3	Kontrol af beregnede værdier for direkte stråling	472
I	Beskrivelse af stokastiske begreber	475
I.1	Kort beskrivelse af forskellen	475

INDHOLDSFORTEGNELSE

I.2	Beskrivelse af følsomhedsanalyse	475
I.2.1	Morris-metoden	476
I.3	Beskrivelse af usikkerhedsanalyse	481
I.3.1	Randomiseret stikprøveplan	483
J	Fordelinger	487
J.1	Anvendte fordelingsfunktioner	487
J.1.1	Normalfordeling	488
J.1.2	Log-normalfordeling	489
J.1.3	Ligefordeling	490
K	Fordelingsfunktioner for parametre til følsomheds- og usikkerhedsanalyse	491
K.1	Københavns Energi	491
K.1.1	BSim parameter	491
K.1.2	Eco-factor parameter	500
L	Korrespondancer	507
L.1	Telefonnotater	507
L.1.1	YORK / Johnson Controls	507
L.2	E-mail-korrespondancer	510
L.2.1	Fergus Nicol - vedr. adaptiv kontrolalgoritme	510
L.2.2	Tage Maigaard Hjelm - Grontmij Carl Bro A/S	511
L.2.3	Allan Bendtsen - Københavns Energi A/S - vedr. solafskærmning	512
L.2.4	Allan Bendtsen - Københavns Energi A/S - vedr. energiforbrug	513

Nomenklaturliste

Symboler

D_h	Diffus stråling på vandret	$\frac{W}{m^2}$
DA	Afstandsfaktor mellem sol og jord	—
DN	Dag-nr.	—
G_h	Global stråling	$\frac{W}{m^2}$
h_s	Solhøjde	°
I_0	Direkte stråling	$\frac{W}{m^2}$
I_e	Kosmisk stråling	$\frac{W}{m^2}$
I_{max}	Maksimal rimelig direkte stråling	$\frac{W}{m^2}$
k_e	Udelukkelseskoeficient	—
K_t	Forhold mellem global og kosmisk stråling	—
m_{luft}	Relativ massefylde for luft	—
$RMIN$	Absolut luftfugtighed	—
t_{min}	Minimumstemperaturen om morgenen inden kl. 8	°C
A_{Du}	DuBois-areal, se ligning (B.1), side 366	m^2
α_{sk}	Andel af kroppen, der antages at være i det ydre volumen (hud-voluminet)	
A_r	Effektivt strålingsareal af kroppen	m^2
BFN	Neutral blodstrøm i huden	$\frac{g}{m^2 \cdot s}$
C	Varmetab ved konvektion	W
c_{cr}	Specifik varmekoefficient for kernen	$\frac{J}{kg \cdot K}$
c_{dil}	Specifik varmekonstant for blodstrømning	
c_p	Specifik varmekapacitet for tør luft ved konstant tryk	$\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
$c_{p,bl}$	Specifik varmekoefficient for blod (v. konstant tryk)	$\frac{J}{kg \cdot K}$

Nomenklaturliste

$c_{p,luft}$	Specifik varmekapacitet for luft	$\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$
c_{sk}	Specifik varmekoefficient for huden	$\frac{J}{kg \cdot K}$
c_{sw}	Proportionalitetskonstant for svedkontrol	$\frac{W}{m^2} \cdot K$
Δt_{kf}	Temperaturdifferens over køleflade	$^\circ C$
Δt_{vf}	Temperaturdifferens over varmeplade	$^\circ C$
e	Forventningsfaktor	
E_d	Varmetab ved diffusion af vanddamp gennem huden	W
E_{max}	Maksimalt fordampningsvarmetab	$\frac{W}{m^2}$
ϵ_c	Carnot-effektfaktor	—
ϵ_p	Praktisk effektfaktor (COP)	—
E_{re}	Varmetab ved respiration	W
E_{rsw}	Regulatorisk fordampningsvarmetab	$\frac{W}{m^2}$
$E_{rsw,req}$	Nødvendigt regulatorisk fordampningsvarmetab for termisk komfort	$\frac{W}{m^2}$
E_{sw}	Varmetab ved fordampning af sved	W
\bar{E}_{sw}	Middelvarmetab ved fordampning af sved	W
ET	Effective Temperature / Effektiv temperatur	$^\circ C$
ET_m^*	Middel effektiv udetemperatur	$^\circ C$
ET^*	New Effective Temperature / Ny effektiv temperatur	$^\circ C$
f_{cl}	Forhold mellem overfladeareal af beklædt krop og nøgen krop	
H	Intern varmereproduktion	W
h_c	Konvektiv varmetabskoefficient	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
H_e	Personens højde	kg
I_{cl}	Beklædningsisolans	$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$
i_m	Total effektivitet af fordampning	
K	Varmetab gennem tøj	W
K_{trans}	Effektiv ledning mellem kerne og hud	$\frac{W}{m^2} \cdot K$
L	Varmetab ved tør respiration	W
LR	Lewis ratio	$\frac{K}{KPa}$
M	Metabolisme	W
m_{cr}	Massen af kernen	kg

M_{shiv}	Varmeforøgelse som følge af kulderystelser	$\frac{W}{m^2}$
m_{sk}	Massen af huden	kg
n_c	Carnot-virkningsgrad	—
p_a	Vanddampstryk i omgivende luft	Pa
$PD_{koldt.loft}$	Procent utilfredse som følge af koldt loft	%
$PD_{kold.vg}$	Procent utilfredse som følge af kold væg	%
$PD_{temp.gulv}$	Procent utilfredse som følge af for kolde eller varme gulve	%
$PD_{varmt.loft}$	Procent utilfredse som følge af varmt loft	%
$PD_{varm.vg}$	Procent utilfredse som følge af varm væg	%
$PD_{vert.temp.diff.}$	Procent utilfredse som følge af vertikal forskel i lufttemperatur mellem hoved og fødder	%
Φ_{kf}	Kølefladeeffekt	kW
Φ_{vf}	Varmefladeeffekt	kW
PMV^*	New Predicted Mean Vote / Ny forventet middelvotering	
PPD^*	New Predicted Percentage Dissatisfied / Ny forventet procent utilfredse	%
PS	Percentage Satisfied / Procent tilfredse	%
Q_{bl}	Periferisk blodstrøm	$\frac{l}{h \cdot m^2}$
Q_{brutto}	Bruttokøleydelse	kW
q_v	Dimensionsgivende luftmængde	$\frac{m^3}{s}$
R	Varmetab ved stråling	W
$R_{e,cl}$	Fordampningsmodstand	$\frac{m^2 \cdot kPa}{W}$
RH	Relative Humidity / Relativ luftfugtighed	%
ρ_{bl}	Densitet af blod	$\frac{kg}{l}$
ρ_{luft}	Densitet for luft	$\frac{kg}{m^3}$
SET	Standard Effective Temperature / Standard effektiv temperatur	$^{\circ}C$
SET^*	New Standard Effective Temperature / Ny standard effektiv temperatur	$^{\circ}C$
$SkBF$	Blodstrøm i huden	$\frac{g}{m^2 \cdot s}$
S_{tr}	Konstant for sammentrækning af blodkar	
$t_{a,ude}$	Middel udelufttemperatur	$^{\circ}C$
$t_{op,m}$	Middel operativ indetemperatur	$^{\circ}C$

Nomenklaturliste

$t_{op,neutral}$	Neutral operativ temperatur	$^{\circ}C$
$t_{op,\text{ønsket}}$	Ønsket operativ temperatur	$^{\circ}C$
t_a	Lufttemperatur af omgivende luft	$^{\circ}C$
$t_{a,l}$	Lokal lufttemperatur	$^{\circ}C$
$t_{a,v}$	Vertikal forskel i lufttemperatur	$^{\circ}C$
t_b	Middel kropstemperatur	$^{\circ}C$
$t_{b,c}$	Temperatur for nedre grænse for evaporativ reguleringszone	$^{\circ}C$
$t_{b,h}$	Temperatur for øvre grænse for evaporativ reguleringszone	$^{\circ}C$
t_{bset}	Setpunkt for kropstemperatur	$^{\circ}C$
T_c	Kondenseringstemperatur	K
t_{cl}	Overfladetemperaturen af tøjet	$^{\circ}C$
t_{comf}	Komforttemperatur	$^{\circ}C$
t_{cr}	Kerne-temperatur	$^{\circ}C$
t_{diff}	Afvigelse fra komforttemperatur	$^{\circ}C$
T_{dm}	Døgnmiddel udetemperatur	$^{\circ}C$
t_f	Gulvtemperatur	$^{\circ}C$
t_g	Globetemperatur	$^{\circ}C$
θ	Tid	s
$ThSens$	Termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen	
TL	Den termiske belastning af kroppen	W
t_{mrt}	Middelstrålingstemperatur	$^{\circ}C$
T_o	Fordampningstemperatur	K
t_{pr}	Strålingstemperatrasymmetri	$^{\circ}C$
T_{rm}	Løbende middeludetemperatur	$^{\circ}C$
t_s	Middeltemperatur af hud	$^{\circ}C$
t_{sk}	Hudtemperatur	$^{\circ}C$
\bar{t}_s	Middeloverfladetemperaturen af huden	$^{\circ}C$
Tu	Turbulensintensitet	$\%$
v	Relativ lufthastighed	$\frac{m}{s}$
$v_{a,l}$	Lokal middellufthastighed	$\frac{m}{s}$

W	Ydre mekanisk arbejde	W
w	Skin wettedness / Fugtighed af hud	
W_{brutto}	Sum af el-effekt	kW
W_e	Personens vægt	kg
wf	Vægtfaktor / Weighting Factor	
Y	Middelvoteringen på den psyko-fysiske 7-punkts-skala	

Græske symboler

η Virkningsgrad

Akronymer

ACA Adaptive Control Algorithm / Adaptiv Kontrolalgoritme

AMV Actual Mean Vote / Aktuell middelvotering

ASHRAE American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers inc.

ATG Adaptive temperaturgrænser

BEAT Building Environmental Assessment Tool / Vurderingsværktøj for bygninger og omgivelser

BNP Bruttonationalproduktet

CFD Computational Fluid Dynamics

CIBSE The Chartered Institution of Building Services Engineers

COP Coefficient Of Performance / Virkningsgrad

CTS Central Tilstandskontrol og Styling

DISC Discomfort / Diskomfort

DR Draught Rating / Træk-vurdering

DRY Design Reference Year

*ET** new Effective Temperature / ny Effektiv Temperatur

GAF Graddøgnsafhængigt Forbrug

GD Graddøgn

GUF Graddøgnsuafhængigt Forbrug

HVAC Heating, Ventilation and Air Conditioning

IEQ Indoor Environmental Quality

IP Improvement Potential / forbedringspotentialet

LCA Life Cycle Analysis / Livscyklusanalyse

<i>Lowess</i>	Locally weighted smoothing scatterplot
<i>LR</i>	Lewis ratio
<i>MCA</i>	Monte Carlo Analysis / Monte Carlo-Analyse
<i>NV</i>	Naturligt ventileret
<i>OAT</i>	One-At-a-Time
<i>PAQ</i>	Perceived Air Quality / Opfattet luftkvalitet
<i>PE</i>	Person Equivalent / Personækvivalenter
<i>PMV</i>	Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering
<i>PMV_e</i>	PMV-model korrigeret for psykologisk adaptivitet
<i>PPD</i>	Predicted Percentage of Dissatisfied / Forventet procent utilfredse
<i>PS</i>	Percentage Satisfied / Procent tilfredse
<i>PV</i>	Præference-votering
<i>SBS</i>	Sick Building Syndrome
<i>SCATs</i>	Smart Control And Thermal comfort surveys
<i>SET*</i>	new Standard Effective Temperature / ny Standard Effektiv Temperatur
<i>TBS</i>	Thermal Building Simulation / Termisk Bygningssimulering
<i>TKV</i>	Termisk KomfortVotering
<i>TSENS</i>	Thermal Sensation / Termisk oplevelse
<i>WEP</i>	Worker Evaluation of Productivity

Konstanter

<i>BFN</i>	Neutral blodstrøm i huden	$6,3 \frac{g}{m^2 \cdot s}$
<i>c_{cr}</i>	Specifik varmekoefficient for kernen	$3500 \frac{J}{kg \cdot K}$
<i>c_{dil}</i>	Specifik varmekonstant for blodstrømning	50
<i>c_{p,bl}</i>	Specifik varmekoefficient for blod (v. konstant tryk)	$4190 \frac{J}{kg \cdot K}$
<i>c_{p,bl}</i>	Specifik varmekoefficient for huden	$3500 \frac{J}{kg \cdot K}$
ε	Emissionstal for huden	0,97
η_{ev}	Fordampningseffektivitet	0,85
<i>f_{eff}</i>	Effektiv strålingsarealfaktor for kroppen	0,71
<i>K_{trans}</i>	Effektiv ledning mellem kerne og hud	$K_{trans} = 5,28 \frac{W}{m^2 \cdot K}$
λ	Fordampningsvarme for vand ved 35°C	$2407 \frac{kJ}{kg}$

Nomenklaturliste

m	Gennemtrængelighedskoefficient for huden	$1,2708 \cdot 10^{-9} \frac{kg}{s \cdot m^2 \cdot Pa}$
ρ_{bl}	Densitet af blod	$\rho_{bl} = 12,9 \frac{kg}{l}$
σ	Stefan-Boltzmann konstant	$5,667 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C^4}$
S_{tr}	Konstant for sammentrækning af blodkar	0,5

Indeklimaet har stor indflydelse på menneskets komfort, og da vi opholder os op mod 95% af vores liv i kunstigt regulerede klimaer, er det et meget centralt og vigtigt emne [Wargocki et al., 2006]. Indeklimaparametre som temperatur, luftkvalitet, støj og lys (og muligheden for at kontrollere disse) er blandt dem, der har størst indflydelse. Et dårligt indeklima udmønter sig i den såkaldte "Indeklimasyge"¹, der indbefatter alt fra irritation af øjnene til generel træthed, hovedpine og koncentrationsbesvær [WHO, 1982]. Undersøgelser har vist korrelation mellem kvaliteten af indeklimaet og menneskets produktivitet, og yderligere studier viser at bygningers driftsomkostninger normalt er minimale i forhold til den produktivitetsforøgelse en optimering af indeklimaet medfører [Wargocki et al., 2006]. Med andre ord vil en investering i et optimeret og forbedret indeklima, foruden indeklimaaspektet, med stor sandsynlighed medføre besparelser på lang sigt, hvilket er et økonomisk incitament til såvel bygherren som ejeren og ikke mindst brugeren. Og set i et samfundsmæssigt perspektiv, medfører et dårligt indeklima, og dermed forringet produktivitet, enorme omkostninger, der foruden at have stor indflydelse på brugeren af bygningen, også influerer på hele samfundsøkonomien og i sidste ende BNP².

En optimering af indeklimaet fordrer metoder til evaluering heraf. Det være sig såvel momentane som langsigtede evalueringer i både eksisterende og nye bygninger ifm. projektering heraf. De eksisterende evalueringemetoder, f.eks. DS 474 [1993], giver ikke tilstrækkelig information om komfortniveauet samt afvigelsen herfra, og det er derfor ønskeligt med mere præcise metoder. Endvidere har mange uafhængige undersøgelser³ vist, at personer ikke blot er passive objekter, men i høj grad aktivt søger at opretholde egen termisk komfort - mennesker er adaptive medspillere. Det er således fundet, at personer der har kontrol over, og kan påvirke egen termisk situation i større udstrækning tillader højere temperaturer. Ydeevnekriterier for indeklimaet opstillet på baggrund af eksisterende teori samt resultater fra seneste undersøgelser, vil forbedre kvaliteten af indeklimavurderinger.

1.1 AFGRÆNSNING AF PROBLEM

Ved evaluering indeklimaet i forhold til termisk komfort skelnes der imellem generel og lokal diskomfort, hvor generel diskomfort vedrører en større gruppe menneskers utilfredshed med det aktuelle termiske indeklima, og den lokale diskomfort vedrører den enkelte person.

I nærværende projekt vil der hovedsageligt blive fokuseret på det generelle termiske indeklima. Dog vil områderne: lokal termisk diskomfort, luftkvalitet, energi samt produktivitet (herunder økonomi) sporadisk blive behandlet, hvor det er fundet nødvendigt.

¹SBS (Sick Building Syndrome)

²Bruttonationalproduktet

³bl.a. Humphreys [1978]; de Dear et al. [1997]; Brager et al. [2004]; Nicol og McCartney [2001] og Haldi og Robinson [2008]

1.2 PROBLEMANALYSE

I det følgende vil der, på baggrund af ovenstående, blive foretaget en problemanalyse med henblik på opstilling af problemformulering for nærværende projekt.

1.2.1 BYGNINGSREGLEMENTETS KRAV

Ved projektering af nybyggeri, skal der tages hensyn til de gældende krav til indeklimaet angivet i bygningsreglementet. I Danmark varierer kravene efter byggeriets type samt brug/anvendelse og omfatter krav vedrørende: termisk indeklima, luftkvalitet, akustisk indeklima samt lysforhold [BR08, 2008, kap. 6]. Graden af de enkelte krav varierer betydeligt og strækker sig fra direkte krav til blot vejledende værdier angivet i normer og lign. Eksempelvis angiver BR08 [2008] kun specifikke krav til ventilationens størrelse i beboelsesrum, daginstitutioner samt undervisningsrum samt køkken-, WC- og baderum i boliger i etagebyggerier, og således ingen specifik angivelse af f.eks. et maksimalt tilladeligt CO₂-niveau. I andre rum end disse, skal ventilationens størrelse blot godkendes af den pågældende kommunalbestyrelse [BR08, 2008, kap. 6.3.1], og for andre bygninger end beboelsesbygninger henvises der som vejledning til den danske norm, DS 447 [2005], der igen henviser til normen DS/CEN/CR 1752 [2001]. I forhold til luftkvalitet henvises der yderligere til Arbejdstilsynet - AT-vejledning A.1.2. [2008]. Ligeledes er kravet til temperaturniveauet ikke defineret konkret, men blot som et krav til at der: "*kan opretholdes sundhedsmæssigt tilfredsstillende temperaturer under hensyn til den menneskelige aktivitet i rummene*" [BR08, 2008, kap. 6.2]. Der henvises foruden dette som vejledning til DS 474 [1993] samt DS/EN ISO 7730 [2006]. En skematisk visning af de ovenfor nævnte krav angivet i BR08 [2008] forefindes i appendiks A.

Med hensyn til defineret af et tilfredsstillende termisk indeklima, har det været praksis blandt rådgivende ingeniører, at benytte grænserne angivet i [DS 474, 1993], der foreslår en maksimal operativ temperatur (i arbejdstiden) på 26 og 27°C i hhv. 100 og 25 timer om året. Problemet med disse grænser er bl.a., at de ikke tager størrelsen af temperaturoverskridelsen i betragtning. Således vil en periode med temperaturer på f.eks. over 30°C blive vægtet identisk med en periode, hvor temperaturerne kun når f.eks. 28°C. Dette problem ses ved brug af grænsekriteriet i bygninger med hhv. mindre og større varmeakkumuleringssevne. Middelttemperaturen i perioder med timer over hhv. 26 og 27°C vil være højere i lette bygninger i forhold til tunge bygninger, hvor temperaturudsvingene er mindre. Grænserne er derfor misvisende og giver ikke et korrekt billede af det aktuelle termiske indeklima. I Holland har det været forsøgt at tage hensyn til dette. Her har man længe benyttet grænser i tråd med dem angivet i DS 474 [1993] blot med hhv. 25 og 28°C som grænser, der maksimalt må overskrides hhv. 100 og 10-20 timer om året, hvor der som følge af ovenstående problemstilling er undersøgt en vægtning af timer over de nævnte grænser. Vægtningen foretages ligefrem-proportionalt med PPD⁴, således at en periode med 20%’s utilfredse (PPD) vægtes dobbelt ift. en periode med 10%’s utilfredse [van der Linden et al., 2002].

DS/EN ISO 7730 [2006] præsenterer metoder til forudsigelse af den generelle termiske oplevelse samt estimering af et forventet antal utilfredse på grund af det termiske indeklima i moderate termiske omgivelser. PMV-⁵ samt PPD-indekset giver mulighed for vurdering af menneskets termiske komfort ud fra indeklimaparametre, der påvirker denne samt den lokale termiske komfort. De to empiriske indekser er formuleret på baggrund af menneskets termiske balance mv. og beregnes

⁴Predicted Percentage of Dissatisfied / forventet procentvis utilfredse beregnet efter DS/EN ISO 7730 [2006]

⁵Predicted Mean Vote / forventet middelvotering [DS/EN ISO 7730, 2006]. Termisk oplevelse angivet på 7-trins skala (kold, kølig, let kølig, neutral, let varm, varm, hed)

ud fra parametre som: beklædning, aktivitetsniveau, lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luft-hastighed samt relativ luftfugtighed der alle har stor indflydelse på menneskets varmebalance og termiske komfort [Fanger, 1972]. Ydermere præsenterer DS/EN ISO 7730 [2006] metoder til beregning af antal utilfredse som følge af træk, vertikal temperaturforskel, varme eller kolde gulve samt strålingsasymmetri. Metoderne præsenteret i DS/EN ISO 7730 [2006] evaluerer det aktuelle indeklima i en given stationær situation, hvor imod det ovennævnte grænse-kriterie benyttes ved evaluering af det termiske indeklima set over et helt år. DS/EN ISO 7730 [2006] angiver dog fem forskellige metoder til langsigtet evaluering af de termiske omgivelser. Disse metoder er alle baseret på krav til enten den operative temperatur eller PMV-/ PPD-indekset. Metoderne er af varierende detaljeringsgrad, og strækker sig fra beregning af simple procentvise overskridelser over en given grænse, til mere detaljerede vægtfaktorer baseret på den numeriske overskridelse af det fastsatte acceptniveau.

1.2.2 KOMFORT- & YDEEVNEINDIKATORER

Da et givet temperaturniveau opfattes forskelligt i afhængighed af beklædning og aktivitetsniveau, er temperaturen som indikator i selv ikke fyldestgørende. Brohus et al. [2006] opstiller en ydeevneindikator baseret på den tidsmæssige variation samt graden af diskomfort (PPD, PD^6 , DR^7 etc.). Til vurdering og evaluering af komfortniveauet er disse langt bedre end en temperaturbaseret indikator, da de beskriver det momentane komfortniveau ud fra lokale påvirkninger som f.eks. lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighed, turbulensintensitet, beklædningsisolans, aktivitetsniveau etc. Den opstillede metode til langsigtet evaluering af en bygnings indeklimaydeevne kan ikke kun bruges til evaluering af termisk indeklima, idet metoden er åben for egne valg af komfortindikatorer, hvilket er en klar fordel. Disse er således ikke begrænset til termiske komfortindikatorer såsom PPD, DR etc., men indikatorer for f.eks. atmosfærisk eller akustisk indeklima mv. kan også benyttes. Ydeevneindikatorerne er givet ved følgende [Brohus et al., 2006]:

$$PI_{Kum} = \int_{\tau_{start}}^{\tau_{slut}} CI(\tau) d\tau \approx \sum_{n_{start}}^{n_{slut}} CI(\tau) \Delta\tau \quad (1.1)$$

$$PI_{Kum,OA} = \int_{\tau_{start}}^{\tau_{slut}} z(\tau) d\tau \approx \sum_{n_{start}}^{n_{slut}} z(\tau) \Delta\tau \quad (1.2)$$

$$z(\tau) = \begin{cases} CI(\tau) - A & \text{hvis } CI(\tau) > A \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (1.3)$$

hvor

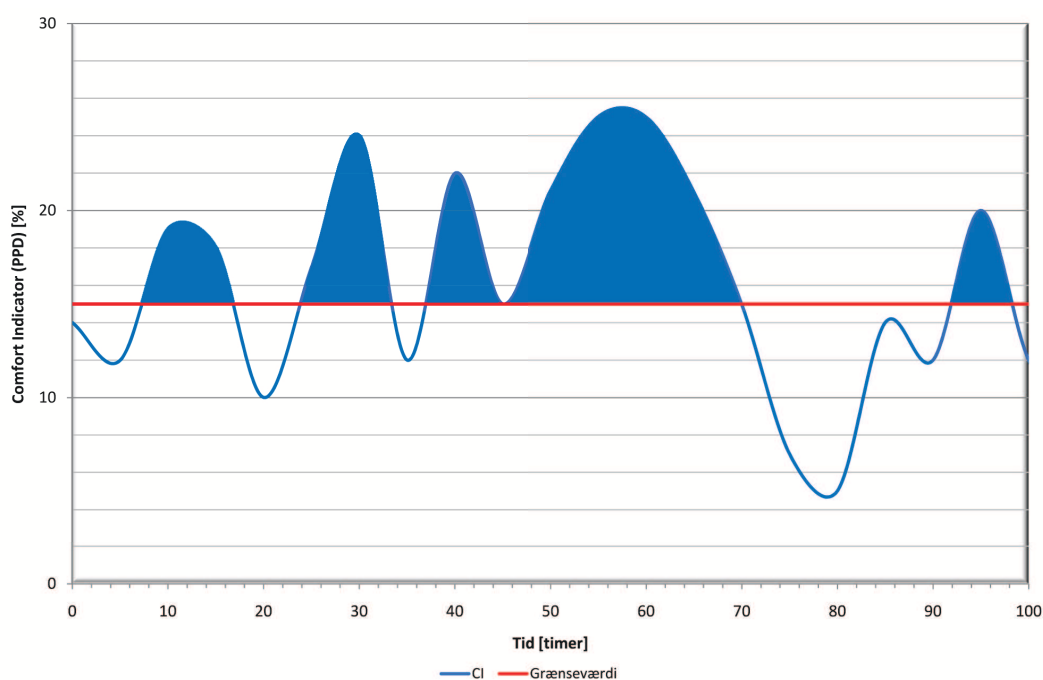
⁶PD = Percentage of Dissatisfied / procent utilfredse som følge af strålingsasymmetri beregnet efter DS/EN ISO 7730 [2006]

⁷DR = Draught Rating / procent utilfredse som følge af træk beregnet efter DS/EN ISO 7730 [2006]

1.2 Problemanalyse

PI_{Kum}	=	Performance Indicator, Kumuleret	[%]
$PI_{Kum,OA}$	=	Performance Indicator, Kumuleret, over acceptniveau A	[%-timer]
CI	=	Komfortindikator (f.eks. PPD, PD, DR)	[%]
A	=	Acceptniveau	[CI]
τ	=	Tid	[timer]
$\Delta\tau$	=	Tidsinterval (som regel 1 time)	[timer]
τ_{start}	=	Starttid for betragtet periode	[timer]
τ_{slut}	=	Sluttid for betragtet periode	[timer]
n_{start}	=	Start-tidsskridt for betragtet periode	[timer]
n_{slut}	=	Slut-tidsskridt for betragtet periode	[timer]

De to indikatorer udtrykt ved formel (1.1) og (1.2), beskriver således den termiske diskomfort (såfremt der fokuseres på termisk indeklima) i den aktuelle periode samt den kumulerede termiske diskomfort i perioder hvor komfortindikatoren CI overskrider acceptniveauet A . Et eksempel er illustreret på følgende figur 1.1.



Figur 1.1: Eksempel: Skitsering af Performance Indicators fra formlerne (1.1) og (1.2). Det farvede område angiver perioder hvor komfortindikatoren CI overskrider acceptniveauet A - i dette tilfælde sat til $PPD \leq 15\%$.

Da de ovenstående ydeevneindikatorer tillader brugen af f.eks. PPD-indekset opstillet ud fra menneskets termiske oplevelse, giver de et mere reelt billede af det oplevede termiske indeklima i forhold til kravene.

1.2.3 ADAPTIVE MODELLER

Resultater af beregninger foretaget med PMV-modellen viser god overensstemmelse med feltstudier i fuldt luftkonditionerede bygninger (i det følgende benævnt HVAC-bygninger⁸) i kolde, tempererede samt varme klimaer både i vinter og sommerperioder. Senere undersøgelser⁹ har derimod vist at PMV-modellen har en tendens til overestimering af menneskets termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger placeret i varme klimaer, hvor modellen forudsiger en varmere termisk oplevelse end reelt opfattet.

Der er generel enighed om, at personer ikke bør og kan opfattes som værende passive objekter, men at de i høj grad aktivt påvirker deres egen termiske situation i et forsøg på at opretholde egen termisk komfort. Denne aktive indvirkning benævnes under ét - adaptivitet - og kan kategorisk opdeles i [de Dear et al., 1997]:

- Adfærdsmæssig adaptivitet
- Fysiologisk adaptivitet
- Psykologisk adaptivitet

Menneskets adfærdsmæssige adaptive opførsel kan beskrives som handlinger hvormed personer selv influerer på opretholdelse af termisk komfort f.eks. gennem påvirkning af omgivelserne (åbning af vinduer, styring af termostater osv.) eller ændringer i beklædning osv. Den fysiologiske adaptivitet indbefatter kroppens naturlige tilpasning til de varierende termiske omgivelser - dvs. akklimatisering. Psykologisk adaptivitet ligger i forventningen til det termiske indeklima. Dels ud fra det aktuelle udeklima, men i høj grad også ud fra omgivelserne i bygningen. Personer har en højere forventning til indeklimaet i en fuldt luftkonditioneret bygning hvorimod personer i en naturligt ventileret bygning, hvor de har mulighed for selv at påvirke indeklimaet f.eks. gennem åbning af vinduer, generelt accepterer højere temperaturer [de Dear et al., 1997]. Personer med stigende antal kontrolmuligheder over deres egen termiske situation accepterer et varmere termisk miljø [Haldi og Robinson, 2008].

Som følge heraf er der gennem de senere år introduceret en række adaptive modeller, der alle opererer med menneskets termiske tilpasning til det aktuelle indeklima. Hovedparten af den ovenfor nævnte adaptive modeller er udtrykt ved en simpel regressionsligning for den operative indetemperatur som funktion af udelufttemperaturen - enten i form af en simpel middeldelufttemperatur eller andre mere detaljerede vægtninger af udelufttemperaturen¹⁰. En svaghed ved disse er således, at de ikke tager beklædning samt aktivitetsniveau i betragtning og ej heller lufttemperatur, middelstrålings-temperatur, lufthastighed eller relativ luftfugtighed, hvilke har stor indflydelse på den termiske komfort [Fanger og Toftum, 2002]. Modellerne er baseret på indeklimamålinger samt spørgeskemaundersøgelser i et varierende antal bygninger, og selv om de med god overensstemmelse forudsiger den termiske oplevelse i eksisterende bygninger nu til dags, rejser Fanger og Toftum [2002] spørgsmålet, hvorvidt dette også vil være tilfældet i nye moderne bygninger og i fremtiden. Foruden de adaptive modeller for termisk komfort, er det ved undersøgelser vist, at personer løbende justerer beklædningsisolansen i afhængighed af det aktuelle indeklima samt de foregående termiske oplevelser [de Dear et al., 1997; de Dear og Morgan, 2003; Haldi og Robinson, 2008]. Denne faktor har stor indflydelse på den termiske komfort, og modellerne for den dynamiske variation af beklædningsisolansen kan således betyde en mulig reduktion af kølebehovet.

⁸Heating Ventilation and Air Conditioning

⁹bl.a.: Humphreys [1978]; de Dear et al. [1997]; Nicol og McCartney [2001] og Fanger og Toftum [2002]

¹⁰F.eks. den løbende middeldelufttemperatur hvor udelufttemperaturen de foregående dage medtages i beregningen.

Da modellerne udelukkende er en funktion af udetemperaturen, vil en ændring i f.eks. beklædningsisolansen ikke være mulig at korrigere for. I artiklen [Fanger og Toftum, 2002] diskuteres den/de mulige fejlkilde/-er, der ligger til grund for PMV-modellens overestimering af den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer. Selvom personers mulighed for at påvirke indeklimaet gennem åbning af vinduer etc. bevirker en højere komforttemperatur, er dette kun gældende for de personer, der sidder tæt på vinduet. Personer midt i et stort åbent kontormiljø vil ikke have denne mulighed, hvorfor den psykologiske adaptivitet ikke er udslagsgivende her. Den fysiologiske akklimatisering udgør således ikke en nævneværdig rolle, men det gør derimod hhv. "forventningen" til indeklimaet samt det faktum at kroppen autonomt justerer metabolismen i afhængighed af den termiske oplevelse. Som udvidelse til den oprindelige PMV-model, indføres dels en justering af aktivitetsniveauet som funktion af PMV samt en "forventningsfaktor", e , i intervallet 0-1, hvilken skal multipliceres den konventionelt beregnede PMV. Denne forventningsfaktor korrigerer således PMV-værdien med hensyntagen til personers psykologiske adaptivitet. Feltundersøgelser sammenlignet med beregninger efter den nye PMV_e-model i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer, viser god overensstemmelse mellem målinger og beregninger af termiske oplevelse.

1.2.4 INDEKLIMA, ENERGIFORBRUG OG PRODUKTIVITET

En stor del af en bygnings energiforbrug går til indeklimaet. Det være sig i form af opvarmning, køling, ventilation, belysning mv. I det ovenstående studier har vist, at personer adaptivt tilpasser sig de termiske omgivelser samt accepterer højere temperaturer, såfremt de har mulighed for at påvirke egen termisk situation gennem åbning af vinduer/dør, indstilling af termostater mv., kan der være store besparelser at hente ved f.eks. en slækning af kølebehovet. Endvidere har studier¹¹ vist, at produktiviteten er direkte påvirket af det aktuelle indeklima, hvorfor et godt indeklima således er nødvendigt for at optimere denne. Umiddelbare resultater fra undersøgelserne har vist, at tilbagebetalingstiderne ved investering i et godt indeklima er meget korte (1-2år)¹², hvilket gør dette emne spændende at forfølge. Det er således en balancegang mellem ønsket om et lavt energiforbrug ved f.eks. slækning af indeklimakravene og sikring af høj produktivitet ved optimering af indeklimaet. I Danmark udgør bygningers energiforbrug ca. 40% af det samlede energiforbrug for hele landet, hvorfor der er store besparelser at hente her. I den nyligt vedtagne energiaftale¹³ i Danmark, skal der: "*For nye bygninger gennemføres stramning med mindst 25 pct. i 2010, mindst 25 pct. i 2015 og mindst 25 pct. i 2020, i alt en reduktion med mindst 75 pct. senest i 2020.*" [Energistyrelsen, 2008, s. 2]. Der er således stort politisk fokus på bygningers energiforbrug, og det vil derfor være interessant om en udnyttelse af den menneskelige adaptivitet ved styring af det termiske indeklima, vil medføre væsentlige energibesparelser.

1.2.5 STATUS

Som beskrevet og diskuteret ovenfor, er bidragene (og udfordringerne) til evalueringen af indeklimaet mange. Seneste publicerede DS/EN standard om designkriterier for indeklimaet og energiforbruget i bygninger, DS/EN 15251 [2007], præsenterer vejledninger i forbindelse med projektering og vurdering af indeklima, der fokuserer på termisk og atmosfærisk indeklima, luftfugtighed, belysning samt støj. Med hensyn til termisk indeklima skelnes der mellem mekanisk opvarmede og/eller kølede byg-

¹¹[Wargocki et al., 2006]

¹²[Wargocki et al., 2006]

¹³[Energistyrelsen, 2008]

ninger og bygninger uden mekanisk køling, og bygger direkte på resultaterne fra Nicol og McCartney [2001]. Foruden generelle krav til de nævnte indeklimaparametre, angiver normen vurderingsmetoder i forbindelse med langsigtede evalueringer af det termiske indeklima [DS/EN ISO 7730, 2006; DS/EN 15251, 2007]. Der præsenteres tre metoder, der kan benyttes på baggrund af computersimuleringer eller direkte indeklimamålinger. Foruden en simpel metode, hvor antallet af timer for hvilke PMV-værdien eller den operative indetemperatur overskrider et givet niveau angives procentvis ift. arbejdstiden, præsenteres to forskellige metoder som ydeevneindikator for det termiske miljø, der enten vægter enkelte timer hvori temperaturen overskrides med størrelsen af denne, eller vægter timer hvor PPD-niveauet overskrider grænsen med en procent-faktor.

Mht. indeluftkvaliteten opstiller normen endvidere vejledende krav for hhv. CO₂, bioeffluenter samt afgangning af byggematerialer. I f.eks. det danske bygningsreglement, BR08 [2008], er de vejledende krav til det atmosfæriske indeklima bl.a. baseret på retningslinjer fra Arbejdstilsynets vejledning [Arbejdstilsynet - AT-vejledning A.1.2., 2008]. Her angives det, at CO₂-niveauet ikke bør være højere end 1000 ppm med en samtidig bemærkning om, at såfremt CO₂-niveauet overstiger 2000 ppm, er luftskiftet utilstrækkeligt. En anden mulighed er den vejledende henvisning til DS 447 [2005], der igen henviser til DS/CEN/CR 1752 [2001] hvilken angiver kriterier for det atmosfæriske indeklima i form af såvel CO₂ som bioeffluenter samt afgangning af byggematerialer opdelt i klasserne A-C. Førhen har det atmosfæriske indeklima generelt været mere eller mindre overset, og fokus har som regel været på det termiske miljø. Årsagen hertil er bl.a., at hovedparten af indeklimaforskningen er foretaget i retning af det termiske indeklima og de parametre, der har indflydelse herpå, men i de senere år har flere og flere forskere rettet interessen mod dette vigtige emne.

Som beskrevet gennem de ovenstående afsnit, stiller gældende normer samt diverse studier og forsøg forskellige muligheder for evaluering af indeklima til rådighed. Metoderne adskiller sig fra hinanden på væsentlige punkter, men er samtidig koncentreret om anerkendelsen af menneskets adaptive opførsel og indvirkningen herfra på den termiske komfort. Senest har ovennævnte standard DS/EN 15251 [2007] forsøgt at samle metoder til vurdering af termisk, atmosfærisk og akustisk indeklima samt belysning baseret på litteraturstudier.

I det ovenstående er der ift. indeklimaet udelukkende fokuseret på termisk og atmosfærisk indeklima med henvisning til afgrænsningen i afsnit 1.1. Det gode indeklima er dog påvirket af langt flere parametre såsom: belysning, akustik, sikkerhed, arkitektur mv. Det koordinerede projekt (foreligger pt. kun som ansøgning) INDCRIT07 [2007] har til formål at skabe et fælles sæt "Indoor Environmental Performance Criteria" til brug ved vurdering og evaluering af bygningers ydeevne i forhold til:

- Termisk indeklima
- Atmosfærisk indeklima
- Akustik
- Belysning
- Sikkerhed

Der skal således findes et sæt ydeevneindikatorer for evaluering af indeklimaet ift. de ovennævnte punkter. Med udgangspunkt i dette samt ovenstående underafsnit, præsenteres problemformuleringen for nærværende projekt i det følgende afsnit.

1.3 PROBLEMFOMULERING

Ovenstående problemanalyse ligger til baggrund for det nærværende projekts problemformulering, der er opstillet punktvis i det følgende:

Med baggrund i et grundigt litteraturstudie søges følgende spørgsmål besvaret:

1. *Hvilke metoder til evaluering af termisk indeklima er der til rådighed?*
2. *Hvilke indikatorer for den termiske komfort er der til rådighed, og hvordan adskiller de sig fra hinanden?*
3. *Hvilken indflydelse har den menneskelige adaptivitet på den termiske oplevelse?*
4. *Hvilke adaptive modeller er der opstillet, og hvad er kvaliteten af disse?*
5. *Hvilken indvirkning har indeklimaet på den menneskelige præstationsevne?*
6. *Kan der opstilles en ydeevneindikator til evaluering af det termiske indeklima i såvel nyt som eksisterende byggeri med brug adaptive modeller sammen med modeller for evaluering af præstationsevnen?*

Del I

Litteraturstudie

Evaluering af indeklima - krav og vejledninger

2

I nærværende afsnit præsenteres og diskuteres metoder til vurdering af termisk og atmosfærisk indeklima i bygninger (kontor, boliger, skoler etc.). Som udgangspunkt gennemgås metoderne og vejledningerne i standarderne DS 474 [1993]; DS/EN ISO 7730 [2006] samt DS/EN 15251 [2007]. Endvidere diskuteres metoderne til langsigtet evaluering af indeklimaet (oftest en karakteristisk periode på et år), da der er et ønske om at kunne kategorisere og klassificere bygninger i tråd med et energi certifikatet, til en samlet vurdering af indeklima og energiforbrug.

2.1 INDLEDNING

Energiforbruget for bygninger afhænger betydeligt af de opstillede kriterier for indeklimaet (temperatur, ventilation, lys, akustik etc.), som ligeledes påvirker helbredet, produktiviteten og menneskers komfort. Seneste studier har vist, at et godt indeklima kan forbedre den mentale præstationsevne samt reducere fraværet blandt medarbejdere og skolebørn [Wyon, 2004; Wargocki et al., 2006; Seppänen et al., 2006a]. Desuden vil personer der føler diskomfort højst sandsynligt skride til handling for at skabe et komfortabelt indeklima, hvilket påvirker energiforbruget i den pågældende bygning. Det giver derfor ingen mening at lave en energideklaration uden en deklaration der er relateret til indeklimaet. Der er derfor brug for metoder til specificering af samtlige kriterier for indeklimaet indenfor design, energiberegninger, præstationsevne vurdering og oplysninger til drift af bygningen. [Olesen, 2007; DS/EN 15251, 2007]

Der eksisterer i dag nationale (DS 447 [2005], DS 474 [1993]) og internationale (DS/EN ISO 7730 [2006], DS/CEN/CR 1752 [2001]) standarder som specificerer kriterier for termisk komfort og indeluftkvalitet. I disse standarder er der angivet forskellige typer og kategorier af kriterier for hhv. opvarmningssæsonen (vinter) og kølesæsonen (sommer) for en bygning. De opstillede kriterier er dog hovedsageligt til brug ved dimensionering af bygningen (opvarmnings-, køle- og ventilationssystemer), og de kan ikke direkte bruges til energiberegninger og langsigtet (årlig) evaluering af det termiske miljø. I de nyeste studier (bl.a. de Dear et al. [1997]; Fanger og Toftum [2002]) er det desuden fundet, at menneskers forventning til indeklimaet er forskellige for hhv. bygninger med mekanisk køling og uden, hvilket ikke er omtalt i detaljer i de ovenfor nævnte standarder. [DS/EN 15251, 2007]

I det følgende præsenteres og diskuteres metoder til såvel momentan som langsigtet evaluering af det termiske og atmosfæriske indeklima, med henblik på brug af erfaringer og metoder i opstilling af nye koncepter for evaluering og klassificering af indeklima.

2.2 DS/EN ISO 7730

Til evaluering af det termiske indeklima kan DS/EN ISO 7730 [2006], der er udviklet sideløbende med ANSI/ASHRAE 55 [2004], benyttes. Normen angiver metoder til estimering af personers komfort i et givet miljø på baggrund af PMV- og PPD-indekset for det globale termiske indeklima og DR- og PD-indeksene for det lokale termiske indeklima [Fanger, 1972; Fanger et al., 1988; Griefahn et al., 2001; Fanger og Christensen, 1986]. I det følgende vil disse metoder kort blive præsenteret. For mere detaljeret information vedr. de termiske indekser se appendiks B.

2.2.1 EVALUERING AF DET TERMISKE INDEKLIMA I STATIONÆRE TILSTANDE

Som nævnt er metoderne i DS/EN ISO 7730 [2006] baseret på de termiske indekser PMV- og PPD, der i en given stationær tilstand angiver dels den forventede middelvotering på den psyko-fysiske ASHRAE-skala samt det forventede antal utilfredse ud fra de personlige parametre: aktivitetsniveau og beklædningsisolans samt de fire indeklimaparametre: lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighed og luftfugtighed.

Ydermere angiver DS/EN ISO 7730 [2006] metoder til evaluering af lokal diskomfort hidrørende fra træk, strålingstemperatursymmetri samt vertikal temperaturgradient.

Til evaluering af et givet termisk miljø, såvel globalt som lokalt, angiver DS/EN ISO 7730 [2006] tre klasser indenfor hvilke bygninger kan placeres. Tabel 2.1 angiver klassificeringen for det globale (PMV og PPD) og lokale (DR og PD) termiske miljø:

Tabel 2.1: Klassificering af det lokale termiske indeklima ved brug af PMV- og PPD-indekset (efter [DS/EN ISO 7730, 2006, Appendiks A, s. 13])

	PPD [%]	PMV	DR [%]		PD [%]	
Kategori				Vertikal temperaturgradient	Varmt eller koldt gulv	Strålingstemperatur- asymmetri
A	< 6	-0,2 < PMV < +0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 < PMV < +0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 < PMV < +0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

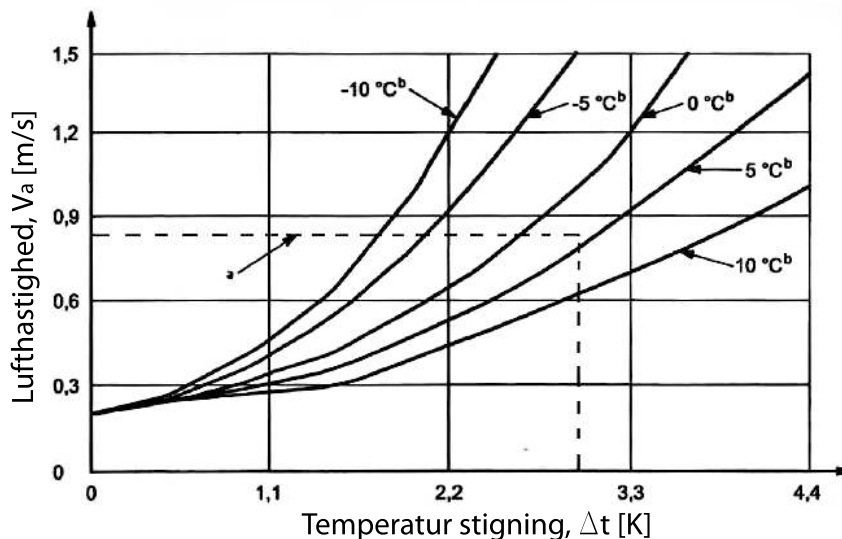
Værdierne i ovenstående tabel 2.1 kan således benyttes som designkriterier for nye og eksisterende bygninger ved evaluering af det termiske indeklima. Det bemærkes, at ifølge DS/EN ISO 7730 [2006] bør antallet af utilfredse med det globale termiske indeklima ikke overstige 15%. Som det senere vises (afsnit 2.3), angiver DS/EN 15251 [2007] yderligere en klasse: "Klasse 4 - uden for kategori", hvilken kan benyttes for eksisterende bygninger, der har sværere ved at imødekomme de skærpede krav.

2.2.2 ØGET LUFTHASTIGHED

Det er desuden muligt under sommerforhold (rumtemperaturer over 25 °C) at udnytte en højere lufthastighed til at kompensere for de højere rumtemperaturer. Lufthastigheden i et rum har stor ind-

flydelse på det konvektive varmetab mellem en person og omgivelserne, hvilket ligeledes influerer på den generelle termiske komfort for en person samt den lokale termiske diskomfort som følge af træk. Der er ingen nødvendig minimumslufthastighed for termisk komfort, hvorimod en øget lufthastighed kan bruges til at nedsætte personernes oplevelse af det termiske miljø forårsaget af den højere temperatur. [DS/EN ISO 7730, 2006, s. 45]

Hvor der er ventilatorer (som kan styres direkte af brugerne) eller andre midler til justering af brugernes personlige lufthastighed (f.eks. Personlige ventilationssystemer, eller åbning af vinduer) kan de øvre grænser i figur 2.2 forøges [DS/EN 15251, 2007]. Den præcise temperaturkorrektion afhænger af den forøgede lufthastighed som ventilatoren eller den naturlige ventilation yder og kan findes af nedenstående graf. Kombinationen mellem lufthastighed og temperatur, angivet ved kurverne i figur 2.1 vil resultere i det samme totale varmetab fra kroppen. Fordelene der kan opnås ved at forøge lufthastigheden afhænger af parametrene beklædningsisolans, aktivitetsniveau og forskellen mellem overfladetemperaturen på tøjet/huden og rumtemperaturen. Figur 2.1 viser lufthastigheden der er krævet for en typisk sommerbeklædning (0,5 clo) ved siddende aktivitet (1,2 met), som svarer til en sommerkomfortsituation. [DS/EN ISO 7730, 2006]



Figur 2.1: Krævet lufthastighed til forøgelse af øvre temperaturgrænser (sommer forhold) i figur 2.2 [DS/EN ISO 7730, 2006, s. 45]. Linjerne viser hvordan lufthastigheden øges med den nødvendige mængde for at opretholde samme totale varmetab fra huden. Brugernes accept af højere lufthastigheder kræver at de selv har kontrol over udstyret der skaber den højere lokale lufthastighed. Figuren gælder både for bygninger med og uden mekanisk køling.

a = Grænse for let, primært siddende, aktivitet.

$b = (\overline{t_{mrt}} - t_a) [^\circ\text{C}]$ (t_a lufttemperatur; $\overline{t_{mrt}}$ middelstrålingstemperatur)

Grafen kan som sagt bruges for temperaturer over $25\text{ }^\circ\text{C}$, hvor både middelstrålingstemperaturen ($\overline{t_{mrt}}$) og lufttemperaturen (t_a) stiger hver for sig. Når middelstrålingstemperaturen er lav og lufttemperaturen er høj, er lufthastigheden mindre effektiv ved stigende varmetab fra kroppen (temperaturforskelle). Modsat er lufthastighedens indflydelse mere effektiv ved stigende varmetab fra kroppen, dvs. når middelstrålingstemperaturen er høj og lufttemperaturen lav. [DS/EN ISO 7730, 2006]

Metoden gælder ligeledes ved høje temperaturer i mekanisk kontrollerede bygninger, hvis det er muligt for brugerne at styre lufthastigheden. [DS/EN 15251, 2007]

Figuren er bygget på teoretiske beregninger, men er i et nyere studie, sponsoret af ASHRAE, blevet bekræftet ved forsøg med mennesker. Studiet undersøgte også om mennesker oplevede den sammen accept af indeklimaet ved højere temperatur/hastighed kombinationer, som ved lavere temperatur/hastighed kombinationer. Studiet bekræftede diagrammets sammenhæng ved eksperimentelle forsøg når brugerne have individuel kontrol over udstyret (loft ventilatorer, åbning af vinduer). Det er essentielt for brugernes accept at have personlig kontrol over den forøget lufthastighed.

2.2.3 DYNAMISKE TERMISKE OMGIVELSER

Tabel 2.1 kan benyttes for stationære tilstande i moderate termiske omgivelser, men i praksis vil indeklimaet i bygninger variere dynamisk i form af:

- Temperaturcyklusser (variabel temperatur med en given amplitude og frekvens forårsaget af den mekaniske temperaturregulering)
- Temperatursvingninger (generel tidslig variation af temperatur i et rum)
- Temperaturvariationer (hurtigt virkende ændringer i temperaturen i et rum)

Temperaturcyklusser forekommer som følge af temperaturreguleringen i et rum - f.eks. på grund af tidskonstanter i ventilationsanlæg, proportionalbånd i radiatortermostater mv. DS/EN ISO 7730 [2006] angiver, at såfremt temperaturudsvinget fra maksimum til minimum er mindre end 1 K, vil dette ikke have væsentlig effekt på den termiske komfort og metoderne for stationære tilstande kan uden videre benyttes.

Hastigheden hvormed temperaturen ændres har også indvirkning på den termiske komfort. Som følge heraf angiver DS/EN ISO 7730 [2006], at metoderne for stationære tilstande kan benyttes, hvis temperatursvingningerne ikke overstiger $2,0 \frac{K}{time}$

Øjeblikkelige ændringer i den operative temperatur har indflydelse på den termiske komfort. Et spring i den operative temperatur føles momentant. Der er imidlertid forskel på, om dette spring er mod større eller mindre temperatur, i forbindelse med termisk komfort. Ved en trinvis stigning i den operative temperatur, vil den nye stationære termiske oplevelse blive følt øjeblikkeligt, hvorfor de termiske indekser PMV og PPD uden videre kan benyttes. Et trinvist spring mod lavere temperaturer vil forårsage at den termiske oplevelse falder til et niveau lavere end estimeret med PMV-indekset. Efter ca. 30 min vil den termisk oplevelse stige til et stationært niveau (under stationære forhold), hvorefter PMV- og PPD-indekset kan benyttes. Ved trinvis fald i den operative temperatur, vil PMV-modellen således forudsige for høje værdier de første 30 min. [DS/EN ISO 7730, 2006]

Ved en eventuel implementering af PMV- og PPD-indekset i TBS-programmer¹ (f.eks. BSim), bør der knyttes en kommentar til ovenstående. Da simuleringer i TBS-programmer normalt er baseret på timeværdier, vil det umiddelbart være svært at vurdere hvorvidt et temperaturspring er sket momentant eller jævnt fordelt. Sandsynligheden for temperaturspring er større i lette bygninger frem for tunge bygninger, hvor varmeakkumuleringsevnen udjævner temperatursvingningerne. Endvidere vil det være svært, såfremt springet er sket øjeblikkeligt, at vurdere om dette er sket umiddelbart inden en given simuleringstime, således den termiske stationære tilstand omtalt ovenfor ikke er indtrådt.

¹Thermal Building Simulation / Termisk Bygningssimulering

2.2.4 LANGSIGTET EVALUERING AF TERMISK INDEKLIMA

Ved langsigtet evaluering af det termiske indeklima, angiver DS/EN ISO 7730 [2006] fem forskellige metoder hertil baseret på de termiske indekser. Disse bliver præsenteret senere i afsnit 2.5 sammen med lignende metoder fra andre normer og publikationer og vil derfor ikke blive gennemgået her.

2.2.5 ADAPTIVITET

I forbindelse med menneskers adaptive adfærd angiver DS/EN ISO 7730 [2006] blot, at der på baggrund af undersøgelser er vist, at der i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer samt ved muligheder for påvirkning af indeklimaet gennem åbning af vinduer mv. accepteres højere temperaturer end PMV-indekset forudsiger [de Dear et al., 1997]. Der angives således ikke, i modsætning til DS/EN 15251 [2007] eller ANSI/ASHRAE 55 [2004], metoder til estimering af denne højere accept.

2.2.6 DYNAMISK BEKLÆDNINGISISOLANS

Senere i afsnit 3.5 præsenteres og diskuteres PMV-modellens validitet, hvor bl.a. beklædningsisolansen og dennes indflydelse bliver behandlet. Opsummeret vil beklædningsisolansen i praksis variere - ikke kun fra person til person, men også som følge af krops- og luftbevægelser (pumpeeffekten) omkring den beklædte krop, hvilket påvirker det omgivende luftlag medførende en reducere af beklædningsisolansen og dermed et øget varmetab.

DS/EN ISO 7730 [2006] angiver en metode til estimering af dynamisk beklædningsisolans ud fra hhv. ganghastigheden og luft hastigheden omkring personen. Den resulterende dynamiske beklædningsisolans beregnes efter følgende formel (2.1):

$$I_{cl,r} = I_{T,r} - \frac{I_{a,r}}{f_{cl}} \quad (2.1)$$

hvor

$I_{cl,r}$	=	Resulterende dynamiske beklædningsisolans	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
$I_{T,r}$	=	Resulterende totale beklædningsisolans beregnet	
	=	efter formel (2.2a)	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
$I_{a,r}$	=	Resulterende isolans for det omkringliggende grænseluftlag beregnet efter formel (2.2b)	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
f_{cl}	=	Forhold mellem overfladeareal af beklædt krop og nøgen krop (se evt. appendiks B.1.1)	[-]

For beklædte personer i normal eller let beklædning ($0,6clo < I_{cl} < 1,4clo$) angives følgende formel (2.2a) for beregning af dynamisk beklædningsisolans samt formel (2.2b) for beregning af den resulterende isolans for det omkringliggende grænseluftlag for nøgne personer ($I_{cl} = 0clo$):

$$\begin{aligned}
 I_{T,r} &= I_T \cdot Corr, I_T \\
 &= I_T \cdot e^{-0,281 \cdot (v_{ar}-0,15)+0,44 \cdot (v_{ar}-0,15)^2-0,492 \cdot v_w+0,176 \cdot v_w^2}
 \end{aligned} \tag{2.2a}$$

$$\begin{aligned}
 I_{T,a} &= I_a \cdot Corr, I_a \\
 &= I_a \cdot e^{-0,533 \cdot (v_{ar}-0,15)+0,069 \cdot (v_{ar}-0,15)^2-0,462 \cdot v_w+0,201 \cdot v_w^2}
 \end{aligned} \tag{2.2b}$$

hvor

$I_{T,r}$	=	Resulterende totale beklædningsisolans	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
$I_{a,r}$	=	Resulterende isolans for det omkringliggende grænseluftlag	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
I_T	=	Den totale beklædningsisolans	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
I_a	=	Isolans for det omkringliggende grænseluftlag	$[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$ eller [clo]
$Corr, I_T$	=	Korrektionsfaktor for den totale beklædningsisolans	[-]
$Corr, I_a$	=	Korrektionsfaktor for I_a	[-]
v_{ar}	=	Relativ lufthastighed omkring personen	$[\frac{m}{s}]$
v_w	=	Ganghastigheden (beregnet ved, $v_w = 0,0052 \cdot (M - 58)$ for $v_w \leq 0,7 \frac{m}{s}$)	$[\frac{m}{s}]$
M	=	Aktivitetsniveauet	$[\frac{W}{m^2}]$

I tilfælde hvor beklædningsisolansen er lav ($0,6clo \leq I_{cl} \leq 0,6clo$) kan en interpolation mellem ligning (2.2a) og (2.2b) benyttes:

$$\frac{I_{T,r}}{I_T} = \frac{(0,6 - I_{cl}) \cdot I_{T,a} + I_{cl} \cdot I_{T,r}}{0,6} \tag{2.3}$$

Ovenstående ligninger (2.1) samt (2.2) benyttes som beskrevet til estimering af den dynamiske beklædningsisolans. Der er endvidere udviklet yderligere metoder til estimering af beklædningsisolansen, hvilke præsenteres og diskuteres i detaljer i afsnit 4.2.

2.3 DS/EN 15251

I den foreliggende standard, [DS/EN 15251, 2007], specificeres hvordan design kriterier kan opstilles og bruges til dimensionering af systemer. Ydermere præciseres det hvordan der opstilles og defineres de vigtigste indgangsparametre til energiberegninger og langsigtede evalueringer af indeklimaet (metoderne til langsigtede evaluering diskuteres senere i afsnit 2.5).

DS15251 foreskriver

2.3.1 TERMISK MILJØ

De anbefalede kriterier for et termisk miljø er opdelt i hhv. bygninger med og uden mekanisk køling. Ved design af bygninger og dimensionering af HVAC-systemer skal de termiske komfortkriterier (minimum rumtemperatur om vinteren, maksimum rumtemperatur om sommeren) og nødvendige ventilationsluftmængder for at opnå et acceptabelt atmosfærisk indeklima anvendes som inddata til

beregning af opvarmningseffekten og den nødvendige køleeffekt. Dette vil garantere at en minimum-/maksimumtemperatur kan opretholdes under designtilstande for udeklimaet og interne belastninger.

Bygninger med mekanisk køling

Grundlaget for opstilling af kriterier for det termiske miljø skal foretages på baggrund af DS/EN ISO 7730 [2006] og de heri opstillede metoder til vurdering af termisk komfort (komfortindikatorerne PMV/PPD), sammen med specifikke eller antagede værdier for hhv. aktivitetsniveau og beklædningsisolans (vinter og sommer situation). Se nedenstående tabel 2.2.

Tabel 2.2: Eksempel på anbefalede kategorier ved design af mekanisk opvarmede og kølede bygninger. (efter DS/EN 15251 [2007, Anneks A])

Kategori ²	Forventet niveau	Termisk tilstand for kroppen som helhed	
		PPD [%]	Predicted mean vote (PMV)
I	<i>Højt</i>	< 6	-0,2 < PMV < +0,2
II	<i>Normal</i>	< 10	-0,5 < PMV < +0,5
III	<i>Acceptabelt</i>	< 15	-0,7 < PMV < +0,7
IV	<i>Udenfor kat.</i>	> 15	PMV < -0,7 el. +0,7 < PMV

Af figur 2.2 er det åbenlyst at der er taget udgangspunkt i de anbefalede kategorier og komfortgrænser fra DS/EN ISO 7730 [2006], yderligere beskrevet i afsnit 2.2. Der er dog, i den nye standard DS/EN 15251 [2007], tilføjet en ekstra kategori, ”kategori IV”, til brug når de beregnede værdier ikke rammer indenfor nogle af de ovenstående.

Baseret på de valgte kriterier (aktivitetsniveau, beklædningsisolans, lufthastighed, etc), og dermed komfortkategori, er det muligt at opstille et korresponderende interval for den operative temperatur til design/dimensionering af de termiske forhold for opvarmning og køling i forskellige arbejdsmiljøer (bolig, kontor, cafeteria, klasseværelser, børnehaver, butikker, etc.). Eksempel herpå, fra DS/EN 15251 [2007], er vist i tabel 2.3.

Istedet for at bruge temperatur som dimensionerende parameter, er det muligt at anvende PMV-/PPD-indekset, hvorved effekten som følge af en stigning i lufthastigheden fremkommer direkte.

²Lignende kategoriseringer benyttes i andre standarder, f.eks. EN 13779 og ISO 7730

Tabel 2.3: Eksempel på anbefalede minimum og maksimum værdier for indetemperaturen ved design af bygninger og HVAC-systemer. Efter DS/EN 15251 [2007, Anneks A]

Bygningstype	Kategori	Operativ temperatur [°C]	
		Minimum for opvarming(vintersæson)	Maksimum ved køling(sommersæson)
		1,0 clo	0,5 clo
Bolig byggeri: opholdsrum	<i>I</i>	21,0	25,5
(soveværelser, stue, køkken, etc.)	<i>II</i>	20,0	26,0
Aktivitet: siddende ~ 1,2 met	<i>III</i>	18,0	27,0
Enkeltmandskontor	<i>I</i>	21,0	25,5
(Celle kontor)	<i>II</i>	20,0	26,0
Aktivitet: siddende ~ 1,2 met	<i>III</i>	19,0	27,0
Storrumskontor	<i>I</i>	21,0	25,5
(Åbenplan kontor)	<i>II</i>	20,0	26,0
Aktivitet: siddende ~ 1,2 met	<i>III</i>	19,0	27,0

Især kriterier for børnehaver og butikker kan diskuteres. I disse typer bygninger er aktivitetsniveauet ikke ensartet (pga. nogle personer er siddende, børn leger og andre gående) og ligeledes er beklædningen varierende mellem forskellige grupper af mennesker (f.eks. de betjenende og kunderne i butikkerne). Andre bygningstyper såsom hospitaler, restauranter, sportshaller og lagerpladser vil have lignende problemer angående variationer i aktivitetsniveauet og beklædningsisolansen. [Olesen, 2007]

I sådanne situationer er det oftest personerne der opholder sig og er brugere af den pågældende bygning der tilgodeses ved fastsættelse af indeklima kriterierne.

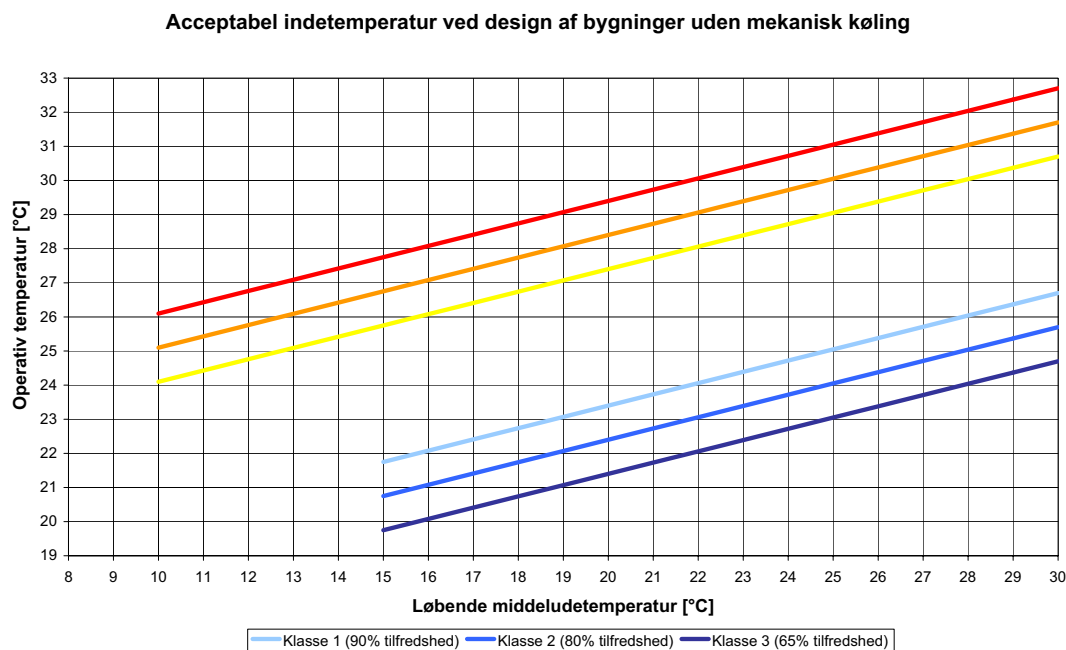
Hvor det ikke er muligt, at opretholde det krævede temperatur- eller PMV-interval (indenfor den valgte kategori) via mekaniske køling skal det opgives hvor ofte betingelserne overskrider intervallet. Dette kan gøres ved forskellige metoder, som yderligere er beskrevet under afsnit 2.5.

Bygninger uden mekanisk køling

Der gælder de samme kriterier ved dimensionering af opvarmningssystemet (vintersituation) i bygninger uden mekanisk køling som ved bygninger med mekanisk køling.

Kriteriet for det termiske miljø i bygninger uden mekanisk køling kan specificeres anderledes end for bygninger med mekanisk køling ved en sommersituation, som følge af forskellige forventninger af brugerne og deres adaption. Graden af adaption og forventning til indeklimaet er kraftig påvirket af udeklimaet, hvor den mest dominerende klimatiske parameter i forhold til menneskers opfattelse af det termiske indeklima er fundet til middel-udelufttemperaturen [Humphreys, 1978; Olesen et al., 2006]. Dette er fundet og dokumenteret i flere forskningsprojekter, f.eks. McCartney og Nicol [2002]; de Dear et al. [1997] og blev første gang introduceret i ANSI/ASHRAE 55 [2004]. Da der ikke skal dimensioneres mekanisk køling, er kategorierne for sommersituationen hovedsageligt brugt til bygningsdesign for at undgå overtemperatur ved udnyttelse af bygningsorientering, solafskærmning, udnyttelse af bygningens varmekapacitet, naturlig ventilation, etc. [DS/EN 15251, 2007; Olesen, 2007] Ved bestemmelse af anbefalede grænser for indetemperaturen benyttes udetemperaturen i form af

en løbende-middel udetemperatur (external running mean outdoor temperature), som vist på nedenstående figur. Hvis de adaptive temperaturgrænser som er vist i figur 2.2 (øverste grænser) ikke kan overholdes ved hjælp af de ovenstående passive teknologier, er mekanisk køling påkrævet. I sådan en situation er det selvfølgelig designkriterierne for bygninger med mekanisk køling der skal bruges.



Figur 2.2: Design værdier for den operative indetemperatur for bygninger uden mekanisk køling, som en funktion af den eksponentielt løbende middeludetemperatur. (efter [DS/EN 15251, 2007, s. 27])

Grænser for den operative temperatur vist i figur 2.2, er testet ved kontorbygninger og andre bygninger af lignende type, hvor der i hovedparten af bygningen er siddende brugere (1,2 met), men kan også benyttes i boliger, hvor der ligeledes er mulighed for personers tilpasning til det termiske miljø. I alle typer af bygninger gælder det, at personerne let skal kunne åbne vinduerne og at de må tilpasse deres beklædning efter inde- og/eller udeklimaforholdene.

I storrumskontorer har de fleste brugere ikke direkte mulighed for åbning af vinduer og har derfor ringe kontrol over den naturlige ventilation, hvorfor graferne i figur 2.2 ikke altid bruges i sådanne situationer. [DS/EN 15251, 2007]

Når personer oplever termisk diskomfort i et termisk miljø, vil de skride til handling for at opnå termisk komfort igen, og disse handlinger tager tid. Der er forskellige adaptive handlinger brugerne kan foretage, såsom åbning af vinduer (momentan handling), eller tilpasning af brugernes beklædningsadfærd fra vinter- til sommerbeklædning (langsigtede handling). Ændring af beklædningen er hurtig nok til at tage højde for fluktuationerne i vejret fra sæson til sæson, men ikke altid hurtig nok til at tage hensyn til ændringerne i det lokale mikroklima³ [Nicol og Humphreys, 2002a]. Der er i tidligere studier foretaget vurderinger af komfortindetemperaturen ud fra udetemperaturen. Bla. har Humphreys [1978] og ANSI/ASHRAE 55 [2004] brugt måneds middeludetemperaturen

³Svingninger i udeklimaet der sker lokalet omkring bygningen, såsom omkring liggende bygninger der har indflydelse på den naturlige ventilation og solbelastningen.

(monthly mean outdoor temperature) som indgangsvariabel, hvor de Dear et al. [1997] har brugt middelværdier af den effektiv udetemperatur, ET^{*4} uden at angive perioden hvori målingerne er foretaget [Nicol og Humphreys, 2002a]. Det skal huskes, at vejret kan ændre sig dramatisk indenfor samme måned og både mennesker og bygningen hvori de opholder sig ændrer sig med en hastighed som ikke kan afspejles af en månedlig vurdering.

Humphreys [1978] anbefalede en eksponentielt vægtet løbende middeltemperatur som ville afspejle en mere præcis sammenhæng med komforttemperaturen, da personer i bygningen vil være mest påvirkede af de seneste dages udvikling af udetemperaturen. Ligningen for beregning af den eksponentielt vægtede løbende middeludetemperatur, T_{rm} , til tiden t er:

$$T_{rm(t)} = (1 - \alpha)\{T_{t-1} + \alpha T_{t-2} + \alpha^2 T_{t-3} \dots\} \quad (2.4)$$

hvor

$T_{rm(t)}$	=	Løbende middeludetemperatur til tiden t [°C]
T_{t-n}	=	Løbende middeludetemperatur til den foregående tid, $t - n$ [°C]
t	=	Tidsinterval (time, dag, uge, etc.)
α	=	Konstant, hvor $0 \leq \alpha < 1$

Ligning (2.4) tager ikke højde for middeludetemperaturen for den pågældende dag, da intentionerne for udviklingen af den løbende middeludetemperatur, i SCATs projektet (McCartney og Nicol [2002]), var en adaptive kontrol algoritme (ACA) til brug ved styring af den ønsket komforttemperatur for brugerne i en bygning.

Ligning (2.4) kan herefter omskrives til at beskrive den eksponentielt vægtede løbende middeludetemperaturen på døgnmiddelbasis ved at betragte en periode på en dag ($t = 24timer$), som desuden også bruges i DS/EN 15251 [2007] samt McCartney og Nicol [2002]:

$$T_{rm} = (1 - \alpha)\{T_{ed-1} + \alpha T_{ed-2} + \alpha^2 T_{ed-3} \dots\} \quad (2.5)$$

hvor

T_{rm}	=	Løbende middeludetemperatur for i dag [°C]
T_{ed-1}	=	Daglig middeludetemperatur for den foregående dag [°C]
T_{ed-2}	=	Daglig middeludetemperatur for dagen før den foregående dag, osv. [°C]
α	=	Konstant, hvor $0 \leq \alpha < 1$

Som det ses er effekten af den tid det tager en bestemt temperatur at "dø hen" afhængig af konstanten, α . Ligning (2.5) giver desuden en løbende middeltemperatur, som er aftagende påvirket af en bestemt temperatur (f.eks. T_{ed-1} - temperatur fra den foregående dag), som tiden går. Des større værdi af α , des større effekt har de foregående dages temperaturer. [Nicol og Humphreys, 2002a]

Ligning (2.5) kan simplificeres til:

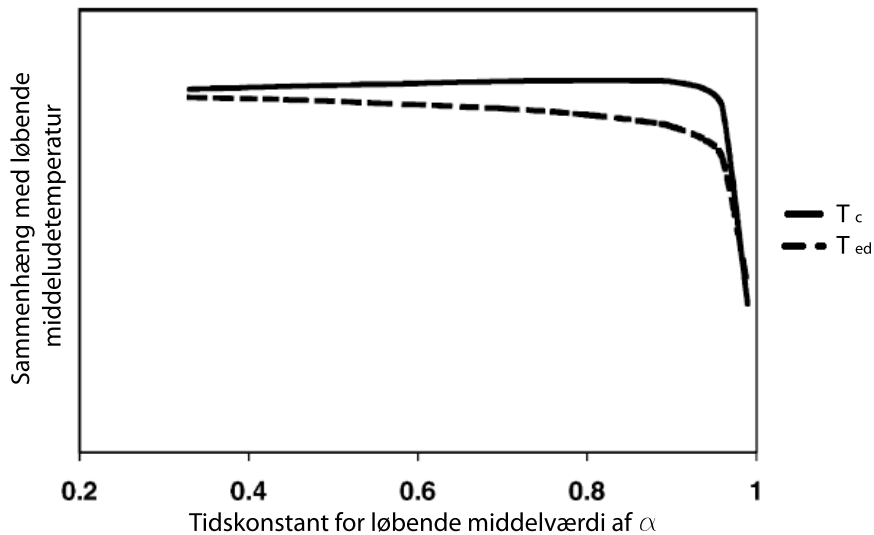
$$T_{rm} = (1 - \alpha)T_{ed-1} + \alpha T_{rm-1} \quad (2.6)$$

hvor

⁴mean of outdoor effective temperature

- T_{rm} = Løbende middeludetemperatur for i dag
 T_{ed-1} = Daglig middeludetemperatur for den foregående dag
 T_{rm-1} = Løbende middeludetemperatur for den foregående dag
 α = Konstant mellem 0 og 1

Målet er herefter at finde en optimal værdi for α der medfører den bedste sammenhæng mellem den løbende middeludetemperatur og komforttemperaturen (ubrudt linie). Figur 2.3 viser sammenhængen mellem komforttemperatur og løbende middeludetemperatur med varierende α -værdier.



Figur 2.3: Ændringen i korrelationen mellem den eksponentielt løbende middeludetemperatur og komfortindetemperaturen (T_c). Korrelationen med daglig middeludetemperatur (T_{ed}) er vist til sammenligning. (efter [Nicol og Humphreys, 2002a, s. 569])

Figur 2.3 viser også sammenhængen mellem daglig middeludetemperatur (stiplet linie) og løbende middeludetemperaturens ændringer i forhold til α . Som det ses, er der en forskel i formen af de to kurver. Sammenhængen med daglig middeludetemperatur og løbende middeludetemperatur falder jævnt for stigende α -værdier, og sammenhængen med komforttemperaturen stiger gradvist indtil den når en α -værdi på 0,8 som herefter falder. Selvom toppunktet på kurven for sammenhængen mellem komfort temperaturen og løbende middeludetemperatur er forholdsvis lille er der dog stadig en effekt. Det anbefales derfor at sætte konstanten α til 0,8, som ligeledes er den værdi der anbefales at bruge i DS/EN 15251 [2007].

Hvis der ikke foreligger målinger af den daglige middeludetemperatur, kan den nedenstående ligning benyttes til beregning af løbende middeludetemperatur:

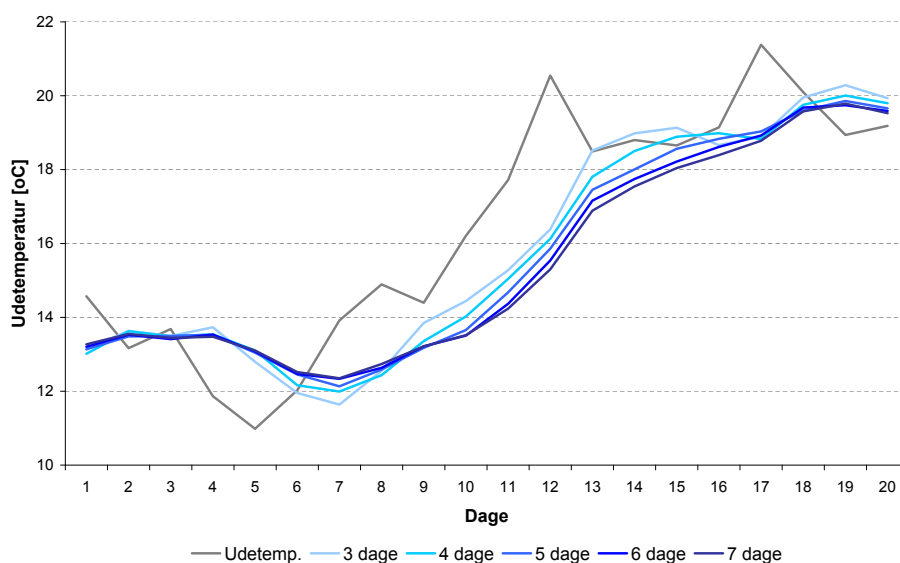
$$T_{rm} = \frac{T_{ed-1} + 0,8T_{ed-2} + 0,6T_{ed-3} + 0,5T_{ed-4} + 0,4T_{ed-5} + 0,3T_{ed-6} + 0,2T_{ed-7}}{3,8} \quad (2.7)$$

Det bemærkes endvidere at relationen til udetemperaturen (via personernes beklædning, adfærd og adaption) ser ud til at give et fornuftigere resultat ved vægtning af udetemperaturerne for i dag og i går istedet for en simpel månedsmiddel, som bla. ANSI/ASHRAE 55 [2004] og Humphreys [1978]

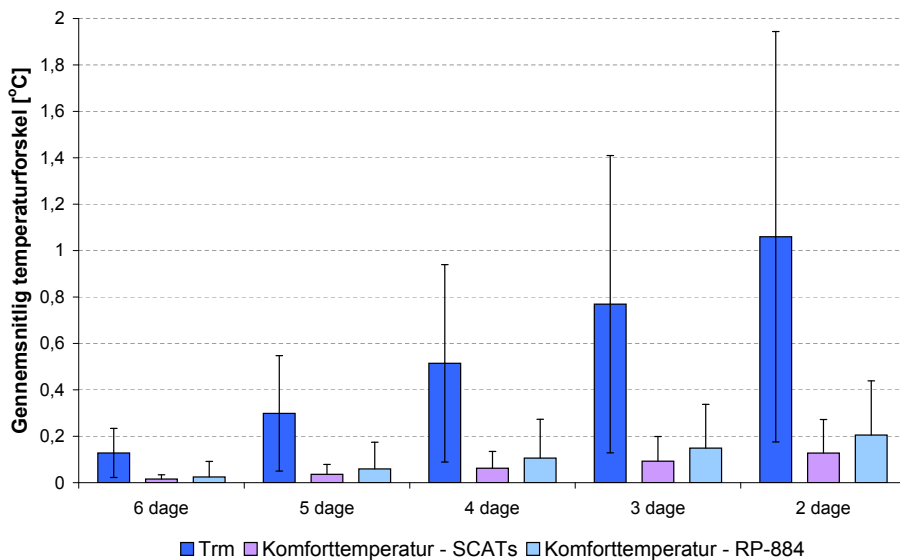
gør det.

Som det ses af ligning (2.7) indgår mange af de foregående dage (sidste syv dage) i beregningen af den løbende middeludetemperatur. Det kan diskuteres om det er nødvendigt, og ikke mindst praktisk, at tage alle disse dage med og om man eventuelt skulle skærer nogle af ledende væk og derved forsimpler udtrykket til en mere praktisk anvendelig metode. Det er derfor foretaget en mindre undersøgelse af, hvad det betyder for den løbende middel-udetemperatur at fjerne nogle af de sidste led i beregningen (ligning (2.7)) og dermed forsimpler udtrykket. Der er taget udgangspunkt i den registrerede udetemperatur fra det danske reference år (DRY).

Nedenstående figur 2.4(a) viser den løbende middel-udetemperatur som funktion af de foregående døgnmiddeltemperaturer ved brug af ligning (2.7). Figur 2.4(a) illustrer variationen i den løbende middel-udetemperatur ved brug af færre antal dage end den oprindelige ligning - 7 dage, 6 dage, 5 dage etc. Der kan herefter foretages en vurdering af eksempelvis 6 dages indvirkning fremfor 5 dage på beregningen af T_{rm} .



(a) Grafisk sammenligning af T_{rm} over en forårs-/sommerperiode på 20 dage



(b) Gennemsnitlig forskel samt standardafvigelsen ved brug af færre antal dage til beregning af T_{rm} . Endvidere er forskellen i komforttemperaturen ligeledes vist til sammenligning. I alle tilfældene er der sammenlignet med beregningen for 7 dage.

Figur 2.4: Undersøgelse af betydningen ved brug af færre antal dage til beregning af den løbende middel-udetemperatur

Som det ses af figur 2.4(a) vil en løbende middel-udetemperatur udjævne temperatursvingningerne fra dag til dag, hvor udjævningsgraden af kurven vil stige i takt med antallet af dage der tages med i beregningen af T_{rm} .

Ved at tage et færre antal dage med i beregningen af den løbende middel-udetemperatur vil den gen-

nemsnitlige forskel ift. den oprindelige metode (7 dage) stige. Dette er ligeledes illustreret af figur 2.4(b), som viser forskellen mellem et mindre antal dage og den oprindelige beregningsmetode af T_{rm} (7 dage). Figuren til højre viser ligeledes, hvordan den gennemsnitlige forskel i komforttemperaturen (Top) variere som funktion af antal dage der medtages i beregningen. Det ses tydeligt at komforttemperaturen i en bygning ikke vil ændre sig betydeligt ved at medtage færre antal dage i beregningen af T_{rm} - f.eks. vil der være under $0,2^{\circ}\text{C}$ i afvigelse ved at kun medtage 3 dage istedet for de sidste 7 dages middel-udetemperatur.

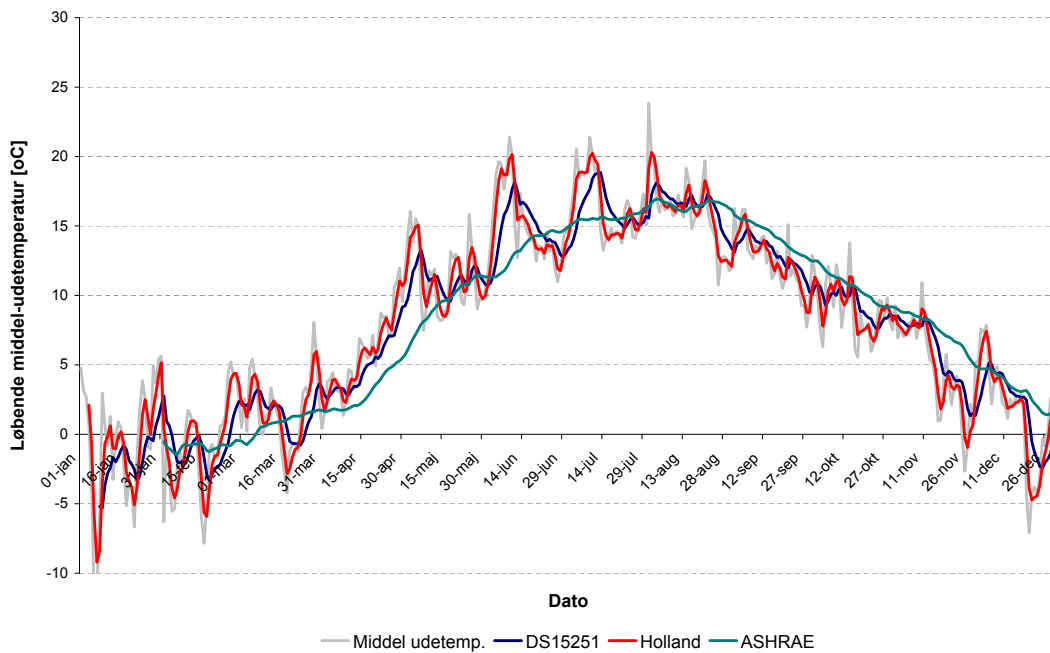
Ved sammenligning af de ovenstående forskellige metoder til beregning af T_{rm} kan der derfor stilles spørgsmål ved, hvorfor de sidste syv dage skal indgå i beregningen, som der er foreskrevet i den nye standard DS/EN 15251 [2007] (ligning (2.7)). Ved brug af et færre antal dage vil, der kun forekomme en lille ændring i komforttemperaturen for både SCATs- og RP-884-projektet.

I nyere Hollandsk litteratur har de anvendt en simplere, men mere praktisk anvendelig metode siden 2006 til beregning af den løbende middeludetemperatur. Her vægtes temperaturen for selve dagen samt de seneste tre dage med faldende koefficienter som angivet i ligning (2.8). Døgnmiddeltemperaturen beregnes, som en middelværdi af den maksimale og minimale-temperatur for den pågældende dag. Metoden kan bruges ved langsigtede vurdering (f.eks. over et år) af det termiske indeklime i et bygningssimuleringsprogram, som BSim, til sammenligning med andre simulerede løsninger. Den Hollandske løbende middeludetemperatur kan altså ikke bruges som en styringsindikator for komfortrumtemperaturen da den har udetemperaturen for den pågældende dag med i beregningen.

$$T_{rm} = \frac{T_{ed} + 0,8T_{ed-1} + 0,4T_{ed-2} + 0,2T_{ed-3}}{2,4} \quad (2.8)$$

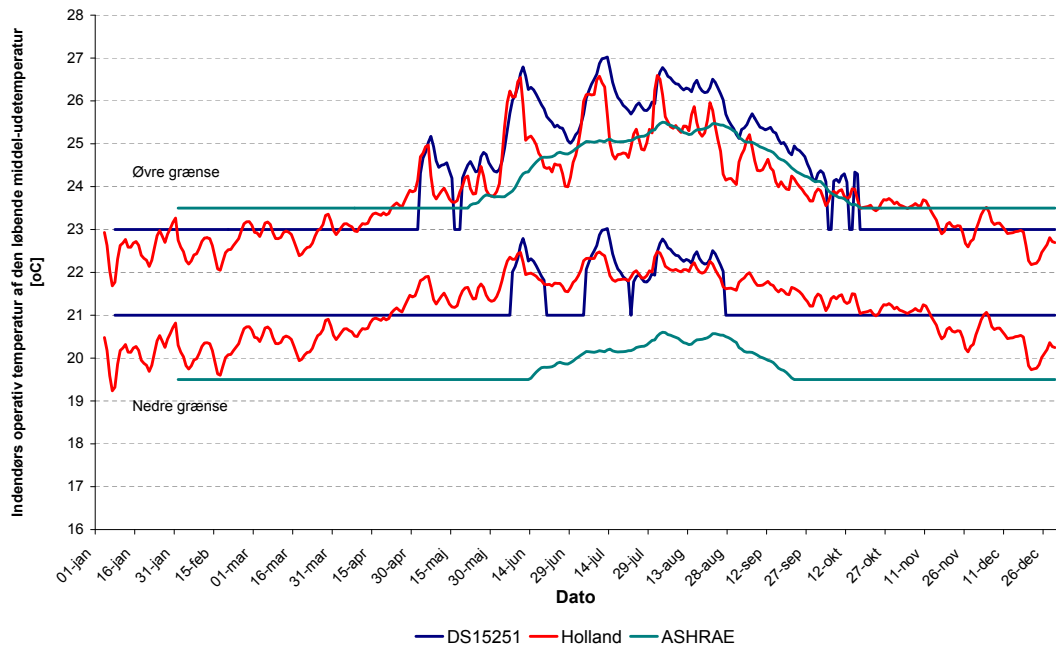
Brugen af de to metoder til bestemmelse af den løbende middeludetemperatur er sammenlignet med hhv. ASHRAE's måneds middeludetemperatur og dags middeludetemperatur fra dry-filen i figur 2.5. For bygninger uden køling (f.eks. naturlig ventileret) har den løbende middeludetemperatur stor betydning for bestemmelse af komforttemperaturen, og valget af metode til beregning af løbende middeludetemperatur har dermed ligeledes stor indflydelse.

Samlet set er der ikke den store forskel mellem de to metoder til beregning af den løbende middeludetemperatur (DS/EN 15251 [2007] og Holland), bortset fra at den hollandske metode giver et hurtigere udsving samt lidt større fluktationer i temperaturen. Dette skyldes, at temperaturen for den pågældende dag tages med i regning samt det kun er de seneste tre dage der har en indvirkning på den løbende middeludetemperatur. Endvidere vil dette bevirke at den løbende middeludetemperatur fra den hollandske metode vil følge dags middeludetemperaturen mere direkte.



Figur 2.5: Sammenligning af løbende middeludetemperatur og månedsmiddel, fra forskellige litteraturer (DS/EN 15251 [2007]; van der Linden et al. [2006]; ANSI/ASHRAE 55 [2004]), samt dags middeludetemperatur fra dry-filen. DS/EN 15251 [2007] og Holland (van der Linden et al. [2006]) er løbende middeludetemperatur og beregnet af hhv. ligning (2.7) og (2.8). ASHRAE (ANSI/ASHRAE 55 [2004]) er månedsmiddeludetemperatur.

Som det ses af figur 2.5 vil den hollandske metode give tilladelige højere operative indetemperatureer når $T_{r,m}$ bruges som indgangsparameter på abscisseaksen i figur 2.2. Det skal dog nævnes at den hollandske metode til bestemmelse af komforttemperaturen er bygget på resultaterne fra ASHRAE projektet RP-884 (de Dear et al. [1997]) og den omtalte metode i figur 2.2 er bygget på resultater fra SCAT's projektet (McCartney og Nicol [2002]). Det vil derfor være interessant at sammenligne hvordan komforttemperaturgrænserne (minimum og maksimum) adskiller sig fra hinanden ved de forskellige metoder (DS/EN 15251 [2007] Holland og ANSI/ASHRAE 55 [2004]) med hver deres måde at beregne den løbende middeludetemperatur. Sammenligningen af komfortgrænserne for de tre metoder er vist på nedenstående figur 2.6. Der er taget udgangspunkt i en kategori I bygning jvf. DS/EN 15251 [2007], hvor der maksimalt vil forekomme 10 % utilfredse.



Figur 2.6: Anbefalede operative temperatur i en bygning baseret på 90% tilfredshed. Værdierne er bygget på ligninger fra hhv. ASHRAE projektet RP-884 (Holland, ASHRAE) og SCATs projektet (DS/EN 15251 [2007]) med forskellige indgangsparameter for den løbende middeludetemperatur.

Fra figur 2.2 og 2.6 ses det, at der accepteres højere rumtemperaturer i bygninger uden mekanisk køling end bygninger med mekanisk køling (tabel 2.3). Dette er til dels pga. brugernes adaption (Beklædningsisolans $< 0,5$ clo) og dels pga. lavere forventninger til temperaturen.

Som det ses af figur 2.2 er det metoden i DS/EN 15251 [2007] der giver de højeste komforttemperaturgrænser, selvom denne har en lavere løbende middeludetemperatur som indgangsparameter end den hollandske metode (se figur 2.5). Som omtalt tidligere skyldes det ligningerne der ligger til grund for beregningen af komforttemperaturen, hvor DS/EN 15251 [2007] bygger på SCATs projektet og Holland og ASHRAE bygger på RP-884 projektet. Komforttemperaturgrænsernes ligninger for hhv. DS/EN 15251 [2007] og Holland er vist nedenfor:

Metode fra DS/EN 15251 [2007] bygget på resultater fra SCATs:

$$\begin{aligned} \text{Øvre grænse: } T_{i,max} &= \begin{cases} 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 + 2 & \text{for } T_{rm} > 10 \\ 23 & \text{ellers} \end{cases} \\ \text{Nedre grænse: } T_{i,min} &= \begin{cases} 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 - 2 & \text{for } T_{rm} > 15 \\ 21 & \text{ellers} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Metode fra Holland/ASHRAE bygget på resultater fra RP-884:

$$\begin{aligned} \text{Øvre grænse: } T_{i,max} &= \begin{cases} 0,31 \cdot T_{rm} + 17,8 + 2,5 & \text{for } T_{rm} > 12 \\ 0,11 \cdot T_{rm} + 21,5 + 1,2 & \text{ellers} \end{cases} \\ \text{Nedre grænse: } T_{i,min} &= 0,11 \cdot T_{rm} + 21,5 - 1,2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Af ligning (2.9) og (2.10) ses det tydeligt at komfortgrænserne fra DS/EN 15251 [2007] vil blive større end metoden fra Holland, hvilket ligeledes viser sig i figur 2.6.

Lokale kriterier for termisk komfort

Kriterier for træk, vertikal temperaturgradient, varm eller koldt gulv og strålingsasymmetri vil også have en vis indflydelse på designet og dimensioneringen af bygningen og HVAC-systemet. Disse kriterier er ikke inkluderet i standarden DS/EN 15251 [2007]. I stedet refereres der til DS/EN ISO 7730 [2006] og afsnit 2.2 for mere information herom. Ved vurderingen af energi ydeevnen er de lokale parametre ikke taget i betragtning. [Olesen, 2007; DS/EN 15251, 2007]

2.4 ASHRAE 55

I nærværende afsnit præsenteres metoderne til evaluering af termisk indeklima angivet i normen ANSI/ASHRAE 55 [2004].

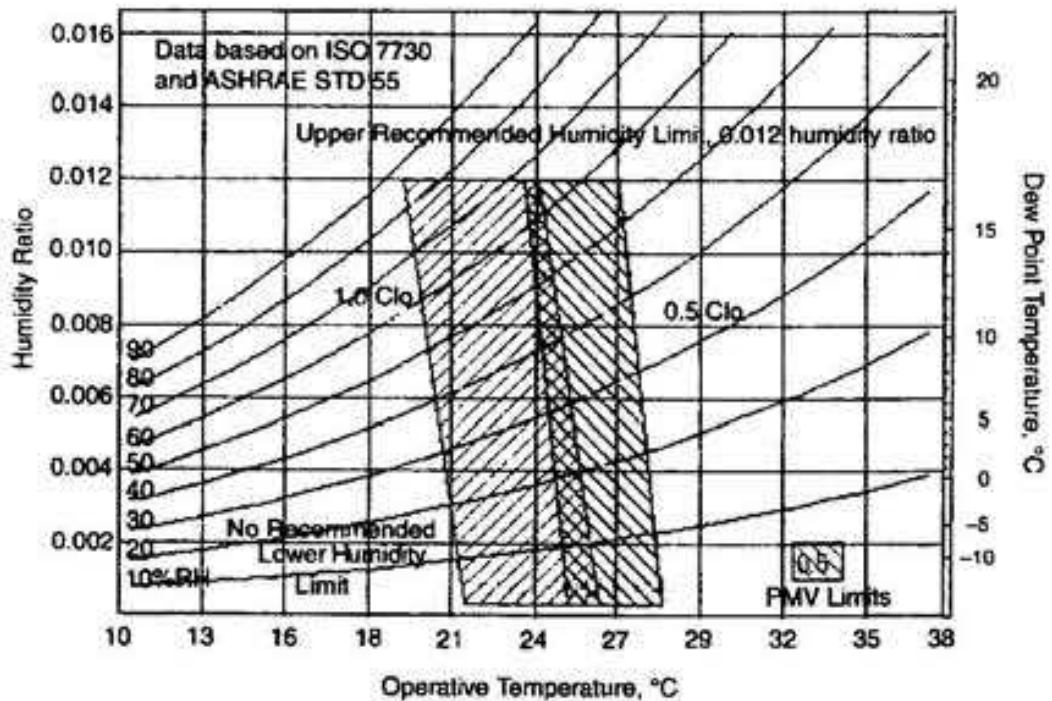
Idet størstedelen af de termiske komfortstudier bygger på siddende eller tæt på siddende aktivitet, skal ANSI/ASHRAE 55 [2004] også primært bruges i disse situationer. Normen angiver to metoder til brug ved eftervisning af et acceptabelt termisk indeklima - en grafisk metode og PMV-baseret metode. Foruden disse to metoder angives en yderligere metode for naturligt ventilerede bygninger baseret på resultaterne fra de Dear et al. [1997]. Feltundersøgelser har vist, at personers termiske oplevelse og accept i naturligt ventilerede bygninger, hvor personerne har kontrol over funktionsdygtige vinduer er forskellige fra andre typer bygninger på grund af skiftende forventninger. Dette er beskrevet og diskuteret nærmere i detaljer i afsnit 4.1.1 sammen med andre adaptive modeller for termisk komfort samlet i kapitel 4.

I modsætning til hhv. DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007], der informativt angiver forskellige klasser for det termiske miljø, foreskriver ANSI/ASHRAE 55 [2004] kun ét sæt betingelser der skal overholdes. Dette bygger på 80%'s termisk komfort for det generelle termiske miljø, og varierende krav for de forskellige kilder til lokal termisk diskomfort.

I de følgende underafsnit præsenteres de ovenfor omtalte metoder og krav angivet i ANSI/ASHRAE 55 [2004].

2.4.1 GRAFISK METODE

Den grafiske metode er opstillet på baggrund af 80%'s termisk accept dækkende over 10% utilfredse for det globale termiske indeklima samt 10% utilfredse som følge af lokal termisk diskomfort. Følgende figur viser komfortzoner for hhv. en vinter- og sommerperiode opstillet på baggrund af PMV-indekset af Fanger [1972] og baseret på en beklædningsisolans på hhv. 0,5 og 1,0 clo. Såfremt den aktuelle beklædningsisolans er imellem disse, kan der interpoleres mellem linjerne.



Figur 2.7: Designgraf med angivelse af komfortzoner for 80%'s termisk accept. Komfortzoner for vinter (1,0 clo) og sommer (0,5 clo) er vist. For beklædningsisolanser i intervallet 0,5-1,0 clo, kan der interpoleres mellem linjerne (fra ANSI/ASHRAE 55 [2004])

Brugen af ovenstående figur er underlagt et sæt begrænsninger. Disse er:

- Aktivitetsniveau: 1,0 – 1,3 *met*
- Beklædningsisolans: 0,5 – 1,0 *clo*
- Lufthastighed: $v_a \leq 0,2 \frac{m}{s}$

På trods af kravet om lufthastigheder under $0,2 \frac{m}{s}$, tillades en forøgelse af den øvre komforttemperatur som følge af øgede lufthastigheder, såfremt disse er personlig kontrolleret. Dette er nærmere beskrevet i afsnit 2.4.3.

2.4.2 PMV-BASERET METODE

Anden metode som ANSI/ASHRAE 55 [2004] angiver til eftervisning af acceptabelt termisk indeklima, bygger på PMV-/PPD-indekset, hvor det antages at personer der stemmer hhv. -3, -2, +2 og +3 efter ASHRAE-skalaen⁵ er utilfredse med det termiske miljø. I modsætning til DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007] der informativt angiver forskellige klasser for termisk komfort⁶, skal

⁵Se evt. afsnit 3.10

⁶F.eks. i DS/EN ISO 7730 [2006]: Klasse A: PPD<6%
Klasse B: PPD<10%
Klasse C: PPD<15%

det termiske miljø i bygninger jf. ANSI/ASHRAE 55 [2004] svare til PPD<10% svarende til 90%’s termisk accept.

Som det senere i nærværende rapport vil blive vist og diskuteret⁷, er PMV-indekset omfattet af voksende usikkerheder og fejl mod gyldighedsområdets begrænsninger. Dette tager ANSI/ASHRAE 55 [2004] hensyn til, idet PMV-indekset i normen kun må bruges for:

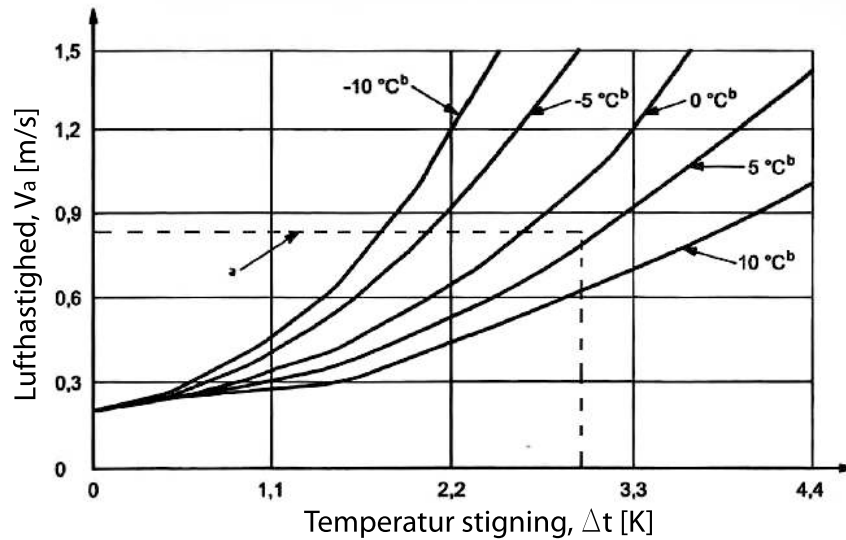
- Aktivitetsniveau: $1,0 - 2,0\text{met}$
- Beklædningsisolans: $0 - 1,5\text{clo}$
- Lufthastighed: $v_a \leq 0,2\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Foruden de ovenstående begrænsninger tillades der også en forøgelse af den øvre komforttemperatur som følge af øgede lufthastigheder, såfremt disse er personlig kontrolleret, som det er tilfældet ved den første metode. Denne forøgelse er beskrevet i følgende afsnit.

2.4.3 FORØGELSE AF ØVRE OPERATIV TEMPERATURGRÆNSE

Præcise forhold mellem forbedret termisk komfort som følge af øgede lufthastigheder er endnu ikke blevet klarlagt i detaljer, men ANSI/ASHRAE 55 [2004] tillader alligevel en forøgelse af komforttemperaturen som følge af forøgede lufthastigheder. Følgende figur 2.8 viser forøgelsen af den operative temperatur for termisk komfort ved forøgelse af den lokale lufthastighed, med det krav at denne er kontrolleret personligt. Figuren er identisk med figur 2.1 fra DS/EN ISO 7730 [2006].

⁷Afsnit 3.5



Figur 2.8: Krævet lufthastighed til forøgelse af øvre temperaturgrænser. Linjerne viser hvordan lufthastigheden øges med den nødvendige mængde for at opretholde samme totale varmetab fra huden. Brugernes accept af højere lufthastigheder kræver at de selv har kontrol over udstyret der skaber den højere lokale lufthastighed.

a = Grænse for let, primært siddende, aktivitet.

$b = (\overline{t_{mrt}} - t_a) [^{\circ}C]$ (t_a lufttemperatur; $\overline{t_{mrt}}$ middelstrålingstemperatur)

Som angivet på figur 2.8, er den maksimalt tilladte temperaturforøgelse $3,0^{\circ}C$ ved en maksimal lufthastighed på $0,8 \frac{m}{s}$. Hvor DS/EN ISO 7730 [2006] angiver at grafen kan benyttes for et aktivitetsniveau på 1,2 met og en beklædningsisolans på 0,5 clo, udvider ANSI/ASHRAE 55 [2004] dette gyldighedsinterval med:

- 1,0-1,3 met
- 0,5-0,7 clo

2.4.4 LOKAL DISKOMFORT

De to metoder beskrevet ovenfor i afsnit 2.4.1 og 2.4.2 er endvidere omfattet af krav til lokal termisk diskomfort. Disse krav er beskrevet ved de termiske indekser, DR og PD, ligesom det er tilfældet ved DS/EN ISO 7730 [2006]. Disse termiske indekser er nærmere beskrevet i appendiks B sammen med PMV-/PPD-indekset.

Som for det generelle termiske miljø, er der i ANSI/ASHRAE 55 [2004] ikke angivet klasser indenfor hvilke en bygning kan placeres. Kravene til lokal termisk diskomfort er helt præcist specificeret, og disse er angivet i følgende tabel.

Tabel 2.4: *Krav til lokal termisk diskomfort angivet i ANSI/ASHRAE 55 [2004]*

Trækvurdering (DR)	< 20%
Vertikal lufttemperaturgradient (PD)	< 5%
Varme eller kolde gulve (PD)	< 10%
Strålingstemperaturasymmetri (PD)	< 5%

De termiske indekser angivet i tabel 2.4 bestemmes som beskrevet i appendiks B.

2.4.5 KRAV OM TIDSLIG TEMPERATURVARIATION

Som det er tilfældet med DS/EN ISO 7730 [2006], stiller ANSI/ASHRAE 55 [2004] også krav om den tidslige temperaturvariation. Denne variation er opdelt i:

- Cyklisk variation: Gentagne ændringer i operativ temperatur i perioder på maksimalt 15 min.
- Generel variation: Ændringer i operativ temperatur over perioder på mere en 15 min.

Den cykliske variation i operativ temperatur må jf. ANSI/ASHRAE 55 [2004] ikke overstige 1,1°C. For den generelle tidslige variation af den operative temperatur, er der fastsat krav som angivet i følgende tabel.

Tabel 2.5: *Tilladelig generel temperaturvariation angivet i ANSI/ASHRAE 55 [2004]*

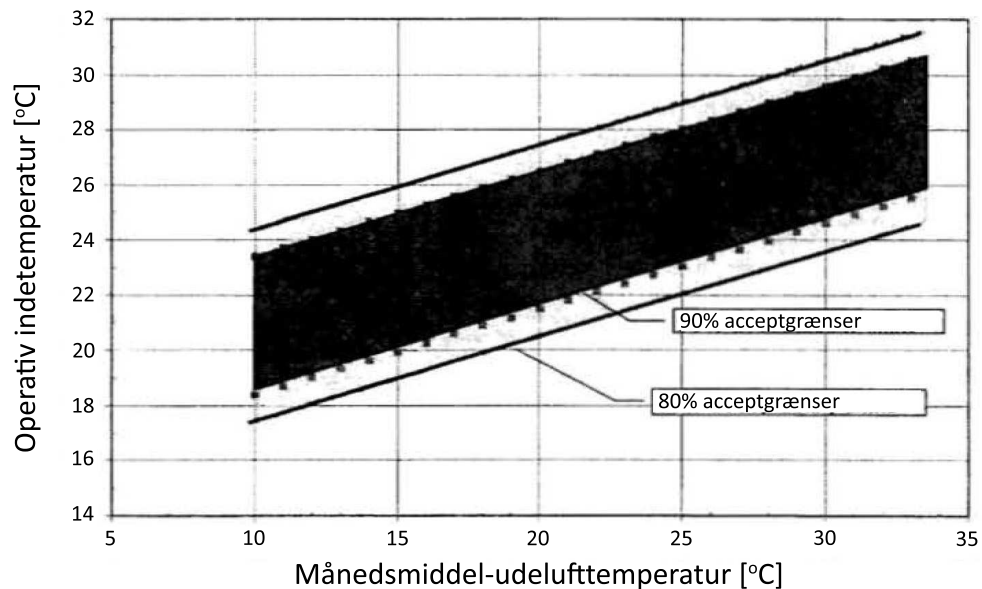
Tidsperiode [timer]	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0
Maksimal temperaturændring [°C]	1,1	1,7	2,2	2,8	3,3

2.4.6 ALTERNATIV METODE FOR NATURLIGT VENTILEREDE BYGNINGER

For naturligt ventilerede bygninger er der i ANSI/ASHRAE 55 [2004] angivet en alternativ metode. Metoden bygger som omtalt ovenfor på resultater fra de Dear et al. [1997]. Brugen af denne metode er omfattet af en række ufravigelige krav:

- Personer skal have direkte adgang til funktionsdygtige vinduer.
- Ingen mekanisk køling.
- Mekaniske ventilation er tilladt, men den primære regulering af det termiske indeklima skal foregå via naturlig ventilation.
- Der må gerne være installeret opvarmningssystem, men metoden må ikke bruges såfremt dette er i drift.
- Aktivitetsniveau: 1,0-1,3 met.
- Ingen krav til beklædning (fri justering af beklædnings tilladt).

Såfremt ovenstående krav er opfyldt, kan den maksimale operative indetemperatur bestemmes ved følgende graf.



Figur 2.9: Komfortgrænser for hhv. 80 og 90%’s termisk accept for naturligt ventilerede bygninger. (efter ANSI/ASHRAE 55 [2004])

Bygninger skal overholde komfortgrænserne for 80%’s termisk accept, hvor grænserne for 90%’s termisk accept kun benyttes for særlige krav til det termiske indeklima. Linjerne i ovenstående figur må ikke ekstrapoleres udover gyldighedsintervallet, og såfremt månedsmiddel-udelufttemperaturen befinder sig udenfor dette interval, må metoden ikke benyttes. Grafen gælder både for global som lokal termisk diskomfort. Såfremt denne metode benyttes er der hverken krav til luftfugtighed eller maksimal lufthastighed.

2.4.7 TOLERANCEOVERSKRIDELSER

Deciderede angivelser af tilladelige toleranceoverskridelser er ikke angivet i ANSI/ASHRAE 55 [2004]. De ovenfor angivne metoder skal overholdes for alle kombinationer af ”mindre ekstreme” konditioner for såvel interne belastninger som eksterne udeklimaforhold. Vejrdata for designforhold er ifølge ANSI/ASHRAE 55 [2004] statistisk opstillet og inkluderer en vis procent tilladelige overskridelser (f.eks. 1% design, 4 måneder sommerbasis og 29 timers overskridelser). De tilladelige toleranceoverskridelser er således bestemt på baggrund af de statistisk opstillede vejrdata for designforhold, hvori tolerancerne er indbygget.

2.5 LANGSIGTET EVALUERING - INDIKATORER FOR DET TERMISKE MILJØ

Eftersom belastninger i en bygning varierer, er det ikke sikkert, at det designede system altid kan opfylde designkriterierne i alle rum. Der er derfor brug for en evaluering af bygningens langsigtede ydeevne med henblik på indeklimaet.

Hvis kriterierne for indeklimaet skal imødegås 100% af den tid hvor brugerne er i bygningen, endda under ekstreme vejrforhold, vil størrelsesordenen af opvarmnings- og/eller kølekapaciteten være voldsomme. Ud fra et energimæssigt synspunkt skal der tillades en tolerance for overskridelse af designkriterierne. Økonomiske og/eller miljømæssige betragtninger vil føre til en mere pragmatisk løsning ved at tillade de termiske forhold at overskride de anbefalede minimum- og maksimumgrænser i et begrænset antal timer. [Olesen og Parsons, 2002, s. 544]

Ved hjælp af computersimuleringer er komfortforholdene ofte undersøgt over en længere tidsperiode (sæson, år), for forskellige typer af bygninger og/eller forskellige HVAC designs. Der er altså brug for at kunne kvantificere det termiske indeklima ud fra en langsigtet betragtning så det er muligt at sammenligne forskellige løsninger.

I dag er der meget lidt viden omkring effekten af at lade rumtemperaturen overskride de anbefalede grænser. Flere forskellige metoder til at opsummere størrelsen af timer hvor i komfortområdet overskrides er angivet i hhv. DS 474 [1993], DS/EN 15251 [2007] og DS/EN ISO 7730 [2006] samt ved brug af ”ydeevneindikator” [Brohus et al., 2006].

De omtalte metoder, fra litteraturen, er beskrevet og diskuteret i de følgende afsnit. Nedenstående liste opsummerer kort de forskellige fremgangsmåder:

I: DS 474 [1993] - Anbefalede maksimale toleranceoverskridelse

II: DS/EN 15251 [2007] & DS/EN ISO 7730 [2006]

A: Timekriterie (Antal timer eller procentdel af tiden hvor temperaturen er uden for et specifikt område)

B: ”gradtime”-metoden (degree hours)

C: PPD-vægtede timer

D: Gennemsnits PPD

E: Opsummeret PPD

III: Ydeevneindikator

DS474

Til langsigtet evaluering af det termiske indeklima kan DS 474 [1993] benyttes. Metoden heri specificerer et antal timer over året for hvilke grænser den operative indetemperatur må overskrides. Princippet formuleres matematisk således:

$$\sum_{i=1}^{n_w} x_i \leq 100 \text{ timer} \quad (2.11)$$

$$\sum_{i=1}^{n_w} y_i \leq 25 \text{ timer} \quad (2.12)$$

hvor

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{hvis } t_{op,i} > 26^\circ\text{C} \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{hvis } t_{op,i} > 27^\circ\text{C} \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (2.14)$$

hvor

i	=	Arbejdstime	[-]
n_w	=	Antal arbejdstimer	[-]
$t_{op,i}$	=	Operativ temperatur for arbejdstime, i	[°C]

Ifølge afsnittet, i [DS 474, 1993], omkring anbefalede maksimale toleranceoverskridelser skal antallet af timer, hvor den operative indetemperatur overstiger 26 og 27°C altså begrænses til maksimalt hhv. 100 og 25 timer om året. Selvom metoden kun er givet som en vejledning er den gennem tiden blevet en standard for mange rådgivende ingeniører, til brug ved langsigtede evalueringer.

Problemet med denne metode er, at den ikke medtager størrelsen af udsvinget over de tilladelige temperaturgrænser (26 og 27°C), hvilket vil medføre at to forskellige operative temperaturer på f.eks. 29°C og 27°C kvantificeres ens ved en summation af antallet af timer over f.eks. 26°C. Foruden dette, benyttes den operative temperatur som indikator for det termiske indeklima og komfortniveauet. Graden af termisk komfort i et givet indeklima afhænger i høj grad af de personlige parametre: aktivitetsniveauet og beklædningsisolansen [Fanger, 1972], hvorfor den operative temperatur ikke nødvendigvis giver et reelt billede af det aktuelle termiske indeklima.

DS/EN 15251 & DS/EN ISO 7730

I det ovenstående afsnit vedr. metoden angivet i DS 474 [1993] blev det bemærket og diskuteret, at det er nødvendigt at tage hensyn til størrelsen af overskridelsen ift. et fastsat acceptniveau. Endvidere blev det bemærket, at brugen af den operative indetemperatur som komfortindikator ikke giver et reelt billede af det aktuelle termiske indeklima. En bedre indikator for oplevelsen af det termiske indeklima er de termiske indekser PMV og PPD der netop ud fra aktivitetsniveauet og beklædningsisolansen samt de fire indeklimavariabler lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed og lufthastighed forudsiger den termiske oplevelse for en stor gruppe mennesker i et givet indeklima [Fanger, 1972; DS/EN ISO 7730, 2006].

Følgende afsnit opsummerer og diskuterer de beskrevne metoder til evaluering af langsigtede forhold i de to standarder DS/EN 15251 [2007] og DS/EN ISO 7730 [2006]. Den nyeste standard, DS/EN 15251 [2007], evalueringsmetoder bygger i flere af situationerne på de samme metoder som er beskrevet i DS/EN ISO 7730 [2006].

Metode A: Timekriterie

Som foreskrevet i den nye standard DS/EN 15251 [2007] er det muligt at opgive, hvor mange timer eller procentdel af bygningens brugstid PMV eller den operative temperatur ligger udenfor et specificeret område. Der kan frit vælges mellem at bruge PMV eller operativ temperatur som indikator, det skal dog huskes ved brug af operative temperaturer er grænserne (tabel 2.3) beregnet og fremkom-

met ved en valgt kategori i tabel 2.2 samt foretaget forudsætninger omkring de enkelte indgående parametre i PMV ligningen (aktivitetsniveau, beklædningsisolans, etc.).

Metode B: Gradtime (Degree Hours) kriterie

Tiden hvor den aktuelle operative temperatur overskrider en specificeret grænse indenfor brugstiden er vægtet med en faktor, der er en funktion af hvor mange grader grænsen overskrides.

Vægtfaktoren (weighting factor, wf) beregnes som:

$$wf = T_o - T_{o,limit} \quad (2.15)$$

hvor

- wf = Vægtfaktor⁸
- T_o = Operativ temperatur
- $T_{o,limit}$ = er øvre eller nedre grænse for det specificerede komfortområde (f.eks. $23,0^{\circ}C \leq T_o \leq 26,0^{\circ}C$ svarende til $-0,5 < PMV < +0,5$ for et enkeltmandskontor i kategori I om sommeren)

Herefter, for en karakteristisk periode på et år, opsummeres vægtfaktoren og tiden til et samlet produkt ("vægtfaktor · tid") kaldet grad-timer. Summeringen af produktet har enheden *timer*.

$$Varm\ periode : \sum_{n_{beg}}^{n_{end}} wf \cdot tid \quad for\ T_o > T_{o,limit} \quad (2.16)$$

$$Kold\ periode : \sum_{n_{beg}}^{n_{end}} wf \cdot tid \quad for\ T_o < T_{o,limit} \quad (2.17)$$

hvor

- n_{beg} = Starttidspunkt for betragtede tidsperiode [timer]
- n_{end} = Sluttidspunkt for betragtede tidsperiode [timer]

For temperaturer over eller under de fastsatte grænser, vil antallet af timer blive multipliceret med vægtfaktoren (wf). Summeringen af vægtnings-tiden kan efterfølgende bruges til evaluering af de langsigtede komfortforhold for en karakteristisk periode på et år.

DS/EN 15251 [2007] giver ikke nogen eksempler på om gradtimerne, over den acceptable grænse, for den varme periode lægges sammen med gradtimerne for den kolde periode. Hvilket højst sandsynligt skyldes der ikke vides nok omkring dette område endnu, og mere forskning er nødvendigt. I Danmark har vi hidtil brugt de vejledende værdier angivet i DS 474 [1993], til bestemmelse af de maksimalt tilladelige overskridelse af de øvre temperaturgrænser, som foreskrive 100 timer ved 26°C og 25 timer ved 27°C.

⁸Svarer til begrebet graddage, som bruges ved energi beregninger

Metode C: PPD-vægtede kriterie

Metoden her ser på den tid hvorover den aktuelle PMV overskrider komfortgrænserne er vægtet med en faktor, der er en funktion af PPD. Startende med en PMV-distribution over et år samt relationen mellem PMV og PPD, kan følgende vægtfaktor beregnes med nedenstående ligning:

$$\text{Vægtfaktor } (wf) = \frac{PPD_{\text{aktuel PMV}}}{PPD_{\text{PMV grænse}}} \quad (2.18)$$

hvor

$$\begin{aligned} PPD_{\text{aktuel PMV}} &= \text{PPD der tilsvare den aktuelt beregnede PMV} \\ PPD_{\text{PMV grænse}} &= \text{PPD der tilsvare den valgte PMV grænse} \end{aligned}$$

Vægtnings-tiden er opsummeret for en karakteristisk periode på et år for f.eks. hver time.

$$\text{Varm periode: } \sum_{n_{beg}}^{n_{end}} wf \cdot \text{tid} \quad \text{for } PMV > PMV_{\text{øvregrænse}} \quad (2.19)$$

$$\text{Kold periode: } \sum_{n_{beg}}^{n_{end}} wf \cdot \text{tid} \quad \text{for } PMV < PMV_{\text{nedregænse}} \quad (2.20)$$

Summeringen af produktet "vægtfaktor · tid" kaldes 'vægtede tid' i enheden timer. Værdierne kan bruges til langsigtet evaluering af komfortkriterier ved en fastsat maksimal tilladt procenoverskridelse. [Olesen og Parsons, 2002]

Nedenstående tabel 2.6 illustrerer konceptet af grad-timer (metode B) og PPD-vægtede timer (metode C). Vægtfaktoren er baseret på temperaturforskelle (wf (°C)) og PPD; wf (PPD) i tabel 2.6 er vist for et komfortområde mellem 23-26 °C svarende til siddende arbejde (1,2 met) og let sommer beklædning (0,5 clo). For temperaturer over eller under dette valgte interval (23-26 °C \approx PPD \leq 10% - svarende til en kategori II bygning) vil antallet af timer blive multipliceret med vægtfaktoren (wf).

Tabel 2.6: Eksempel på vægtfaktorer baseret på temperaturforskelle og PPD som beskrevet i teksten og ligningerne (2.15)-(2.20). Med udgangspunkt i bygninger med mekanisk køling. (efter [DS/EN 15251, 2007])

	Temperatur [°C]	PPD [%]	Vægtfaktor	
			wf (°C)	wf (PPD)
Kold	20	47	3	4,7
	21	31	2	3,1
	22	19	1	1,9
Neutral	23	10	0	0
	24	<10	0	0
	25	<10	0	0
	26	10	0	0
Varm	27	19	1	1,9
	28	31	2	3,1
	29	47	3	4,7

Som det ses af ovenstående tabel er vægtningen direkte proportional med temperaturen og PPD. Med andre ord; en time med 20% utilfredse tæller dobbelt så meget som en time med 10% utilfredse. Jævnfør van der Linden et al. [2002] er der ikke udført direkte undersøgelser af brugernes accept af det termiske indeklima i sammenhæng med 'grad timer' og 'PPD timer'. Ikke desto mindre kan det forventes at vægtede timer relaterer bedre til graden af brugernes indeklimaaccept end de ikke-vægtede timer [van der Linden et al., 2002].

Det kan endvidere ses af tabel 2.6 at ved brug af PPD-vægtfaktoren vil det resultere i et større antal timer på en årsberegning.

For PMV-værdier over $\pm 2,0$ er vægtfaktoren beregnet på samme måde. Selvom Fangers PMV-model kun er anvendelig i området $-2,0 < PMV < +2,0$ [DS/EN ISO 7730, 2006], skal dette ikke ses som en ulempe ved vurderingen af det langsigtede termiske indeklima. Desuden bør timer, der overskrider $PMV = \pm 2,0$ ikke forekomme i en bygning og under alle omstændigheder vil dette ikke optræde i bygninger, der imødekommer de opstillede kriterier i klasserne I, II, III og IV. Hvis PMV-værdier over $\pm 2,0$ forekommer i beregningen, skal det slå hårdt igennem på resultatet. [van der Linden et al., 2002]

Ydeevneindikator

Udover metoderne beskrevet i standarderne DS/EN 15251 [2007] og DS/EN ISO 7730 [2006], er det også valgt at fokusere på brugen af ydeevneindikatoren, som ligeledes gør brug af PMV- og PPD-indekset til evaluering af langsigtede forhold. PMV- og PPD-indekset er en bedre direkte indikator for det termiske indeklima end eksempelvis den operative indetemperatur, og på baggrund heraf opstiller Brohus et al. [2006] ydeevneindikatorer for langsigtet evaluering af såvel det termiske som atmosfæriske indeklima.

$$PI_{Kum} = \int_{\tau_{start}}^{\tau_{slut}} CI(\tau) d\tau \approx \sum_{n_{start}}^{n_{slut}} CI(\tau) \Delta\tau \quad (2.21)$$

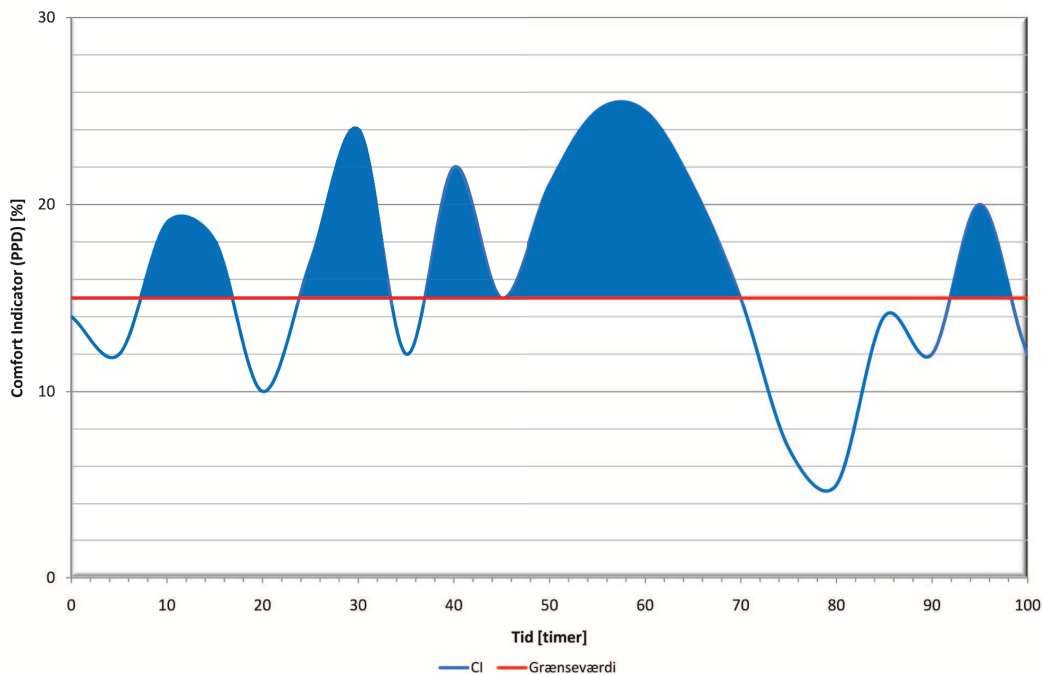
$$PI_{Kum,OA} = \int_{\tau_{start}}^{\tau_{slut}} z(\tau) d\tau \approx \sum_{n_{start}}^{n_{slut}} z(\tau) \Delta\tau \quad (2.22)$$

$$z(\tau) = \begin{cases} CI(\tau) - A & \text{hvis } CI(\tau) > A \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (2.23)$$

hvor

PI_{Kum}	=	Ydeevneindikator, Kumuleret	[%]
$PI_{Kum,OA}$	=	Ydeevneindikator, Kumuleret, over acceptniveau A	[%-timer]
CI	=	Komfortindikator (f.eks. PPD, PD, DR)	[%]
A	=	Acceptniveau	[CI]
τ	=	Tid	[timer]
$\Delta\tau$	=	Tidsinterval (som regel 1 time)	[timer]
τ_{start}	=	Starttid for betragtet periode	[timer]
τ_{slut}	=	Sluttid for betragtet periode	[timer]
n_{start}	=	Start-tidsskridt for betragtet periode	[timer]
n_{slut}	=	Slut-tidsskridt for betragtet periode	[timer]

Som komfortindikator, CI , kan det f.eks. vælges at bruge PPD-indekset. Ved evaluering efter ovenstående metode fastsættes et acceptniveau, A , ved brug af eksempelvis DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] eller DS/CEN/CR 1752 [2001]. PPD-værdien beregnes som funktion af tiden og fratrækkes løbende det angivne acceptniveau, hvorefter der slutteligt integreres over hele den betragtede periode. Resultatet af beregningen er et antal ”%-timer”, der kan benyttes som indikator for det termiske indeklime. Ydeevneindikatorerne (8.1) og (8.2) er udtryk for den kumulerede diskomfort samt den kumulerede diskomfort over det angivne acceptniveau i den betragtede periode. Metoden kan også benyttes til evaluering af det atmosfæriske indeklime f.eks. ved brug af antal utilfredse på grund af højt CO_2 -niveau beregnet efter DS/CEN/CR 1752 [2001] som komfortindikator. Figur 2.10 viser et opstillet eksempel på brug af ydeevneindikatorerne (8.1) og (8.2), hvor acceptniveauet for komfortindikatoren (her PPD) som eksempel er valgt til 15%.



Figur 2.10: Eksempel: Skitsering af ydeevneindikatorerne fra formlerne (8.1) og (8.2). Det farvede område angiver perioder hvor komfortindikatoren CI overskrider acceptniveauet A - i dette tilfælde sat til $PPD \leq 15\%$.

I praksis vil en gennemsnitsværdi af den valgte komfortindikator nogle gange være mere anvendelig, idet den er uafhængig af længden af den betragtede periode [Brohus et al., 2006].

$$PI_{Av} = \frac{PI_{Kum}}{\tau_{slut} - \tau_{start}} \approx \frac{PI_{Kum}}{n_{slut} - n_{start}} \quad (2.24)$$

$$PI_{Av,OA} = \frac{PI_{Kum;OA}}{\tau_{slut} - \tau_{start}} \approx \frac{PI_{Kum,OA}}{n_{slut} - n_{start}} \quad (2.25)$$

hvor

$$\begin{aligned} PI_{Av} &= \text{Ydeevneindikator, middelværdi} && [\%] \\ PI_{Av,OA} &= \text{Ydeevneindikator, middelværdi, over acceptniveau } A && [\%] \end{aligned}$$

Klassificeringen af indeklimaet angivet for stationære tilfælde i DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] eller DS/CEN/CR 1752 [2001] kan benyttes som grundlag for klassificeringen af bygninger ud fra ydeevneindikatoren. Krav om et maksimalt antal %-timer årligt inddelt i eksempelvis klasse A, B og C eller 1, 2 og 3 kan bestemmes på baggrund af forsøg, målinger og/eller politik med fokus på både indeklima, energi, miljø, økonomi, produktivitet etc.

2.5.1 ANBEFALEDE KRITERIER FOR ACCEPTABLE AFVIGELSER

DS/EN 15251 [2007] angiver anbefalede maksimale værdier for vurdering og klassificering af det termiske indeklima. Vurderingen af det termiske indeklima i en bygning foretages ved evaluering af indeklimaet i typiske rum repræsenteret ved forskellige zoner i bygningen. Det er anbefalet, at 95% af rummene skal opfylde de opstillede kriterier.

Vurderingen kan enten baseres på design, målinger eller beregninger. Idet kriteriet er bygget på øjeblikkelige værdier, skal variationer udenfor det anbefalede område accepteres i korte perioder i løbet af en dag. Derfor er det tilladeligt i 3-5% af tiden (f.eks. arbejdstiden), at de beregnede eller målte værdier overskrider grænserne. [Olesen, 2007]

Nedenfor viste tabel 2.7 viser tiden som svarer til 3%(5%) afvigelse, baseret på arbejdstimer og totale timer på et år.

Tabel 2.7: Eksempel på afvigelse udover de anbefalede grænser, svarende til 3% og 5% af tiden. Arbejdstiden for en dag er sat til 8 timer. [DS/EN 15251, 2007]

	Dag (min)	Uge (timer)	Måned (timer)	År (timer)
Arbejdstid	15/24	1/2	5/9	61/108
Total tid	43/72	5/9	22/36	259/432

Som det ses af tabel 2.7, tillades det i korte perioder at have afvigelser; i tråd med når der åbnes vinduer hvor der i korte perioder accepteres højere lufthastighed og støj. Som et eksempel er det tilladt ved en 5% afvigelse at have temperaturer over det anbefalede kriterie i 108 timer på et år, men ikke i mere end 24 min på en arbejdsdag og 2 timer på en arbejdsuge.

I den første offentlige høring af DS/EN 15251 [2007] var det kun accepteret at overskride komfortkriterierne med 3%. Der kom efterfølgende indsigelser fra Danmark om at det var en forholdsvis stor skærpelse af de vejledende værdier i DK (100 timer - svarende til ca. 5% af arbejdstiden). Derfor er den maksimale overskridelsesgrænse ikke fastsat til 3%, men derimod et interval mellem 3 og 5%. Det kan diskuteres om de 3% nogensinde vil blive brugt som maksimal grænse, når der frit kan vælges 5% istedet, hvormed der også spares på energien og omkostningerne ved byggeriet. Praktisk set burde der istedet være fastsat én maksimal grænse for de rådgivende ingeniører at skulle overholde, sådan der mindskes diskussion og tvivl omkring valget.

I Holland har de brugt en lignende metode, dog lidt højere maksimale værdier for vurdering af det termiske indeklima. Efter artiklen van der Linden et al. [2002] har de i Holland tidligere brugt en maksimal overskridelsesgrænse på 100 timer (over 25°C) af arbejdstiden ved brug af operativ temperatur som indikator. Efterfølgende har den Hollandske bygningsstyrelse (Government Building Agency of The Netherlands, GBA) i løbet af 1980'erne kommet frem til den konklusion, at ved brug af operativ temperatur som indikator for en maksimal overskridelsesgrænse, vil det resultere i dårligere termisk indeklima i bygninger med en lav termisk kapacitet i forhold til bygninger med høj termisk kapacitet. Dette kan tydeligt illustreres i en situation, hvor temperaturkriterierne overskrides indenfor den tilladte grænse på 100 timer, vil en bygning med en lille termisk kapacitet have en afgjort højere middel rumtemperaturer end en bygning med en høj termisk kapacitet. Det kan ligeledes antages, uden yderligere argumentation, at i sådanne situationer vil personerne i rummet opleve en højere termisk belastning. For at fjerne forskelligheden i fastsættelse af let og tung bygning, udviklede GBA

et kriterie der bygger på ”vægtede overskridelsestimer”, som ovenstående metode C i DS/EN 15251 [2007] og DS/EN ISO 7730 [2006].

Den hollandske metode tager udgangspunkt i Fangers PMV-ligning, hvor vægtningen er direkte proportional med PPD-værdien, ved overskridelse af en fastsat grænse på $PMV = 0,5$ ($PPD = 10\%$). Vægtfaktoren har værdien 1 for $PMV = 0,5$ ($PPD = 10\%$), og når $PMV = 1,0$ ($PPD = 26\%$) vil vægtfaktoren være 2,6 etc..

Efterfølgende har GBA fundet det nødvendigt at øge den maksimale overskridelsesgrænse på 100 timer, da et PPD-vægtede kriterie vil give flere antal timer ved en langsigtede evaluering over en karakteristisk periode på et år, som det også er vist i tabel 2.6. Hvorefter der er udført et antal computer simuleringer (f.eks. ved hjælp af BSim) til undersøgelse af dette. Det blev fundet jævnfør van der Linden et al. [2002], at en ”gennemsnits” bygning med 100 timer i overskridelse af grænsen ($PMV = 0,5$) har en middel PMV-værdi på omtrent 0,7. Hvilket medfører en PPD på 15% og en vægtfaktor på 1,5 og derfor er den anbefalede størrelse af PPD-vægtede timer (vægtede overskridelsestimer) fastsat til 150 timer ($1,5 \cdot 100$ timer).

For at finde ud af om dette er et godt udgangspunkt er der udført mange computer simuleringer for forskellige bygninger og installationer. Det viste sig ved studiet, lavet af GBA, at der er en fin overensstemmelse mellem det gamle temperatur-kriterie og det nye PPD-vægtede kriterie. Nedenstående tabel 2.8 opsummerer resultaterne ved sammenligningen fra studiet.

Tabel 2.8: Værdier for et årligt antal timer der overskrider den ”fastsatte temperatur” på $25^{\circ}C$ for PPD-vægtede timer på 150. Efter van der Linden et al. [2002]

Bygningsmasse	Ikke mekanisk køling	Mekanisk køling (maksimum)
Let bygning	70-85	95
Medium bygning	80-95	115
Tung bygning	90-110	115

For forskellige situationer, viser tabel 2.8 antallet af timer over en sommer periode, hvorover lufttemperaturen på $25^{\circ}C$ overstiges, når de har et antal PPD-vægtede timer på 150. Tabel 2.8 viser at:

- For lette bygninger er det PPD-vægtede kriterie mere strengt.
- For tungere bygninger uden køling stemmer det gamle krav godt overens med det nye (110 timer vs. 90-110 timer).
- For tungere bygninger med køling er det PPD-vægtede kriterie forsvarligt mindre strengt.

Det blev fundet gennem studiet, gjort af van der Linden et al. [2002], at der er en god overensstemmelse mellem det ”gamle” og det ”nye” kriterie.

Endvidere vil det være fornuftigt, at være endnu mere streng omkring overskridelseskriterierne ved vurdering af det termiske indeklima i en bygning med mekanisk køling, hvor vinduerne ikke kan åbnes og dermed stræbe efter maksimale overskridelsesværdier mellem 100-150 PPD-vægtede timer. Grunden til dette er at mennesker bliver mere krævende under sådanne omstændigheder, bl.a. pga. de

ikke har nogen indflydelse på indeklimaet i bygningen. På den anden side vil værdier over 150 PPD-vægtede timer være tilladeligt i bygninger med naturlig ventilation og med tilpasnings muligheder for de enkelte personer til at påvirke indetemperaturen. [van der Linden et al., 2002]

2.5.2 SAMLET VURDERING AF INDEKLIMAET

Der er brug for at kunne anvende en simpel indikator til vurdering af det samlede indeklima i en bygning, hvor samtlige fysiske og komplekse parametre som termisk, atmosfærisk, støj og lys tages med i vurderingen. Indikatoren skal efterfølgende præsenteres sammen med energi certifikatet, sådan en samlet vurdering for bygningens ydeevne kan præsenteres. Desværre findes der ikke nok viden til at gøre dette. [DS/EN 15251, 2007; Olesen, 2007]

Som Olesen [2007] pointerer vil det først og fremmest være svært at vægte den indbyrdes betydning af de forskellige parametre. Endda ved brug af estimeringsmetoden ”antal utilfredse personer”, som bruges ved evaluering af det termiske indeklima og indeluftkvalitet, vil der være store problemer. Hvilket skyldes at kriteriet for termisk indeklima bygger på et lavere niveau af antal utilfredse end kriteriet for indeluftkvalitet. Ydermere vil der for det termiske indeklima være personer der er utilfredse med det globale temperaturniveau samt personer der er utilfredse med den lokale termiske diskomfort. Ligeledes er der heller ikke nok viden om, hvordan disse to termiske indekser kan kombineres. [DS/EN 15251, 2007]

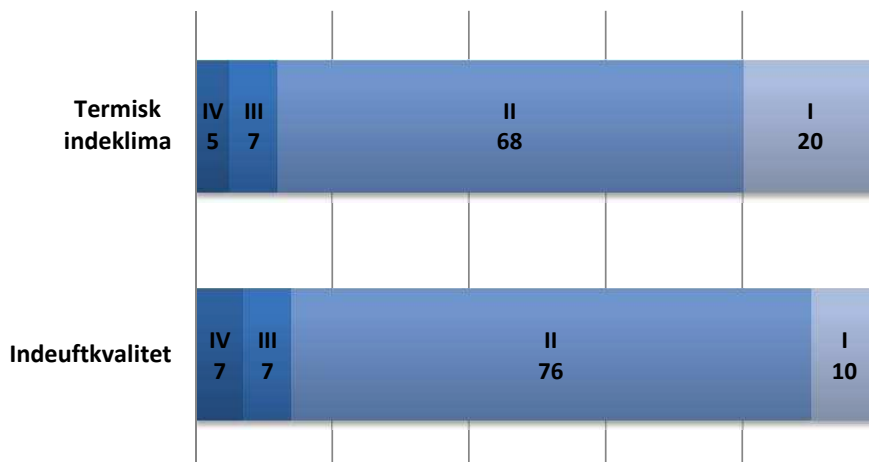
I standarden, [DS/EN 15251, 2007], er der vist tre forskellige måder at udtrykke den samlet kvalitet af indeklimaet (design kriterie, ”foot-print” og subjektiv evaluering).

Den første metode er baseret på specificeret design kriterier, hvor klassifikationen er vist ved kriterierne fra energiberegningen, som vist i tabel 2.9.

Tabel 2.9: *Klassifikation af bygningen baseret på kriterierne fra energiberegning. Efter [DS/EN 15251, 2007]*

Kriterier fra indeklimaet	Bygnings kategori	Design kriterier
Termisk indeklima, vinter	II	20-24°C
Termisk indeklima, sommer	III	22-27°C
Luftkvalitet, CO ²	II	500ppm over udeklimaet
Ventilationsrate	II	1 l/s m ²
Lys		Em > 500lux; UGR < 19; Ra > 80
Støj		Indestøj < 35dB(A); støj udefra < 55 dB(A)

En anden metode er at præsentere distributionen af de termiske forhold og indeluftkvaliteten hver for sig, også kaldt ”foot-print”. Dette kan blive gjort ved at vise den procentdel af tiden indeklimaet (temperatur, ventilationsrate eller CO₂-koncentration) er inden for hver af de fire kategorier (I, II, III og IV), baseret på f.eks. en årlig computersimulering eller målinger. Et eksempel er vist på nedenstående figur 2.11:

Indeklimaets kvalitet: % af tiden inddelt i fire kategorier


Figur 2.11: Eksempel på klassificering ved brug af "foot-print" af det termiske og atmosfæriske indeklima. Distributionen af de forskellige kategorier er vægtede med gulvarealet af de forskellige rum i en bygning. Efter DS/EN 15251 [2007]

Til sidst er der præsenteret en subjektiv evalueringmetode i standarden DS/EN 15251 [2007]. Brugere af en bygning er bedt om at udfylde et spørgeskema for et repræsentativt tidspunkt på året (vinter-forår-sommer-efterår). Procentdelen af brugere der oplever indeklimaet (termisk og luftkvalitet) som acceptabelt beregnes for hvert repræsentativt område i bygning. Et vægtede middelniveau efter antallet af personer i de forskellige zoner beregnes og bruges til klassifikationen. Mere detaljeret information kan også inkluderes ved at vise distributionen af f.eks. den termiske oplevelse på en syv-punkts skala samt vise procentdelen af personer der ønsker højere, ingen ændring og lavere rumtemperaturer. [Olesen, 2007]

Resultaterne fra en subjektiv evaluering kan efterfølgende illustreres som i tabel 2.10:

Tabel 2.10: Eksempel på brug af subjektive evaluering som klassificering af indeklimaet. Efter [DS/EN 15251, 2007]

Klassificering baseret baseret på brugernes svar	Procent						
Bruger som finder det termiske indeklima acceptabelt	85						
Bruger som finder indeluftkvaliteten acceptabel	80						
Distributionen af svar omkring termisk oplevelse	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Distribution af temperatur præference	0	5	10	53	20	10	2
	Koldere		Ingen ændring			varmere	
	20		75			5	

2.6 OPSUMMERING OG DISKUSSION

Der er i de foregående afsnit gennemgået og diskuteret metoder til vurdering af indeklimaets kvalitet i bygninger med baggrund i standarderne DS 474 [1993]; DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] og ANSI/ASHRAE 55 [2004]. Ligeledes er der præsenteret metoder til langsigtet evaluering af det termiske indeklima over en karakteristisk periode, f.eks. et år, hvor resultaterne fra hver simulering efterfølgende kan bruges ved sammenligning af forskellige designløsninger til et endeligt valg af bygningsdesign.

Standarderne for vurdering af det termiske indeklima er vel anerkendt og relativt ensartet i deres metoder (DS/EN ISO 7730 [2006], ANSI/ASHRAE 55 [2004] og DS/EN 15251 [2007]). Ved at opfylde kriterierne fuldt, vil det dog ikke garantere en 100% accept af indeklimaet for alle personer i hele bygningen pga. brugernes individuelle ønsker til det termiske miljø. En individuel kontrol af det termiske indeklima kombineret med individuel adaptivitet (beklædning, åbning af vinduer) vil imidlertid forøge brugernes accept af indeklimaet.

Ved brug af PMV-kriterier og den adaptive metode er der nogle begrænsende forudsætninger for lufthastigheden i rummet, hvilket skyldes personers oplevelse af træk. F.eks. kan det i varme situationer være gavnligt for det termiske indeklima, at øge lufthastigheden over det anbefalede niveau (afsnit 2.2.2 og figur 2.1). Effekten af dette er til dels inkluderet ved brug af PMV-indekset (Appendiks B.2), da lufthastigheden indgår direkte i ligningen. Både ANSI/ASHRAE 55 [2004], DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007] accepterer øget lufthastighed i opholdszonen, op til 0,8 m/s ved siddende aktivitet, såfremt styringen af den øgede lufthastighed er under individuel kontrol af brugeren. [Olesen, 2004]

Feltstudier har vist at for opvarmede og luftkonditionerede bygninger stemmer brugen af PMV- og PPD-indekset godt overens med observationerne i bygningerne. Men for bygninger uden mekanisk køling i varme klimaer, hvor det er nødvendigt om sommeren at gøre brug af naturlig ventilation ved åbning af vinduer og/eller hybrid ventilation, lader der til at være en yderligere adaptivitet som ikke kan forklares udelukkede ved brugernes adaptation, som f.eks. ændring af beklædningen eller den lokale lufthastighed. Som bl.a. Olesen og Parsons [2002] og Olesen [2004] diskuterer, skyldes den yderligere adaptivitet til dels personernes aktivitetsniveau, som er meget svært at måle i feltundersøgelser, men hovedsageligt den psykologiske adaptation i form af varierende forventninger til indeklimaet, som følge af den personlige kontrol samt ”termisk hukommelse”.

Kriterierne for acceptabel maksimal rumtemperatur, der er præsenteret i standarderne, tager ikke indflydelsen af det termiske indeklima med i vurderingen af brugernes præstationsevne. Mange studier har vist en betydningsfuld indflydelse af temperatur, ventilationsrate, støj og lysforhold på menneskers præstationsevne [Seppänen, 1999; Seppänen et al., 2006a; Wargocki et al., 2006] (kapitel 5). Ved en økonomisk vurdering af kompromiset mellem indeklima- (f.eks. stigende temperatur om sommeren), komfort- og energi-ydeevne, vil det være bedre hvis brugernes præstationsevne medtages i den samlede vurdering. Der er flere uafhængige studier, som har fundet en relation mellem f.eks. ventilationsrate og præstationsevne samt temperatur og præstationsevne. Det vil derfor i en fremtidig standard være godt at kunne tage højde for menneskers præstationsevne ved vurdering af såvel momentane som langsigtede forhold.

Et andet spørgsmål og emne der er diskuteret ovenfor i afsnit 2.5, er hvorvidt det skal være tilladt for en begrænset periode af tiden at acceptere forhold udenfor den specificerede klasse, eller om det termiske indeklima skal være inden for det givne område 100% af tiden. For hver af de termiske komfortindikatorer (PMV/PPD, DR, strålingstemperatursymmetri etc.) samt enkelte atmosfæriske

indikatorer (PD(CO₂)), vil det være muligt - enten via målinger eller beregninger - at bestemme en faktor "%-utilfredse × tid" for dermed at tage tidsaspektet (sæson, år) og størrelsen af overskridelsen, i forhold til det opstillede komfortkriterie, med i betragtning. Med sådanne indikator(er) kan der erhverves yderligere og mere detaljeret information om indeklimaet, eller resultatet kan gives som et samlet mål/indeks for indeklimaets kvalitet.

Den nuværende metode til evaluering af langsigtede forhold, [DS 474, 1993], tager ikke størrelsen af overskridelsen med i beregningen og vil derfor ikke give tilstrækkelig information om det termiske indeklima i en bygning. Der er derfor præsenteret nye og bedre metoder, fra standarderne DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007] samt ydeevneindikatoren ([Brohus et al., 2006]), til evaluering af de langsigtede forhold, som foruden at give mere detaljerede oplysninger samtidig vil være en god fremtidig løsning til klassificering af bygninger. Ved fastsættelse af en anbefalet maksimal toleranceoverskridelse, kan der tages udgangspunkt i værdierne og metoderne udviklet af den hollandske bygningsstyrelse ([van der Linden et al., 2002] samt afsnit 2.5.1).

Termisk komfort

Nærværende kapitel skal sammen med appendiks B ses som en præsentation af den grundlæggende teori bag de metoder, der benyttes til evaluering af det termiske indeklima. Efter ovenstående præsentation af de eksisterende standarder og normer for evaluering af indeklima, tjener igangværende kapitel som "springbræt" til rapportens del II, der bl.a. omhandler adaptive modeller for termisk komfort.

Foruden en kort gennemgang af de termiske indekser: PMV, PPD, PD og DR, afsluttes nærværende kapitel med en diskussion af validiteten af komfortindikatoren, PMV, der siden udledningen har været underlagt talrige undersøgelser vedrørende nøjagtigheden heraf.

3.1 TERMISK KOMFORT - GENERELT

Baseret på de i problemanalysen omtalte komfortkriterier, har Fanger [1972] udviklet de termiske indekser PMV og PPD. Disse er udledt med baggrund i varmebalanceligningen (B.19) samt komfortligningen (B.22), og giver mulighed for evaluering af et rums termiske miljø med udgangspunkt i menneskets termiske komfort. Indekserne giver tilsammen mulighed for ved et givet aktivitetsniveau og en given beklædningsisolans, ud fra kombinationer af de fire termiske parametre: Luftfugtighed (p_a), lufttemperatur (t_a), middelstrålingstemperatur (t_{mrt}) og relativ lufthastighed (v), at estimere den termiske oplevelse. I de følgende underafsnit, præsenteres og beskrives disse termiske indekser. Der henvises til appendiks B, hvor menneskets termiske komfort samt baggrunden for de termiske indekser beskrives mere detaljeret.

En af forudsætningerne for et tilfredsstillende termisk indeklima, er at de personer som opholder sig heri er i termisk komfort. Grundlæggende for tilstedeværelsen af termisk komfort er menneskets termoreguleringsystem, der opretholder en nogenlunde konstant intern kropstemperatur ved forskellige eksterne og interne belastninger. Under stationære forhold vil der således opnås en varmebalance med omgivelserne, hvor kroppens interne varmeproduktion er lig med varmetabet til omgivelserne. De vigtigste indgående parametre i menneskets termiske komfort er [Fanger, 1972]:

- Stofskiftet (Afhængigt af aktivitetsniveauet)
- Beklædningen
- Lufttemperaturen
- Middelstrålingstemperaturen
- Lufthastigheden
- Luftfugtigheden

Med udgangspunkt i menneskets varmebalance opstiller Fanger [1972] komfortligningen (ligning (B.22)), der beskriver de kombinationer af de ovennævnte parametre, for hvilke der vil medføre

termisk komfort.

Til evaluering af det termiske indeklima i praksis, præsenterer Fanger [1972] to termiske indekser, der præsenteres i det følgende.

3.2 PREDICTED MEAN VOTE - PMV

I praksis vil der forekomme situationer, hvor komfortligningen (B.22) ikke opfyldes. Til vurdering af den termiske oplevelse præsenterer Fanger [1972] PMV-indekset, der angiver den forventede midelvotering af det termiske indeklima for en stor gruppe mennesker på den psyko-fysiske skala:

-3	Koldt	(Cold)
-2	Køligt	(Cool)
-1	Let køligt	(Slightly cool)
0	Neutral	(Neutral)
+1	Let varmt	(Slightly warm)
+2	Varmt	(Warm)
+3	Hedt	(Hot)

Indekset er udledt på basis af komfortligningen hvor menneskets subjektive vurdering af hhv. kulde og varme blev eksperimentelt relateret til belastningen på menneskets termoreguleringsystem. PMV kan beregnes af ligning (B.25) (appendiks B).

3.3 PREDICTED PERCENTAGE OF DISSATISFIED - PPD

Til estimering af det antal personer, der vil føle utilfredshed med det termiske indeklima, præsenterer Fanger [1972] PPD-indekset. Indekset giver netop en kvantitativ forudsigtelse af det antal personer, der vil føle termisk diskomfort, og er udledt eksperimentelt på baggrund af PMV-indekset. Det forventede procentvise antal utilfredse, PPD, kan enten aflæses på figur B.2 eller beregnes efter ligning (B.27) (appendiks B).

I danske såvel som udenlandske normer, f.eks. DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/CEN/CR 1752 [2001] samt ANSI/ASHRAE 55 [2004], udtrykkes de vejledende krav til det termiske indeklima inddirekte ved en maksimalt tilladelig PPD-værdi, og i de fleste tilfælde kategoriseret ved bygningsklasse (f.eks. A, B eller C).

3.4 LOKAL DISKOMFORT

Komfortindikatorerne, PMV og PPD, angiver det forventede antal utilfredse i en stor mængde og således oplevelsen af det termiske indeklima som helhed. Der kan på trods af generel tilfredshed med det termiske indeklima optræde lokal diskomfort. Dette være sig træk, strålingstemperatursymmetri samt temperaturgradienter. I DS/EN ISO 7730 [2006] angives metoder til vurdering af det forventede antal utilfredse som følge af lokal termisk diskomfort, og er endvidere gengivet i appendiks B i nærværende rapport.

Senere i nærværende kapitel præsenteres en model for estimering af antal tilfredse med den aktuelle lokale lufthastighed, såfremt personerne har mulighed for egenkontrol over denne (ligning (3.1)).

3.5 PMV-MODELLENS VALIDITET

Siden Fanger [1972] opstillede PMV-modellen har denne været underlagt talrige empiriske undersøgelser, hvor den beregnede PMV sammenlignes med AMV¹. Undersøgelser foretaget i laboratorier (klimakamre) har ofte understøttet PMV-modellen, hvorimod feltundersøgelser viste større afvigelser mellem PMV og AMV bl.a. i form af en overestimering af personernes varmeoplevelse [Olesen og Parsons, 2002, s. 539]. Blandt de gældende normer og standarder er DS/EN ISO 7730 [2006], indeholdende metoder til beregning af PMV- og PPD-indekset samt estimering af lokal diskomfort. I denne præsenteres tabelværdier af PMV-indekset angivet med to decimalers nøjagtighed, hvilket nødvendigvis må frembringe diskussionen om, i hvor detaljeret en grad PMV-indekset skal beregnes og angives (DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks E, s. 26]). I de følgende afsnit vil de største fejlkilder i vurderingen af den termiske oplevelse ved brug af PMV-indekset blive præsenteret og diskuteret.

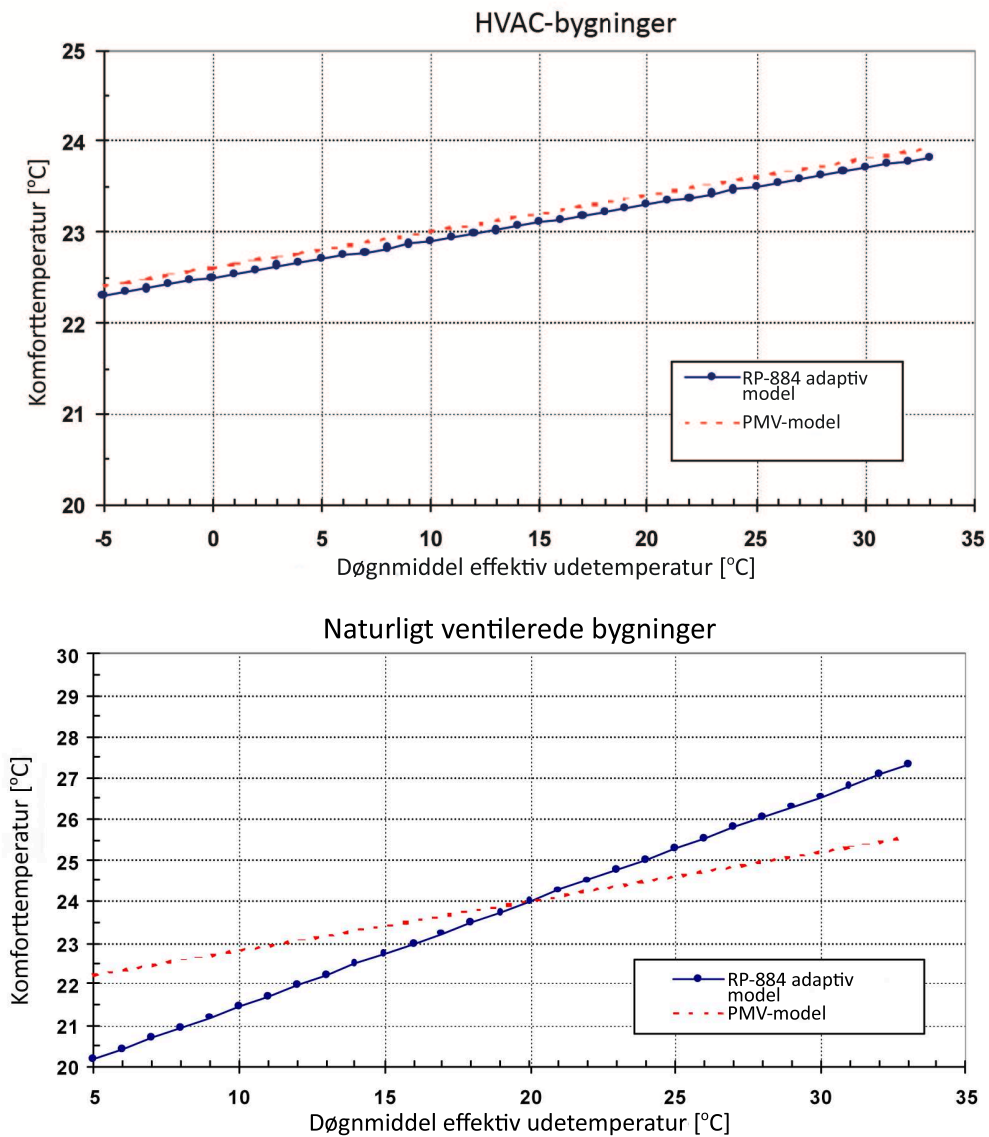
3.5.1 UNDERSØGELSER AF PMV-INDEKSET

Som nævnt ovenfor, har PMV-indekset løbende været underlagt talrige undersøgelser i såvel klimakamre (kontrolleret miljø) som rigtige bygninger. Resultaterne af disse undersøgelser, har udmøntet sig i forskellige konklusioner vedrørende PMV-modellens validitet og beregningsnøjagtighed.

I forskningsprojektet RP-884, udført med støtte fra ASHRAE², er der på baggrund af over 20.000 observationer i ca. 160 bygninger placeret forskellige steder i verden bl.a. undersøgt sammenhængen mellem PMV-modellens estimering af det oplevede indeklima og det aktuelle oplevede indeklima [de Dear et al., 1997]. Resultaterne heraf påpegede bl.a. en stor afvigelse mellem PMV og AMV i situationer hvor indetemperaturen var høj. Følgende grafer er et udpluk fra [de Dear et al., 1997]:

¹Actual Mean Vote / aktuel middelvotering

²American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.



Figur 3.1: Resultater fra forskningsprojektet, RP-884, hvor neutraltemperaturen afbildes som funktion af døgnmiddel effektiv udetemperatur (døgnmiddel af ET^* beregnet efter (3.2)). Graferne viser hvordan PMV overestimerer det oplevede termiske indeklima i forhold til AMV i naturligt ventilerede bygninger ved stigende indeklimaer (efter [de Dear et al., 1997])

Som det fremgår af figur 3.1 skelnes der mellem luftkonditionerede (HVAC) og naturligt ventilerede bygninger. Der beskrives i projektet en tilsyneladende tendens til et højere acceptniveau for indetemperaturer i forhold til personernes termiske komfort i naturligt ventilerede bygninger. Forklaringen herpå ligger ifølge de Dear et al. [1997] bl.a. i muligheden for aktivt at påvirke indeklimaet i naturligt ventilerede bygninger gennem åbning af vinduer/døre sammen med forventningen til indeklimaet. I fuldt luftkonditionerede bygninger, vil der forekomme en langt højere forventning til det aktuelle

termiske indeklima, hvorfor der accepteres lavere temperaturer her [de Dear et al., 1997, s. 12]. På baggrund heraf udviklede de Dear et al. [1997] adaptive modeller for estimering og evaluering af termisk komfort i hhv. luftkonditionerede og naturligt ventilerede bygninger. Disse vil blive præsenteret og diskuteret i kapitel 4 sammen med yderligere undersøgelser samt adaptive modeller bl.a. fra det europæiske SCATs-projekt.

I modsætning til de Dear et al. [1997] fandt Nicol og Humphreys [2002b] ikke denne sammenhæng. I deres undersøgelser³ viste der sig ingen nævneværdig forskel i PMV-modellens resultater i hhv. luftkonditionerede og naturligt ventilerede bygninger, der vil lede til en nødvendig kategorisering af bygninger i hhv. luftkonditionerede og naturligt ventilerede [Nicol og Humphreys, 2002b, s. 682]. Den tilsyneladende større nøjagtighed af PMV-modellens resultater i luftkonditionerede bygninger kan jf. Nicol og Humphreys [2002b] tilskrives det snævre temperaturinterval, der forekommer i denne type bygninger og i langt mindre grad forventningen til indeklimaet.

Af det ovenstående fremgår det tydeligt, at der ikke er enighed om hvorvidt der entydigt bør skelnes mellem hhv. naturligt ventilerede og luftkonditionerede bygninger, ved brug af PMV-modellen. de Dear et al. [1997] samt Nicol og Humphreys [2002b] benytter de samme data, men opnår ikke samme konklusion med hensyn til omtalte kategorisering.

I de følgende underafsnit, vil bl.a. PMV-modellens følsomhed overfor estimeringen af de indgående parametre samt menneskets opfattelse af termisk komfort bliver diskuteret sammen med interaktionen mellem global og lokal diskomfort blive diskuteret nærmere.

3.5.2 OPFATTELSE AF TERMISK KOMFORT

PMV-modellen er udledt på baggrund af undersøgelser foretaget under velkontrollerede stationære forhold i klimalaboratorier. Der må derfor forventes en vis afvigelse mellem det af PMV-modellen beregnede middel-komfortniveau og det aktuelle middel-komfortniveau for en stor gruppe mennesker (AMV). Ifølge PPD-indekset, vil antallet af utilfredse aldrig være mindre en 5%, hvilket tilskrives de varierende kriterier den enkelte person har for den individuelle termiske komfort. Personer har forskellige opfattelser af termisk komfort og fortolker derfor den psyko-fysiske ASHRAE-skala (appendiks 3.2) individuelt, hvilket bl.a. kan afhænge af nationalitet, kulturelle forskelle mv. [Nicol og Humphreys, 2002b, s. 669]. Endvidere bemærkes forskellen mellem de omgivelser der skabes i klimakamrene, og de forhold der rent faktisk er i de enkelte bygninger. Dette vil selvsagt føre til en afvigelse mellem PMV og AMV.

3.5.3 PMV-LIGNINGEN

Som nævnt ovenfor, er opstillingen af PMV-ligningen baseret på opretholdelse af menneskets varmebalance med omgivelserne under stationære konditioner, og endvidere forbundet med den psyko-fysiske ASHRAE-skala gennem målinger og vurderinger foretaget i klimakamre under velkontrollerede forhold [Fanger, 1972, s. 110]. Da indeklimaet og påvirkningerne fra personer der opholder sig heri varierer dynamisk med tiden, vil det være svært, om muligt, at beskrive menneskets termiske komfort præcist ud fra en stationær tilgang til varmebalancen. Menneskets termoreguleringssystem vil løbende søge at opretholde en konstant intern kropstemperatur bl.a. ved sammentrækning og udvidelse af blodkarrene (ændring af overfladetemperaturen af huden og derved varmetab til omgivelserne),

³Behandling af data fra [de Dear et al., 1997]

fordampning af sved og i mere ekstreme tilfælde kulderystelser (muskelsammentrækninger) [Fanger, 1972; Nicol og Humphreys, 2002b]. Dette er nærmere beskrevet i appendiks B.2.1.

Foruden det faktum at PMV-ligningen er opstillet for stationære tilstande, kommenterer Nicol og Humphreys [2002b] metoden hvorpå Fanger [1972] udtrykker termisk diskomfort. Den termiske belastning af de indgående kropsfunktioner såsom intern varmeproduktion, fordampning af sved mv., vil medføre en afvigelse fra komforttilstanden, hvilket antages som værende en indikator for graden af diskomfort [Fanger, 1972, s. 111]. Kritikken fremført af Nicol og Humphreys [2002b] ligger således i, at en ændring af aktivitetsniveauet, hvilket direkte vil resultere i en ændring af den interne varmeproduktion, vil blive tolket som diskomfort. Ifølge Olesen og Parsons [2002] vil en bedre indgangsvinkel være at forudsige afvigelsen fra den neutrale tilstand på baggrund af netop kroppens aktuelle tilstand i form af hudens overfladetemperatur samt svedafgivelsen.

Nicol og Humphreys [2002b] har ved en statistisk analyse af PMV-indekset, påpeget en systematisk fejl heri. For at fjerne denne opstilles en korrektion af det konventionelle PMV-indeks hvilken skal fjerne den systematiske fejl. Dog er modellen kun opstillet som eksempel, og kan derfor ikke benyttes i nærværende projekt. For mere information henvises der til beskrivelsen i Nicol og Humphreys [2002b].

Der er endvidere efterfølgende opstillet alternative modeller for den menneskelige varmebalance under dynamiske forhold f.eks. [Fiala et al., 1999]. Disse er dog meget beregningstunge, idet der benyttes meget komplekse modeller. Disse dynamiske modeller vil ikke blive behandlet videre i nærværende rapport.

3.5.4 ESTIMERING AF INDGÅENDE PARAMETRE

PMV-indekset forudsiger som beskrevet tidligere den forventede middelvotering af det termiske indeklima ud fra kombinationer af aktivitetsniveauet, beklædningsisolansen samt de fire kendte indeklimaparametre: lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighed samt luftfugtighed. Ifølge Nicol og Humphreys [2002b] medfører estimeringen af alle disse variable store afvigelser mellem PMV og AMV. Disse er dog ikke uafhængige af hinanden, hvorfor en vurdering af fejlen ved kombinationer af de enkelte parametre må baseres på yderligere undersøgelser.

Foruden de parametre der benyttes direkte i PMV-ligningen, er der i forbindelse med udledningen heraf foretaget en række forudsætninger og simplificeringer af komplekse fysiske, fysiologiske og psykiske systemer [Fanger, 1972; Nicol og Humphreys, 2002b]. Alle disse bidrager til usikkerheden i beregningen af PMV-indekset.

Nicol og Humphreys [2002b] har på baggrund af næsten 17.000 komfortvoteringer undersøgt indflydelsen af aktivitetsniveauet, beklædningsisolansen samt de fire indeklimaparametre (lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, lufthastighed og luftfugtighed) på PMV i forhold til AMV. I de følgende underafsnit, vil resultaterne heraf blive præsenteret sammen med simple følsomhedsanalyser ved OAT-metoden⁴, hvor de enkelte parametre varieres enkeltvis ved samtidig fastholdelse af de resterende parametre.

⁴One-At-a-Time

Aktivitetsniveau og beklædningsisolans

Det er især fastsættelsen af aktivitetsniveauet samt beklædningsisolansen, der har stor indflydelse på resultatet af PMV-beregningen. Ved estimering af disse to personparametre kan DS/EN/ISO 8996 [2004] samt DS/EN/ISO 9920 [2007] benyttes for hhv. aktivitetsniveau og beklædningsisolans. Endvidere indeholder DS/EN ISO 7730 [2006] tabellerede værdier for beklædningsisolansen, men da disse er fundet på baggrund af målinger med stillestående termiske manikiner, vil der forekomme afvigelser mellem de reelle og eksperimentelt bestemte isolanser. I det følgende diskuteres estimeringen af beklædningsisolans samt aktivitetsniveau og disses indflydelse på beregningen af PMV.

Estimering af beklædningsisolansen kan foretages ved brug af DS/EN/ISO 9920 [2007] indeholdende en omfattende database over beklædningsisolanser baseret på målinger med termiske manikiner benyttes. Jf. DS/EN ISO 7730 [2006] er gyldighedsintervallet for beklædningsisolansen: 0-2,0 clo, men undersøgelser foretaget af Nicol og Humphreys [2002b] har vist at PMV-beregningen er fri for nævneværdige fejl i intervallet 0,3-1,2 clo, men ved lettere eller tungere påklædning overestimeres menneskets følelse af varme. Især var fejlen stor ved tung påklædning (over 1 skala-enhed på ASHRAE-skalaen).

Foruden estimeringen af beklædningsisolansen har undersøgelser vist, at isolansen for et beklædningsstykke har en standardafvigelse i forhold til middelværdien på ca. 30% [Alfano og d' Ambrosion, 1991, s. 207]. En samlet beklædningsisolans på 1,0 clo kan således variere med 0,3 clo.

Yderligere undersøgelser har endvidere vist, at indflydelsen på beklædningsisolansen fra parametre såsom krops- og luftbevægelse er så stor, at det er nødvendigt at medtage effekten herfra i forbindelse med modeller for komfort [Havenith et al., 2002]. DS/EN/ISO 9920 [2007] angiver, at pumpeeffekten⁵ kan medføre en reduktion af beklædningsisolansen i intervallet 5-50%, men de tabellerede isolanser medtager ikke dette, da de enkelte værdier er bestemt under stationære forhold, med en fastlåst termisk manikin [Havenith et al., 2002, s. 582]. Størrelsen af reduktionen kan kun bestemmes empirisk ved forsøg med termiske manikiner (eller personer) i bevægelse ved varierende aktivitetsniveauer. Til korrigering af beklædningsisolansen som følge af krops- og/eller luftbevægelser, er der udviklet modeller på baggrund af forsøg med kombinationer af siddende og "gående" termiske manikiner udsat for varierende lufthastigheder i frontal retning ved forskellige kombinationer af beklædning [Holmér et al., 1999; Havenith et al., 1999]. Gennem modellerne beregnes den korrigerede beklædningsisolans, som funktion af lufthastigheden, ganghastigheden (modelleret som funktion af metabolismen/aktivitetsniveauet) samt isolansen af hhv. tøj og luftlaget ved overfladen af tøj. Varmetabet fra kroppen via konvektion og stråling er direkte afhængigt af beklædningsisolansen, hvorfor en nedjustering af denne medfører et øget strålings- og konvektionsvarmetab.

Udover at påvirke strålings- og konvektionsvarmetabet, influerer krops- og luftbevægelser også på tøjets fordampningsmodstand [Havenith et al., 2002, s. 584]. PMV-modellen forudsætter, at al sved der udskilles fra huden fordampes gennem tøj, og tager således ikke hensyn til fordampningsmodstanden i tøj men benytter middeltemperaturen af hudoverfladen samt svedproduktionen som komfortbetingelser [Fanger, 1972; Havenith et al., 2002]. Som en sidebemærkning hertil kan det nævnes, at de termiske indekser, ET^{*6} og SET^{*7} , tager hensyn til dette, hvilket er beskrevet nærmere i afsnit 3.8. Det er alment anerkendt, at fugtigheden af hudoverfladen er en vigtig (og begrænsende) faktor for termisk komfort, og en beregning heraf er et nødvendigt ekstra komfortkriterie [Havenith et al., 2002, s. 585]. Især vil tøj med høj fordampningsmodstand (renrumstøj, operationskitler mv.) medføre en øget fugtighed af hudoverfladen, hvilket vil føre til diskomfort, hvorfor tøjets fordampningsmod-

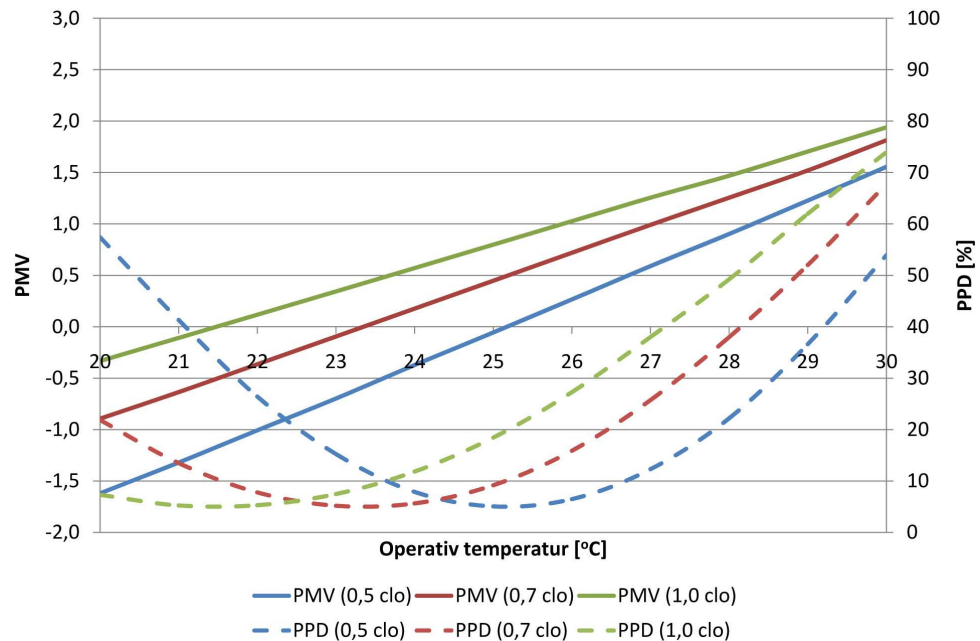
⁵Luftudveksling med omgivelserne gennem åbninger i tøj (krave, revers, ærmer mv.), der fører til øget varmetab.

⁶new Effective Temperature / ny Effektiv Temperatur

⁷new Standard Effective Temperature /ny Standard Effektiv Temperatur

stand i disse situationer bør medtages - enten ved direkte integrering i PMV-modellen (forbedret model for beregning af evaporativ varmemodstand som beskrevet ovenfor) eller ved separat beregning af fugtigheden af huden og korrigering herfor [Havenith et al., 2002]. Modellerne for korrigering af beklædningsisolansen samt fordampningsmodstanden af tøjet vil blive præsenteret og diskuteret senere i afsnit 2.2.3. Ydermere vil der i afsnit 4.2 blive præsenteret yderligere dynamiske modeller for estimering af beklædningsisolansen.

For at belyse PMV-modellens følsomhed overfor estimeringen af beklædningsisolansen, er der foretaget simple beregninger af sensitiviteten af hhv. PMV og PPD ved varierende operative temperaturer og tre forskellige beklædningsisolanser. Resultatet heraf fremgår af figur 3.2



Figur 3.2: PMV-modellens sensitivitet overfor ændringer i beklædningsisolansen. Endvidere vises den tilsvarende PPD-værdi. Følgende inputparametre til PMV-modellen er benyttet: $t_a = t_{mrt}$; $RH = 50\%$; $v_a = 0,15 \frac{m}{s}$; $M = 1,2 \text{ met}$

Af figur 3.2 fremgår det, at ved forøgelse af beklædningsisolans fra 0,5 til 1,0 clo forskydes neutraltemperaturen ($PMV=0$) med ca. $3,5^\circ\text{C}$. Selv ved 0,7 clo, er neutraltemperaturen forøget med ca. 2°C . Heraf ses det, at PMV-modellen er ret følsom overfor fejlestimeringer af beklædningsisolansen, hvilket diskuteres yderligere i det nedenstående.

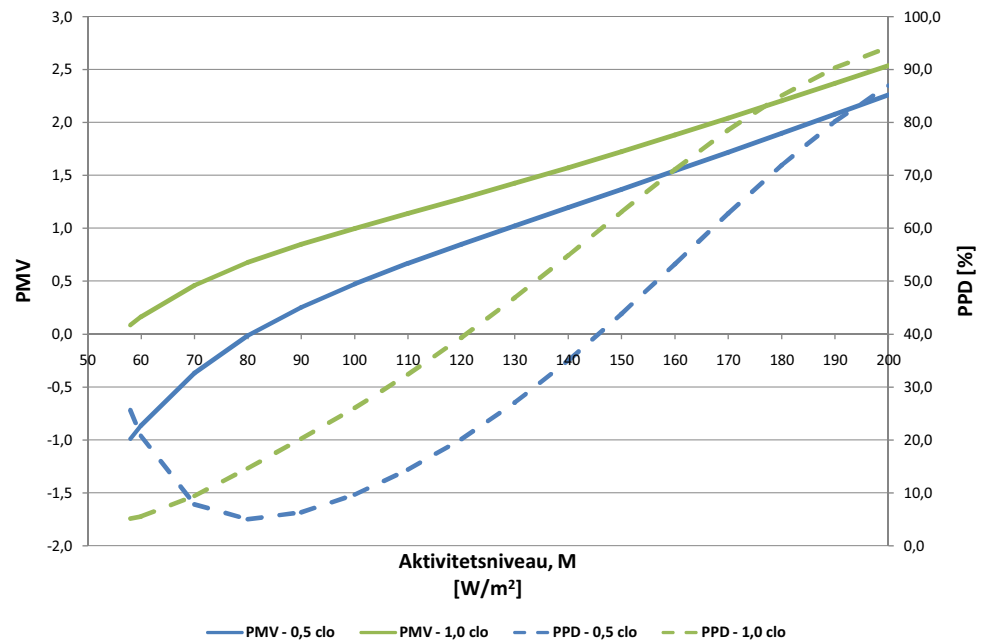
Op til et aktivitetsniveau på ca. 1,4 met giver PMV udmærkede resultater, men ved stigende aktivitet, bliver fejlen stor. Ved et aktivitetsniveau på 1,8 met (let aktivitet) overestimeres oplevelsen af varme med ca. 1 skala-enhed på den psyko-fysiske ASHRAE-skala. Det skal her kommenteres, at ifølge Fanger [1972] og DS/EN ISO 7730 [2006] er gyldighedsområdet for aktivitetsniveauet 0,8-4,0 met. [Olesen og Parsons, 2002; Nicol og Humphreys, 2002b, s. 540-541, 670-673]

Estimeringen af aktivitetsniveauet kan foretages ved brug af DS/EN/ISO 8996 [2004], der indeholder seks metoder hertil fordelt i tre niveauer (I-III) efter nøjagtighed. De enkelte metoder er angivet i følgende tabel.

Tablet 3.1: Metoder til estimering af aktivitetsniveau inddelt i tre niveauer (I-III) efter nøjagtighed. I tilfælde af varierende belastningsprofiler, anbefales det at foretage en tidsvægtning af de enkelte opgaver. DS/EN/ISO 8996 [2004]

Metode	Nøjagtighed	Undersøgelse ved arbejdspladsen
I A: Klassificering efter aktivitet B: Klassificering efter beskæftigelse/erhverv	Grov information hvor risikoen for fejl er stor	Ikke nødvendig Information om teknisk udstyr, arbejdsorganisering
II A: Brug af tabeller for gruppevurdering B: Brug af tabeller for specifikke aktiviteter C: Brug af hjerterytme under definerede betingelser	Stor fejlrisiko: nøjagtighed $\pm 15\%$	Tidsundersøgelse nødvendig Ikke nødvendig
III Måling	Risiko for fejl indenfor målingernes og tidsundersøgelsernes nøjagtighed: nøjagtighed $\pm 15\%$	Tidsundersøgelse nødvendig

Af ovenstående tabel 3.1 ses det, at metoderne er omfattende og sammen med data fra DS/EN/ISO 8996 [2004], vil dette egne sig godt til integrering i computerprogrammer såsom BSim etc. [Havenith et al., 2002, s. 588]. Målinger foretages ved direkte eller inddirekte kalorimetri. Ved direkte kalorimetri placeres en person i en lukket og isoleret kabine, hvorefter varmeproduktionen ved varierende aktivitetsniveauer måles. Ved vurdering og estimering af termisk indeklime, vil det i praksis være mere eller mindre umuligt at foretage direkte målinger af metabolismen ved denne metode. Ved inddirekte kalorimetri måles mængden af oxygen i personens udåndingsluft, hvorved metabolismen kan estimeres ud fra sammenhængen mellem omsat oxygen og aktivitetsniveau. Ved estimeringen af aktivitetsniveauet er spørgsmålet således, hvor nøjagtigt dette skal foretages. Ved klassificeringen af bygninger i kategorierne A, B og C i DS/EN ISO 7730 [2006, annek A], foreslås disse med en PMV-nøjagtighed på 0,3. Derfor må estimeringsnøjagtigheden af aktivitetsniveauet (og for den sags skyld beklædningsisolansen) være i tråd hermed. Følgende graf viser PMV-modellens sensitivitet overfor aktivitetsniveauet ved hhv. let påklædning (0,5 clo) og alm. jakkesæt (1,0 clo).



Figur 3.3: PMV-modellens sensitivitet overfor ændringer i aktivitetsniveauet. Endvidere vises den tilsvarende PPD-værdi. Følgende inputparametre til PMV-modellen er benyttet: $t_a = t_{mrt} = 24^\circ\text{C}$; $P_a = 1488\text{Pa}$ (svarende til ca. 50%RH ved t_a); $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Som det fremgår af figur 3.3, vil en fejlestimering af aktivitetsniveauet på 15% have stor indflydelse på PMV - især ved aktivitetsniveauer omkring $58 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (siddende), hvor hælningskoefficienten er størst. Som eksempel kan det ses, at hvis metabolismen for en person med let beklædning (0,5 clo) estimeres til $80 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, beregnes PMV til '0' svarende til PPD=5%. Hvis der forudsættes en usikkerhed i estimeringen af aktivitetsniveauet på $\pm 15\%$ (jf. [DS/EN/ISO 8996, 2004]) ses det, at den reelle PMV kan ligge fra -0,4 til 0,25 svarende til en PPD-værdi på mellem 6,5 og 10% (for aktivitetsniveauer på hhv. 68 og $92 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$). Dette kan f.eks. betyde, at en klassificering af indeklimaet som klasse A jf. DS/EN ISO 7730 [2006, annek A](PPD<6%) kan overskrides som følge af usikkerheden på estimeringen af aktivitetsniveauet.

Efter ovenstående diskussion vedr. usikkerheden i estimering af hhv. beklædningsisolans og aktivitetsniveau er det nærliggende at undersøge den samlede effekt fra usikkerheden i forbindelse med estimeringen af såvel beklædningsisolans som aktivitetsniveau. Følgende tabel viser påvirkningen af hhv. PMV- og PPD-værdien i tilfælde af en vurderet usikkerhed i fastlæggelsen af hhv. beklædningsisolans og aktivitetsniveau på $\pm 15\%$ jf. DS/EN/ISO 8996 [2004]; Olesen og Parsons [2002] og Havenith et al. [2002].

Tabel 3.2: Påvirkning af PMV- og PPD-indeks med udgangspunkt i to aktivitetsniveauer, 58(siddende) og 100 $\frac{W}{m^2}$ (let aktivitet) hvor hhv. beklædningsisolans og aktivitetsniveau er ændret med usikkerheden herpå ($\pm 15\%$) (efter [Olesen og Parsons, 2002])

Aktivitetsniveau, M [$\frac{W}{m^2}/met$]	Beklædningsisolans, I_{cl} [$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}/clo$]	PMV [-]	PPD [%]
49/0,85	0,132/0,85	-0,6	13,5
58/1,00	0,155/1,00	0,1	5,2
67/1,15	0,178/1,15	0,5	11,3
85/1,46	0,132/0,85	0,6	13,0
100/1,72	0,155/1,00	1,0	26,1
115/1,98	0,178/1,15	1,3	40,2

$$t_a = t_{rmt} = 24^\circ C; P_a = 1488 Pa \text{ (svarende til ca. 50\%RH ved } t_a); v = 0,15 \frac{m}{s}$$

Som det klart fremgår af tabel 3.2, har en skønnet usikkerhed på $\pm 15\%$ i fastlæggelsen af hhv. aktivitetsniveauet samt beklædningsisolansen stor indflydelse på beregningen af PMV og derved også PPD. Ved stillesiddende arbejde og derved lavt aktivitetsniveau ($58 \frac{W}{m^2}$), kan usikkerheden medføre at PPD beregnes til ca. 5%, hvor den reelt set kunne være ca. 14%. Og fejlen er større ved stigende aktivitetsniveau. Ved fastlæggelse af aktivitetsniveauet bør DS/EN/ISO 8996 [2004] benyttes [Olesen og Parsons, 2002, s. 540]. Havenith et al. [2002] har dog påvist, at metoderne heri til bestemmelse af aktivitetsniveauet ikke giver den fornødne nøjagtighed i forhold til at klassificere bygninger afgrænset af 0,3 PMV-enheder, som angivet i DS/EN ISO 7730 [2006].

Senere i afsnit 4.2 i nærværende rapport præsenteres og diskuteres forskellige adaptive modeller for bestemmelse af hhv. beklædningsisolans og aktivitetsniveau.

Luft- og middelstrålingstemperatur

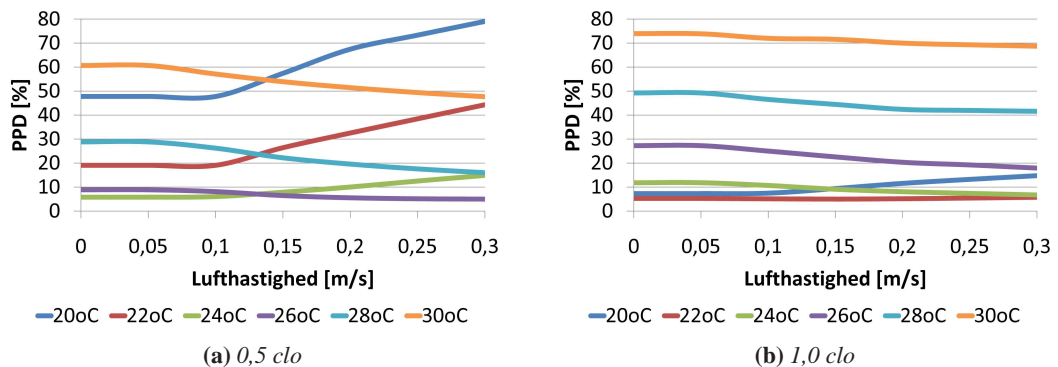
Også temperaturen har været underlagt undersøgelser af Nicol og Humphreys [2002b]. Her er den simple middelværdi af hhv. lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen benyttet - dvs. den operative temperatur. Ved relative lufthastigheder mindre end $0,2 \frac{m}{s}$ eller en forskel på lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen på mindre end 4 K, kan denne approksimation gøres med tilstrækkelig nøjagtighed [Hansen et al., 1997, s. 36]. Ved operative temperaturer over $27^\circ C$ overestimeres PMV, og i relation til gyldighedsintervallet angivet i DS/EN ISO 7730 [2006] for hhv. lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen på hhv. $10-30^\circ C$ og $10-40^\circ C$ (middel: $35^\circ C$), er dette en forskel på 8K. Dette må anses for værende en stor afvigelse.

Lufthastighed

Ved lave lufthastigheder forudsiger PMV-modellen opfattelsen af det termiske indeklima uden store afvigelser. Dog er der i undersøgelserne foretaget af Nicol og Humphreys [2002b], fundet stigende afvigelser mellem PMV og AMV ved lufthastigheder over ca. $0,2 \frac{m}{s}$. Sammenlignet med gyldighedsområdet for den relative lufthastighed i DS/EN ISO 7730 [2006] er dette sat til $0-1 \frac{m}{s}$.

For at undersøge PMV-modellens sensitivitet overfor fastsættelsen af lufthastigheden, er der foretaget simple beregninger heraf. Følgende figur 3.4 viser PPD som funktion af lufthastigheden ved varierende temperaturer i intervallet $20-30^\circ C$. Figur 3.4(a) viser beregningerne foretaget med en bek-

lædningsisolans på 0,5 clo, hvor der i (b) er benyttet 1,0 clo.



Figur 3.4: PMV-modellens sensitivitet overfor ændringer i lufthastigheden. Følgende inputparametre til PMV-modellen er benyttet: $t_a = t_{mrt}$; $RH = 50\%$; $M = 1,2 \text{ met}$

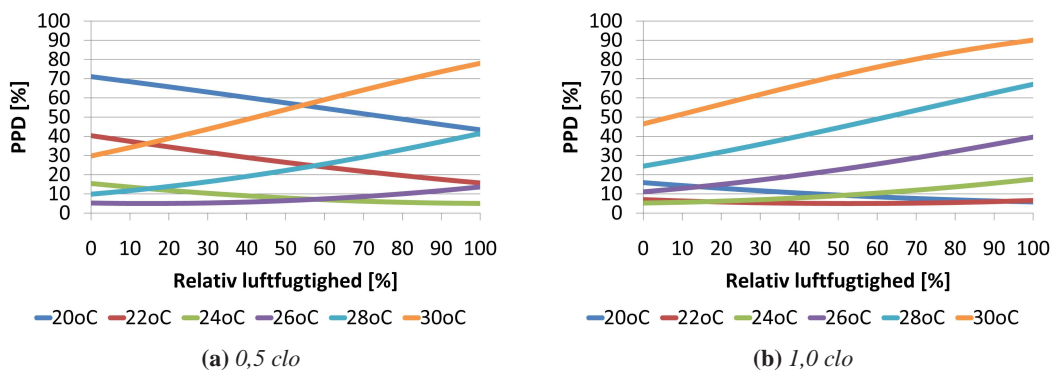
Af figur 3.4(a) fremgår det, at PMV-modellen er følsom overfor ændringer i lufthastigheden, ved lave beklædningsisolanser - i dette tilfælde 0,5 clo. I intervallet 20-22°C, stiger PPD hurtigt ved lufthastigheder over ca. $0,1 \frac{m}{s}$. Ved en operativ temperatur på 20°C og en lufthastighed på $0,1 \frac{m}{s}$, beregnes PPD til ca. 46%. Såfremt lufthastigheden var $0,15 \frac{m}{s}$, ville PPD være ca. 56% - dvs. ca. 10% højere. Det er kun ved temperaturer i intervallet 24-26°C, at stigende lufthastigheder kun har en mindre betydning. Som det også fremgår af figur 3.4(a), giver en øget lufthastighed en negativ effekt på PPD ved temperaturerne 20-24°C, og modsat en positiv effekt ved temperaturerne i intervallet 26-30°C (kølede effekt). Af figur 3.4(b) ses det, at ved en højere beklædningsisolans - i dette tilfælde 1,0 clo - er PMV-modellen mindre følsom overfor stigende lufthastigheder. Ydermere bemærkes det, at de stigende lufthastigheder kun har en negativ effekt ved 20°C. For temperaturer herover, vil en stigende lufthastighed have en kølede effekt, som følge af den højere beklædningsisolans.

Senere i afsnit 4.2 præsenteres og diskuteres forskellige adaptive modeller for bestemmelse af lufthastigheden.

Luftfugtighed

Den relative luftfugtighed har jf. Fanger [1972, s. 123,127] ikke stor indflydelse på den termiske oplevelse tæt på komforttilstanden. Ifølge undersøgelser er PMV fri for store afvigelser ved relative luftfugtigheder under 60%, men ved højere værdier bliver afvigelsen mellem PMV og AMV stor. DS/EN ISO 7730 [2006] angiver gyldighedsområdet for vanddampstrykket til 0-2,7 kPa, hvor undersøgelserne fandt afvigelser allerede ved et vanddampstryk på 2,2 kPa (svarende til ca. 95%RH ved 20°). [Nicol og Humphreys, 2002b]

Som det fremgår af det ovenstående, er gyldighedsområderne for de enkelte parametre benyttet i PMV-modellen fundet strengere end de i DS/EN ISO 7730 [2006] angivne. Som ved undersøgelsen af de andre indgående parametre foretaget i de foregående underafsnit, er der også foretaget en simpel følsomhedsanalyse af PMV-modellens følsomhed overfor ændringer i den relative luftfugtighed. Resultatet heraf er vist på følgende figur 3.5(a) og (b).



Figur 3.5: PMV-modellens sensitivitet overfor ændringer i relativ luftfugtighed. Følgende inputparametre til PMV-modellen er benyttet: $t_a = t_{mrt}$; $v_a = 0,15 \frac{m}{s}$; $M = 1,2 met$

Af ovenstående figur ses det, følsomheden er stort set lige stor ved hele intervallet 0-100 RH% for de forskellige operative temperaturer, idet linjerne forekommer tæt på rette. Der er imidlertid stor forskel på følsomheden, såfremt der sammenlignes temperaturmæssigt. For en beklædningsisolans på 0,5 clo, kan man jf. figur 3.5 se, at det er imod yderpunkterne af nærværende analyse - hhv. 20-22°C og 28-30°C, at der forekommer den største ændring af PPD som følge af ændringer i luftfugtigheden. For beregningen med brug af en beklædningsisolans på 1,0 clo ses det jf. figur 3.5(b), at her er følsomheden overfor ændringer i luftfugtigheden allerede stor ved 26°C. Dette er i tråd med det forventede. Endvidere ses det også, at ved lavere temperaturer, har en stigende luftfugtighed en positiv indflydelse på PPD i form af lavere PPD-værdier og modsat ved de højere temperaturer, hvor den stigende luftfugtighed medfører en øget PPD. Dette er også i tråd med det forventede, idet en fugtig luft føles mere varm end en tør luft som følge af, at dels varmetabet ved fordampning samt respiration direkte er påvirket heraf (se evt. appendiks B)

3.5.5 UDEKLIMAETS INDFLYDELSE PÅ OPFATTELSE AF TERMISK KOMFORT

Tidligere undersøgelser foretaget af bl.a. Humphreys [1978] har vist, at den mest dominerende klimatiske variabel er middeldetemperaturen, hvorfor indflydelsen heraf er undersøgt i bl.a. [de Dear et al., 1997] og senest i SCATs-projektet⁸ ([McCartney og Nicol, 2002]). SCATs-projektet, hvor der er foretaget målinger i europæiske bygninger, har kortlagt indflydelsen af skiftene vejrmønstre på termisk komfort og optimal neutral indetemperatur, hvilket bl.a. har vist, at luftkonditionerede bygninger kan programmeres til at opretholde en indetemperatur der varierer let og blødt i harmoni med udeklimaet, hvilket ikke medførte store ændringer i den termiske komfort, produktivitet eller indeluftkvalitet (IAQ) [McCartney og Nicol, 2002; Nicol og Humphreys, 2002b; Charles, 2003]. Med fokus på energiforbruget i forbindelse med opretholdelse af et acceptabelt indeklima, vil det således være muligt at mindske energiforbruget markant uden samtidig at påvirke opfattelsen af termisk komfort væsentligt. Ydermere fandt Humphreys [1990], at korrelationen mellem termisk oplevelse og udetemperaturen var bedst ved at vægte udetemperaturen i de foregående dage. Denne relation mellem det aktuelle udeklima og den termiske oplevelse, har endvidere vist sig lineær i naturligt ventilerede bygninger, hvorimod relationen er mere kompleks og ulineær i luftkonditionerede bygninger

⁸Smart Control And Thermal comfort Surveys projektet beskrives nærmere i kapitel 4

[Charles, 2003; de Dear et al., 1997]. Se evt. figur 4.1 i kapitel 4.

På trods af, at udeklimaet ikke direkte indgår i beregningen af PMV, bliver dette delvist medregnet i forbindelse med fastsættelsen af beklædningsisolansen, der er påvist influeret af udeklimaet Charles [2003]; Morgan et al. [2002]. Dette kommer bl.a. til udtryk i normer og standarder såsom ANSI/ASHRAE 55 [2004] og DS/EN 15251 [2007], der opererer med sæsonbestemte værdier af beklædningsisolansen.

3.5.6 INTERAKTION MELLEM GENEREL OG LOKAL DISKOMFORT

Ved estimering af den generelle oplevelse af det termiske indeklima som helhed for en større gruppe kan PMV-indekset benyttes som beskrevet i nærværende kapitel. Dog vil der i lokale felter kunne opstå diskomfort som følge af træk, strålingstemperatursymmetri eller temperaturgradienter, som ligeledes er omtalt tidligere (afsnit 3.4). Der er dog en vis usikkerhed i metoden hvorpå interaktionen mellem den generelle og lokale diskomfort skal behandles. En simpel summation er ikke mulig idet personer der føler sig generelt utilfredse med det termiske indeklima som helhed ikke nødvendigvis føler lokal diskomfort [Olesen og Parsons, 2002]. En mulighed er metoden, der benyttes ved beregning af Eco-factoren [Bjørn et al., 2004; Brohus og Bjørn, 2006a,b], hvor det største bidrag til termisk diskomfort (generel eller lokal) benyttes, og der således ses bort fra det andet bidrag. En situation hvor antallet af utilfredse som følge af det generelle termiske indeklima er 15% og som følge af lokal termisk diskomfort er 10%, vil bidraget fra den lokale diskomfort ikke blive medtaget. Spørgsmålet er således, hvorvidt nøjagtigheden af denne betragtning er acceptabel. Talrige undersøgelser viser, at aktivitetsniveauet og den generelle termiske oplevelse har indflydelse på følsomheden overfor lokal termisk diskomfort [Toftum, 2002]. I kolde omgivelser (lav PMV) er personer mere påvirkelige overfor lokal diskomfort, hvorimod tolerancen stiger i takt med stigende temperaturer. Da den generelle termiske komfort afhænger af aktivitetsniveauet, vil en ændring heraf medføre en ændring af den generelle termiske komfort, der så igen påvirker tolerancen overfor lokal termisk diskomfort. Som eksempel kan et skift mellem siddende og stående position resultere i et stigning i aktivitetsniveauet på 0,3 met svarende til et fald i foretrukken temperatur på 2,4°C [Olesen, 2000a]. Modeller for estimering af trækrisiko, som funktion af den generelle termiske oplevelse samt aktivitetsniveau er bl.a. opstillet af Toftum og Nielsen [1996] og Griefhahn et al. [2000], men der mangler en metode til vurdering af den samlede indflydelse fra samtlige påvirkninger. Studier vedrørende samtidige termiske påvirkninger i lokale felter har ikke vist direkte med- eller modvirkende effekter mellem de enkelte påvirkninger [Berglund og Fobelets, 1987; Beier og Kuszon, 1992]. Der foreslås en simpel summation af de enkelte bidrag til antal utilfredse som værende adækvat, men som nævnt før, er dette ikke muligt ved hhv. generel og lokal diskomfort. Der søges derfor metoder hertil, hvilket kun kan opstilles empirisk [Toftum, 2002].

3.5.7 OPSUMMERING

I de ovenstående afsnit er validiteten af PMV-indekset præsenteret og diskuteret. Uafhængige feltundersøgelser har påvist uoverensstemmelser mellem PMV og AMV bl.a. som følge af usikkerheder i estimeringen af de personlige parametre - aktivitetsniveau og beklædningsisolans. Ydermere har det vist sig, at de i DS/EN ISO 7730 [2006] angivne gyldighedsområder for netop omtalte parametre samt de fire indeklima parametre⁹ er for brede, og at fejlen øges kraftigt mod yderpunkterne af

⁹Lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed og lufthastighed

disse områder. Den største usikkerhed forekommer dog i vurderingen af aktivitetsniveauet samt beklædningsisolansen, der i praktiske tilfælde beror på tabelopslag baseret på resultater fra forsøg med termiske manikiner. De ovenstående simple følsomhedsanalyser efter OAT-metoden, giver en indikation af PMV-modellens følsomhed overfor estimeringen samt usikkerheden på de enkelte indgående parametre. En mere detaljeret undersøgelse af PMV-indekset og sensitiviteten heraf, vil nødvendige inkludere mere detaljerede undersøgelser f.eks. ved brug af Morris-metoden. Følgende tabel opsummerer fremtalte undersøgelser af PMV-indeksets validitet foretaget af Nicol og Humphreys [2002b].

Tabel 3.3: Opsummering af undersøgelser af PMV-indeksets validitet foretaget af Nicol og Humphreys [2002b].

Parameter	DS/EN ISO 7730 [2006]	Nicol og Humphreys [2002b]	
		PMV fri for fejl hvis	Bemærkning/kommentar
Beklædningsisolans	0-2 clo	0,3-1,2 clo	Overestimering for let og tung beklædning, stor fejl ved tung beklædning. Få informationer for situationer hvor $I_{cl} < 0, 2clo$
Aktivitetsniveau	0,8-4 met	<1,4 met	Fejl øges ved stigende aktivitet. Ved 1,8 met er fejlen ca. 1 skalaenhed.
Hypotetisk varmebelastning		$I_{cl} \cdot M < 1, 2met \cdot clo$	Stor fejl ved $2 met \cdot clo$
Lufttemperatur	10-30°C		Overestimering for
Middelstrålingstemperatur	10-40°C		$t_{op} > 27^\circ C$
Vanddampstryk /	0-2,7 kPa /		Fejl bliver stor for $p_a > 2,2kPa$
Relativ luftfugtighed	30-70%	<60%	
Lufthastighed	0-1 $\frac{m}{s}$	<0,2 $\frac{m}{s}$	Overestimering for $v_a > 0,2 \frac{m}{s}$

Som det fremgår af ovenstående tabel, er begrænsningerne af de indgående parametre til PMV-indekset jf. Nicol og Humphreys [2002b] større end angivet i DS/EN ISO 7730 [2006], og der må således mod gyldighedsintervallernes grænser forventes en stigende usikkerhed i estimeringen af antal utilfredse med det generelle termiske indeklima.

Endvidere har forsøg vist en tilsyneladende bedre overensstemmelse mellem PMV og AMV i luftkonditionerede bygninger, hvorimod PMV blev overestimeret i naturligt ventilerede bygninger. Dette forklares til dels ved personernes mulighed for aktivt at påvirke deres egen termiske situation gennem åbning af vinduer etc. samt forventningen til det termiske indeklima, hvilket behandles nærmere i kapitel 4.

Afsluttende skal der knyttes en kommentar til de faglige termer: termisk tilfredshed (tilfreds/utilfreds med de termiske omgivelser), termisk komfort (komfortabel eller ukomfortabel), termisk oplevelse, termisk accept (de termiske omgivelser kan accepteres) samt termisk præference (højere eller lavere temperatur ønskes). PMV-modellen er udledt på baggrund af voteringer om hvorvidt personer føler sig varme eller kolde. Termisk oplevelse, bliver gennem PMV-modellen vurderet i forhold til den psyko-fysiske ASHRAE-skala, hvor voteringer i intervallet -1 til +1 tolkes som termisk tilfredshed med indeklimaet. I stedet for at vurdere det termiske indeklimas kvalitet på baggrund af termisk oplevelse, ville termiske præference, termisk accept eller termisk tilfredshed være bedre indikatorer. Termisk accept er langt fra identisk med termisk præference idet personers acceptniveau til vid udstrækning kan findes i områder, hvor den enkelte persons optimale komfort ikke er opnået. [Charles, 2003]

3.6 USIKKERHED VED ESTIMERING AF LOKAL DISKOMFORT

Usikkerheden i estimeringen af antal utilfredse som følge af lokale diskomfort ved brug af ovenstående modeller, har ikke været underlagt samme mængde undersøgelser som i forbindelse med undersøgelserne af PMV-modellens validitet [Charles, 2003]. Dog har blandt andre Griefahn et al. [2001] foretaget undersøgelser af træk-vurderingen (DR / Draught Rate), hvor forsøgsresultaterne viste at DR-modellen underestimerede den egentlige utilfredshed som følge af træk ved lave lufthastigheder og omvendt blev utilfredsheden overestimeret ved høje lufthastigheder. Modellen til vurdering af antal utilfredse som følge af træk, er udledt på baggrund af laboratorieforsøg, hvor siddende personer i kontrollerede stationære konditioner blev kortvarigt (8-15min) udsat for træk. I de enkelte tilfælde skulle testpersonerne angive om hvorvidt de følte træk, og om dette var ukomfortabelt eller ej [Fanger og Christensen, 1986; Fanger et al., 1988]. Responsen på træk er således ikke undersøgt i længerevarende tilfælde.

Senere undersøgelser har vist, at træk accepteres i større grad og måske endda føles behageligt ved højere temperaturer [Olesen og Parsons, 2002; Charles, 2003]. Foruden dette vil acceptniveaueet for træk udvides i de tilfælde, hvor de enkelte personer har individuel mulighed for kontrol af luftforsyningen. På baggrund heraf præsenterer ANSI/ASHRAE 55 [2004] samt DS/EN ISO 7730 [2006] et diagram til vurderingen af den nødvendige lufthastighed til opvejning af en stigende temperatur og derved forhøje den øvre temperaturgrænse (se evt. figur 2.1 i afsnit 2.3).

Fountain et al. [1994] foretog undersøgelser i et velkontrolleret klimakammer indrettet som et typisk kontor, hvor der var installeret tre typer ventilation (foruden den balancerede ventilation): bordventilator, gulvdiffusor samt diffusor monteret på bordet. De 54 deltagende personer var alle iklædt tøj svarende til en beklædningsisolans på 0,5-0,6 clo, og udførte under forsøget almindeligt kontorarbejde. I undersøgelserne blev temperaturen holdt konstant i intervallet 25,5-28,5°C med et spring på 0,5°C, hvorefter personerne blev bedt om at indstille den ønskede lufthastighed for at opnå termisk komfort. Sammen med dette udførte personerne spørgeskemaundersøgelser indeholdende spørgsmål vedr. bl.a. termisk oplevelse og præference, sundhedsmæssig tilstand mv. Umiddelbart efter den enkelte person havde indstillet den ønskede lufthastighed, blev der foretaget målinger af såvel temperatur som lufthastighed. På baggrund af samtlige resultater opstiller Fountain et al. [1994] følgende model for estimering af antal tilfredse med den aktuelle lokale lufthastighed.

$$PS = 1,13 \cdot t_{op}^{0,5} - 0,24 \cdot t_{op} + 2,7 \cdot v_a^{0,5} - 0,99 \cdot v_a \quad (3.1)$$

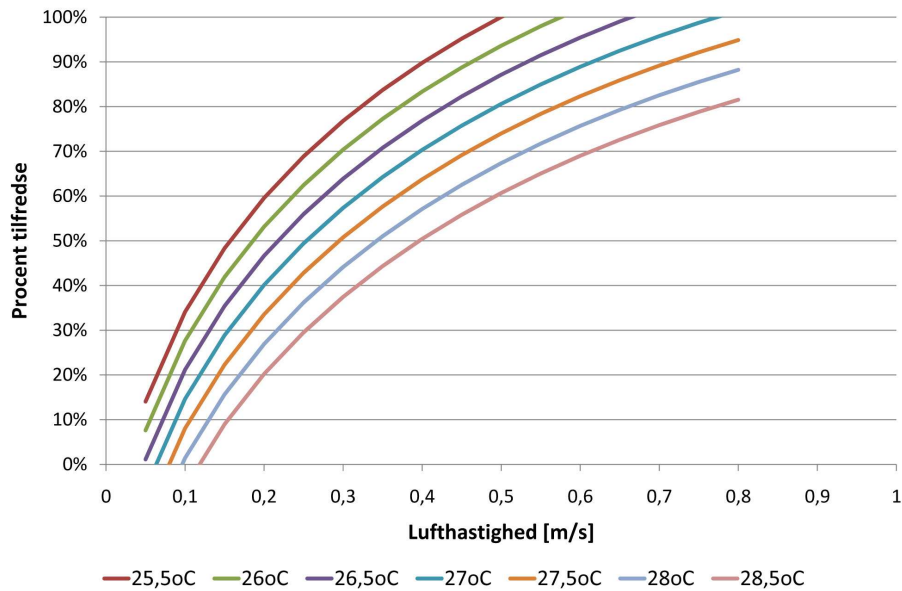
hvor

PS	=	Percentage Satisfied / Procent tilfredse	[%]
t_{op}	=	Operativ temperatur	[°C]
v_a	=	Lokal middellufthastighed	[$\frac{m}{s}$]

Modellen beskrevet ved ovenstående ligning (3.1) kan benyttes, såfremt muligheden for personlig ventilation eller styring af den lokale lufthastighed er tilstede, eller ved estimering af antal utilfredse ved manglende lufthastighed og kontrol over denne. Det er vigtigt at bemærke, at DR-modellen¹⁰ af Fanger et al. [1988] benyttes for tilfælde hvor personerne ikke har mulighed for personlig kontrol over den lokale lufthastighed, hvor den alternative PS-model anerkender personernes aktive holdning

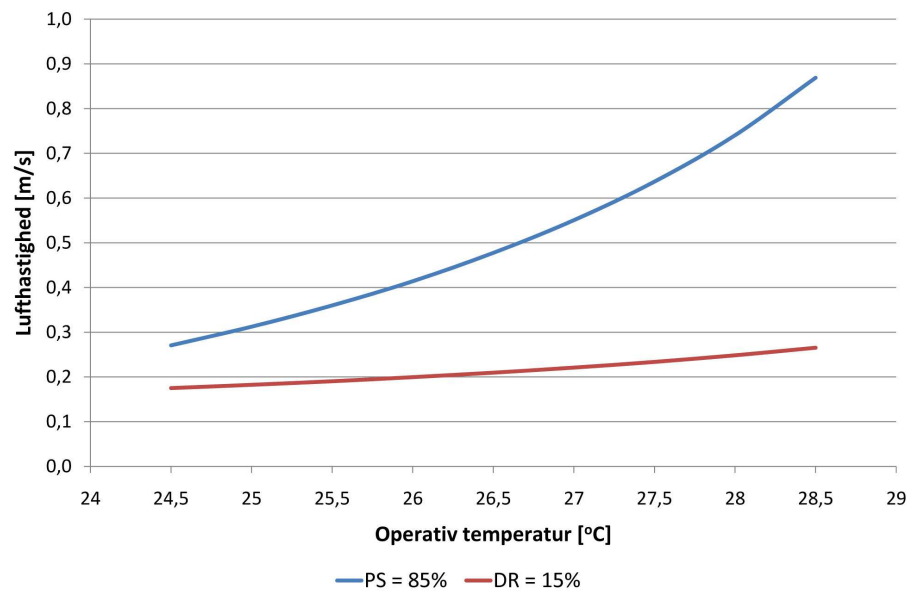
¹⁰Nærmere beskrevet i appendiks B - ligning (B.28)

ifm. opretholdelse af egen termisk komfort. Følgende figur 3.6 viser antal tilfredse som funktion af lokale lufthastighed beregnet for operative temperaturer i intervallet 25,5-28,5°C med et spring på 0,5°C efter formel (3.1).



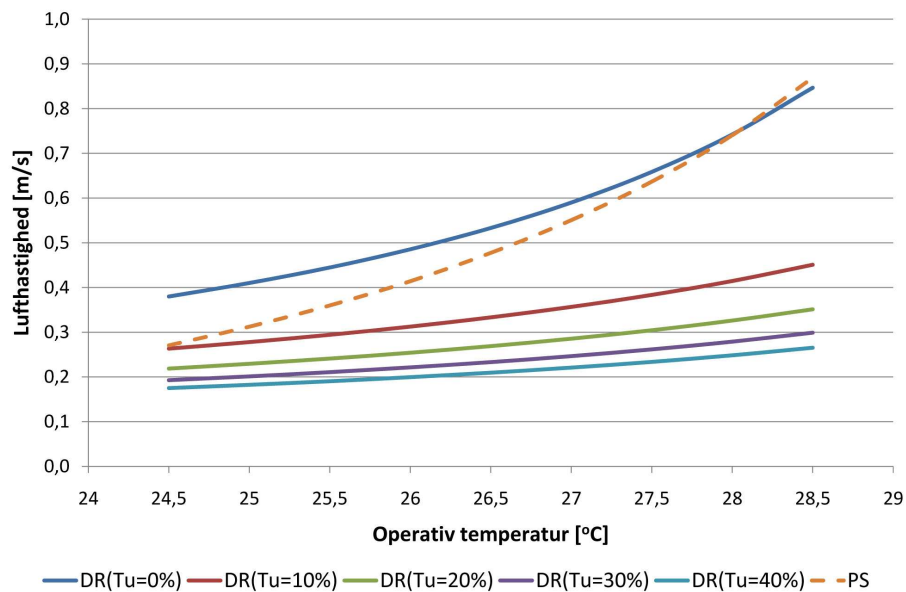
Figur 3.6: Antal tilfredse som funktion af lokal lufthastighed for varierende operative temperaturer.

Som det fremgår af figur 3.6, viser resultaterne af forsøgene, at der generelt blev ønsket høje lufthastigheder. I følgende figur 3.7 sammenlignes DR-modellen med PS-modellen for varierende operative temperaturer.



Figur 3.7: Maksimal tilladelig lufthastighed for 15% tilfredse / 85% utilfredse beregnet med hhv. PS-model og DR-modellen ($T_u = 40\%$) (efter Fountain et al. [1994]).

Af figur 3.7 ses det, at DR-modellen ikke tillader så høje lufthastigheder ift. PS-modellen. Ved 26°C ønskede personer i forsøget lidt over dobbelt så stor lufthastighed som DR-modellen forudsiger. Det bør bemærkes, at DR-modellen er opstillet for trækvurdering ift. personer i kolde-neutrale miljøer og således tilgodes de personer, der er følsomme over for træk. En kommentar i forbindelse med turbulensintensiteten bør også nævnes. I DR-modellen beregnes antallet af utilfredse med den lokale lufthastighed, som en funktion af bl.a. turbulensintensiteten. I ovenstående figur 3.7, er denne sat til 40%, hvilket mere eller mindre er blevet standard. I nærværende forsøg, lå turbulensintensiteten i intervallet 30-60% med en gennemsnitsværdi på ca. 50%, og den mindste forekommende turbulensintensitet blev målt/beregnet til ca. 17%, hvor de tre typer personlig ventilation var slukket. Til at belyse indflydelsen fra turbulensintensiteten på DR-modellen præsenterer Fountain et al. [1994] følgende figur.



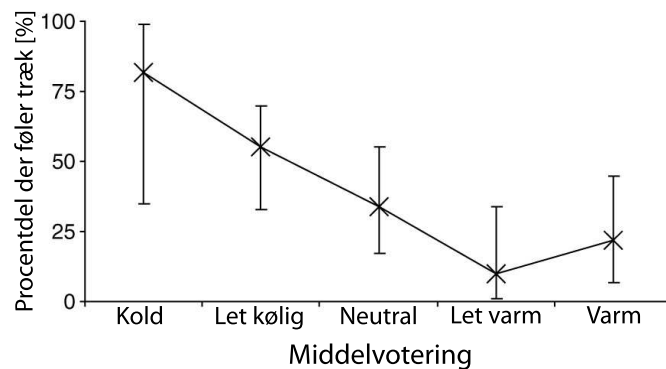
Figur 3.8: Maksimal tilladelig lufthastighed for 15% tilfredse / 85% utilfredse beregnet med hhv. PS-model og DR-modellen ved varierede turbulensintensitet. (efter Fountain et al. [1994]).

Selv ved lave turbulensintensiteter, ligger PS-kurven en del højere end de maksimalt tilladte lufthastigheder efter DR-modellen. Kun ved en turbulensintensitet på 0% ligger PS-kurven under DR-kurven. Turbulensintensiteter på 0% er dog urealistiske og i nærværende forsøg, blev denne også som nævnt målt til 17% som minimum.

De ovenstående sammenligninger i figur 3.7 og 3.8 af Fountain et al. [1994] er umiddelbart svære at konkludere noget specifikt ud fra, idet de to modeller er opstillet på basis af forskellige betingelser. De to modeller tager imidlertid to forskellige indgangsvinkler til indflydelsen fra lufthastigheden. Personer i termisk neutralitet eller koldere i siddende aktivitet og ved temperaturer op til 22-23°C, kan luftbevægelserne omkring disse blive opfattet som generende træk. Personer der føler sig varmere end neutral i miljøer over 23°C eller ved højere aktivitetsniveauer, har forsøg vist at personer generelt ikke føler træk op til en lufthastighed på $0,4 \frac{m}{s}$. Lufthastigheder op til $1,6 \frac{m}{s}$ har endda vist sig acceptable ved indetemperaturer på ca. 30°C. Ved så høje lufthastigheder bør muligheden for personlig kontrol over denne dog forekomme. Men selv om dette er muligt, vil disse høje lufthastigheders tryk på huden samt de generelle forstyrrelser herfra kunne medføre diskomfort i sig selv. Den generelle termiske oplevelse påvirker oplevelsen af træk væsentligt. DR-modellen kan anvendes for personer i termisk neutralitet, men oftest forekommer det, at personer er enten "let kølige" eller "let varme", hvilket påvirker opfattelsen af luftbevægelser positivt eller negativt iht. termisk diskomfort. Forsøg i ni industrimiljøer¹¹ udført af Toftum og Nielsen [1996] viste, at såfremt den termiske oplevelse var en skala-enhed¹² lavere end neutral, ville det procentvise antal personer der følte træk være ca. 2-3 gange højere, hvilket er illustreret på følgende figur 3.9. [Toftum, 1994]

¹¹ hhv. trykkeri, storkøkkener, madproduktion, fiskeproduktion samt jernfremstilling

¹² På ASHRAE-skalaen



Figur 3.9: Procentantal personer der føler træk som funktion af deres termiske oplevelse (middelvotering) sammen med angivelse 95%’s konfidensinterval. (efter Toftum [1994]).

Såfremt der forekommer personlig ventilation og muligheden for personlig kontrol over denne er tilstede, kan PS-modellen således benyttes til vurdering af antal tilfredse med den aktuelle lokale lufthastighed ved temperaturer i det undersøgte interval på 25,5-28,5°C. Modellen kan dog ikke erstatte DR-modellen, idet PS-modellen begrænser sig til tilfælde med personlig ventilation samt det høje temperaturinterval samt det faktum at de to modeller bygger på forskellige forudsætninger. Jf. Toftum [2004], bør bygninger designes for lave lokale lufthastigheder, sammen med personlig ventilation - f.eks. i form af en bordventilator - til de personer der ønsker højere lufthastigheder.

3.7 OPSUMMERING

I det ovenstående er PMV-indekset, herunder validiteten heraf, samt metoder for estimering af lokale diskomfort diskuteret. Der blev præsenteret undersøgelser af PMV-indekset, hvor en sammenligning med aktuelle målinger gav afvigelser mellem den aktuelle middelvotering og den af PMV-modellen forudsagte. Senere i nærværende rapport, vil alternative adaptive modeller blive præsenteret og diskuteret med henblik på en eventuel implementering i opstillingen af ydeevneindikatorer.

Endvidere er der i det ovenstående fokuseret på lokal diskomfort samt en alternativ metode til estimering af antal utilfredse som følge lokal lufthastighed. Metoden kan ikke erstattes den benyttede DR-model, men kan evt. benyttes til vurdering af antal tilfredse med den lokale lufthastighed, såfremt der forekommer personlig ventilation samt mulighed for personlig kontrol over denne.

Senere i denne rapport præsenteres og diskuteres alternative modeller til evaluering af termisk indeklima mv., hvorfor der henvises til disse for videre behandling heraf.

3.8 KOMFORTMODELLER

En komfortindikator kombinerer to eller flere parametre (lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed etc.) til et indeks, der beskriver et givet termisk miljø på baggrund af de indgående parametre.

De enkelte komfortindikatorer kan klassificeres iht. metoden, fra hvilken de er udviklet/opstillet. Rationelle indekser er udledt teoretisk, hvor empiriske indekser er udledt på baggrund af resultater fra forsøg og/eller målinger. I dette kapitel gives en kort præsentation af alternative modeller og indikatorer for termisk komfort, idet disse omtales og benyttes i nærværende rapport.

3.8.1 NEW EFFECTIVE TEMPERATURE - ET^*

Ny effektiv temperatur bygger på det originale empiriske indeks, effektiv temperatur (ET), opstillet af Houghten og Yaglou [1923]. Ud fra en rationel tilgang opstiller Gagge et al. [1941] den nye effektive temperatur, der er den temperatur i et isotermisk miljø ved hvilken en relativ luftfugtighed på 50% vil medføre samme totale varmetab fra huden, som de reelle omgivelser. Forskellige termiske miljøer med identiske effektive temperaturer fremkalder således samme termiske respons på trods af forskellige temperaturer og luftfugtigheder så længe lufthastigheden er den samme. Den nye effektive temperatur er defineret ved følgende formel (3.2).

$$ET^* = t_{op} + w \cdot i_m \cdot LR \cdot (p_a - p_{ET^*,s}) \quad (3.2)$$

hvor

ET^*	=	New Effective Temperature / ny effektiv temperatur	[°C]
t_{op}	=	Operativ indetemperatur	[°C]
w	=	Fugtighed af hud ^a	[°C]
i_m	=	Total effektivitet af fordampning	[-]
LR	=	Lewis Ratio, forhold mellem evaporativt og konvektivt varmeovergangstal ^b	$[\frac{K}{KPa}]$
p_a	=	Vanddampstryk i omgivende luft	[kPa]
$p_{ET^*,s}$	=	Mættet vanddampstryk af omgivende luft v. ET^*	[kPa]

^aAktuelt ift. maksimalt varmetab ved fordampning fra huden ved svedning, hvis huden er fuldstændig våd. F.eks. $w=0,5$ svarer til at halvdelen af kroppen er våd og halvdelen er tør.

^b $LR = \frac{h_c}{h_e}$. Normalt er $LR = 16,5 \frac{K}{KPa}$ for typiske indeklimatiske forhold. [ASHRAE, 2005, Kap. 8]

Den nye effektive temperatur, ET^* , tager mere hensyn til luftfugtigheden og fordampningsmodstanden i tøj, idet w og i_m afhænger direkte heraf¹³. Prek [2005] foreslår en ændring af det oprindelige PMV-indeks opstillet af Fanger [1972], der beregnes på baggrund af ET^* fremfor hhv. lufttemperaturen og middelstrålingstemperaturen (PMV^* hhv. PPD^*). Herved bliver der taget større hensyn til luftfugtighedens indflydelse på den termiske komfort.

Til at belyse indvirkningen på PMV-indekset ved brug af den effektive temperatur, er der i følgende tabel 3.4 samt figur 3.10 opstillet et eksempel, hvor såvel PMV- som PPD-indekset beregnes for varierende operative temperaturer og relative luftfugtigheder. I eksemplet er hhv. aktivitetsniveauet og beklædningsisolansen holdt konstante¹⁴.

¹³Beregning af ET^* forefindes som regneark på den vedlagte DVD

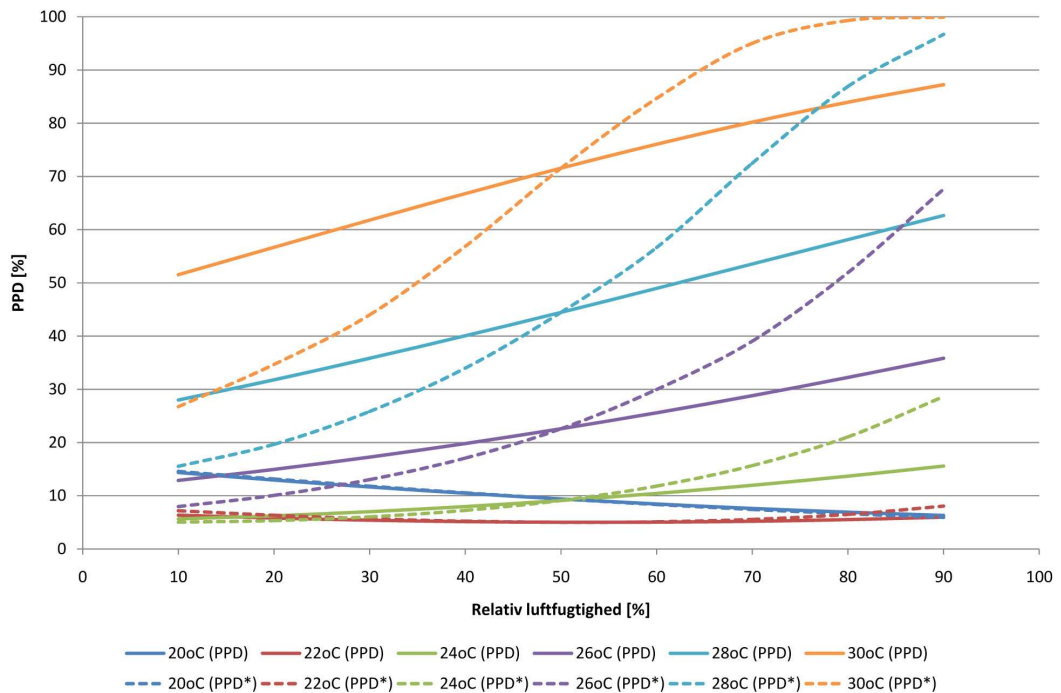
¹⁴VBA-program for beregning af ET^* forefindes på vedlagte DVD

3.8 Komfortmodeller

Tabel 3.4: Beregning af PMV- og PPD-indeks ud fra hhv. operativ og ny effektiv temperatur for tre forskellige operative temperaturer og relative luftfugtigheder. PMV og PPD er beregnet efter Fanger [1972], hvor PMV^* og PPD^* er beregnet ved brug af ET^* fremfor luft- og middelstrålingstemperatur

t_{op} [°C]	RH [%]	ET^* [°C]	PMV	PMV^*	PPD [%]	PPD^* [%]
20	30	19,97	-0,56	-0,57	11,6	11,8
25	30	24,49	0,54	0,42	11,0	8,7
30	30	28,73	1,70	1,37	61,8	44,0
20	50	20,00	-0,46	-0,46	9,4	9,4
25	50	25,00	0,68	0,68	14,6	14,6
30	50	30,00	1,89	1,89	71,6	71,6
20	70	20,06	-0,35	-0,34	7,6	7,4
25	70	25,73	0,82	1,00	19,1	26,0
30	70	31,97	2,08	2,58	80,2	95,0

$$t_a = t_{mrt}; v_a = 0,15 \frac{m}{s}; I_{cl} = 1,0 clo; M = 1,2 met$$



Figur 3.10: Sammenligning af PPD beregnet på baggrund af hhv. operativ temperatur og ny effektiv temperatur. PPD og PPD^* er beregnet som funktion af den relative luftfugtighed for varierende operative temperaturer. De samme konstanter som vist i noten til tabel 3.4 er benyttet. (De fuldt optrukne linjer angiver PPD og de stiplede linjer angiver PPD^*). Forudsætninger som angivet i tabel 3.4

Som det fremgår af såvel tabel 3.4 som figur 3.10, vil den konventionelle PMV-/PPD-model for stigende temperaturer forudsige et højere antal utilfredse ved luftfugtigheder under 50%RH. Modsat forudsiger PMV-/PPD-modellen et lavere antal utilfredse for relative luftfugtigheder over 50%RH, og disse afvigelser mellem PPD og PPD^* øges for stigende operative temperaturer. Endvidere fremgår det, at $t_{op} = ET^*$ (og dermed $PPD = PPD^*$) for $RH = 50\%$, hvilket stemmer overens med definitionen af den nye effektive temperatur idet ET^* giver samme varmetab fra huden som de reelle omgivelser ved denne relative luftfugtighed.

I det senere afsnit 4.1.1 præsenteres forskellige forskningsprojekter (RP-884, SCATs etc.) der har vist, at PMV-/PPD-indekset underestimerer den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer. Det kunne således være interessant at se, om PMV^* -indekset kan forudsige den termiske oplevelse i disse bygninger bedre en det konventionelle PMV-indeks. Til at undersøge dette er data fra RP-884-projektet ([de Dear, 1998; de Dear et al., 1997]) for hhv. mekanisk (HVAC) og naturligt ventilerede (NV) bygninger i en sommerperiode benyttet, hvor den relative luftfugtighed hhv. inde og ude er plottet som funktion af hhv. operativ indetemperatur og middel udelufttemperatur. Der er udvalgt fire bygninger i varme klimaer, to HVAC- og to NV-bygninger, hvor målingerne er foretaget i en varm periode. Ydermere er der til brug ved sammenligning medtaget simuleringresultater fra et storrums kontor placeret i Danmark, hvor der både er simuleret med Dansk DRY samt vejrdata fra Sydney. Resultaterne er opsummeret i følgende tabel 3.5 samt figur 3.11.

Tabel 3.5: Udvalgte bygninger fra RP-884-databasen ([de Dear, 1998])

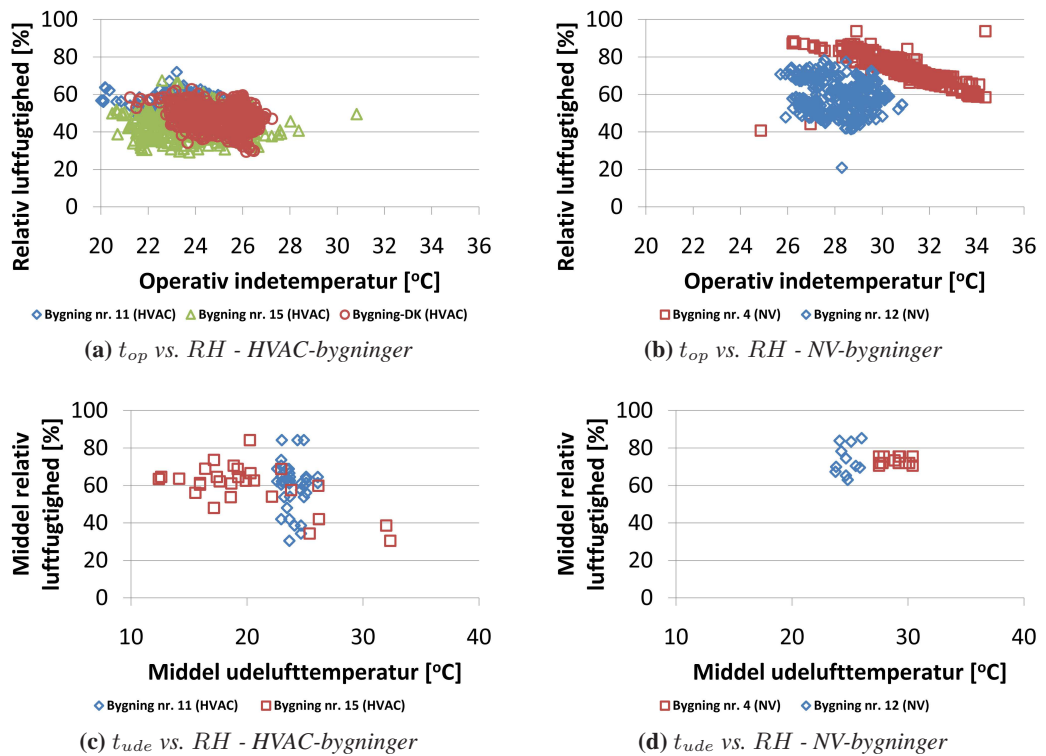
Bygningsnr. ¹⁾	Type	Geografisk placering	Min.	$t_{op.inde} [^{\circ}C] / RH_{inde} [\%]$	
				Mid.	Maks.
4	NV	Bangkok, Thailand	24,9 / 40,7	31,0 / 73,0	34,4 / 93,8
12	NV	Brisbane, Australien	25,7 / 20,9	28,0 / 58,5	39,8 / 78,4
11	HVAC	Brisbane, Australien	18,9 / 43,3	23,9 / 53,3	26,8 / 71,9
15	HVAC	Melbourne, Australien	19,4 / 29,1	23,7 / 43,9	30,8 / 67,4
Bygning-DK ²⁾	HVAC	Danmark (BSim-data)	21,2 / 29,5	25,1 / 47,9	27,2 / 62,8
Bygning-AUS ³⁾	HVAC	Australien (BSim-data)	24,2 / 21,6	27,0 / 50,6	30,2 / 66,1

1) Iht. nummereringen i RP-884-databasen [de Dear, 1998].

2) Simuleringsresultater fra juni, juli og august i arbejdstiden 8-16 på baggrund af dansk DRY.

3) Simuleringsresultater fra december, januar og februar (varme måneder) i arbejdstiden 8-16 på baggrund af Sydney DRY.

Følgende figur 3.11 viser resultaterne fra ovennævnte bygninger undtagen ”Bygning-AUS”.



Figur 3.11: Relativ luftfugtighed inde og ude som funktion af hhv. operativ indetemperatur og middel udelufttemperatur for hhv. HVAC- og NV-bygninger. Figurerne er baseret på data fra de Dear [1998] (RP-884-databasen). Ydermere er simuleringsresultater af relativ luftfugtighed og operativ indetemperatur fra et storrums kontor modellet i BSim med danske klimadata (DRY) vist for HVAC-bygninger til brug ved sammenligning (figur (a)).

Ved at fokusere på intervallet for hhv. operative indetemperatur og relativ luftfugtighed sammen med figur 3.10, kan det vurderes om PMV^* -indekset vil forudsige lavere eller højere antal utilfredse end den oprindelige PMV-model af Fanger [1972]. I RP-884 projektet fandt de Dear et al. [1997] som nævnt en stor forskel mellem målte og estimerede (ved PMV-modellen) neutraltemperaturer i naturligt ventilerede bygninger.

Hvis der således først fokuseres på de naturligt ventilerede bygninger ses det af figur 3.11(b), at de målte operative indetemperaturer for bygning 4 hovedsageligt har ligget i intervallet ca. 28-34°C med relative luftfugtigheder i intervallet 60-85%. Med en samtidig fokus på figur 3.10, vil PMV^* -modellen i dette tilfælde have forudsagt større antal utilfredse og dermed en lavere neutraltemperatur ($PMV=0$) end den konventionelle PMV-model. Det samme gør sig gældende for bygning 12, hvor den operative temperatur har ligget i intervallet 26-30°C med relative luftfugtigheder i intervallet 40-75%. I de tilfælde hvor den relative luftfugtighed har været under 50% (bygning 12), vil PMV^* -modellen have givet et resultat tættere på den reelle komfortvotering end PMV-modellen, men jf. figur 3.10, er denne forskel minimal.

Fokuseres der herefter på HVAC-bygningerne ses det jf. figur 3.11(a), at det operative temperatur-niveau ikke har været nær så højt, som det var tilfældet ved NV-bygningerne. Den operative temperatur har hovedsageligt ligget i intervallet 21-26°C med tilhørende relative luftfugtigheder i intervallet 30-60%, hvor bygning 11 generelt ligger over 50%RH. Sammenlignet med simuleringen af storrums-

skontoret placeret i Danmark, er temperaturniveauet og de relative luftfugtigheder meget lig hinanden. I RP-884-projektet fandt de Dear et al. [1997] god overensstemmelse mellem AMV og PMV i HVAC-bygninger, og i nærværende tilfælde, vil PMV^* -modellen medføre afvigelser i dette således overensstemmelsen mellem disse ikke længere er tilstede. Ydermere er der foretaget en simulering med samme model, hvor klimadata fra Sydney, Australien er benyttet. Af tabel 3.5 fremgår det, at intervallet hvori den relative luftfugtighed har ligget, har været tæt på intervallet fundet i selvsamme bygning men med danske klimadata.

På baggrund af ovenstående diskussion ses det, at den alternative PMV^* -model, vil lede til større afvigelser mellem den reelle og estimerede neutraltemperatur, hvorfor det vælges ikke at arbejde videre med denne.

3.9 2-KNUDE-MODELLEN - TSENS & DISC

Som alternativ til den psyko-fysiske ASHRAE-skala, kan skalaerne TSENS¹⁵ eller DISC¹⁶ benyttes. TSENS er identisk med ASHRAE-skalaen benyttet i PMV-modellen opstillet af Fanger [1972] blot med to ekstra grader: ± 4 (meget varmt/koldt) og ± 5 (utåleligt varmt/koldt). De to skalaer er vist nedenfor, hvor en negativ score henviser til kold diskomfort og modsat henviser en positiv score til varm diskomfort:

Score	TSENS	DISC
-5	Utåleligt koldt	Utåleligt
-4	Meget koldt	Begrænset tolerance
-3	Koldt	Meget ukomfortabelt
-2	Køligt	Ukomfortabelt og ubehageligt
-1	Let køligt	Let ukomfortabelt men acceptabelt
0	Neutral	Komfortabelt
1	Let varmt	Let ukomfortabelt men acceptabelt
2	Varmt	Ukomfortabelt og ubehageligt
3	Hedt	Meget ukomfortabelt
4	Meget hedt	Begrænset tolerance
5	Utåleligt varmt	Utåleligt

Beregningen af scoren foretages ved brug af 2-knude-modellen ("2-node-model") [Gagge et al., 1941, 1986], hvilken er præsenteret i detaljer i appendiks C.

Til sammenligning af hhv. TSENS og DISC med PMV-indekset er følgende tabel 3.6 opstillet. Ud fra operative temperaturer i intervallet 20-45°C estimeres den termiske komfort vurderet af de tre termiske indekser og sammenlignes herefter.

Som det fremgår af ovenstående tabel, vil såvel TSENS- som DISC-indekset forudsige det termiske indeklima for $t_{op} \leq 23^\circ\text{C}$ som hhv. "Neutral" og "Komfortabelt", hvilket ikke er tilfældet ved PMV-modellen. På trods heraf stemmer de forudsagte komfortvoteringer godt overens med kun små afvigelser.

¹⁵Thermal Sensation / Termisk oplevelse

¹⁶Thermal Discomfort / Termisk Diskomfort

3.10 Skalaer for termisk komfort og præference

Tabel 3.6: Sammenligning af komfortvoteringer efter TSENS, DISC og PMV

t_{op}/ET^* [°C]	TSENS		DISC		PMV		PPD [%]
20	-0,26	Neutral	-0,26	Komfortabelt	-1,68	Køligt	60,6
21	-0,17	Neutral	-0,17	Komfortabelt	-1,38	Let køligt	44,3
22	-0,09	Neutral	-0,09	Komfortabelt	-1,07	Let køligt	29,3
23	-0,02	Neutral	-0,02	Komfortabelt	-0,77	Let køligt	17,4
24	0	Neutral	0	Komfortabelt	-0,46	Neutral	9,4
25	0,19	Neutral	0,22	Komfortabelt	-0,15	Neutral	5,5
26	0,41	Neutral	0,48	Komfortabelt	0,16	Neutral	5,5
27	0,62	Let varmt	0,74	Let ukomfortabelt men acceptabelt	0,48	Neutral	9,7
28	0,82	Let varmt	1,01	Let ukomfortabelt men acceptabelt	0,79	Let varmt	18,2
29	1,02	Let varmt	1,29	Let ukomfortabelt men acceptabelt	1,11	Let varmt	30,9
30	1,22	Let varmt	1,58	Let ukomfortabelt men acceptabelt	1,43	Let varmt	47,0
31	1,41	Let varmt	1,89	Let ukomfortabelt men acceptabelt	1,75	Varmt	64,4
32	1,6	Varmt	2,22	Ukomfortabelt og ubehageligt	2,07	Varmt	79,9
33	1,79	Varmt	2,58	Meget ukomfortabelt	2,4	Varmt	91,0
34	1,98	Varmt	2,96	Meget ukomfortabelt	2,73	Hedt	97,1
35	2,17	Varmt	3,39	Meget ukomfortabelt	3,06	Hedt	99,3
36	2,36	Varmt	3,87	Begrænset tolerance	3,39	Hedt	100
37	2,56	Hedt	4,41	Begrænset tolerance	3,73	Hedt	100
38	2,92	Hedt	4,7	Utåleligt	4,06	Hedt	100
39	3,26	Hedt	4,7	Utåleligt	4,4	Hedt	100
40	3,34	Hedt	4,7	Utåleligt	4,75	Hedt	100
41	3,43	Hedt	4,7	Utåleligt	5,09	Hedt	100
42	3,52	Meget hedt	4,7	Utåleligt	5,44	Hedt	100
43	3,62	Meget hedt	4,7	Utåleligt	5,79	Hedt	100
44	3,73	Meget hedt	4,7	Utåleligt	6,15	Hedt	100
45	3,84	Meget hedt	4,7	Utåleligt	6,51	Hedt	100

$$t_a = t_{mrt}; RH = 50\%; v_a = 0,15 \frac{m}{s}; I_{cl} = 1,0 clo; M = 1,2 met; A_D = 1,8 m^2$$

3.10 SKALAER FOR TERMISK KOMFORT OG PRÆFER- ENCE

Til vurdering af såvel termisk komfort som præference benyttes psyko-fysiske skalaer. Nærværende afsnit opsummerer de mest benyttede skalaer, og præsenterer undersøgelser af sammenhængen mellem komfort og præference på baggrund af seneste studier.

Ved evaluering af termisk komfort i et rum benyttes psyko-fysiske skalaer, der sprogligt omsætter en given termisk oplevelse. Følgende tabel 3.7 viser de mest benyttede skalaer for estimering af termisk komfort og præference.

Tabel 3.7: Skalaer for termisk komfort og præference (efter Humphreys et al. [2007])

Kode	Termisk komfort		Termisk præference	
	ASHRAE	Bedford	McIntyre	Nicol
3	Hedt	Alt for varmt		
2	Varmt	For varmt		Foretrækker det meget køligere
1	Let varmt	Komfortabelt varmt	Foretrækker det koldere	Foretrækker det en smule køligere
0	Neutral	Komfortabelt	Ingen ændring	Ingen ændring
-1	Let køligt	Komfortabelt køligt	Foretrækker det varmere	Foretrækker det en smule varmere
-2	Køligt	For køligt		Foretrækker det meget varmere
-3	Koldt	Alt for køligt		

Seneste studier, bl.a. af de Dear et al. [1997]; Brager et al. [2004]; Nicol og McCartney [2001] og Humphreys og Hancock [2007], har alle vist en difference mellem termisk komfort og præference. På trods af at personer befandt sig i termisk neutralitet, foretrak personer i kolde miljøer det generelt lidt varmere end neutralt og omvendt foretrak personer i varmere miljøer det lidt koldere end neutralt. I det følgende præsenteres resultater fra Humphreys og Hancock [2007]. Resultaterne vedr. termisk komfort og præference i hhv. de Dear et al. [1997], Brager et al. [2004] og Nicol og McCartney [2001] er præsenteret og diskuteret i detaljer i afsnit 4.1.1, 4.1.2 og 4.1.4.

Ved vurdering af termisk præference kan McIntyre- eller Nicol-skalaen jf. tabel 3.7 benyttes. Problemet med McIntyre-skalaen er, at denne ikke giver mulighed for at udtrykke hvor meget varmere eller koldere en person ønsker det, men kun at der ønskes en ændring. Til undersøgelse af dette samt kompleksiteten af ASHRAE-skalaen bl.a. ved korrelationen mellem termisk oplevelse og præference, har Humphreys og Hancock [2007] udført spørgeskemaundersøgelser i hhv. boliger samt et undervisningslokale i England:

- **Undersøgelse 1 - Undervisningslokale**

- Mekanisk ventileret lokale.
- Blev udført i fem undervisninger i perioden februar-marts, hvor et totalt antal på 133 studerende deltog.
- Termisk oplevelse og præference blev angivet to gange i løbet af forelæsningen - en umiddelbart efter start, og en inden slutningen.
- Spørgeskemaerne indeholdte også spørgsmål vedr. beklædning og aktivitetsniveau.
- Lufttemperaturen blev målt sideløbende.
- 519 komfortvoteringer.

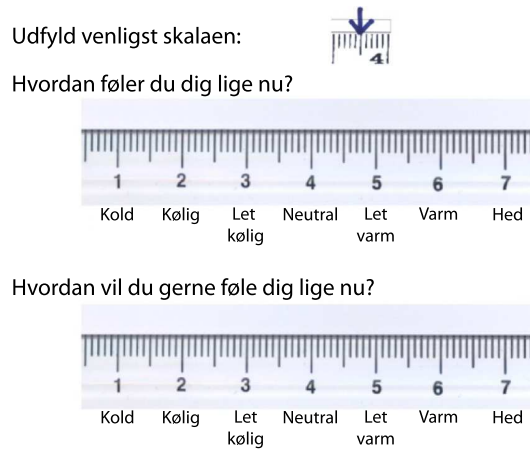
- **Undersøgelse 2 - Boliger**

- Otte personer (fire mænd og fire kvinder) fra seks forskellige huse.
- Spørgeskemaet blev udfyldt fire gange om dagen i en periode på en to uger - en uge om vinteren hhv. sommeren.
- Temperaturen blev målt i udvalgte punkter over en periode på fire uger om såvel sommeren som vinteren.
- 349 komfortvoteringer.

På trods af det relativt svage empiriske grundlag, kan undersøgelse i Humphreys og Hancock [2007] stadig benyttes til at give en indikation af kompleksiteten af ASHRAE-skalaen. I under-

3.10 Skalaer for termisk komfort og præference

søgelse blev der ikke kun givet mulighed for at angive komfortvoteringen som helt tal mellem -3 og +3. Metoden der blev brugt er illustreret på følgende figur.



Figur 3.12: Termisk oplevelse og præference efter ASHRAE-skalaen (efter Humphreys og Hancock [2007])

De enkelte personer blev bedt om at angive dels deres aktuelle termiske oplevelse men også deres termiske præference ved den ”flydende” skala vist i figur 3.12. Formålet med de ovennævnte var at undersøge om det er tilfældet, at personer til tider ønsker en anden termisk oplevelse end ”neutral” og hvorvidt der forekommer en systematik i den termiske præference samt hvilken variation¹⁷ der er knyttet til denne. Dette kan klarlægge et evt. mønster i relationen termisk oplevelse og præference, og herved kan indflydelsen på behandlingen af og konklusionen på spørgeskemaundersøgelser.

Følgende tabel 3.8 og 3.9 angiver resultater fra spørgeskemaundersøgelserne i både undervisningslokalet og boligerne. Tabel 3.8 indeholder voteringer af termisk oplevelse, hvor tabel 3.9 indeholder voteringer af termisk præference.

Tabel 3.8: Termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen vist i figur 3.12 afrundet til nærmeste hele tal (efter Humphreys og Hancock [2007])

Sæson		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	Total ^{a)}
		kold	kølig	let kølig	neutral	let varm	varm	hed	
Undervisnings-	Vinter	5	10	86	236	174	45	9	565
lokaler									
Boliger	Vinter	1	8	23	28	37	80	4	181
Boliger	Sommer	1	3	10	34	49	58	14	169
Alle	Alle	7	21	119	298	260	183	27	915

^{a)} Indeholder også spørgeskemaer hvor votering af termisk præference ikke forekom

¹⁷Dvs. om personer altid har samme termiske præference

Tabel 3.9: Termisk præference efter ASHRAE-skalaen vist i figur 3.12 afrundet til nærmeste hele tal (efter Humphreys og Hancock [2007])

	Sæson	-3 kold	-2 kølig	-1 let kølig	0 neutral	+1 let varm	+2 varm	+3 hed	Total ^{a)}
Undervisningslokaler	Vinter			28	312	152	21	9	522
Boliger	Vinter		2	4	28	58	87	2	181
Boliger	Sommer		3	1	37	78	49		168
Alle	Alle		5	33	377	288	157	11	871

^{a)} Indeholder også spørgeskemaer hvor votering af termisk oplevelse ikke forekom

Jf. tabel 3.9 ses det, at for de studerende var den termiske præference andet end "neutral" i 40% af tilfældene. For den samlede datamængde - dvs. både personerne i boligerne og de studerende - forekom dette i 57% af tilfældene. Det fremgår således, at personerne i næsten halvdelen af tiden har stemt andet end "neutral" i deres termiske præference. For at undersøge hvorvidt der forekommer en systematik i den termiske præference mellem personerne¹⁸, er der foretaget en statistisk analyse. Standardafvigelse i voteringerne af termisk præference for de enkelte undersøgelser er opsummeret i følgende tabel.

Tabel 3.10: Standardafvigelse i votering af termisk præference for de enkelte spørgeskemaundersøgelser samt for de enkelte personer (efter Humphreys og Hancock [2007])

	Standardafvigelse
Undervisningslokale	1,1
Boliger	2,4
Alle	1,4
De enkelte personer	0,5

Som det fremgår af tabel 3.10, forekommer der stor afvigelse i den termiske præference blandt de enkelte personer i undersøgelserne. Jf. Humphreys og Hancock [2007] ønskede de fleste personer det varmere end "neutral". En analyse af resultaterne, hvor standardafvigelsen af personopdelte præferencevoteringer er beregnet fremgår også af ovenstående tabel 3.10, hvilket angiver en standardafvigelse på 0,5 skala-enheder på ASHRAE-skalaen. Rettes fokus på normerne DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] samt ANSI/ASHRAE 55 [2004] er komfortgrænserne for en kategori "B"¹⁹ informativt angivet til $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$. Standardafvigelsen på 0,5 for de personopdelte præferencevoteringer kan således have stor indflydelse på disse komfortgrænser, og hvorvidt de afspejler et acceptabelt termisk indeklima eller om de skal skærpes eller slækkes.

For at undersøge hvorvidt der forekommer et mønster i personernes termiske præference og om denne er direkte påvirket af den aktuelle termiske oplevelse, har Humphreys og Hancock [2007] undersøgt korrelationen mellem disse. Hvis der er tilstrækkelig mulighed for adaptivitet (justering af beklædningsisolans, åbning af vinduer og/eller døre mv.), vil personer der angiver deres termiske oplevelse til "let varm" måske også ønske at føle sig dette. Ligeledes kan personer der stemmer "let kølig"

¹⁸F.eks. om hvorvidt nogle personer ønsker at føle sig kølige og andre varme

¹⁹i DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007]

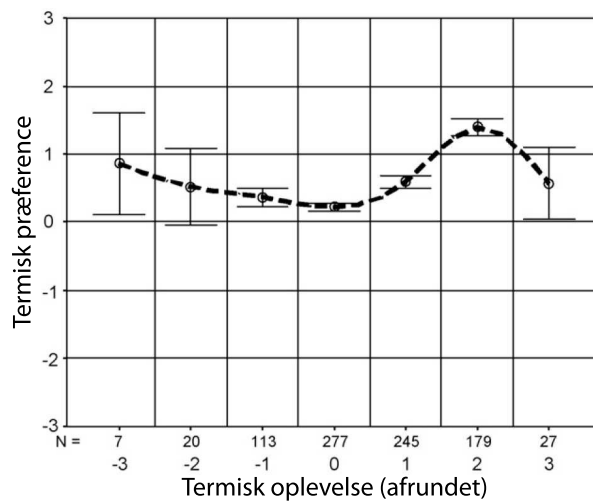
3.10 Skalaer for termisk komfort og præference

måske også foretrække dette. I dette område, vil der således forekomme positiv korrelation mellem den aktuelle termiske oplevelse og den termiske præference. Hvor graden af mulighed for adaptivitet er begrænset, vil personer der i kølige omgivelser højst sandsynligt foretrække det "let varmt" eller "varmt" og omvendt for de varme omgivelser. Her vil der således forekomme en negativ korrelation mellem aktuel termisk oplevelse og præference. For at undersøge sammenhængen nærmere er samtlige data blevet analyseret. En kryds-tabellering af aktuel og ønsket termisk oplevelse er vist i følgende tabel 3.11.

Tabel 3.11: Kryds-tabellering af aktuel og ønsket termisk oplevelse (efter Humphreys og Hancock [2007])

Termisk præference	Termisk oplevelse							Total
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	
	kold	kølig	let kølig	neutral	let varm	varm	hed	
+3		1	2	1	5	2		11
+2	2	1	6	3	23	114	8	157
+1	2	11	43	74	116	33	9	288
0	3	4	53	196	89	23	6	374
-1		1	9	3	12	7	1	33
-2		2					3	5
-3								
Total	7	20	113	277	245	179	27	868

Som det fremgår af tabellen ovenfor ønskes "neutral" i de fleste tilfælde (374). Dog bemærkes det også, at i området "neutral" til "varmt" termisk oplevelse, var den mest forekommende termiske præference ligeledes "neutral", "let varmt" eller "varmt" (markeret med fed). Her er der således positiv korrelation mellem aktuel og ønsket termisk oplevelse, hvilket også var formodningen jf. det ovenstående. Til yderligere analyse heraf er den gennemsnitlige termiske præference som funktion af termisk oplevelse beregnet og vist på følgende figur 3.13.



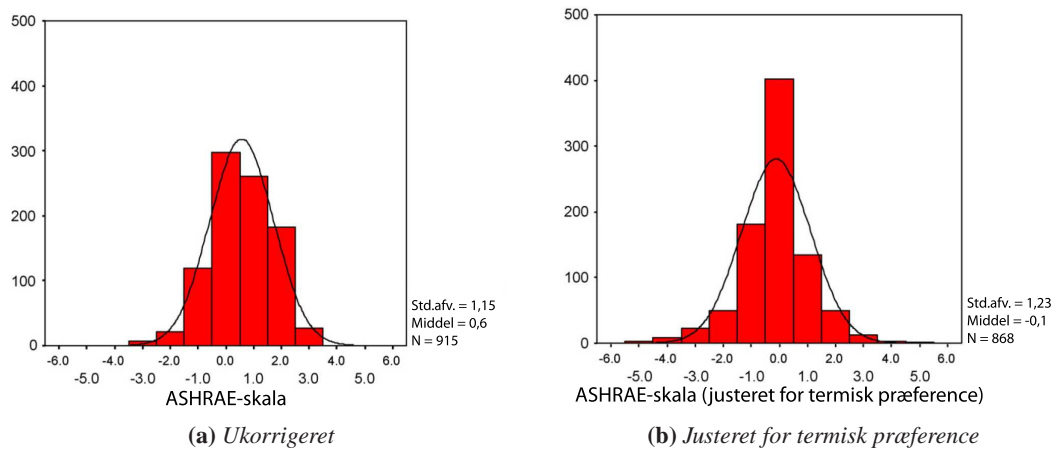
Figur 3.13: Tendenslinje for gennemsnitlig termisk præference som funktion af termisk oplevelse sammen med angivelse af 95% konfidensintervaller. (efter Humphreys og Hancock [2007])

Af figur 3.13 ses det, at der forekommer positiv korrelation i intervallet 0-2 for den termiske oplevelse, hvilket er i tråd med det ovenstående. Endvidere viser figuren, at der er negativ korrelation mod ekstremiteterne "kold" og "hed". Dog bør det kommenteres, at antallet af komfortvoteringer i dette område var lille, hvilket også afspejles i de respektive konfidensintervaller. Det bemærkes endvidere, at samtlige præferencevoteringer har ligget over "neutral". Humphreys og Hancock [2007] antyder, at såfremt undersøgelsen var foretaget i en varmere klimazone, ville denne tendens måske være lige modsat. I koldere klimaer foretrækker personer det måske generelt varmere end neutralt og omvendt i varmere klimaer. I de senere afsnit 4.1.1, 4.1.2 og 4.1.4 vises det, at dette er tilfældet.

For at klarlægge indflydelsen fra forskellen mellem termisk oplevelse og præference yderligere, opstiller Humphreys og Hancock [2007] en distribution af voteringserne af den termiske oplevelse samt en distribution hvor den termiske oplevelse er korrigeret for præferencevoteringen²⁰. Herved er det muligt at klarlægge, hvor meget den termiske oplevelse overskrider præferencen. Disse er illustreret på figur 3.14.

²⁰Korrigeret termisk oplevelse = $\text{Aktuel termisk oplevelse} - \text{Termisk præference}$

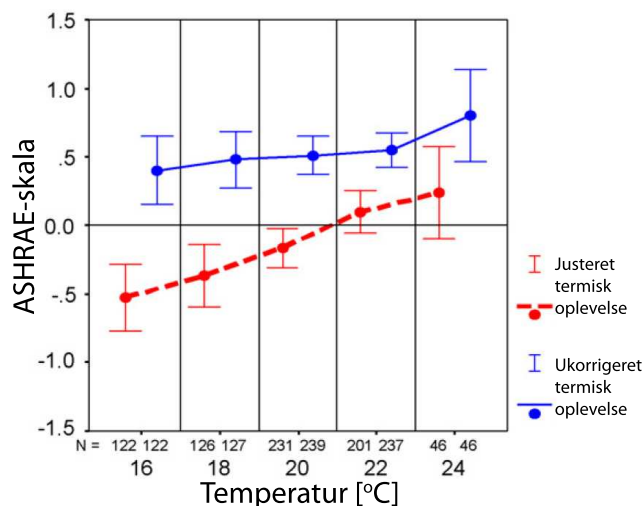
3.10 Skalaer for termisk komfort og præference



Figur 3.14: Distributioner af voteringer af termisk oplevelse ukorrigeret (a) og korrigeret for termisk præference (b). værdien "0" på den justerede skala angiver, at personen hverken føler sig varmere eller koldere end ønsket. En positiv værdi angiver hvor meget personen føler sig varmere end ønsket og en negativ værdi angiver hvor meget koldere en person føler sig end ønsket. (efter Humphreys og Hancock [2007])

Af figur 3.14(b) fremgår det, at i ca. 46% af tilfældene var personerne i deres ønskede termiske tilstand, hvorimod figur 3.14(a) viser at kun ca. 33% er i termisk neutralitet. Graden af termisk accept var således højere end den konventionelle ukorrigerede skala viser. Standardafvigelsen for de enkelte distributioner var ret ens, men middelværdierne antog ret forskellige værdier jf. figur 3.14(a) og (b). Forskellen imellem disse er vigtig, idet denne vil medføre forskellige konklusioner vedrørende den optimale rumtemperatur for opnåelse af termisk komfort.

Sammen med komfortvoteringerne, blev der som nævnt tidligere også udført sideløbende temperaturmålinger i såvel undervisningslokalet som boligerne. Følgende figur viser hhv. korrigerede og ukorrigerede komfortvoteringer som funktion af den målte indetemperatur for alle data.



Figur 3.15: Korrigerede og ukorrigerede komfortvoteringer som funktion af målt rumtemperatur (efter Humphreys og Hancock [2007])

Af figur 3.15 ses det, at de korrigerede komfortvoteringer generelt ligger lavere end de ukorrigerede. Ved en rumtemperatur på 20°C stemte personerne ca. 0,5 hvorimod den korrigerede linje viser en ønsket værdi på ca. -0,3. Personerne angav således at de var varmere end neutral (blå linje), men samtidig ses det, at de følte sig koldere end de ønskede (røde linje). Temperaturen for termisk neutralitet²¹ er også meget forskellig. For de ukorrigerede værdier optræder denne udenfor plottet, mens den for de korrigerede værdier antager værdien ca. 21°C.

Ovenstående undersøgelser af termisk oplevelse i forhold til termisk præference i forbindelse med brug af ASHRAE-skalaen har vist, at det ikke er tilstrækkeligt udelukkende at inkludere voteringer af termisk oplevelse, men i høj grad også præferencevoteringer. Undersøgelserne viste, at personer i kolde miljøer generelt foretrækker det lidt varmere på trods af, at de var i termisk neutralitet. Sammen med undersøgelserne beskrevet i afsnit 4.1.1, 4.1.2 og 4.1.4 fremgår det, at termisk præference er essentielt i forbindelse med indeklimavurderinger, hvorfor spørgeskemaundersøgelser altid bør indeholde præferencevoteringer. Det faktum at personer generelt tillader højere temperaturer har stor indflydelse på energiforbruget i bygninger. Idet personerne accepterer højere temperaturer, vil kølebehovet kunne nedsættes, hvilket vil have stor effekt på energiforbruget og dermed CO₂-belastningen. Dette er bl.a. behandlet nærmere i det senere afsnit 4.1.4, hvor en adaptiv kontrolalgoritme til styring af indetemperaturen som funktion af udetemperaturen præsenteres og diskuteres.

²¹ værdien "0" på ASHRAE-skalaen

Adaptive modeller

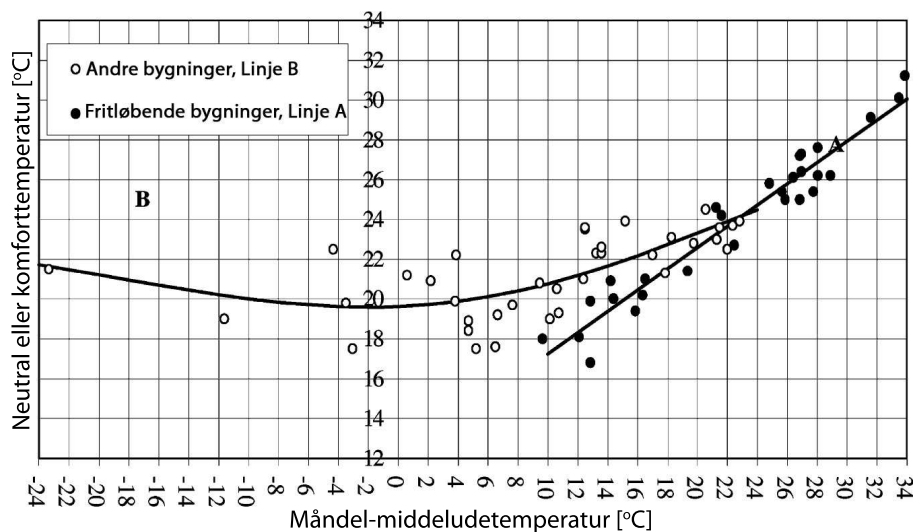
4

I nærværende kapitel præsenteres og diskuteres forskellige adaptive modeller, med henblik på evt. videre brug af disse i opstillingen af ydeevneindikatoren jf. formålet med nærværende projekt. Nedenstående gennemgang indeholder ikke samtlige adaptive modeller men kun udvalgte projekter der er fundet særligt vigtige for nærværende projekt. Først vil baggrunden for udviklingen af de adaptive modeller blive præsenteret, hvorefter de enkelte modeller præsenteres og diskuteres nærmere.

Efter Fanger [1972] præsenterede PMV-modellen, har denne været underlagt mange undersøgelser i såvel klimakamre som bygninger. Hvor undersøgelserne i klimakamre har vist god overensstemmelse mellem den aktuelle og den af PMV-modellen forudsagte termiske oplevelse, har undersøgelserne i bygninger vist afvigelser heri. Humphreys [1975] udførte meta-analyser af data fra Bedford [1936] indeholdende over 200.000 observationer fra 36 feltundersøgelser i Afrika, Amerika, Asien, Australien og Europa, hvor vurderinger af den termiske oplevelse efter Bedford-skalaen¹ blev indsamlet sammen med korresponderende målinger af luft- og middelstrålingstemperatur, lufthastighed og luftfugtighed. Humphreys [1975] foretog bl.a. undersøgelser af forholdet mellem hhv. neutral og komforttemperatur og de aktuelle indetemperaturer samt undersøgelser af personernes termiske følsomhed overfor ændringer i rummet. Der blev fundet en påviselig afvigelse, især i varme klimaer, mellem forskellige fysiologiske komfortmodeller - herunder PMV-modellen af Fanger [1972]. Ydermere fremgik det af komfortvurderingerne, at personer i varme klimaer generelt foretrak det lidt koldere end neutral og omvendt i kolde klimaer lidt varmere end neutral.

Humphreys [1978] foretog en efterfølgende meta-analyse af selvsamme data, hvor indflydelsen fra de udeklimatiske forhold blev inkluderet. Følgende figur 4.1 viser resultaterne fra analysen, hvor komforttemperaturen er plottet som funktion af måneds-middeludetemperatur.

¹7-punkts-skala. Behandlet nærmere i afsnit 3.10



Figur 4.1: Komforttemperatur som funktion af måneds-middeludetemperatur (efter Humphreys [1978])

I figur 4.1 er der skelnet mellem "fritløbende" og "andre" bygninger. I fritløbende bygninger er varme- eller køleanlægget ikke i drift og det termiske indeklima "driver" således påvirket af det aktuelle udeklima. Som det også fremgår af figuren, forekom der ikke bygninger i fritløbende drift ved måneds-middeludetemperaturer under ca. 10°C. Herunder var varmeanlægget i drift i alle bygninger.

Af figur 4.1 fremgår det, at forskellen i komforttemperatur i de forskellige typer bygninger er forskellig. I de fritløbende bygninger ses det, at komforttemperaturen kan antages i lineær sammenhæng med måneds-middeludetemperatur, hvorimod sammenhængen synes mere kompleks for andre bygninger. Endvidere ses det, at komforttemperaturen i de fritløbende bygninger spænder over et interval på ca. 13°C. Humphreys [1978] foreslog derfor, at komforttemperaturen i fritløbende bygninger kunne beregnes som en lineær funktion af måneds-middeludetemperatur:

$$t_{comf} = a \cdot t_{ude} + b \tag{4.1}$$

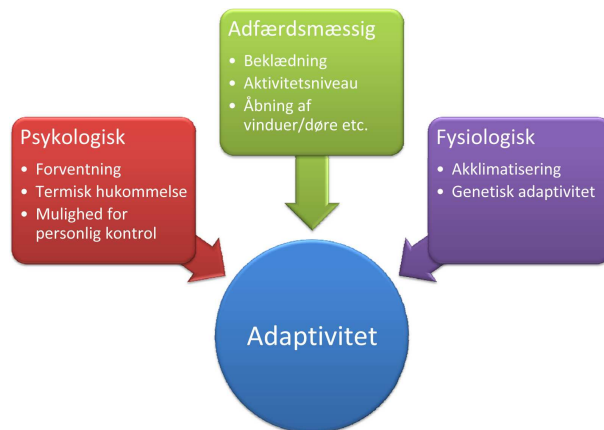
hvor

t_{comf}	=	Komforttemperatur	[°C]
t_{ude}	=	Måneds-middeludetemperatur	[°C]
a og b	=	Konstanter	[-]

De ovenfor beskrevne afvigelser mellem den aktuelle og den af fysiologiske modeller estimerede termiske oplevelse lagde grunden for den adaptive komfortteori idet det blev antaget, at den termiske oplevelse i høj grad var påvirket af den termiske historik. Efterfølgende er der foretaget talrige undersøgelser i forsøget på at klarlægge hvorfra denne afvigelse kommer, og hvordan de fysiologiske modeller kan optimeres eller erstattes for at tage højde herfor.

I den adaptive komfortteori opdeles personers adaptivitet i tre bidrag, indenfor hvilke afvigelsen mellem de eksisterende fysiologiske modeller og feltundersøgelser kan placeres. Disse er illustreret

på følgende figur 4.2.



Figur 4.2: Personers adaptivitet opdelt i tre bidrag.

De enkelte adaptive processer kan yderligere beskrives i detaljer (efter de Dear et al. [1997]):

Psykologisk Ændret oplevelse af og reaktion på termiske påvirkninger som følge af foregående termiske oplevelser og forventning til det aktuelle termiske indeklima på baggrund heraf.

Adfærdsmæssig Alle ændringer en person foretager i forsøget på at opretholde egen termisk komfort. Disse ændringer kan enten ske bevidst eller ubevidst og kan eksempelvis være: justering af beklædningsisolans og/eller aktivitetsniveau, åbning af vinduer eller døre, indstilling af termostater mv.

Fysiologisk Ændringer i den fysiologiske respons som følge af kroppens tilpasning til det aktuelle indeklima. Den fysiologiske adaptivitet kan opdeles i hhv. genetisk (i arvemassen) og akklimatisering (indenfor den enkelte persons levetid).

I det følgende vil indflydelsen fra den menneskelige adaptivitet blive diskuteret i detaljer med udgangspunkt i resultaterne fra de enkelte undersøgelser vedrørende den adaptive komfortteori. Foruden de adaptive modeller, indeholder de behandlede projekter også undersøgelser af tidlige variationer af indgående parametre. Disse vil også blive præsenteret og diskuteret i detaljer, hvilket foretages umiddelbart efter præsentationen og diskussionen af de adaptive komfortmodeller.

4.1 EMPIRISKE UNDERSØGELSER AF ADAPTIVITET

4.1.1 RP-884 - UDVIKLING AF ADAPTIVE MODELLER FOR TERMISK KOMFORT OG PRÆFERENCE

Følgende afsnit er baseret på resultaterne fundet i de Dear et al. [1997] og de Dear [1998].

Forskningsprojektet RP-884 af de Dear et al. [1997] udsprang som direkte konsekvens af resultaterne fra Humphreys [1978] beskrevet i det foregående, hvor den åbenlyse forskel i komforttemperatur i

bygninger i hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift blev vist. I RP-884-projektet blev der skelnet mellem:

- **Naturligt ventilerede bygninger:** Bygninger med funktionsdygtige vinduer og loftventilatorer i små en- eller tomandskontorer, hvor adaptive muligheder er store.
- **Luftkonditionerede bygninger:** Lukkede centralt styrede luftkonditionerede bygninger med åbne kontormiljøer, og hvor brugerne ingen mulighed har for åbning/lukning af vinduer.

Følgende liste angiver de af projektets formål, der har interesse for nærværende projekt (citat frit oversat fra de Dear et al. [1997]):

- Udarbejde og definere adaptive processer i konteksten af indeklimaopfattelse.
- Udvikle en indvendig ensartet og kvalitetskontrolleret database for feltundersøgelser af termisk komfort fra forskellige bygninger og klimaer på tværs af verden. Herudover at gøre databasen så vidt muligt tilgængelig for andre forskere i termisk komfort.
- Undersøge betydningen af skalaer for termisk oplevelse, accept og præference i kontekst af en adaptiv model for termisk komfort.
- Udvikle statistiske modeller for termisk komfort tydeligt baseret på de forskellige adaptive processer, inkl. justering, akklimatisering og tilvænnning.
- Undersøge indflydelsen på termisk oplevelse fra vedrørende og ikke-termiske faktorer i indeklimaet. Undersøgelsen vil indeholde påvirkning fra (men ikke begrænses til) sæson, bygningsformål (beboelse, kontor) og klimatisk baggrund på termisk oplevelse. Dette vil uundgåeligt inkludere sammenligninger med forudsigelser om termisk komfort fra varmebalance-modeller såsom PMV/PPD.

Kort opsummeret behandler projektet således en definering af de adaptive processer (nærmere beskrevet i starten af nærværende kapitel), en opstilling af en ensartet database samt opstilling af adaptive modeller på baggrund af data fra selvsamme, der sammenlignes med eksisterende komfortmodeller.

Det unikke i nærværende projekt er den store mængde data, der er indsamlet og ikke mindst efterbehandlingen af disse. Data er indsamlet som rå data i elektronisk form², hvorefter der er foretaget en ensartet behandling af data vedrørende estimering og beregning af beklædningsisolans (konverteret til en standardiseret metode), PMV, ET* etc. Databasen indeholder op imod 21.000 datasæt fra ca. 160 bygninger i landene: Australien, Canada, Grækenland, Indonesien, Pakistan, Singapore, Thailand, Storbritannien og USA - dvs. hovedsageligt varme klimaer. En mere detaljeret beskrivelse af databasen samt behandling af data kan findes i de Dear [1998].

I det følgende vil et uddrag af de vigtigste resultater fra RP-884-projektet blive præsenteret og diskuteret. Idet begrebet "termisk komfort" dækker over forskellige aspekter heraf, er der foretaget undersøgelser af de mere specifikke termer:

- Termisk neutralitet
- Termisk præference
- Termisk accept
- Termisk oplevelse

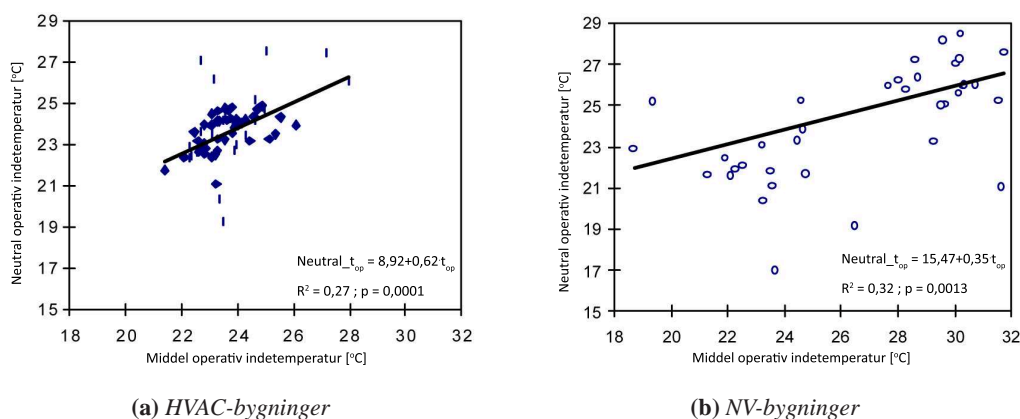
²En skabelon udviklet ifm. tidligere forskningsprojekter blev fremsendt til de deltagende

I det nedenstående er der hovedsageligt lagt vægt på de tre første punkter i ovenstående liste. Til undersøgelse af den termiske neutralitet, er der foretaget regressionsanalyser af de enkelte termiske komfortindikatorer (bl.a. operativ temperatur (t_{op}), ny effektiv temperatur (ET^*) og PMV) i forhold til den termiske oplevelse, hvor den simple lineære regressionsmodel:

$$\text{Middel termisk oplevelse} = a + b \cdot \text{Komfortindikator} \quad (4.2)$$

er benyttet. Komfortvoteringer er sammenholdt med målinger af den operative indetemperatur samt døgnmiddel effektiv udetemperatur. De benyttede lineære regressionsmodel er baseret på resultaterne i [Humphreys, 1975, 1978] og [Humphreys, 1981].

Følgende figur 4.3 viser beregnede neutrale operative indetemperaturer som funktion af middel operativ indetemperatur, beregnet ved løsning af samtlige bygnings regressionsmodeller mht. nul.



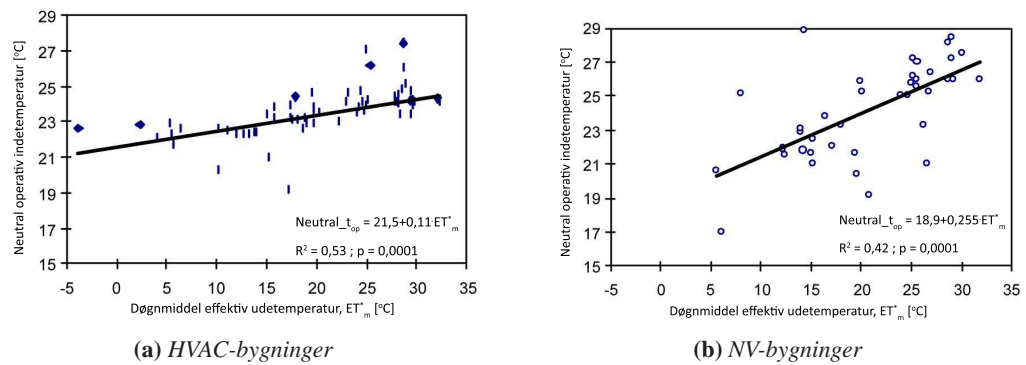
Figur 4.3: Neutral operativ indetemperatur som funktion af middel operativ indetemperatur (efter de Dear et al. [1997])

Af figur 4.3 fremgår det, at den neutrale operative indetemperatur tydeligt stiger i takt med stigende indetemperatur, hvilket understøtter teorien om personers adaptive adfærd. Den neutrale operative indetemperatur er således ikke konstant, men er påvirket af temperaturniveauet i det pågældende rum. Den gennemsnitlige hældningskoefficient³ for samtlige HVAC- og NV-bygninger er beregnet til hhv. 0,51 og 0,27. Idet gradienten er direkte relateret til sensitiviteten af den gennemsnitlige termiske oplevelse påvirket af indetemperaturen, viser de to beregnede hældningskoefficienter således, at personer i HVAC-bygninger er næsten dobbelt så følsomme overfor temperaturafvigelser ift. neutraltemperaturen end personer i NV-bygninger.

Da den adaptive adfærd, som beskrevet i begyndelsen af nærværende kapitel, ikke udelukkende kan relateres til indeklimaet, men i høj grad også til udeklimaet, er der foretaget lineære regressioner for den neutrale operative indetemperatur som funktion af døgnmiddel effektiv udetemperatur, hvilket er vist på figur 4.4.

³konstanten 'b' i ligning (4.2)

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet



Figur 4.4: Neutral operativ indetemperatur som funktion af døgnmiddel effektiv udetemperatur (efter de Dear et al. [1997])

Som det fremgår af figur 4.4 er antagelsen om at udeklimaet også har stor indflydelse på den termiske neutralitet korrekt. En yderligere antagelse er, at denne indflydelse er stærkere i bygninger, der er tættere ”knyttet” til de udeklimatiske variationer (dvs. NV-bygninger). Hældningskoefficienten for NV-bygninger er mere end dobbelt så stor som ved HVAC-bygninger, hvilket viser den større følsomhed af den operative indetemperatur ift. døgnmiddel effektiv udetemperatur i naturligt ventilerede bygninger. Endvidere bør det bemærkes, at den operative indetemperatur i HVAC-bygningerne lå i intervallet 21-25°C hvorimod et større interval forekom i de naturligt ventilerede bygninger, 19-27°C.

RP-884-databasen indeholder endvidere præferencevoteringer efter McIntyre-skalaen⁴. Ved sammenligning af disse voteringer med den termiske neutralitet kan hypotesen om at personer foretrækker varmere-end-neutral i kolde miljøer og koldere-end-neutral i varme miljøer undersøges. Dette blev foretaget for såvel HVAC- som NV-bygninger, men der blev kun opnået statistisk signifikans for HVAC-bygningerne⁵. Den lineære regression for forskellen mellem termisk neutralitet og præference blev bestemt til:

$$\begin{aligned} \text{Korrektion (semantisk afvigelse)} &= t_{op.neutral} - t_{op.ønsket} \\ &= -0,95 + 0,07 \cdot ET_m^* \end{aligned} \quad (4.3)$$

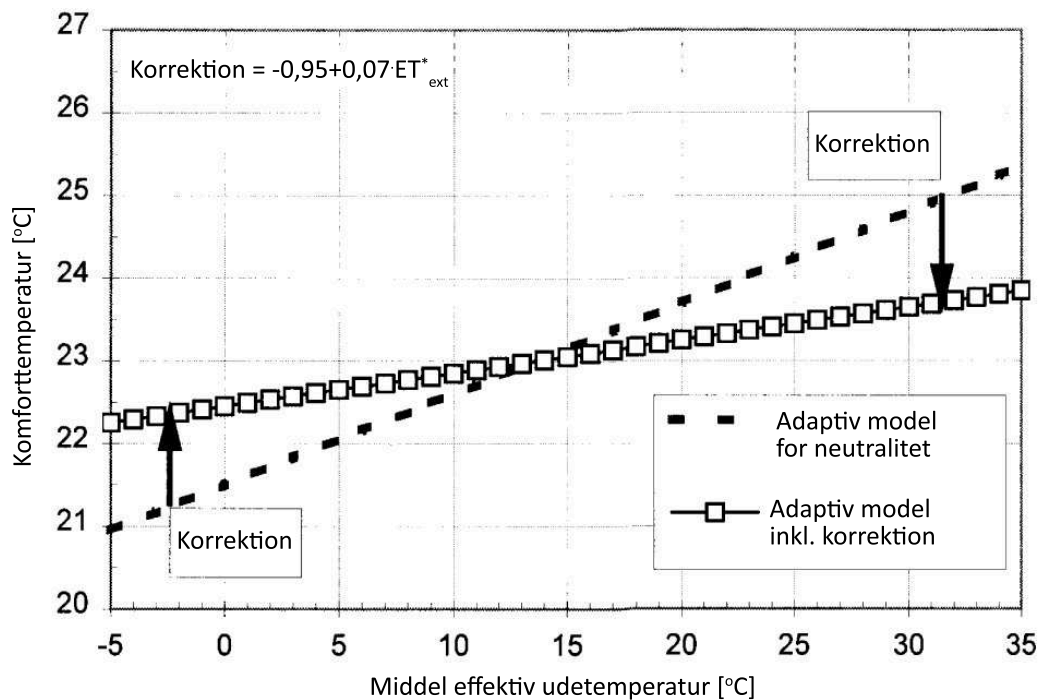
hvor

<i>Korrektion</i>	=	Korrektion for forskel mellem termisk neutralitet og præference	[°C]
$t_{op.neutral}$	=	Neutral operativ temperatur (termisk neutralitet, PMV=0)	[°C]
$t_{op.ønsket}$	=	Ønsket operativ temperatur (termisk præference)	[°C]
ET_m^*	=	Middel effektiv udetemperatur	[°C]

Den fundne afvigelse mellem termisk neutralitet og præference er endvidere vist på følgende figur.

⁴-1: Foretrækker det varmere, 0: Ingen ændring, +1: Foretrækker det koldere

⁵ $R^2 = 0,3844$; $p = 0,0001$



Figur 4.5: Termisk oplevelse ift. termisk præference. Den adaptive model er fra figur 4.4(a) og korrektionen er beregnet efter ligning (4.3) (efter de Dear et al. [1997])

Af figuren ses det, at ved en middel effektiv udetemperatur på 0°C , foretrak personer en temperatur på ca. 1°C højere end deres termiske neutralitet. Modsat foretrak personer en temperatur på ca. 1°C lavere ved en middel effektiv udetemperatur på 28°C . Korrektionen viser således, at frem for brugen af den termiske neutralitet som komfortindikator, ville den termiske præference måske være mere korrekt.

Efter korrektion for termisk præference i HVAC-bygninger, er modellerne for termisk neutralitet i hhv. HVAC- og NV-bygninger fundet i RP-884-projektet givet ved (hvor ligning (4.6) er korrigeret for termisk præference ift. ligningen angivet i figur 4.4(a)):

Som funktion af middel operativ indetemperatur:

$$t_{op,neutral,HVAC,topm} = 8,92 + 0,62 \cdot t_{op,m} \quad (4.4)$$

$$t_{op,neutral,NV,topm} = 15,47 + 0,35 \cdot t_{op,m} \quad (4.5)$$

Som funktion af middel effektiv udetemperatur:

$$t_{op,neutral,HVAC,ETm} = 22,6 + 0,04 \cdot ET_m^* \quad (4.6)$$

$$t_{op,neutral,NV,ETm} = 18,9 + 0,26 \cdot ET_m^* \quad (4.7)$$

hvor

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

$t_{op,neutral,HVAC,topm}$	=	Middel operativ indetemperatur, HVAC-bygninger	[°C]
$t_{op,neutral,NV,topm}$	=	Middel operativ indetemperatur, NV-bygninger	[°C]
$t_{op,neutral,HVAC,ETm}$	=	Middel operativ indetemperatur, HVAC-bygninger	[°C]
$t_{op,neutral,NV,ETm}$	=	Middel operativ indetemperatur, NV-bygninger	[°C]
$t_{op,m}$	=	Middel operativ indetemperatur	[°C]
ET_m^*	=	Middel effektiv udetemperatur (middel ^a af ligning (3.2))	[°C]

^aMiddel af effektiv temperatur målt kl. 6.00 og 15.00

Ligningerne er efterfølgende modificeret, således neutraltemperaturen beregnes som funktion af middel udelufttemperatur [de Dear og Brager, 2002; Boerstra et al., 2003].

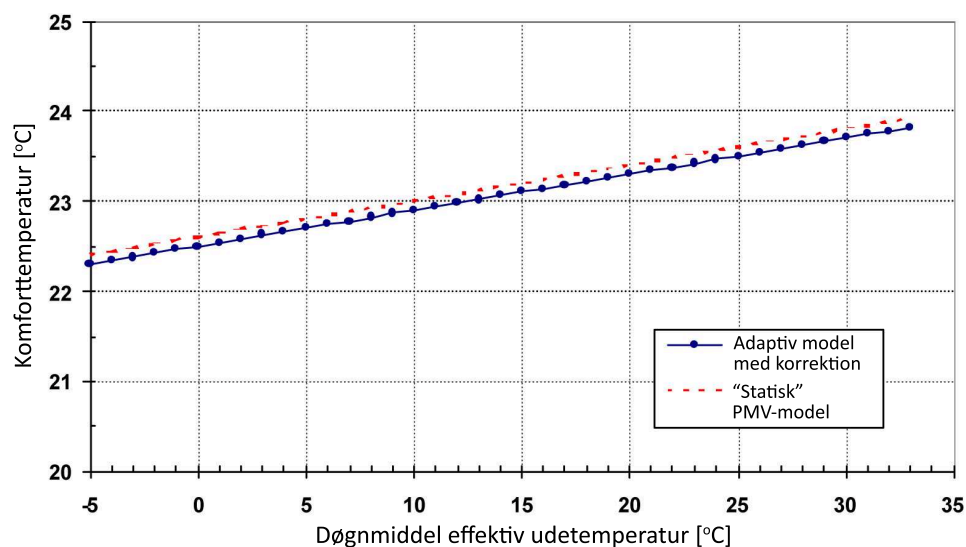
$$t_{op,neutral,HVAC,tude} = 21,45 + 0,11 \cdot t_{a,ude} \quad (4.8)$$

$$t_{op,neutral,NV,tude} = 17,8 + 0,31 \cdot t_{a,ude} \quad (4.9)$$

hvor

$t_{op,neutral,HVAC,tude}$	=	Middel operativ indetemperatur, HVAC-bygninger	[°C]
$t_{op,neutral,NV,tude}$	=	Middel operativ indetemperatur, NV-bygninger	[°C]
$t_{a,ude}$	=	Middel udelufttemperatur	[°C]

De fundne modeller for termisk neutralitet blev endvidere sammenlignet med PMV-modellen af Fanger [1972], hvilket er illustreret på følgende figurer 4.6 og 4.7. I figur 4.6 er den adaptive model sammenlignet med PMV-modellen for HVAC-bygninger.

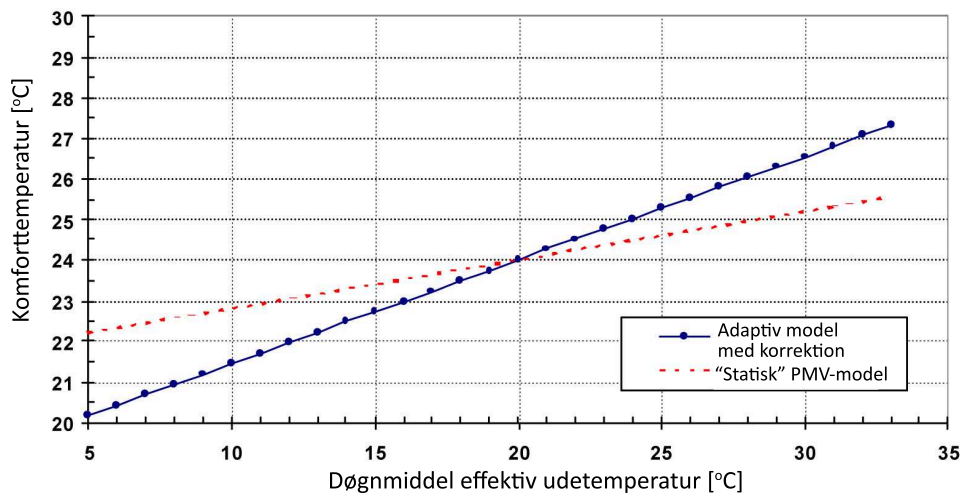


Figur 4.6: Sammenligning af adaptiv model for HVAC-bygninger (ligning (4.6)) og PMV-modellen af Fanger [1972] (efter de Dear et al. [1997])

For den adaptive model i figur 4.6 bemærkes det, at de observerede neutrale temperaturer kun va-

rierer omkring 2°C i et udeklimatisk interval på ca. 40°C . Det kan jf. de Dear et al. [1997] tolkes som, at personer i de mekanisk ventilerede bygninger har adapteret sig til det mere eller mindre stationære termiske indeklima der forefindes i sådanne bygninger i modsætning til NV-bygninger. Spørgsmålet er således i hvilken form adaptationen er foretaget, hvilket kan besvares ved sammenligning af den adaptive model med PMV-modellen udledt af Fanger [1972]. Som det fremgår af figur 4.6, er sammenhængen mellem neutraltemperatur og middel effektiv udetemperatur efter hhv. den adaptive og PMV-modellen stort set identisk. Den gode overensstemmelse mellem den adaptive og PMV-modellen skyldes det faktum, at PMV-modellen bl.a. er beregnet på baggrund af beklædningsisolans, lufthastighed samt aktivitetsniveau. Herved er korrektionen for den menneskelige adaptive adfærd indirekte foretaget i PMV-modellen, der forudsiger den termiske neutralitet i HVAC-bygninger godt.

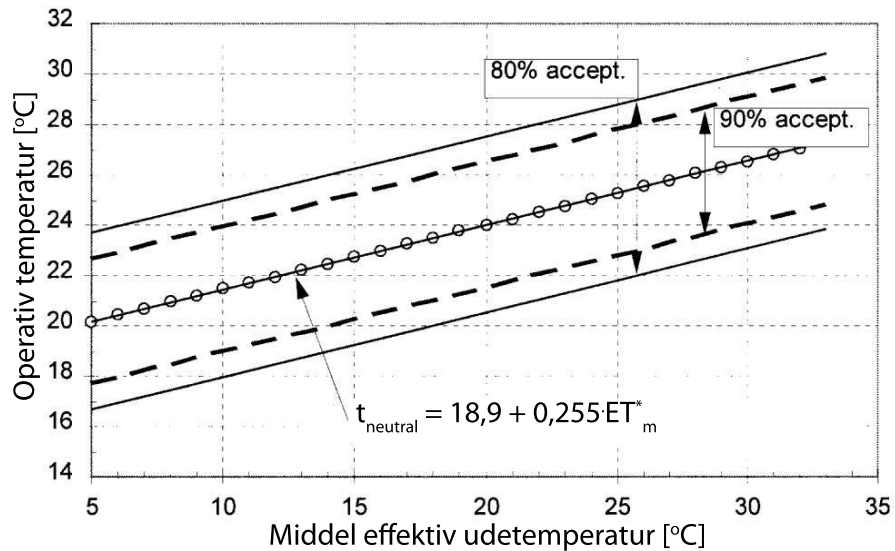
I følgende figur 4.7 er den adaptive model sammenlignet med PMV-modellen for NV-bygninger. Det skal bemærkes, at der ikke blev fundet en systematisk sammenhæng mellem termisk neutralitet og præference for NV-bygningerne, hvorfor der ikke er foretaget en korrektion herfor i dette tilfælde.



Figur 4.7: Sammenligning af adaptiv model for NV-bygninger (ligning (4.7)) og PMV-modellen af Fanger [1972] (efter de Dear et al. [1997])

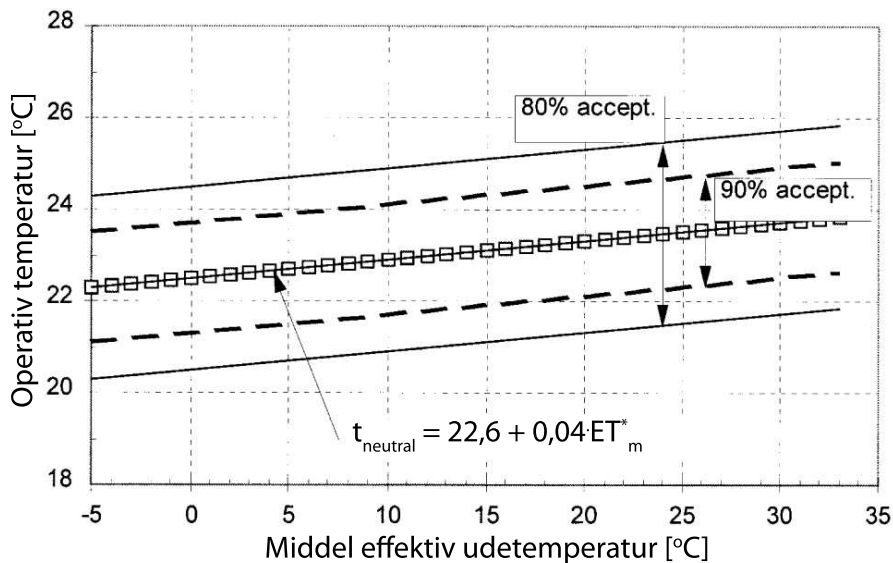
Af figur 4.7 ses det, at der ikke opnås samme lighed mellem den "stationære" PMV-model og den adaptive model fundet i RP-884-projektet. Hælningskoefficienten for den adaptive model er næsten dobbelt så stor som for PMV-modellen, og det kan således konkluderes, at kun halvdelen af den klimatiske indflydelse på den termiske neutralitet kan tilskrives den adfærdsrelaterede adaptive tilpasning (beklædningsisolans, lufthastighed mv.). Den anden halvdel skal således findes blandt den fysiologiske og psykologiske adaptation i form af hhv. akklimatisering og tilvænnning. Som beskrevet i indledningen, er der ikke fundet beviser for en væsentlig indflydelse fra akklimatiseringen, hvorfor der kan ses bort fra denne. Den anden halvdel af den klimatiske indflydelse på neutraltemperaturen må således tillægges den psykologiske adaptation gennem tilvænnning og forventning til det aktuelle indeklima. PMV-modellen, der bygger på den stationære varmebalance for kroppen i et givet termisk miljø, kan i sin nuværende form ikke tage hensyn til denne psykologiske påvirkning, men det er tydeligt jf. 4.7 at termisk komfort ikke blot afhænger af de aktuelle termiske forhold, men i høj grad også af den termiske "hukommelse".

Foruden det ovenfor præsenterede, opstiller de Dear et al. [1997] endvidere modeller for den termiske accept. Normerne DS/EN ISO 7730 [2006]; ANSI/ASHRAE 55 [2004] og DS/EN 15251 [2007] angiver som eksempel komfortkriterier ud fra et PMV-interval indenfor hvilket de beregnede PMV-værdier (og herved operative temperaturer) bør ligge. Eksempelvis skal PMV-værdien for 90%’s accept jf. DS/EN ISO 7730 [2006] ligge i intervallet $-0,5 < PMV < +0,5$. I RP-884-projektet opstilles der, med udgangspunkt i PMV/PPD-indekset, tilsvarende modeller baseret på hhv. 90 og 80%’s accept. Ved erstatning af den observerede termiske oplevelse med PMV-indekset i den lineære regression, er der med de nævnte grænser for accept opstillet følgende grafer.



Figur 4.8: Dynamiske grænser for termisk accept bestemt for NV-bygninger på baggrund af PMV/PPD-indekset. 90 og 80%’s termisk accept bygger på temperaturintervaller på hhv. 2,5 og 3,5° C fundet ved statistisk analyse (standardafvigelse) (efter de Dear et al. [1997])

Tilsvarende er der for den HVAC-bygninger opstillet følgende.



Figur 4.9: Dynamiske grænser for termisk accept bestemt for HVAC-bygninger på baggrund af PMV/PPD-indekset. 90 og 80%’s termisk accept bygger på temperaturintervaller på hhv. 1,25 og 2,0° C fundet ved statistisk analyse (standardafvigelser) (efter de Dear et al. [1997])

Komfortgrænserne i figur 4.8 og 4.9 er opstillet på baggrund af statistiske analyser for de benyttede data i form af standardafvigelser. Disse er opsummeret i følgende tabel.

Tabel 4.1: Statistisk analyse af data fra RP-884-projektet (efter de Dear et al. [1997])

	HVAC	NV
Antal bygninger	108	41
Antal bygninger hvor regressionsmodel opnåede 95% statistisk signifikans	62	33
80% termisk accept, std.afv.	(±1, 91)	(±3, 27)
90% termisk accept, std.afv.	(±1, 12)	(±2, 79)

Ovenstående figurer 4.8 og 4.9 kan benyttes til klassificering af det aktuelle termiske indeklime som funktion af den effektive middeludetemperatur beregnet efter ligning (3.2) med hensyntagen til personers psykologiske og adfærdsmæssige adaptivitet.

En opsummering af resultaterne fra RP-884-projektet er punktvis opstillet. Endvidere er gyldighedsområdet for de opstillede adaptive modeller vist:

- Nødvendigt med en standardisering af estimeringsproceduren for beklædningsisolans. Herunder er det vigtigt at tage hensyn til bidraget fra stolen.
- Der skal tages hensyn til, at termisk neutralitet ikke altid er identisk med termisk præference (set ved HVAC-bygninger)
- Personer i NV-bygninger er mere tolerante overfor et større temperaturinterval.
- Akklimatisering (fysiologisk adaptivitet) har ingen nævneværdig indflydelse

- PMV-modellen tager hensyn til adfærdsrelateret adaptivitet i form af beklædningsisolans, aktivitetsniveau samt lufthastighed.
- Forskel mellem aktuel og beregnet termisk neutralitet tilskrives den psykologiske adaptivitet (forventninger og tilvænning)
- På baggrund af resultater fra undersøgelserne, er der opstillet adaptive modeller til bestemmelse af termisk neutralitet i såvel naturligt ventilerede som fuldt luftkonditionerede bygninger. De adaptive modeller er opstillet med følgende gyldighedsinterval:
 - Aktivitetsniveau: 1,2-1,6 met
 - Beklædning kan varieres frit i intervallet 0,5-1,0 clo
 - Adgang til funktionsdygtige vinduer (gælder kun for NV-modellen)
 - Mindre end 4 personer per rum

de Dear et al. [1997] påpeger at yderligere undersøgelser vedr. forholdet mellem termisk neutralitet og præference for NV-bygninger bør foretages, idet der ikke blev fundet nogen klar relation for denne type bygninger.

I RP-884-projektet blev der også foretaget yderligere undersøgelser af hhv. inde- og udeklimaets indflydelse på den adaptive adfærd i form af ændret beklædningsisolans, aktivitetsniveau samt lokal lufthastighed. Disse er sammen med andre lignende undersøgelser præsenteret og diskuteret senere i afsnit 4.2.

4.1.2 RP-1161 - ANVENDELIGE VINDUER, PERSONLIG KONTROL OG TERMISK KOMFORT

I forskningsprojektet RP-884 af de Dear et al. [1997], blev der fundet beviser på den adaptive adfærd, idet neutraltemperaturen for personer i naturligt ventilerede bygninger var højere end i HVAC-bygninger som beskrevet i det foregående afsnit. Den umiddelbare forklaring på dette var, at såfremt personer har egenkontrol over deres termiske miljø og påvirkningen heraf gennem åbning af vinduer/døre samt indstilling af termostater mv., ville der blive tilladt højere temperaturer.

Målet med det efterfølgende forskningsprojekt, RP-1161 udført af Brager et al. [2004], var at undersøge indflydelsen af denne personlige kontrol på den termiske opfattelse. Hertil blev der udført indeklimamålinger sammen med spørgeskemaundersøgelser i en naturligt ventileret bygning i San Francisco indrettet som landskabs-kontor, hvor 38 personer deltog. Undersøgelsen blev opdelt i følgende to dele:

- **Baggrundsundersøgelse**
 - Kontinuerte målinger af temperatur og luftfugtighed i forskellige zoner i bygninger
 - Web-baseret spørgeskemaundersøgelse, sæsonmæssige indtryk (udført en gang i hhv. kold og varm sæson)
 - Varighed: to uger i både varm og kold sæson
- **Detaljeret undersøgelse**
 - Kontinuerte målinger af tør lufttemperatur⁶, mættet lufttemperatur⁷, globe-temperatur⁸ og lufthastighed ved samtlige arbejdspladser (mikroklima) samt vejrdata fra meteorologisk vejrstation.
 - Web-baseret spørgeskemaundersøgelser flere gange dagligt (2-3 gange), nuværende indtryk
 - Varighed: to uger i både varm og kold sæson udført umiddelbart efter baggrundsundersøgelse
- **Udelufttemperaturer (min / middel / maks)**
 - Varm periode (24/9-8/10): 11,6°C / 16,9°C / 28,1°C
 - Kold periode (26/2-13/3): 11,6°C / 11,8°C / 17,3°C

I den detaljerede undersøgelse, blev der afviklet spørgeskemaundersøgelser, hvor de enkelte personer dels skulle angive hvorvidt de følte termisk neutralitet samt deres termiske præference⁹. Disse data kunne efterfølgende sammenholdes med data fra målingerne af mikroklimaet ved hver enkelt arbejdsplads. Nedenstående tabel opsummerer udvalgte måleresultater fra Brager et al. [2004].

⁶dry-bulb temperature

⁷wet-bulb temperature

⁸benyttes til bestemmelse af middelstrålingstemperaturen samt den termiske belastning på personer, der arbejder i varme omgivelser [Hansen et al., 1997] (Kan beregnes som: $t_{mrt} = t_g \cdot (1 + 2,35 \cdot \sqrt{v_a}) - 2,35 \cdot t_a \cdot \sqrt{v_a}$, hvor t_g er globe-temperaturen, t_a er lufttemperaturen og v_a er lufthastigheden [McCartney og Nicol, 2002])

⁹-1: Ønsker det varmere, 0: Ingen ændring, +1: Ønsker det koldere

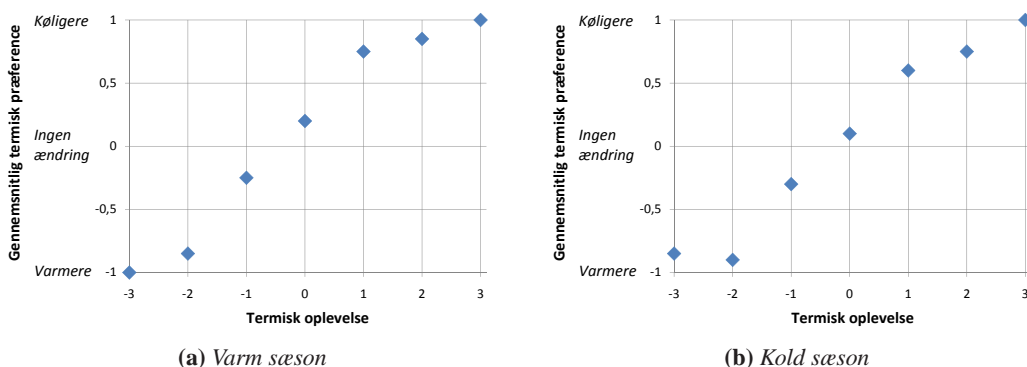
4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

Tabel 4.2: Udvalgte måledata fra detaljeret undersøgelse (fra Brager et al. [2004])

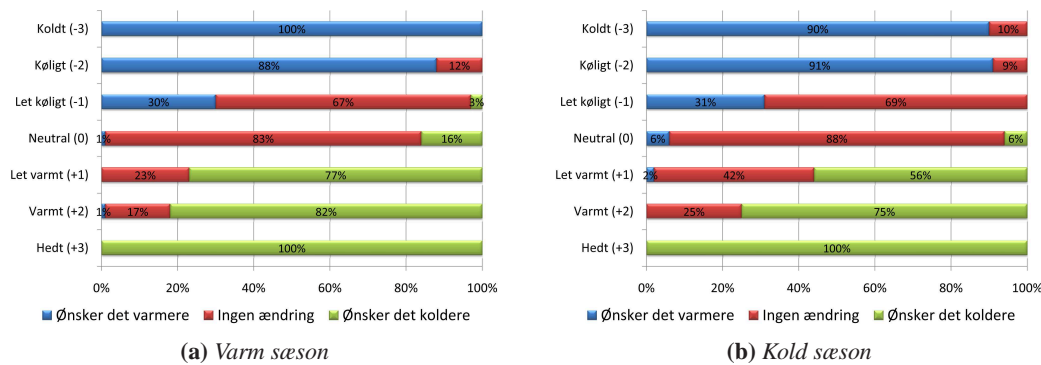
	Varm sæson				Kold sæson			
	Middel	Std.afv.	Min	Maks	Middel	Std.afv.	Min	Maks
Beklædningsisolans [clo]	0,7	0,2	0,5	1,6	0,8	0,2	0,5	1,5
Aktivitetsniveau [met]	1,3	0,1	1,1	2,1	1,2	0,1	1,1	1,4
Operativ temperatur [°C]	24,1	1,7	19,7	32,5	22,9	1,6	17,6	30,6
Lufthastighed [$\frac{m}{s}$]	0,09	0,13	0,00	0,95	0,05	0,07	0,00	0,75
PMV	0,2	0,5	-1,3	2,2	0,0	0,4	-2,2	1,6
PPD [%]	9,8	7,7	5,0	83,0	9,1	7,7	5,0	83,0

Som det fremgår af tabel 4.2 har forskellen i operative indetemperaturer i de to måleperioder/sæsoner ikke været stor, på trods af bygningens kontekst i form af den naturlige ventilation. Den gennemsnitlige operative indetemperatur har jf. tabel 4.2 været 24,1 og 22,9°C for hhv. den varme og kolde sæson, og forskellen imellem disse er kun 1,2°C. Det samme gør sig gældende for minimum og maksimum målt operativ indetemperatur, hvor temperaturerne i den varme sæson ikke har ligget højere end ca. 2°C ift. den kolde sæson. Forskellen mellem de to sæsoners termiske indeklima, er således ikke stor.

Følgende figurer 4.10 og 4.11 angiver hhv. den termiske præference sammenfaldende med komfortvoteringer efter ASHRAE-skalen samt fordelingen af den termiske præference ud fra voteringen af termisk neutralitet (på baggrund af den detaljerede undersøgelse).



Figur 4.10: Gennemsnitlig termisk præference sammenfaldende med termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen (efter Brager et al. [2004])



Figur 4.11: Distribuering af termisk præference på baggrund af termisk neutralitet (efter Brager et al. [2004])

Som det fremgår af figur 4.10, er den termiske accept ikke symmetrisk omkring neutral. Ved fokusering på den varme sæson (figur 4.10(a)) ses det, at ønsket om en temperaturændring er større, når personer angiver det termiske indeklima til ”let varmt” fremfor ”let køligt”, hvilket også er tilfældet for målingerne i den kolde sæson vist på figur 4.10(b). I de termiske ekstremiteter (-3/-2 og +2/+3), er fordelingen tæt på symmetrisk.

I figur 4.11 er den procentvise fordeling af den termiske præference som funktion af komfortvoteringen vist. For begge sæsoner gælder det, at ved termisk neutralitet ønsker størstedelen ingen temperaturændring (hhv. 83 og 88%). Generelt ses det, at personer i højere grad accepterer let kølige omgivelser (-1) idet hhv. 67 og 69% ikke ønsker nogen ændring i modsætning til let varme omgivelser (+1), hvor kun hhv. 23 og 42% ikke ønsker ændringer. Ved kølige og varme omgivelser (± 2), er det modsatte gældende. Endvidere er det interessant at se, at personerne i den varme sæson generelt accepterer og ønsker lavere temperaturer og modsat i den kolde sæson. Idet intervallet for den operative indetemperatur i de to måleperioder ikke afviger meget fra hinanden jf. tabel 4.2, vil denne tendens måske være mere udpræget såfremt der blev målt i bygninger placeret, hvor den klimatiske kontekst opnår større spredning i det termiske indeklima.

Foruden undersøgelserne vedr. den termiske oplevelse i forhold til præference, blev der også foretaget lineære regressioner mellem forskellige komfortindikatorer¹⁰ og de registrerede komfortvoteringer (AMV). Den største korrelation blev fundet ved regression mellem operativ indetemperatur og komfortvotering. De lineære regressioner er givet ved:

Varm sæson:

$$ThSens_{varm} = 0,30 \cdot t_{op} - 6,90 \quad (R^2 = 0,90) \quad (4.10)$$

Kold sæson:

$$ThSens_{kold} = 0,19 \cdot t_{op} - 4,20 \quad (R^2 = 0,69) \quad (4.11)$$

hvor

$$\begin{aligned} ThSens_{varm} &= \text{Termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen, varm sæson} & [^{\circ}C] \\ ThSens_{kold} &= \text{Termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen, kold sæson} & [^{\circ}C] \\ t_{op,m} &= \text{Middel operativ indetemperatur} & [^{\circ}C] \end{aligned}$$

¹⁰Herunder: t_{op} , ET^* , SET og PMV

Ved løsning af ligning (4.10) og (4.11) for $PMV=0$ (termisk neutralitet), er neutraltemperaturen i de enkelte perioder bestemt til hhv. 23,0 og 22,1°C. Disse neutrale temperaturer er imidlertid indirekte påvirket af graden af personlig kontrol, hvilket også blev undersøgt i projektet. Graden af mulighed for personlig kontrol blev på baggrund af indledende opdelinger/kriterier (1-4) inddelt i to hovedkategorier¹¹:

- **PK-høj**
 - 1: Direkte kontrol, privat kontor
 - 2: Direkte kontrol, landskabskontor, arbejdsplads lige ved vindue
- **PK-lav**
 - 3: Indirekte kontrol, landskabskontor, arbejdsplads et skrivebord væk fra vindue
 - 4: Ingen kontrol, landskabskontor, arbejdsplads afskærmet fra vindue

For de to ovennævnte grupper blev der igen foretaget lineære regressioner mellem komfortvoteringerne og den operative indetemperatur. På samme måde som beskrevet ovenfor, blev neutraltemperaturen ($PMV=0$) bestemt fordelt på de to grader af personlig kontrol. Resultaterne er opsummeret i følgende tabel.

Tabel 4.3: Neutraltemperatur bestem på baggrund af løsning af lineære regressioner for $PMV=0$, fordelt på grupper med hhv. høj og lav personlig kontrol. Endvidere er den neutrale operative indetemperatur bestemt for ligning (4.10)-(4.11) medtaget (fra Brager et al. [2004])

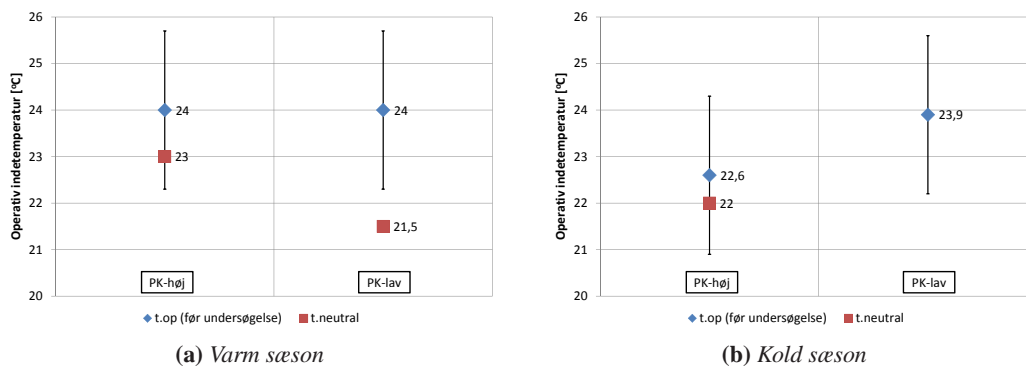
		$t_{neutral}$ [°C]	R^2	$t_{neutral,alle}$ [°C]
Varm sæson	PK-høj	23,0	0,94	23,0
	PK-lav	21,5	0,48	
Kold sæson	PK-høj	22,0	0,82	22,1
	PK-lav	a)	a)	

a) Regressionsmodel var ikke statistisk signifikant, $p>0,05$

Som det fremgår af tabel 4.3, var neutraltemperaturen ved manglende/mindre grad af mulighed for personlig kontrol lavere end for de personer, der havde direkte adgang til åbning af vinduerne. Dog bør det nævnes, at idet forklaringsgraden, $R^2 = 0,48$, er det således kun ca. halvdelen af ændringerne i den termiske oplevelse, der kan tilskrives ændringerne i den operative indetemperatur.

For at undersøge den adaptive teori om, at den termiske oplevelse er afhængig af de foregående termiske oplevelser, hvilket resulterer i en adfærdsmæssig adaptivitet såsom ændring af beklædningsisolans, aktivitetsniveau og lufthastighed (åbning af vinduer) samt psykologisk adaptivitet i form af skiftende forventninger til det termiske indeklima, sammenligner Brager et al. [2004] den gennemsnitlige operative indetemperatur forud for hver komfortvotering med de efterfølgende voteringsfordelt på de to grupper af mulighed for personlig kontrol. Resultatet heraf er illustreret i figur 4.12.

¹¹PK: Personlig Kontrol

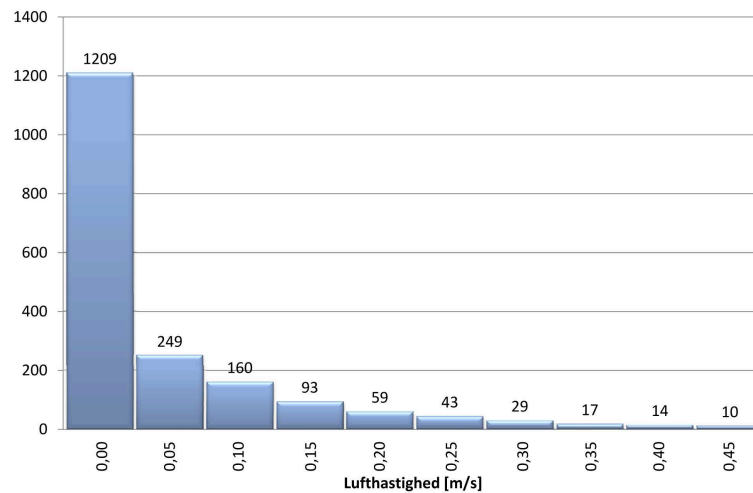


Figur 4.12: Operativ indetemperatur for tidsrummet forud for undersøgelsen (*t.op*) ift. neutral operativ indetemperatur (*t.neutral*) fordelt på kategorierne høj/lav personlig kontrol (efter Brager et al. [2004])

Af figur 4.12(a) fremgår det, at personer med såvel høj som lav mulighed for personlig kontrol oplevede samme operative indetemperatur forud for spørgeskemaundersøgelsen i den varme sæson, men for personerne med høj mulighed for personlig kontrol var neutraltemperaturen ($Th_{Sens} = 0$) højere. I den kolde sæson illustreret på figur 4.12(b), er det ikke muligt at lave samme sammenligning, idet data for personer med lav mulighed for personlig kontrol ikke opnåede statistisk signifikans. Brager et al. [2004] antyder dog, at tendensen til adaptivitet for personer med høj mulighed for personlig kontrol også er tilstede her, idet neutraltemperaturen ligger tæt på den, forud for undersøgelsen, oplevede operative indetemperatur. Dette er dog svært at konkludere med god overbevisning, idet mange andre faktorer har indflydelse på neutraltemperaturen, og da der ikke er en tilsvarende neutraltemperatur for personer med lav mulighed for kontrol at sammenligne med, må konklusionen bero på antagelser og ikke empiriske beviser.

Foruden netop præsenterede resultater fra analyserne af termisk neutralitet og præference ift. operativ indetemperatur, blev der også foretaget undersøgelser af indflydelsen fra den lokale lufthastighed. Jf. tabel 4.2 var de gennemsnitlige målte lufthastigheder $0,09$ og $0,05 \frac{m}{s}$ i hhv. varm og kold sæson. Følgende figur 4.13 viser fordelingen af de målte lufthastigheder hvoraf det fremgår, at i ca. 91% af tiden var lufthastigheden maksimalt $0,15 \frac{m}{s}$.

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet



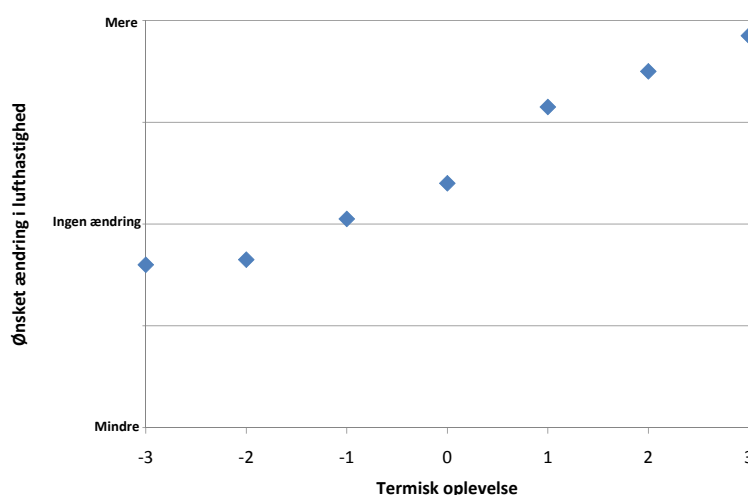
Figur 4.13: Fordeling af målte lufthastigheder for varm og kold sæson. I ca. 91% af tiden, var lufthastigheden ikke over $0,15 \frac{m}{s}$. (efter Brager et al. [2004])

Sammen med målingerne af lufthastigheden, blev de enkelte personer spurgt om de ønskede større eller mindre lufthastighed eller inden ændring. Resultaterne heraf er opsummeret i tabel 4.4.

Tabel 4.4: Ønsket lufthastighed fordelt på de to sæsoner (fra Brager et al. [2004])

	Varm sæson	Kold sæson
(1) Ønsker mere	45%	28%
(2) Ingen ændring	52%	68%
(3) Ønsker mindre	3%	4%

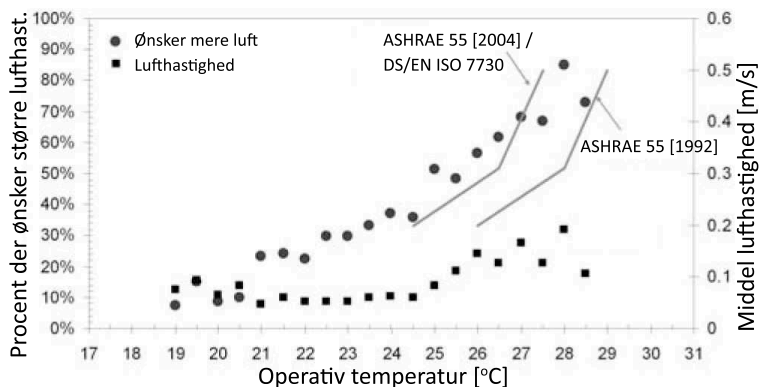
Som det fremgår af tabel 4.4, opstod der i måleperioderne generelt ikke træk, idet kun 3-4% ønskede lavere lufthastighed. Andelen af personer der ønskede større lufthastighed var langt større (45 og 28% for hhv. varm og kold sæson). For at undersøge dette nærmere opstilles følgende figur 4.14, hvor de ønskede ændringer i lufthastigheden er vist i forhold til den termiske neutralitet efter ASHRAE-skalaen.



Figur 4.14: Ønsket ændring i lufthastighed i forhold til komfortvotering/termisk neutralitet efter ASHRAE-skalaen (efter Brager et al. [2004])

Som vist på ovenstående figur, er fordelingen langt fra symmetrisk, idet størstedelen af personerne i langt større grad ønskede større lufthastighed eller ingen ændring heraf. Ved komfortvoteringer i intervallet 0 til +3 (neutral til hedt), ønskede de fleste højere lufthastigheder. Ved "let køligt" (-1) blev der generelt ikke ønsket ændringer i lufthastigheden.

Undersøgelser af sammenhængen mellem operativ indetemperatur og ønsket lufthastighed blev også udført. I følgende figur 4.15 er gennemsnitlig lufthastighed samt antallet af personer (procent), der ønsker en ændring af lufthastigheden plottet som funktion af operativ indetemperatur.



Figur 4.15: Gennemsnitlig lufthastighed samt antal procent der ønsker større lufthastighed som funktion af operativ indetemperatur. Anbefalede grænser for maksimal lufthastighed angivet i DS/EN ISO 7730 [2006]/ANSI/ASHRAE 55 [2004] samt [1992] er angivet til sammenligning (efter Brager et al. [2004])

Af figur 4.15 ses det, at ved stigende operative indetemperatur stiger ønsket om højere lufthastighed i takt hermed, hvilket også er forventet. Endvidere ses det, at personerne i et forsøg på at øge den lufthastighed, har åbnet vinduerne ved en temperatur på ca. 24,5°C, og dermed foretaget en

adfærdsmæssig adaptivitet.

I det netop præsenterede forskningsprojekt, RP-1161, har Brager et al. [2004] foretaget undersøgelser i en enkelt naturligt ventileret bygning over to perioder i en hhv. kold og varm sæson. Resultaterne herfra har indikeret en vis adaptivitet i form af højere acceptniveau ved mulighed for personlig kontrol samt justering af lufthastighed ved stigende indetemperaturer. Da den nærværende undersøgelse udelukkende bygger på undersøgelser i en enkelt bygning over en forholdsvis kort periode, kan resultaterne kun benyttes som en konstatering af, at der i den pågældende undersøgelse er forekommet adaptivitet blandt personer, og at personer med højere mulighed for kontrol har vist sig mere acceptable overfor højere temperaturer. Det empiriske grundlag er ikke stærkt nok til at kunne benytte resultaterne (f.eks. ligning (4.10) og (4.11)) ved opstillingen af de nye metoder for evaluering af det termiske indeklima, som er målet i nærværende projekt.

4.1.3 PMV_e - UDVIDELSE TIL PMV-MODELLEN

I forskningsprojektet RP-884 af de Dear et al. [1997] blev det vist, at PMV-modellen af Fanger [1972] overestimerer den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer, og således forudsiger en varmere termisk oplevelse end den personerne i virkeligheden oplever (se evt. figur 4.6 og 4.7 i afsnit 4.1.1). Afvigelsen mellem den af PMV-modellen estimerede og den reelle middel-komfortvotering kan ifølge de Dear et al. [1997] tilskrives de adaptive påvirkninger i form af adfærdsmæssig (justering af beklædning, åbning af vinduer mv.) samt psykologisk (forventninger) adaptivitet. Til estimering af neutraltemperaturen i såvel naturligt som mekanisk ventilerede bygninger opstillede de Dear et al. [1997] lineære regressionsmodeller, der kun afhænger af én parameter¹². Dette er jf. Fanger og Toftum [2002] en klar svaghed ved modellerne, idet disse ikke afhænger af hverken beklædningsisolans eller aktivitetsniveau og ej heller af de fire klassiske termiske parametre: lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed og lufthastighed, der alle har en kendt indflydelse og effekt på den menneskelige termiske komfort [Fanger, 1972].

Afvigelsen mellem PMV-modellen og de reelle komfortvoteringer i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer kan jf. Fanger og Toftum [2002] kun i mindre grad tilskrives muligheden for personlig kontrol over vinduer og lign. Dette er kun gældende for de personer, der har direkte adgang til dette. Da den fysiologiske adaptivitet i form af akklimatisering og tilvænnning jf. afsnit 4.1.1 ikke påvirker den termiske neutralitet væsentligt, må PMV-modellens overestimering ifølge Fanger og Toftum [2002] tilskrives den psykologiske adaptivitet gennem forventninger.

På baggrund af dette indfører Fanger og Toftum [2002] en forventningsfaktor, e , der skal multipliceres med den konventionelle PMV, hvorved der korrigeres for den psykologiske adaptivitet:

$$PMV_e = PMV \cdot e \quad (4.12)$$

hvor

$$\begin{aligned} PMV &= \text{Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering, beregnet ved ligning (B.25)} & [-] \\ e &= \text{Forventningsfaktor i intervallet } 0,5 \leq e \leq 1,0 & [-] \end{aligned}$$

For naturligt ventilerede bygninger afhænger forventningsfaktoren af den varme periodes varighed samt af forekomsten af luftkonditionerede bygninger i området hvori bygningen er placeret. En bygning placeret et sted, hvor forekomsten af HVAC-bygninger er lille og der forekommer lange perioder med varmt klima vil forventningsfaktoren være 0,5, hvorimod den måske vil være 0,7, hvis HVAC-bygninger er talrige i det givne område. I følgende tabel 4.5 angives et estimat af forventningsfaktoren for naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer ud fra lav, moderat og høj forventning.

¹²Enten middel operativ indetemperatur, t_{op} (ligning (4.4)-(4.5)), eller middel effektiv udetemperatur, ET^* (ligning (4.6)-(4.7))

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

Tabel 4.5: Forventningsfaktor for naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer ud fra lav, moderat eller høj forventning (fra Fanger og Toftum [2002])

Klassificering af NV-bygninger			
Forventning	Placering	Varme perioder	e
Høj	I områder hvor HVAC-bygninger er almindelige	Forekommer kort i løbet af sommersæsonen	0,9-1,0
Moderat	I områder med nogle HVAC-bygninger	Sommersæsonen	0,7-0,9
Lav	I områder med få HVAC-bygninger	Alle sæsoner	0,5-0,7

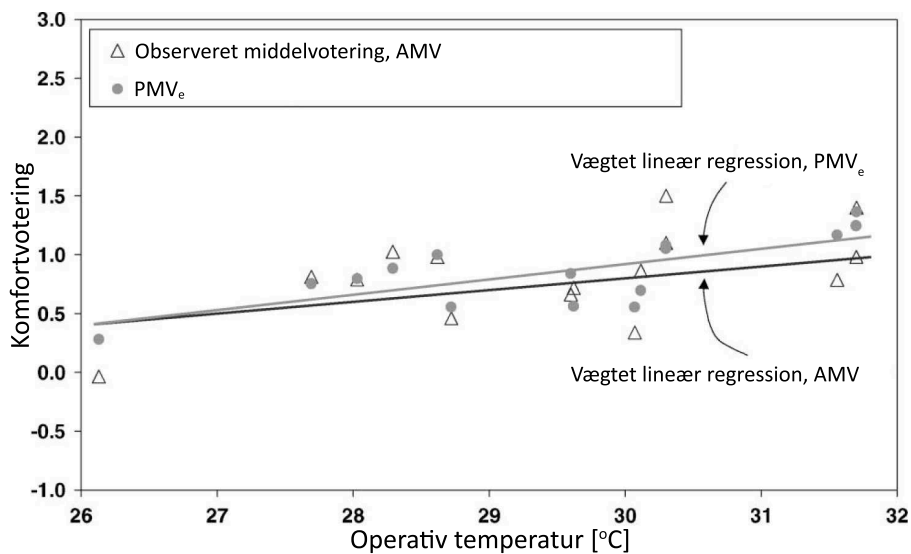
Foruden indflydelsen fra forventningen til det termiske indeklime beskrevet ovenfor, vil personer ved stigende temperaturer adaptere til de varmere omgivelser og nedjustere metabolismen [Fanger og Toftum, 2002]. Dette er beskrevet nærmere i det senere afsnit 4.2.2, hvorfor der henvises hertil. Kort opsummeret har undersøgelser baseret på analyser af data¹³ fra de Dear [1998] vist, at personer nedjusterer metabolismen med 6,7% for hver skala-enhed af PMV over neutral (PMV=0). Således vil aktivitetsniveauet i omgivelser med en PMV på 1,5 resultere i en nedjustering af metabolismen med 10% [Fanger og Toftum, 2002].

I følgende tabel 4.6 samt figur 4.16 vises det, af PMV_e-modellen, forudsagte komfortniveau sammenlignet med observerede middel komfortvoteringer.

Tabel 4.6: Sammenligning mellem PMV_e og AMV for udvalgte data fra de Dear [1998] (efter Fanger og Toftum [2002])

By	Forventningsfaktor, e	PMV justeret for nedsat metabolisme	PMV _e justeret for forventning	AMV
Bangkok	0,6	2,0	1,2	1,3
Singapore	0,7	1,2	0,8	0,7
Athen	0,7	1,0	0,7	0,7
Brisbane	0,9	0,9	0,8	0,8

¹³Data fra fire byer: Bangkok, Singapore, Athen og Brisbane



Figur 4.16: Sammenligning mellem observerede og forudsagte komfortvoteringer ved brug af PMV_e -modellen. De viste lineære regressioner er vægtet ift. antallet af voteringer i de enkelte bygninger (efter Fanger og Toftum [2002])

I tråd med resultaterne fra de adaptive studier herunder de Dear et al. [1997]; Brager et al. [2004]; Nicol og Humphreys [2007] mv., forudsiger den udvidede PMV-model en højere øvre temperaturgrænse for personer med lav forventning til det termiske indeklima. I følgende tabel 4.7 er de øvre temperaturgrænser for varierende forventningsfaktorer angivet.

Tabel 4.7: Øvre temperaturgrænser, $t_{op,max}$, for varierende forventningsfaktorer, e . (efter Fanger og Toftum [2002])

Forventningsfaktor, e	PPD [%]	PMV	PMV_e	$t_{op,max}, PMV$ [$^{\circ}C$]
1,0	10	0,50	0,50	27,9
	20	0,85	0,85	28,7
0,7	10	0,70	0,50	28,3
	20	1,20	0,85	29,4
0,5	10	1,00	0,50	29,0
	20	1,70	0,85	30,5

$$M = 1,0 \text{ met}, I_{cl} = 0,5 \text{ clo}, v_a = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}, RH = 70\%$$

Som det fremgår af ovenstående tabel 4.7, er der taget udgangspunkt i hhv. 10 og 20% utilfredse med det termiske indeklima svarende til en PMV-værdi på hhv. 0,5 og 0,85. Det ses, at ved faldende forventningsfaktorer stiger den maksimale komforttemperatur, og forskellen imellem disse ved hhv. høj og lav forventning er ca. 1-2 $^{\circ}C$ for en PPD-værdi på hhv. 10 og 20%. Idet PMV_e -modellen er opstillet på baggrund af data fra RP-884-projektet, er denne omfattet af samme gyldighedsområde som de adaptive modeller opstillet heri. Gyldighedsområderne for den konventionelle PMV-model og den nye PMV_e -model er:

- PMV
 - Aktivitetsniveau: 0,8-4,0 met
 - Beklædningsisolans: 0-2 clo
 - Lufttemperatur, t_a : 10-30°C
 - Middelstrålingstemperatur, t_{mrt} : 10-40°C
 - Lufthastighed, v_a : 0-1 $\frac{m}{s}$
 - Vanddampstryk, p_a : 0-2700 Pa
- PMV_e
 - Aktivitetsniveau: 1,2-1,6 met
 - Beklædning kan varieres frit i intervallet 0,5-1,0 clo
 - Adgang til funktionsdygtige vinduer (gælder kun for NV-modellen)
 - Mindre end 4 personer per rum

Fremtidige studier i såvel varme som tempererede og kolde klimaer, kan fastlægge forventningsfaktoren for varierende bygningstyper, klimaer og områder, hvilket vil være nødvendigt for brugen af PMV_e-modellen.

4.1.4 SCATs

Som beskrevet i indledningen til nærværende kapitel 4, blev der allerede i 1978 fundet antydninger af personers adaptivitet. En kritik af adaptiv komfortteori har altid været, at denne er meget kompleks og således svær at benytte ifm. design af bygninger. På baggrund heraf blev det treårige SCATs-projekt¹⁴ gennemført. Formålet med projektet var, at finde en metode til reducere af energiforbruget i luftkonditionerede bygninger ved brug af de adaptive komfortteorier beskrevet tidligere.

Humphreys [1978] foreslog at komforttemperaturen kunne udtrykkes som en lineær funktion af måneds-middeludetemperatur givet ved (4.1). I ligning (4.1) skal konstanterne a og b bestemmes på baggrund af feltundersøgelser, og det er bl.a. disse der søges i SCATs-projektet.

Senere undersøgelser har bl.a. vist, at den eksponentielt vægtede middeludetemperatur (løbende middel-udetemperatur) gav større korrelation. Bl.a. i RP-884-projektet beskrevet tidligere i afsnit 4.1.1, benyttes månedlig middeludetemperatur, men da den adaptive teori angiver, at personer reagerer på den termiske hukommelse og oplevelse, giver den løbende middeludetemperatur større korrelation med komforttemperaturen, beklædningsisolansen mv. [McCartney og Nicol, 2002]; [Nicol og McCartney, 2001; Nicol og Humphreys, 2007; Haldi og Robinson, 2008]. I SCATs-projektet benyttes den løbende middeludetemperatur på formen:

$$T_{rm,n} = 0,8 \cdot T_{rm,n-1} + 0,2 \cdot T_{dm,n-1} \quad (4.13)$$

hvor

$$\begin{aligned} T_{rm,n} &= \text{Løbende middeludetemperatur for dag } n && [^{\circ}C] \\ T_{rm,n-1} &= \text{Løbende middeludetemperatur for dag } n - 1 && [^{\circ}C] \\ T_{dm,n-1} &= \text{Døgnmiddel udetemperatur for dag } n - 1 && [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Ligning (4.13) er nærmere beskrevet i afsnit 2.3.

Formålet med projektet er med udgangspunkt i det ovenstående:

- At foretage feltundersøgelser i europæiske bygninger.
- At udvikle kontrolsystemer for både luftkonditionerede og naturligt ventilerede bygninger.
- Teste den adaptive kontrolalgoritme og herved estimere en potentiel energibesparelse samt indflydelsen på den termiske komfort.

I projektet blev de udvalgte bygninger kategoriseret som:

- **Bygninger i fritløbende drift:** Bygninger hvor hverken varme- eller køleanlægget er i drift.
- **Bygninger i opvarmet eller kølet drift:** Bygninger hvor varme- eller køleanlægget er i drift.

Denne opdeling er i tråd med metoden benyttet af Humphreys [1978], men afviger fra metoden i det allerede beskrevne projekt, RP-884 i afsnit 4.1.1, hvor der som beskrevet blev skelnet mellem naturligt ventilerede og luftkonditionerede bygninger.

¹⁴Smart Controls And Thermal comfort surveys

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

Feltundersøgelserne i bygningerne bestod af målinger kombineret med to typer spørgeskemaundersøgelser - en overordnet månedlig og en mere detaljeret daglig undersøgelse. Følgende komfortparametre blev målt samtidig med spørgeskemaundersøgelserne:

- Lufttemperatur
- Globe-temperatur (hvoraf middelstrålingstemperatur kan beregnes)
- Relativ luftfugtighed
- Lufthastighed
- CO₂-koncentration
- Belysningsniveau
- Baggrundsstøj

De ovennævnte undersøgelser blev fordelt på landene: Frankrig, Grækenland, Portugal, Sverige og England, hvor der sammenlagt blev foretaget undersøgelser i 26 bygninger.

Første spørgeskemaundersøgelse der blev foretaget, var den overordnede månedlige undersøgelse med 840 deltagende. Af tabel 4.8 fremgår de forhold de deltagende skulle bedømme. Beklædningsisolansen samt aktivitetsniveauet blev estimeret af de enkelte forskere på baggrund af DS/EN ISO 7730 [2006]. Fordelen ved den overordnede spørgeskemaundersøgelse var, at mange personer i bygningen kan blive undersøgt på den samme dag. Det valgte tidspunkt for undersøgelsen afspejler dog ikke nødvendigvis det normale indeklima i bygningen og kan således ikke forventes at vise de indeklimaproblemer, der normalt forekommer i den pågældende bygning. Derfor blev der også udført en detaljeret spørgeskemaundersøgelse over en periode på 3-12 måneder, hvor 126 personer deltog. Indholdet af den detaljerede undersøgelse fremgår også af tabel 4.8.

Tabel 4.8: *Indhold af overordnede og detaljerede spørgeskemaundersøgelser i SCATs-projektet*

	Overordnet undersøgelse	Detaljeret undersøgelse
Frekvens	En gang pr. måned	Fire gange om dagen i 3-12 mdr.
Antal deltagende	840	126
Antal Voteringer	4655	27284
Voteringer	Termisk komfort ^{a)}	Termisk komfort ^{a)}
	Termisk præference ^{b)}	Termisk præference ^{b)}
	Indeluftkvalitet	Beklædning ^{c)}
	Generel termisk oplevelse	Aktivitetsniveau de sidste 15 min ^{c)}
	Produktivitet	Brug af kontrolmuligheder ^{c)}

a) Bedømt efter ASHRAE-skalaen

b) Bedømt efter Nicol's 5-punkts-skala, behandlet i afsnit 3.10

c) Afkrydsning på en liste

Foruden de i tabel 4.8 nævnte punkter, blev der i den detaljerede undersøgelse sideløbende udført temperaturmålinger, hvilket muliggjorde at undersøge de til komfortvoteringerne korresponderende temperaturer.

I de følgende afsnit præsenteres udvalgte resultater fra SCATs-projektet, der er vigtige for, og vil blive brugt i nærværende projekt.

Komforttemperaturer

Ud fra ovenstående spørgeskemaundersøgelser og sideløbende indeklimamålinger, er der foretaget lineære regressioner mellem løbende middeludetemperatur (givet ved ligning (4.13)) og komforttemperaturen ($-0,5 \leq PMV \leq +0,5$). Komforttemperatur for hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift fundet i SCATs-projektet er givet ved ligning (4.14) og (4.15) og er illustreret på den efterfølgende figur 4.17:

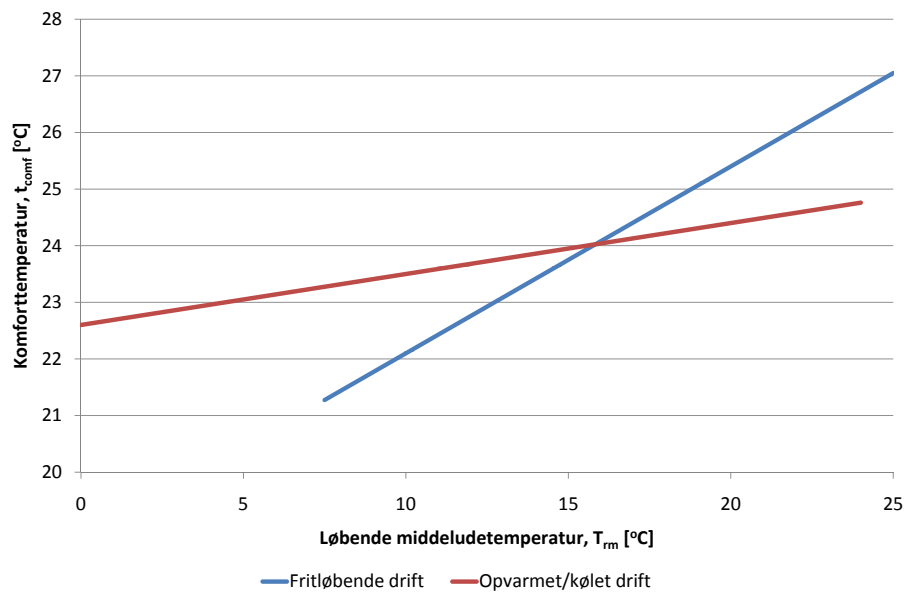
$$\text{Fritløbende drift:} \quad t_{comf} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 \quad (4.14)$$

$$\text{Opvarmet/kølet drift:} \quad t_{comf} = 0,09 \cdot T_{rm} + 22,6 \quad (4.15)$$

hvor

$$t_{comf} = \text{Komforttemperatur} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{rm} = \text{Løbende middeludetemperatur bestemt ved ligning (4.13)} \quad [^{\circ}\text{C}]$$



Figur 4.17: Komforttemperatur ($-0,5 \leq PMV \leq +0,5$) som funktion af løbende middeludetemperatur (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

Idet graden af diskomfort må forventes at stige i takt med afvigelsen fra komforttemperaturen, er der endvidere foretaget undersøgelser af dette. I undersøgelsen heraf, er forskellen mellem den aktuelle operative temperatur og komforttemperaturen beregnet for samtlige data i projektet:

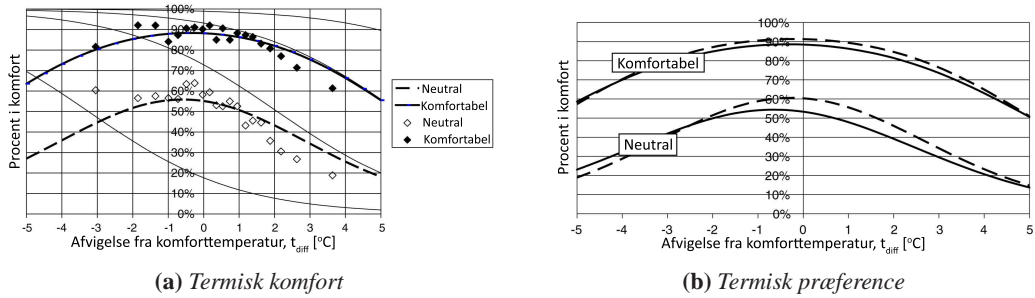
$$t_{diff} = t_{op} - t_{comf} \quad (4.16)$$

hvor

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

$$\begin{aligned}
 t_{diff} &= \text{Afvigelse fra komforttemperatur} && [^{\circ}\text{C}] \\
 t_{op} &= \text{Operativ indetemperatur} && [^{\circ}\text{C}] \\
 t_{comf} &= \text{Komforttemperatur bestemt ved (4.14)-(4.15)} && [^{\circ}\text{C}]
 \end{aligned}$$

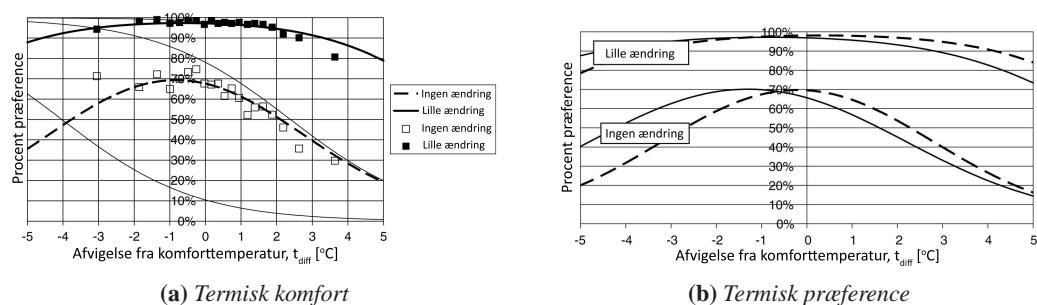
Afvigelsen, t_{diff} , sammenlignes med hhv. graden af termisk komfort samt termisk præference opdelt i hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift. I følgende figur 4.18 sammenlignes procentandelen af personer der er i termisk komfort¹⁵ som funktion af afvigelsen fra komforttemperaturen, T_{diff} .



Figur 4.18: Procentandel komfortable ($-0,5 \leq PMV \leq +0,5$) eller neutrale i hhv. fritløbende (uafbrudt) og opvarmet/kølet (stiplet) drift. Kurverne er stablede (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

Som det fremgår af figur 4.18, vil 80% af personerne føle sig komfortable i et interval på $\pm 2^{\circ}\text{C}$'s afvigelse fra komforttemperaturen. Der er stort set ingen forskel på andelen af personer der angiver, at de er i termisk komfort i hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift. For intervallet $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ses det endvidere, at mindst 40% af personerne har angivet, at de er i termisk neutralitet. Her er forskellen mellem fritløbende og opvarmet/kølet drift lidt større, idet der generelt i fritløbende drift tillades større afvigelse fra komforttemperaturen. For såvel termisk komfort og neutralitet ses det, at disse ikke er symmetriske omkring $t_{diff} = 0$ og heller ikke har toppunkt her. For termisk komfort ses det, at der forekommer flest personer der har angivet dette ved en operativ temperatur lidt under komforttemperaturen (ca. $-0,5^{\circ}\text{C}$). Det samme gør sig gældende for den termiske neutralitet i fritløbende bygninger illustreret på følgende figur 4.19, der viser personernes termiske præference, begrænset til dem der har stemt "ingen ændring" samt "lidt koldere/varmere", som funktion af afvigelsen fra komforttemperaturen.

¹⁵I SCATS-projektet defineret som: $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$



Figur 4.19: Procentandel der ønsker ingen eller en lille ændring (lidt koldere/varmere) iht. den termiske præference-skala i hhv. fritløbende (uafbrudt) og opvarmet/kølet (stiplet) drift. Kurverne er stablede (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

Af figur 4.19 ses det, at personerne hovedsageligt i fritløbende bygninger har ønsket en lidt lavere temperatur end komforttemperaturen (ca. -1°C), og for fritløbende bygninger er den termiske præference langt fra symmetrisk omkring komforttemperaturen. For begge typer bygninger har personerne generelt ønsket/accepteret en lidt lavere temperatur end komforttemperaturen.

Generelt for begge figurer 4.18 og 4.19 ses det, at resultaterne er i modstrid med den adaptive tankegang, hvor personer i fritløbende bygninger generelt accepterer højere temperaturer og afvigelser fra komforttemperaturen. Den stiplede linje, der repræsenterer opvarmet/kølet drift, ligger generelt over den uafbrudte linje (fritløbende drift). Dette antyder således, at flere personer er i termisk komfort og accepterer større afvigelser fra komforttemperaturen i opvarmet/kølet drift. Dette bemærkes imidlertid ikke af Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007].

De af figur 4.18 og 4.19 viste afvigelser i komforttemperaturer, afhænger såvel af den termiske hukommelse som det aktuelle termiske miljø. Sammen med de faktum, at forskellige personer har forskellige oplevelser af et givet termisk indeklima, vil der forekomme et spektrum/en fordeling af komforttemperaturer. For at undersøge dette har Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007] beregnet standardafvigelser for komforttemperaturen jf. ligning (4.14) og (4.15), hvorved spredningen af komforttemperaturer undersøges. Følgende tabel 4.9 opsummerer dette.

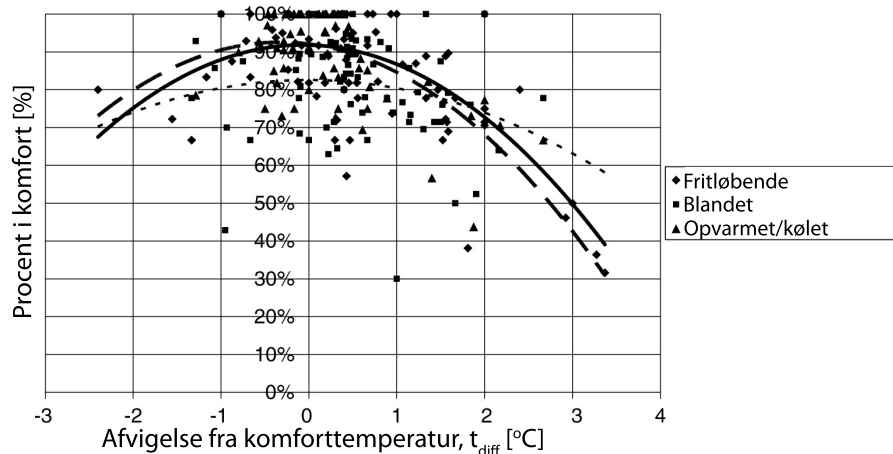
Tabel 4.9: Standardafvigelser mellem registrerede og beregnede komforttemperaturer efter ligning (4.14) og (4.15) (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

	Std.afvigelse for fejlen i individuel komforttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]	Std.afvigelse for fejlen i komforttemperatur for bygningen pr. måned [$^{\circ}\text{C}$]
Opvarmet/kølet	1,87	0,77
Blandet ^{a)}	2,27	1,32
Fritløbende	2,09	1,00

a) For kategorien "blandet" var der ikke samstemmende mening blandt deltagerne om, hvorvidt bygningen var opvarmet eller kølet i tidspunktet for undersøgelsen.

Idet komforttemperaturen i en bygning bestemmes som middelværdien af de enkelte personers kom-

fortemperatur, forekommer der mindre spredning mellem komforttemperaturer for bygninger (anden kolonne) end mellem de enkelte personer (første kolonne). Af tabel 4.9 fremgår det endvidere, at for bygninger i fritløbende drift, er standardafvigelsen for komforttemperaturen ca. $\pm 2^\circ\text{C}$. Idet den største standardafvigelse i komforttemperatur forekommer for individuelle personer, opstiller Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007] følgende figur 4.20, hvor komfortvoteringerne sammen med temperaturmålingerne i databasen ikke analyseres samlet men opdelt for de enkelte bygninger, således at komforttemperaturen benyttet i ligning (4.16) hentes fra én bestemt bygning i én bestemt måned og den operative temperatur er middelværdien for samme undersøgelse jf. Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007].



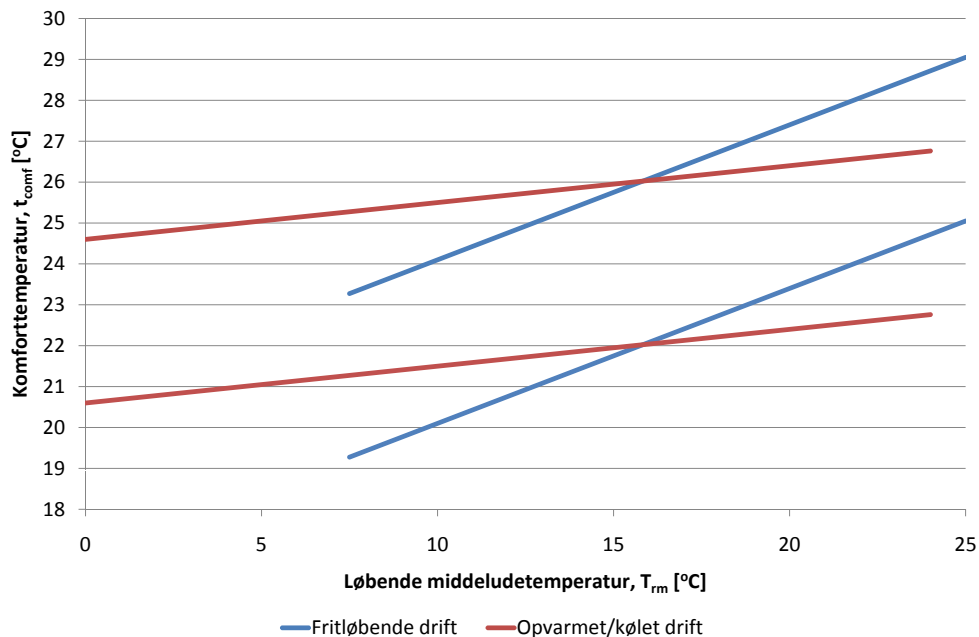
Figur 4.20: Procentandel af personerne der er komfortable ($-0,5 \leq PMV \leq +0,5$) såfremt komforttemperaturen i ligning (4.16) beregnes opdelt i grupper, som funktion af den gennemsnitlige afvigelse i komforttemperatur. Linjer er opstillet på baggrund af en måned i databasen. Linjerne er beregnet efter ligning (4.14)-(4.15) og repræsenterer hhv. Fritløbende (uafbrudt), Blandet (tynd stiple) og opvarmet/kølet (stiple) drift (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

Ved opdeling af komforttemperaturer bygningsmæssigt ses det af figur 4.20, at kurverne fra figur 4.18 er forskudt en anelse mod højre således at toppunktet for kurverne (flest personer i termisk komfort) forekommer tættere på $T_{diff} = 0$. Endvidere er kurverne mere indsnævret og graden af diskomfort stiger altså hurtigere end vist på figur 4.18. Ydermere ses det, at linjerne har ”byttet plads”, således der i de fritløbende bygninger tillades højere afvigelser fra komforttemperaturen ved positive PMV-værdier (højere temperaturer), hvilket er i tråd med den adaptive teori. Det modsatte er gældende for negative PMV-værdier, hvor den termiske oplevelse tilsyneladende er mindre påvirket i opvarmet/kølet drift.

Opsummeret blev det i figur 4.18 vist, at på trods af at den operative indetemperatur var identisk med komforttemperaturen ($T_{diff} = 0$), var der stadig over 10% utilfredse og allerede ved 2°C 's afvigelse fra komforttemperaturen, var det samlede antal utilfredse næsten 20%. Endvidere fremgik det af figur såvel figur 4.18 som 4.19, at fordelingen ikke var symmetrisk omkring $T_{diff} = 0$, og heller ikke havde toppunkt heri. Figur 4.20 viste at en del af forklaringen kunne ligge i opdelingen mellem bygninger, hvor en sortering af data bygningsmæssigt gav bedre resultater. Punkterne i figur 4.20 følger ikke komfortlinjerne bestemt ved ligning (4.14) og (4.15), men er spredt omkring disse, hvor der henvises til standardafvigelsen for komforttemperaturerne i de enkelte bygninger (fritløbende, blandet og

opvarmet/kølet) vist i tabel 4.9, hvor der for fritløbende bygninger blev vist en standardafvigelse på ca. 2°C . Af figur 4.19(a) fremgik det, at såfremt den operative indetemperatur var identisk med komforttemperaturen vil ca. 70% ikke foretrække en ændring af det termiske miljø, og af de resterende 30%, var der over dobbelt så mange der vil foretrække det "lidt koldere" end "lidt varmere".

På baggrund af det ovenstående opstiller Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007] følgende figur 4.21 indeholdende komfortgrænser for 80%'s accept.



Figur 4.21: Grænser for operativ indetemperatur som funktion af løbende middel-udetemperatur bestemt ved ligning (4.13). Grænserne for den operative temperatur er bestemt på baggrund af ligning (4.14) og (4.15) med en grænse på $\pm 2^{\circ}\text{C}$ for 80%'s accept af det termiske indeklima (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

For bygninger i hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift, bestemmes den løbende middel-udetemperatur af ligning (4.13), hvorefter grænserne for den operative indetemperatur bestemmes af ligningerne (4.14) og (4.15) med et tillæg på $\pm 2^{\circ}\text{C}$. De på figur 4.21 viste komfortzoner medfører jf. Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007] 80%'s termisk accept.

De opstillede adaptive modeller i SCATs-projektet er omfattet af følgende begrænsninger:

- Aktivitetsniveau: 1,0-1,3 met
- Beklædning kan varieres frit
- Mekanisk ventilation tillades, men ikke mekanisk køling
- Kan benyttes i kontorbygninger og lignende med hovedsageligt siddende aktivitet

Foruden de ovenstående resultater, blev der i SCATs-projektet endvidere udviklet en adaptiv kontrolalgoritme (ACA), der præsenteres og diskuteres i følgende afsnit.

Adaptiv kontrolalgoritme - ACA

Som beskrevet i starten af nærværende afsnit 4.1.4 foreslog Humphreys [1978] at komforttemperaturen kunne udtrykkes som en lineær funktion af udetemperaturen jf. ligning (4.1). Og som det også blev beskrevet ovenfor, blev det senere vist, at den eksponentielt vægtede løbende middeldetemperatur gav større korrelation med komforttemperaturen, beklædningsisolansen mv.

Formålet med opstillingen af den adaptive kontrolalgoritme var at udnytte den adaptive komfortteori, og på baggrund heraf styre bygningers setpunkter for indetemperaturen. Ved implementering af den adaptive kontrolalgoritme i sin rå form (ligning (4.1)) vil ved faldende udetemperaturer jf. Humphreys og Nicol [1995] medføre for lave indetemperaturer, hvorfor det er nødvendigt med en nedre grænse.

Den adaptive kontrolalgoritme skal således opstilles på baggrund af følgende:

$$t_{comf} = d \cdot T_{rm} + e \quad \text{for } T_{rm} > f \quad (4.17)$$

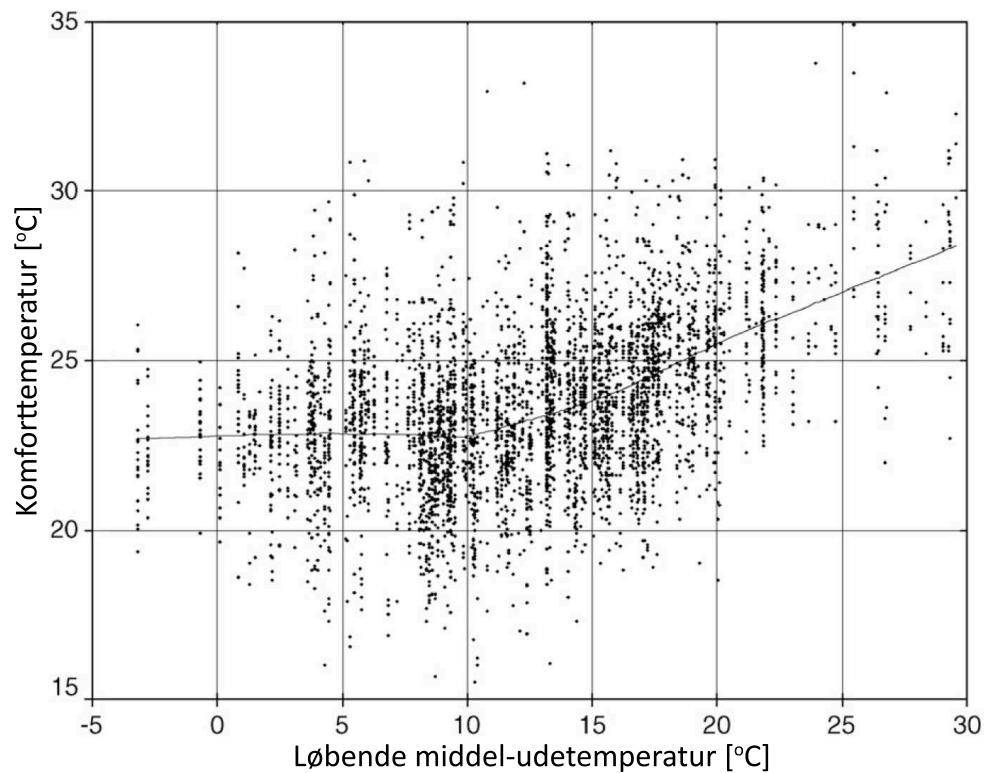
$$t_{comf} = g \quad \text{for } T_{rm} < f \quad (4.18)$$

hvor

t_{comf}	=	Komforttemperatur	[°C]
T_{rm}	=	Løbende middeldetemperatur bestemt ved ligning (4.13)	[°C]
d, e, f, g	=	Konstanter	

Til bestemmelse af konstanterne $d - g$, benyttes data for samtlige lande fra den overordnede undersøgelse beskrevet i tabel 4.8. Disse er vist på følgende figur 4.22, hvor en eksponentiel udglatning vha. Lowess-regressionslinjen¹⁶ med tre iterationer og en udglatningsfaktor på $\alpha = 50\%$ også er indtegnet.

¹⁶Locally weighted smoothing scatterplot



Figur 4.22: Komforttemperaturer for samtlige bygninger i SCATs-databasen. Endvidere er Lowess-regressionslinjen indtegnet for tre iterationer og $\alpha = 50\%$ (efter Nicol og McCartney [2001]; McCartney og Nicol [2002])

Som det fremgår af figur 4.22 og den indtegnede Lowess-kurve, vil komforttemperaturen for løbende middel-temperaturer under ca. 10°C være konstant og over denne værdi have en lineær sammenhæng. På baggrund af dette er konstanterne $d - g$ i ligning (4.17) og (4.18) bestemt til.

$$t_{comf} = 0,302 \cdot T_{rm} + 19,39 \quad \text{for } T_{rm} > 10^{\circ}\text{C} \quad (4.19)$$

$$t_{comf} = 22,88 \quad \text{for } T_{rm} < 10^{\circ}\text{C} \quad (4.20)$$

hvor

$$t_{comf} = \text{Komforttemperatur} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{rm} = \text{Løbende middeludetemperatur bestemt ved ligning (4.13)} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

Kontrolalgoritmen ovenfor er som nævnt opstillet på baggrund af data fra den indledende undersøgelse. Ved brug af data fra den detaljerede undersøgelse blev der fundet næsten identiske værdier af konstanterne $d - g$, men det blev vurderet at data fra den indledende undersøgelse sandsynligvis var mere nøjagtige, hvorfor disse blev benyttet.

Ovenstående ligninger (4.19)-(4.20) udgør den adaptive kontrolalgoritme opstillet for samtlige byg-

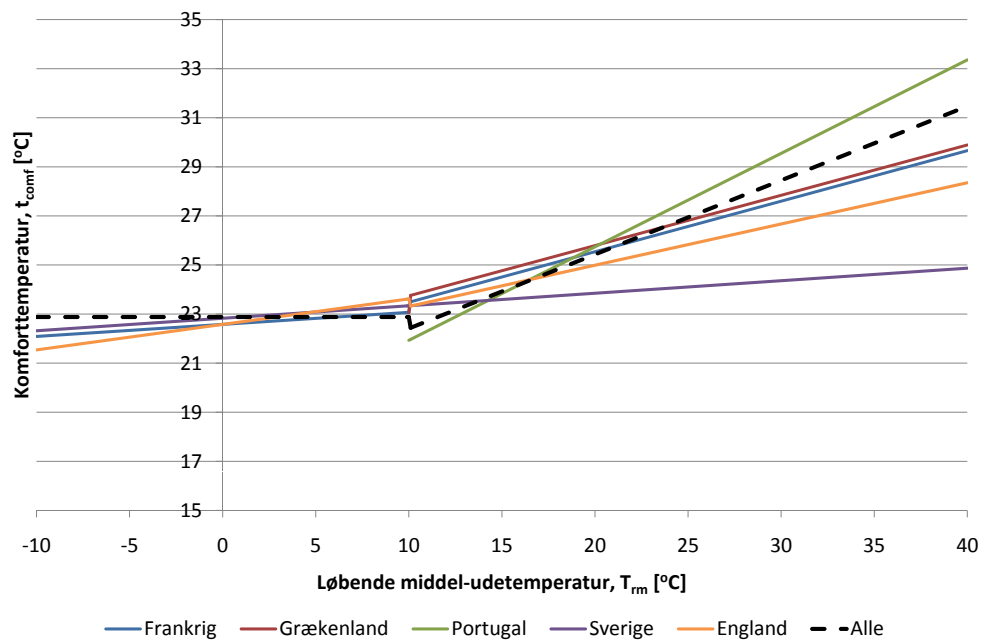
4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

ninger i SCATs-databasen. Der er foruden denne opstillet algoritmer for hver enkelt bygning, hvilket fremgår af følgende tabel 4.10 samt figur 4.23.

Tabel 4.10: Adaptive kontrolalgoritmer for de enkelte bygninger i SCATs-databasen (efter Nicol og McCartney [2001]; McCartney og Nicol [2002])

Land	Adaptiv kontrolalgoritme (ACA)	
	$T_{rm} \leq 10^{\circ}C$	$T_{rm} > 10^{\circ}C$
Frankrig	$0,049 \cdot T_{rm} + 22,58$	$0,206 \cdot T_{rm} + 21,42$
Grækenland ^{a)}	%	$0,205 \cdot T_{rm} + 21,69$
Portugal	$0,381 \cdot T_{rm} + 18,12$	$0,381 \cdot T_{rm} + 18,12$
Sverige	$0,051 \cdot T_{rm} + 22,83$	$0,051 \cdot T_{rm} + 22,83$
England	$0,104 \cdot T_{rm} + 22,58$	$0,168 \cdot T_{rm} + 21,63$
Alle	22,88	$0,302 \cdot T_{rm} + 19,39$

a) Af tekniske årsager, blev der ikke indsamlet data fra vinterperioden.



Figur 4.23: Adaptive kontrolalgoritmer for de enkelte lande i SCATs-projektet. Data for Portugal samt Sverige gav ikke samme knæk for $T_{rm} = 10^{\circ}C$ (efter Nicol og McCartney [2001]; McCartney og Nicol [2002])

I SCATs-projektet blev der sammen med komfortvoteringerne bl.a. foretaget målinger af lufttemperatur (t_a), globe-temperatur (t_g), relativ luftfugtighed (RH) samt lufthastighed (v_a). For at undersøge effekten fra andre indeklimaparametre på komfortvoteringen og i det hele taget forudsigelsen af det termiske indeklima, er der foretaget statistiske undersøgelser af korrelationen mellem komfort-

voteringerne og de enkelte indeklimaparametre - alene og i kombination med andre. Resultater herfra er vist i følgende tabel 4.11.

Tabel 4.11: Korrelation mellem komfortvoteringerne og forskellige kombinationer af indeklimaparametre.

Parameter	Korrelation, r , med komfortvotering
t_g	0,324
$t_{mrt}^{a)}$, t_a , RH , v_a	0,348
t_{mrt} , t_a , RH , v_a , I_{cl} , M	0,363
t_{mrt} , t_a , RH , v_a , T_{rm}	0,373
t_{mrt} , t_a , RH , v_a , I_{cl} , M , T_{rm}	0,383

a) Beregnet ved: $t_{mrt} = t_g \cdot (1 + 2,35 \cdot \sqrt{v_a}) - 2,35 \cdot t_a \cdot \sqrt{v_a}$

Ved sammenligning af række et og to med de sidste to rækker i tabel 4.11 ses det, at inkluderingen af den løbende middel-udetemperatur, T_{rm} , giver en betydelig forbedring af korrelationen og ifølge en statistisk t-test er T_{rm} den næstvigtigste parameter. Foruden de i tabel 4.11 korrelationer, er der foretaget statistiske analyser af korrelationen mellem den aktuelle middelvotering, AMV og den af PMV-modellen estimerede middelvotering. Korrelationen mellem disse var 0,250, hvilket er mindre end korrelationen mellem AMV og den adaptive kontrolalgoritme. På baggrund heraf konkluderer Nicol og McCartney [2001], at inkluderingen af yderligere indeklimaparametre i ACA ikke øger nøjagtigheden heraf, og at ACA giver bedre forudsigelser af komforttemperaturen end PMV-modellen opstillet af Fanger [1972].

I det ovenstående er den adaptive kontrolalgoritme givet ved ligning (4.19)-(4.20) præsenteret. Ved implementering af ACA i bygningers CTS-anlæg¹⁷ beregnes setpunktet for indetemperaturen efter følgende procedure [Nicol og McCartney, 2001]:

- Middel-udetemperatur for de foregående 24 timer beregnes hver dag kl. 7:00 ($T_{dm,n-1}$ i ligning (4.13))
- Den løbende middel-udetemperatur, T_{rm} , beregnes ved ligning (4.13)
- På baggrund af den beregnede T_{rm} beregnes setpunktet for indetemperaturen ved ligning (4.19)-(4.20).

For at teste den adaptive kontrolalgoritme, blev der udvalgt to bygninger. Følgende tabel 4.12 opsummerer undersøgelserne i de to bygninger.

¹⁷Central Tilstandskontrol og Styring

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

Tabel 4.12: Indhold af undersøgelser foretaget for de to udvalgte bygninger ifm. test af den adaptive kontrolalgoritme. Bygning A var en del SCATs-projektet, hvorimod bygning B var en ny bygning fundet til formålet.

	Bygning A	Bygning B
Placering	Sverige	England
Undersøgelser udført ^{a)}	Overordnet undersøgelse	Overordnet undersøgelse Detaljeret undersøgelse
Varighed af undersøgelse	5 mdr.	3 mdr.

a) Som beskrevet i starten af nærværende afsnit. Personerne i bygning A ønskede ikke at deltage i en detaljeret undersøgelse.

Idet bygning A allerede var en del af SCATs-projektet, var det således muligt at sammenligne data fra de to uafhængige undersøgelser. Dette var selvsagt ikke muligt for bygning B, idet denne ikke allerede var en del af SCATs-databasen. Derfor blev det besluttet at udføre målinger i to ens rum, hvor ACA blev implementeret i et af rummene, og i det andet rum blev setpunktet for indetemperaturen sat konstant. Resultaterne fra undersøgelserne er vist i følgende tabel 4.13.

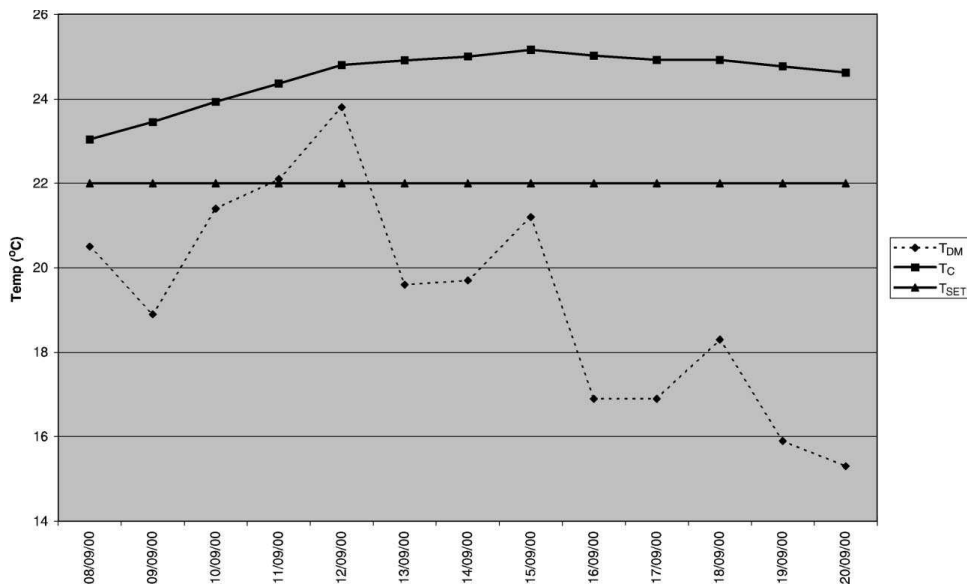
Tabel 4.13: Resultater fra undersøgelserne af den adaptive kontrolalgoritme implementeret i to bygninger. Tallene i tabellen angiver antal procent der har stemt indenfor de angivne kategorier (efter Nicol og McCartney [2001]; McCartney og Nicol [2002])

	$AMV = 0$ [%]	$-1 \leq AMV \leq +1$ [%]	$PV^a) = 0$ [%]
Bygning A			
Fast setpunkt ^{b)}	72	97	76
ACA	84	92	84
Bygning B			
Fast setpunkt	37	84	56
ACA	42	84	57

a) Præference-votering. $PV = 0$: ingen ændring

b) Resultater fra første del af SCATs-projektet

Som det fremgår af tabel 4.13, forekom der blot en lille ændring i det termiske komfortniveau og generelt ingen ændringer i graden af diskomfort efter implementering af ACA i bygningerne. Foruden de ovennævnte undersøgelser, blev der for bygning B foretaget målinger af energiforbruget før og efter implementeringen. Følgende figur 4.24 viser komforttemperaturen beregnet efter ACA (T_C), det eksisterende kølesetpunkt (T_{SET}) samt Døgnmiddeltemperaturen (T_D) for en periode på 12 dage i bygning B. Forud for denne måling, havde ACA kørt i ca. en uge.



Figur 4.24: Komforttemperaturen beregnet efter ACA (T_C), det eksisterende kølesetpunkt (T_{SET}) samt Døgnmiddeltemperaturen (T_D) for en periode på 12 dage i bygning B (efter McCartney og Nicol [2002])

Af figur 4.24 ses det, at komforttemperaturen beregnet efter ACA konsekvent ligger over det oprindelige setpunkt for køling. På trods heraf fremgik det af tabel 4.13, at graden af diskomfort forekom mere eller mindre uændret. For den pågældende undersøgelse i bygning B, blev den samlede energibesparelse ifm. køling målt til 27,6 kWh. Idet det undersøgte område kun udgjorde en del af den samlede bygning, og såfremt det skønnes at køling er nødvendigt i 16 uger om året, vil energibesparelsen for bygning B være ca. 448 MWh om året svarende 210 ton CO₂ [Nicol og McCartney, 2001]. Det er selvfølgelig kun tilfældet såfremt de termiske belastninger, bygnings beskaffenhed mv. i de resterende områder er nogenlunde identisk med de undersøgte. Den samlede energibesparelse for den undersøgte bygning, udgjorde ca. 30% af det normale energiforbrug, hvor setpunktet for køling er konstant.

Energibesparelsespotentialer er således stort, men det kræver dog flere undersøgelser heraf. Nicol og McCartney [2001] opstiller følgende punkter, der skal foretages ifm. ACA:

- ACA skal testes grundigt i flere bygninger. Disse bør være af længere varighed og foretages i forskellige typer bygninger.
- Det må forventes at ACA kan medføre større energibesparelser ved implementering i bygninger i varme klimaer. Dette bør undersøges nærmere.

4.1.5 ADAPTIVE TEMPERATURGRÆNSER (ATG)

I Holland har man i over ti år taget hensyn til personers adaptive adfærd, idet der ved temperaturer over 25°C blev forudsat, at beklædningsisolansen nedjusteres fra 0,7 til 0,5clo og lufthastigheden fastsættes til $0,25 \frac{m}{s}$ [van der Linden et al., 2002]. Disse antagelser er imidlertid ikke underbygget empirisk.

Som beskrevet tidligere i afsnit 2.5.1, har man i Holland længe benyttet et vægtet timekriterie baseret på et 90%’s acceptniveau, hvor en vægtfaktor for PPD>10% blev indført. Efter at resultaterne fra forskningsprojektet RP-884 af de Dear et al. [1997] beskrevet i afsnit 4.1.1 tydeligt viste et højere termisk acceptniveau i naturligt ventilerede bygninger i forhold til luftkonditionerede bygninger, blev de adaptive temperaturgrænser, ATG, opstillet. Disse behandles i detaljer i nærværende afsnit.

I RP-884-projektet blev der skelnet mellem:

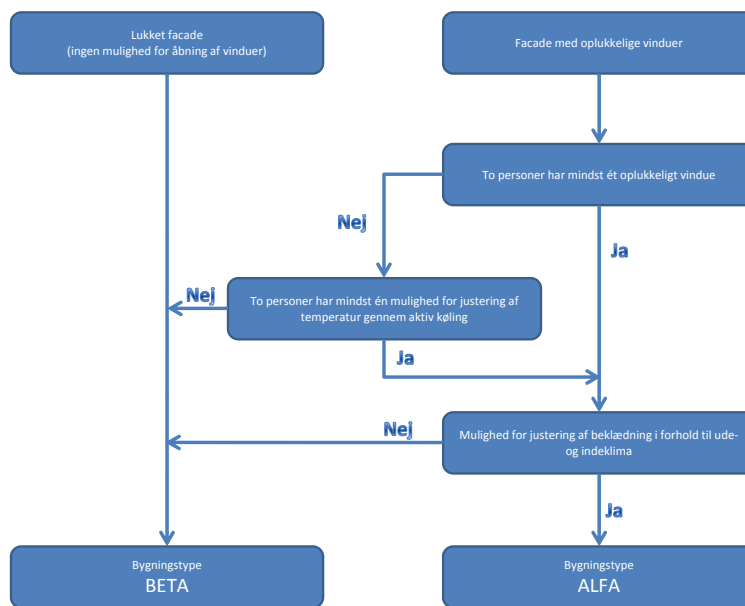
- **Naturligt ventilerede bygninger:** Bygninger med funktionsdygtige vinduer og loftventilatorer i små en- eller tomandskontorer, hvor adaptive muligheder er store.
- **Luftkonditionerede bygninger:** Lukkede centralt styrede luftkonditionerede bygninger med åbne kontormiljøer, og hvor brugerne ingen mulighed har for åbning/lukning af vinduer.

og i SCATs-projektet beskrevet i afsnit 4.1.4:

- **Opvarmede/kølede bygninger:** Bygninger der er opvarmede og/eller kølede
- **Fritløbende bygninger:** Bygninger uden opvarmning og køling

Jf. Kurvers et al. [2006] er denne opdeling dog upraktisk, idet de fleste bygninger har funktionsdygtige vinduer samt forskellige rumstørrelser - fra enkeltmandskontorer til helt åbne kontormiljøer. Og da bygninger endvidere ofte kombinerer funktionsdygtige vinduer med forskellige typer HVAC-systemer¹⁸, er opdelingen benyttet i de to projekter som vist ovenfor ikke praktisk. Baseret på muligheden for adaptivitet opstilles følgende diagram vist i figur 4.25, hvori der skelnes mellem Alfa- og Beta-bygninger, hvor personer i Alfa-bygninger har størst mulighed for at påvirke deres egen termiske situation.

¹⁸Med/uden mekanisk køling, passiv facadeventilation, kølelofter etc.



Figur 4.25: Kategorisering af bygninger i hhv. Alfa- og Beta-kategori (efter van der Linden et al. [2006]; Kurvers et al. [2006])

Udvælgelsesproceduren vist i figur 4.25 tager hensyn til hhv. adfærdsmæssig og psykologisk adaptivitet i form af hhv. muligheden for åbning af vinduer og justering af beklædningsisolans samt forventningen til det termiske indeklima i tråd med resultaterne fra de Dear [1998]; Brager et al. [2004]; Nicol og Humphreys [2007] samt McCartney og Nicol [2002].

Baseret på resultaterne fra de Dear et al. [1997] beskrevet i afsnit 4.1.1, opstiller van der Linden et al. [2006] graferne i figur 4.26 og 4.27 til bestemmelse af komforttemperaturen for hhv. Alfa- og Beta-bygninger. Graferne er opstillet for neutraltemperaturerne fundet af de Dear et al. [1997] for hhv. HVAC- og NV-bygninger (ligning (4.8)-(4.9)), hvor disse er modificeret således komforttemperaturene beregnes som funktion af den løbende middel-udetemperatur [de Dear og Brager, 2002; Boerstra et al., 2003]:

$$t_{comf,alfa} = 0,31 \cdot T_{rm} + 17,8 \quad (4.21)$$

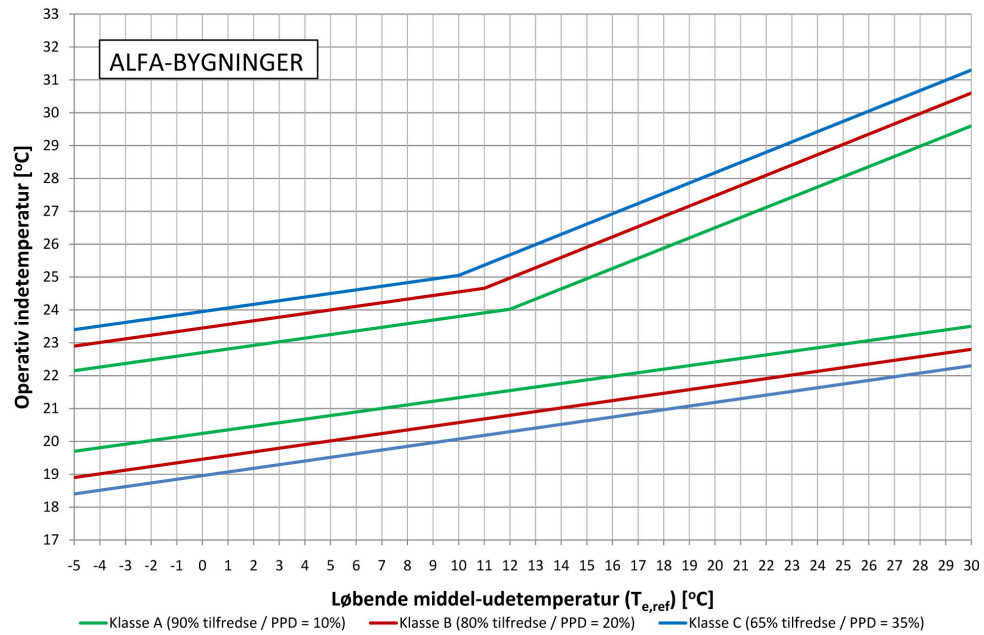
$$t_{comf,beta} = 0,11 \cdot T_{rm} + 21,45 \quad (4.22)$$

hvor

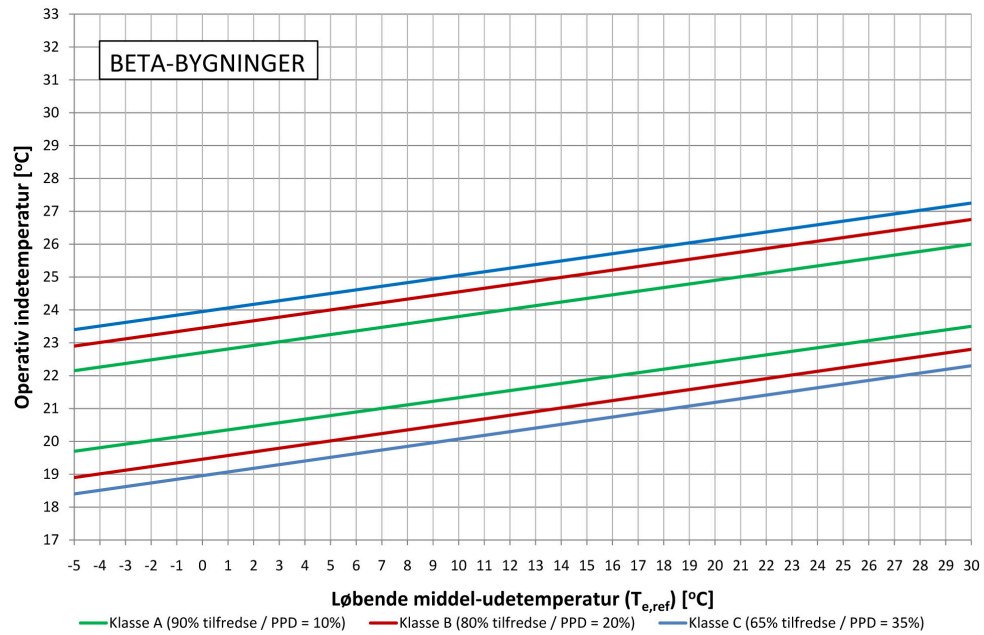
$$\begin{aligned} t_{comf,alfa} &= \text{Komforttemperatur, Alfa-bygninger} && [^{\circ}C] \\ t_{comf,beta} &= \text{Komforttemperatur, Beta-bygninger} && [^{\circ}C] \\ T_{rm} &= \text{Løbende middel-udetemperatur, bestemt ved ligning (4.23)} && [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Ovenstående ligninger er benyttet direkte fra RP-884-projektet. Her beregnes komforttemperaturen som funktion af middel-udelufttemperaturen, men i de ovenstående ligninger (4.21)-(4.22) er denne udskiftet med den løbende middel-udetemperatur, T_{rm} . Dette er foretaget uden justering af koefficienterne i de lineære forskrifter givet ovenfor, hvilket nødvendigvis må medføre en afvigelse.

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet



Figur 4.26: Afbildning af grænser for operativ indetemperatur som funktion af løbende middeludelufttemperatur for hhv. 90, 80 og 65%'s acceptniveau, Alfa-bygninger (efter van der Linden et al. [2006]).



Figur 4.27: Afbildning af grænser for operativ indetemperatur som funktion af løbende middeludelufttemperatur for hhv. 90, 80 og 65%'s acceptniveau, Beta-bygninger (efter van der Linden et al. [2006]).

De i figur 4.26 og 4.27 viste grænser for termisk accept er bestemt ud fra ligning (4.21)-(4.22) samt

resultaterne i de Dear et al. [1997]. De tilladelige afvigelser er i RP-884 projektet sat til:

Tabel 4.14: Tilladelige afvigelser i °C fra komforttemperaturen bestemt ved ligning (4.21)-(4.22) for hhv. 80 og 90%'s accept [de Dear et al., 1997; Boerstra et al., 2003]. De øgede grænser i Alfa-bygninger er markeret med fed.

Bygningstype	Acceptniveau	Grænser (Øvre/Nedre)	$T_{rm} \leq 12^{\circ}C$	$T_{rm} > 12^{\circ}C$
Alfa	90%	Ø	$t_{comf} + 1,25$	$t_{comf} + \mathbf{2,50}$
		N	$t_{comf} - 1,25$	$t_{comf} - 1,25$
	80%	Ø	$t_{comf} + 2,00$	$t_{comf} + \mathbf{3,50}$
		N	$t_{comf} - 2,00$	$t_{comf} - 2,00$
	65%	Ø	$t_{comf} + 2,40$	$t_{comf} + \mathbf{4,00}$
		N	$t_{comf} - 2,40$	$t_{comf} - 2,40$
Beta	90%	Ø	$t_{comf} + 1,25$	$t_{comf} + 1,25$
		N	$t_{comf} - 1,25$	$t_{comf} - 1,25$
	80%	Ø	$t_{comf} + 2,00$	$t_{comf} + 2,00$
		N	$t_{comf} - 2,00$	$t_{comf} - 2,00$
	65%	Ø	$t_{comf} + 2,40$	$t_{comf} + 2,40$
		N	$t_{comf} - 2,40$	$t_{comf} - 2,40$

Som det fremgår af figur 4.26 og 4.27, bestemmes den maksimale operative indetemperatur som funktion af den løbende middel-udetemperatur, T_{rm} . Denne er benyttet idet bl.a. de Dear og Morgan [2003]; Haldi og Robinson [2008] mv. fandt stor korrelation mellem beklædningsniveauet og den løbende middel-udetemperatur. Derfor benyttes denne fremfor en simpel middel-udetemperatur og er givet ved følgende:

$$T_{rm} = \frac{1,0 \cdot T_{ude,n} + 0,8 \cdot T_{ude,n-1} + 0,4 \cdot T_{ude,n-1} + 0,2 \cdot T_{ude,n-3}}{2,4} \quad (4.23)$$

hvor

$$\begin{aligned} T_{rm} &= \text{Løbende middel-udetemperatur} && [^{\circ}C] \\ T_{ude,n} &= \text{Middel-udetemperatur for dag nr. } n && [^{\circ}C] \\ & \quad (\text{gennemsnit af maksimum og minimum udetemperatur}) \\ n &= \text{dag-nr.} \end{aligned}$$

Som det fremgår af ovenstående ligning (4.23), er den løbende middel-udetemperatur en "syntetisk" udetemperatur, der medtager de tre foregående dages udetemperaturer. Den løbende middel-udetemperatur er en numerisk simplificering af (2.7), og tager endvidere temperaturen for den aktuelle dag med i beregning. Som beskrevet tidligere bygger de ovenstående designgrafer på resultaterne fra de Dear et al. [1997].

Jf. figur 4.26 og 4.27 vil der for løbende middel-udetemperaturen under 10-12°C ikke forekomme samme mulighed for åbning af vinduer som følge af de lave temperaturer, der overvejende vil forårsage træk i disse situationer, men muligheden for justering af beklædningsisolans vil dog stadig være tilstede, hvilket også er tilfældet for Beta-bygninger. Under de 10-12°C vil Alfa-bygninger således karakteriseres som Beta-bygninger og de operative temperaturgrænser er identiske. De nedre grænser er identiske for begge typer bygninger idet det er antaget, at personernes termiske opfattelse er ens

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet

ved lave værdier iht. ASHRAE-skalaen.

Ovenstående design-grafer til bestemmelse af maksimal tilladelig operativ indetemperatur er opstillet ud fra ligningerne angivet i følgende tabel:

Tabel 4.15: Ligninger til bestemmelse af maksimal operativ indetemperatur for kategori A, B og C angivet i figur 4.26 og 4.27 (efter van der Linden et al. [2006])

Klasse	Acceptniveau	Bygningstype	
		Alfa	Beta
A	90%	$T_{op} < 0,11 \cdot T_{rm} + 22,7$ for $T_{rm} < 12^{\circ}C$ $T_{op} < 0,31 \cdot T_{rm} + 20,3$ for $T_{rm} > 12^{\circ}C$	$0,11 \cdot T_{rm} + 22,7$
B	80%	$T_{op} < 0,11 \cdot T_{rm} + 23,45$ for $T_{rm} < 11^{\circ}C$ $T_{op} < 0,31 \cdot T_{rm} + 21,3$ for $T_{rm} > 11^{\circ}C$	$0,11 \cdot T_{rm} + 23,45$
C	65%	$T_{op} < 0,11 \cdot T_{rm} + 23,95$ for $T_{rm} < 10^{\circ}C$ $T_{op} < 0,31 \cdot T_{rm} + 22,0$ for $T_{rm} > 10^{\circ}C$	$0,11 \cdot T_{rm} + 23,95$

Under specielle omstændigheder (f.eks. højt aktivitetsniveau og/eller højt beklædningsniveau), justeres grænserne med:

$$\Delta T = -6 \cdot (I_{cl} - 0,7) - 8 \cdot (M - 1,4)$$

(gyldig for $1,4 \text{ met} < M < 4,0 \text{ met}$ og $0,7 \text{ clo} < I_{cl} < 2,0 \text{ clo}$)

De adaptive modeller benyttet i de hollandske ATG, er omfattet af samme begrænsninger som RP-884 projektet, idet modellerne er taget herfra. Opsummeret er disse begrænsninger:

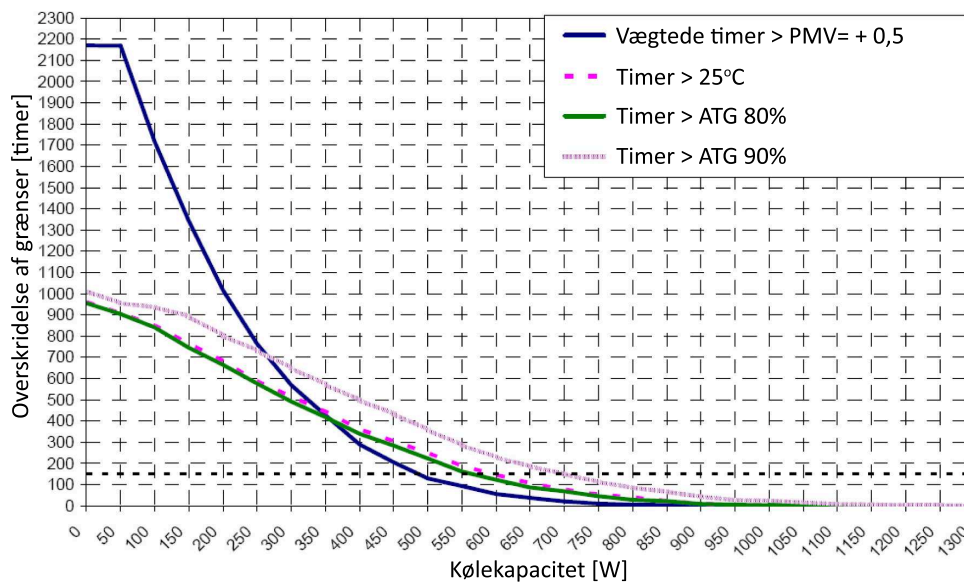
- Aktivitetsniveau: 1,2-1,6 met
- Beklædning kan varieres frit i intervallet 0,5-1,0 clo
- Adgang til funktionsdygtige vinduer (gælder kun for NV-modellen)
- Mindre end 4 personer per rum

I de nærværende retningslinjer for projektering ift. termisk indeklime opstillet af van der Linden et al. [2006], anbefales det, at et "godt termisk indeklime" er karakteriseret ved et 80%'s acceptniveau (klasse B), hvor det som udgangspunkt er foreslået, at grænsen aldrig overskrides. Ud fra et energimæssigt synspunkt, er dette dog nødvendigt, da det i modsat fald vil afstedkomme store krav til kølekapaciteten. Følgende figur 4.28 sammenligner nødvendig forventet kølekapacitet¹⁹ på baggrund af de i afsnit 2.5.1 omtalte temperatur- og vægtet temperaturgrænser²⁰ med nødvendig kølekapacitet efter de nye adaptive temperaturgrænser, ATG.

¹⁹Estimeret gennem dynamiske computersimuleringer af en naturligt ventileret bygning med: gennemsnitlig termisk masse, gennemsnitligt vinduesareal og udvendig solafskærmning

²⁰**Temperaturgrænse:** Der tillades maksimalt 100 timer om året, hvor temperaturen overstiger 25°C

Vægtet temperaturgrænse: Tiden hvor $PMV > +0,5$ beregnes og vægtes proportionalt ift. PPD således en time med $PPD=20\%$ vægtes dobbelt ift. en time med $PPD=10\%$. Gennem computersimuleringer for en gennemsnitsbygning, er det maksimale antal vægtede timer fundet til 150.

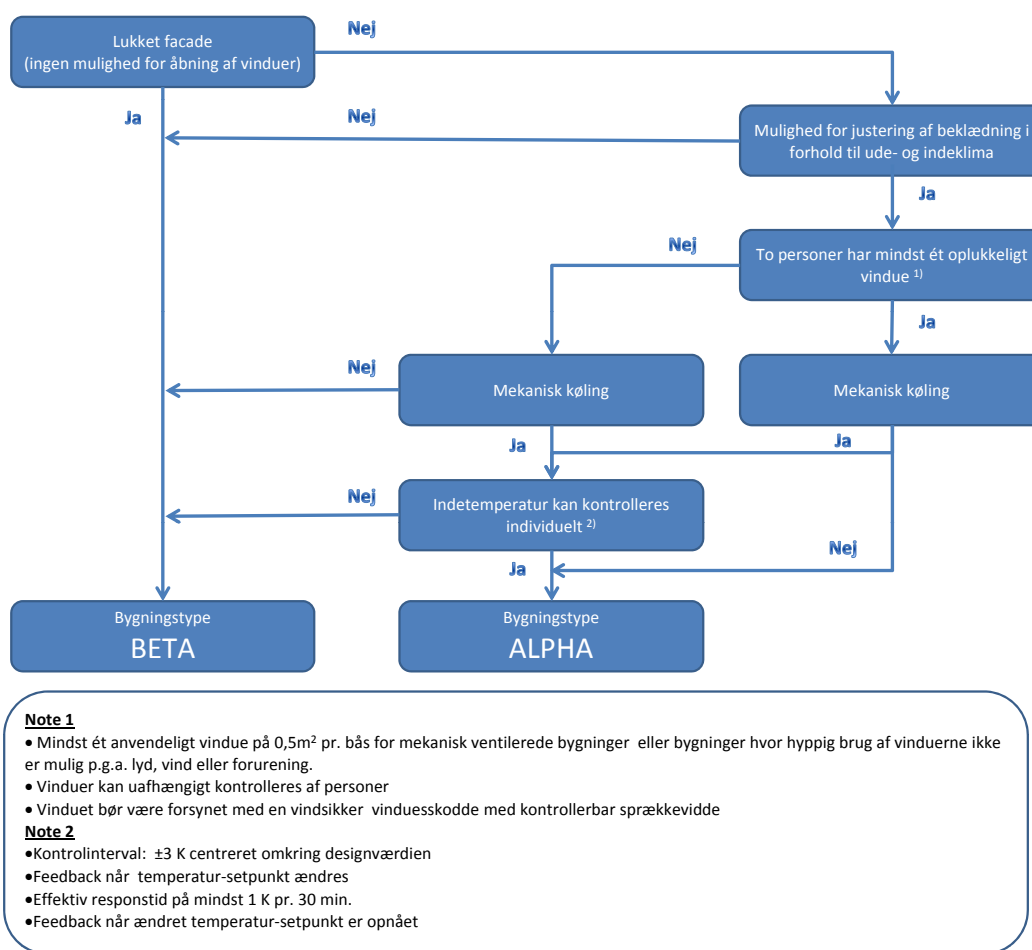


Figur 4.28: Nødvendig kølekapacitet på baggrund af forskellige evalueringsmetoder. Den vandrette stiplede linje angiver det vægtede temperaturkrav på 150 timer som beskrevet i afsnit 2.5.1 (efter Kurvers et al. [2006])

Som det fremgår af figur 4.28, vil et projekteringskrav iht. ”Vægtede timer” medføre et nødvendigt kølebehov på ca. 500W (hvor grænsen på 150 timer overholdes). Idet der som udgangspunkt er foreslået, at de adaptive temperaturgrænser ikke må overskrides, vil dette medføre et over dobbelt så stort kølebehov, da det af figur 4.28 ses, at kurven for ATG 80% når 0 timers grænseoverskridelse ved en kølekapacitet på ca. 1100W. Som ovenstående eksempel viser, er en tilladelig overskridelse af de adaptive temperaturgrænser nødvendig, men denne er endnu ikke fastlagt [Kurvers et al., 2006].

Som beskrevet i afsnit 2.3, skelnes der bl.a. i DS/EN 15251 [2007] mellem bygninger med og uden mekanisk køling. Derfor har van Hoof og Hensen [2007] opstillet en udvidet udgave af diagrammet vist i figur 4.25, hvor der tages hensyn til, om hvorvidt en bygning er mekanisk kølet eller ej. Det alternative diagram er vist på følgende figur 4.29.

4.1 Empiriske undersøgelser af adaptivitet



Figur 4.29: Kategorisering af bygninger i hhv. Alfa- og Beta-kategori, hvor klassificeringen afhænger af om bygningen er mekanisk kølet eller ej (efter van der Linden et al. [2006]; van Hoof og Hensen [2007])

Som det fremgår af figur 4.29, er kravet til fri justering af beklædning essentielt og ufravigeligt såfremt bygningen skal kategoriseres som Alfa-bygning. Dog ses det, at der enten skal være mekanisk køling med et ufravigeligt krav om mulighed for individuel styring af indetemperaturen eller mindst et vindue pr. to personer, for at opnå klasse ”Alfa”. Dette er ikke helt i tråd med opdelingen af bygninger med og uden mekanisk køling i DS/EN 15251 [2007], hvor de termiske indeklimakrav til mekanisk kølede bygninger er opdelt sæsonvist på baggrund af to forskellige beklædningsisolanser (sommer: 0,5 clo hhv. vinter: 1,0 clo), og kravene for bygninger uden mekanisk køling beregnes/ aflæses ud fra en løbende middel-udetemperatur (afsnit 2.3). På trods af at undersøgelser korrekt har vist, at mekanisk køling kan accepteres (såfremt der er individuel kontrol over denne), burde disse bygninger, ud fra et energimæssigt synspunkt, måske ikke kunne klassificeres som værende Alfa-bygninger.

4.2 TIDSLIG VARIATION AF INDGÅENDE PARAMETRE

I afsnit 3.5.4 blev de i PMV-modellen indgående parametre diskuteret. Det blev vist, at usikkerheden i estimeringen af de personlige parametre, aktivitetsniveau samt beklædningsisolans, kan medføre store afvigelser i PMV/PPD. Endvidere blev det i ovenstående afsnit gennemgået, at forskningsresultater fra bl.a. RP-884²¹, RP-1161²² samt SCATs²³ har vist en højere accept af det termiske indeklima i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer, hvor brugerne har mulighed for at påvirke indeklimaet i form af åbning af vinduer, justering af termostater mv. Personer forsøger løbende at opretholde egen termisk komfort, hvilket foruden påvirkningen af indeklimaet, kan foregå gennem justering af hhv. aktivitetsniveau samt beklædningsisolans.

I det følgende vil modeller for dynamisk variation af beklædningsisolansen samt aktivitetsniveauet blive præsenteret og diskuteret. Dette med henblik på implementering i eksisterende modeller for estimering af termisk komfort til brug ved opstilling af nye koncepter.

4.2.1 BEKLÆDNINGISISOLANS

I designfasen af en bygning, hvor bygningssystemer skal designes med henblik på opretholdelse af et tilfredsstillende termisk indeklima, benyttes retningslinjer samt standarder såsom DS/EN ISO 7730 [2006]; ANSI/ASHRAE 55 [2004], hvor opvarmningsbetingelserne typisk tager udgangspunkt i en beklædningsisolans på 1,0 clo (vinter) og kølebetingelserne i en beklædningsisolans på 0,5 clo (sommer). Det er dog langt fra tilfældet, at beklædningsisolansen er fast i disse to perioder, men varierer derimod dynamisk hen over året. Undersøgelser har vist, at beklædningsisolansen ikke kun er korreleret med indeklimaet men i høj grad også med udeklimaet [de Dear et al., 1997]. Foruden metoden til estimering af dynamisk beklædningsisolans angivet i DS/EN ISO 7730 [2006] (afsnit 2.2.6) er der på baggrund af forsøg fundet yderligere dynamiske modeller for estimering af beklædningsisolansen. I det følgende præsenteres og diskuteres resultater fra forskellige undersøgelser med henblik på brug af disse i opstilling af koncepter for ydeevne-indikatorer.

I forskningsprojektet RP-884 blev der, som tidligere beskrevet i afsnit 4.1.1, fundet klare tegn på personers adaptive adfærd i form af forsøg på at opretholde termisk komfort ved justering af beklædningsisolans samt øgning af lufthastigheden omkring kroppen ved åbning af vinduer mv. Ved undersøgelser af 160 bygninger (opdelt i HVAC og naturligt ventilerede bygninger) blev der fundet følgende sammenhæng mellem beklædningsisolansen og hhv. middelværdien af den operative indetemperatur samt middelværdien af den effektive udetemperatur, ET*:

Som funktion af middel operativ indetemperatur:

$$I_{cl,HVAC,topm} = 1,73 - 0,04 \cdot t_{op,m} \quad (R^2 = 0,18; p = 0,0001) \quad (4.24)$$

$$I_{cl,NV,topm} = 2,08 - 0,05 \cdot t_{op,m} \quad (R^2 = 0,66; p = 0,0001) \quad (4.25)$$

²¹[de Dear et al., 1997]

²²[Brager et al., 2004]

²³[Nicol og McCartney, 2001]

Som funktion af middel effektiv udetemperatur:

$$I_{cl,HVAC,ET_m} = 0,9343 \cdot e^{-0,0127 \cdot ET_m^*} \quad (R^2 = 0,64; p < 0,05) \quad (4.26)$$

$$I_{cl,NV,ET_m} = 1,44 - 0,03 \cdot ET_m^* \quad (R^2 = 0,44; p = 0,0001) \quad (4.27)$$

hvor

$I_{cl,HVAC,topm}$	=	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af $t_{op,m}$, HVAC-bygninger	[clo]
$I_{cl,NV,topm}$	=	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af $t_{op,m}$, NV-bygninger	[clo]
$I_{cl,HVAC,ET_m}$	=	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af ET_m^* , HVAC-bygninger	[clo]
I_{cl,NV,ET_m}	=	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af ET_m^* , NV-bygninger	[clo]
$t_{op,m}$	=	Middel operativ indetemperatur	[°C]
ET_m^*	=	Middel effektiv udetemperatur (ligning (3.2))	[°C]

I undersøgelser foretaget af de Dear og Morgan [2003] blev der udført spørgeskemaundersøgelser, målinger af indelufttemperaturen samt udelufttemperaturen i to typer bygninger i Sydney, Australien:

Indkøbscenter Ingen krav til beklædning, mekanisk ventileret. Periode: august-januar²⁴. 45 personer pr. dag.

Call Center Krav til beklædning mandag-torsdag, fri beklædning om fredagen, mekanisk ventileret. Periode: september-januar²⁵. 14 personer.

Formålet med forsøgene var at undersøge sammenhængen mellem beklædningsisolansen og parametrene: køn, omgivelser, krav til beklædningsisolans, variation i indeklima samt variation i udeklima.

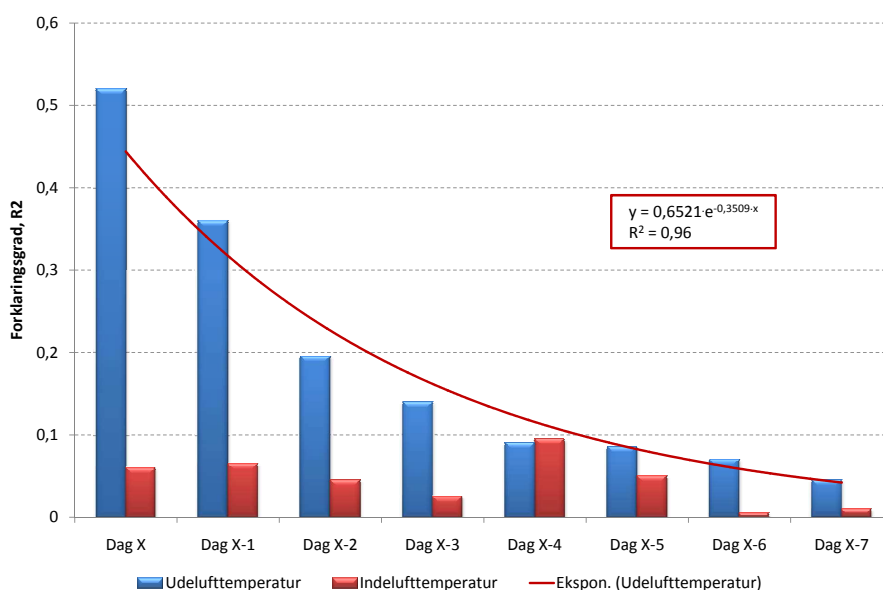
Resultaterne fra undersøgelserne i indkøbscentret viste, at beklædningsisolansen var næsten uafhængig af indelufttemperaturen²⁶ ($R^2 = 0,0045$), hvorimod der blev fundet langt større korrelation med udelufttemperaturen²⁷ ($R^2 = 0,523$) [de Dear og Morgan, 2003, s. 273, fig. 5]. Foruden dette viste resultaterne fra undersøgelsen, at korrelationen mellem beklædningsisolansen og udelufttemperaturen ikke kun var høj for den pågældende dag men især også ift. de foregående dage. Følgende figur 4.30 viser forklaringsgraden, R^2 , for hhv. indeluft- og udelufttemperaturen fordelt på den pågældende dag samt de syv foregående dage for de enkelte undersøgelser i perioden.

²⁴Månedsmiddel-temperatur, dag: 18-26 °C, nat: 8-19 °C (Danmark: dag: 2-20 °C, nat: -2-13 °C)[DMI, 2008]

²⁵Månedsmiddel-temperatur, dag: 20-26 °C, nat: 10-19 °C (Danmark: dag: 2-17 °C, nat: -2-10 °C)[DMI, 2008]

²⁶Døgnmiddel af indelufttemperaturen. Benævnes i nærværende afsnit blot "indelufttemperaturen"

²⁷Døgnmiddel af udelufttemperaturen. Benævnes i nærværende afsnit blot "udelufttemperaturen"



Figur 4.30: Forklaringsgrad for hhv. indeluft- og udelufttemperaturen for den pågældende samt syv foregående dage (efter [de Dear og Morgan, 2003, s. 273, fig. 6]).

Som beskrevet ovenfor og som det tydeligt ses på figur 4.30, forekom der størst korrelation mellem beklædningsisolansen og udelufttemperaturen frem for indelufttemperaturen. Endvidere viste undersøgelserne, hvilket også tydeligt fremgår af figur 4.30, at korrelationen mellem disse ikke udelukkende var tydelig den pågældende dag men i høj grad også i forhold til de foregående dage. Dette understøtter teorien om, at beklædningsisolansen i høj grad er påvirket af den ”termiske hukommelse” (*det var varmt i går, så det bliver nok også varmt i dag*). Den optimale tidshorisont for udetemperaturen i adaptive modeller er stadig endnu ikke klarlagt i detaljer, men ifølge de Dear og Morgan [2003], bør der foretages en vægtet middelværdi af udetemperaturen for de syv foregående dage, idet samtlige koefficienter helt tilbage til ”Dag X-7” viste sig statistisk signifikante²⁸.

Ved undersøgelserne i call centret viste der sig samme billede af korrelationen med hhv. udeluft- og indelufttemperaturen. Dog viste der sig ikke nær så stor korrelation med udelufttemperaturen som det var tilfældet for indkøbscentret ($R^2 = 0,143$), men da call centret var underlagt krav til beklædningen i fire ud af fem hverdage, er dette ikke overraskende og korrelationen er måske endda undervurderet. Regressionsanalyser foretaget på opdelt data for hhv. mandag til torsdag (krav til beklædning) og fredag (fri beklædning) viste ingen korrelation mellem hverken udeluft- eller indelufttemperatur og beklædningsisolans for dagene mandag til torsdag. Ved fokusering på data fra fredage, hvor der ingen krav til beklædningen var, forekom der større korrelation - især i forhold til udelufttemperaturen, hvor forklaringsgraden blev beregnet til $R^2 = 0,44$. [de Dear og Morgan, 2003]

Såvel undersøgelserne i indkøbscentret som call centret viste, at den største korrelation med beklædningsisolansen er i forhold til udelufttemperaturen frem for indelufttemperaturen. De empirisk opstillede udtryk for beklædningsisolansen fundet for hhv. indkøbscentret og call centret (for dage med fri beklædning) er udtrykt ved ligning (4.28a) og (4.28b):

²⁸ $p \leq 0,05$ (mindre end 5% risiko for at der tages fejl. Nulhypotesen forkastes)

$$I_{cl,indk.} = 7,3048 \cdot t_{mut}^{-0,9922} \quad (R^2 = 0,523) \quad (4.28a)$$

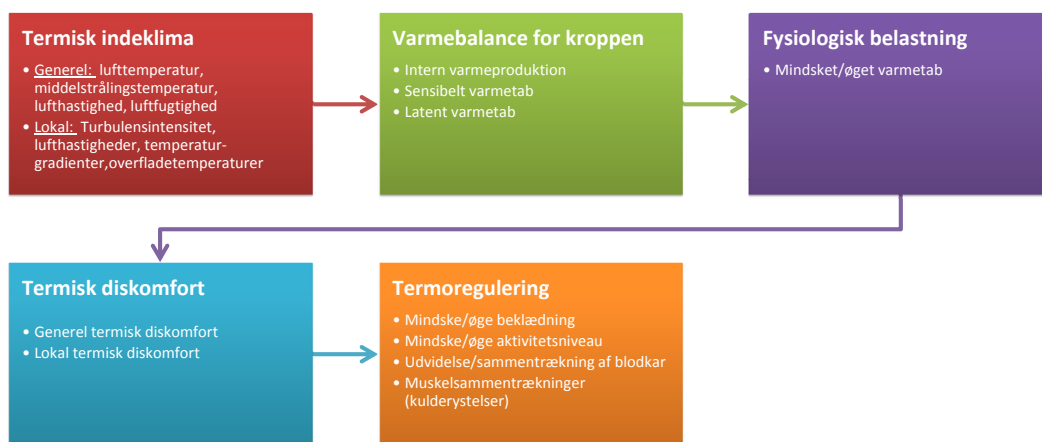
$$I_{cl,call} = 1,81 \cdot e^{-0,0497 \cdot t_{mut}} \quad (R^2 = 0,44) \quad (4.28b)$$

hvor

$I_{cl,indk.}$	=	Beklædningsisolans, indkøbscenter-data	[clo]
$I_{cl,call}$	=	Beklædningsisolans, call center-data	[clo]
t_{mut}	=	Middeludelufttemperatur	[°C]

de Dear og Morgan [2003] bemærker, at idet over halvdelen af variansen af beklædningsisolansen kan tilskrives variationer i udelufttemperaturen og at inde- og udeklimaet i realiteten er adskilte, er det interessant hvorvidt denne korrelation er større i lavenergibygninger, hvor inde- og udeklimaet er tættere relateret. Der bør dog knyttes en kommentar til netop præsenterede undersøgelser. Idet undersøgelserne af korrelationen mellem beklædningsisolansen og ude- samt indetemperaturen til dels er foretaget i et indkøbscenter, vil der nødvendigvis forekomme en vis korrelation med ude-temperaturen, idet personer må forventes at justere beklædningen efter udeklimaet. Såfremt disse undersøgelser skal benyttes for andre bygninger, må den empiriske baggrund for undersøgelserne være mere eller mindre identisk (indetemperaturer, luftfugtighed, lufthastighed, ventilation, aktivitetsniveau, forventninger, muligheder for adaptivitet etc.)

I konventionel teori for termisk komfort betragtes motivationen for valg af beklædning samt yderligere termoreguleringsadfærd som værende proportional med oplevelsen af termisk diskomfort [de Dear og Morgan, 2003]. Princippet er illustreret ved følgende figur 4.31



Figur 4.31: Indeklimaets indflydelse på termoreguleringsadfærd som følge af termisk diskomfort (frit efter de Dear og Morgan [2003])

Det er således en generel opfattelse, at beklædningsisolansen er direkte påvirket af det termiske indeklima. Spørgsmålet om hvorfor udeklimaet har så stor en indflydelse på beklædningsisolansen rejser sig derfor. Forklaringen herpå kan ifølge de Dear og Morgan [2003] ligge i tidspunktet for hvilket beklædningen bestemmes, hvilket i de fleste tilfælde forekommer om morgenen. Her vil indflydelsen fra vejrsigten i medierne sammen med den ”termiske hukommelse” for de foregående dage influere på valget af beklædning, hvilket også viste sig i resultaterne illustreret i figur 4.30. På baggrund af

dette, indsamlede de Dear og Morgan [2003] data fra de samtidige vejrudsigter publiceret i medierne, hvorefter følgende ligning (4.29) for estimering af middel beklædningsisolans blev opstillet på baggrund af data fra indkøbscentret opstilles ($R^2 = 0,59$):

$$I_{cl,m} = 1,15 - 0,0164 \cdot (t_{mut,x-1}) - 0,0178 \cdot (t_{max,x}) \quad (4.29)$$

hvor

$I_{cl,m}$	=	Middelbeklædningsisolans	[clo]
$t_{mut,x-1}$	=	Gårdagens observerede middeldelufttemperatur	[°C]
$t_{max,x}$	=	Maksimum forudsagt udelufttemperatur for nuværende dag	[°C]

Idet ovenstående ligninger (4.28)-(4.29) er baseret på målinger i Sydney, Australien og endvidere er foretaget i hhv. indkøbscenter samt call center, kan de ikke uden videre anvendes i f.eks. tempererede klimaer såsom Danmark uden at undersøge modellernes resultater empirisk med lokal data. Parametre såsom udetemperatur, temperaturinterval (min og maks), forventning (afhænger bl.a. af geografi) mv. har alle indflydelse på de fundne resultater. Endvidere må der, som beskrevet ovenfor, forventes en vis korrelation mellem udetemperaturen og beklædningsisolansen, ved en undersøgelse i et indkøbscenter. Ydermere bør det bemærkes, at undersøgelserne foretaget i call-centret kun beror på registrering af 14 personer. De fundne udtryk for middel-beklædningsisolans i afhængighed af såvel inde- som udetemperatur er således ikke underbygget med et tilpas stort empirisk grundlag til at kunne bruges i nærværende projekt. Det samme gør sig reelt gældende for undersøgelserne i call-centeret. På trods af at det empiriske grundlag er lidt større end det er tilfældet for undersøgelsen ved indkøbscentret, er dette på ingen måde stort nok, og de ovenstående modeller forkastes således på baggrund af dette.

Undersøgelser foretaget af Haldi og Robinson [2008], hvor personers adaptive adfærd i forhold til det termiske indeklima blev undersøgt, har bekræftet resultaterne fra undersøgelserne foretaget af de Dear et al. [1997] og de Dear og Morgan [2003]. Der blev foretaget spørgeskemaundersøgelser og indeklimamålinger i otte kontorbygninger i Schweiz (uden luftkonditionering) med 60 deltagere over en periode på tre måneder (juni til september)²⁹, hvor for inde- og udetemperaturen lå i intervaller på ca. hhv. 20-32 °C og 10-34 °C. I projektet blev der fokuseret på to former for adaptiv adfærd i forbindelse med beklædningsisolansen:

- Justering af beklædningsisolans i løbet af dagen
- Justering af beklædningsisolans i løbet af flere dage

Ved undersøgelse af justering af beklædningsisolansen i løbet af dagen, blev der foretaget regressionsanalyser mellem beklædningsisolans og hhv. inde- og udetemperaturen. Her blev der ikke fundet statistisk signifikant bevis for at en daglig justering af beklædningsisolansen, idet sandsynligheden herfor var mindre end 0,07. Dog blev der endvidere foretaget undersøgelser af variationen af beklædningsniveauet som funktion af de foregående dages udetemperaturer, hvilket viste dobbelt så stor effekt [Haldi og Robinson, 2008]. Til undersøgelse af justering af beklædningsisolansen baseret på den ”termiske hukommelse”, blev der foretaget regressionsanalyser af beklædningsisolansen i forhold til den eksponentielt vægtede løbende middel-udetemperatur fra DS/EN 15251 [2007]³⁰ med god

²⁹Månedsmiddel-temperatur, dag: 20-22 °C, nat: 9-10 °C (Danmark: dag: 17-19 °C, nat: 10-11 °C)[DMI, 2008]

³⁰afsnit 2.3

overenstemmelse ($R^2 = 0,97$), hvilket også blev vist af Nicol et al. [1999]. Modellen for middelbeklædningsisolans som funktion af løbende middel-udetemperatur blev fundet til:

$$I_{cl,m} = -0,0236 \cdot T_{rm} + 1,0275 \quad (4.30)$$

hvor

$$\begin{aligned} I_{cl,m} &= \text{Middelbeklædningsisolans} && [clo] \\ T_{rm} &= \text{Løbende middel-udetemperatur beregnet efter (2.5) og (2.7)} && [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Ovenstående ligning (4.30) er som beskrevet udledt på baggrund af forsøg foretaget i otte kontorbygninger i Schweiz, hvilket klimatisk kan karakteriseres som tempereret klimazone. Konklusionen for undersøgelsen var, at justeringen af beklædningen sker som et led i den termiske hukommelse, idet regressionen mellem den løbende middel-udetemperatur³¹ og beklædningsisolansen var stor.

De ovenfor præsenterede modeller for estimering af dynamisk beklædningsisolans vil senere i afsnit 4.5 blive diskuteret med henblik på at undersøge muligheden for en eventuel implementering i ydeevneindikatoren.

Beklædningsisolans og energiforbrug

Beklædningsisolansens indflydelse på en bygnings energiforbrug er massivt. For kontorbygninger i såvel kolde som tempererede og tropiske klimazoner, hidrører den største indvirkning på udeklimaet fra opretholdelse af et komfortabelt indeklima, og beklædningsisolansen repræsenterer en af de mest signifikante komfort parametre, der influerer på en bygnings varme- og kølebelastning [Rolué, 2001; de Dear og Morgan, 2003]. Simuleringer af en fiktiv mekanisk ventileret kontorbygning i Toronto, Canada foretaget af Newsham [1997] viste stort potentiale for energibesparelser såfremt der ikke stilles krav til beklædningsniveauet. I undersøgelserne blev det forudsat, at personerne løbende ændrede beklædningsisolansen indenfor et givet interval således PPD-værdien tilstræbes minimeret - dvs. som det kunne forventes i en virkelig situation. Herefter implementerede Newsham [1997] algoritmer for løbende styring af varme- og kølepunkt. Disse blev udledt gennem test-simuleringer, hvor bygningen antages som værende fritløbende³² på hhv. en sommer- og vinterdag. Setpunkterne blev bestemt af de lufttemperaturer, der resulterede i en PPD-værdi på 10%. Metoden er nærmere beskrevet i [Newsham, 1997, s. 285].

Resultaterne fra simuleringerne er opsummeret i følgende tabel 4.16.

³¹Vægtet efter de dage, der ligger tættest på det betragtede tidspunkt således disse vægtes højest (ligning (2.5) og (2.7))

³²jf. definitionen i afsnit 4.1.4

Tabel 4.16: Udvalgte simuleringresultater fra en fiktiv mekanisk ventileret kontorbygning i Toronto, Canada. Tabellen viser simuleret energiforbrug for varierende krav til beklædning. Procentsatser i parentes i kolonnen med totalt energiforbrug angiver besparelse i procent ift. fast beklædning (fra [Newsham, 1997, s. 288, tab. 1])

Beklædnings- fleksibilitet	Beklædning, [clo]		Setpunkter, [°C]		Energiforbrug, [$\frac{kWh}{år}$]			
	Vinter	Sommer	Køl.	Opv.	Køl.	Opv.	Ventilatorer	Total
Fast	1,00	0,75	24,35	22,35	275	1242	85	1602 (0%)
Meget begrænset	1,00/0,90	0,75/0,65	24,75	22,35	261	1173	80	1514 (5%)
Begrænset	0,75/1,00	0,50/0,75	25,55	22,35	234	1053	72	1359 (15%)
Fri beklædning	0,75/1,00/1,25	0,50/0,75/1,00	25,55	20,75	218	657	68	943 (41%)

Som det fremgår af tabel 4.16 er korrelationen mellem krav til beklædningsisolans og energiforbruget til hhv. opvarmning, køling og ventilatorer stor. Ved at tillade personer at adaptere sig til indeklima i form en beklædningsjustering, kan det medføre signifikante energibesparelser. Såfremt scenariet med ”Fast” beklædning benyttes som reference og således antages at have et energiforbrug på 100%, kan det af tabellens sidste kolonne ses, at energibesparelserne sideløbende med nedjustering af krav til beklædningen stiger med hhv. 5%, 15% og 41%.

4.2.2 AKTIVITETSNIVEAU

Fra stationære modeller er det vist, at et skift mellem siddende og stående aktivitet i gennemsnit resulterer i et øget aktivitetsniveau på ca. 0,3 met, der medfører en stigning i komforttemperatur på ca. 2,4 °C. På trods af at aktivitetsniveauet har stor indflydelse på den termiske komfort, er det en af de mindst veldokumenterede parametre. [Goto et al., 2002, s. 1038]

I modsætning til beklædningsisolansen, har flere studier imidlertid vist, at aktivitetsniveauet praktisk talt er upåvirket af såvel inde- som udetemperaturen [de Dear et al., 1997; Nicol et al., 1999; de Dear og Morgan, 2003; Haldi og Robinson, 2008]. Personers aktivitetsniveau er bestemt af det arbejde de skal udføre, og det er således mere eller mindre umuligt at ændre dette for at opnå højere termisk komfort.

Ovennævnte undersøgelser bygger imidlertid på spørgeskemaundersøgelser, hvor de enkelte deltageres aktivitetsmønster kortlægges procentvis ift. tidspunkter for siddende, stående og gående aktivitet. Dette giver ikke et reelt billede, idet personer ved stigende temperaturer ubevidst nedjusterer aktivitetsniveauet, hvilket ikke vil fremgå af spørgeskemaundersøgelser. Personer vil således adaptere sig til de varmere omgivelser. Ud fra denne betragtning er der på baggrund af data fra de Dear [1998] foretaget undersøgelser, hvor der udelukkende benyttes data fra ikke-luftkonditionerede bygninger i varme klimaer i varme perioder. I nærværende tilfælde blev der således benyttet data fra fire byer (Bangkok, Brisbane, Athen og Singapore) dækkende over mere end 3.200 observationer. Resultaterne fra undersøgelserne viste en reducere af aktivitetsniveauet med 6,7% for hver skala-enhed af PMV over neutral (PMV=0). Således vil aktivitetsniveauet i omgivelser med en PMV på 1,5 resultere i en nedjustering af metabolismen med 10%. [Fanger og Toftum, 2002]

Udtrykt matematisk kan den korrigerede metabolisme, M_{korr} , ved korrektionsfaktoren, k_M , jf. ovenstående beskrives ved følgende ligning:

$$M_{korr} = (1 - k_M) \cdot M \quad (4.31)$$

hvor k_M beregnes af

$$k_M = \begin{cases} 0,067 \cdot PMV & \text{hvis } PMV > 0 \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (4.32)$$

hvor

M_{korr}	=	Det korrigerede aktivitetsniveau	$[met, \frac{W}{m^2}]$
M	=	Aktivitetsniveau	$[met, \frac{W}{m^2}]$
k_M	=	Korrektionsfaktor for aktivitetsniveau	$[-]$
PMV	=	Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering	$[-]$

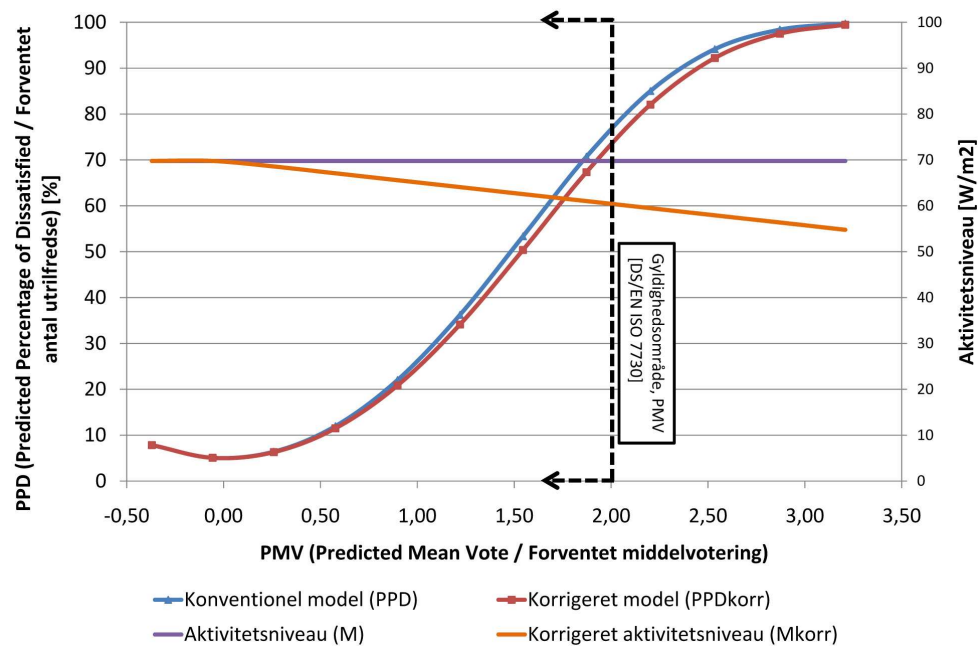
Følgende tabel 4.17 med tilhørende figur 4.32 viser resultater fra beregninger af PMV- og PPD-værdier, hvor indflydelsen fra nedjusteringen af metabolismen ved $PMV > 0$ jf. ligning (4.31) er beregnet. Der er foretaget beregninger for luft- og middelstrålingstemperaturer i intervallet 24-35 °C med spring på 1 °C. Alle andre parametre³³ er holdt konstante. Som udgangspunkt, er der forudsat et aktivitetsniveau på 1, $2met = 69,78 \frac{W}{m^2}$ svarende til stillesiddende kontorarbejde. Efter beregning af PMV- og PPD-værdien, korrigeres metabolismen efter ligning (4.31), hvorefter en ny PMV-værdi på baggrund af den korrigerede metabolisme beregnes.

Tabel 4.17: Beregning af PMV og PPD ved stigende luft- og middelstrålingstemperatur samt statiske værdier af aktivitetsniveau, beklædningsisolans, lufthastighed og luftfugtighed. Aktivitetsniveauet, M , korrigeres efter formel (4.31) hvorefter den korrigerede PMV- og PPD-værdi beregnes (PMV_{korr} hhv. PPD_{korr}). Endvidere er differensen mellem oprindelige og korrigerede PMV- og PPD-værdier angivet (ΔPMV hhv. ΔPPD). Der er taget udgangspunkt i et aktivitetsniveau på 1, $2met = 69,78 \frac{W}{m^2}$ svarende til stillesiddende kontorarbejde.

t_{op} [°C]	M [$\frac{W}{m^2}$]	p_a [Pa]	PMV	PPD [%]	k_M	M_{korr} [$\frac{W}{m^2}$]	PMV_{korr}	PPD_{korr} [%]	ΔPMV	ΔPPD [%]
24	69,78	1488	-0,37	7,85	0,00	69,78	-0,37	7,85	0,00	0,00
25	69,78	1579	-0,06	5,07	0,00	69,78	-0,06	5,07	0,00	0,00
26	69,78	1676	0,26	6,39	0,02	68,57	0,25	6,31	-0,01	-0,09
27	69,78	1777	0,58	11,98	0,04	67,08	0,56	11,50	-0,02	-0,48
28	69,78	1884	0,90	22,01	0,06	65,58	0,87	20,83	-0,03	-1,18
29	69,78	1996	1,22	36,24	0,08	64,08	1,18	34,14	-0,04	-2,10
30	69,78	2114	1,55	53,36	0,10	62,56	1,49	50,38	-0,05	-2,97
31	69,78	2239	1,87	70,71	0,13	61,02	1,81	67,34	-0,07	-3,36
32	69,78	2369	2,20	85,01	0,15	59,48	2,12	82,05	-0,08	-2,96
33	69,78	2506	2,54	94,14	0,17	57,93	2,45	92,21	-0,09	-1,93
34	69,78	2650	2,87	98,38	0,19	56,36	2,77	97,51	-0,10	-0,88
35	69,78	2801	3,21	99,71	0,21	54,78	3,09	99,46	-0,11	-0,26

$$t_{op} = t_{mrt} = t_a ; I_{cl} = 0,5 ; clo = 0,078 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} ; RH = 50\% \text{ ved } t_a ; v_a = 0,15 \frac{m}{s}$$

³³aktivitetsniveau, beklædningsisolans, lufthastighed og luftfugtighed



Figur 4.32: PPD-værdier beregnet hhv. med og uden korrigering af aktivitetsniveau efter ligning (4.31) som funktion af PMV-værdien. Endvidere er aktivitetsniveauet som funktion af PMV-værdien afbilledet.

Som det fremgår af såvel tabel 4.17 som figur 4.32 er korrektionen ved lave PMV-værdier lille. Hvis der sammenlignes med klasserne A, B og C³⁴ angivet i DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks A] ses det, at forskellen mellem PMV-værdien med og uden korrektion af aktivitetsniveauet er minimal. Ved en PMV-værdi på ca. 0,7, er korrektionen af metabolismen ca. 4,7% jf. formel (4.31), og ifølge tabel 4.17 samt figur 4.32 er overestimeringen af PMV- og PPD-værdien hhv. ca. 0,025 og 0,8% (interpoleret). Indflydelsen af den nedsatte metabolisme ved stigende temperaturer på PMV- og PPD-værdien er således lille for de anbefalede kategorier i DS/EN ISO 7730 [2006] for de benyttede personlige og indeklimaparametre.

Idet ovenstående ligning (4.31) til korrigering af aktivitetsniveauet netop bygger på ikke-luftkonditionerede bygninger i varme klimaer i varme perioder, kan den ikke benyttes direkte for f.eks. Europæiske forhold. Middelterperaturerne i de behandlede bygninger, ligger en del højere end bygninger i f.eks. den tempererede zone, hvorfor der må forventes en større effekt af nedjusteringen af metabolismen heri. Dette taget i betragtning sammen med det ovenstående eksempel hvor det blev vist, at indflydelsen af den nedsatte metabolisme på PMV- og PPD-værdien er meget lille, må det forventes at den procentvise nedjustering af metabolismen under europæiske forhold vil være mindre end de 6,7% efter ligning (4.32).

Hvorvidt nedjusteringen også forekommer i HVAC-bygninger og i hvor stor en grad er ikke undersøgt. Der må dog forventes at forekomme en lignende tendens, idet justeringen sker som direkte funktion af indetemperaturen. Der er ikke foretaget lignende undersøgelser for data indhentet i Europa.

³⁴[-0,2<PMV<0,2], [-0,5<PMV<0,5] og [-0,7<PMV<0,7]

4.2.3 LUFTHASTIGHED

I RP-884 projektet af de Dear et al. [1997], blev der også foretaget målinger af lufthastigheden. Følgende tabel viser de gennemsnitlige lufthastigheder samt tilhørende standardafvigelser i hhv. HVAC- og NV-bygninger.

Tabel 4.18: Statistik for lufthastigheder i $\frac{m}{s}$ fra RP-884-projektet (efter de Dear et al. [1997])

	HVAC	NV
<i>Sommer</i>		
Antal bygninger	74	31
Middel lufthastighed (\pm std.afv.)	0,11 ($\pm 0,037$)	0,23 ($\pm 0,120$)
<i>Vinter</i>		
Antal bygninger	28	12
Middel lufthastighed (\pm std.afv.)	0,08 ($\pm 0,024$)	0,10 ($\pm 0,047$)

Som det fremgår af tabel 4.18, var den gennemsnitlige lufthastighed i sommerperioden ca. dobbelt så stor i NV-bygningerne som i HVAC-bygningerne. Dog bemærkes det også, at standardafvigelsen for lufthastigheden i HVAC-bygningerne i denne periode var ret høj. For vinterperioden ses det, at lufthastighederne i de to typer bygninger var ret tætte på hinanden, hvilket højst sandsynligt skyldes, at vinduerne i NV-bygningerne generelt er lukkede i denne periode.

På baggrund af de målte lufthastigheder er der foretaget regressioner med hhv. operativ indetemperatur og middel udelufttemperatur. Disse er givet ved ligningerne (4.33)-(4.36).

Som funktion af middel operativ indetemperatur:

$$v_{a,HVAC,topm} = -0,56 + 0,03 \cdot t_{op,m} \quad (R^2 = 0,34; p = 0,0001) \quad (4.33)$$

$$v_{a,NV,topm} = 0,0077 \cdot e^{0,1174 \cdot t_{op,m}} \quad (R^2 = 0,5312; p < 0,05) \quad (4.34)$$

Som funktion af middel effektiv udetemperatur:

$$v_{a,HVAC,ETm} = 0,08 \cdot e^{0,0135 \cdot ET_m^*} \quad (R^2 = 0,19; p < 0,05) \quad (4.35)$$

$$v_{a,NV,ETm} = 0,03 \cdot e^{0,0758 \cdot ET_m^*} \quad (R^2 = 0,64; p < 0,05) \quad (4.36)$$

hvor

$v_{a,HVAC,topm}$	=	Middellufthastighed som fkt. af $t_{op,m}$, HVAC-bygninger	$[\frac{m}{s}]$
$v_{a,NV,topm}$	=	Middellufthastighed som fkt. af $t_{op,m}$, NV-bygninger	$[\frac{m}{s}]$
$v_{a,HVAC,ETm}$	=	Middellufthastighed som fkt. af ET_m^* , HVAC-bygninger	$[\frac{m}{s}]$
$v_{a,NV,ETm}$	=	Middellufthastighed som fkt. af ET_m^* , NV-bygninger	$[\frac{m}{s}]$
$t_{op,m}$	=	Middel operativ indetemperatur	$[^{\circ}C]$
ET_m^*	=	Middel effektiv udetemperatur (ligning (3.2))	$[^{\circ}C]$

Som det fremgår af ovenstående modeller for middellufthastighed som funktion af hhv. middel operativ indetemperatur eller middel effektiv udetemperatur, er der på trods af opnået statistisk signifikans for samtlige modeller ($p < 0,05$) ikke opnået store korrelationskoefficienter. Modellerne der

opnår størst korrelation med den indgående parameter er ligning (4.34) og (4.36), men her er det stadig kun omkring halvdelen af ændringerne i lufthastigheden, der sker som følge af ændringer i hhv. middel operativ temperatur eller middel effektiv udetemperatur. Endvidere ses det, at korrelationskoefficienterne for NV-bygningerne er større end dem for HVAC-bygningerne hvilket antyder, at indeklimaet i NV-bygningerne har været i ”tættere kontakt” med udeklimaet, idet HVAC-bygningerne generelt har været mere eller mindre afskåret herfra jf. definitionen herpå.

De ovenstående modeller for middellufthastigheden i hhv. NV- og HVAC-bygninger kan på baggrund af ovenstående ikke benyttes i nærværende projekt.

4.3 OPSUMMERING

I nærværende afsnit opsummeres resultaterne fra forskningsprojekterne og de efterfølgende meta-analyser heraf gennemgået i det foregående, hvorefter de diskuteres. Først behandles de primære resultater af projekterne, hvorefter resultaterne fra undersøgelserne af parametrene aktivitetsniveau, beklædningsisolans og lufthastighed diskuteres. Tabel 4.19 indeholder generelle data for de behandlede projekter og adaptive modeller.

RP-884

I det største af projekterne, RP-884, af de Dear et al. [1997] blev der foretaget mange og detaljerede undersøgelser af korrelationen mellem termisk komfort, præference, accept (afsnit 3.10) og indeklima samt muligheden for at påvirke egen termisk situation gennem åbning af vinduer, justering af beklædningsisolans og aktivitetsniveau mv. Her blev det fundet, at personer i naturligt ventilerede bygninger generelt accepterede højere temperaturer end personer i luftkonditionerede bygninger, der var næsten dobbelt så følsomme overfor temperaturændringer væk fra optimum. PMV-modellen udledt af Fanger [1972] viste imidlertid ikke denne tendens, og forklaringen jf. de Dear et al. [1997] var, at personers adaptivitet påvirker den termiske opfattelse. Det er generelt anerkendt, at disse adaptive processer er opdelt i:

- **Fysiologisk:** Genetisk bestemt og akklimatisering
- **Psykologisk:** Termisk hukommelse og forventning
- **Adfærdsmæssig:** Ændring af beklædningsisolans og aktivitetsniveau, åbning af vinduer/døre mv.

Den fysiologiske adaptivitet er gennem mange forsøg fundet uden/af mindre betydning for den termiske oplevelse. Bl.a. angiver Fanger [1972], at mange forsøg i andre klimatiske zoner har vist indflydelsen fra akklimatiseringen som værende uden den store betydning. Dette efterlader de resterende to adaptive forhold. Halvdelen af afvigelsen mellem PMV og AMV i de naturligt ventilerede bygninger kan jf. de Dear et al. [1997] tilskrives den adfærdsmæssige adaptivitet, og den anden halvdel er som følge af den psykologiske adaptivitet. Det faktum at PMV-modellen er delvist adaptiv i og med at denne medtager de personlige parametre beklædningsisolans og aktivitetsniveau, er den grundlæggende forklaring på den gode overensstemmelse mellem AMV og PMV i luftkonditionerede bygninger.

I projektet blev der også foretaget undersøgelser om den termiske præference. Teorien om at personer i kolde miljøer foretrækker det lidt varmere end neutral og omvendt lidt koldere end neutral i varme miljøer³⁵ blev undersøgt, men der blev kun opnået statistisk signifikans for HVAC-bygningerne. Den adaptive model fundet for HVAC-bygninger korrigeres således for denne afvigelse.

For HVAC-bygninger varierede den neutrale operative indetemperatur kun omkring 2°C i et udeklimatisk interval på ca. 40°C hvilket forklares ved, at personerne i disse bygningstyper har adapteret sig til det snævre temperaturinterval der forekommer heri i modsætning til NV-bygningerne. I RP-884-projektet var intervallerne for indetemperatur i NV- og HVAC- bygninger hhv. 19-27°C og 21-25°C. Slutteligt blev de nye adaptive modeller sammenlignet med forudsigelser af den konventionelle PMV-model, hvor overensstemmelsen mellem AMV og PMV i de luftkonditionerede bygninger viste sig god. Den tilsvarende sammenligning for NV-bygningerne gav dog ikke samme overensstemmelse, og

³⁵Betegnet som "semantisk afvigelse"

det blev konkluderet, at kun halvdelen af den klimatiske indflydelse på den termiske neutralitet kan tilskrives den adfærdsrelaterede adaptive tilpasning (beklædningsisolans, lufthastighed (ved åbning af vinduer) mv.). Den anden halvdel skal således findes blandt den fysiologiske og psykologiske adaptation i form af hhv. akklimatisering og tilvænning, og da akklimatiseringen som beskrevet ovenfor blev fundet af mindre betydning, må den psykologiske adaptivitet kunne tilskrives resten.

RP-1161

Som direkte konsekvens af resultaterne i RP-884-projektet, blev forskningsprojektet RP-1161 af Brager et al. [2004] gennemført. Projektet skulle undersøge personers adaptivitet samt indflydelsen fra graden af personlig kontrol på den termiske komfort, præference og accept. Hertil blev der udført målinger i hhv. en kold og varm periode (to uger i hver) i en naturligt ventileret bygning indrettet som landskabskontor placeret i San Francisco, hvor 35 personer deltog.

Undersøgelser af den termisk præference viste en klar asymmetri omkring termisk neutralitet. I tråd med resultaterne fra RP-884, blev der også her fundet tegn på, at personer i kolde miljøer foretrækker det lidt varmere end neutralt og omvendt koldere end neutralt i varme miljøer. Og idet temperaturintervallet mellem minimum og maksimum indetemperatur kun var 1,2 og 2,0°C for hhv. kold og varm sæson, kan denne asymmetri måske være større ved et bredere interval mellem minimum og maksimum indetemperaturen. Endvidere viste undersøgelserne, at et klart flertal accepterede let kølige omgivelser fremfor let varme omgivelser³⁶.

Der blev endvidere i projektet foretaget lineære regressioner mellem de indsamlede komfortvoteringer og forskellige inde- og udeklimatiske parametre. Her var det regressionen mellem den termiske oplevelse og operative indetemperatur, der opnåede størst korrelation. For at undersøge i hvor stor en grad den personlige kontrol har indflydelse på den termiske komfort, blev dataene inddelt i to grupper iht. graden af personlig kontrol:

- **PK-høj**
 - 1: Direkte kontrol, privat kontor
 - 2: Direkte kontrol, landskabskontor, arbejdsplads lige ved vindue
- **PK-lav**
 - 3: Indirekte kontrol, landskabskontor, arbejdsplads et skrivebord væk fra vindue
 - 4: Ingen kontrol, landskabskontor, arbejdsplads afskærmet fra vindue

For de to grupper blev der også foretaget lineære regressioner mellem operativ indetemperatur og termisk oplevelse. Sammenligninger af neutral operativ indetemperatur³⁷ for komfortmodellerne opstillet for samtlige data samt fordelt på de to ovennævnte grupper viste, at neutraltemperaturen ($ThSens = 0$) for personer med høj grad af personlig kontrol var højere end for personer med mindre grad af personlig kontrol.

Teorien om at den foregående termiske oplevelse påvirker den termiske oplevelse blev også undersøgt i projektet. Operative temperaturer forud for en komfortvotering blev sammenlignet med neutraltemperaturen for de to ovennævnte grupper. For den varme sæson var den operative indetemperatur forud for komfortvoteringen identisk for de to grupper, og stadig forekom der en forskel i neutraltemperatur

³⁶Varme omgivelser: 67/69% ønskede ingen ændring, Kølige omgivelser: 23/42% ønskede ingen ændring

³⁷Ligningerne for termisk oplevelse som funktion af operativ indetemperatur, blev løst for $ThSens = 0$

mellem de to grupper. Det interessante kunne være at se, om denne tendens også forekom såfremt den foregående operative temperatur forud for komfortvoteringserne i de to grupper var forskellig, men idet der ikke blev opnået statistisk signifikans, var dette ikke muligt.

Endelig blev indflydelsen fra lufthastigheden undersøgt. Der blev foretaget undersøgelser af ønsket om ændringer i lufthastigheden som funktion af den termiske oplevelse, hvilke også viste en asymmetrisk fordeling omkring neutral (fig. 4.14). Ønsker om ændringer i lufthastigheden var stærkere i intervallet fra termisk neutralitet til hedt ($0 \rightarrow +3$). Her ønskede alle generelt højere lufthastigheder selv ved termisk neutralitet. I kolde miljøer var ønsket om en lufthastighedsændring ikke så stort, og i let kølige omgivelser (-1) blev der generelt ikke ønsket en ændring. Fordelingen af lufthastighederne for den varme og kolde sæson viste, at i ca. 91% af tiden, var lufthastigheden ikke over $0,15 \frac{m}{s}$ jf. figur 4.13.

SCATs

I SCATs-projektet blev der foretaget målinger i 26 bygninger i Europa. Det unikke for projektet var, at der blev udviklet en samlet målestation til opsamling af indeklimamålinger. Herved ville den forskel der forekommer ved måling med forskelligt udstyr i forskellige bygninger helt kunne fjernes. Hvor de førnævnte projekter inddeler bygninger i hhv. naturligt og mekanisk ventilerede bygninger, benyttes inddelingen af bygninger i hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift. Selvom bygninger er mekanisk ventileret, kan muligheden for åbning af vinduer stadig være tilstede, hvorfor den adfærdsmæssige adaptivitet netop i form af åbning af vinduer og døre ikke udelukkende kan forekomme i naturligt ventilerede bygninger. I SCATs-projektet blev der foretaget to undersøgelser af forskellig detaljeringsgrad - hhv. en undersøgelse en gang om måneden og en undersøgelse fire gange om dagen i 3-12 mdr. Ligesom projekterne RP-884 og RP-1161 benytter SCATs-projektet teorien om, at komforttemperaturen kan beskrives som en lineær funktion af udetemperaturen. Til forskel fra de andre projekter, benyttes den eksponentielt vægtede løbende middel-udetemperatur³⁸ fremfor en simpel middel-udelufttemperatur, idet undersøgelser har vist at personers termisk komfort og adaptivitet ikke blot afhænger af temperaturen den aktuelle dag, men i høj grad også af den termiske hukommelse [Humphreys, 1973; Humphreys og Nicol, 1995; Nicol og Raja, 1996; Nicol, 2000] samt de Dear og Morgan [2003]. Den løbende middel-udetemperatur benyttet i projektet beregnes på baggrund af temperaturer for de syv foregående dage. På baggrund af dette, er der opstillet adaptive komfortmodeller til bestemmelse af komforttemperatur som funktion af løbende middel-udetemperatur. Hvor RP-884-projektet opstiller modeller for termisk neutralitet, opstilles modellerne i SCATs-projektet for intervallet $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ svarende til 10% utilfredse.

Også i SCATs-projektet blev der foretaget undersøgelser af den termiske præference ift. termisk komfort, hvor afvigelsen fra komforttemperaturen er beregnet og sammenlignet med komfort- og præference-voteringserne. Idet komforttemperaturen for hele bygningen bestemmes som middelværdien af de enkelte personers individuelle komforttemperatur, forekommer der selvsagt en vis standardafvigelse. I SCATs-projektet er komforttemperaturer bestemt for enkelte grupper i enkelte bygninger, hvoraf standardafvigelsen i komforttemperaturen er bestemt til ca. $2,0^\circ C$. Det er således fundet, at der kan opnås termisk komfort i et område på $\pm 2,0^\circ C$ omkring komforttemperaturen. På baggrund heraf er der opstillet et dimensioneringsdiagrammer for såvel fritløbende som opvarmede/kølede bygninger med angivelse af komfortområde som funktion af løbende middel-udetemperatur.

³⁸Ligning 4.13 og (2.7)

ATG

De Hollandske adaptive temperaturgrænser, ATG, bygger direkte på de adaptive modeller fundet i RP-884. Udover komfortgrænserne på hhv. 80 og 90% 's termisk accept, er der tilføjet en klasse yderligere defineret som 65% termisk accept. I stedet for kategoriseringen i hhv. HVAC- og NV-bygninger, klassificeres bygninger i en Alfa- og Beta-klasse i afhængighed af muligheden for adaptivitet, og ikke i hhv. naturligt og mekanisk ventilerede bygninger. De adaptive modeller i RP-884 opstillet som funktion af middel-udetemperaturen benyttes, hvor middel-udetemperaturen er udskiftet med den løbende middel-udetemperatur, idet der som tidligere beskrevet er fundet stor korrelation mellem den termiske oplevelse og de foregående temperaturoplevelser. Ud fra de adaptive modeller for termisk neutralitet, opstilles komfortgrænser for hhv. 90, 80 og 65% 's termisk accept opdelt i hhv. Alfa- og Beta-kategori hvilken bestemmes på baggrund af grafisk udvælgelsesprocedure.

PMVe

De ovennævnte adaptive modeller tager alle udgangspunkt i teorien om, at den termiske komfort kan beskrives som en lineær funktion af en inde- eller udeklimavariabel (operativ indetemperatur, middel-udetemperatur etc.). En klar svaghed herved er jf. Fanger og Toftum [2002], at disse ikke medtager indflydelsen fra hhv. aktivitetsniveau og beklædningsisolans og ej heller lufthastighed og luftfugtighed (og i nogle tilfælde luft- og middelstrålingstemperatur), hvilke har stor indflydelse på den menneskelige varmebalance og derved termiske oplevelse og komfort.

Fanger og Toftum [2002] erkender indflydelsen fra personernes adaptivitet på den termiske oplevelse, men kun i form af varierende forventninger samt justering af aktivitetsniveau og beklædningsisolans - dvs. psykologisk og adfærdsmæssig adaptivitet. Den personlige kontrol over vinduer har kun indflydelse på de personer, der sidder umiddelbart ved siden af dette, og denne kontrol er endvidere begrænset idet der kan opstå uenighed blandt personerne i rummet om hvorvidt vinduet skal være åbent eller ej.

I PMVe-modellen benyttes det termisk indeks, PMV, i uændret form, hvorefter der multipliceres med en forventningsfaktor, der afhænger af den varme periodes varighed samt af forekomsten af luftkonditionerede bygninger i området hvori bygningen er placeret. Udover dette justeres aktivitetsniveauet, idet det ved meta-analyser af data fra RP-884-databasen er fundet at dette nedsættes med 6,7% for hver skala-enhed på ASHRAE-skalaen, der afviger fra neutral. Med den korrigerede metabolisme og forventningsfaktoren benytter PMVe-modellen det bedste fra den oprindelige PMV-model, og medtager påvirkningerne fra hhv. psykologisk og adfærdsmæssig adaptivitet.

Følgende tabeller 4.19 og 4.20 opsummerer hhv. de enkelte forskningsprojekter samt de opstillede adaptive komfortmodeller.

Tabel 4.19: *Oversigt over de adaptive projekter, der er behandlet i nærværende kapitel.*

Komfortmodel/ projekt	Kilde	Geografisk placering	Observationer(ca.) / bygninger
RP-884	[de Dear, 1998] [de Dear et al., 1997]	Australien, Canada, Grækenland, Indonesien, Pakistan, Singapore, Thailand, England og USA	21.000 / 160
RP-1161	[Brager et al., 2004]	USA (San Francisco)	2.100 / 1
PMVe	[Fanger og Toftum, 2002]	Brisbane, Athen, Singapore og Bangkok ^{a)}	3.200 / 4
SCATs	Nicol og McCartney [2001] [Nicol og Humphreys, 2007] [McCartney og Nicol, 2002]	Frankrig, Grækenland, Portugal, Sverige og England	4.500 / 26
ATG	[van der Linden et al., 2002] [Boerstra et al., 2003] [van der Linden et al., 2006] [Kurvers et al., 2006]	^{b)}	21.000 / 160

a) Meta-analyse af data fra RP-884 af de Dear [1998]; de Dear et al. [1997]

b) På baggrund af komfortmodeller fra RP-884 (modifikationer)

Tabel 4.20: Oversigt over adaptive komfortmodeller.

		Adaptiv model	Formelreference
RP-884	HVAC-bygninger	$t_{neutral} = 0,62 \cdot t_{op,m} + 8,92$	(4.4)
		$t_{neutral} = 0,04 \cdot ET_m^* + 22,6$	(4.6)
		$t_{neutral} = 0,11 \cdot t_{a,ude} + 21,45$	(4.8)
	NV-bygninger	$t_{neutral} = 0,35 \cdot t_{op,m} + 15,47$	(4.5)
		$t_{neutral} = 0,26 \cdot ET_m^* + 18,9$	(4.7)
		$t_{neutral} = 0,31 \cdot t_{a,ude} + 17,8$	(4.9)
RP-1161	NV-bygning, varm sæson	$ThSens_{varm} = 0,30 \cdot t_{op} - 6,90$	(4.10)
	NV-bygning, kold sæson	$ThSens_{kold} = 0,19 \cdot t_{op} - 4,20$	(4.11)
PMVe	NV-bygninger	$PMV_e = PMV \cdot e$	(4.12)
SCATs	Fritløbende bygninger ^{c)}	$t_{comf} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8$	(4.14)
	Opv./køl. bygninger	$t_{comf} = 0,09 \cdot T_{rm} + 22,6$	(4.15)
ATG	Alfa-bygninger ^{d)}	$t_{comf,alfa} = 0,31 \cdot T_{rm} + 17,8$	(4.21)
	Beta-bygninger ^{d)}	$t_{comf,beta} = 0,11 \cdot T_{rm} + 21,45$	(4.22)
$t_{neutral}$	Neutral operativ indetemperatur (PMV=0)		[°C]
t_{comf}	Operativ komforttemperatur ($-0,5 \leq PMV \leq +0,5$)		[°C]
$t_{comf,alfa}$	Neutral operativ indetemperatur (PMV=0), alfa-bygninger		[°C]
$t_{comf,beta}$	Neutral operativ indetemperatur (PMV=0), beta-bygninger		[°C]
t_{op}	Operativ indetemperatur		[°C]
$t_{op,m}$	Middel operativ indetemperatur (for rummet)		[°C]
$t_{a,ude}$	Middel udelufttemperatur (døgnmiddel)		[°C]
ET_m^*	Middel af effektiv udetemperatur målt kl. 6.00 og 15.00, beregnet efter (3.2)		[°C]
T_{rm}	Løbende middel-udetemperatur, beregnet efter (4.23)		[°C]
e	Forventningsfaktor, se tabel 4.5		[-]
PMV	Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering, beregnet efter (B.25)		[-]
$ThSens_{varm}$	Termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen, varm sæson		[-]
$ThSens_{kold}$	Termisk oplevelse efter ASHRAE-skalaen, kold sæson		[-]

c) Fritløbende: Bygninger hvor varme- eller køleanlægget ikke er i drift.

d) Kategorisering af bygninger foretages ved brug af diagrammet i figur 4.25

4.4 DISKUSSION

Diskussion

De netop præsenterede projekter tager alle udgangspunkt i personers adaptivitet. Som beskrevet er denne opdelt i: fysiologisk, psykologisk og adfærdsmæssig adaptivitet. På baggrund af forsøg, er den fysiologiske adaptivitet i form af akklimatisering og tilvænning fundet uden væsentlig betydning for den termiske oplevelse, og alle de ovennævnte projekter erkender dette. Der er dog uenighed om indflydelsen fra graden af personlig kontrol på den termiske oplevelse. Fanger og Toftum [2002] mener kun at dette er gældende for de personer, der sidder umiddelbart ved siden af vinduet. Dette fremgik også af RP-1161 projektet, hvor personer med høj grad af personlig kontrol placeret tæt ved vinduerne generelt accepterede højere temperaturer. Resultaterne fra dette projekt bør dog, som nævnt tidligere, kun benyttes som en indikation af adaptivitetens indflydelse på den termiske komfort, idet undersøgelserne kun bygger på resultater/målinger fra én bygning, hvor 35 personer deltog. Det empiriske grundlag er således langt fra stort nok til at benytte de udledte adaptive modeller i nærværende projekt. Projektet af Haldi og Robinson [2008], hvor der blev foretaget undersøgelser i otte kontorbygninger i Schweiz beskrevet i afsnit 4.2.1, omfattede registreringer af personernes adfærdsmæssige adaptivitet i form af: åbning/lukning af vinduer og døre, brug af persienner og ventilatorer samt indtagelse af drikkevarer. De enkelte personer angav hvilke adfærdsmæssige adaptive kontrolmuligheder de benyttede samt afgav deres komfortvotering på ASHRAE-skalaen. I alt 60 personer deltog i undersøgelserne, og resultaterne herfra er opsummeret i følgende tabel 4.21

Tabel 4.21: Forøgelse i komforttemperatur (i projektet defineret ved $PMV=0$) som funktion af benyttede kontrolmuligheder (efter Haldi og Robinson [2008])

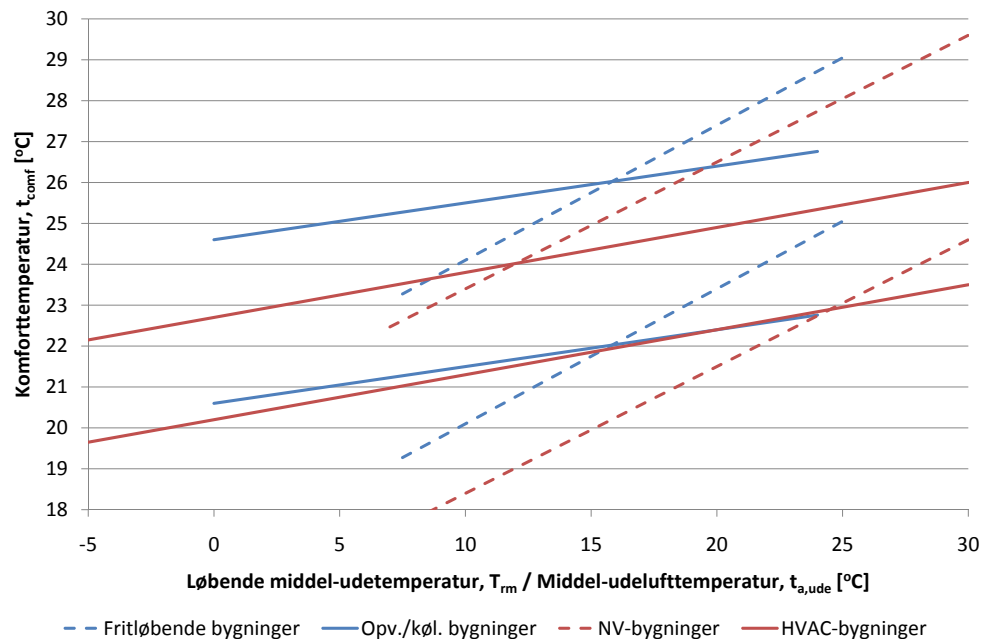
Kontrolmuligheder i brug	Komforttemperatur [°C]	Forekomster
Ingen	23,98	777
Vi	24,56	348
P	24,44	28
Ve	25,37	16
D	24,13	339
d	24,67	204
Vi,P	25,78	83
Vi,Ve	26,80	10
Vi,D	24,89	301
Vi,d	24,77	189
P,Ve	25,27	14
P,D	24,95	49
P,d	25,84	10
Ve,D	25,43	1
Ve,d	27,31	4
D,d	24,09	103
Vi,P,D	25,36	219
Vi,P,d	24,64	45
Vi,Ve,D	26,55	25
Vi,Ve,d	25,43	1
Vi,D,d	25,09	153
P,Ve,D	26,14	1
P,Ve,d	26,58	4
P,D,d	25,59	8
Ve,D,d	26,67	4
Vi,P,Ve,D	26,79	58
Vi,P,Ve,d	26,14	1
Vi,P,D,d	25,61	41
Vi,Ve,D,d	27,09	11
Vi,P,Ve,D,d	26,83	14

Vi: vinduer, P: persiener, Ve: ventilatorer, D: døre, d: drikkevarer

Af tabellen ses det, at der forekommer en vis påvirkning af komforttemperaturen i takt med stigende grad af benyttede kontrolmuligheder. Forskellen i komforttemperaturen mellem de personer der ikke har benyttet kontrolmulighederne og de personer der har benyttet samtlige muligheder er næsten 3°C. På trods af det relativt svage empiriske grundlag, bekræfter resultaterne at der forekommer en vis påvirkning fra personers adaptivitet på den termiske oplevelse, præference og accept.

Fælles for hovedparten af de adaptive modeller er, at de tager udgangspunkt i resultaterne fra

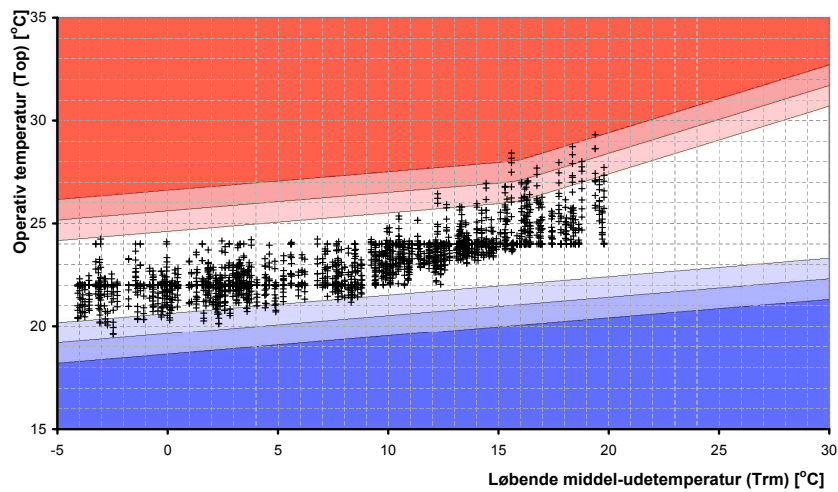
Humphreys [1978], der beskrev den neutrale indetemperatur³⁹ som en lineær funktion af månedsmiddel-udetemperaturen. Hvor RP-884-projektet opstiller de adaptive modeller for termisk neutralitet, er det valgt i SCATs-projektet at fokusere på termisk komfort, hvor der som kriterie er valgt 90%’s termisk accept svarende til $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$. Det er således ikke muligt at opnå mindre end 10% utilfredse ved brug af denne model, hvilket må anses som en svaghed. Det at hovedformålet med SCATs-projektet var at udvikle den adaptive kontrolalgoritme som direkte konsekvens af de energipolitiske beslutninger i EU omhandlende en reducere af energiforbruget til såvel opvarmning som køling, afspejles i de opstillede komfortmodeller. Dette fremgår først og fremmest af det faktum, at modellerne er opstillet for maksimalt 90%’s termisk accept. På følgende figur 4.33 sammenlignes komfortzonerne for 90%’s accept i de adaptive modeller fra hhv. RP-884 og SCATs.



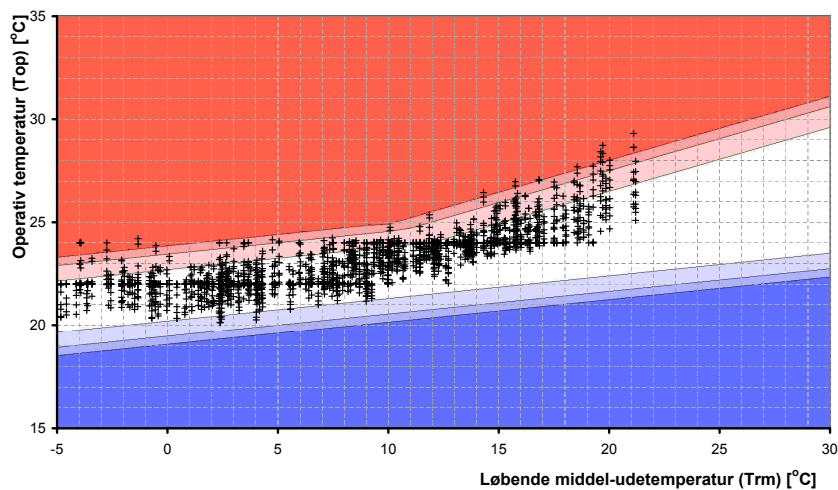
Figur 4.33: Sammenligning af komfortzoner for 90%’s accept bestemt ved hhv. RP-884 (rød) og SCATs (blå) givet ved hhv. $\pm 1,25^\circ\text{C}$ og $\pm 2,0^\circ\text{C}$ for hhv. NV og fritløbende bygninger, og hhv. $\pm 2,5^\circ\text{C}$ og $\pm 2,0^\circ\text{C}$ for hhv. HVAC og opvarmede/kølede bygninger.

Som det fremgår af figur 4.33, er komfortzonen for 90%’s termisk accept i opvarmede/kølede bygninger (SCATs) smallere end komfortzonen for HVAC-bygninger (RP-884). Dette forekommer som en direkte konsekvens af, at modellerne i SCATs-projektet er opstillet for termisk komfort, hvor modellerne i RP-884 er opstillet for termisk neutralitet. Dog er komfortzonen for NV-bygningerne bredere end for de fritløbende bygninger, men da komforttemperaturen i SCATs-modellen ligger over neutral-temperaturen i RP-884-projektet tillades højere indetemperatur - dvs. mindre kølebehov. Dette er yderligere illustreret på følgende grafer i figur 4.34, hvor en simulering ved brug af TBS-programmet BSim er udført for et konventionelt storrumskontor placeret i Danmark. Konceptet fra de Hollandske ATG, hvor komfortgrænserne for hhv. fritløbende og opvarmet/kølet drift sammenbygges i én designgraf, er benyttet med grænser fra SCATs-projektet. Endvidere opsummerer efterfølgende tabel 4.22 resultaterne fra de viste simuleringer.

³⁹PMV=0



(a) SCATs



(b) RP-884

Figur 4.34: Timeværdier af operativ temperatur i arbejdstiden 8-16 plottet i forhold til komfortgrænser i hhv. SCATs og RP-884. Simuleringsdata fra simulering gennem TBS-programmet BSim af storrumskontor placeret i Danmark.

Tabel 4.22: Opsummering af resultater fra ovenstående simulering. Tallene angiver antal timer i den angivne kategori af acceptniveau. Tallene i parentes angiver procentdelen af den total simuleringsperiode.

	Termisk acceptniveau						Udenfor kategori
	Udenfor kategori	65%	80%	90%	80%	65%	
SCATs	0 (0%)	0 (0%)	40 (1,7%)	2254 (96%)	40 (1,7%)	12 (0,5%)	3 (0,1%)
RP-884	0 (0%)	0 (0%)	9 (0,4%)	1958 (83,4%)	317 (13,5%)	34 (1,4%)	31 (1,3%)

Af figur 4.34 og tabel 4.22 fremgår effekten af de mere snævre grænser i RP-884-projektet, idet antallet timer i hhv. 80 og 65%’s termisk acceptniveau samt timer uden for kategori ved høje indetemperaturer er langt større end det er tilfældet for SCATs projektet. En yderligere kommentar, der bør knyttes til såvel RP-884 som SCATs-projektet er, at de angivne komfortgrænser kun er angivet for et interval i løbende middel-udetemperatur ned til mindst -5°C . I udeklimatiske forhold som den der f.eks. forefindes i den tempererede klimazone samt i koldere klimaer, forekommer der ofte løbende middel-udetemperaturer under -5°C . Ved ovenstående simulering er det danske DRY benyttet, hvori der forekommer hhv. 15 og 2 dage hvor den løbende middel-udetemperatur er under -5°C beregnet efter metoden i hhv. RP-884/ATG⁴⁰ og SCATs. Begrænses den anskuede periode til arbejdstiden forekommer der hhv. 10(RP-884/ATG) og 2(SCATs) dage, hvor den løbende middel-udetemperatur er under -5°C . Med de aktuelle adaptive temperaturgrænser i de to projekter vil der således forekomme tidspunkter udenfor gyldighedsområdet - ikke blot i Danmark, men i stigende grad i koldere klimaer.

De to største projekter beskrevet i nærværende kapitel, adskiller sig endvidere fra hinanden på flere punkter. RP-884-projektet er bygget på et stort empirisk grundlag, og den efterfølgende databehandling er foretaget efter identiske procedurer og beregningsrutiner, hvilket medvirker til at fejlene i forbindelse hermed minimeres eller helt fjernes. Problemet med projektet er dog, at undersøgelserne hovedsageligt er foretaget i bygninger placeret i varme klimaer, hvilket gør det svært/umuliggør en direkte overførsel af resultaterne til brug i bygninger placeret i f.eks. tempererede klimaer. Som modspil hertil blev SCATs-projektet udført, der foretog målinger i 26 bygninger i Europa. Det unikke ved projektet var, at der til formålet blev udviklet en mobil målestation, således at samtlige indeklimamålinger i alle bygninger er foretaget med identisk udstyr, hvilket minimerer eller helt fjerner fejlen ved de forskellige målinger. For såvel RP-884 som SCATs er der betæneligheder ved de benyttede klassificeringer af bygningerne, hvor RP-884 skelner mellem hhv. NV- og HVAC-bygninger og SCATs mellem fritløbende og opvarmede/kølede bygninger. De naturligt ventilerede bygninger er defineret som bygninger med funktionsdygtige vinduer og loftventilatorer i små en- eller tomandskontorer, hvor adaptive muligheder er store og de mekanisk ventilerede bygninger som lukkede centralt styrede luftkonditionerede bygninger med åbne kontormiljøer, og hvor brugerne ingen mulighed har for åbning/lukning af vinduer. Problemet med denne opdeling er, at de fleste bygninger har funktionsdygtige vinduer, og at samtlige bygninger i en vis udstrækning består af en kombination af åbne kontormiljøer og små enkelt- eller topersoners-kontorer. Åbne kontormiljøer bliver endvidere mere og mere almindelige, og den nævnte opdeling gør det således svært at placere en given bygning i en af disse kategorier. I SCATs-projektet benyttes opdelingen i hhv. fritløbende og opvarmede/kølede bygninger. Problemet her er det samme idet de fleste bygninger vil falde udenfor disse kategorier og således "lande" et sted imellem dem. For at løse dette, har Holland indført Alfa/Beta-konceptet, hvor bygninger klassificeres på baggrund af muligheden for adaptivitet og personlig kontrol over det termiske indeklima. Denne opdeling er mere fleksibel, og klassificeringen af de enkelte bygninger er nemmere at foretage. Dog bør det bemærkes, at de Hollandske adaptive modeller bygger direkte på resultaterne fra RP-884, og disse modeller er ikke opstillet for Alfa/Beta-klassificeringen. Og endvidere er der, som beskrevet ovenfor, foretaget en justering af modellerne, hvor den gennemsnitlige udelufttemperatur er udskiftet med den løbende middel-udetemperatur uden korrigerende af koefficienterne i de lineære udtryk. På trods af, at der på baggrund af forsøg er vist større korrelation mellem den termiske oplevelse og løbende middel-udetemperatur, må der nødvendigvis forekomme en afvigelse herved. Koefficienterne burde således korrigeres på baggrund af lineære regressioner mellem komfortvoteringerne og den løbende middel-udetemperatur for at opnå større nøjagtighed. Foruden dette bør det også bemærkes, at i forbindelse med opstillingen af de adaptive modeller i RP-

⁴⁰Beregning af løbende middel-udetemperatur er foretaget efter metoden beskrevet under ATG

884-projektet, blev der kun fundet en semantisk afvigelse⁴¹ i HVAC-bygningerne, og forklaringen på den manglende afvigelse i NV-bygningerne kunne ikke gives.

Ydermere bør der knyttes en kommentar til temperaturintervallerne indenfor hvilke de enkelte projekters komfortgrænser er opstillet, og sammen med disse bør gyldighedsområderne for de enkelte projekter diskuteres. Disse opsummeres i følgende tabel 4.23.

Tabel 4.23: Gyldighedsintervaller for de enkelte adaptive modeller. RP-1161 er ikke medtaget. Gyldighedsområde for de Hollandske ATG er identiske med RP-884-projektets, hvorfor dette heller ikke er medtaget.

	Adaptive modeller		
	RP-884	SCATs	PMV _e
Aktivitetsniveau	1,2-1,6 met	1,0-1,3 met	1,2-1,6 met
Beklædningsisolans	0,5-1,0 clo		0,5-1,0 clo
Middel-udelufttemperatur	-5-33°C/5-33°C (HVAC/NV)		5-33°C (NV)
Løbende middel-udetemperatur		7-25°C/0-25°C (Fritl./Opv.Køl.)	
Lufttemperatur			10-30°C
Middelstrålingstemperatur			10-40°C
Vanddampstryk			0-2700Pa
Luft hastighed			0-1 $\frac{m}{s}$
Yderligere begrænsninger	Beklædning kan varieres frit i ovenstående interval	Beklædning kan varieres frit	
	NV: Adgang til funktions- dygtige vinduer	Mekanisk ventilation tillades men ikke mekanisk køling	
	NV: Mindre end fire personer pr. rum		

Som det fremgår, vil det i tempererede og især i koldere klimaer forekomme, at hhv. $t_{a,ude}$ eller T_{rm} ligger lavere end grænserne angivet ovenfor. Spørgsmålet er således hvordan de adaptive metoder beskrevet i det foregående benyttes i disse situationer. En simpel ekstrapolering er ikke mulig, da der hverken forekommer empirisk eller teoretisk grundlag herfor. Såvel RP-884- som SCATs-modellerne er kraftigt begrænset i forhold til den konventionelle PMV-model. De adaptive modeller er ikke adaptive i sig selv, idet de kun kan benyttes i lignende bygninger. I et lager, hvor aktivitetsniveauet er højere end ved stillesiddende kontorarbejde, vil de adaptive modeller der udelukkende er opstillet som funktion af en enkelt inde- eller udeklimaparameter fejle. Endvidere vil de ikke kunne benyttes såfremt der i en given bygning er fastsat dresscode. På trods af, at de adaptive modeller forudsiger den termiske oplevelse i nutidige bygninger godt, er det ikke sikkert at dette er tilfældet for fremtidige bygninger. Jf. Fanger og Toftum [2002] kan man ikke forvente at beskrive noget så fysisk indviklet som menneskets varmebalance og termisk komfort med en simpel førstegrads-ligning.

På baggrund af ovenstående foreslog Fanger og Toftum [2002] en simpel udvidelse til den eksisterende PMV-model. Som beskrevet ovenfor, mener Fanger og Toftum [2002] ikke at virkningen fra den personlige kontrol på den termiske oplevelse totalt set har en effekt på den samlede gruppe af personer i en bygning - kun for de personer, der har direkte adgang til vinduet. Idet PMV-modellen

⁴¹forskel mellem neutral og ønsket temperatur

allerede er delvist adaptiv i og med at denne medtager virkningen fra den adfærdsmæssige adaptivitet i form af justering af beklædningsisolans og aktivitetsniveau, må afvigelsen mellem AMV og PMV i de naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer nødvendigvis tilskrives den psykologiske adaptivitet. Til korrigerende af den oprindelige PMV-model blev der på baggrund heraf indført en forventningsfaktor, der bestemmes på baggrund af den varme periodes varighed samt af forekomsten af luftkonditionerede bygninger i området hvori bygningen er placeret.

PMV_e-modellen er attraktiv idet den benytter det velkendte PMV-indeks, der siden udviklingen har været underlagt mange empiriske undersøgelser. Ulempen herved er blot, at beregningen heraf er forholdsvis tung og kompliceret idet der bl.a. skal foretages iterationer ifm. bestemmelse af overfladetemperaturen på tøjet. Der er dog i DS/EN ISO 7730 [2006] angivet tabellerede værdier af PMV som funktion af varierende operative temperaturer, beklædningsisolanser, aktivitetsniveauer og lufthastigheder. Endvidere mangler der empiriske undersøgelser, der skal fastlægge forventningsfaktoren for et bredt spektrum af bygninger. Indtil disse er foretaget, kan forventningsfaktoren fastlægges skønsmæssigt.

Et af kritikpunkterne af disse adaptive modeller er (ikke PMV_e), at de udelukkende tager hensyn til en parameter (inde- eller udetemperatur), og således ikke er baseret på andre klimatiske parametre såsom lufthastighed og luftfugtighed, hvilke har en vel anerkendt indflydelse på den termiske komfort og endvidere ej heller er afhængige af hhv. aktivitetsniveau eller beklædningsisolans [Fanger, 1972; Fanger og Toftum, 2002]. I diskussionen af dette præsenteres følgende tabel 4.24, der viser korrelationskoefficienten, r^{42} , mellem den termiske komfortvotering og forskellige termiske indicier.

Tabel 4.24: Korrelation, r , mellem termisk komfortvotering (TKV) og forskellige termiske indicier. Meta-analyse af hhv. de Dear [1998] og Nicol og McCartney [2001] (efter Humphreys et al. [2007])

RP-884						
	TKV	t_a	t_{op}	ET*	SET	PMV
TKV	1	0,514	0,515	0,507	0,430	0,462
t_a	0,514	1	0,996	0,980	0,776	0,834
t_{op}	0,515	0,996	1	0,985	0,776	0,834
ET*	0,507	0,980	0,985	1	0,783	0,827
SET	0,430	0,776	0,776	0,783	1	0,931
PMV	0,462	0,834	0,834	0,827	0,931	1

SCATs						
	TKV	t_a	t_{op}	ET*	SET	PMV
TKV	1	0,352	0,333	0,319	0,200	0,249
t_a	0,352	1	0,968	0,912	0,320	0,442
t_{op}	0,333	0,968	1	0,952	0,371	0,488
ET*	0,319	0,912	0,952	1	0,410	0,489
SET	0,200	0,320	0,371	0,410	1	0,848
PMV	0,249	0,442	0,488	0,489	0,848	1

Af tabel 4.24 fremgår det, at den største korrelation med TKV forekommer med hhv. indelufttemperaturen t_a og den operative indetemperatur t_{op} , og korrelationen mellem TKV og PMV næsten den

⁴²Pearsons korrelationskoefficient

dårligste i begge tilfælde. Ifølge tabel 4.24 er det således ikke en forbedring af medtage virkningen fra samtlige fire indeklimaparametre og de to personlige parametre, hvilket er tilfældet med PMV-modellen - det er snarere en forværring. Humphreys et al. [2007] har dog desværre ikke foretaget en regressionsanalyse af korrelationen mellem TKV og udelufttemperaturen - såvel middel som løbende middel. Dette ville være mere interessant end de ovenstående, idet de adaptive modeller først og fremmest bygger på disse.

Efter denne gennemgang og diskussion af de enkelte modeller, må der nødvendigvis drages en konklusion for det videre forløb i forbindelse med muligheden for brugen af de enkelte modeller for estimering af termisk komfort. Modellerne i RP-1161-projektet ses der helt bort fra, idet det empiriske grundlag herfor kun kan give anledning hertil. Resultaterne heri kan, som før nævnt, kun benyttes til at give en indikation om forekomsten af den adaptive adfærd. De resterende modeller bygger på et relativt stort empirisk grundlag, men som diskuteret ovenfor, er gyldighedsintervallerne for de enkelte modeller meget begrænsede. Der vil som beskrevet forekomme situationer, hvor hhv. middel-udelufttemperaturen eller den løbende middel-udetemperatur er udenfor gyldighedsområdet - hovedsageligt i tempererede og kolde klimaer. De adaptive modeller kan således ikke erstatte de eksisterende metoder til evaluering af det termiske indeklima, og det må således konstateres, at status for den nuværende forskning indenfor området termisk komfort endnu ikke tilbyder alternativer til de allerede benyttede metoder, der er præcise nok. En implementering af de enkelte modeller vil således kun kunne være på informativ basis. Her kan det nævnes, at den Hollandske ATG-metode allerede benyttes som projekteringskriterie, til fordel for PMV-modellen. De adaptive temperaturgrænser i nuværende form tillader ikke overskridelser af de enkelte grænser⁴³, men simuleringer har påvist en nødvendighed heraf, da det i modsatte tilfælde vil føre til store kølebehov⁴⁴.

Adaptiv kontrolalgoritme

I SCATs-projektet blev der endvidere udviklet en adaptiv kontrolalgoritme. Formålet med denne er at styre setpunktet for indetemperaturen beregnet efter en algoritme med den løbende middel-udetemperatur som indgangsparameter. Gennem computersimuleringer blev det vist, at det energimæssige besparelespotentialer ved implementeringen er stort, og uden af niveauet for termisk diskomfort blev forringet. Endvidere er en implementering heraf forholdsvis enkel - ikke blot i konkrete bygninger, men også i forbindelse med simuleringer i TBS-programmer. Senere i afsnit 9.2 vil mulighederne for implementering af den adaptive kontrolalgoritme i TBS-programmet BSim blive præsenteret og diskuteret.

4.5 OPSUMMERING OG DISKUSSION AF MODELLER FOR TIDSLIG VARIATION AF INDGÅENDE PARAMETRE

I afsnit 4.2 blev forskellige modeller for tidslig variation af hhv. beklædningsisolans, aktivitetsniveau og lufthastighed præsenteret. Nærværende afsnit opsummerer resultaterne præsenteret i dette foregående afsnit med henblik på vurdering af validiteten for de enkelte modeller samt muligheden for implementering i ydeevneindikatoren.

⁴³Overskrides f.eks. grænsen for 90% termisk accept karakteriseres bygningen efter 80% termisk accept

⁴⁴Se evt. afsnit 4.1.5

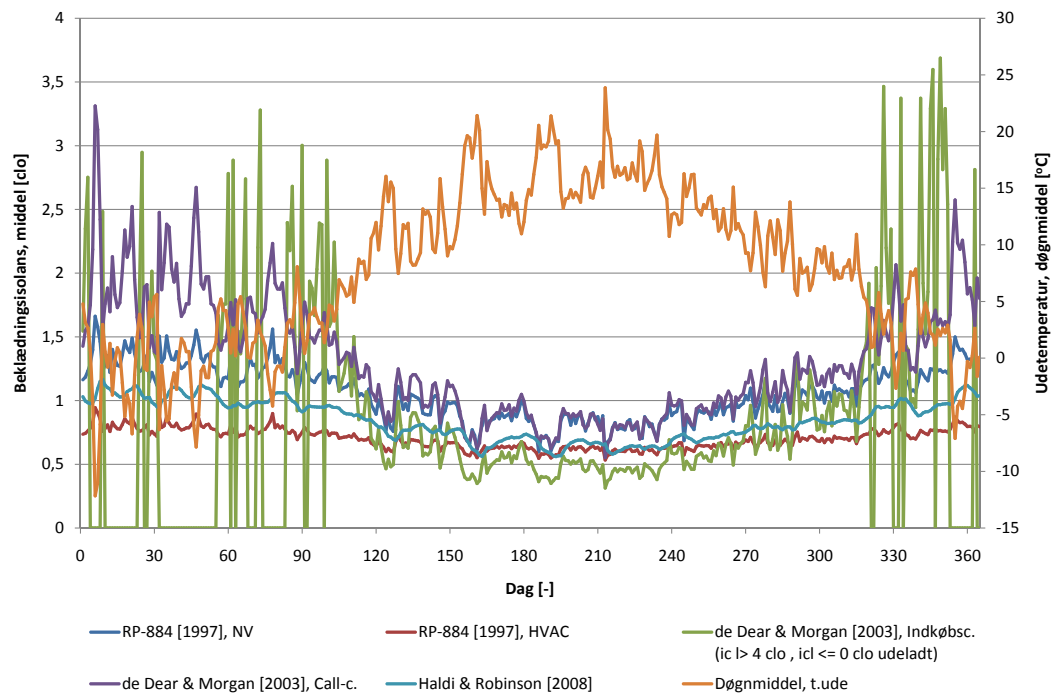
Beklædningsisolans

Beklædningsisolansen er ikke kun korreleret med indeklimaet, men i høj grad også med udeklimaet. I det ovenstående er der præsenteret dynamiske modeller for estimering af beklædningsisolansen som funktion af såvel middel operativ indetemperatur og middel effektiv udetemperatur. Følgende tabel opsummerer de fundne modeller.

Tabel 4.25: Oversigt over modeller for estimering af dynamisk beklædningsisolans.

		Model for beklædningsisolans	Formelreference
RP-884	HVAC-bygninger	$I_{cl,HVAC,topm} = 1,73 - 0,04 \cdot t_{op,m}$	(4.24)
		$I_{cl,HVAC,ETm} = 0,9343 \cdot e^{-0,0127 \cdot ET_m^*}$	(4.26)
	NV-bygninger	$I_{cl,NV,topm} = 2,08 - 0,05 \cdot t_{op,m}$	(4.25)
		$I_{cl,NV,ETm} = 1,44 - 0,03 \cdot ET_m^*$	(4.27)
de Dear og Morgan [2003]	Indkøbscenter	$I_{cl,indk.} = 7,3048 \cdot t_{mut}^{-0,9922}$	(4.28a)
		$I_{cl,m} = 1,15 - 0,0164 \cdot (t_{mut,x-1}) - 0,0178 \cdot (t_{max,x})$	(4.29)
	Call-center	$I_{cl,call} = 1,81 \cdot e^{-0,0497 \cdot t_{mut}}$	(4.28b)
Haldi og Robinson [2008]	Kontorbygninger	$I_{cl,m} = -0,0236 \cdot T_{rm} + 1,0275$	(4.30)
$I_{cl,HVAC,topm}$	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af $t_{op,m}$, HVAC-bygninger		[clo]
$I_{cl,NV,topm}$	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af $t_{op,m}$, NV-bygninger		[clo]
$I_{cl,HVAC,ETm}$	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af ET_m^* , HVAC-bygninger		[clo]
$I_{cl,NV,ETm}$	Beklædn.isolans (incl. stol) som fkt. af ET_m^* , NV-bygninger		[clo]
$I_{cl,indk.}$	Beklædningsisolans, indkøbscenter-data		[clo]
$I_{cl,call}$	Beklædningsisolans, call center-data		[clo]
$I_{cl,m}$	Middelbeklædningsisolans		[clo]
$t_{op,m}$	Middel operativ indetemperatur (for rummet)		[°C]
ET_m^*	Middel af effektiv udetemperatur målt kl. 6.00 og 15.00, beregnet efter (3.2)		[°C]
T_{rm}	Løbende middel-udetemperatur beregnet efter (2.5) og (2.7)		[°C]
t_{mut}	Middeludelufttemperatur		[°C]
$t_{mut,x-1}$	Gårsdagens observerede middeludelufttemperatur		[°C]
$t_{max,x}$	Maksimum forudsagt udelufttemperatur for nuværende		[°C]

I følgende figur 4.35 foretages en sammenligning mellem den enkelte modeller på baggrund af udeklimadata fra det danske DRY. For modellen opstillet af de Dear og Morgan [2003] for indkøbscentret, har det været nødvendigt at begrænse resultaterne til $0clo < I_{cl} < 4clo$.

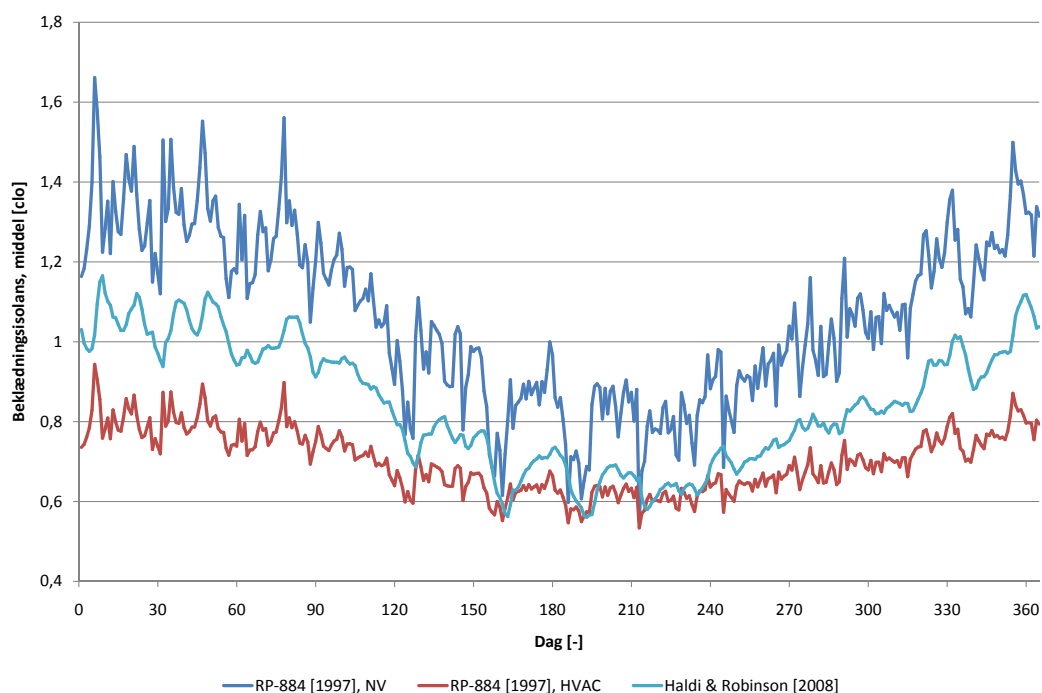


Figur 4.35: Sammenligning mellem modellerne for estimering af dynamisk beklædningsisolans beregnet på baggrund af dansk DRY. Endvidere er døgnmiddel-udetemperaturen afbildet

Som det fremgår af figur 4.35, viser modellerne fra studierne af de Dear og Morgan [2003] (ligning (4.28a) og (4.28b)) stor usikkerhed ved estimering af beklædningsisolans ved lave udetemperaturer, hvilket højst sandsynligt er en direkte konsekvens af det svage empiriske grundlag, samt det faktum at modellen er opstillet på baggrund af målinger og registreringer i varme klimaer i en varm periode. Modellerne opstillet af de Dear et al. [1997] for hhv. HVAC- og NV-bygninger er også opstillet for varme klimaer, men omfatter data over en længere periode - dvs. også indeholdende lavere middeltemperaturer. På baggrund af ovenstående diskussion vedr. validiteten af forsøgene foretaget af de Dear og Morgan [2003] samt netop beskrevne sammenligning med de resterende modeller, vælges det at forkaste disse to modeller.

I følgende figur 4.36 vises udelukkende modellerne opstillet af hhv. de Dear et al. [1997] og Haldi og Robinson [2008].

4.5 Opsummering og diskussion af modeller for tidlig variation af indgående parametre



Figur 4.36: Sammenligning mellem modellerne fra projektet RP-884 ([de Dear et al., 1997]) og modellen opstillet af Haldi og Robinson [2008]

Af figur 4.36 ses det, at RP-884-modellen for HVAC-bygninger ligger med en gennemsnitlig beklædningsisolans om sommeren hhv. vinteren på ca. 0,65 clo og 0,75 clo, og for modellen for NV-bygninger på ca. 0,9 clo og 1,2 clo. Midt imellem de to ligger modellen af Haldi og Robinson [2008], der angiver et beklædningsniveau i intervallet mellem 0,7 clo til 0,9 clo i gennemsnit. Jf. DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks C, tabel C.1] svarer en beklædnings sammensætning af: undertøj, skjorte, bukser, sokker og sko - dvs. en typisk hverdagsbeklædning for en kontoransat til 0,7 clo. Endvidere angiver DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks A.4] som eksempel på designkriterier at middelbeklædningsisolansen om sommeren (kølesæsonen) kan sættes til 0,5 clo og om vinteren (opvarmningssæsonen) til 1,0 clo. Beklædning med isolanser på hhv. 0,5 og 1,0 clo, kan f.eks. være:

- 0,5 clo: Undertøj, kortærmet skjorte, lette bukser, lette strømper og sko
- 1,0 clo: Undertøj, skjorte, jakke/bluse, bukser, strømper og sko

På baggrund af figur 4.36 kan det således ses, at modellen af Haldi og Robinson [2008] beskrevet ved ligning (4.30) er bedst til estimering af dynamisk beklædningsisolans ift. de ovennævnte beklædningsisolanser på hhv. 0,5 og 1,0 clo, hvilke er typiske for kontorer i hhv. sommer- og vintersæsonen jf. DS/EN ISO 7730 [2006].

Endelig blev det ved computersimuleringer vist, at det energimæssige besparelsespotentiale er stort såfremt der tillades fri variation af beklædningen. Sammenlignet med en bygning med krav til beklædningen (dress code), ville energireduktionen i form af køling og varme ved fri justering af beklædningen være 41%.

Aktivitetsniveau

For variationen af aktivitetsniveauet som funktion af det termiske indeklima, har Fanger og Toftum [2002] på baggrund af udvalgte⁴⁵ data fra de Dear [1998] foretaget undersøgelser heraf. Resultaterne viste en nedjustering af metabolismen på 6,7% for hver skalaenhed afvigelse fra "neutral". I afsnit 4.2.2 blev indflydelsen fra denne korrigerende undersøgelse undersøgt. Tabel 4.17 samt figur 4.32 viste en minimal indflydelse på PPD-værdien, der i realiteten mere eller mindre kan ses bort fra. Endvidere var undersøgelserne foretaget i naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer, hvor de fremherskende temperaturer i bygningerne må forventes højere end dem der forekommer i f.eks. tempererede klimaer. Som følge heraf, må nedjusteringen af aktivitetsniveauet i bygninger i f.eks. den tempererede eller koldere klimazone(-er) forventes mindre. Modellen for nedjustering af aktivitetsniveauet givet ved ligning (4.31) vil således ikke have en nævneværdig betydning, og det vælges således at se bort fra denne.

Lufthastighed

Undersøgelser af korrelationen mellem den gennemsnitlige lufthastighed og hhv. middel operative indetemperatur og middel effektiv udetemperatur foretaget i RP-884-projektet viste ikke stor korrelation imellem disse. I de naturligt ventilerede bygninger, var det kun ca. halvdelen af ændringerne i middellufthastigheden, der kunne tilskrives ændringer i hhv. middel operativ indetemperatur eller middel effektiv udetemperatur. For HVAC-bygningerne var korrelationen langt mindre. Som tidligere beskrevet i afsnit 4.2.3 vælges det at se helt bort fra disse modeller til estimering af gennemsnitlig lufthastighed i et rum.

⁴⁵kun naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer

Indeklima og produktivitet

5

I nedenstående afsnit vil forskellige indeklimaparametres indflydelse på produktiviteten og menneskers præstationsevne blive beskrevet og efterfølgende diskuteret. Dette er gjort med henblik på at kunne finde metoder til, at beskrive de kvantitative relationer mellem indeklimaet og produktiviteten, i et ønske om at kunne benytte disse i et senere udviklet værktøj.

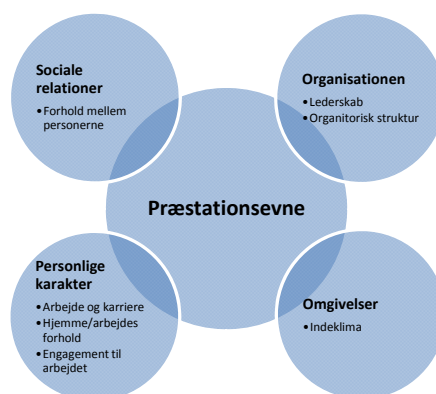
5.1 INDLEDNING

Gennem de senere års forskningsarbejder og studier har det vist sig, at indeklimaet på kontoret har stor indflydelse på menneskers helbred og mentale præstationsevne. Det har desuden vist sig at de økonomiske fordele ved at forbedre indeklimaet kan være langt større end den investering det vil koste at udfører dette. Dårlig luftkvalitet nedsætter menneskers præstationsevne og øger hyppigheden af SBS-symptomer. De økonomiske konsekvenser af et middelmådigt indeklima kan være omfattende og skønnes i Danmark årligt at udgøre et tocifret milliardbeløb, når nedsat produktivitet, sygefravær og udgifter til sundhedsvæsen medtages. Nogle beregninger har endda vist at omkostningerne ved et dårligt indeklima i en specifik bygning er højere end energi omkostningerne til opvarmning og ventilation for den samme bygning. [Roelofsen, 2002; Wargocki et al., 2006]

Indtil nu har det været normalt for bygningsejerne at mindske bygningsomkostningerne ved opførelse og drift, for at i sidste ende at tjene penge. Hvilket selvfølgelig i sidste ende måske har medført en forværring af indeklimaet. Det har ligeledes indtil nu ikke været muligt for bygherren at tage helbred, sygefravær og tabt produktivitet, som følge af dårligt indeklima, med i omkostninger af bygningen. Der er derfor tydeligvis et ønske om nogle redskaber eller modeller til vurdering af det økonomiske udbytte af et forbedret indeklima, i form af helbredet og præstationen, i forhold til den merinvestering det vil være. Brugen af sådanne modeller vil forventes at forbedre indeklimaet, helbredet og produktiviteten i fremtidige bygninger. [Wargocki et al., 2006]

5.2 INDEKLIMAETS PÅVIRKNING AF MENNESKET

Personers individuelle præstationsevne på jobbet, og til dels også i hjemmet, afhænger af flere forskellige parametre som arbejdsmiljø, motivationen samt muligheden for at udføre arbejdet. Figur 5.1 opsummerer de fleste af de påvirkninger der kan være på menneskers mentale præstationsevne.



Figur 5.1: Figuren viser nogle af de faktorer der påvirker menneskers mentale præstations-evne på arbejdspladsen [Wargocki et al., 2006]

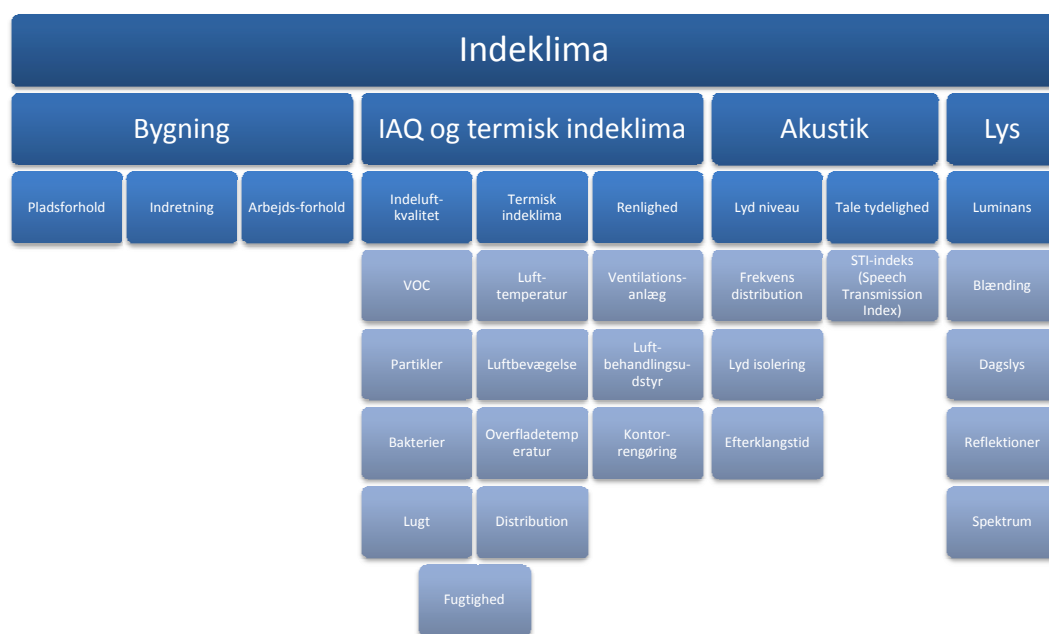
Brugernes tilfredshed med arbejdsmiljøet på kontoret indbefatter indeklimaet (lufttemperatur, støj, lys, etc.), serviceområder (cafeteria, styrkecenter, postomdeling, etc.) samt infrastrukturen af bygningen (arbejdspladsens indretning, landskabet omkring bygning, etc.). Desuden er der lavet undersøgelser af, at det psyko-sociale miljø og brugernes opfattelse af arbejdsmiljøet er lige vigtige for personerne i bygningen [Wargocki et al., 2006].

Gennem tiderne er der gjort mange forsøg på at finde en sammenhæng mellem indeklima og brugernes helbred, men der vides stadigvæk ikke tilstrækkeligt omkring indeklimaets påvirkning af menneskers velvære, de ansattes præstationsevne og produktivitet. Dette skyldes at mange af de omtalte parametre påvirker mennesker enkeltvis og selvfølgelig også samtidigt.

Helbredsproblemer og general utilfredshed med indeklima kvaliteten (i det følgende benævnt IEQ¹) kan resultere i reduceret præstationsevne og tabt produktivitets fortjeneste. Først og fremmest er der i yderste konsekvens tabet af arbejds år som følge af for tidlig død blandt medarbejderne, og derefter tab ved forøget fravær i perioder af forskellige længder og til sidst tabet ved langt fra optimal mental præstationsevne.

Af nedenstående figur 5.2 er de mange forskellige parametre der påvirker menneskers opfattelse af indeklima kvaliteten (IEQ) vist.

¹Indoor Environmental Quality



Figur 5.2: Parametre der er inkluderet i definitionen af brugernes opfattelse af indeklime kvaliteten [Wargocki et al., 2006]

5.3 PRODUKTIVITETENS INDFLYDELSE

Produktivitet er svært at beskrive og defineres forskelligt alt efter arbejds område, men produktivitet skal ikke forveksles med menneskers individuelle præstationsevne. I princippet er produktivitet et relativt forhold mellem output og input. Det kan derfor blive forbedret ved at reducere input-parameteren (omkostninger) og/eller ved at øge output-parameteren. Produktivitet er ofte opfattet som menneskers evne til at forøge deres produktion (output) ved kvantitet og/eller kvalitet af produktet eller den service de yder [Wyon, 2004; Wargocki et al., 2006]. Ligeledes hvilken indeklime parametre der reducerer den individuelle præstationsevne (kvantitet eller kvalitet) vil resultere i et forøget fravær og/eller reduceret omsætning. Dette kan være mere omkostningsbehæftet for organisationen end de omkostninger der vil være forbundet ved en mer investering for at opnå et bedre indeklime. Konsekvensen af et dårligt indeklime vil være en lavere produktivitet både med hensyn til en reduceret indtægt og øget omkostninger for firmaet. Produktivitet er vigtig, men ikke den eneste faktorer der påvirker indtjeningen i et firma, som f.eks. også er påvirket af markedssituationen.

Ud over det fysiske arbejdsmiljø i en bygning er der også andre faktorer som kan have en positiv eller negativ effekt på menneskers mentale præstationsevne som selvfølgelig også vil have en betydning for produktiviteten. Disse faktorer omfatter områder som problemer på hjemme fronten, personlige forhold, etc. som også påvirker menneskers præstationsevne på arbejdet. Disse faktorer er dog udenfor det område som firmaet/organisationen kan kontrollere og derfor ikke omtalt yderligere her. Omvendt er firmaet/ledelsen direkte ansvarlige for arbejdsmiljøet og indeklimeet på arbejdspladsen. Aspekter som job stress og job utilfredshed ligger også inden for firmaets/ledelsens ansvar. Job utilfredshed er relaterede, blandt andet, til motivationen af medarbejderen. Motivationen er en afgørende betydningsfuld faktor med hensyn til arbejderens præstationsevne. Hvis det antages at der er en klar

motivation blandt medarbejderne, hvad er så den relative betydning af indeklimaet på præstations- evnen og produktiviteten? [Roelofsen, 2002]

En måde at vurdere præstationsevnen på er ved brug af Worker Evaluation of Productivity (WEP) også kaldt self-reported performance (oversat til dansk: selv-vurdering af præstationsevnen). WEP er brugt til at undersøge de enkelte medarbejders måde at selv-vurdere deres påvirkning fra omgivelserne (indeklimaet), job tilfredsheden og job stress på deres mentale præstationsevne. Undersøgelserne blev udført på 170 personer i seks kontorbygninger og resultaterne viste at der er en klar relation mellem job stress, job utilfredshed og indeklimaet.

Ud fra medarbejderens votering på en ni-punkts skala af deres egen produktivitet (WEP) samt utilfredsheden med indeklimaet, job stress og job utilfredsheden på en syv-punkts skala blev der udviklet en ligning der beskriver medarbejderens evne til at præstere [Olesen, 2000b; Roelofsen, 2002]. Ud fra studierne er følgende ligning blevet fundet ved regression:

$$WEP = 6,739 - 0,419 \cdot E - 0,164 \cdot JD - 0,048 \cdot JS \quad (5.1)$$

hvor

WEP	=	Worker Evaluation of Productivity
E	=	Utilfredsheden med indeklimaet/arbejdsmiljøet
JD	=	Job Utilfredsheden
JS	=	Job Stress (bl.a. tætbeholdt arbejdsplads)

Det er tydeligt af ovenstående ligning at indeklimaet (E) har en relativ betydelig effekt på produktiviteten i relation til de to andre parametre. Det er ligeledes klart at de ansatte betragter indeklimaet som mere kritisk i forhold til de andre betydende parametre. Hvis ansatte føler at de fysiske og psykologisk forhold påvirker deres produktivitet på arbejdet, så er det vigtigt fordi dette vil også kunne påvirke andre områder af de ansattes arbejde som den mentale præstationsevne og i sidste ende produktiviteten. WEP bruges af forskere og andre som en passende målestok for ansattes produktivitet [Roelofsen, 2002].

De samfundsøkonomiske fordele ved en højere produktivitet, inkludere færre lægeundersøgelser, flere arbejdsdage pga. mindre sygeorlov, bedre præstationsevne på arbejdet, mindre udskiftning af personalet og lavere omkostninger til driften af bygningen pga. færre klager over dårlig IEQ. Det er temmelig simpelt at forstå de økonomiske fordele ved mindre sygeorlov. Derimod den mentale præstationsevne af medarbejderne er mere kompliceret at bestemme, da denne afhænger af flere forskellige aspekter som kvantitet (hastigheden af det udførte arbejde), kvaliteten (antal fejl i arbejdet) og hvor godt en gruppe arbejder sammen. IEQ problemer vil skabe klager og negativ kommunikation mellem medarbejderne, ændre medarbejdernes attitude og i sidste ende påvirke præstationsevnen. Hvis indeklimaproblemerne ikke tages seriøst og der prøves at finde en løsning vil der hurtigt ske konflikter mellem medarbejderne og ledelsen og komplicere løsnings processen, hvilket i sidste ende vil medføre tabt produktivitet [Seppänen, 1999; Wargocki et al., 2006]. Størrelsesorden af denne effekt er dog ikke kendt.

5.3.1 RELATION MELLEM OMKOSTNINGER OG PRODUKTIVITET

For at kunne illustrere sammenhængen mellem forskellige parametres indflydelse på omkostningerne og fortjenesten kan der opstilles en simpel ligning der inkluderer de mest betydningsfulde omkostninger og ydelser der er forbundet med bygnings drift, vedligeholdelse og styring. I denne sammenhæng er det vigtigt at se på årlige udgifter og ikke kun betragte investerings omkostningerne, for eksempel kan sammenhængen mellem udgifter og indtægter udtrykkes efter nedenstående ligning [Hanssen, 1997; Wargocki et al., 2006]:

$$I \cdot a + E + D + R + L = O - F \quad (5.2)$$

hvor

- I = investerings omkostningerne (bygningen, møbler, udstyr og installationer)
- a = annuitetsfaktor (tilbagebetalings faktor) $a = \frac{r}{(1+r)^n - 1} + r$
- E = årlige energiudgifter
- D = årlige udgifter til drift og vedligeholdelse
- R = årlige udgifter til rengøring
- L = årlige udgifter til løn
- O = årlig omsætning fra produktionen (produkter, honorar, etc.)
- F = årlig fortjeneste

Ligning (5.2) kan omskrives til at bestemme sammenhængen mellem udgifter og fortjeneste ved at introducere ændringen i kvantiteten i forhold til reference situationen (kaldet Δ), det vil sige den nødvendige produktivitetsændring/-stigning, i form af øget omsætning, for at energien, driften eller investeringen er rentabel. Det forudsættes at der ikke vil forekomme ændringer i lønudgifter ($\Delta L = 0$) samt fortjenesten ($\Delta F = 0$) og at hver medarbejder bruger antal y m² af bygnings samlet areal samt bygningens samlede omkostninger per m² sættes til x (kr/m²). Således opstilles ligningen for en gevinst situation:

$$\Delta x \cdot a + \Delta E + \Delta D + \Delta R \leq \frac{\Delta O}{y} \quad (5.3)$$

$$(\Delta x \cdot a + \Delta E + \Delta D + \Delta R \leq \frac{\Delta O}{y}) \cdot \frac{1}{x \cdot a} \quad (5.4)$$

$$\frac{\Delta x}{x} + \frac{E}{a \cdot x} \cdot \frac{\Delta E}{E} + \frac{D}{a \cdot x} \cdot \frac{\Delta D}{D} + \frac{R}{a \cdot x} \cdot \frac{\Delta R}{R} \leq \frac{O}{a \cdot x \cdot y} \cdot \frac{\Delta O}{O} \quad (5.5)$$

Ovenstående ligning (5.5) kan bruges i en sensitivitetsanalyse for at demonstrere den relative vigtighed af de enkelte parametre. Som et eksempel kan der opstilles følgende værdier for parametrene (omregnet værdier fra Wargocki et al. [2006]):

5.3 Produktivitetens indflydelse

a	=	0,11 (7% rente i 15 år)
x	=	10.500 kr/m ²
y	=	20 m ² /medarbejder
D	=	262,5 kr/m ²
E	=	87,5 kr/m ²
R	=	131,25 kr/m ²
I	=	350.000 kr/medarbejder

De valgte ovenfor stående værdier til beregningseksemplet er taget fra Wargocki et al. [2006], dog omregnet til danske kroner. Herefter kan de ovenstående værdier indsættes i ligning (5.5) og bruges til at illustrere vigtigheden af hver enkelt parameter. Det skal bemærkes at de valgte værdier kan være forskellige fra situation til situation, men beregningsprincippet er det samme.

$$\frac{\Delta x}{x} + 0,076 \cdot \frac{\Delta E}{E} + 0,227 \cdot \frac{\Delta D}{D} + 0,114 \cdot \frac{\Delta R}{R} \leq 15,152 \cdot \frac{\Delta O}{O} \quad (5.6)$$

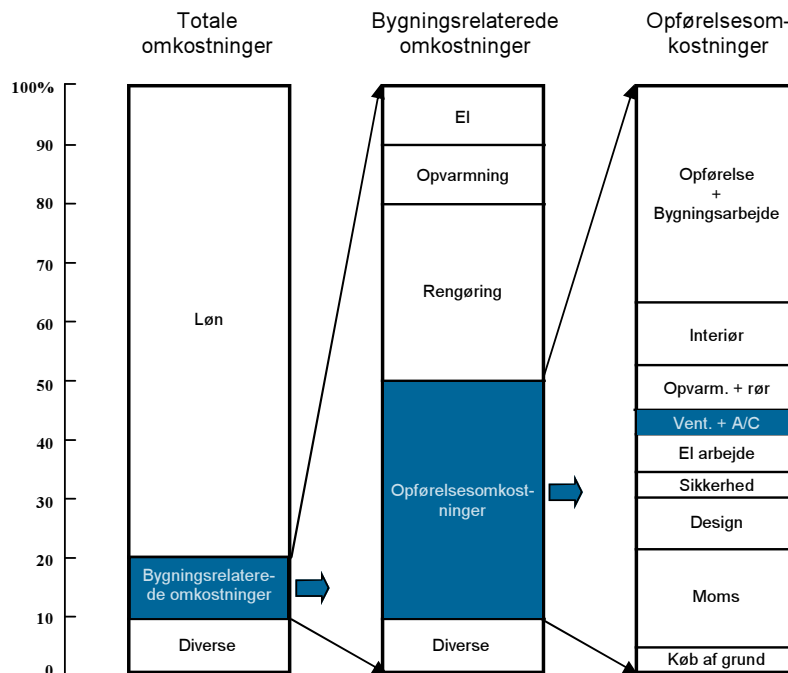
Efterfølgende er det muligt at opdele ligningen for hvert led og se på de enkeltes betydning for produktiviteten, som vist nedenfor:

Tabel 5.1: I nedenstående tabel er ovenstående ligning (5.6) opdelt for hvert led, så det er muligt at vurdere de enkelte parametre hver for sig. Efter [Wargocki et al., 2006]

Parametre	Ligning	Nødvendig produktivetsfortjeneste
Investering	$\Delta x/x \leq 15,152 \cdot (\Delta O/O)$	$(\Delta O/O) \geq 0,0660 \cdot (\Delta x/x)$
Energi	$0,076 \cdot (\Delta E/E) \leq 15,152 \cdot (\Delta O/O)$	$(\Delta O/O) \geq 0,0050 \cdot (\Delta E/E)$
Drift og vedligeholdelse	$0,227 \cdot (\Delta D/D) \leq 15,152 \cdot (\Delta O/O)$	$(\Delta O/O) \geq 0,0150 \cdot (\Delta D/D)$
Rengøring og service	$0,114 \cdot (\Delta R/R) \leq 15,152 \cdot (\Delta O/O)$	$(\Delta O/O) \geq 0,0075 \cdot (\Delta R/R)$

Af ovenstående tabel 5.1 er det herefter muligt at vurdere betydningen af hvert enkelt parametre i forhold til produktiviteten for et firma. Resultaterne viser f.eks. at en 20% stigning i energidgifterne kan modsvares ved en beskedne stigning i produktiviteten på bare 0,1%, det vil sige en forøgelse af produktiviteten på 1,75 dag på et år eller 0,5 minut per dag, når der forudsættes 1750 arbejdstimer/år. Ved en forøgelse af investeringen på 10% kan det bliver betalt af ved en forøget produktivitet på 0,66%, det vil sige 11,6 timer per år eller 3,2 minutter per dag. Ydermere kan ovennævnte procedure også anvendes på drift og vedligeholdelses omkostningerne samt rengøring og service.

Ovenstående forsimplet beregnings procedure viser hvordan små ændringer i produktiviteten er meget vigtig for fortjenesten i et firma. Det fremgår desuden også hvordan en lille ændring i parametrene der har indflydelse på IEQ, kan have omfattende betydning for produktiviteten. Forklaringen skyldes investeringen og opførelse af bygningen og dets udstyr er forholdsvis små sammenlignet med de store udgifter til løn og medarbejder ydelser. Yderligere og nemmere illustreret i figur 5.3.



Figur 5.3: Figuren viser et eksempel på den relative betydning mellem medarbejderlønninger og årlige omkostninger for en kontorbygning. Efter [Wargoeki et al., 2006]

I en anden undersøgelse, lavet af den engelske forening CIBSE², er der udført målinger i kontorbygninger i det Nordlige Amerika, hvor det har vist at medarbejderudgifter er 100 til 200 gange større end energiudgifterne og dermed opvejes ved en forøgelse mellem 0,5% og 1% i produktiviteten. Flere detaljerede oplysninger kan ses i tabel 5.2, som opsummerer resultaterne fra undersøgelsen [CIBSE, 1999; Clements-Croome, 2000].

Tabel 5.2: Sammenligning af energi- og medarbejderudgifter for kontorbygninger i det Nordlige Amerika [CIBSE, 1999]

Udgifter	Rosenfeld	Abdou & Lorsch	EPA	Woods	BOMA
	(1989)	(1994)	(1989)	(1989)	(1988)
Medarbejderudgifter [\$ /m ² /år]	3000	2180	2000	2370	1300
Løbende udgifter til HVAC [\$ /m ² /år]	-	20...100	60	120	29
Energiudgifter [\$ /m ² /år]	15	10...20	20	20	15
Forhold mellem medarbejder- og energiudgifter	200	114...218	100	118	87
Forhold mellem medarbejder- og HVAC-udgifter	-	22...109	34	20	45
Energiudgifter i forhold til produktivitet [%]	0,5	0,5...0,9	1,0	0,9	1,2
Nødv. Produktivitetsforøgelse [min/dag pr. pers]	2,25	2...3,75	4,33	-	5

Tabel 5.2 viser at medarbejderudgifter er mellem 20 og 45 gange større end de løbende omkostninger

²The Chartered Institution of Building Services Engineers

for luftkonditionerede bygninger (HVAC), hvilket indikerer en nødvendig øget produktivitet mellem 2% og 5% for at opveje disse udgifter. En forøgelse af produktiviteten på lige under 10% kan opveje de løbende udgifter og installations omkostningerne forbundet med dette [Clements-Croome, 2000].

5.4 INDEKLIMAETS BETYDNING FOR PRÆSTATIONSEVNEN

Design og styringen (ledelse, HVAC, etc.) af en bygning har stor indflydelse på IEQ og menneskers tilfredshed, hvilket således har en indirekte betydning for produktiviteten. På det sidste er der blevet udført flere og flere undersøgelser af, hvordan IEQ påvirker præstationen på arbejdet, der er dog stadigvæk ikke nok viden omkring emnet endnu og der er brug for flere studier, som også indikeres gennem det gjorte litteraturstudie [Seppänen et al., 2006a,b; Seppänen, 1999; Wyon, 2004; Wargocki et al., 2006]. Dette er til trods for de potentielt store økonomiske fordele der vil være ved et forbedret indeklima i modsætning til merinvesteringen.

Effekten af lufttemperatur, ventilationsmængde, luftkvaliteten, lys, støj og individual kontrol på præstationsevnen er sammenfattede i det følgende. Eftersom lufttemperatur, luftkvalitet og ventilationsmængde har vist sig at have en effekt på SBS-symptomer, er det også forsøgt at sammenholde SBS og præstationsevne. Endvidere er andre faktorerers indvirkning på indeklimaet og korrelationen mellem parametre på præstationsevnen diskuteret i det følgende.

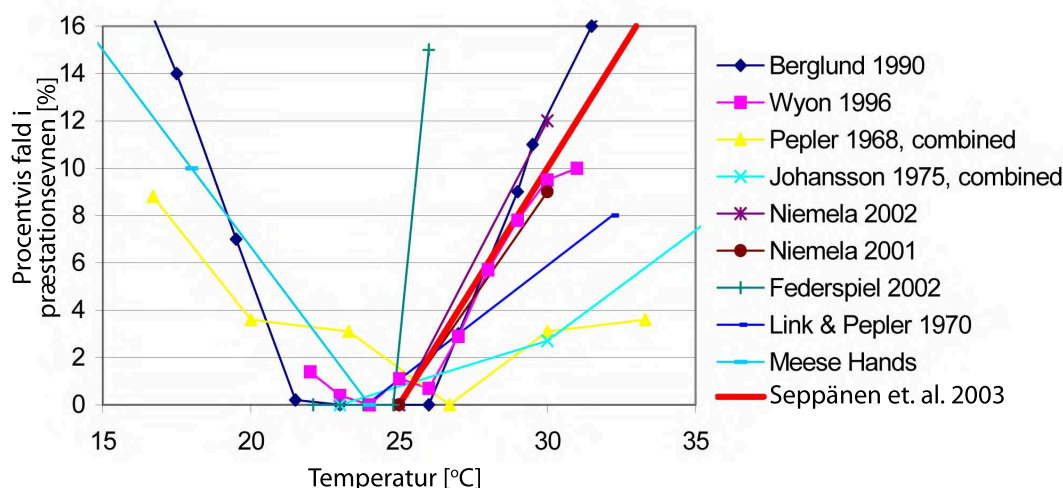
5.4.1 TERMISKE KRITERIER & PRÆSTATIONSEVNE

I mange erhvervsbygninger er de termiske betingelser ikke styret som de skal pga. utilstrækkelig køling, varmekapaciteten, høj intern eller ekstern varmebelastning, store termiske zoner, upassende styring eller design af varmeanlægget, samt andre faktorer [Seppänen et al., 2006a].

Rumlufttemperaturen påvirker menneskers mentale præstationsevne på flere områder [Wargocki et al., 2006]:

- Termisk diskomfort fjerner opmærksomheden fra arbejdet og forøger klager fra medarbejderne
- Varme sløver, forværrer SBS-symptomer og har en negativ effekt på det mentale arbejde
- Kolde omgivelser nedsætter temperaturen i fingrene og har dermed en negativ effekt på færdighederne
- Hurtige temperatursvingninger har den samme effekt på kontorarbejde som en anelse varmere rumtemperatur

Selvom der ikke direkte er klager over de termiske forhold samt de ligger inde for de normalt opstillede grænser kan der i følge Seppänen et al. [2006a] stadig være reduktioner mellem 5 og 15% af præstationsevnen og der kan derfor opnås store besparelse ved forbedringer af indeklimaet. De fleste studier er udført i laboratorier og derfor svært at konkludere en direkte sammenhæng til normalt kontorarbejde. Fisk et al. [2003] har samlet de fleste af de laboratorie studier der er udført omkring lufttemperatur og præstationsevne i figur 5.4.



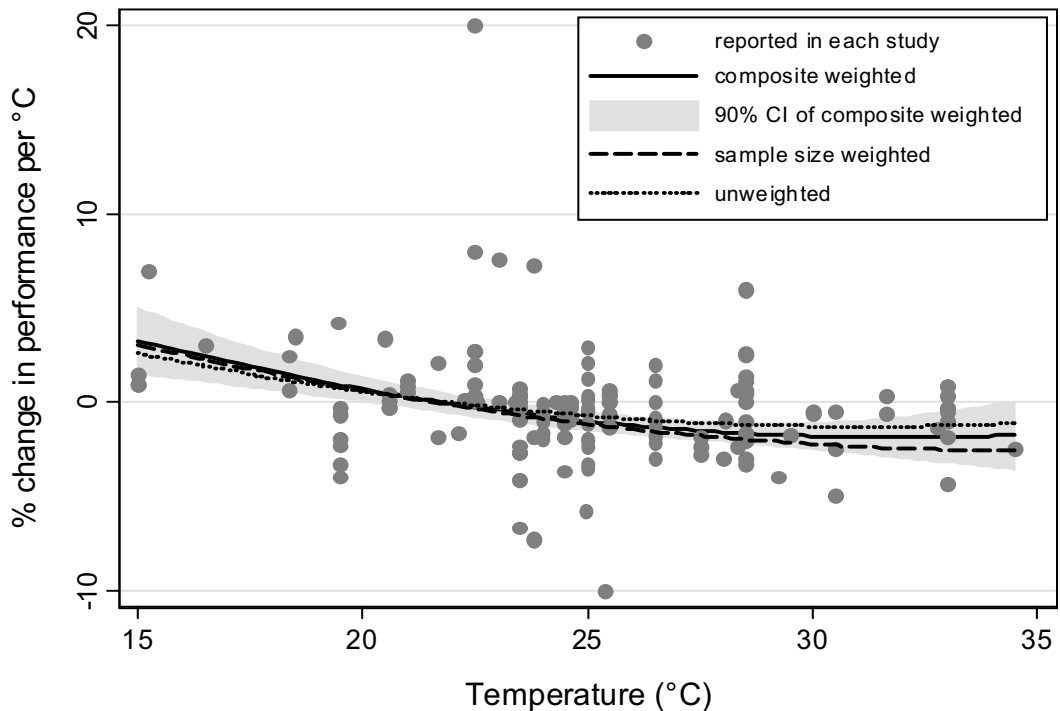
Figur 5.4: Opsummering af de studier der er lavet omkring lufttemperatur mod præstationsevne. [Fisk et al., 2003]

Af figuren ses det at præstationsevnen(/produktiviteten) afhænger af lufttemperaturen i rummet og generelt kan det siges at præstationsevnen forbedres jo nærmere de termiske betingelser kommer den termiske komfort zone (21-25°C). Den nye model er udviklet ved en kombination mellem nogle af de tidligere modeller (Pepler 1996 og Johansson 1975), og Fisk et al. [2003] fandt ud af at præstationsevnen aftager 2% for hver grad lufttemperaturen overstiger 25°C. Det er desuden forudsat at præstationsevnen er uændret, i forhold til maksimal præstation, i temperaturområdet 21 til 25°C. Det har senere hen i andre og nyere studier vist sig at præstationsevnen også variere indenfor komfort zonen (21-25°C). Disse undersøgelser har taget udgangspunkt i et "rigtigt" kontormiljø, call-center, hvor der blev målt på den gennemsnitlige tale tid og report skrivning. Følgende punkter blev konkluderet ud fra undersøgelse, yderligere beskrevet i [Seppänen et al., 2006a; Wargocki et al., 2006; Seppänen, 1999]:

- Arbejdernes præstationsevne var højere, det vil sige den gennemsnitlige samtale-tid var 5-7% lavere når lufttemperaturen var under 25°C i forhold til den solbelastede side af call-centeret [Niemelä et al., 2002]
- Sygeplejersker der skulle give medicinske råd/anbefalinger i et call-center arbejdede 16% langsommere, da de skulle skrive deres rapporter efter samtalen når lufttemperaturen oversteg 25,4°C [Federspiel et al., 2004]
- Arbejderens gennemsnitlige samtale-tid steg med 4,9% når rumtemperaturen blev nedsat 2°C fra 24,5°C ved en normal udelufttilførsel på 10 l/s pr. person.

Baserede på 148 vurderinger af præstationsevnen fra 24 forskellige undersøgelser (call-center, skole og kontor) er der fundet en relation mellem rumtemperaturen og præstationsevnen som vist på figur 5.5 [Seppänen et al., 2006a; Seppänen, 1999]. Disse studier fastsatte præstationsevnen ved at objektivt måle arbejdernes præstation (f.eks. samtale tiden i et call center), præstationsevne ved svære opgaver, præstationsevne ved nemme visuelle opgaver og ved at måle indlæringssevnen. De indsamlede data er herefter blevet normaliserede for at så kunne vise den procentvise ændring af præstationsevnen ved en lufttemperaturændring på 1°C [Wargocki et al., 2006]. Figure 5.5 viser sammenhængen mellem lufttemperaturen og en ændring i præstationsevnen ved en stigning på 1°C i lufttemperaturen

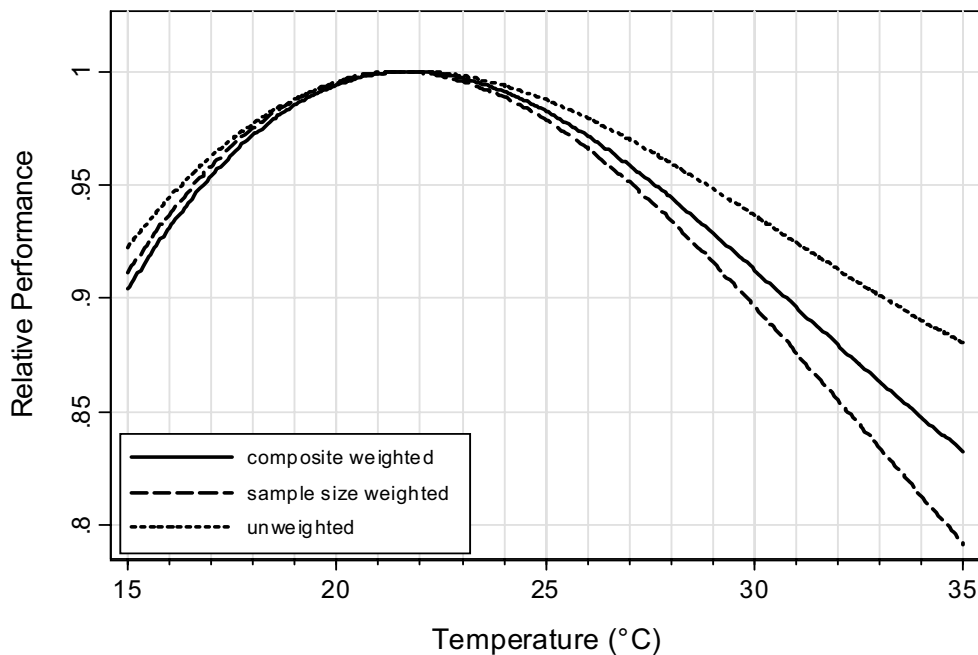
samt et 90% konfidensinterval. Positive værdier indikere en stigning(forbedring) i præstationsevnen med stigende lufttemperaturer, og negative værdier indikere faldende(reduceret) præstationsevne ved stigende lufttemperaturer. Altså præstationsevnen stiger når lufttemperaturen er under 23-24°C og falder når den er over dette niveau. Skæringen med den horizontale akse sker ved en lufttemperatur på 21,75°C.



Figur 5.5: Ændring i præstationsevne ($\Delta P\%$ per $^{\circ}\text{C}$ stigning i lufttemperaturen) i forhold til lufttemperaturen. Positive værdier indikere forbedret præstationsevne og negative værdier betyder forringet præstationsevne ved stigning i lufttemperaturen. [Seppänen et al., 2006a]

Det skraverede område i figur 5.5 repræsenterer 90% konfidensinterval for kurven. Som det kan ses af kurven er konfidensintervallet positivt op til 20°C og negativ for lufttemperaturer over 23°C. Forklaringen er at en stigning i temperaturen op til 21°C er statistisk set forbundet med en betydningsfuld forbedring af præstationsevnen og en lufttemperaturstigning over 24°C er ligeledes statistisk forbundet med en betydningsfuld forværring af præstationsevnen. Dette resultat er i god overensstemmelse med de tidligere konklusioner omkring en uændret præstationsevne i komfort zonen, temperaturområdet 21-25°C [Fisk et al., 2003]. Dog giver denne nye undersøgelse ligeledes en mulighed for at skønne hvordan præstationsevnen variere i området 21-24°C.

Efterfølgende er forholdene i figur 5.5 plottede for præstationsevnen i relation til den maksimale præstationsevne (lufttemperatur på 21,75°C). Af figur 5.6 fremgår det at en reduktion i præstationsevnen med 1% vil ske for hver 1°C ændring (reduktion eller stigning) i rumtemperaturen fra den maksimale reference lufttemperatur på 21,75°C. Det kan f.eks. nævnes at, ved en lufttemperatur på 30°C er præstationsevnen bare 91,1% af den maksimale, det vil sige en reduktion på 8,9%. [Seppänen et al., 2006a; Wargocki et al., 2006; Seppänen, 1999]



Figur 5.6: Relative præstationsevne som en funktion af lufttemperaturen; kurverne er udledt af graferne præsenteret i figur 5.5. Den maksimale præstationsevne er sat lig 1 hvor kurverne i figur 5.5 krydser x-aksen (lufttemperatur på 21.75°C) [Seppänen et al., 2006a]

5.4.2 VENTILATION & PRÆSTATIONSEVNE SAMT DENS INDVIRKNING PÅ SYGDOMSFRAVÆRET

Ventilationsraten varierer betydeligt i og blandt erhvervsbygninger, hvilket bl.a. kan skyldes HVAC-designet, driften af anlægget, antallet af personer, in- og eksfiltrationen etc. Ventilationen er ikke godt styret i de individuelle bygninger pga. mangel på godt måleudstyr og styreegenskaber [Seppänen et al., 2006b].

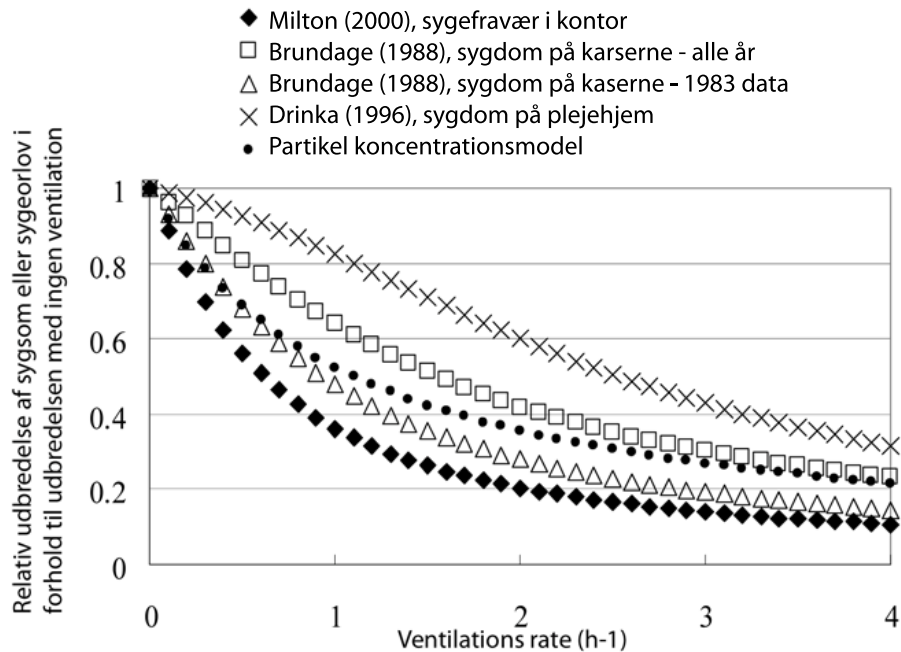
Tidligere studier i USA og Europa har vist store variationer i målte ventilationsrater imellem bygninger men også inde i samme bygning. I en lille andel af de målte bygninger, hovedsageligt skoler, blev der fundet ventilationsrater under de gængse retningslinjer og standard værdier til dimensionering [Seppänen et al., 2006b]. Dette kan skyldes at frisklufttilførelsen har været tilsigtet lav pga. designkriteriet eller muligheden for at spare energi.

Resultatet af høj eller lav ventilationsrate har været kendt længe, hvor en stigning i ventilationsraten sædvanligvis resulterer i bedre indeluftkvalitet og en lavere koncentration af bioeffluenter. I modsætning vil en lavere ventilationsrate generelt medføre højere udbredelse af ugunstige helbredsfølger - indeholdende SBS-symptomer og luftbårne smitsomme sygdomme [Seppänen, 1999].

De nedenstående afsnit opsummerer og diskuterer resultaterne fra flere af de seneste studier omkring ventilations betydning for hhv. sygdomsfraværet og præstationsevnen.

Relation mellem ventilations rate og kortsigtede sygdomsfravær

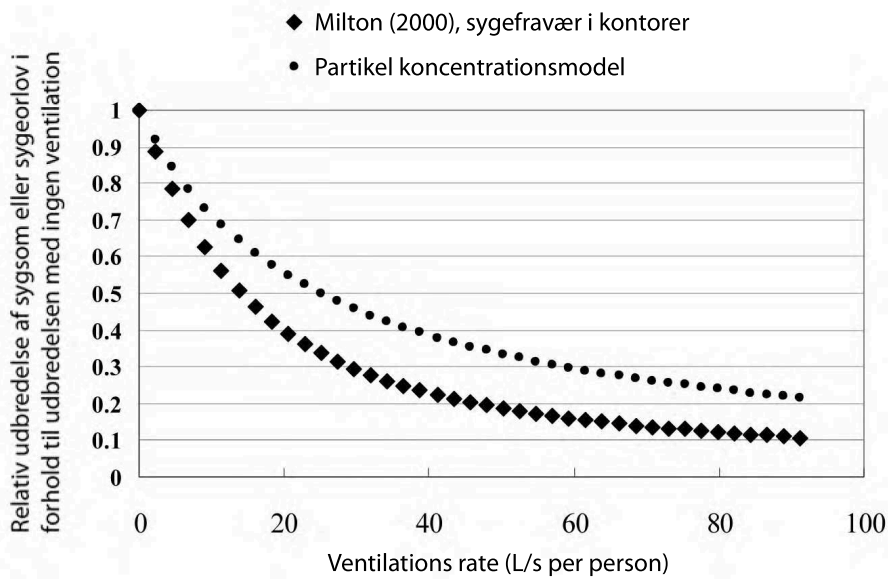
Effekten ved brug af ventilation vil være reduceret inde-koncentration af de generede luftbårne forureningskilder. Denne effekts virkning på de menneskelige følger er blevet opsummeret af Seppänen [1999]; Fisk et al. [2003]; Wargocki et al. [2006] og det blev bla. fundet at udbredelsen af nogle typer af smitsomme åndedræts sygdomme var højere under indeforhold med lavere ventilations rater. I Fisk et al. [2003] blev der præsenteret en kvantitativ relation mellem ventilations rate og kortsigtede sygdomsforløb baseret på feltmålinger, hvor sygeorlov eller det kortsigtede sygefravær var udfaldet, og en teoretisk model for luftbåren transmission af åndedrætsinfektioner. Relationen er vist på nedenstående figur 5.7.



Figur 5.7: Skønnet tendens i sygdom eller sygefravær mod ventilations rate per time. Relativ sygefravær i forhold til udbredelsen uden ventilation. (fra Fisk et al. [2003])

For at illustrere hvordan sygdomme eller nærmere fraværstætheden forudsættes til at variere med ventilationsraten pr. person i en bygning viser figur 5.8 et gen-plot af to af kurverne fra figur 5.7. Der forudsættes i nedenstående figur en befolkningstæthed på 83 m³ pr. person, hvilket er fremkommet ved brug af resultater fra 100 kontorbygninger i US [Wargocki et al., 2006].

Fra et eksempel fra Wargocki et al. [2006] er der taget udgangspunkt i en typisk kontorbygning, hvor den kortsigtede sygefravær-procent er fundet til 2% og et luftskifte på 0,45 h⁻¹ (som rapporteret i Seppänen og Fisk [2005]). Efterfølgende er det muligt at beregne en årlig gennemsnitlige sygefraværstæthed ved både højere og lavere ventilations rater. Ved brug af en middel-kurve fra figur 5.7 (dvs. baseret på data fra Brundage et al. (1988), data fra alle år) vil der ved, at forøge det gennemsnitlige luftskifte fra 0,45 h⁻¹ til 1 h⁻¹ ske en formindskelse af den relative udbredelse af sygefraværet fra 0,8 til 0,6. Dette korresponderer til en reduktion fra i gennemsnit 5 sygedage/år (2% sygefraværstæthed) til 3,75 sygedage/år (0,6/0,8 · 2% = 1,5% sygefraværstæthed).



Figur 5.8: Skønnet tendens i sygdom eller sygefravær mod ventilationsrate pr. person. Relativ sygefravær i forhold til udbredelsen uden ventilation. (fra Fisk et al. [2003])

Ved brug af de ovenfor præsenteret relationer mellem sygefravær og ventilations rate, vil der ved en grov estimering være en 10% reduktion i sygefraværet ved at fordoble ventilations raten. Effekten af en øget ventilations rate vil være forholdsvis stor, men vil også forøge energiforbruget væsentligt. Figur 5.7 og 5.8 kan altså bruges til estimering af effekten ved at ændre ventilations raten i en bygning.

Ifølge Seppänen og Fisk [2005] er der mange kilder til usikkerhed i modellen der relaterer ventilations rate med sygefraværet, den vigtigste parametre er de begrænsede empiriske data der bruges til kalibrering og evaluering af modellen. Yderligere er der usikkerheder omkring størrelsen og afsætningsraten af de smitsomme partikler i en typisk bygning, men også det naturlige tab af de levedygtige luftbårne smitsomme partikler er heller ikke medtaget i modellen pga. den manglede information omkring overlevelsestiden på de luftbårne virusser og bakterier der forårsager åndedrætssygdommene. Hvis den nødvendige information var tilgængelig ville det uden problemer være muligt at inkorporere levedygtigheden ligesom filtrering og afsætningstab er inkorporeret i modellen.

Modtageligheden overfor en infektion vil variere med alder, helbred og immunforsvaret af personerne i bygningen, og det vil højst sandsynligt være disse og andre faktorer, såsom den varierende tid som personerne opholder sig i de forskellige bygninger, som delvist forklare forskelligheden i kurverne på figur 5.7. Til trods for disse forholdsvis store kilder af usikkerhed vil brugen af relationen mellem ventilationsrate og sygefravær give mulighed for et bedre værktøj til beslutning af bygnings design og driften end at helt se bort fra dette problem [Wargocki et al., 2006]

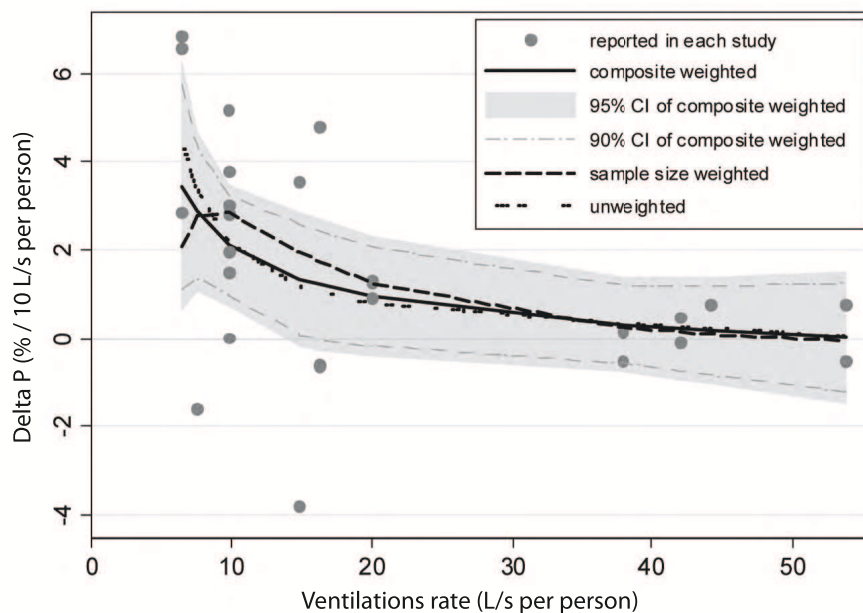
Relation mellem ventilations rate og præstationsevne

Ventilation har en indirekte indflydelse på produktiviteten gennem sin indvirkning på den kortsigtede sygdomsfravær pga. smitsomme sygdomme, men ventilationsraten vil også have en direkte indflydelse. For at fastsætte relationen mellem ventilations rate og præstationsevne er der brugt data fra fem forskellige relevante studier (snakke-tid i call-centre) og resultater fra to laboratorie undersøgelser

(skrivning, addition etc.) [Seppänen og Fisk, 2005].

Jf. Wargocki et al. [2006] er resultaterne fra studierne normaliseret ved at beregne ændringen i præstationsevnen per stigning af 10 l/s/person i ventilationsraten. På denne måde er den relative stigning i præstationsevnen beregnet ved, at fratragke præstationsevnen ved lavere ventilationsrater fra præstationsevnen ved højere ventilationsrater og dividere differencen med præstationsevnen for den lavere ventilationsrate. Denne relative ændring i præstationsevne er yderligere divideret med differencen mellem de to ventilationsrater i l/s/person og efterfølgende multipliceret med 10 l/s/person og konverteret til procent. Resultatet repræsenterer således ændringen i præstationsevne per stigning i ventilationsraten på 10 l/s pr. person.

Normaliseret korrigeret ændring i produktiviteten (%) som funktion af ventilationsraten, uvægtede, vægtede ved prøve størrelsen og sammensat vægtning er vist i nedenstående figur 5.9. Figur 5.9 viser ligeledes 90% og 95% konfidens interval for den sammensatte model (composite weighted).



Figur 5.9: Ændring i normaliseret tilpasset præstationsevne (Delta P%) per 10 l/s pr. person som funktion af en ventilationsrate - kurverne er fremkommet ved en brøk-polynomisk regressions model. [Seppänen og Fisk, 2005]

Ovenstående figur 5.9 indikere at præstationsevnen vil stige op til en ventilationsrate på 40 l/s/person, men modellen er dog kun statistisk signifikant for ventilationsrater op til ca. 15 l/s/person for et 95% konfidens interval og op til ca. 17 l/s/person for et 90% konfidens interval. Forholdet mellem præstationsevne og ventilationsrate (illustreret i figur 5.9), viser at ved stigende ventilationsrater vil der være en mindre og mindre forbedring i præstationsevnen - dvs. den positive effekt af øget ventilation er større når begyndelses ventilationsraten er lav og dermed i modsætning svagere når begyndelses ventilationsraten er høj.

Kurverne i figur 5.9 viser den procentvise ændring i præstationsevnen per 10 l/s/person i ventilation-

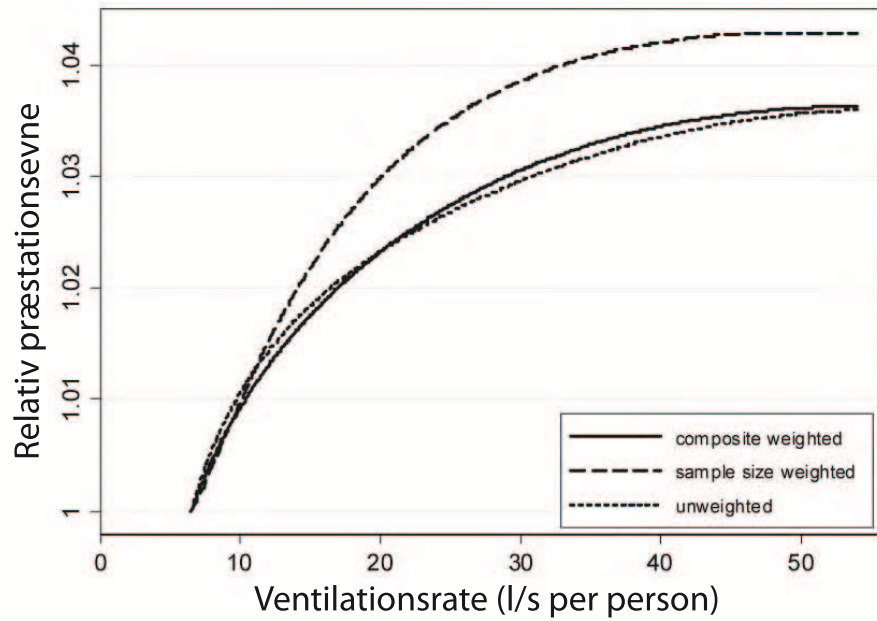
sraten. Den følgende ligning (5.7) kan bruges til at evaluere forholdet i præstationsevne på baggrund af to forskellige ventilationsrater [Seppänen et al., 2006b]. Når ventilationsraten stiger fra V_0 til V_1 vil forholdet i præstationsevnen gå fra V_1 ($P(V_1)$) til det ved V_0 ($P(V_0)$):

$$\frac{P(V_1)}{P(V_0)} = \exp\left[0,1 \cdot \int_{V_0}^{V_1} \hat{\lambda}(v) dv\right] \quad (5.7)$$

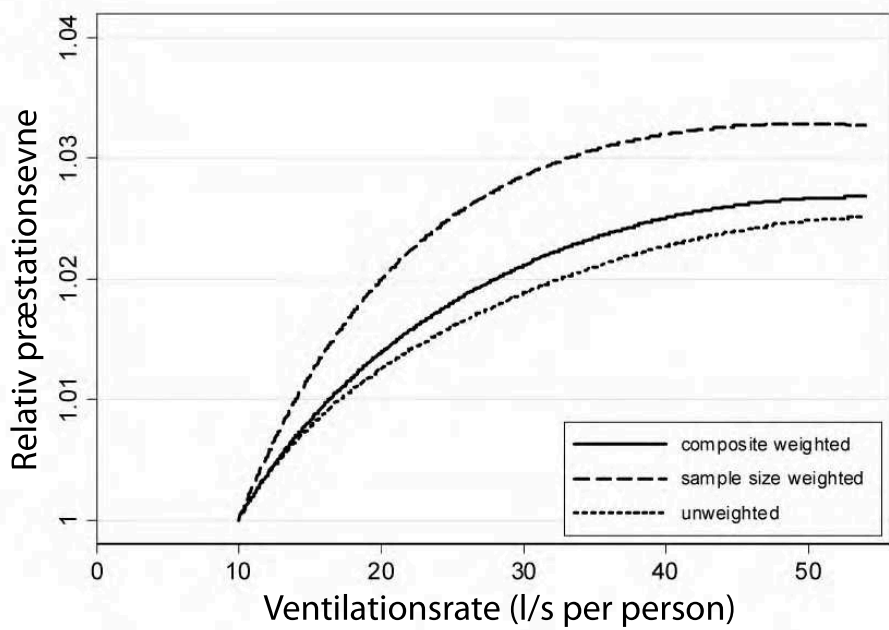
hvor

$\hat{\lambda}(v)$ = Brøktilpasset ændring i præstationsevnen per 10 l/s pr. person ved ventilationsraten v

Baseret på den polynomiske model i figur 5.9 er præstationsevnen for alle ventilationsrater i forhold til reference præstationsevnen ved ventilationsraterne (V_0) for hhv. 6,5 og 10 l/s/person beregnet ved brug af ligning (5.7) og vist på nedenstående figur 5.10.



(a) Reference ventilationsrate er sat til 6,5 l/s pr. person



(b) Reference ventilationsrate er sat til 10 l/s pr. person

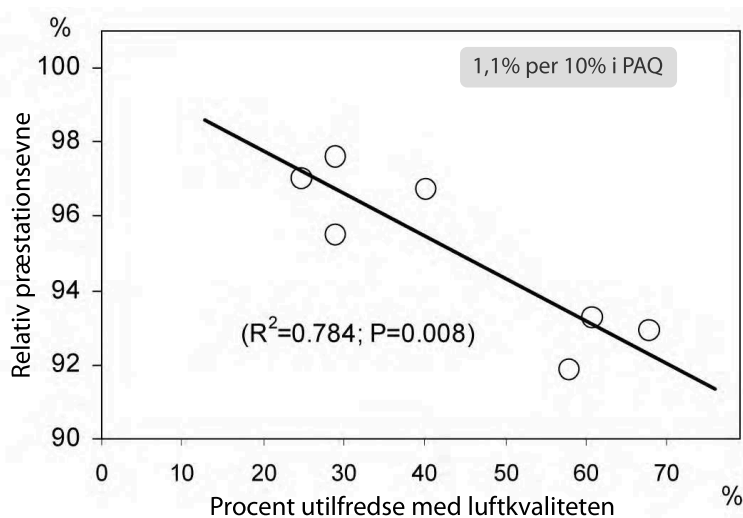
Figur 5.10: Den relative præstationsevne som funktion af at øge ventilationsraten. [Seppänen og Fisk, 2005]

Ifølge Seppänen et al. [2006b] er der i laboratorieforsøgene vist en pålidelig forbedring af præstationsevnen i typiske kontoropgaver når ventilationsraten stiger. I de mere komplekse feltstudier i call-centrene er der ligeledes vist en generel tendens til forbedring i præstationsevnen med stigende ventilationsrater, men disse er dog ikke helt så pålidelige som de ovenfor nævnte laboratorieforsøg. Kontoropgaverne i de gennemgået studier er forholdsvis simple opgaver og det er derfor ikke entydigt, hvor godt resultaterne repræsenterer præstationsevnen i virkelige kontormiljøer. Alligevel er der i de gennemgået studier medtaget mange forskellige og specifikke opgaver, som den udviklede vægtede relation vel og mærke kan beskrive gennemsnitlig-arbejde i en kontorbygning og vil derfor være anvendelig i mange kontormiljøer. [Wargocki et al., 2000b]

Kurverne i figur 5.10 viser en kontinuerlig stigning i arbejdspræstationen med ventilationsrater op til omtrent 45 l/s/person, dette afspejle dog ikke den virkelige situation i rigtige bygninger - ved høje ventilationsrater vil den indendørs forureningskoncentration indstille sig lige med den udendørs koncentration og præstationsevnen skulle hermed stabiliseres. I realiteten vil der ved høje ventilationsrater forekomme træk og støj fra luftbevægelserne, som kan formindske præstationsevnen.

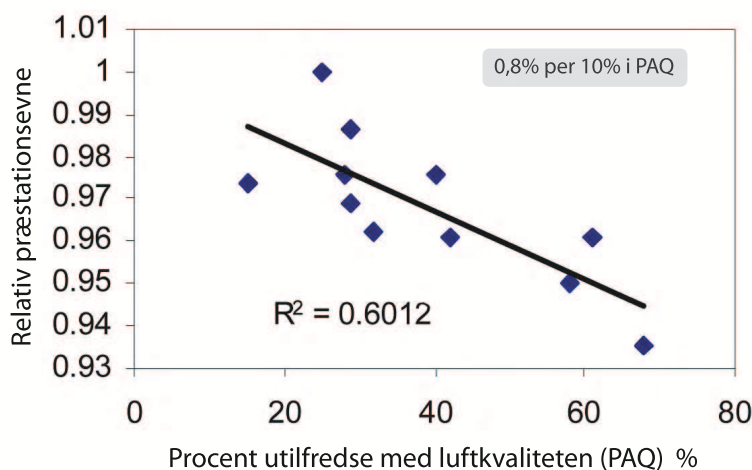
5.4.3 LUFTKVALITET (IAQ) & PRÆSTATIONSEVNE

De fleste studier omkring relationen mellem opfattede luftkvalitet (Perceived Air Quality, PAQ) og præstationsevne er hovedsageligt blevet udført i Danmark. Det første studie, Wargocki et al. [1999], berettede om en betydningsfuld ($P < 0,05$) dårligere præstationsevne ved tekstskrivnings- og addition-sopgaver når forureningskilden var tilstede samt ligeledes betydningsfuld ($P < 0,1$) dårligere præstationsevne med fejl i tekstskrivningen, logisk ræsonnement samt flere opgaver når forureningskilden var tilstede [Wargocki et al., 2006]. Efterfølgende har Wargocki et al. [2000a] udviklede en model baseret på disse resultater. Modellen viser en 1,1% stigning i præstationsevnen for kontorarbejde (tekstskrivning, addition og korrekturlæsning) for hver 10% formindskelse i procent utilfredse med luftkvaliteten ved indtræden i et rum (første reaktion på luftkvaliteten som gæst i rummet). Relationen mellem PAQ og præstationsevne er illustreret på nedenstående figur 5.11, i området 15-70% utilfredse [Seppänen og Fisk, 2005].



Figur 5.11: *Relativ ændring i præstationsevne ved kontorarbejde som funktion af opfattet luftkvalitet (PAQ), evalueret ved brug af et utrænede lugte(olf)-bedømmelsesudvalg og udtrykt ved procent utilfredse med luftkvaliteten. [Wargocki et al., 2000a; Seppänen og Fisk, 2005]*

Wargocki et al. [1999] udførte sit eksperiment ved at bruge et 20-år gammelt tæppe som forureningskilde i indblæsningsluften. Forholdet præsenteret i figur 5.11 er senere blevet verificeret af Bako-Biro [2004], som kombinerede resultaterne fra Wargocki et al. [1999] med sine egne opnåede resultater til at skabe en relation mellem præstationsevne og luftkvalitet som vist på nedenstående figur 5.12. Forholdet viser en lignende effekt, som blev observeret af Wargocki et al. [1999], men dog ikke helt så kraftigt. Resultaterne fra projektet viser at en 10% stigning i procent utilfredse med PAQ kan modsvares med en 0,8% stigning i præstationsevnen. Det skal dog huskes at præstationsevnen i Bako-Biro [2004] indebærer kun tekstskrivning i resultaterne, hvorimod i Wargocki et al. [1999]-studiet indgår virkningen af tekstskrivning, addition og korrekturlæsning i præstationsevnen. [Seppänen og Fisk, 2005; Wargocki et al., 2006]



Figur 5.12: Relativ ændring i præstationsevne ved tekstskrivning som funktion af opfattet luftkvalitet (PAQ) udtrykt ved procent utilfredse med luftkvaliteten. [Bako-Biro, 2004; Seppänen og Fisk, 2005]

Baseret på de gennemgået studier vides det ikke om en lavere opfattede luftkvalitet er årsagssammenhængende relateret til præstationsevnen eller om den kun er en indikator for andre faktorer i bygninger, som har en sammenhæng med præstationsevnen. Den opfattede luftkvalitet er påvirket af flere andre faktorer, hvor den hovedsageligt afhænger af forureningskilder og ventilationsrate, men er også afhængig af lufttemperatur og luftfugtighed. [Seppänen og Fisk, 2005]

På baggrund af forholdene præsenteret i figur 5.11 og 5.12 kan man forudsige effekten af, at forbedre den opfattede indeluftkvalitet i kontorbygninger på præstationsevnen af kontorarbejdet [Wargocki et al., 2006]. Som eksempel er det i et Europæiske Revisions projekt [Seppänen og Fisk, 2005] vist at PAQ variere mellem 2 og 9 decipol i europæiske bygninger, hvilket svarer til 25-60% utilfredse. Ved brug af modellen udviklet af Wargocki et al. [2000a] svarer dette til en potentiel forbedring på 3,8% af præstationsevnen i kontorarbejdet og ved brug af modellen fra Bako-Biro [2004] vil der være en potentiel forbedring på 2,8% af præstationsevnen ved tekstskrivning.

5.4.4 SBS-SYMTOMER & PRÆSTATIONSEVNE

Mange studier har vist at stigende lufttemperaturer, reduceret ventilation og dårlig luftkvalitet er forbundet med udbredelsen af bygningsrelaterede SBS-symptomer, som opfattes af brugerne i den pågældende bygning [Seppänen et al., 2006b; Fisk et al., 2003; Seppänen, 1999]. SBS-symptomer forårsager forstyrrelse fra arbejdet og inkludere symptomer som hovedpine, koncentrationsbesvær samt muligheden for at tænke klart og det er derfor rimeligt at forvente SBS-symptomer også kan påvirke præstationsevnen [Wargocki et al., 2006].

To af de nyeste studier, der har brugt objektive præstationsevne-resultater, antyder et forhold mellem SBS-symptomer og præstationsevnen [Seppänen og Fisk, 2005]. Niemelä et al. [2003] fandt, på baggrund af data fra et call-center, at en gennemsnitlig reduktion på 7,4%-point i udbredelsen af

ugentlige SBS-symptomer (f.eks. hovedpine) korrespondere til en 1,1% stigning i produktiviteten. Tham og Willem [2004] rapporterede om en gennemsnitlig reduktion af intensiteten af adfærdsterapeutiske symptomer (f.eks. hovedpine og svært ved at tænke klart) med 10 point på en skala mellem 0 og 100 ville medføre en 5% stigning i præstationsevnen. [Wargocki et al., 2006]

Disse iagttagelser underbygger hypotesen om, at der forefindes en relation mellem SBS-symptomer og præstationsevne, det vil dog pga. variationerne i de rapporterede symptomer samt de relativt få undersøgelser der er foretaget med objektivet målte symptomer være svært at udvikle en pålidelig relation mellem disse om præstationsevnen. [Seppänen og Fisk, 2005; Wargocki et al., 2006]

5.4.5 KONTROLMULIGHEDER & PRÆSTATIONSEVNE

Muligheden for individuelt at kontrollere de indeklimamæssige parametre har vist sig, at reducere sygefraværet pga. SBS samt forbedre den selv-reporteret præstationsevne betydeligt [Wargocki et al., 2006]. Hollandske studier har vist, at sygefraværet pga. SBS-symptomer kan sandsynligvis være 34% lavere, hvis brugerne i kontorbygningerne har mulighed for at kontrollere det termiske indeklima [Roelofsen, 2002]. Andre studier, bla. fra England, indikere at den selv-reporteret præstationsevne er signifikant højere når ansatte kan kontrollere deres eget termiske indeklima eller lysniveaue hvor de arbejder [Wargocki et al., 2006]. Disse to studier stemmer ligeledes godt overens med en undersøgelse i et forsikringsselskab, hvor det viste sig ved anskaffelsen af individuelle kontrol muligheder for lufttemperaturen i rummet steg produktiviteten med 4%, det er desuden efterfølgende blevet estimeret, at ved anskaffelsen af individuel kontrolmuligheder af lufttemperaturen på $\pm 3^\circ$ omkring komforttemperaturen vil medføre en stigning på omkring 7% i præstationsevnen. [Wargocki et al., 2006]

Kaczmarczyk et al. [2004] fandt i en undersøgelse, hvor personer udførte simulerede kontorarbejde (f.eks. tekstskrivning, addition etc.), at den selv-reporteret præstationsevne blev forbedret når udeluft blev tilført ved brug af personlig ventilation og endnu mere når den tilførte luft havde en lavere lufttemperatur end indelufttemperaturen; ved disse forhold lavede personerne 15% færre fejl end ved konventionel opblandingsventilation uden individuel styring. Det blev ligeledes påvist at intensiteten af hovedpine var lavere samt evnen til at tænke klart var steget.

Resultaterne fra de ovenfor nævnte studier foreslår, at tilvejebringelsen af individuel kontrolmuligheder for forskellige parametre af indeklimaet kan have en stor indflydelse på de ansattes præstationsevne, der er dog på nuværende tidspunkt for få data til at udvikle en kvantitativ metode der beskriver forholdet mellem kontrolmuligheder og præstationsevne. [Wargocki et al., 2006]

5.5 DISKUSSION

De ovenfor gennemgået emner påviser, at der indenfor den seneste stykke tid er udviklet tilstrækkelig med data til, at kunne kvantificere indflydelsen af IEQ³ og de relateret bygningsforhold på brugernes helbred og produktivitet. Baseret på litteratur gennemgangen har det været muligt at kvantitativt estimere hvordan ventilationsrate, lufttemperatur og oplevet luftkvalitet påvirker helbredet og arbejdspræstationsevnen i en kontorbygning. Ydermere er det gennem flere studier stærkt anbefalet, at finde en sammenhæng mellem SBS-symptomer og produktivitet da brugbare funktioner der relaterer SBS-symptomer til produktivitet eller fraværelsen heraf, vil være meget værdifulde, fordi mange ek-

³Indoor Environmental Quality

sisterende data relatere bygningsdesign og -drift til udbredelsen af SBS-symptomer [Wargocki et al., 2000b, 1999].

Det skal dog nævnes, at der er mange begrænsninger til de kvantitative forhold som er blevet udviklet ovenfor i afsnit 5.4, hvor en af de vigtigste begrænsninger er de udviklede estimeringsmetoder af de forskellige forhold, som i de fleste tilfælde er baseret på et forholdsvist moderat antal studier - hvormed estimeringsmetoderne vil have en forholdsvis høj usikkerhed. I udviklingen af de kvantitative forhold er det forudsat at de observerede forbindelser indikere en årsagssammenhæng eller at forbindelserne er så robuste at de kan benyttes til at forudsige ændringer i helbredet eller præstationsevnen. Jf. Seppänen og Fisk [2005] er det f.eks. forholdsvis sikkert at en høj lufttemperatur kan nedsætte arbejdernes præstationsevne, da effekten er blevet påvist i flere forskellige studier (Seppänen [1999], Seppänen et al. [2006a]) hvor de andre parametre blev holdt konstant. I modsætning vil ventilationsraten ikke direkte have en indflydelse på præstationsevnen, men derimod have en indflydelse på andre parametre som f.eks. luftens forureningskoncentrationen som i modsætning vil have en direkte indvirkning på præstationsevnen. Den sammenhæng, der dog er størst usikkerhed omkring er parameteren oplevet luftkvalitet og relationen til præstationsevnen (afsnit 5.4 og Seppänen og Fisk [2005]). I afsnit 5.4 blev det fundet at den oplevede luftkvalitet ligeså vel kunne være en indikator for andre faktorer som kunne påvirke præstationsevnen; dog er det ikke sikkert at de enkelte faktorer som har en indflydelse på den oplevede luftkvalitet også har en indflydelse på præstationsevnen.

Desuden er der flere andre vigtige begrænsninger eller vigtige forsigtigheder ved brug af de kvantitative estimeringsmetoder angivet i dette afsnit [Wargocki et al., 2006; Seppänen og Fisk, 2005]:

- I nuværende situation er der udviklede estimeringsmetoder til evaluering af befolkningens gennemsnitlige effekt af IEQ samt de relaterede bygningsfaktorer på helbredet og præstationsevnen. Det anerkendes selvfølgelig at der vil være forskellige reaktioner på indeklimaet blandt arbejderne og ligeledes med typen af arbejdet det skal udføres, og ofte vil det kun være de mere påvirkelige personer blandt befolkningen som ugunstigt vil blive påvirket af dårlige IEQ. Teoretisk set vil det være mere effektivt at rette hjælpemidlerne mod de personer der lider under de indeklimamæssige forhold - det vil dog ofte være upraktisk at gøre dette.
- De kvantitative relationer mellem indeklima parametre og helbredet eller produktiviteten vil ligeledes variere fra bygning til bygning, f.eks. vil en øget ventilation være gavnligt i bygninger med høje forureningskoncentrationer og kun have en marginal betydning i bygninger med forureningskoncentrationer under gennemsnittet - estimeringen af de kvantitative forhold mellem IEQ og produktivitet/helbred er mest brugbart for en gennemsnitlig bygning.
- Det er ligeledes vigtigt at gøre opmærksom på, at når fordelene fra indeklimaforbedringer er estimeret er det ikke altid muligt, at addere ydelserne fra de enkelte indeklimaforbedringer da effekten kan være medtaget to gange. Som eksempel vil der ved en reduceret indelufttemperatur måske blive en mindre udbredelse af SBS-symptomer på 20% samt en højere ventilationsrate vil måske også reducere udbredelsen af symptomer med 20%. Hvorimod hvis begge disse tiltag blev implementeret i en bygning, vil den totale formindskelse af SBS-symptomernes udbredelse, i forhold til det oprindelige niveau, højst sandsynligt være mindre end 40%. Ligeledes er det nødvendigt at tage særligt hensyn når kombineringen af de estimerede ydelser ved forbedret oplevet luftkvalitet med ydelser for andre parametre, da den oplevede luftkvalitet ofte kun er et mål for andre faktorer som påvirker arbejdspræstationsevnen.
- Omfanget af en produktivitetsforøgelse en medarbejder kan udnytte fra et bedre indeklima

afhænger ligeledes meget af størrelsen og typen af personen. En forøgelse i præstationsevnen vil være mere vigtigt når arbejdet er krævende og vil måske være praktisk for større firmaer - f.eks. vil et 10-personers firma ikke have mulighed for at afskedige nogle af deres medarbejder efter en indeklimateforbedring, som har øget produktiviteten med nogle få procent, hvorimod et firma med hundrede eller tusind medarbejder vil kunne afskedige nogle af medarbejderne. Der vil dog stadig i et lille firma være en produktivitetsforøgelse som vil medføre en højere fortjeneste.

- Markedssituationen vil desuden også påvirke størrelsen af de mulige forbedringer af indeklimaet. En usikker bygmester vil kun være interesseret i den kortsigtede tilbagebetaling af hans investering og en udlejer vil måske bevidst forringe kvaliteten af indeklimaet for på den måde at spare penge på driftsomkostningerne og dermed acceptere (eller være uvidende om) en mindre lejeindtægt og værdi af ejendommen.

Wargocki et al. [2006] og Seppänen og Fisk [2005] anerkender, at der fortsat er en høj usikkerhed associeret med inkorporeringen af en produktivitetsforbedring i rentabilitetsberegninger der er relateret til bygningsdesign samt driften heraf. Samtidigt skal det dog nævnes, at en estimering af produktivitetsforøgelse ved brug af de tilgængelige relationer og informationer præsenteret ovenfor, vil generelt set medfører bedre beslutninger omkring bygningsdesign og -drift sammenlignet med den gængse praksis, hvor der oftest ignoreres de potentielle muligheder for forbedring. [Seppänen og Fisk, 2005]

5.5.1 HVORDAN OVERBEVISES KUNDEN?

Det er vigtigt at overbevise kunden om at bæredygtig bygningsdesign, konstruktioner og driften vil spare penge på energi- og vandforbruget, som ligeledes kan resultere i en sundere bygning med en følgende stigning i produktiviteten. Problemet er at kunden "anvender" sin bygning på forskellige måder, hvilket ifølge Wargocki et al. [2006] kan blive opdelt i følgende punkter:

- (i) *Containere* bygget for en billig pris uden at tage hensyn til indvirkningen af det bebygget på præstationsevnen
- (ii) *Prestige symbol* hvor det udvendige er det vigtige fremfor de indvendige forhold
- (iii) *Industrielle bygninger* hvor et godt arbejdsmiljø er anset som vigtigt for arbejdsstyrken (medarbejderne) - f.eks. bilfabrik
- (iv) *Driftsstyrke* hvor funktionen og den symbolske rolle er afspejlet i ledelsen og bygningsdesignet

Af de ovenstående punkter er det kun de sidste to bygningsformer/kategorier der anerkender vigtigheden af et godt arbejdsmiljø og det er kun i den sidste kategori firmaerne indser at gode indeklimateforhold kan øge produktiviteten.

Den tekniskechef/driftsleder (Facilities Manager) har en vigtig funktion i at opretholde en høj produktivitet ved en ansvarlig styring af anlægget ud fra tilbagemeldingen fra medarbejderne samt vedligeholdelse af systemerne, så de fungerer optimalt. Facilities Management er meget væsentligt i en bygning og skal være effektivt styret for at kunne tilvejebringe et godt indeklima for kontorpersonalet [Wargocki et al., 2006]. Ofte vil der være et stort antal forskellige behov blandt arbejderne for at opleve indeklimaet som værende tilfredsstillende - behovene kan typisk opdeles i følgende interesse grupper (fra Wargocki et al. [2006]):

- Virksomhedsbestyrelsen, som vil øge effektiviteten og produktiviteten
- Medarbejderne, som vil have en funktionel og indbydende arbejdsplads
- Bygningsejeren, som vil have en større værdi af den faste ejendom
- Servicearbejderen, som vil have en lette vedligeholdelses områder med god tilgængelighed

Facilities managers vil ofte nødig investere i deres bygning, da en fuldstændig indeklimateundersøgelse ofte ender ud med konklusionen, at alvorlige og dyre forbedringer er nødvendige for at forbedre situationen og reducere antallet af indeklimateklager. Forestil jer, at en facilities manager bliver konfronteret med følgende meddelelse: "Vi har undersøgt din bygning og fundet frem til, at du har alvorlige IEQ problemer. Vil du bruge 2100 kr/m² på at forbedre indeklimaet?". Den første reaktion vil sandsynligvis være negativ hvis prisen kun medtages i vurderingen, hvilket ofte er tilfældet når facilities manageren havde forventet en billig løsning. Alternativt kan man beskrive hvad han får ud af investeringen ved brug af en anden udtalelse: "Du har et alvorlig IEQ problem. Vil du forbedre medarbejdernes produktivitet med 10%, nedsætte sygefraværet med nogle få procent og opnå en fortjeneste af investeringen på over 10%?". Ifølge Wargocki et al. [2006] er erfaringerne, at denne fremgangsmetode er meget mere effektiv og meget oftere ender ud med et forbedret indeklima i bygningen.

5.6 OPSUMMERING OG KONKLUSION

- Studier har vist, at indeklimaet har den største effekt på produktiviteten i forhold til job stress og job utilfredsheden (afsnit 5.3 og Roelofsen [2002])
- Flere studier indikere at forbedre kvaliteten af indeklimaet kan forbedre præstationsevnen mellem 1 og helt op til 15% (Seppänen [1999]; Wargocki et al. [2006]; Seppänen og Fisk [2005])
- Givet at personaleomkostningerne er betydeligt højere end boligomkostningerne, vil en investering i et bedre indeklima være den mest effektive måde at bekæmpe tabet i præstationsevnen (Wargocki et al. [2006])
- Muligheden for at personerne individuelt kan styre de forskellige indeklimateparametre (lufttemperatur, ventilation) i et rum, har en relativ stor effekt på WEP og vil derfor være ønskeligt i en bygning (Olesen [2000b])
- En merinvestering i et bedre indeklima med færre antal utilfredse i realiteten altid betragtes som omkostningseffektivt, fordi de årlige besparelser i produktivitetsforøgelsen overstiger merinvesteringen oftest indenfor et til to år (Roelofsen [2002])
- Forholdet mellem lufttemperatur og produktivitet (afsnit 5.4.1) gør det muligt at designe det termiske indeklima på baggrund af produktivetsforbedringer, hvilket vil resultere i et komfortabelt indeklima samt en følgelig økonomisk fordel for firmaet (Seppänen [1999])
- Da arbejdsområdet har en stor betydning for medarbejdernes præstationsevne er det overraskende, at forskerne indtil nu har ignoreret effekten af et godt indeklima på produktiviteten og velvære. Designet af arbejdspladsen er knapt betragtet som en strategi for produktivetsforbedringer, hvilket især er tilfældet når der skal tages hensyn til arbejdspladsindretningen i kontormiljøer (Roelofsen [2002])

5.6 Opsummering og konklusion

Af ovenstående gennemgået emner, omkring indeklimaets indflydelse på produktiviteten og medarbejdernes præstationsevne, er det tydeligt at der stadig mangler flere og større studier i "rigtige" kontormiljøer sådan der kan skabes en mere brugbar kvantitativ metode til estimering af en produktivetsforøgelse ved at forbedre kvaliteten af indeklimaet i en (kontor)bygning. De kvantitative relationerne kan dog stadig være en stor hjælp i en designfase, da disse kan bruges til at kvantitativt vurdere forskellige løsninger imellem hinanden. Endvidere kan økonomiske beregningseksempler overfor en bygherre være et godt redskab til at opnå en produktivetsforøgelse ved et forbedret indeklima og samtidigt ophøje brugernes generelle tilfredshed med firmaets ledelse.

Beskrivelse af eksisterende koncepter

6

I nærværende kapitel præsenteres forskellige koncepter. De udvalgte koncepter repræsenterer alle metoder til evaluering af forskellige områder såsom: termisk og atmosfærisk indeklima, global og lokal termisk diskomfort, energi, livscyklusanalyser mv. I del II af nærværende rapport vil disse blive diskuteret yderligere med henblik på en udvælgelse for videreudvikling heraf.

6.1 BY OG BYG MILJØDEKLARERING

Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) har udarbejdet en metode til opgørelse og vurdering af en bygnings miljøbelastninger og opstillet et forslag til en miljødeklareringsordning for bygninger. Metoden og forslaget er yderligere beskrevet af Dinesen et al. [2001].

Bygninger giver anledning til væsentlige belastninger¹ af miljøet, men der er mange muligheder for at reducere belastningerne. For at synliggøre reduktionsmulighederne er der behov for at kunne opgøre belastningerne, at kunne vurdere dem i forhold til andre bygningers belastninger og at kunne fremlægge resultaterne i form af overskuelige miljødeklarationer. Disse omfatter også en miljømæssig klassificering af bygningen, f.eks. i miljøklasse A, B eller C afhængigt af, i hvor høj grad miljøbelastningen er reduceret i forhold til en ”normalbygning”. [Dinesen et al., 2001]

Formålet med By& Byg’s projekt [Dinesen et al., 2001] er at opstille en praktisk anvendelig fremgangsmåde ved miljødeklarering og -klassificering af bygninger. Ved miljødeklarering forstås en beskrivelse af den aktuelle bygnings status med hensyn til hver enkelt af de udvalgte miljøindikatorer (energi, materialer, indeklima etc.). Miljøklassificering betyder, at den aktuelle bygning indplaceres i én af tre miljøklasser (A, B eller C), som er defineret ud fra en klassificering af hver enkelt miljøindikator. [Dammann, 2004]

Fremgangsmåden skal kunne anvendes ved nedenstående beskrevne punkter:

- opstilling af miljømål når en bygherre skal planlægge et byggeri
- dokumentere at bygningen er opført som beskrevet i byggeprogrammet
- værktøj f.eks. for kommuner til styring af byudvikling i et bestemt område ved at stille minimumskrav til miljøklassificering
- vurdere et byggeprojekts miljømæssige værdi for f.eks. investorer, bygherrer og brugere

Miljødeklareringen og -klassificeringen vedrører de miljømæssige forhold, der er generelle for en bygning af den pågældende bygningstype - altså selve bygningen og de brugsmæssige forhold, der i væsentlig grad er påvirket af bygningens udformning. Inventar mv. er ikke inkluderet, ligesom stærkt

¹Energiforbrug gennem bygningens levetid, genbrug af byggematerialer etc.

brugerafhængige aktiviteter, som f.eks. transport til og fra bygningen, heller ikke indgår. Miljøvurderingen omfatter bygningens livscyklus, dvs. fremstilling baseret på indsamlede proces- og materialedata, vedligehold baseret på anslåede levetider og fjernelse baseret på nutidige data. [DR-byen, 2003]

Deklareringen og klassifikationen omfatter kun i meget begrænset omfang forhold, der har relation til bygningens specifikke lokalisering og indpasning i landskab og infrastruktur, idet en deklarerings og klassificering, der omfatter alle variationsmuligheder i forbindelse med bygningens lokalisering, vil være for omfattende at opstille. Alligevel kan det ikke undgås, at visse eksterne forhold indgår i beregningerne og er dermed forhold, som bygherren for den konkrete bygning ikke har indflydelse på (eller ikke har tænkt over, at han kunne have indflydelse på). Det drejer sig f.eks. om valg mellem energiformer (gas, olie, fjernvarme, el etc.) og valg mellem forskellige producenter af samme byggematerialer. [DR-byen, 2003; Dammann, 2004]

I nedenstående tabel 6.1 er en kort forklaring til hver af de anvendte miljøindikatorer givet. De første fem indikatorer opgøres kvantitativt (dvs. med en talværdi som slutresultat) ved hjælp af pc-værktøjet BEAT². Indikatorerne opgøres i normaliserede og vægtede personækvivalenter (PE), dvs. sat i forhold til en gennemsnitspersons bidrag til den pågældende effekt i et referenceår. En uddybende forklaring på grundlaget for anvendelsen af BEAT-programmet findes i [Dinesen et al., 2001].

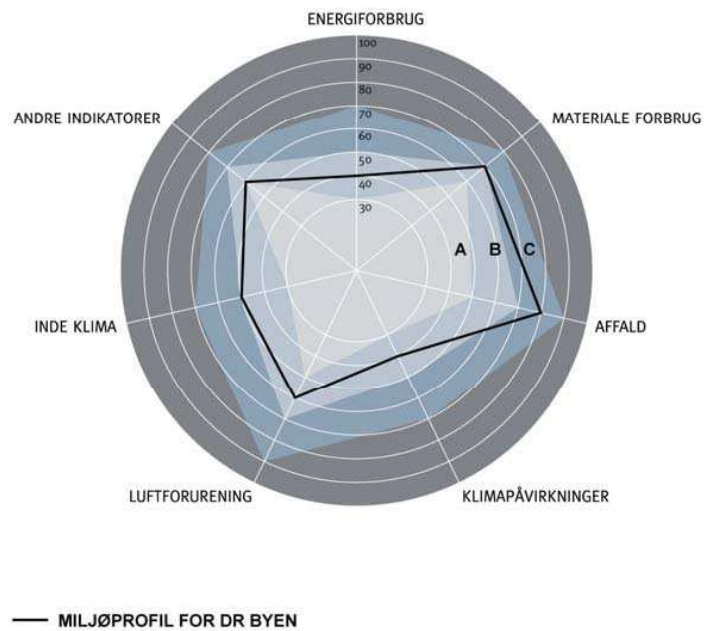
Indeklimaindikatorerne og øvrige indikatorer bestemmes kvalitativt ved hjælp af en række kriterier, som er vist i forklaringskemaerne i appendiks E. Delindikatorerne adderes ved hjælp af et pointsystem, som ligeledes er vist i skemaerne.

²Building Environmental Assessment Tool / Vurderingsværktøj for bygninger og omgivelser

Tabel 6.1: De indgående miljøindikatorer ved beregning af deklareringsen og klassificeringen. Ydermere er der givet en beskrivelse/forklaring af hver indikator. (fra DR-byen [2003])

Miljøindikatorer	Forklaring
Energiforbrug	Miljøindikatoren for energiforbruget er forbruget af fossile brændsler. Følgende energiforbrug indgår: Energiforbrug til opførelse og udskiftning, energiforbrug til opvarmning og ventilation, energiforbrug til køling, energiforbrug til belysning, energiforbrug til drift af varme- og ventilationsanlæg (pumper, fyr, ventilatorer mv.). Energiforbruget til opførelse og udskiftning i bygningens levetid beregnes ved hjælp af By og Bygs pc-program BEAT, energiforbruget til opvarmning og ventilation beregnes ved hjælp af By og Bygs pc-program Be06, energiforbrug til køling, belysning samt varme- og ventilationsanlæg beregnes ved hjælp af overslagsmæssige beregningsmetoder. De to sidstnævnte forbrug indlæses i BEAT programmet, som på grundlag af det samlede bruttoforbrug beregner forbruget af fossile brændsler angivet i normaliserede og vægtede personækvivalenter.
Materialeforbrug	Miljøindikatoren for materialeforbrug er et vægtet forbrug af knappe materialeressourcer. Vægtningen afhænger af forsyningshorisonten, dvs. den tid der vil gå før de tilgængelige ressourcer af materialet er brugt op med det nuværende forbrug. På nuværende tidspunkt indgår kun visse metaller (kobber, zink, stål) i opgørelsen. Opgøres ved hjælp af BEAT-programmet som et vægtet forbrug af knappe materialeressourcer regnet i personækvivalenter.
Affald	BEAT opgør de tre affaldskategorier: <i>Volumenaffald, slagge og aske</i> samt <i>farligt affald</i> . De normaliserede og vægtede effekter for hver kategori adderes til en fælles indikator for affald. Der indgår affald fra udvindings- og produktionsprocesser (herunder energiproduktion) samt fra udskiftning og nedrivning. Husholdningsaffald mv. indgår ikke.
Klimapåvirkning	De normaliserede, vægtede effekter <i>drivhuseffekt</i> og <i>nedbrydning af ozonlag</i> adderes til indikatoren klimapåvirkning. Indikatoren er i høj grad relateret til energiforbruget.
Luftforurening	De normaliserede, vægtede effekter <i>forsuring</i> og <i>fotokemisk ozondannelse</i> adderes til indikatoren luftforurening. Indikatoren er i høj grad relateret til energiforbruget.
Indeklima	Indeklima udgør et særligt sæt af indikatorer, hvoraf nogle ikke kan opgøres eller måles kvantitativt. Da de derfor heller ikke kan omregnes til samme enheder og dermed adderes, opgøres de i første omgang hver for sig og gives hver sine miljøklasser. Hvert af områderne <i>luftkvalitet</i> og <i>ventilation</i> , <i>termisk klima</i> , <i>dagslys</i> , <i>kunstlys</i> og <i>udsyn</i> samt <i>støj</i> og <i>akustik</i> omfatter 3-5 indikatorer. Vedrørende de enkelte indikatorer henvises til indeklimateksterne.
Øvrige indikatorer	Omfatter en række indikatorer, som bestemmes kvalitativt ved hjælp af skemaet for øvrige indikatorer. Der indgår uønskede kemikalier, vandforbrug, bygningens drift, bygningens lokalisering og eget valg. Sidstnævnte er en "fri" indikatorgruppe, som kan anvendes individuelt, og som skal vedrøre særlige miljømæssige foranstaltninger i den pågældende bygning.

På følgende figur 6.1 er et eksempel vist på, hvordan hovedindikatorerne samles i en grafisk afbildning af resultaterne fra DR-byen.



Figur 6.1: Eksempel på grafisk afbildning af resultaterne fra DR-byen. (Fra DR-byen [2003])

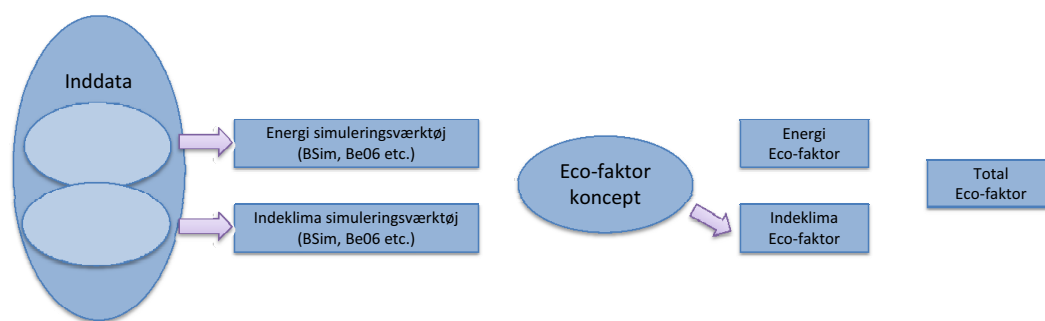
På hver akse kan den opnåede værdi/pointsum for den pågældende indikator nu afsættes, hvorved klassifikationen kan aflæses.

Den bedste klassifikation er nærmest centrum i diagrammet dvs. jo lavere pointsum/værdi der opnås, jo bedre bliver klassifikationen.

6.2 ECO-FACTOR

Eco-factor-metoden er en evalueringsmetode som indbefatter den miljømæssige effekt af energiforbruget samt det termiske og atmosfæriske indeklima i én score på en skala fra 0-100% - den såkaldte Eco-factor. Metoden inkluderer både det "interne" og "eksterne" aspekt af energiforbruget (dvs. de indeklima- og miljømæssige forhold). [Brohus og Bjørn, 2006a]

Eco-factoren er baseret på en energi-Eco-factor og en indeklima-Eco-factor, som kombineret set giver den totale Eco-factor. Nedenstående illustration viser ideen og opbygningen bag konceptet.



Figur 6.2: Beregningen af Eco-factor kræver inddata fra eksisterende energi- og indeklimaværktøjer. Kvaliteten og detaljeringsgraden af både inddata og simuleringsværktøjerne stiger gennem designfasen, men evalueringsmetoden forbliver den samme. Fra Brohus og Bjørn [2006a]

Metoden betragter kun driftsfasen (den operative fase) af en bygnings livscyklus, da denne fase står for størstedelen af den miljømæssige effekt, pga. nutidens bygningsstil og energiforsyning [Brohus og Bjørn, 2006b; Bjørn et al., 2004]. Indeklimaaspekter som termisk komfort og luftkvalitet, er betragtede som værende tæt relaterede til energiforbruget. Den miljømæssige effekt af energiforbruget er estimeret på baggrund af de luftbårne emissioner og den relaterede påvirkning, resulteret fra en livscyklusanalyse (LCA³) af energikilderne. [Brohus og Bjørn, 2006b]

Eco-factoren beregnes på baggrund af vægtfunktioner baseret på en række fysiske egenskaber, omfattende driftsenergiforbrug, valg af energikilde, samt forudsigtelse af indetemperaturer, lufthastigheder, etc.. Værktøjet er tiltænkt at give et overblik over effekten ved ændring af nøgleparametre såsom rumhøjde, luftskifte, intern belastning, energikilde, etc.. Dette muliggør hurtige ændringer og iterationer, hvormed potentialet for forbedringer af enten energiforbruget eller indeklimaet kan ses. [Bjørn et al., 2004]

For den energimæssige del, er Eco-factor-værktøjet i bund og grund en metode til at inkludere størstedelen af de miljømæssige belastninger gennem en bygnings levetid, uden at skulle lave en komplet LCA af bygningen.

Som beskrevet af Bjørn et al. [2004] er ideen bag Eco-factoren, at give designeren (ingeniør, arkitekt, etc.) og bygningsejeren en direkte forståelse samt grafisk indtryk af bygningens totale ydeevne (energi samt indeklima). Ydermere giver værktøjet informationer omkring ydeevnen for individuelle aspekter ved et givet design og således også indikationer for hvilke dele af designet, der ikke yder optimalt. Dette vil hjælpe designer og ejer til at fokusere på én løsning som er tilpasset klimaet og brugen af bygningen, samt hvilke løsninger der virker bedst når hele bygningen betragtes som ét energisystem [Brohus og Bjørn, 2006a].

Det er tiltænkt at Eco-factor-værktøjet kan være behjælpeligt under samtlige faser af et projekt, herunder design-, projekterings- og afleveringsfasen, idet der er forskellige detaljeringsgrader i f.eks. indeklimadelen.

Eco-factor-konceptet og metoden heri vil være en integreret del af de nye udviklede koncepter der præsenteres i næste del af nærværende rapport.

³Life Cycle Analysis / Livscyklusanalyse

Del II

Udvikling af koncepter

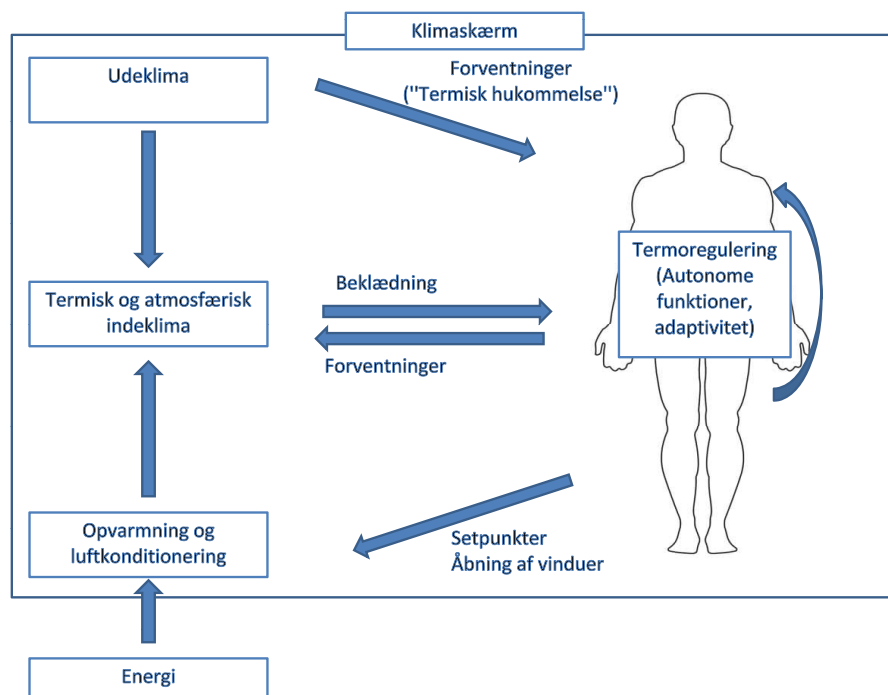
Indledning

I denne anden del af nærværende rapport, fokuseres der på udviklingen af nye metoder til evaluering af termisk og atmosfærisk indeklima med samtidig fokus på energi og produktivitet. For at bringe fokus tilbage på formålet med dette projekt citeres dele af problemformuleringen:

1. *Hvilke metoder til evaluering af termisk indeklima er der til rådighed?*
2. *Hvilke indikatorer for den termiske komfort er der til rådighed, og hvordan adskiller de sig fra hinanden?*
3. *Hvilken indflydelse har den menneskelige adaptivitet på den termiske oplevelse?*
4. *Hvilke adaptive modeller er der opstillet, og hvad er kvaliteten af disse?*
5. *Hvilken indvirkning har indeklimaet på den menneskelige præstationsevne?*
6. *Kan der opstilles en ydeevneindikator til evaluering af det termiske indeklima i såvel nyt som eksisterende byggeri med brug adaptive modeller sammen med modeller for evaluering af præstationsevnen?*

Formålet med nærværende projekt er således at opstille metoder til brug ved evaluering af det termiske indeklima i eksisterende og nye bygninger. I første del af rapporten, er der på baggrund af litteraturstudier præsenteret og diskuteret eksisterende metoder til evaluering og klassificering af termisk og atmosfærisk indeklima - såvel momentant (DS/EN ISO 7730 [2006]; ANSI/ASHRAE 55 [2004]; de Dear et al. [1997]; Nicol og McCartney [2001]; van der Linden et al. [2006] etc.) som langsigtet (DS 474 [1993]; DS/EN 15251 [2007]; DS/EN ISO 7730 [2006]; Brohus et al. [2006] etc.). I denne anden del af rapporten vil erfaringerne fra litteraturstudierne kombineret med egne bidrag danne baggrund for opstillinger af nye koncepter for evaluering af bygningers indeklima-ydeevne med fokus på termisk og atmosfærisk indeklima samt økonomi, produktivitet og energi herunder miljøbelastning.

Som det er vist gennem nærværende projekts litteraturstudie, er der mange faktorer der påvirker den enkelte persons komforttilstand, hvilket er illustreret ved følgende figur 7.1.



Figur 7.1: Vekselvirkninger mellem termisk komfort, indeklíma, udeklíma og energi (efter [de Dear og Morgan, 2003])

Den mere eller mindre optimale løsning på nærværende projekts problem vil være én samlet indikator der ved kombineret af flere faktorer, herunder: termisk og atmosfærisk indeklíma, produktivitet, energi, støj og lys, kan bruges til evaluering og klassificering af såvel nye som eksisterende bygninger der samtidig er fleksibel. Ved fleksibilitet menes en ydeevneindikator der er anvendelig i samtlige faser af et byggeri. Det skal således være muligt at foretage en beregning af ydeevneindikatoren på baggrund af få oplysninger (tidligt i projektfasen) og samtidig give mulighed for indregning af detaljerede parametre. En samlet klassificering af en bygnings "indeklíma- og energi ydeevne".

Klassificering af bygninger i forhold til termisk og atmosfærisk indeklíma foretages normalt ved brug af langsigtede evalueringer over længere perioder - normalt et år. Ved langsigtede evalueringer af det termiske indeklíma angiver normerne DS 474 [1993] og senest DS/EN ISO 7730 [2006] samt DS/EN 15251 [2007] forskellige metoder hertil. Fælles for metoderne er, at de stiller krav til antallet af timer, i hvilke en given grænse overskrides. Forskellen i metoderne ligger bl.a. i detaljeringsgraden. Metoden i DS 474 [1993] angiver som vejledning et maksimalt årligt timeantal hvor den operative indetemperatur må overskride hhv. 26 og 27 °C. Problemet med denne metode er, som tidligere beskrevet i afsnit 2.5, at den ikke tager størrelsen af temperaturudsvinget i betragtning, hvilket er af stor betydning¹. I normerne DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007] angives forskellige metoder til langsigtet evaluering af det termiske indeklíma med varierende detaljeringsgrader, og er tidligere beskrevet detaljeret i afsnit 2.3. Kort opsummeret angiver DS/EN 15251 [2007] følgende tre metoder:

¹I bygninger med lav varmeakkumuleringssevne vil temperaturudsvingene være større og hurtigere end en tung bygning med høj varmeakkumuleringssevne.

- A - Timekriterie:** krav til antal timer eller procentdel af tiden hvor temperaturen overskrider en specifik grænse
- B - "Grad-time":** Timebaseret metode hvor den numeriske størrelse af temperaturoverskridelsen ift. en given grænse opsummeres
- C - PPD-vægtede timer:** Timebaseret metode hvor overskridelsen beregnet som forholdet mellem den aktuelle PPD og grænsen opsummeres

Fælles for normerne er, at der på trods af ovenstående metoder til langsigtet evaluering ikke angives kriterier for de enkelte beregnede indikatorer. Det er således op til brugeren at fastsætte den tilladelige overskridelse. Grænserne kan opstilles på baggrund af forsøg, simuleringer, økonomi, politik, erfaringer mv.

Et centralt spørgsmål er også hvordan de enkelte indeklimafaktorer influerer på hinanden. På trods af, at nærværende projekt kun behandler det generelle termiske indeklima og i mindre grad det atmosfærisk indeklima, bør det nævnes, at indeklimaparametre såsom lys, akustik/støj, sikkerhed, indretning, arkitektur mv. alle bidrager til den generelle opfattelse af indeklimaet, men der er kun lavet få undersøgelser af kombinationerne (f.eks. personer i termisk diskomfort udsat for støjgener og/eller dårligt luftkvalitet²). Eksempelvis vil personer med stor sandsynlighed klassificere det termiske indeklima dårligere i situationer hvor de er påvirket af yderligere irritationsmomenter såsom støj, blænding, flimmer etc., end i tilfælde hvor det udelukkende er det termiske indeklima, der ikke møder komfortkravene for den enkelte person. I de termiske indekser PMV/PPD samt PD/DR opereres der med antallet af momentant utilfredse som følge af global og lokal termisk diskomfort, og det er tidligere³ i nærværende rapport diskuteret, hvordan disse summeres. En simpel summation er ikke mulig, hvilket også gør sig gældende for kombinationer med de andre parametre. Som diskuteret tidligere i kapitel 6 kunne en metode i tråd med Eco-factoren⁴ benyttes. Der kunne således foretages en vægtning af de enkelte indeklimaparametre som udmunder i én samlet indeklima-score, der så kunne vægtes i forhold til en score opstillet for energiforbruget, hvilket tilsammen vil give en endelig klassificering af bygningens "indeklima- og energiydeevne".

Med ovenstående diskussion samt foregående del I som baggrund, vil der i det følgende blive opstillet og diskuteret forskellige koncepter for såvel momentane som langsigtede evalueringer af hovedsageligt det termiske, og i mindre grad det atmosfæriske indeklima, med samtidig fokus på økonomi, produktivitet og energi herunder miljøbelastning.

²[Clausen et al., 1993; Pellerin og Candas, 2003]

³afsnit 3.5.6

⁴Bjørn et al. [2004]; Brohus og Bjørn [2006a,b]

Nye og eksisterende koncepter

8

I nærværende kapitel opstilles en række koncepter af varierende detaljeringsgrader samt fokusområder. Til sidst i kapitlet vil de enkelte koncepter blive sammenlignet og diskuteret med henblik på udvælgelse af koncepter for videreudvikling.

8.1 KONCEPT 1 - GENEREL METODE

8.1.1 GENERELT

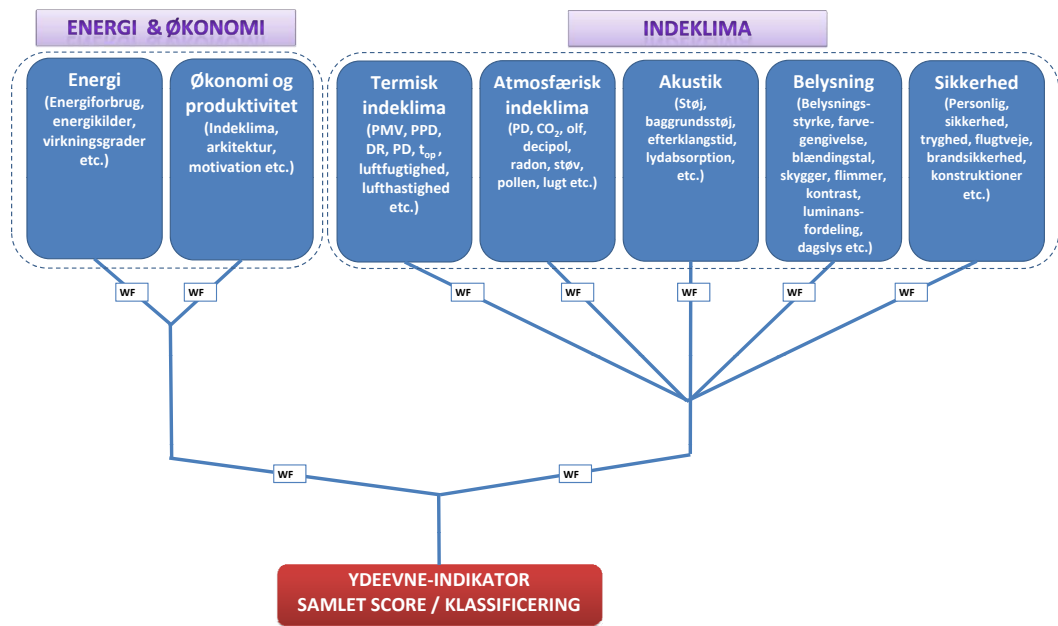
Det koordinerede EU-projekt (foreligger pt. kun som ansøgning) INDCRIT07 [2007], har til formål at skabe et fælles sæt "Indoor Environment Performance Criteria" til brug ved evaluering af bygningers ydeevne i forhold til:

- Termisk indeklima
- Atmosfærisk indeklima
- Akustik
- Belysning
- Sikkerhed

På trods af, at det i nærværende projekt samt i denne rapport er valgt at fokusere på termisk og atmosfærisk indeklima samt energi, bør der knyttes en kommentar til ovennævnte projekt.

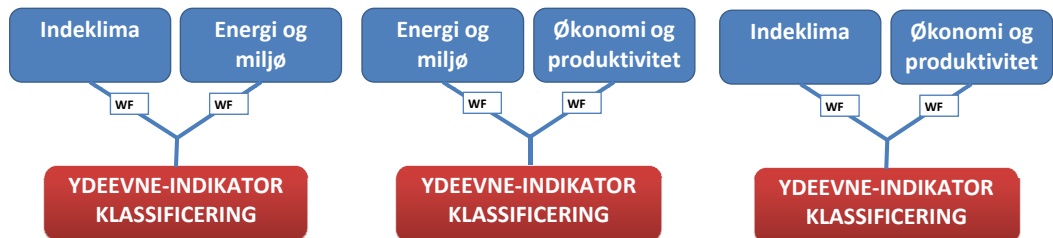
Inden for hvert delelement (termisk indeklima, atmosfærisk indeklima, akustik etc.) søges der udviklet ydeevneindikatorer til evaluering af en bygning ydeevne - dels momentant samt langsigtet med henblik på en egentlig klassificering heraf [INDCRIT07, 2007, s. 3]. Det interessante er dog, hvorvidt disse enkelte delelementer kan kombineres til én samlet score. I Eco-factor-metoden¹ benyttes bl.a. en simpel procentvis vægtning, hvilken er beskrevet nærmere i afsnit 6.2. Helt overordnet kunne de enkelte ydeevneindikatorer således vægtes indbyrdes i forhold til hinanden. Princippet er illustreret på figur 8.1.

¹[Bjørn et al., 2004]



Figur 8.1: Overordnet vægtingsprincip hvor de enkelte delelementer vægtes indbyrdes (WF: Vægtfaktor).

Som det fremgår af figur 8.1, er der foruden de ovennævnte delelementer tilføjet bidrag fra hhv. energi samt økonomi og produktivitet. Foruden energiperspektivet, vil et bidrag fra økonomi og produktivitet trække indikatoren i en retning af økonomisk betragtning, hvilket ofte er interessant for bygherren, bygningsejeren og/eller -lejer. Dette er nærmere beskrevet i kapitel 5. Beregning af indikatoren med fokus udelukkende på f.eks. energi og miljø samt økonomi og produktivitet eller andre kombinationsmuligheder illustreret på følgende figur 8.2 er også tænkeligt.



Figur 8.2: Forskellige kombinationer af parametre til beregning af specifikke ydeevneindikatorer (WF: Vægtfaktor).

Fastlæggelsen af de enkelte vægtfaktorer kan foretages på baggrund af beregninger, forsøg, politik, skøn etc. Der kunne opstilles forskellige vægtningemetoder der f.eks. tager hensyn til energi fremfor indeklima, vægtede økonomi højest etc., hvilket vil føre til varierende resultater af den samlede ydeevneindikator. Ovenstående metode tjener således til såvel som redskab i designfasen som afsluttende klassificering af bygninger, efter de enkelte ydeevneindikatorer for hhv. indeklima samt energi og økonomi er beregnet. Fordelen ved denne metode er, at den er simpel i brug (forudsat at ydeevneindikatorerne er beregnet), og således nemt kan implementeres i såvel almindelige regneark

(f.eks. Excel) samt mere komplicerede/detaljerede TBS-programmer (f.eks. BSim).

En metode til samlet evaluering af områderne fra INDCRIT07 [2007] beskrevet ovenfor er opstillet af Olesen og Boerstra [2005], hvor der opdeles i seks faktorer:

1. Termisk kriterie for vinter
2. Termisk kriterie for sommer
3. Kriterie for Luftkvalitet og ventilation
4. Kriterie for belysning
5. Kriterie for akustik
6. Kriterie for træk

På baggrund af ovenstående kriterier, kan der jf. Olesen og Boerstra [2005] foretages en klassificering efter følgende princip, hvor der tages udgangspunkt i klasserne angivet i DS/EN 15251 [2007]:

Tabel 8.1: Fordeling af de seks ovennævnte faktorer for at opnå klasse A-J. [Olesen og Boerstra, 2005]

Klasse	Kriterie - (iht. DS/EN 15251 [2007])			
	A	B	C	Uden for klasse C
A	6			
B	≥ 4	≤ 2		
C	≥ 2	≤ 4		
D		6		
E		≥ 4	≤ 2	
F		≥ 2	≤ 4	
G			6	
H			≥ 4	≤ 2
I			≥ 2	≤ 4
J				6

Metoderne beskrevet ovenfor er reelt set et "Multi Criteria Decision Tool", der på baggrund af forskellige kriterier, kan benyttes til samlet vurdering og vægtning af enkelte parametre. Et koncept der bygger på dette er "Miljøklassificeringen" opstillet af By og Byg, hvilket er nærmere beskrevet i kapitel 6 afsnit 6.1. På baggrund af det allerede opstillede koncept, der bygger på en livscyklus-analyse af hele bygningen, kan der foretages opdateringer af de eksisterende vurderingsmetoder af indeklimadelen. Fremfor den eksisterende metode, hvor der vurderes i forhold til overtemperatur i rummet, kan metoden udvides som beskrevet i det følgende.

8.1.2 BY OG BYG MILJØDEKLARERING - OPTIMERING AF INDEKLIMADEL

Miljøindikatorer vedrørende indeklima er væsentlige i en miljødeklaration. Ikke mindst fordi bygherren som regel vil prioritere indeklimaet højt. Men indeklimaet er vanskeligt at håndtere i en deklareringsproces, fordi det er bestemt af mange parametre, som ikke kan kvantificeres og adderes. I forbindelse med

projektet [Dinesen et al., 2001] er der opstillet en systematik for en overordnet miljømæssig vurdering af indeklimaet. Der opdeles i fire underpunkter, som for hvert punkt består af fire eller fem indikatorer. Ved hjælp af et pointsystem sammenfattes klassificeringen for hvert underpunkt, og derefter til én samlet indeklimaklassificering.

Indeklimaindikatorerne opstilles inden for følgende opdeling:

- Indeklima
 - Luftkvalitet
 - Termisk klima
 - Dagslys, udsyn og kunstlys
 - Støj og akustik

Som det ses stemmer disse inddelinger godt overens med de, der er beskrevet og diskuteret i det foregående, hvor det ligeledes er forsøgt at kvantificere indeklimaparametrene i en klassificering af bygningen.

I nærværende koncept er der fokuseret på en optimering af indeklimadelen (hovedsageligt termisk i dette projekt) i den ovenfor beskrevne metode til miljødeklarering og -klassificering af bygninger.

Ved klassificering af f.eks. det termiske indeklima skal underpunkterne: *undertemperatur*, *overtemperatur*, *træk*, *stråling fra kolde flader* samt *individuelle reguleringsmuligheder* vurderes hver for sig ved hjælp af pointsystemet (forklaringsskema er vist i appendiks E). Hvis der som eksempel tages udgangspunkt i *overtemperatur*, bestemmes klassen ved at vurdere det maksimale temperaturniveau (ud over ekstremt varme dage) som vil forekomme i bygningen. Der foreligger dog ikke nogen definition på ”ekstremt varme dage” i det omtalte projekt [Dinesen et al., 2001], men en metode kunne være at tage udgangspunkt i de anbefalede maksimale toleranceoverskridelser defineret i [DS 474, 1993] og desuden beskrevet og diskuteret i afsnit 2.5.

Til vurdering og bestemmelse af miljøklassen ville det være en bedre og mere præcis metode at benytte PMV-/PPD-indekset til vurdering af det termiske indeklima i en bygning, fremfor at bygge vurdering på en maksimal temperatur. PMV-/PPD-indekset bruges, da der er stor forskel på menneskers termiske oplevelse i et rum, og derfor også ved hvilken temperatur der opnås termisk komfort. Derfor vil det i en fremtidig version være bedre at kunne sætte en grænse for hvor mange procent utilfredse (PPD) der må være, afhængigt af den valgte klasse (A, B eller C).

Ved en optimering af grænserne for underpunkterne i f.eks. den termiske del, kunne der tages udgangspunkt i værdierne fra afsnit 2.2 og 2.3, hvormed den endelige indeklimaklassificering vil bygge på resultater, der fortæller mere om hvordan personerne oplever indeklimaet hvilket i sidste ende vil give en mere nøjagtig klassificering af bygningen.

8.2 KONCEPT 2 - LANGSIGTET KOMFORTINDIKATOR-METODE

I afsnit 2.5 blev en ydeevneindikator udviklet af Brohus et al. [2006] beskrevet. Opsummeret kan konceptet bruges til langsigtet evaluering af indeklimaet på baggrund af en valgt komfortindikator

(PPD, DR, PD etc.). Forskellen mellem metoden og f.eks. DS 474 [1993] er blot, at den medtager størrelsen af overskridelsen i forhold til et fastsat acceptniveau for den valgte komfortindikator, samt benytter mere detaljerede komfortindikatorer fremfor en simpel operativ temperatur.

I nærværende koncept kan ydeevneindikatoren benyttes med varierende komfortindikatorer og acceptniveauer baseret på undersøgelserne beskrevet i afsnit 4 samt 4.2, der således tager personers adaptive adfærd med i betragtning. Eksempelvis vil et acceptniveau, der løbende bestemmes som funktion af udetemperaturen eller den løbende middel-udetemperatur som f.eks. metoden opstillet af van der Linden et al. [2006] være oplagt, idet dette kunne beskrives ved en simpel ligning jf. afsnit 4.1.5. En udskiftning af komfortindikatoren fra den konventionelle PMV-/PPD-metode til en adaptiv model for termisk komfort - f.eks. modellerne beskrevet i kapitel 4 - vil give en ydeevneindikator, der medtager personers adaptivitet i højere grad.

Ydeevneindikatoren er vist ved følgende ligning.

$$PI_{Kum} = \int_{\tau_{start}}^{\tau_{slut}} t_{op}(\tau) d\tau \approx \sum_{n_{start}}^{n_{slut}} t_{op}(\tau) \Delta\tau \quad (8.1)$$

$$PI_{Kum,OA} = \int_{\tau_{start}}^{\tau_{slut}} z(\tau) d\tau \approx \sum_{n_{start}}^{n_{slut}} z(\tau) \Delta\tau \quad (8.2)$$

$$z(\tau) = \begin{cases} t_{op}(\tau) - t_{op,grænse} & \text{hvis } t_{op}(\tau) > t_{op,grænse} \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (8.3)$$

hvor

PI_{Kum}	=	Ydeevneindikator, Kumuleret	[%]
$PI_{Kum,OA}$	=	Ydeevneindikator, Kumuleret, over acceptniveau A	[%-timer]
t_{op}	=	Operativ indetemperatur	[°C]
$t_{op,grænse}$	=	Acceptniveau for operativ indetemperatur	[°C]
τ	=	Tid	[timer]
$\Delta\tau$	=	Tidsinterval (som regel 1 time)	[timer]
τ_{start}	=	Starttid for betragtet periode	[timer]
τ_{slut}	=	Sluttid for betragtet periode	[timer]
n_{start}	=	Start-tidsskridt for betragtet periode	[timer]
n_{slut}	=	Slut-tidsskridt for betragtet periode	[timer]

Konceptet kunne endvidere benyttes i forbindelse med indeklimasimuleringer gennem TBS-programmer.

8.3 KONCEPT 3 - ADAPTIV KONTROLALGORITME (ACA)

I afsnit 4.1.4 blev SCATs²-projektet præsenteret. Kort opsummeret viste resultaterne herfra, at en løbende ændring af setpunktet for indetemperaturen som funktion af den løbende middel-udetemperatur

²[Nicol og McCartney, 2001]

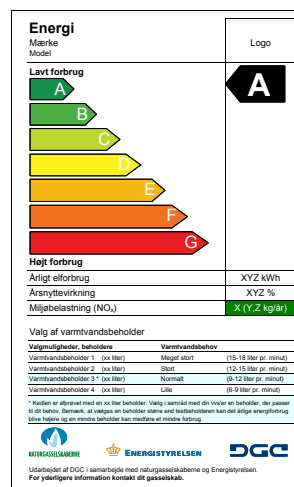
i mekanisk ventilerede bygninger ikke forårsagede væsentlige påvirkninger af den termiske komfort, idet undersøgelserne viste at mennesker søger at opretholde deres termiske komfort gennem f.eks. åbning af vinduer, justering af beklædning og aktivitetsniveau etc. (adaptivitet) [Nicol og McCartney, 2001; McCartney og Nicol, 2002]. Ved stigende udetemperaturer vil setpunktet for indetemperaturen forøges³, men energibesparelser til følge (forudsat at indetemperaturen ikke ligger under setpunktet for opvarmning).

Det vil være oplagt at implementere den adaptive kontrolalgoritme, ACA, i et TBS-program som f.eks. BSim, TRNSYS etc. Kontrolstrategien kan integreres således setpunktet for indetemperaturen løbende gennem simuleringen beregnes ud fra den løbende middel-udetemperatur beskrevet ved ligning (4.13). Simuleringer hhv. med og uden brug af adaptiv kontrolalgoritme kan således benyttes til estimering af energibesparelserne ved sammenligning af simuleringerne.

Implementering af ACA i et TBS-program er forholdsvis simpel, hvilket gør konceptet meget attraktivt at forfølge og bruge. Den adaptive kontrolalgoritme kan endvidere med fordel kombineres med andre indikatorer for bygningers indeklimate og energiydeevne, hvilket vil blive præsenteret og diskuteret senere.

8.4 KONCEPT 4 - INDEKLIMAMÆRKNING

Dette koncept omhandler muligheden for indeklimatemærkning af bygninger. Til klassificering af bygningers indeklimate, kan der udvikles et såkaldt "Indeklimamærke" som pendant til det allerede benyttede energimærke for såvel bygninger som kedler, cirkulationspumper, opvaskemaskiner, køle-/ frysekabe mv. Et eksempel på et energimærke for en gaskedel er vist på følgende figur 8.3.



Figur 8.3: Eksempel på energimærke

Mærket kunne således på baggrund af målinger eller simuleringer klassificere den pågældende bygning til brug ved sammenligning med lignende bygninger. Indeklimamærkningen kunne f.eks. tage udgangspunkt i langsigtede evalueringer af indeklimatet beskrevet i gældende normer f.eks. DS/EN ISO 7730

³jf. ligning (4.19) og (4.20)

[2006]; DS/EN 15251 [2007], hvilket for det termiske indeklima er nærmere beskrevet i afsnit 2.5.

Metode vil dog være svær at realisere på nuværende tidspunkt. Idet indeklimaet ikke kan forventes identisk for samtlige rum i en bygning, rejser det spørgsmålet om hvilke /-et rum, der skal danne ramme for en eventuel indeklimamærkning. Samme problemstilling er faktisk gældende for samtlige af de behandlede koncepter. Parametre såsom orientering, konstruktioner, vinduer, solafskærmning, intern varmebelastning, brugsmønster, ventilation, brugeradfærd etc. har stor indflydelse på indeklimaet, og kan variere meget indenfor samme bygning. Eksempelvis vil et sydvendt kontor med høj intern belastning have meget sværere ved at opnå et godt indeklimamærke fremfor et nordvendt kontor med lav intern varmebelastning i samme bygning. Det vil være for tidskrævende (og dermed også økonomisk krævende) at foretage indeklimamålinger eller -simuleringer på samtlige rum i en bygning, og selvom dette blev gjort, vil indeklimamærkningen af de enkelte rum påvirke brugernes opfattelse af indeklimaet. Hvis et rum f.eks. blev indeklimamærket til kategori "C" vil det have en negativ effekt på opfattelsen af indeklimaet. Så selvom der i store dele af året kan opnås klasse "A" i termisk indeklima, vil indeklimamærket måske medføre, at personerne klassificerer det termiske indeklima dårligere fordi de rent psykisk påvirkes af det aktuelle indeklimamærke. Endvidere foretages indeklimasimuleringer og -målinger sjældent for hele bygningen, men kun for udvalgte rum der har vist eller forventes at få indeklimaproblemer for at undersøge dette.

Ovenstående problemstilling med hvilke /-et rum der skal danne ramme for indeklimamærket kan løses på forskellige måder. Baseret på diverse kriterier kan der opstilles generelle retningslinjer for indeklimamærkningen. F.eks. kan et krav om, at de primære opholdsrum skal overholde et givet sæt betingelser⁴ i en vis procentdel af arbejdstiden.

Herefter rejser spørgsmålet sig hvilken indikator der skal bruges - dels for det termiske komfortniveau men også for de resterende indeklimaaspekter (akustik, belysning etc.). Det er tidligere i denne rapport diskuteret og konkluderet at på trods af manglerne ved PMV- og PPD-indekset, er disse en af de bedste indikatorer for oplevelsen af det termiske indeklima for en stor gruppe mennesker. Svagheden ved denne ligger bl.a. i bestemmelsen af de personlige parametre: aktivitetsniveau og beklædningsisolans, for hvilke PMV- og PPD-indekset er særdeles følsomt overfor⁵. Og det faktum, at de er transiente og således varierer med tiden, kan være svært at tage højde for, hvilket bringer os hen til næste problemstilling ved en eventuel indeklimamærkning. I og med at udeklimaet (og dermed indeklimaet) varierer hen over året, vil et indeklimamærke foretaget på baggrund af en vintersituation være forskelligt fra en sommersituation. Spørgsmålet er således om der skal foretages en indeklimamærkning for hver sæson, den varmeste måned, uge, dag, time eller en middelværdi for hele året? En tilgang kunne være, at foretage en indeklimamærkning på baggrund af ydeevneindikatorerne beskrevet i afsnit 2.5, hvor klassificeringen blev foretaget på baggrund af grænser for de enkelte ydeevneindikatorer.

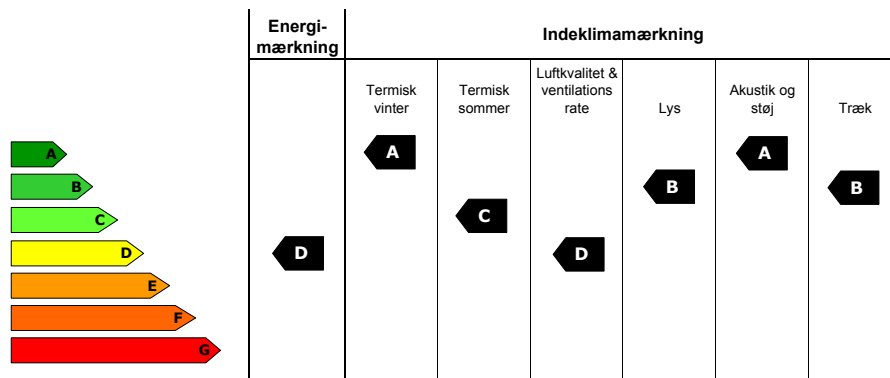
Det vil dog, som beskrevet i afsnit 8.1, være svært at opstille en samlet metode for indeklimamærkning, da der ikke er foretaget mange undersøgelser af de enkelte indeklimaaspekters indbyrdes indflydelse. Eksempelvis vil summeringen af antal utilfredse med det generelle termiske indeklima med antal utilfredse p.g.a. dårlig belysning eller akustikken være problematisk. Et eventuelt indeklimamærke må altså, indtil der er foretaget flere undersøgelser af korrelationen mellem simultant virkende indeklimaparametre, gives for hvert enkelt område (termisk, atmosfærisk, akustisk etc.). Dog bør det nævnes, at selv ved fokusering på termisk indeklima alene, er der problemet med summation af antal utilfredse med hensyn til hhv. global og lokal diskomfort, hvilket er beskrevet nærmere i afsnit 3.5.6.

Nedenstående figur 8.4 viser et forslag til, hvordan de forskellige indeklima områder kan mærkes

⁴F.eks. langsigtede evalueringer af forskellige komfortindikatorer som beskrevet i afsnit 2.5

⁵afsnit 3.5.4

sammen med energimærket. Hermed vil det være muligt at medtage indeklimaets betydning ved en samlet mærkning af bygningen.



Figur 8.4: Eksempel på energimærkning sammen med en indeklimamærkning af de enkelte indeklimaparametre (fra www.dgc.dk)

Et forslag til en samlet mærkning af indeklimaet i et energi/indeklima certifikat for en bygning, kan nedenstående grundprincip bruges. Som det ses går indeklimamærkningskalaen fra A til J og indeholder derfor nogle flere kategorier end den oprindelige energimærkning (ses af ovenstående figur). Men da det ikke er nødvendigt at mærke en bygning for energi og indeklima efter samme skala, kunne det være et forslag at benytte to forskellige mærkningsordninger for hhv. energi og indeklima.

- A:** 6 parametre i klasse A
- B:** 4 parametre eller mere i klasse A og 2 parametre eller mindre i klasse B
- C:** 2 parametre eller mere i klasse A og 4 parametre eller mindre i klasse B
- D:** 6 parametre i klasse B
- E:** 4 parametre eller mere i klasse B og 2 parametre eller mindre i klasse C
- F:** 2 parametre eller mere i klasse B og 4 parametre eller mindre i klasse C
- G:** 6 parametre i klasse C
- H:** 4 parametre eller mere i klasse C og 2 parametre eller mindre udenfor klasse C
- I:** 2 parametre eller mere i klasse C og 4 parametre eller mindre udenfor klasse C
- J:** 6 parametre udenfor klasse C

På baggrund af ovenstående diskussion kan det således konkluderes, at en egentlig indeklimamærkning af bygninger på nuværende tidspunkt er mere eller mindre urealiserbar, men kan ikke udelukkes for fremtiden.

8.5 KONCEPT 5 - ECO-FACTOR-BASEREDE KONCEPTER

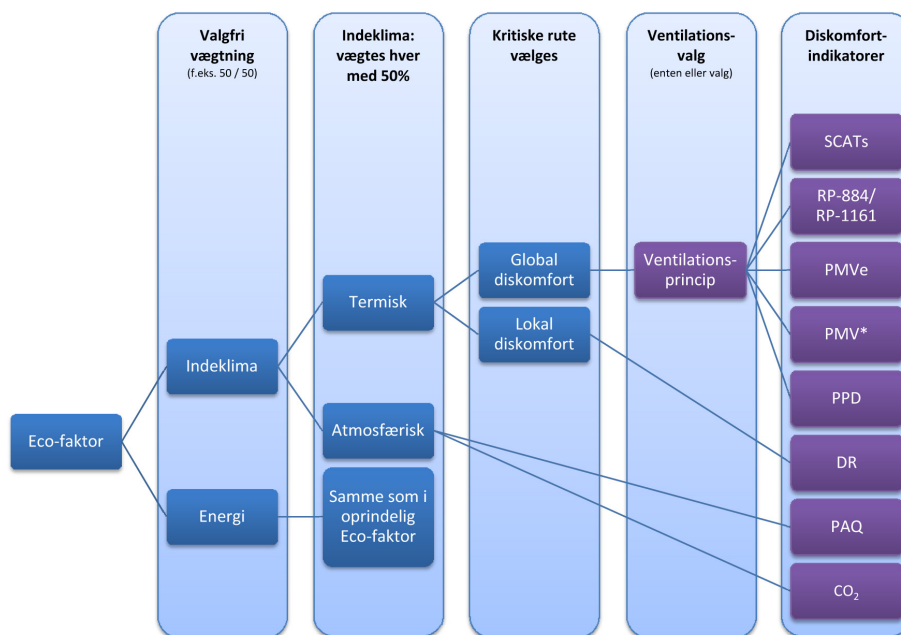
Følgende afsnit beskriver forskellige koncepter baseret på Eco-faktoren [Bjørn et al., 2004]. Der tages udgangspunkt i den allerede udviklede Eco-factor-metode, hvorefter mulighederne for enten

udvidelse eller optimering søges og beskrives i nye koncepter. Eco-factor-metoden er nærmere beskrevet i afsnit 6.2.

8.5.1 KONCEPT 5A - OPTIMERING AF INDEKLIMADEL

Følgende koncept bygger, som tidligere nævnt, på Eco-factoren, som er udviklet af Bjørn et al. [2004]. Ideen i det nye koncept er at bibeholde selve energidelen i Eco-factoren men videreudvikle indeklimadelen med mere detaljerede ydeevneindikatorer. Hermed vil det være muligt i en designfase, eller mere aktuelt, i en projekteringsfase, at give et bedre og mere kvalificeret bud på det fremtidige indeklima ved forskellige designløsninger.

Indeklimamodulet i det nuværende Eco-factor tager både termisk (PMV/PPD, træk, strålingsasymmetri, etc.) og atmosfærisk (olf og CO₂) indeklima med i beregningen, hvor begge parametre vægtes med 50%. Denne vægtning kan dog ændres af brugeren såfremt der ønskes en anden ændring. Beregningen af den atmosfæriske del i indeklimamodulet bibeholdes som den er ved momentane beregninger, men kan evt. senere videreudvikles med mere detaljerede beregninger, hvilket dog ikke er behandlet i nærværende projekt. Adaptive modeller for estimering af termisk komfort, som f.eks. modellerne beskrevet i kapitel 4, kan implementeres istedet for de eksisterende PMV-/PPD-metoder. Ved brug af disse adaptive modeller, skal det være muligt at kunne skelne mellem naturlig ventilerede og mekanisk kølede bygninger, for på den måde at kunne tage adaptiviteten med i beregningen. Konceptet er illustreret grafisk på følgende figur 8.5.



Figur 8.5: Optimering og udvidelse af indeklimadelen i Eco-factor-konceptet. Der gøres brug af den nyeste viden indenfor hhv. den termiske- og atmosfæriske del i beregningen af Eco-factoren. Desuden vil det fremover være muligt at skelne mellem naturlig ventilerede og mekanisk kølede bygninger, da ligningerne og beregningsproceduren bagved er forskellig.

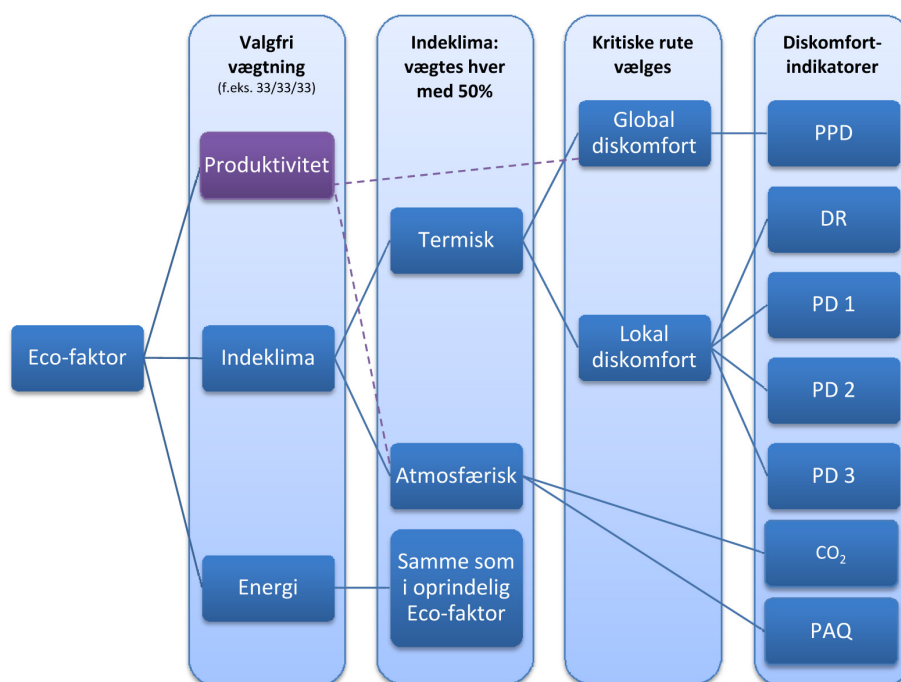
Af figur 8.5 ses det, at konceptet og ideen bag Eco-factor-metoden bibeholdes. Der vil dog, som nævnt

ovenfor, foretages opdateringer/udvidelser af det termiske modul, hvorved outputtet fra Eco-factor-beregningen vil være mere præcis i forhold til den oprindelige Eco-factor-metode. Udvidelsen af Eco-factor-metoden med valget mellem ventilationsprincipper/bygningstype, vil give en større frihed til designeren samt en mere nøjagtig beregning af indeklimadelen og dermed også den samlede Eco-factor.

8.5.2 KONCEPT 5B - UDVIDELSE MED PRODUKTIVITET

I ovenstående afsnit blev der set på en opdatering af indeklimadelen i Eco-factor metoden. En anden ide til en udvidelse af Eco-factoren kunne være at kombinere metoden med produktivitet og dermed få brugernes præstationsevne med i vurderingen af de enkelte designløsninger som beskrevet i kapitel 5. Herved vil det være muligt, ud fra de indtastede data i indeklimamodulet, at kunne beregne en produktivetsforringelse angivet i procent som følge af dårligt indeklima. Det vil være muligt at angive produktivetsnedsættelsen i forhold til flere af de allerede beregnede indeklimaparametre i indeklimamodulet som f.eks. operativ temperatur, PMV/PPD, oplevet luftkvalitet, osv. Indeklimaparametrene er beskrevet og diskuteret i kapitel 5.

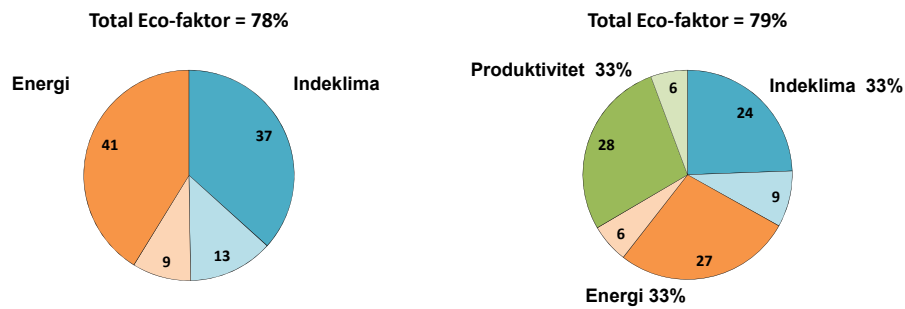
Efter beregning af brugernes nedsatte præstationsevne som følge af f.eks. høj indetemperatur, og dermed bygningsejerens tabte produktivitet, kan resultatet sammenlignes og vægtes sammen med indeklima- og energidelen i Eco-factor konceptet. Det nye koncept med udvidelse af en produktivetsdel i Eco-factoren er vist nedenfor i figur 8.6:



Figur 8.6: Udvidelse af Eco-faktoren, hvor produktivitet tages med i vurderingen af den samlede Eco-factor på lige fod med indeklima og energi aspektet. Produktivitetsforringelsen bestemmes på baggrund af beregninger udført i indeklimateksten (indetemperatur, luftkvalitet og luftmængde). Yderligere vil det være nødvendigt for brugeren, at fastsætte en vægtning mellem det nye produktivetsaspekt samt indeklima- og energidelen.

En udvidelse med tabt produktivitet vil give et godt økonomisk indblik i, hvad designeren (og ikke mindst brugeren og bygningsejeren) kan få ud af at forbedre det termiske og atmosfæriske indeklima i bygningen, og samtidigt have det energimæssige aspekt med i vurderingen. Endvidere vil det være muligt, for f.eks. en virksomhed, at sammenkæde en produktivitetsforøgelse direkte med en økonomisk gevinst.

Vægtningen mellem de tre parametre (energi, indeklima og produktivitet) skal være op til den enkelte bruger af programmet, men en evt. vægtning på 1/3 for hver af modulerne kan være et forslag. Figur 8.7 viser et eksempel på resultatet af en beregning fra den oprindelige Eco-factor-metode (diagram til venstre) og det nye koncept hvor produktiviteten tages med i beregningen (diagram til højre).



Figur 8.7: Sammenligning af resultat cirkeldiagram fra Eco-faktoren fra hhv. den oprindelige metode (diagram til venstre) og det nye udviklede koncept (diagram til højre), hvor produktivitet medtages. I begge metoder er der brugt samme værdier for beregning af energi- og indeklimateco-faktor. I det nye koncept er der som eksempel brugt en vægtfaktor på 33% mellem de forskellige moduler.

Figur 8.7 giver et godt overblik over hvilke områder der kan optimeres, indenfor hvert Eco-factor-modul (indeklimateco-faktor, energi og produktivitet).

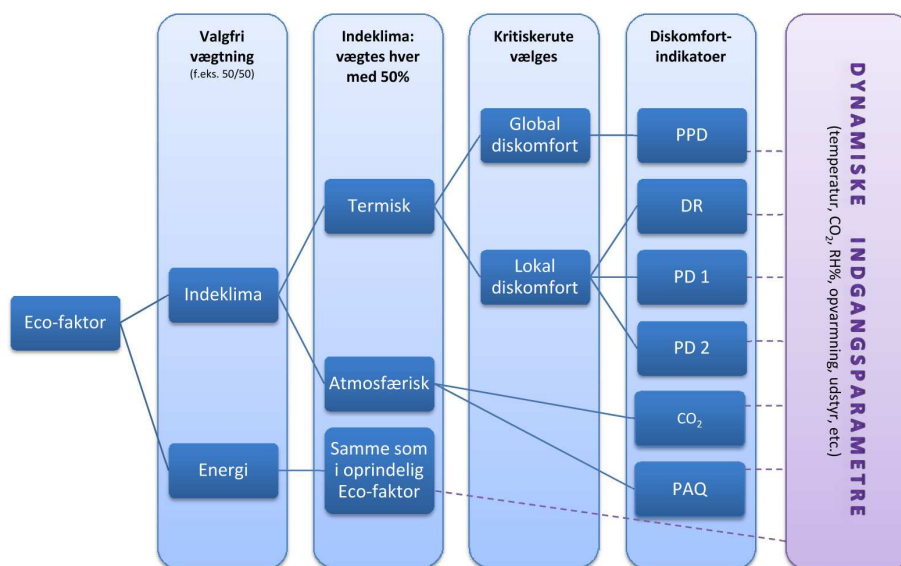
8.5.3 KONCEPT 5C - DYNAMISK BEREGNING

For indeklimateco-faktoren bygger det oprindelige Eco-factor-koncept på en stationær situation, hvor f.eks. den globale diskomfort i indeklimateco-faktor beregnes ud fra forudsætninger, omkring indetemperatur, beklædningsisolans, aktivitetsniveau etc. I en designfase i et projektforsøg vil en stationær betragtning være den maksimalt mulige detaljeringsgrad af de indgående parametre, bl.a. fordi informationerne på design-stadiet er begrænsede. Derimod vil det senere i projektforsøget, f.eks. i projekteringsfasen, være muligt at gøre brug af resultater fra et TBS-program ved en Eco-factor-beregning. Simuleringsprogrammet vil give resultater for både indeklimaet (temperaturer, CO₂-koncentrationer, relativ fugtighed etc.) samt energiforbruget til opvarmning ud fra et givet udeklima - f.eks. det danske design-reference-år DRY⁶ samt konstruktionsopbygninger og interne belastninger etc.

Konceptet hvor implementering af simuleringsresultater i den oprindelige Eco-factor-metode, vil give et bedre værktøj til designere og bygningsejeren ved vurdering af forskellige designløsninger samt mere detaljerede informationer omkring det termiske og atmosfæriske indeklimas ydeevne. Det skal dog stadig være muligt for designeren og bygningsejeren at bruge værktøjet i en designfase (stationær), hvilket kan gøres ved at bruge Eco-factor-metoden som den er i sin oprindelige form.

Følgende figur 8.9 illustrerer hvordan udbyggelsen af Eco-factor-metoden foretages. De enkelte diskomfort-indikatorer samt energiforbruget beregnes på baggrund af resultater fra en termisk bygningssimulering, hvorved indgangsparametrene varierer over året.

⁶Design Reference Year (DRY); Vejrdata til brug i f.eks. BSIm



Figur 8.8: Optimering af de indgående parametre for beregningen af hhv. indeklimate og energidelen i Eco-factor-metoden. Konceptet bygger på udvidelse af de stationære beregningsmetoder til en dynamisk betragtning istedet, ved f.eks. at gøre brug af simulerede data fra et TBS-program som BSim.

Ved udbyggelse af Eco-factor-værktøjet vil der således blive foretaget en beregning af den totale Eco-factor for hvert tidsskridt i resultat-filen fra TBS-programmet (karakteristisk tidsskridt på en time over en periode på f.eks. et år). Outputtet fra en beregning efter det nye koncept vil, ved en betragtet periode på et år, give 8760 Eco-faktorer, hvorefter der efterfølgende kan foretages en statistisk bearbejdning af resultaterne (fordeling, middelværdi, maksimum- og minimum, standardafvigelse etc.) for den pågældende designløsning og herefter sammenlignes med andre løsninger.

I stedet for at beregningerne af de enkelte parametre for hhv. indeklimate og energi gøres i Eco-factor-værktøjet i et særskilt regneark, vil det i fremtiden være en bedre ide (og ikke mindst hurtigere), at implementere konceptet og metoderne direkte i TBS-programmet. Herved får designeren, i en projekteringsfase, resultaterne af Eco-factoren direkte ved de forskellige designløsninger og hurtigt kunne give en vurdering af arkitektens, ingeniørens eller bygningssejers ideer og forslag til optimering gennem projektfasen.

Det dynamiske aspekt i det nye Eco-factor-koncept vil give større mulighed samt øget information for designeren og bygningssejeren omkring forskellige forbedringer. Endvidere kan der ved en udvidelsen gøres brug af konceptet præsenteret i afsnit 8.2 samt de langsigtede evalueringer beskrevet i afsnit 2.5, ved f.eks. at fastsætte en øvre grænse for accepteret Eco-factor, hvormed det vil give designeren mulighed for at finde de tidspunkter, hvor der er brug for optimering af enten energiforbruget eller det termiske og/eller atmosfæriske indeklimate (energi- eller indeklimate delen i Eco-factoren).

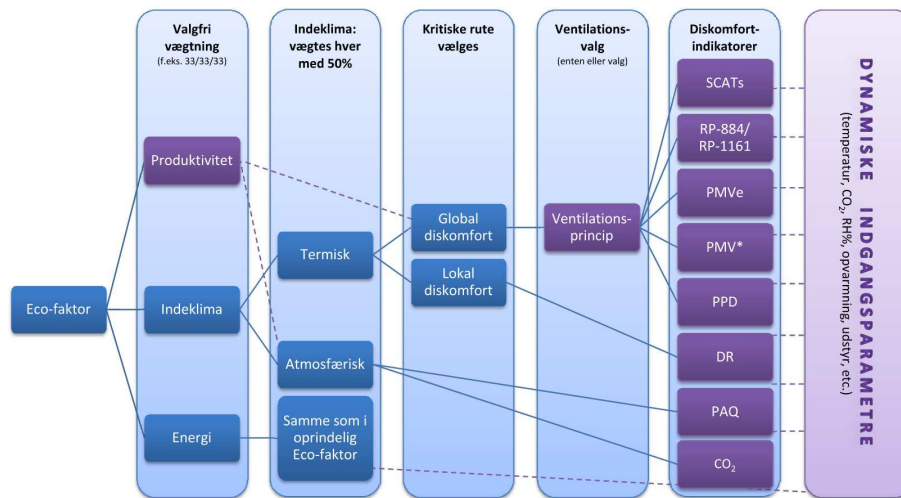
8.5.4 KONCEPT 5D - SAMLET UDVIDELSE AF ECO-FACTOREN

I de ovenfor beskrevet koncepter, er der udarbejdet tre forskellige udvidelser af den oprindelige Eco-factor, med det formål at forbedre og optimere metoden ved brug af den nyeste viden indenfor om-

rådet. Ydermere er det tiltænkt at gøre brug af alle tre nye koncepter i ét nyt og samlet koncept, hvor det fremtidige Eco-factor-værktøj vil inkludere en optimeret indeklimaldel, tage produktiviteten med i beregning samt bruge dynamiske data som indgangsparametre.

Det vil stadig være muligt at indtaste faste værdier for indeklima- og energidelen, når det kun er muligt at udføre stationære beregninger f.eks. i starten af et projektforsløb (designfasen), hvor informationerne for mere detaljerede beregninger ikke er tilstede.

Figur 8.9 viser kombinationen af de tre koncepter beskrevet ovenfor i en samlet udvidelse af Eco-factoren.



Figur 8.9: Samlet opgradering samt udvidelse af Eco-factor konceptet ved implementering af de ovenfor beskrevne metoder til optimering af det oprindelige koncept. Eco-factor metoden optimeres ved udvidelser og opgraderinger indenfor indeklimaldelen, ekstra produktivetsled samt dynamiske beregninger.

Det nye koncept, vil give mere præcise beregninger af indeklimaldelen samtidigt med, at de dynamiske indgangsparametre vil gøre beregningen mere detaljeret og informativ. Yderligere vil det være muligt at se hvordan produktiviteten, for f.eks. en virksomhed, varierer som funktion af inde-temperaturen, luftkvaliteten eller luftskiftet over en karakteristisk periode på f.eks. et år.

Opsummeret vil der være store muligheder med disse udvidelser og helt klart størst potentiale i at kombinere og implementere ovenstående koncepter i én samlet Eco-factor.

8.6 OPSUMMERING OG DISKUSSION

I dette afsnit opsummeres og diskuteres de enkelte koncepter, der er præsenteret i de foregående afsnit. Koncepterne varierer i detaljeringsgrad - bl.a. i afhængighed af fokuseringsområde (termisk indeklima, luftkvalitet, økonomi (herunder produktivitet), energi og miljø) samt i hvilke faser af byggeriet det enkelte koncept er tiltænkt benyttet (design-, projekterings- og afleveringsfase samt eksisterende bygninger).

I følgende tabel 8.2 opsummeres de i foregående afsnit præsenterede koncepter:

Tabel 8.2: Opsummering af koncepter. Tabellen angiver hvorvidt det pågældende koncept kan benyttes til momentan eller langsigtet evaluering samt i hvilke byggefaser det kan bruges

Koncept	Fokus ¹⁾	Evalueringsmetode		Byggefase				
		Momentan	Langsigtet	Prædesign	Projekt.	Afløv.	Eksist.	
1	Generel metode	It,Ia,Iak, L,E,P	✓	✓	✓	✓	✓	✓
2	Komfortindikator	It,Ia,Iak, L	✓	✓	✓	✓	✓	✓
3	ACA	E		✓	(✓)	✓	✓	✓
4	Indeklimamærkning	It,Ia,Iak, L	✓	✓	(✓)	✓	✓	✓
5	Eco-factor	It,Ia,Iak, L,E,P	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Note 1:
 It = termisk indeklima, Ia = atmosfærisk indeklima, Iak = akustisk indeklima
 L = Lys, E = energi, P = produktivitet, ACA: Adaptiv kontrolalgoritme

For koncept 5 er det tiltænkt at kombinere de opstillede koncepter 5a-5c, således en samlet ydeevneindikator for det termiske og atmosfæriske indeklima med samtidig fokus på energi, produktivitet og økonomi kan opstilles. Kombinationsmulighederne er mange, men formålet med nærværende projekt er netop, med henvisning til problemanalysen og -formuleringen i afsnit 1.3, at finde en ydeevneindikator til brug ved såvel langsigtet som momentan evaluering af det termiske og atmosfæriske indeklima i både nye og eksisterende bygninger. Indikatoren skal foruden indeklimaaspektet tage hensyn til energien.

Det videre arbejde med opstilling af ydeevneindikatorer kan på baggrund af det ovenstående opdeles i følgende:

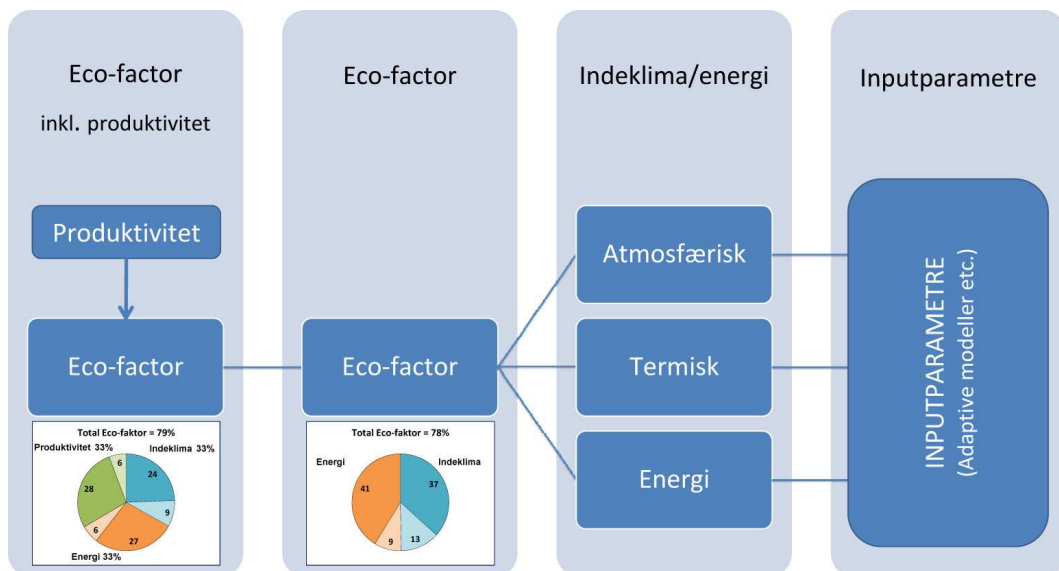
- **Termisk og atmosfærisk indeklima**
 1. Ydeevneindikator for **stationære** forhold
 2. Ydeevneindikator for **dynamiske (langsigtede)** forhold
- **Energi**
 1. Energiforbrug
 2. Miljøbelastning

Med opstillingen af ydeevneindikatoren skal der endvidere tages hensyn til de faser hvori det er tiltænkt at indikatoren skal benyttes. Tidligt i byggefasen er mange af de nødvendige parametre for indeklimaanalyser ikke fastlagt i detaljer, og muligheden herfor er heller ikke eksisterende. Det er således nødvendigt, at indikatoren er fleksibel og kan bruges ved projekter i samtlige af dets faser.

Metoderne beskrevet i afsnit 8.2 og 8.3 tager kun hensyn til hhv. indeklima og energi hver for sig, og er således ikke fyldestgørende i sig selv for nærværende projekts formål. I afsnit 8.4 blev der set på en samlet metode for mærkning af en bygnings indeklima, der sammen med det allerede eksisterende energimærke kunne bruges til en samlet klassificering af en bygnings indeklima- og energi ydeevne. Problemet med konceptet er imidlertid, som beskrevet tidligere, at realisere dette idet indeklimaet langt fra er homogent i hele bygningen. Endvidere er konceptet ikke fordelagtigt for brug

i de varierende faser af byggeriet, hvilket er ønsket. Udbyggelsen af metoden for miljødeklarering af bygninger, hvor indeklimadelen optimeres ved implementering af de termiske indekser (PMV, PPD, DR og PD), der foruden miljø- og energidelen tager hensyn til både termisk, atmosfærisk og akustisk indeklima samt dags- og kunstlys. Forskellen mellem dette koncept og Eco-factor-konceptet ligger bl.a. i, at de enkelte bygningsmaterialers livscyklus (LCA) og derved miljøbelastningen medtages i miljødeklareringen, hvilket ud fra et miljømæssigt synspunkt er fordelagtigt. Problemet med metoden/konceptet er imidlertid, at livscyklusanalyser foretages gennem specielle programmer såsom BEAT. Endvidere er det et omfattende værktøj, der er svært at benytte tidligt i designfasen for et byggeri.

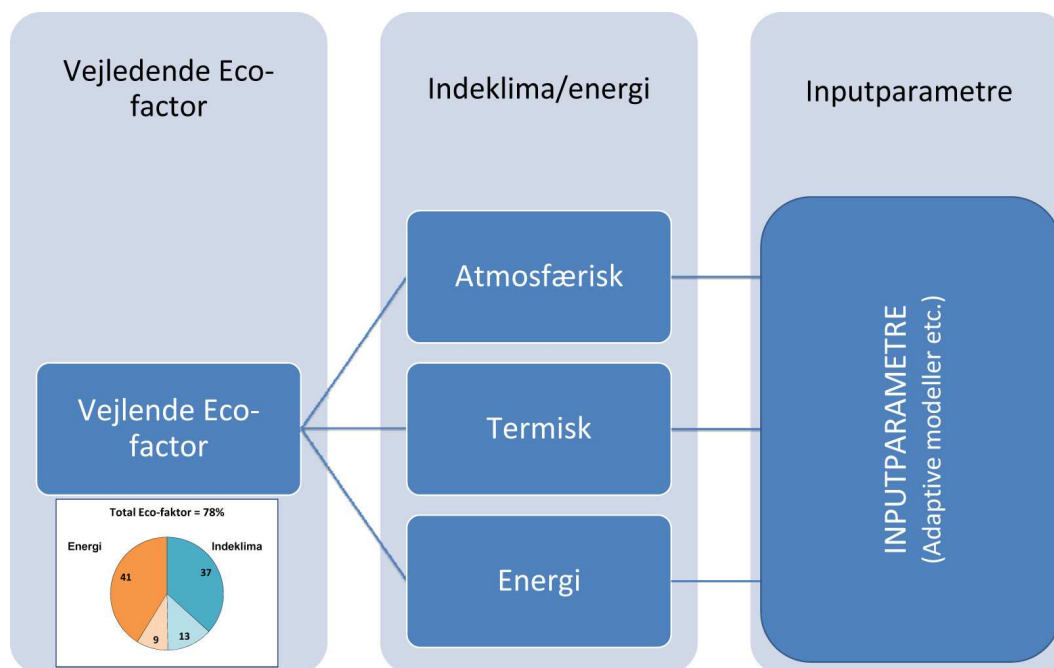
Idet der ønskes en samlet indikator, der tager hensyn til både termisk og atmosfærisk indeklima såvel som energi, vil en udbygning af Eco-factor-metoden være fordelagtig (8.5). Metoden kan, afhængig af de valgte indikatorer for termisk komfort og luftkvalitet mv., benyttes til såvel momentan som langsigtet evaluering af en bygnings indeklima- og energiydeevne. Som foreslået i afsnit 8.5 vil en implementering af adaptive modeller for termisk komfort, produktivitet mv., give en mere detaljeret udgave af Eco-factoren, der foruden det indeklima- og energimæssige aspekt, kan bruges ved evaluering af produktiviteten i et givet termisk og atmosfærisk indeklima. Følgende figur viser grundprincippet i det valgte koncept.



Figur 8.10: Implementering af adaptive modeller samt produktivetsmodeller i Eco-factor-konceptet

Her må der nødvendigvis henvises til diskussionerne af de adaptive modeller samt modellerne for produktivetsforringelse i afsnit 4.4 hhv. 5.6. Som det blev diskuteret her, er validiteten af de enkelte modeller langt fra tilstrækkelig til at "afløse" de eksisterende metoder for evaluering af termisk indeklima, og det samme gør sig gældende for modellerne for produktivetsforringelsen. En direkte erstatning af de eksisterende komfortindikatorer kan således ikke foretages i nærværende projekt og ej heller implementeringen af modellerne for produktivetsforringelsen. Dog tillader det valgte koncept en senere implementering uden påvirkning af det eksisterende. De adaptive modeller implementeres kun vejledende sammen med forskellige komfortindikatorer beskrevet i projektets første del, således dette ikke påvirker Eco-factoren i dens oprindelige udformning. Ved evaluering af bygningers termiske og energimæssige ydeevne ved brug af Eco-factoren, kan de alternative evalueringsmetoder

gennem de adaptive modeller samt komfortindikatorerne således benyttes som vejledning. Følgende figur viser konceptet som vil blive udarbejdet i detaljer i det følgende.



Figur 8.11: Implementering af adaptive modeller mv. i Eco-factor-konceptet som vejledende alternativ til den konventionelle Eco-factor.

Udover Eco-factor-beregninger for stationære tilfælde, vil konceptet i det følgende blive udvidet med en beregning af Eco-factoren på baggrund af data fra TBS-programmer, hvorpå der foretages statistisk bearbejdning med henblik på langsigtet evaluering af bygningers termiske og energimæssige ydeevne gennem Eco-factoren.

Foruden ovenstående Eco-factor-koncept, vælges det at fokusere på den adaptive kontrolalgoritme, idet konceptet er forholdsvist let at implementere i et TBS-program. Det er her valgt at foretage implementeringen i TBS-programmet BSim, hvilket gøres i samarbejde med SBI⁷. Simuleringer med og uden brug af ACA muliggør en estimering af energibesparelsespotentialt.

En kort opsummering af det ovenstående giver følgende to koncepter, der videreudvikles i det følgende:

1. Eco-factor-koncept

- Det oprindelige Eco-factor-koncept bevares uændret
- Adaptive modeller implementeres kun som vejledning (RP-884, SCATs, Hollandske ATG, PMVe)
- Komfortindikatorer implementeres kun som vejledning (DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] og Brohus et al. [2006])

⁷Statens Byggeforskningsinstitut

- Muligheden for implementering af data (termisk og atmosfærisk indeklime samt energi) fra TBS-programmer opstilles
- Langsigtet evaluering ved brug af Eco-factoren opstilles.
- Konceptet benyttes for to bygninger opbygget i BSim - en naturligt ventileret og en fuldt luftkonditioneret bygning med mekanisk køling.

2. **Adaptiv kontrolalgoritme (ACA)**

- Styring af setpunkter for indetemperaturen efter adaptiv kontrolalgoritme (ACA) implementeres i BSim.
- Energibesparelspotentialet undersøges ved simulering af en fuldt luftkonditioneret bygning med mekanisk køling i BSim.
- Det termiske indeklime efter implementering af den adaptive kontrolalgoritme sammenlignes med forholdene før implementeringen.

I følgende kapitel 9, vil koncepterne blive udarbejdet i detaljer.

Analyse og implementering af valgte koncepter

9

I det følgende afsnit vil der blive foretaget en detaljeret gennemgang samt udarbejdelse af de valgte koncepter fra afsnit 8.6.

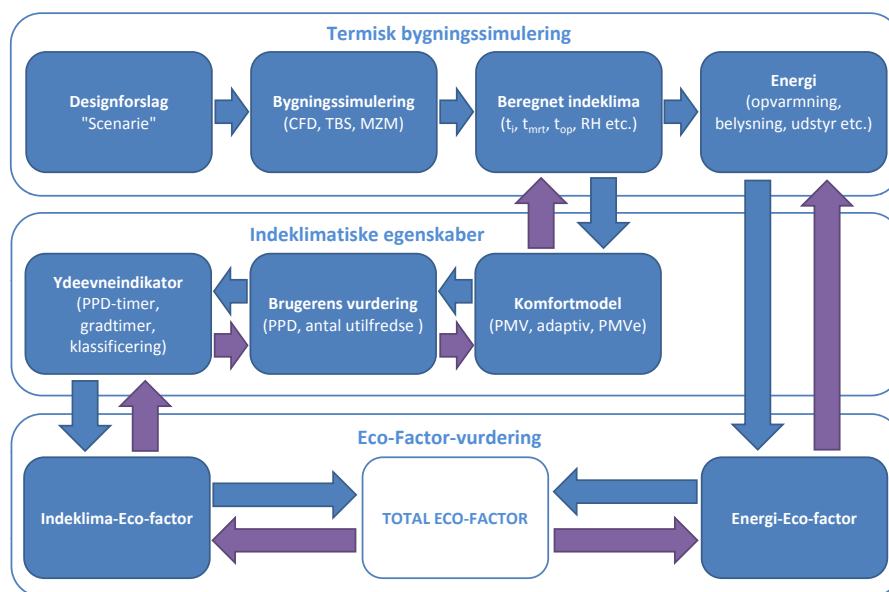
Det første afsnit der beskrives herunder omhandler udvidelsen af Eco-factoren, hvor der vil blive fokuseret på ideen bag denne samt implementeringen af udvalgte ligninger og modeller.

Det andet afsnit omhandler en beskrivelse og udarbejdelse af ACA-konceptet samt implementeringen af Adaptiv kontrolalgoritme (ACA) i BSim.

9.1 ECO-FACTOR MED OPTIMERET INDEKLIMADEL SAMT DYNAMISK BEREGNING

Det er i ovenstående afsnit 8.6 besluttet at arbejde videre med en udvidelse samt optimering af det eksisterende Eco-factor-koncept. Som tidligere beskrevet, fokuseres der udelukkede på en optimering af Indeklima-Eco-factoren, hvor der afgrænses til at videreudvikle det termiske modul med nye metoder til vurdering af indeklima (PPD-timer, adaptive modeller etc.) samt muligheden for at tage hensyn til menneskets påvirkning af de termiske indeklimaparametre ved brug af dynamiske beregningsmetoder. Energi-Eco-factoren bibeholdes uden ændringer. Dog vil beregningen af det indgående energiforbrug blive foretaget automatisk ud fra den importerede resultatfil fra TBS-programmet. Ydermere er der foretaget en udvidelse til beregning af effektfaktoren for køleanlæg (COP) til brug ved mekanisk kølede bygninger.

Ved de udførte implementeringer samt optimering af den oprindelige Eco-factor-metode, vil resultatet af den totale Eco-factor give et mere detaljeret resultat og endvidere en fordeling over den beregnede periode (ofte en periode på et år). De mange resultater over en årlig periode, kan efterfølgende behandles og bearbejdes statistisk (middelværdien, spredning mv.). Resultaterne kan efterfølgende bruges til f.eks. sammenligninger af forskellige designløsninger. Der kan således gives et antal forslag til forskellige designmuligheder i starten af en projektfase, hvorefter den "bedste" eller mest optimale designløsning kan udvælges for videre projektering. Grundprincippet i et simuleringsforløb kombineret med en vurdering af de indeklimatiske forhold (komfortmodel og ydeevneindikator) samt Eco-factor-metoden kan skitseres ved figur 9.1.



Figur 9.1: Fremgangsmåde for simulering af en bygnings indeklima (bygningssimulering) med en efterfølgende kvantificering af brugernes opfattelse af det simulerede indeklima og vurdering ved brug af Eco-factor-værktøjet. Typisk anvendes bygningssimuleringen til at analysere et scenario (blå pile), hvor effekten kvantificeres ved bestemmelse og sammenligning af en eller flere ydeevneindikatorer. Men ydeevneindikatoren eller Eco-factoren kan også angive en grænse for acceptabelt indeklima, hvorved processen forløber den modsatte vej - dvs. der er tale om et design af bygningen (lilla pile). ([Bendtsen og Sørensen, 2005])

Af figuren ses det, at bygningens indeklima samt energiforbrug kan simuleres dynamisk på baggrund af en række inputparametre, der geometrisk beskriver bygningen samt belastningerne som en funktion af tiden (personer, udstyr, lys, udeklima etc.). Inputparametrene samles i et designforslag (scenario), fra bygherren, arkitekten og ingeniøren, der efterfølgende anvendes som input i bygningssimuleringsprogrammet. Der kan, som nævnt ovenfor, anvendes forskellige scenarier, der beskriver forskellige kombinationer af designmuligheder, udeklimaforhold, interne belastninger osv. Ved det valgte scenario som input til f.eks. TBS-programmet, foretages en simulering af bygningens indeklima, som resulterer i et output, der beskriver en række indeklimatiske forhold som funktion af tiden.

Som vist på figur 9.1 anvendes resultatet fra bygningssimuleringen (operativ temperatur, relativ luftfugtighed, energiforbrug etc.) som input til evaluering af bygningens indeklima og energiforbrug, udtrykt ved en ydeevneindikator som Indeklima-Eco-factoren og Energi-Eco-factoren - dvs. en kvantificering af resultatet fra bygningssimuleringen.

Den efterfølgende databehandling af resultaterne fra bygningssimuleringen til evaluering af de indeklima- og energimæssige forhold kræver, at der defineres følgende i Eco-factor-konceptet:

1. En eller flere komfortmodeller til estimering af brugernes komforttilstand (f.eks. udbygning af eksisterende model).
2. En gennemgang af de indgående faktorer til beregning af energiforbruget samt udvidelse til es-

timering af COP-faktoren.

3. En definering af ydeevneindikator til evaluering af Eco-factoren samt indeklimaets ydeevne.

I de følgende afsnit 9.1.1 og 9.1.3 beskrives og diskuteres de valgte komfortmodeller og ydeevneindikatorer til brug i det udvidede Eco-factor-koncept.

9.1.1 KOMFORTMODELLER

Hovedformålet med en komfortmodel er at kunne evaluere brugernes tilfredshed (oftest beskrevet ved utilfredshed), med det pågældende indeklima i bygningen. Der forefindes flere forskellige komfortmodeller til evaluering af det termiske indeklima og de kan meget firkantet set opdeles i to typer [Nicol og Humphreys, 2002a]:

- En ”statisk” komfortmodel - det antages at brugernes termiske komfortgrænser er stationære (nærmere forklaret i kapitel 3).
- En ”adaptiv” komfortmodel - det antages at brugernes termiske komfortgrænser er påvirket af den adfærdsmæssige, fysiologiske og psykologiske adaptivitet (nærmere forklaret under kapitel 4).

Under brugen af statiske komfortmodeller antages det, at menneskerne i bygningen er *passive modtagere* med statiske egenskaber som udelukkende styres af fysiologiske mekanismer. Modsat medtager adaptive komfortmodeller de adfærdsmæssige, fysiologiske og psykologiske egenskaber hos personerne, som f.eks. forventningen til indeklimaet baseret på forudgående hændelser, hvilket kan have afgørende betydning for brugernes accept af komfortgrænserne i bygningen. [Bendtsen og Sørensen, 2005; Fanger og Toftum, 2002; Nicol og Humphreys, 2002a]

Der forefindes mange forskellige statiske og adaptive komfortmodeller, som kunne medtages i udvidelsen og optimeringen af beregningsrutinerne i den oprindelige Eco-factor. I det ovenfor beskrevne litteraturstudie (afsnit 3 og 4), er de mest betydningsfulde og velanerkendte modeller gennemgået og diskuteret. Der vil derfor i det nedenstående blive gjort rede for valget af de komfortmodeller, både statiske og adaptive, der vil blive implementeret i det nye udvidede koncept. Der er foretaget en opdeling af beskrivelsen af modellerne i hhv. statiske og adaptive komfortmodeller.

Statiske komfortmodeller

Statiske komfortmodeller anvendes i vidt omfang i praksis ved vurdering af (fremtidige) komfortbetingelser i bygninger. Både danske og internationale standarder for vurdering af anbefalet termisk indeklima bygger på komfortmodeller med statiske egenskaber, f.eks. DS 474 [1993]; DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] og ANSI/ASHRAE 55 [2004]. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

Nedenstående opsummerer kort nogle af de statiske komfortmodeller der findes:

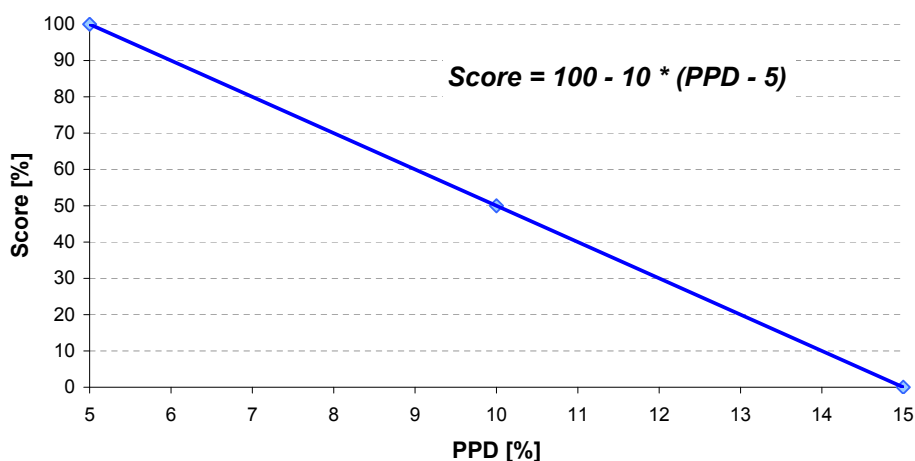
- Global diskomfort

- PMV/PPD-indeks (afsnit 3.2 og Fanger [1972])
- ET*-DISC: New Effective Temperature (afsnit 3.8 og ASHRAE [2005])
- PMV*/PPD*-indeks: kombination mellem PMV-ligningen og indetemperaturen udtrykt ved ET* (afsnit 3.8)
- Lokal diskomfort
 - Metoder til estimering af antal utilfredse som følge af lokal diskomfort i forhold til træk, strålingstemperatursymmetri, vertikal temperaturgradient og varmt eller koldt gulv (afsnit 3.6 og DS/EN ISO 7730 [2006]; Fanger et al. [1988])

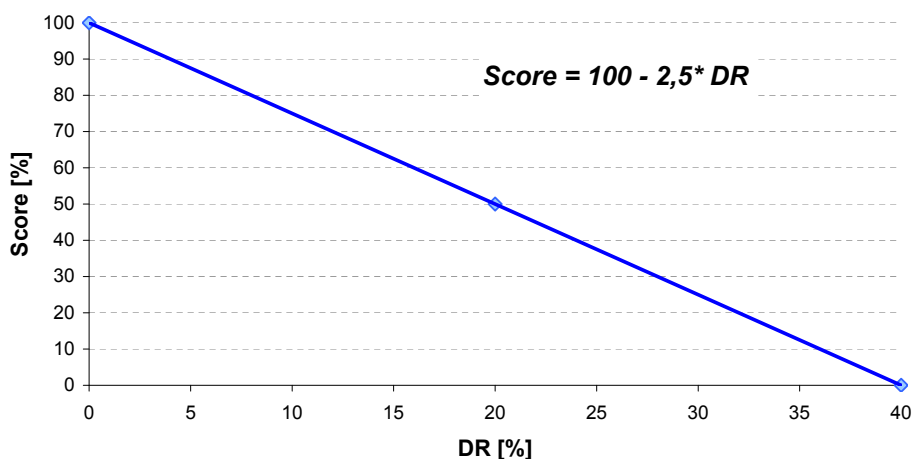
Af ovenstående liste er det ikke alle komfortmodeller der er implementeret i Eco-factoren. F.eks. er det i litteraturstudiet (afsnit 3.8.1) fundet, at ET* og PMV* ikke er anvendeligt i dette værktøj.

Global diskomfort

Den oprindelige Eco-faktor-metode gør brug af PMV/PPD-modellen til vurdering af det globale termiske miljø ud fra faste værdier af de indgående parametre - enten ud fra en stationær betragtning eller ved brug af eksempelvis en 95%-fraktil fra en TBS-beregning (jf. Brohus [2006]). De beregnede procent utilfredse (PPD) korresponderer direkte til en score for det globale termiske indeklima i intervallet 0-100%, der sammenlignes med de beregnede score-værdier for lokal termisk diskomfort (træk, strålingstemperatursymmetri, varmt eller koldt gulv etc.). Eco-faktor-metoden bruger herefter den "laveste" score til beregning af den termiske del af Indeklima-Eco-factoren, der er et led i beregningen af den totale Eco-faktor (nærmere forklaring i afsnit 6.2).



(a) Score-funktion for det globale termiske miljø ved brug af PPD-indikatoren



(b) Score-funktion for lokal diskomfort pga. træk ud fra DR-indikatoren

Figur 9.2: Indeklima score-funktioner for hhv. global diskomfort (PPD) og lokal diskomfort pga. træk (DR). Ligningerne bruges som et led i beregningen af den totale Eco-factor. (Fra Bjørn et al. [2004])

Beregningsrutinerne for den termiske komfort kan bygge på simple resultater fra en stationær betragtning eller en bygningssimulering (gælder ligeledes for indeluftkvalitet og energi), hvor der som nævnt ovenfor, tages udgangspunkt i en fraktil af de beregnede parametre ved vurdering af den globale diskomfort (PPD). I sådan en situation vil designeren/brugeren forudsætte stationære forhold for hhv. middellufthastigheden i rummet samt de to personlige parametre, beklædningsisolans og aktivitetsniveau, hvorved resultaterne af Eco-factoren kun vil afspejle meget få perioder af året. Det vil derfor være bedre og mere detaljeret, at gøre brug af dynamiske beregningsrutiner, hvor de parametre der kan bestemmes af et TBS-program (indelufttemperatur, middelstrålingstemperatur og relativ fugtighed) fastsættes herudfra og de resterende parametre (lufthastighed, beklædningsisolans og aktivitetsniveau) antages eller bestemmes ved eksterne beregninger - f.eks. CFD¹ eller udviklede ligninger til estimering heraf (f.eks. beklædningsisolans - afsnit 4.2.1).

¹Computational Fluid Dynamic

Jf. afsnit 3.2 har Fangers komfortmodel vist sig bedst dokumenteret og mest præcis til forudsigelse af forventede antal utilfredse i en bygning, og det nye udvidede Eco-factor-koncept vil derfor fortsat gøre brug af PMV/PPD-indekset samt PD/DR til evaluering af hhv. det globale og lokale termiske indeklima. Fordelen ved PMV-indekset er, at det er et fleksibelt værktøj som inkluderer alle de vigtigste variable parametre, der har indflydelse på den termiske oplevelse. Modellen kvantificerer den absolutte samt relative indvirkning fra de seks faktorer og kan derfor benyttes i termiske miljøer med vidt forskellige HVAC-systemer samt forskellige kombinationer af de indeklimatiske og personlige parametre.

Eco-factor-værktøjet skal desuden indeholde en metode til implementering af resultat-filen (output) fra TBS-programmet til brug ved dynamiske beregninger af PMV/PPD-indekset, som ligeledes er illustreret på figur 9.1. Den dynamiske beregning af PMV og PPD i den udvidede nye Eco-factor-metode, vil for hvert tidsskridt i inddata (typisk én time) sammen med en forudsat lufthastighed, aktivitetsniveau og beklædningsisolans give en fordeling af et forventet antal utilfredse (PPD) for hele den betragtede periode.

Aktivitetsniveau

Aktivitetsniveauet skal fastsættes af designeren/brugeren og er ikke fundet korreleret med andre med de indgående parametre (inde- og udelufttemperaturen) (yderligere beskrevet under afsnit 4.2.2).

Ydermere skal det være muligt, at kunne angive brugernes aktivitetsniveau som en funktion af tiden - f.eks. over en arbejdsdag.

Beklædningsisolans

For beklædningsisolansen vil det være muligt at fastsætte én værdi for hele beregningsperioden, når der f.eks. er "dresscode" i en bygning. Endvidere vil det være muligt for designeren at opdele brugernes beklædning i fire perioder fordelt over året, som f.eks. gjort af Brohus et al. [2006]. Det vil desuden i programmet være mulighed for, hovedsageligt for siddende kontorarbejde, at tage højde for kontorstolens isolerende effekt. Isoleringsevnen for forskellige stole kan anvendes i værktøjet og er taget direkte fra DS/EN ISO 7730 [2006].

Ydermere er det fundet i afsnit 4.2.1, at beklædningsisolansen er korreleret med udetemperaturen, og det vil derfor være muligt at gøre brug af en ligning til bestemmelse af brugernes beklædningsisolans ud fra en beregnet løbende middel-udetemperatur. Det er valgt ved udvidelsen af Eco-factor-metoden, at gøre brug af ligning (9.1) fra Haldi og Robinson [2008], ved beregning af brugernes middel-beklædningsisolans under europæiske forhold.

$$I_{cl,m} = -0,0236 \cdot T_{rm} + 1,0275 \quad (9.1)$$

hvor

$$\begin{aligned} I_{cl,m} &= \text{Middelbeklædningsisolans} && [clo] \\ T_{rm} &= \text{Løbende middel-udetemperatur beregnet efter (2.5) og (2.7)} && [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Ydermere er det valgt at implementere de fundne ligninger for beregning af beklædningsisolansen fra RP-884-projektet beskrevet i afsnit 4.1.1 samt de Dear et al. [1997]. Hermed vil det være muligt for designeren, at vælge modeller for beklædningsisolansen, der repræsenterer varmere klimazoner

(Australien, Thailand, sydligste del af Europa etc.) end de europæiske forhold. Nedenfor viste ligning (9.2) og (9.3) beregner beklædningsisolansen for hhv. HVAC- og NV-bygninger.

$$I_{cl,HVAC,ET_m} = 0,9343 \cdot e^{-0,0127 \cdot ET_m^*} \quad (R^2 = 0,64; p < 0,05) \quad (9.2)$$

$$I_{cl,NV,ET_m} = 1,44 - 0,03 \cdot ET_m^* \quad (R^2 = 0,44; p = 0,0001) \quad (9.3)$$

hvor

$$\begin{aligned} I_{cl,HVAC,ET_m} &= \text{Beklædningsisolans, incl. stol} = 0,15\text{clo, HVAC-bygninger} \quad [clo] \\ I_{cl,NV,ET_m} &= \text{Beklædningsisolans, incl. stol} = 0,15\text{clo, NV-bygninger} \quad [clo] \\ ET_m^* &= \text{Middel effektiv udetemperatur (middel af ligning (3.2))} \quad [^\circ C] \end{aligned}$$

Som det ses af ovenstående ligninger, vil det herefter ikke være nødvendigt for brugeren af Eco-factor-værktøjet, at bestemme en middel beklædningsisolans af personerne i en bygning, da den beregnes automatisk ud fra den løbende middel-udetemperatur (T_{rm}) eller den middel effektive udetemperatur (ET^*). Det forudsættes ved brug af den dynamiske beklædningsisolans, at personerne i bygningen varierer deres beklædning efter udeforholdene.

Lufthastighed

Lufthastighedens indvirkning på PMV-indekset er beskrevet og diskuteret i afsnit 3.5.4, hvor parameteren viste stor indflydelse ved estimering af menneskers komfort. Ved det adaptive forskningsprojekt, RP-884 (de Dear et al. [1997]), er der udført målinger af middellufthastigheden i forskellige bygninger, hvorefter resultaterne blev underlagt regressionsanalyser med hhv. inde- og udetemperaturen. Jf. afsnit 3.5.4 er der ikke fundet tilstrækkelige empiriske undersøgelser til at underbygge denne teori. Det er derfor valgt ikke at anvende disse regressionsligninger i udvidelsen af Eco-factoren. For en yderligere beskrivelse af resultaterne fra undersøgelse henvises der til afsnit 4.1.1.

For brugeren af værktøjet vil det være muligt at fastsætte en middel-lufthastighed for hele beregningsperioden. Det vil derfor være op til den enkelte bruger, hvad denne skal fastsættes til i beregningen. Hvis størrelsen af lufthastigheden ønskes fastsat forholdsvist præcist, vil det kræve en simulering af luftstrømningerne inde i rummet ved hjælp af CFD (eller målinger). I situationer hvor dette ikke er rentabelt eller muligt, kan middel-lufthastigheden fastsættes frit - f.eks. i området 0,1-0,15 m/s.

Lokal diskomfort

I den oprindelige Eco-factor indgår vurderingen af lokal termisk diskomfort på lige fod med den globale termiske diskomfort, hvor den laveste score benyttes til videre beregning af Indeklima-Eco-factoren. Dette vil fortsat være fremgangsmåden i det nye Eco-factor-koncept, da der endnu mangler information og forskning om, hvordan disse kan kombineres og adderes.

Usikkerheden i estimeringen af lokal diskomfort samt betydningen heraf er yderligere diskuteret i afsnit 3.6 og appendiks B.3.

Træk*vurdering*

Ved estimering af forventede antal utilfredse pga. træk vil der fortsat blive gjort brug af den eksisterende ligning B.28 til beregning af DR som vist i appendiks B.3.1 og DS/EN ISO 7730 [2006]. Til beregning af antal utilfredse som følge af træk er det nødvendigt, at designeren gør sig overvejelser omkring størrelsen af lufttemperaturen, den lokale lufthastighed samt turbulensintensiteten.

I mange situationer vil det være nødvendigt, at foretage en CFD-beregning af rummets luftstrømninger for at kunne fastsætte størrelsen af de indgående parametre (lufthastigheden og turbulensintensiteten) for dermed at kunne beregne antal utilfredse pga. træk. Ved optimering af eksisterende bygninger, kan disse parametre imidlertid også måles.

Vertikal temperaturgradient

Der foretages ingen ændringer til beregningsrutinen af temperaturforskel mellem hoved og fødder, da der ikke er fundet nogen nævneværdig optimering af denne metode i ovenstående litteraturstudie (del I). Ligningen til beregning af vertikal temperaturforskel er diskuteret i appendiks B.3.2 samt i standarderne DS/CEN/CR 1752 [2001]; DS/EN ISO 7730 [2006]. Da det ikke er muligt, at gøre brug af de importerede resultater fra en TBS-beregning til vurdering af den vertikale temperaturgradient, vil det her være nødvendigt for designeren/brugeren at gøre sig overvejelser omkring størrelsen af de indgående værdier.

I bygninger med opblandingsventilation vil temperaturforskellen mellem hoved og fødder oftest være meget lille eller helt antage værdien nul (fuld opblanding). Modsat vil bygninger med fortrængningsventilation have større temperaturforskel, hvor det ligeledes er her beregningen af antal utilfredse vil have sin indvirkning og være nødvendig i vurderingen af det lokale termiske indeklima. I mange situationer vil det kræve en CFD-beregning for, at kunne fastsætte temperaturforskellen korrekt.

Strålingstemperaturasymmetri

Beregningsrutinerne ved vurdering af strålingsasymmetri bibeholdes som i den oprindelige Eco-factor. Strålingstemperaturasymmetri mellem to flader i et rum kan forårsage personer, der føler diskomfort herved. Det er derfor nødvendigt at foretage en evaluering af antal utilfredse på baggrund af estimerede eller beregnede overfladetemperaturer. Estimeringen af antal utilfredse kan bestemmes af ligning (B.31)-(B.34) i appendiks B.3.4 samt standarderne DS/CEN/CR 1752 [2001]; DS/EN ISO 7730 [2006]

Det er ligeledes her nødvendigt, at brugeren af værktøjet indtaster en forudsat temperaturforskel mellem lufttemperaturen og overfladetemperaturen i rummet, hvorefter antallet af utilfredse kan estimeres.

Varme eller kolde gulve

Gulvtemperaturen har ligeledes indflydelse på brugernes opfattelse af det lokale termiske indeklima. Ved for varmt eller for koldt gulv vil brugerne føle diskomfort, pga. den lokale opvarmning eller kølende effekt af fødderne. Her vil det ligeledes være designeren/brugere, der skal indtaste en overfladetemperatur på gulvet, hvoraf antal utilfredse kan beregnes. Estimeringen af antal utilfredse kan beregnes af ligning (B.30) fra appendiks B.3.3 samt endvidere beskrevet i standarderne DS/CEN/CR 1752 [2001]; DS/EN ISO 7730 [2006].

Adaptive komfortmodeller

Hvor PMV-modellen forudsiger den termiske oplevelse godt i bygninger med HVAC-systemer, er det ved feltundersøgelser fundet, at modellen overestimerer menneskers termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger (uden mekanisk køling) [Nicol og Humphreys, 2007]. Efterfølgende er der, gennem flere uafhængige studier, fundet forskellige adaptive modeller [Nicol og Humphreys, 2002a; Fanger og Toftum, 2002; de Dear et al., 1997]. Som beskrevet tidligere i afsnit 4 er alle adaptive modeller (Humphreys, RP-884, SCATs) opbygget som en regressionsligning, der relaterer den neutrale (ønskede) indelufttemperatur direkte med den løbende middel-udetemperatur eller i andre tilfælde månedlig middel-udetemperatur.

Nedenfor er de mest anerkendte adaptive studier gennem tiden listet, vurderet ud fra det empiriske grundlag samt antallet af referencer til studierne. Disse er yderligere beskrevet og diskuteret i afsnit 4.

- Humphreys 1978
- RP-884-model 1997
- SCATs-model 2001
- PMV_e 2002

Den adaptive indgangsvinkel, og dermed udviklingen af adaptive komfortmodeller, er blevet mere aktuell efterhånden som udbredelsen af bygninger uden mekanisk køling (naturligt ventilerede bygninger) er stigende i såvel Danmark som internationalt. Dette skyldes, at en meget vigtig del af den naturlige ventilation bygger på, at brugerne har mulighed for interaktion med styringen af indeklimaet hvilket vil sige, at hvis brugerne føler diskomfort, er der mulighed for at foretage en regulering (f.eks. åbning af vindue) og hermed selv medvirke til at forbedre indeklimaet - dvs. en tilpasning af de adfærdsmæssige, fysiologiske og psykologiske betingelser (adaptivitet) [Bendtsen og Sørensen, 2005].

Princippet i en adaptiv komfortmodel er ved sin hensyntagen til de adaptive parametre (adfærd, fysiologisk og psykologisk) meget attraktiv i forhold til de statiske modeller (PMV, ET^* etc.), hvormed højere indelufttemperaturer vil kunne tillades i en sommersituation. De adaptive vurderingsmetoder er kun implementeret i Eco-factor-værktøjet som vejledning til designeren/brugere af programmet, og indgår således ikke i beregningen af Eco-factoren. Udvidelsen af programmet med de informative adaptive modeller vurderes som særdeles fordelagtigt ved evaluering af det termiske indeklima i bygninger uden mekanisk køling.

Som nævnt tidligere er de ovenfor listede adaptive komfortmodeller beskrevet og diskuteret i afsnit 4, og det er herudfra valgt at implementere de adaptive komfortmodeller fra SCATs-projektet (Nicol og Humphreys [2007]), RP-884-projektet (de Dear [1998]) samt PMV_e (Fanger og Toftum [2002]) i det nye udvidede Eco-factor-koncept. Herved vil modellerne for de to store projekter - SCATs og RP-884 - kunne anvendes i hver deres region i verden². Valget af de adaptive komfortmodeller der indgår i arket, er foretaget ud fra flere betydende faktorer, som ligeledes er beskrevet i afsnit 4.1.4, 4.1.1 samt 4.1.3:

- SCATs-projektet

²SCATs-projektet relaterer til europæiske klimaforhold og RP-884-projektet relaterer til overvejende varme klimaforhold (Australien, Thailand og det sydlige Europa)

- Den geografisk placering: Undersøgelserne er foretaget i fem europæiske lande, hvormed resultatet af heraf relaterer til danske og europæiske klimaforhold.
 - Målemetoden og indsamling af data: SCATs har som en del af projektet udviklet en ensartet målemetode, som er blevet benyttet i samtlige bygninger.
 - Implementeret i DS/EN 15251 [2007]: Resultaterne fra projektet er benyttet i den nye europæiske standard, som ligeledes indikerer at resultaterne bør bruges i europæiske sammenhænge (afsnit 2.3).
- RP-884-projektet
 - Den geografisk placering: Undersøgelserne er foretaget i lande over hele verden, men overvejende under varme klimaforhold, og komfortmodellerne kan hermed bruges, når der skal laves beregninger i subtropiske eller tropiske områder.
 - Resultatdatabasen: Der er foreliggende over 20.000 målinger af indeklimaforhold, som danner grundlag for de fundne adaptive komfortmodeller.
 - Bruges i ANSI/ASHRAE 55 [2004] samt Hollandsk-standard (van der Linden et al. [2006]): De fundne ligninger fra projektet er indtil videre brugt i amerikansk og hollandsk regi.
 - PMV_e-modellen
 - Gør brug af den oprindelige beregning af PMV, hvor mange betydende faktorer medtages i vurderingen af personernes komfort og endvidere er gennemtestet.
 - Anvender en simpel *forventningsfaktor*, som multipliceres med PMV-indekset til vurdering af personernes adaptivitet.

De fundne regressionsligninger fra SCATs- og RP-884-projektet, som vil blive implementeret informativt i Eco-factor-værktøjet, er vist nedenfor. For yderligere beskrivelser og diskussioner henvises der til afsnit 4.1.1 og 4.1.4.

SCATs-projektet

Naturligt ventileret:

$$T_{comf} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 \quad (9.4)$$

Opvarmede og/eller kølede bygninger:

$$T_{comf} = 0,09 \cdot T_{rm} + 22,6 \quad (9.5)$$

RP-884-projektet

Naturligt ventileret:

$$T_{neutral} = 0,31 \cdot T_{a,ude} + 17,8 \quad (9.6)$$

Opvarmede og/eller kølede bygninger:

$$T_{neutral} = 0,11 \cdot T_{a,ude} + 21,45 \quad (9.7)$$

hvor

T_{comf}	=	Den estimerede komfort temperatur	[°C]
$T_{neutral}$	=	Den estimerede neutral temperatur	[°C]
T_{rm}	=	Løbende middel-udetemperatur beregnet efter (2.5) og (2.7)	[°C]
$T_{a,ude}$	=	Middel udelufttemperatur	[°C]

Beregningen af komforttemperaturen for eksempelvis en naturligt ventileret bygning vil blive foretaget udfra ligning 9.4 eller 9.6, alt efter de omgivende udeklimaforhold (f.eks. europæisk eller varmere klima). Hermed vil det i Eco-factoren være muligt, at medtage den adaptive effekt i vurderingen af naturligt ventilerede bygningers ydeevne.

Under SCATs- og RP-884-projektet blev det ydermere undersøgt, hvor mange procent utilfredse der vil forekomme ved en afvigelse fra komfort temperaturen. Nedenstående tabel 9.1 viser resultaterne heraf.

Tabel 9.1: Tilladelige afvigelses grænser fra komfort temperaturen (T_{comf}), som opgivet i projekterne.

Klasse	SCATs-projektet	RP-884-projektet
I (A)	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ - 10% utilfredse	$\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ - 10% utilfredse
II (B)	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ - 20% utilfredse	$\pm 3,5^{\circ}\text{C}$ - 20% utilfredse
III (C)	$\pm 4^{\circ}\text{C}$ - 35% utilfredse	$(\pm 4,0^{\circ}\text{C} - 35\% \text{ utilfredse})^3$

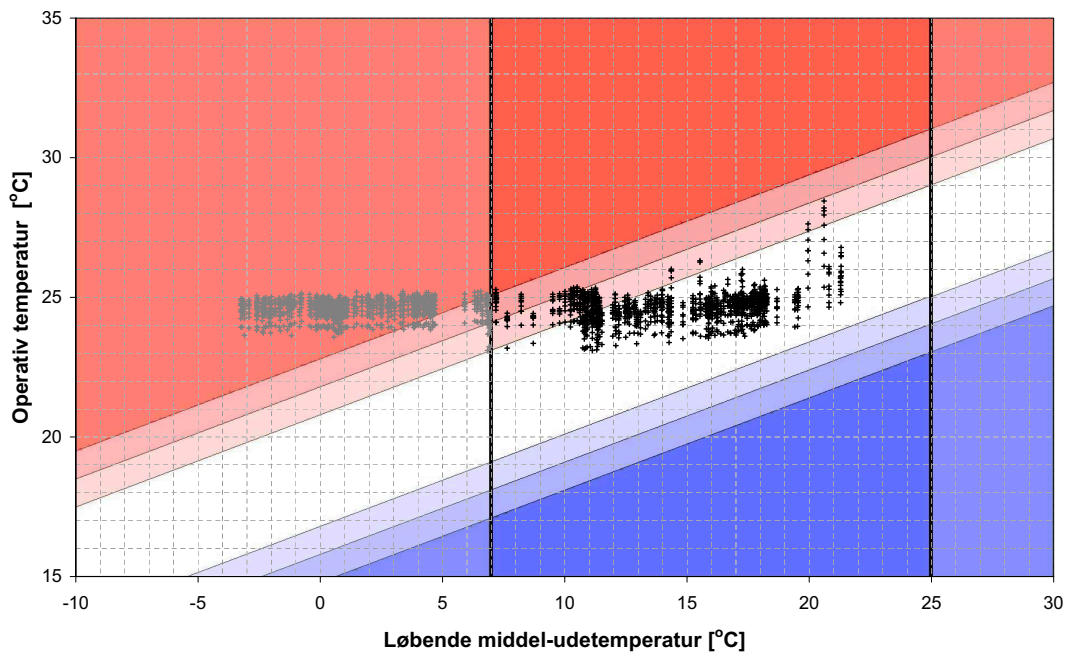
Grænserne for klasserne og antal utilfredse stemmer ikke overens med de værdier der bruges i DS/EN 15251 [2007] / DS/EN ISO 7730 [2006](se evt. afsnit 2.3). I DS/EN 15251 [2007] er der f.eks. maksimalt 10% utilfredse i en klasse II (A) bygning. Det er derfor nødvendigt at foretage yderligere undersøgelser/studier af, hvordan dette stemmer overens, da det ellers vil være ”nemmere” at overholde en bygningsklasse ved brug af adaptive modeller end ved brug af statiske komfortmodeller.

Fortolkning af resultat fra SCATs og RP-884 studierne

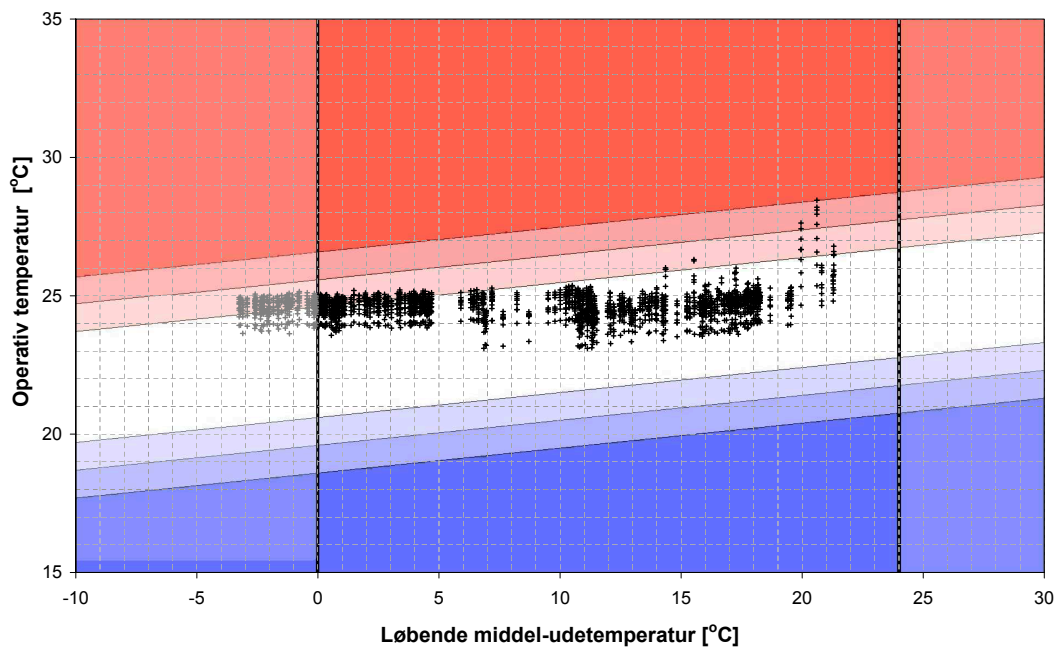
Til evaluering af en bygnings indeklimaydeevne ved brug af de adaptive komfortmodeller, anvendes en grafisk fremstilling samt en optælling af de beregnede operative indetemperaturer indenfor de forskellige klasser som angivet i tabel 9.1. I det følgende gennemgås kun Eco-factorens implementerede adaptive komfortmodel fra SCATs-projektet, men en tilsvarende behandling af resultaterne fra RP-884-projektet kan ligeledes foretages.

Som sagt beskrives i det følgende kun SCATs-projektets resultater, hvoraf designeren/brugeren skal foretage en evaluering af det termiske indeklima. Det skal her igen nævnes, at de adaptive komfortmodeller kun anvendes informativt og således ikke indgår i den videre beregning af Eco-factoren. Ved en vurdering af bygningens indeklimaydeevne, anvendes en grafisk fremstilling af den operative indetemperatur som funktion af den løbende middel-udetemperatur. Nedenstående figur viser de angivne klasser og dermed også grænserne ved vurdering efter hhv. en naturligt ventileret og mekanisk kølet bygning.

³de Dear [1998] udviklede i deres RP-884-projekt kun klasserne A og B til at beskrive et godt termisk indeklima, der er dog efterfølgende, bl.a. fra Holland, fastsat en yderligere grænse - klasse C - til brug i tråd med SCATs-projektets samt DS/EN ISO 7730 [2006] fastsatte klasser.



(a) Grænser for en naturligt ventileret bygning (Alfa-bygningstype)



(b) Grænser for en mekanisk kølet bygning (Beta-bygningstype)

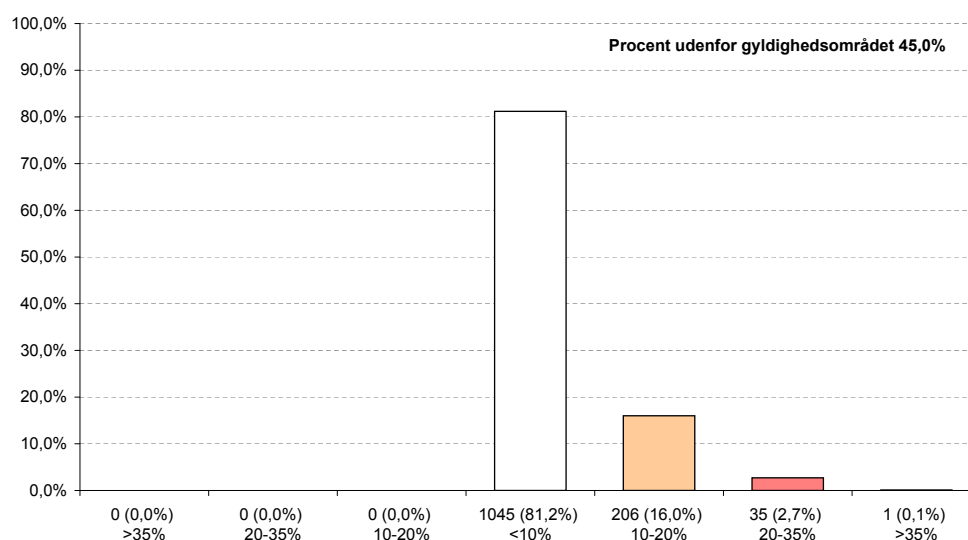
Figur 9.3: Grafisk afbildning af de beregnede operative indetemperaturer som funktion af den løbende middel-udetemperatur. De plottede punkter er blot vist som eksempel, hvoraf vurderingen skal foretages. De to lodrette linje viser den adaptive models gyldighedsområde. SCATs-projektets adaptive komfortmodeller er yderligere beskrevet i afsnit 4.1.4.

Ved en naturligt ventileret bygning (Alfa-bygning) foretages vurderingen af det termiske indeklima efter figur 9.3(a). Hvis der derimod var tale om en mekanisk kølet bygning (Beta-bygning) skulle evalueringen af det termiske indeklima foretages efter figuren til højre. De plottede punkter er resultaterne fra en eksempelberegning, og skal blot anvendes som forklaring til vurderingsmetoden. Endvidere fremgår modellens gyldighedsområde på begge figurer, markeret ved de to lodrette sorte streger. De punkter der ligger udenfor gyldighedsområdet er ikke mulige, at medtage i en samlet evaluering af indeklimaet, da det i det pågældende studie ikke er undersøgt hvordan grænserne ligger i dette område. Antallet af operative indetemperaturer (punkter) der ligger udenfor gyldighedsområdet (ofte under den nedre grænse for dansk klima) varierer fra år til år, da punkternes placering er i forhold til den løbende middel-udetemperatur. Ud fra et dansk udeklima vil der altid forekomme punkter, som ligger udenfor gyldighedsområdet, da grænsen for den ovenfor viste model allerede går ved $T_{rm} = 7^{\circ}\text{C}$ for figur 9.3(a) og $T_{rm} = 0^{\circ}\text{C}$ for figur 9.3(b). Antallet af punkter der ligger udenfor gyldighedsområdet er for ovenstående eksempel 45% for figur 9.3(a) og 13,5% for figur 9.3(b).

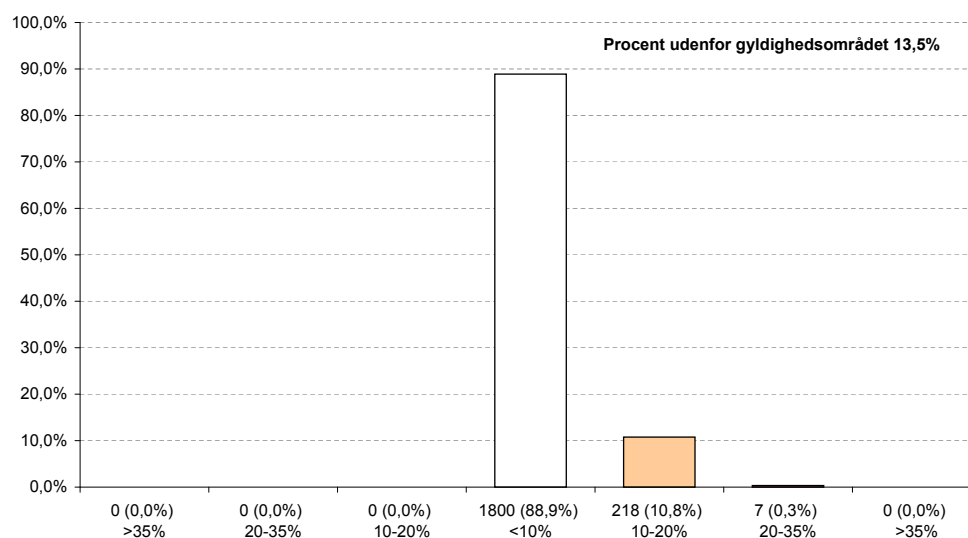
Når der skal foretages en vurdering af de beregnede operative indetemperaturer der ligger indenfor gyldighedsområdet, kan dette f.eks. gøres ved at angive hvor mange procent af punkterne, der overstiger en valgt acceptgrænse/klasse, hvoraf designeren kan foretage sin egen evaluering af resultatet. Som standard angiver Eco-factoren procentdelen der overskrider en klasse I bygning svarende til 10% utilfredse. Som eksempel kan der igen ses på punkterne, der er vist på figur 9.3, hvor procentdelen der overstiger den valgte acceptgrænse på 10% utilfredse er 18,8% for figuren øverst og 11,1% for figuren nederst.

Når den maksimale procent der ligger udenfor den valgte acceptgrænse skal vurderes, er det nødvendigt at medtage punkterne der ligger udenfor gyldighedsområdet i evalueringen. Da der ikke er kendskab til grænserne udenfor området tælles disse som værende over acceptgrænsen. Herved opnås den totale procentdel af punkterne, der overskrider acceptgrænsen på 10% utilfredse. Som eksempel kan der ved vurdering af bygningen som en naturligt ventileret bygning (figur 9.3(a)) beregnes en total procentdel af punkterne, der overskrider den valgte acceptgrænse på 55,3%. Derimod hvis bygningen vurderes som en mekanisk kølet bygning (figur 9.3(b)) fås, at 23,1% af punkterne overskrider acceptgrænsen.

I Eco-factor-værktøjet er der desuden foretaget en optælling af de operative temperaturer, der ligger indenfor gyldighedsområdet i de forskellige klasser. Resultatet for den samme eksempelberegning som ovenfor er vist i nedenstående figur 9.4:



(a) Optælling af punkter fra figur 9.3(a) (Alfa-bygning)



(b) Optælling af punkter fra figur 9.3(b) (Beta-bygning)

Figur 9.4: Antallet af operative temperaturer i de forskellige klasser indenfor gyldighedsområdet. Endvidere er der angivet hvor mange procent, der ligger udenfor det angivne gyldighedsområde (se figur 9.3). Grænserne for operativ indetemperatur er fastsat til hhv. 90%, 80% og 65% accept af det termiske indeklima, som en funktion af løbende middel-udetemperatur.

Af ovenstående figurer fremgår det tydeligt, hvor mange forekomster der er i de forskellige klasser indenfor det angivne gyldighedsområde. Det gør det således nemmere for brugeren, at foretage en vurdering af bygningens indeklimadeevne, ved brug af figurerne 9.3 og 9.4 samt den ovenfor angivne metode til evaluering af det termiske indeklima. Endvidere kan bygningen klassificeres efter ovenstående figur 9.4, hvor f.eks. eksempelbygningen vil blive klassificeret som en klasse IV bygning efter den øverste figur, da der er én forekomst af over 35% utilfredse. Der er senere i dette afsnit

foretaget en yderligere beskrivelse af, hvordan bygninger kan klassificeres efter de adaptive metoder. De ovenfor beskrevne grafer samt vurderingsmetoder til evaluering af det termiske indeklima udfra de adaptive modeller, forefindes i Eco-factor-værktøjet hvoraf brugeren af programmet kan foretage egne vurderinger af indeklimaets ydeevne, udfra en importeret resultatfil fra et TBS-program. Vurderingen af indeklimaet kan, som beskrevet tidligere, foretages udfra begge de implementerede adaptive modeller - SCATs- og RP-884.

PMV_e

Ydermere er der i værktøjet foretaget en udvidelse med den adaptive komfortmodel, PMV_e , som er en udvidelse til PMV-modellen. I de ovenfor beskrevne adaptive modeller afhænger den estimerede komforttemperatur kun af én parameter - enten den løbende middel-udetemperatur eller middel effektiv udetemperatur (ligningerne (9.4)-(9.7)). Fanger og Toftum [2002] fandt dette som en klar svaghed, idet disse ikke afhænger af hverken beklædningsisolans eller aktivitetsniveau og ej heller af de fire klassiske termiske parametre: lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed og lufthastighed, der alle har en kendt indflydelse og effekt på den menneskelige termiske komfort [Fanger, 1972]. Der er på baggrund af dette implementeret PMV_e -beregningen i Eco-factoren for dermed, at kunne foretage en vurdering af indeklimaet herudfra. Den adaptive beregning i forhold til PMV_e kan desuden nemt indgå i beregningen af den totale Eco-factor, hvorved metoden bliver endnu mere interessant, da det hermed er utrolig simpelt at gøre brug af en adaptiv komfortmodel i evalueringen af en bygnings samlede ydeevne. Metoden er mere detaljeret beskrevet og diskuteret i afsnit 4.1.3 samt Fanger og Toftum [2002].

Beregningen udføres ved indføringen af en forventningsfaktor, e , der skal multipliceres med den konventionelle PMV, hvorved der korrigeres for den psykologiske adaptivitet:

$$PMV_e = PMV \cdot e \quad (9.8)$$

hvor

$$\begin{aligned} PMV &= \text{Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering, beregnet ved ligning (B.25)} & [-] \\ e &= \text{Forventningsfaktor i intervallet } 0,5 \leq e \leq 1,0 & [-] \end{aligned}$$

Som beskrevet i afsnit 4.1.3 afhænger forventningsfaktoren af den varme periodes varighed samt af forekomsten af luftkonditionerede bygninger i området hvori bygningen er placeret. I følgende tabel 9.2 angives forventningsfaktoren for naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer ud fra en lav, moderat og høj forventning.

Tabel 9.2: Forventningsfaktor for naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer ud fra lav, moderat eller høj forventning (fra Fanger og Toftum [2002])

Forventning	Klassificering af NV-bygninger		
	Placering	Varme perioder	e
Høj	I områder hvor HVAC-bygninger er almindelige	Forekommer kort i løbet af sommersæsonen	0,9-1,0
Moderat	I områder med nogle HVAC-bygninger	Sommersæsonen	0,7-0,9
Lav	I områder med få HVAC-bygninger	Alle sæsoner	0,5-0,7

Designeren skal således ”kun” tage stilling til, hvilken forventning personerne i den pågældende bygning har til det termiske indeklima udfra ovenstående tabel og herudfra fastsætte forventnings-

faktoren.

Ved vurdering af resultatet fra PMV_e -beregningen er det muligt at summere antallet af PPD_e -timer, der overstiger en valgt acceptgrænse på f.eks. 10% utilfredse, som beskrevet senere i afsnit 9.1.3.

Som beskrevet tidligere kan beregningen af PMV_e indgå i PPD -indekset, som anvendes i score-funktionen for Indeklima-Eco-faktoren. Hermed vil det være muligt at tage højde for personernes adaptivitet i naturligt ventilerede bygninger ved vurdering af ydeevnen.

Tilladelige toleranceoverskridelser af de enkelte klasser

Jf. DS/EN 15251 [2007] og som beskrevet i afsnit 2.3 er det nødvendigt, hvor de øvre temperaturgrænser (klasse C) (f.eks. i figur 9.3(a)) ikke kan overholdes ved brug af passive teknologier, at installere mekanisk køling i bygningen for at opnå et tilfredsstillende termisk indeklima. Jf. Nicol og Humphreys [2007] er der i SCATs-projektet ikke taget stilling til om det er tilladeligt at overskride grænserne i figur 9.3 med nogle få procent eller timer om året - og stadig f.eks. bibeholde en kategori A klassificering. Modsat er der i RP-884-projektet (de Dear [1998]) foreskrevet, at det ikke er tilladeligt (eller meget få gange) at overskride en grænse på 80%-tilfredse, da komfortgrænserne følger udeklimaforholdene. Dette er ligeledes, hvad de i Holland (van der Linden et al. [2006]) indtil nu har gjort brug af ved klassificering af bygninger. Der er dog efterfølgende, jf. Kurvers et al. [2006], forekommet nogen kritik og diskussion, om det skulle være tilladeligt at overskride en fastsat grænse, f.eks. klasse B (20% utilfredse), med nogle få timer eller procent, da det ellers vil kræve et stort kølebehov i forhold til en beregning ved brug af PMV/PPD -indekset - se afsnit 4.1.5 for yderligere beskrivelse og diskussion heraf.

Efter ovenstående diskussion af de adaptive komfortgrænser samt tilladelige toleranceoverskridelser af de enkelte klasser, er det valgt at arbejde videre med metoden beskrevet i RP-884. Det vurderes dog, at der i fremtiden vil være opstillet tilladelige overskridelsesgrænser, som det er tilfældet for de statiske modeller - f.eks. antal timer over 26°C samt antal tilladelige PPD -timer. Men da der ikke er foretaget tilstrækkelige undersøgelser vedr. dette, kan der ikke anvendes overskridelsesgrænser i evalueringen af en bygnings ydeevne ved denne metode.

Idé til fremtidig vurdering af antal utilfredse for hhv. SCATs- og RP-884-projektet

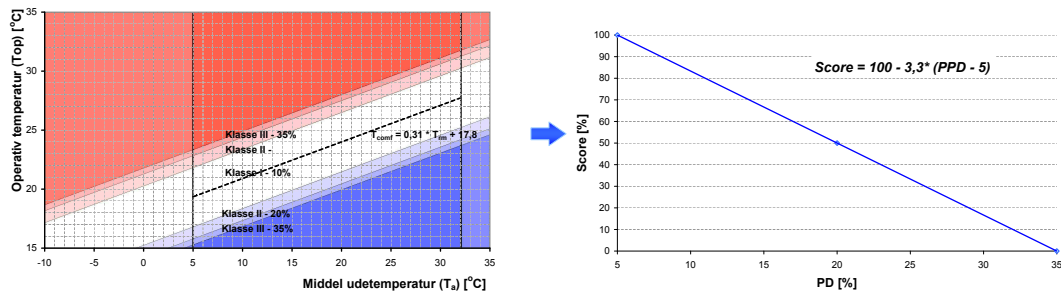
Til vurdering af resultatet fra de adaptive komfortmodeller, er det ikke muligt at få et varierende antal utilfredse som funktion af punktets beliggenhed og op/ned til det neutrale niveau eller en valgt acceptgrænse. Som beskrevet ovenfor, i fortolkning af resultatet fra SCATs- og RP-884 projektet, anvendes der i Eco-faktoren en optælling af punkterne der ligger i de forskellige klasser, som efterfølgende omregnes til en procentdel der ligger over en valgt acceptgrænse. Det vil i fremtiden være en bedre og mere præcis metode, at kunne finde en bestemt procentdel utilfredse, der istedet varierer i forhold til afstand til f.eks. komforttemperatur-linjen. Dvs. en lignende metode som PPD -indekset, hvor antal utilfredse afhænger direkte af den beregnede PMV -værdi.

Der er i det følgende beskrevet en fremtidig metode, som kan implementeres i værktøjet ved brug af resultaterne fra de to studier. Hvis ideen i fremtiden skulle implementeres i Eco-faktoren, vil det være nødvendigt med flere studier som underbygger teorien om et varierende antal utilfredse som funktion af afstanden fra komforttemperaturen og altså ikke opdeler antal utilfredse i "kasser" som i den nuværende situation.

Ved at implementere en sådan udvidelse i Eco-factor-værktøjet vil det ligeledes være muligt, at anvende det estimerede antal utilfredse (PD) i beregningen af Eco-faktoren. En af grundene til, at de

adaptive modeller ikke er implementeret i vurderingen af bygningers ydeevne for NV-bygninger eller blot Alfa-bygninger er, at det ikke har været muligt at få en flydende score-værdi som funktion af et flydende forventet antal utilfredse (PD). Hvis dette problem løses, vil det være muligt, at gøre brug af de adaptive komfortmodeller i beregningen af Indeklima-Eco-factor, hvormed scoren for det generelle termiske indeklima vil variere på samme måde, som for den normale PPD-beregning.

Til beregningen "score"-værdien for den termiske del i Indeklima-Eco-factoren skal der indlægges en ligning for scoren, som funktion af en procentdel utilfredse (PD). Det er derfor nødvendigt at lave PD-værdien flydende ved at lade den afhænge af temperaturforskellen (t_{diff}) mellem den registrerede operative indetemperatur (t_{op}) og neutraltemperaturen ($t_{neutral}$) eller en valgt acceptgrænse på f.eks. 10% utilfredse. Nedenstående figur 9.5 viser princippet i, hvordan simulerede timeværdier af den operative indetemperatur skal omsættes til en score ved brug af ligningen i figur 9.5(b).



(a) Komforttemperaturen som funktion af løbende middel-udetemperatur samt de tilhørende klasser

(b) Score funktion for det globale termiske miljø ved brug af adaptiv komfortindikator

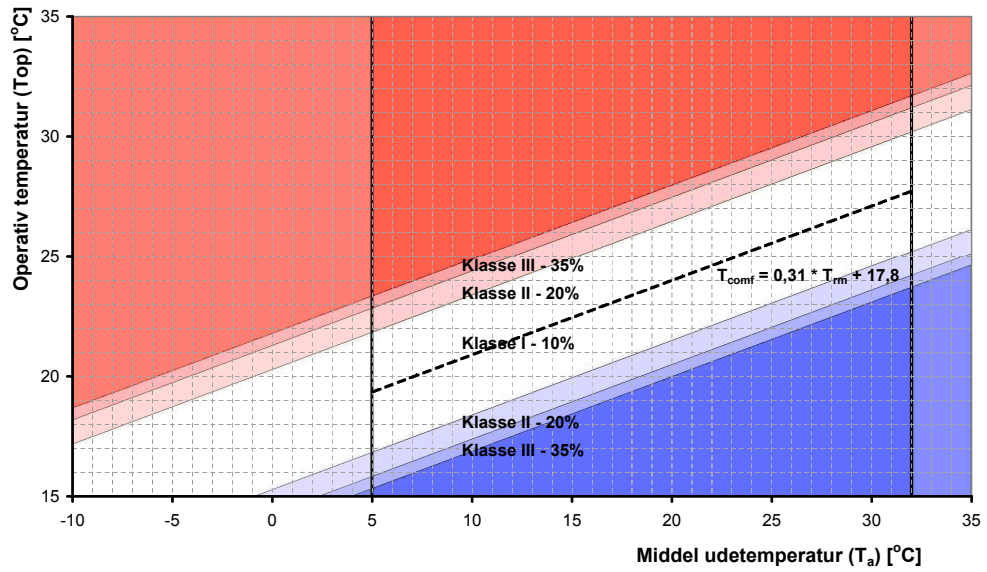
Figur 9.5: Principskitse der kombinerer de adaptive komfortgrænser samt neutraltemperaturen med scoren i Eco-factoren. Beregnede indetemperaturer, ved brug af f.eks. BSim, plottes på grafen til venstre, hvorefter det beregnes hvor mange procent utilfredse der vil være for hver time som efterfølgende korresponderer til en score for det termiske indeklima.

Der tages i det følgende udgangspunkt i RP-884-projektets neutraltemperatur og komfortgrænser (figur 9.5(a)) for en naturligt ventileret bygning, hvor der er udvidet med en ekstra klasse (klasse III - 35% utilfredse) som beskrevet i van der Linden et al. [2006]. En tilsvarende lineariserings-metode kan på samme måde udvikles for SCATs-projektets grænser (figur 9.3).

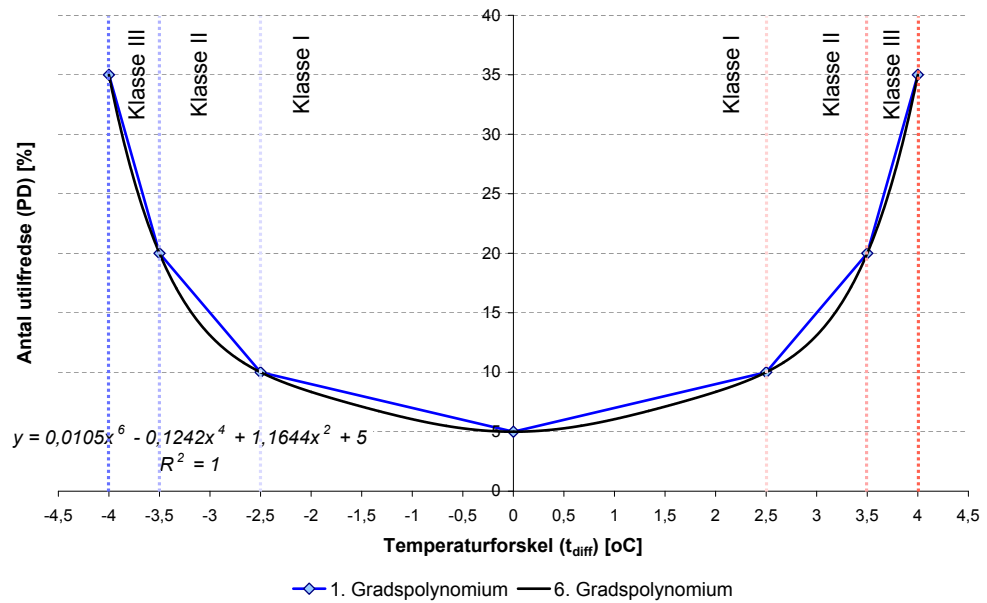
Som diskuteret ovenfor samt i afsnit 4.1.4 er der ikke foreskrevet en metode til beregning af antal utilfredse (PD) ud fra en vilkårlig afstand fra neutraltemperaturen ($t_{neutral}$). Det er derfor nødvendigt at lave en linearisering mellem de enkelte komfortgrænser (klasserne I, II, III samt ift. $t_{neutral}$), hvorved det efterfølgende vil være muligt at kombinere en beregnet PD-værdi med score-funktionen for den adaptive model (figur 9.5(b)).

Til at finde et polynomium der beskriver sammenhængen mellem t_{diff} og antal utilfredse, indlægges et snit i ovenstående figur 9.5(a) et vilkårligt sted indenfor gyldighedsområdet. Der vil ved alle middel-udelufttemperaturer være samme afstand mellem grænserne og afstanden ned til neutraltemperaturen. Der er dog for en HVAC-bygning i RP-884-projektet lidt andre grænser, men metoden er den samme. For SCATs-projektets komfortgrænser er der samme afstand fra komforttemperaturen og ud til grænserne for de forskellige klasser, for både NV- og HVAC-bygninger (figur 9.3).

Det er forholdsvis simpelt at finde et polynomium, som beskriver antallet af utilfredse som funktion af en temperaturforskel mellem den simulerede t_{op} og $t_{neutral}$. Nedenstående figur 9.6 viser to eksempler på en linearisering ved brug af et 1. og 6. grads polynomium (figur 9.6(a)).



(a) Designgraf til bestemmelse af antal utilfredse som funktion af t_a .



(b) Antal utilfredse (PD) som funktion af temperaturforskellen (t_{diff}). C

Figur 9.6

Af ovenstående figur 9.6(b) er det således muligt, at bestemme antal utilfredse ud fra hhv. et 1. grads polynomium eller et 6. grads polynomium. Den valgte lineariseringsmetode til beregning af antal utilfredse er desuden vigtig, da det vil give en betydelig forskel i PD ved valget mellem et 1. og 6. grads polynomium. Dette fremgår også af den ovenstående figur (b). Et 1. grads polynomium vil give de korrekte værdier ved de respektive grænser (klasse I, II og III), men i området omkring $t_{neutral}$

(hovedsageligt klasse I) ses det af ovenstående figur 9.6(b), at der vil forekomme et højere antal utilfredse ved brug af en simpel ret linje mellem punkterne end ved brug af f.eks. et 6. grads polynomium. Spørgsmålet er så, hvilken lineariseringsmetode der vil beskrive de termiske tilstande mest præcist for de personer, der opholder sig i rummet? Til at vurdere dette, vil det være nærliggende at se på Fangers PPD-model [Fanger, 1972], som ligeledes kan beskrive antal utilfredse som funktion af en temperaturforskelle. I området omkring neutraltemperaturen, eller for PMV-indekset omkring $PMV = 0$, vil der ved små temperaturforskelle fra den optimale neutraltemperatur ikke forekomme en stor stigning i antallet af utilfredse, da personerne i en bygning ikke vil opfatte denne afvigelse fra den termiske komfort som betydelig (Parsons [2003]; Fanger [1972] samt yderligere beskrevet i afsnit 3.2). Endvidere vil antallet af utilfredse, gennem brug af PMV-indekset, stige eksponentielt, når der afviges med større PMV-værdier fra termisk neutralitet. Dette vil ligeledes ske ved brug af 6. grads polynomiet, når temperaturforskellen mellem neutraltemperaturen og den operative indetemperatur overstiger $\pm 4^\circ\text{C}$ (klasse III).

Ved valget af lineariseringsmetode til beskrivelse af antal utilfredse som funktion af temperaturforskellen mellem den registrerede operative indetemperatur og neutraltemperaturen, må det forventes at det fundne 6. grads polynomie bedst beskriver sammenhængen ud fra ovenstående diskussion af metoderne. Funktionen for polynomiet for en NV-bygning i RP-884-projektet er vist nedenfor, og desuden er resultatet ved en vurdering i forhold til SCATs-projektet ligeledes vist.

$$PD_{adaptiv} = 0,0389 \cdot t_{diff}^4 + 1,2607 \cdot t_{diff}^2 + 5 \quad \text{for SCATs} \quad (9.9)$$

$$PD_{adaptiv} = 0,0105 \cdot t_{diff}^6 - 0,1242 \cdot t_{diff}^4 + 1,1644 \cdot t_{diff}^2 + 5 \quad \text{for RP-884} \quad (9.10)$$

Disse ligninger kan i fremtiden implementeres i Eco-factor-værktøjet, hvoraf et varierende procent utilfredse kan estimeres ved brug af de adaptive komfortmodeller. Det beregnede antal utilfredse indgår, som beskrevet tidligere, i beregningen af scoren til den termiske del i Indeklima-Eco-factoren. Ovenstående metode er givet som et forslag til en metode, hvorved resultaterne fra de adaptive modeller kan inkorporeres i den samlede vurdering af en bygnings ydeevne ved brug af den totale Eco-factor.

Indeluftkvalitet

Brugernes krav til indeklimaet i et lokale er først og fremmest, at sundhedsrisikoen ved at indånde luften skal være ubetydelig. Dernæst at luften bør opleves frisk og behagelig fremfor tung og indelukket. [DS/CEN/CR 1752, 2001]

Indeluftkvaliteten kan styres ved en kombination mellem kontrol af forureningskilder og ventilation. Den ventilationsrate der er nødvendig for at kontrollere sundhedsrisikoen fra et specifikt forureningskomponent bør bestemmes uafhængigt af den ventilationsrate, der er nødvendig for at opnå en ønsket oplevet luftkvalitet. Det anbefales, at den højeste af disse ventilationsrater anvendes, hvor det i praksis normalt vil være kravet til komfort, der er bestemmende for ventilationsraten [DS/CEN/CR 1752, 2001]. Eksponering for forurening i luften der kan udgøre en sundhedsrisiko er i det følgende forudsat værende minimal, da ventilationsraten for komfort er vurderet og fundet langt større.

Udover termisk komfort beregner det oprindelige Eco-factor-værktøj også antal utilfredse som følge

af dårlig indeluftkvalitet. Til beregning af antal utilfredse anbefales det i Eco-factoren, at der først foretages en estimering af luftmængden pr. person ud fra en vurdering af CO₂-niveauet i rummet. Efterfølgende kan den estimerede luftmængde bruges til beregning af procentdelen af utilfredse med den oplevede luftkvalitet, som angiver andelen af personer, der forventes at opleve luftkvaliteten som værende uacceptabel umiddelbart efter indtræden i et lokale [DS/CEN/CR 1752, 2001, s. 22].

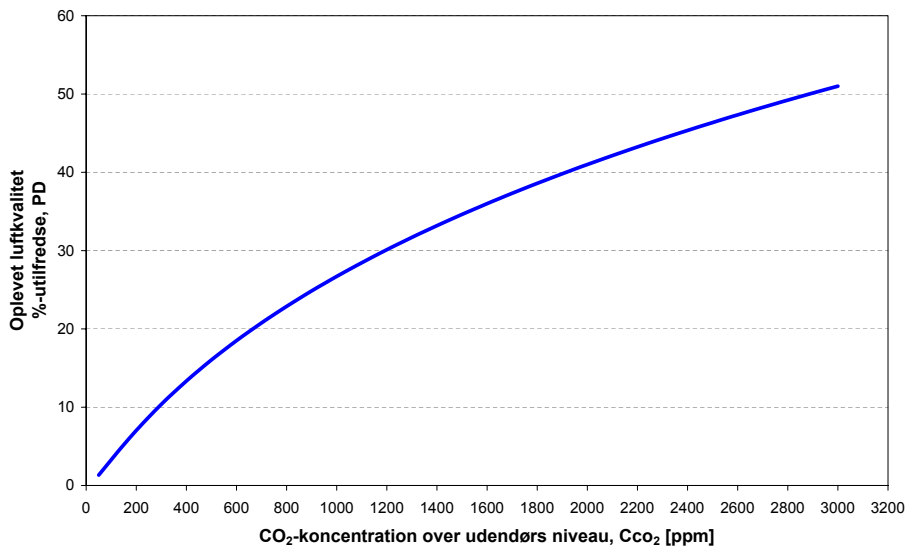
I de nye udvidede Eco-factor er det ligeledes valgt, at gøre brug af beregningsmetoden af antal utilfredse ud fra den oplevede luftkvalitet ved indtræden i et rum. Dette er gjort med baggrund i, at metoden er en bedre indikator end den traditionelle beregning ud fra CO₂-koncentrationen i rummet, da flere betydende faktorer medtages i beregningen - som f.eks. byggematerialers afgasning. Når resultater fra en TBS-beregning implementeres i det nye udvidede Eco-factor-værktøj, vil disse indeholde CO₂-koncentrationens variation over året påvirket af personbelastninger og ventilationsslutmængde. Herudfra vil det, som beskrevet tidligere, være muligt at beregne en procentdel utilfredse med det atmosfæriske indeklima i den pågældende bygning som følge af for høje kuldioxidkoncentrationer eller som følge af den oplevede luftkvalitet med nogle ekstra indtastninger af brugeren (udeluftens forurening og bygningens forureningsbelastning). Beregningen af antal utilfredse kan således opdeles i to metoder/niveauer:

1. Antal utilfredse pga. for høj CO₂-koncentration (foretages direkte ud fra det beregnede/simulerede indeklima).
2. Antal utilfredse som følge af den oplevede luftkvalitet ved indtræden i et lokale.

Disse to metoder er kort beskrevet i de to nedenstående afsnit.

Beregning ud fra CO₂-koncentration

Kvantitativt set er kuldioxid (CO₂) den vigtigste menneskelige bioeffluent. Selvom CO₂ ved de lave koncentrationer der typisk forekommer indendørs er uskadelig og ikke fornemmes af mennesker, er den en god indikator for koncentrationen af andre menneskelige bioeffluenter, der vil opleves generende for personerne i rummet. Nedenstående figur 9.7 angiver procentdelen af utilfredse personer som funktion af CO₂-koncentrationen (over det udendørs niveau - typisk 350ppm) for lokaler, hvor stillesiddende personer er de eneste forureningskilder. I auditorier, festsale og andre lokaler med stor personbelastning der varierer hurtigt, er måling af CO₂-koncentration en veletableret metode til at regulere udelufttilførsel. Selvom CO₂ er en god indikator for forurening forårsaget af stillesiddende mennesker, er den ofte en dårlig generel indikator for den oplevede luftkvalitet, da den ikke omfatter de mange sensoriske forureningskilder, der ikke producerer CO₂ (byggematerialer, tobaksrygning, fugt/entalpi). [DS/CEN/CR 1752, 2001]



Figur 9.7: Kurven angiver den oplevede luftkvalitet (%-utilfredse), som funktion af kuldioxid-koncentrationen over udendørs niveau ($CO_{2,inde} - CO_{2,ude}$). Kurven gælder desuden kun for lokaler, hvor stillesiddende personer er de eneste forureningskilder. CO_2 -koncentrationen udendørs er typisk omkring 350ppm ($700mg/m^3$). For yderligere information henvises der til DS/CEN/CR 1752 [2001]

Ovenstående kurve, som beskriver sammenhængen mellem CO_2 -koncentration og antal utilfredse, kan udtrykkes ved nedenstående ligning (9.11):

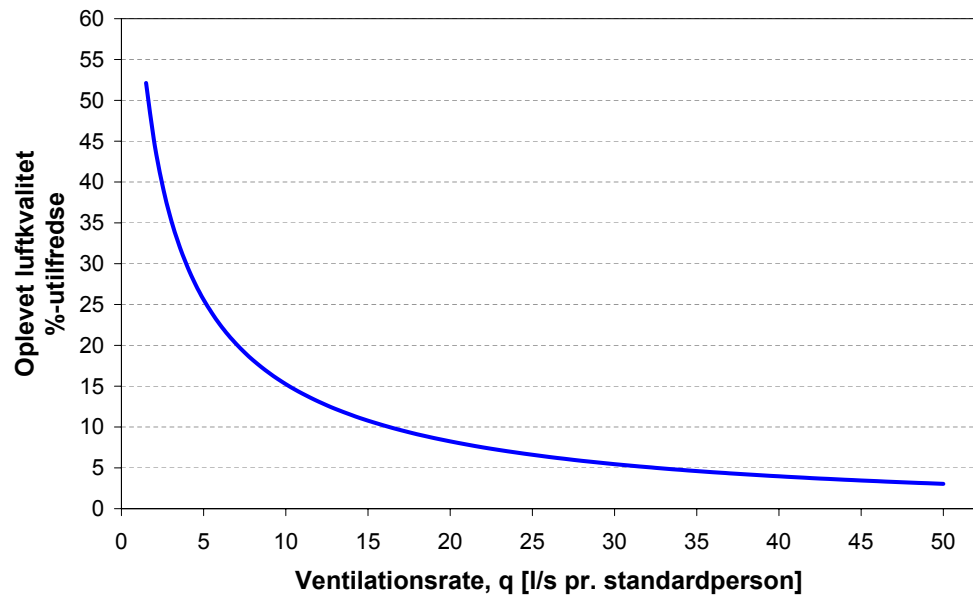
$$PD = 395 \cdot e^{-15,15 \cdot C_{CO_2}^{-0,25}} \quad (9.11)$$

Beregningen ud fra ovenstående metode er implementeret i Eco-factor-værktøjet, hvoraf designeren kan foretage en evaluering af indeluftkvaliteten. Som beskrevet ovenfor vil brugen af beregningsmetoden ud fra en CO_2 -koncentration ikke altid give det reelle billede af luftkvaliteten i rummet, da flere betydende faktorer ikke medtages såsom de mange sensoriske forureningskilder. Det anbefales derfor, at gøre brug af de beregnede CO_2 -koncentrationer fra TBS-programmet ud fra den oplevede luftkvalitet som indgangsparameter til vurderingsmetoden (beskrevet i følgende afsnit).

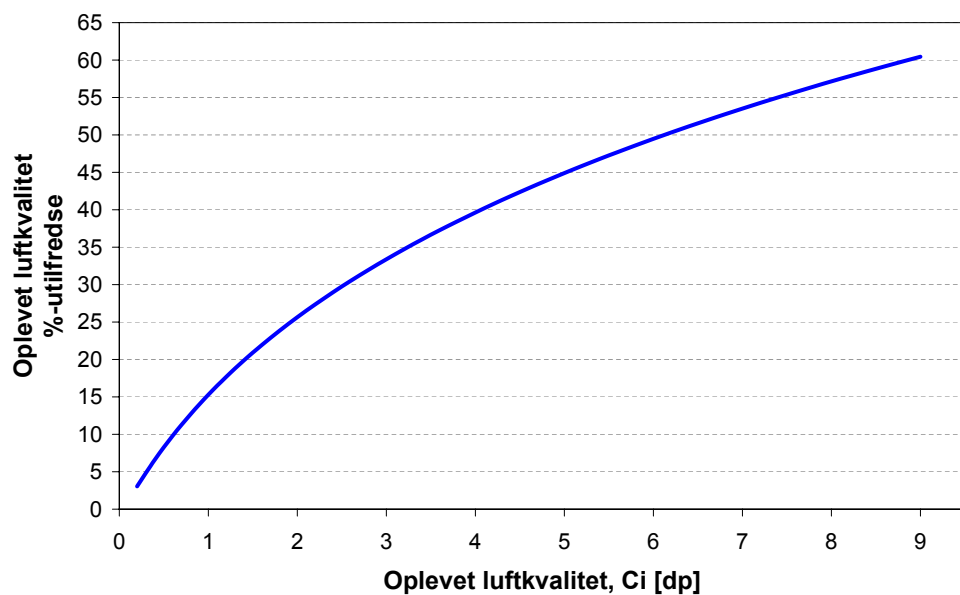
Beregning ud fra oplevet luftkvalitet

Mennesker opfatter luftens kvalitet ved hjælp af to sanser - lugtesansen og den kemiske sans. Lugtesansen er placeret i næsehulen og er følsom overfor flere hundredetusinde lugtstoffer i luften. Den generelle kemiske sans er placeret overalt på slimhinderne i næsen og øjnene og er følsom overfor et tilsvarende stort antal kemiske stoffer i luften. Det er således den kombinerende respons fra disse to sanser, der er bestemmende for om luften opleves som værende frisk og behagelige eller tung og indelukket. For luft der er forurenede af menneskelige bioeffluenter, viser figur 9.8(a) procentdelen af utilfredse som funktion af ventilationsraten pr. standardperson (gennemsnitlig stillesiddende voksen kontorarbejde i termisk neutralitet) - forureningen af en sådan standardperson kaldes "en olf". Figur 9.8(b) viser ligeledes procentdelen af utilfredse som funktion af den oplevede indeluftkvalitet i decipol (dp). [DS/CEN/CR 1752, 2001]

Enheden for oplevet luftkvalitet er *decipol*, og defineres som den oplevede luftkvalitet som en standardperson (forureningsbelastning 1 olf) forårsager i et rum, der ventileres med 10 l ren luft pr. sekund. [Hansen et al., 1997]



(a) Utilfredshed forårsaget af en standardperson (en olf) ved forskellige ventilationsrater.



(b) Procent utilfredse som funktion af den oplevede luftkvalitet i dp.

Figur 9.8: Ovenstående kurver angiver antallet af utilfredse som funktion af den oplevede indelukvalitet. [DS/CEN/CR 1752, 2001]

Ovenstående kurve i figur 9.8(a) er givet ved følgende ligning:

$$\begin{aligned} PD &= 395 \cdot e^{-1,83 \cdot q^{0,25}} && \text{for } q \geq 0,32 \text{ l/s} \cdot \text{olf} \\ PD &= 100 && \text{for } q < 0,32 \text{ l/s} \cdot \text{olf} \end{aligned} \quad (9.12)$$

hvor

$$\begin{aligned} PD &= \text{Procent utilfredse (Percentage Dissatisfied)} \quad [\%] \\ q &= \text{Ventilationsrate for en standardperson (olf)} \quad [\text{l/s pr. olf}] \end{aligned}$$

Kurven i figur 9.8(b) er givet ved nedenstående ligning (9.13).

$$PD = 395 \cdot e^{-3,25 \cdot \frac{1}{C_i^{0,25}}} \quad \text{for } q \geq 0,32 \text{ l/s} \cdot \text{olf} \quad (9.13)$$

hvor

$$\begin{aligned} PD &= \text{Procent utilfredse (Percentage Dissatisfied)} \quad [\%] \\ C_i &= \text{Oplevet indeluftkvalitet (decipol)} \quad [\text{dp}] \end{aligned}$$

Den i figur 9.8(a) viste kurve er baseret på bioeffluenter fra mere end et tusind personer, som blev vurderet af 168 forsøgspersoner. En standardperson er gennemsnittet af disse godt tusind personer - en stillesiddende voksen person i termisk komfort med en hygiejnisk standard på ca. 0,7 bad pr. dag. Forsøgene blev gennemført i Danmark (Berg-Munch et al. [1986]), men tilsvarende studier i Nordamerika (Cain et al. [1983]) og Japan (Iwashita et al. [1990]) har vist forbavsende god overensstemmelse med figuren [Hansen et al., 1997].

Det er, som beskrevet ovenfor, ønsket at gøre brug af metoden for den oplevede luftkvalitet (olf) i beregningen af bidraget for indeluftkvaliteten i Indeklima-Eco-factoren. Dette vil blive gjort ud fra de importerede resultater fra TBS-beregningen, da disse giver en direkte indikation af, hvor stor personbelastningen har været i det pågældende rum. Til beregning af den oplevede luftkvalitet er det nødvendigt, at designeren/brugeren tager stilling til byggematerialernes forureningsbelastning samt forureningen af udeluften (indblæsningsluften). Det har tidligere også været muligt at medtage procentdelen af tobaksrygere i beregningen, men da rygeregler i stigende grad forbyder at ryge på arbejdspladser, er denne del ikke aktuel mere, og der henvises til speciallitteraturen for yderligere information (bl.a. DS/CEN/CR 1752 [2001]).

Beregningsproceduren fra de importerede CO₂-koncentrationer til en procentdel utilfredse med det oplevede luftkvalitet ved indtræden i rummet, vil blive beskrevet i det nedenstående.

Som det første kan der udregnes en nødvendig volumenstrøm til at fjerne den CO₂-koncentration, der er beregnet ved brug af BSim eller et andet TBS-program. Dette gøres ved brug af nedenstående ligning fra Andersen et al. [2002, s. 51] (benævnelser for nedenstående parametre og ligninger har taget udgangspunkt i den oprindelige Eco-factor).

$$C_{CO_2} = \frac{q_{v,CO_2}}{\varepsilon_p \cdot q_v} + C_o \rightarrow q_v = \frac{q_{v,CO_2}}{C_{CO_2} - C_o} \cdot \frac{1}{\varepsilon_p} \quad (9.14)$$

hvor

C_{CO_2}	=	Forureningskoncentrationen i opholdszonen	[m ³ /m ³]
C_o	=	Forureningskoncentrationen i udeluften	[m ³ /m ³]
q_{v,CO_2}	=	Forureningsbelastningen fra personerne, $q_{v,CO_2} = 17 \cdot M$	[l/h pr. person]
M	=	Aktivitetsniveauet (stofskiftet)	[met]
q_v	=	Volumenstrømmen	[l/s pr. person]
ε_p	=	Ventilationseffektivitet	[-]

Forureningskoncentrationerne for hhv. inde- og udeluften er angivet i m³/m³ ovenfor, men kan ligeledes angives i ppm som i de fleste tilfælde bruges. F.eks. vil udeluftens CO₂-koncentration ligge omkring ca. $350 \cdot 10^{-6}$ m³/m³, hvilket svarer til 350 ppm. I København vil kuldioxid-koncentrationen dog være oppe på 400 ppm, og højere koncentrationer kan forekomme i byer, hvor forureningsniveauet er større. [Andersen et al., 2002]

Ved at indsætte og omskrive ligningen således at beregningen foretages direkte ud fra CO₂-niveauet i bygningen og personernes aktivitetsniveau, vil ligningen komme til at se ud som vist nedenfor:

$$q_v = \frac{17 \cdot M}{C_{CO_2} - C_o} \cdot \frac{1}{\varepsilon_p} \cdot \frac{1}{3600} \cdot 10^6 \quad (9.15)$$

hvor

C_{CO_2}	=	Forureningskoncentrationen i opholdszonen	[ppm]
C_o	=	Forureningskoncentrationen af udeluften	[ppm]
M	=	Aktivitetsniveauet (stofskiftet)	[met]
q_v	=	Volumenstrømmen	[l/s pr. person]
ε_p	=	Ventilationseffektivitet	[-]

Den fundne nødvendige volumenstrøm pr. person for at opretholde den beregnede CO₂-koncentration i rummet bruges herefter i beregningen af antal utilfredse (ligning (9.12)). Som det ses af ligning (9.12) og figur 9.8, er den indgående parameter udtrykt ved en ventilationsrate for en standardperson. Der skal der derfor foretages en omregning af den fundne ventilationsrate pr. person (q_v), den oplevede luftkvalitet af udeluften og forureningsbelastningen fra bygningen til en ventilationsrate pr. standardperson (olf).

Den oplevede luftkvalitet i et rum kan udtrykkes ved komfortligningen som vist nedenfor. På basis af forureningsbelastningen fra forskellige kilder, kan forureningsbalancen for et rum opstilles:

$$q_v \cdot (C_i - C_u) = 10 \cdot G \cdot \frac{1}{\varepsilon_p} \rightarrow C_i = C_u + 10 \cdot \frac{G}{q_v} \cdot \frac{1}{\varepsilon_p} \quad (9.16)$$

hvor

q_v	=	Volumenstrøm af tilført udeluft	[l/s pr. person]
C_i	=	Oplevet indeluftkvalitet	[dp]
C_u	=	Oplevet udeluftkvalitet	[dp]
G	=	Sensorisk belastning af luften	[olf]
ε_p	=	Ventilationseffektivitet	[-]

Den nødvendige ventilation afhænger, som det kan ses af ovenstående ligning, ligeledes af kvaliteten af den udeluft der er til rådighed. Hvis der ikke er tilgængelige lokale data for luften omkring byg-

ningen, kan estimeringen af den oplevede udeluftkvalitet foretages ud fra nedenstående tabel 9.3: [DS/CEN/CR 1752, 2001, s. 27]

Tabel 9.3: *Eksempler på den udendørs luftkvalitet. [DS/CEN/CR 1752, 2001]*

	Oplevet luftkvalitet [dp]	CO ₂ -koncentration [ppm]
Udmærket	0	350
I byer, god luftkvalitet	< 0,1	390
I byer, dårlig luftkvalitet	> 0,5	390-445

Brugeren af Eco-factor-programmet vil således være nødsaget til at vælge, hvilken udeluftkvalitet der i den pågældende bygnings lokalområde. Sædvanligvis antages det at udeluften er ren, men der kan i visse situationer være en væsentlig udeforurening, og det kan dermed være nødvendigt at rense luften, før den anvendes til ventilation af bygningen eller at acceptere ringere kvalitet af indeluften. [Hansen et al., 1997]

Den samlede sensoriske belastning af indeluften bestemmes ved summering af forureningsbelastningen fra de enkelte kilder i rummet (personbelastning og bygningens emissioner). Alle mennesker emitterer bioeffluenter og nogle forurener yderligere ved tobaksrygning - en standard person emitterer 1 olf og en ryger vil i gennemsnittet emitte 6 olf. Nedenstående tabel 9.4 giver forureningsbelastningen fra personer i afhængighed af aktiviteten: [DS/CEN/CR 1752, 2001]

Tabel 9.4: *Forureningsbelastning forårsaget af personer. [Hansen et al., 1997; DS/CEN/CR 1752, 2001]*

	Sensorisk Forureningsbelastning [olf/person]	Kuldioxid [l/h pr. person]
<i>Stillesiddende, 1-1,2 met</i>		
0% rygere	1	19
<i>Fysisk aktivitet</i>		
Lav, 3 met	4	50
Middel, 6 met	10	100
Høj (atleter), 10 met	20	170
<i>Børn</i>		
Børnehave: 3-6 år, 2,7 met	1,2	18
Skole: 14-16 år, 1-1,2 met	1,3	19

Af ovenstående tabel skal brugeren af Eco-factor-værktøjet vælge, hvilken sensorisk belastning personerne i rummet afgiver. I de fleste tilfælde, i kontormiljøer, vil en belastning på 1 olf pr. person

være den der vil blive brugt i den videre beregning - det skal dog erindres at den sensoriske belastning fra personer er afhængig af deres aktivitetsniveau, som desuden ses af ovenstående tabel 9.4.

Udover personbelastning vil der også være en forureningsbelastning fra bygningen, som skyldes emission af flygtige organiske forbindelser fra materialer. Tabel 9.5 angiver data for målte forureningsbelastninger i forskellige typer af eksisterende bygninger opført i de sidste 30 år. Forureningsbelastningen fra bygningen er ofte høj og varierer meget fra bygning til bygning. Den seneste tids store opmærksomhed omkring forurening fra materialer synes dog at have medført et vist fald i emissionerne i nybyggeri. Det skal dog altid huskes, at ved projektering af nye bygninger er det vigtigt at stræbe imod lave bygningsforureningsbelastninger - det er desuden foreskrevet i det nye Bygningsreglement BR08 [2008], at der bør altid benyttes byggematerialer med den lavest mulige afgivelse af forurening til indeklimaet. Forureningsbelastningen for lavt forurenende bygninger angivet i tabel 9.5 bør tilstræbes under projektering, og dette vil kræve systematisk udvælgelse af lavt forurenende materialer til bygningen inklusive møblement, gulvtæpper og ventilations- og luftkonditioneringsanlæg. [DS/CEN/CR 1752, 2001; Hansen et al., 1997]

Tabel 9.5: Forureningsbelastning forårsaget af bygningen inklusive møblement, tæpper og ventilationssystem. [DS/CEN/CR 1752, 2001]

Bygningskategori	Sensorisk forureningsbelastning [olf/(m ² gulv)]	
	Middel	Variationsområde
<i>Eksisterende bygninger</i>		
Kontorer	0,3	0,02 - 0,95
Kontorer	0,6	0 - 3
Skoler (klasseværelser)	0,3	0,12 - 0,54
Børnehaver	0,4	0,20 - 0,74
Vestibuler	0,3	0,13 - 1,32
<i>Nye bygninger</i>		
<i>Ingen tobaksrygning</i>		
Lavt forurenende bygninger	0,1	
Ikke-lavt forurenende bygninger	0,2	

Af ovenstående tabel ses det tydeligt, at der er forholdsvis høje middelværdier og ikke mindst variationer i eksisterende bygninger. Det angives bl.a. i Hansen et al. [1997], at mange eksisterende bygninger har behov for en grundig renovering for at sænke bygningens forureningsbelastning.

Efter at de forskellige bidrag til komfortligningen for luftkvalitet (ligning (9.16)) nu kan bestemmes ud fra ovenstående tabeller 9.3-9.5, er det muligt at beregne den oplevede indeluftkvalitet (C_i) ved brug af den beregnede nødvendige volumenstrøm (q_v , ligning (9.15)) ud fra de simulerede CO₂-koncentrationer (personbelastningen) fra TBS-programmet time for time. Den beregnede oplevede

luftkvalitet indenfor arbejdstiden kan bruges direkte i beregningen af en procentdel utilfredse ud fra ovenstående ligning (9.13), eller evt. ved brug af ligning (9.12) hvor det skal erindres at den oplevede luftkvalitet skal omregnes til l/s pr. olf (1 dp = 10 l/s pr. olf). Hermed vil det efterfølgende være muligt at få en variation og fordeling af antal utilfredse over året, som vil indgå i beregningen af den samlede Indeklima-Eco-factor.

Den ovenstående gennemgåede metode til beregning af en procentdel utilfredse som funktion af den oplevede luftkvalitet i decipol samt beregningsmetoden ved brug af CO₂-koncentrationen i rummet, er sammenlignet i en opstillet case, hvor resultaterne er vist i nedenstående tabel 9.6 og figur 9.9. Hermed er det muligt, at se forskellen i antal utilfredse ved brug af de to forskellige metoder.

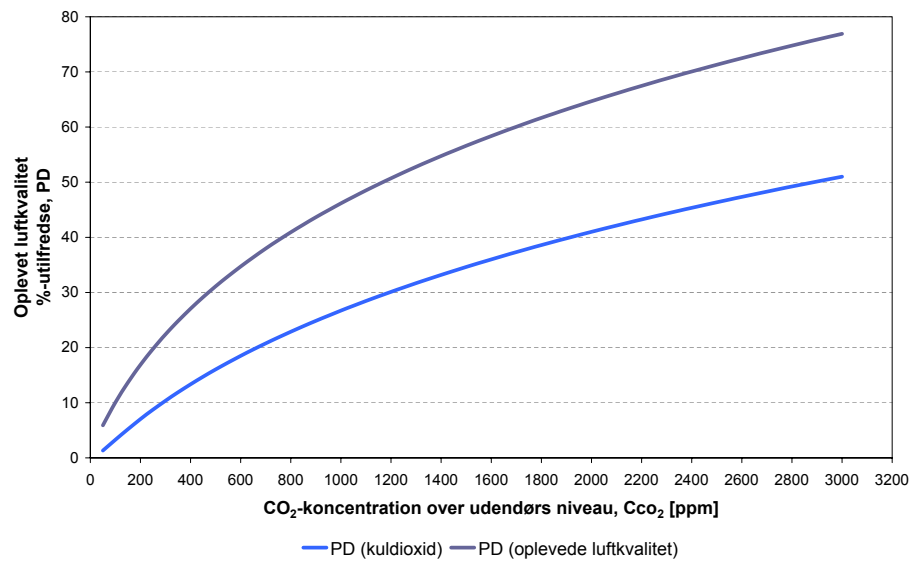
Tabel 9.6: Sammenligning af procent utilfredse som funktion af CO₂-koncentrationen og den oplevede luftkvalitet umiddelbart efter indtræden i et rum.

CO ₂ -konc. over uden- dørs niveau	%utilfredse pga. for høj CO ₂	Parametre til beregning af oplevede luftkvalitet				Oplevede indeluftkvalitet		Procentdel utilfredse
		Bergn. luftmgd. udfra CO ₂ -niveau	Opl. udeluft kvalitet	Sensorisk belastning		C _i [dp]	q [l/s pr. olf]	
[ppm]	PD [%]	q _v [l/s pr. person]	C _u [dp]	G _{pers} [dp]	G _{byggn.} [dp]			
0	0	→ ∞	0,05	1	1,925	0,1	200	0,4
350 (kl. I)	11,9	16,2	0,05	1	1,925	1,9	5,4	24,4
500 (kl. II)	16,0	11,3	0,05	1	1,925	2,6	3,8	30,7
800 (kl. III)	22,9	7,1	0,05	1	1,925	4,2	2,4	40,9
1200 (kl. IV)	30,1	4,7	0,05	1	1,925	6,2	1,6	50,5
1600 (kl. IV)	36,0	3,5	0,05	1	1,925	8,3	1,2	58,2

Forudsætninger: Aktivitetsniveau = 1,2 met; Ventilationseffektivitet = 1; Antal personer i rummet = 8;
Bygningsareal = 154 m²; Lavt forurenende byggematerialer

Af tabel 9.6 ses det tydeligt, at beregningen ud fra den oplevede luftkvalitet vil give en større procentdel utilfredse, da f.eks. bygningens forureningsbelastning medtages i vurderingen.

Nedenstående figur 9.9 viser en grafisk sammenligning af resultaterne fra ovenstående tabel. Det fremgår tydeligt, at se beregningsmetoden ved brug af den oplevede luftkvalitet altid vil give en større procentdel utilfredse. Det vil altid være mest korrekt at gøre brug af denne beregning, da flere vigtige parametre medtages i estimeringen af antal utilfredse.



Figur 9.9: Grafisk sammenligning af de to beregningsmetoder af antal utilfredse i et rum. Samme forudsætninger som i ovenstående tabel 9.6 er benyttet.

9.1.2 BEREGNING AF ENERGIFORBRUG FOR IMPORTEREDE DATA

Den totale Eco-factor består som beskrevet af et bidrag fra hhv. termisk og atmosfærisk indeklima samt energiforbrug. I nærværende underafsnit præsenteres metoderne for beregning af bygningens energiforbrug i forbindelse med importering af data fra simuleringer eller målinger.

Energi-Eco-factoren beregnes på baggrund af oplysninger om det totale årlige energiforbrug fordelt på følgende:

- Opvarmning
- El-forbrug til:
 - Opvarmning, ventilation og luftkonditionering (HVAC)
 - Belysning (Lighting)
 - Udstyr (Appliances)

Der skelnes således mellem almindeligt opvarmningsforbrug og elektricitetsforbrug, hvor beregningen af Energi-Eco-factoren foretages ved evaluering af de enkelte energikilders emissioner og dermed miljøpåvirkning. Mere information om den beregningen heraf forefindes i Bjørn et al. [2004]. Ved udvidelsen af Eco-factor-værktøjet for dynamiske beregninger gennem importerede data fra simuleringer, beregnes det totale energiforbrug til hhv. opvarmning samt el-forbrugende udstyr direkte af de importerede data. I forbindelse med mekanisk køling, vil el-forbruget til køleanlægget variere som funktion af udetemperaturen og dermed også den krævede køleydelse. Til beregning af den praktiske effektfaktor (COP⁴) for de varierende udeklimatiske forhold, benyttes at carnot-virkningsgraden

⁴Coefficient Of Performance

beskrevet ved følgende ligning (9.17) for et anlæg er forholdsvis konstant under varierende driftsforhold.

$$n_c = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} \quad (9.17)$$

hvor

$$\begin{aligned} n_c &= \text{Carnot-virkningsgraden} & [-] \\ \epsilon_p &= \text{Praktisk effektfaktor (COP)} & [-] \\ \epsilon_c &= \text{Carnot-effektfaktor} & [-] \end{aligned}$$

For en given driftssituation, beregnes Carnot-effektfaktoren samt den praktiske effektfaktor, hvorefter Carnot-virkningsgraden kan beregnes af ovenstående ligning. Ved andre driftsforhold bestemmes først Carnot-effektfaktoren af følgende ligning (9.18), hvorefter den praktiske effektfaktor bestemmes af efterfølgende ligning (9.19).

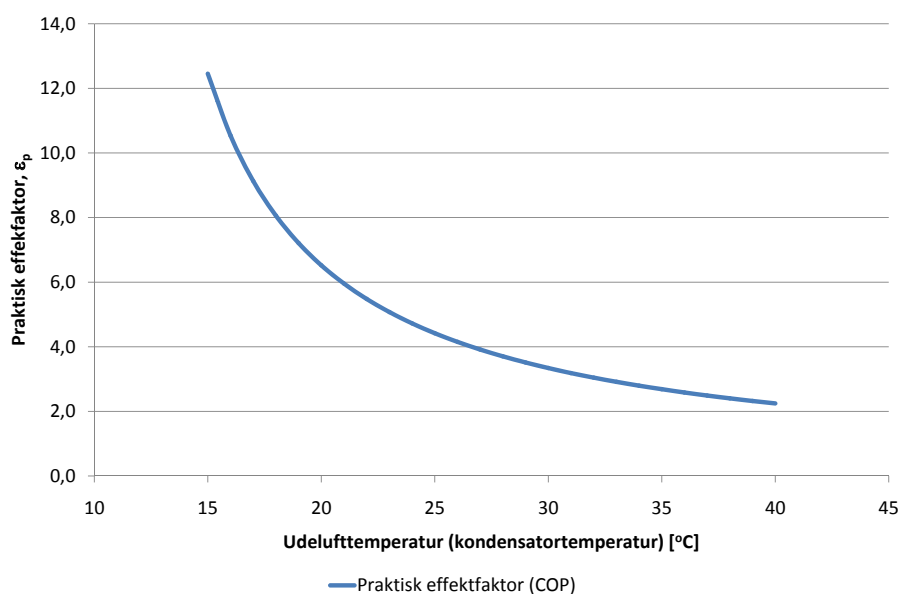
$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T_c - T_o} \quad (9.18)$$

$$\epsilon_p = \frac{Q_{brutto}}{W_{brutto}} \quad (9.19)$$

hvor

$$\begin{aligned} Q_{brutto} &= \text{Køleaggregatets bruttokøleydelse} & [kW] \\ W_{brutto} &= \text{Sum af kompressorens optagne effekt og samtlige effekter til hjælpeudstyr} & [kW] \\ T_o &= \text{Fordampningstemperaturen} & [K] \\ T_c &= \text{Kondenseringstemperaturen} & [K] \end{aligned}$$

I appendiks L.1.1 er der foretaget en eksempelberegning af den praktiske effektfaktor ved varierende driftsforhold. Følgende figur viser den praktiske effektfaktor som funktion af udelufttemperaturen for et udvalgt køleanlæg.



Figur 9.10: Praktisk effektfaktor (COP) som funktion af udelufttemperaturen for udvalgt køleanlæg (specifikationer angivet i appendiks L.1.1).

Til beregning af den nødvendige el-effekt til kølekompressoren, benyttes den beregnede praktiske effektfaktor. Den nødvendige køleydelse divideres med den praktiske effektfaktor for hvert datasæt, hvorefter der foretages en beregning af det totale forbrug ved summation af de enkelte bidrag. Ved implementeringen af ovenstående dynamiske beregning af den praktiske effektfaktor skal brugeren af det udvidede Eco-factor-værktøj således indtaste følgende:

- Køleydelse (Q_{brutto})
- El-effekt (W_{brutto})
- Kondensatortemperatur v. ovenstående ydelse (T_c)
- Fordampertemperatur v. ovenstående ydelse (T_o)

I fremtiden kunne der med fordel opstilles standard-data såfremt Eco-factor-værktøjet kun skal benyttes overslagsmæssigt. Det vil således være muligt at vælge en standard køleunit, hvor gennemsnitlige data for carnot-effektfaktorer benyttes fordelt på f.eks. mindre, mellem og stor anlæg.

9.1.3 YDEEVNEINDIKATOR

Eco-factor-værktøjet er udvidet med flere forskellige ydeevneindikatorer, som beregnes automatisk ud fra nogle enkelte indtastninger/forudsætninger af brugeren. Der er i det følgende beskrevet de forskellige langsigtede indikatorer for hhv. indeklimaets ydeevne men også bygningens samlede ydeevne, som er implementeret i arket/programmet.

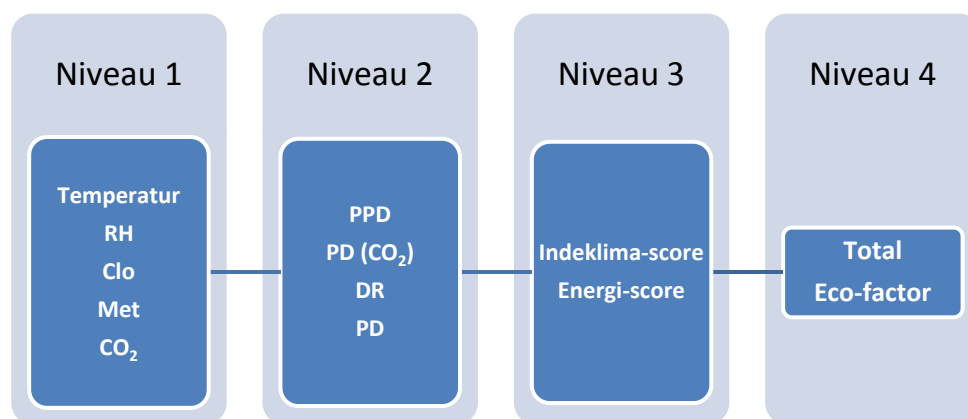
Til den langsigtede evaluering af indeklimaets ydeevne er den traditionelle metode, hvor antallet af timer over hhv. 26 og 27°C opsummeres implementeret (yderligere beskrevet i afsnit 2.5 og DS 474 [1993]). Det er herudfra muligt for designeren, at foretage en vurdering af temperaturniveauet i for-

skellige designløsninger og dermed kvantificere og rangere de enkelte løsninger. Endvidere er det fundet i afsnit 2.5, at en langsigtet evaluering ved brug af PPD-timer giver langt mere information om indeklimaydeevnen samt et bedre billede af personernes oplevelse af det termiske indeklima. Til vurdering af antal PPD-timer er det nødvendigt at brugeren indtaster en accepteret grænse af antal utilfredse i bygningen. F.eks. kan brugeren vælge at bygningen skal overholde en klasse II (B) bygning iht. DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/EN 15251 [2007], hvormed det tillades at 10% af personerne i bygningen er utilfredse med det pågældende termiske indeklima. Antallet af PPD-timer er således størrelsen af overskridelsen i form af antal utilfredse, der overstiger acceptgrænsen. Der henvises desuden til afsnit 2.5 for en mere detaljeret beskrivelse og diskussion af metoden. I afsnit 2.5.1 er der angivet anbefalede maksimale overskridelser af de valgte grænser (ligesom i DS 474 [1993] hvor det tillades at overskride 26°C med 100 timer), da det vil kræve et alt for stort energiforbrug til køling at overholde de anbefalede grænser 100% af tiden. van der Linden et al. [2002] og Olesen [2004] anbefaler, at der for antal PPD-timer tillades en overskridelses grænse på 150 PPD-timer - denne vejledning er ligeledes anvendt i Eco-factoren for de totale antal PPD-timer.

Ydermere er der i det følgende foretaget en vurdering af, hvordan en endelig ydeevneindikator for bygningen opstilles ved brug af den totale Eco-factor.

I beregningen af den totale Eco-factor skal der, som beskrevet tidligere, indgå en Indeklima-Eco-factor samt en Energi-Eco-factor. Disse bestemmes af to uafhængige beregninger og beregnes i den oprindelige Eco-factor ud fra den importerede resultatfil og de indtastninger brugerne gør undervejs i værktøjet. Efter at den totale Eco-factor er blevet udvidet til at beregne energiforbruget og de indgående indeklimaparametre (PMV/PPD, træk, etc.) udfra en importeret resultatfil fra BSim samt enkelte brugerindtastninger (COP, beklædningsisolans, aktivitetsniveau, etc.), vil dette resultere i et stort antal beregnede Indeklima- og Energi-Eco-factor-værdier (typisk omkring 2000 for en kontorbygning med normal arbejdstid).

Der er således brug for en samlet ydeevneindikator, udtrykt i én værdi, til vurdering og sammenligning af en bygnings ydeevne. Den totale Eco-factor er en god indikator for en bygnings samlede ydeevne, da der indgår et bidrag fra både indeklimaet og energiforbruget. Der er desuden en stor forskel på, hvor i beregningsforløbet f.eks. en fraktil-, gennemsnits- eller maksimalværdi udtages til den videre beregning af den totale Eco-factor som ydeevneindikator. Nedenstående figur illustrerer de forskellige steder i beregningsforløbet, hvor det vil være muligt, at udtage f.eks. en fraktil-værdi til videre beregning af den endelige samlede ydeevneindikator for bygningen.

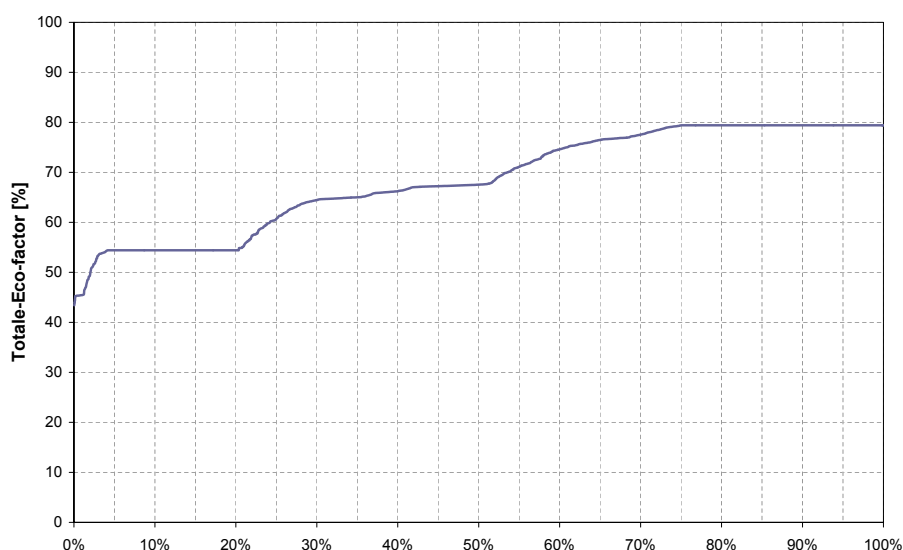


Figur 9.11: Niveauopdelinger af de forskellige steder en fraktil-værdi i beregningen af den endelige ydeevneindikator kan udtages. Indikatorerne af lokal diskomfort i niveau 3 skal ses som værdier, der kan anvendes i en senere og udvidet version af Eco-factoren.

Af ovenstående figur 9.11 ses det, at der er flere forskellige niveauer i beregningsrutinen, hvor f.eks. en 95%-fraktil kan udtages til den videre beregning af den samlede totale Eco-factor. Hvis der som eksempel udtages en 95%-fraktil på parametrene i niveau 1, vil den samlede totale Eco-factor give et andet resultat, end hvis der udtages en 95%-fraktil i f.eks. niveau 2 eller 3. Det vil derfor være nødvendigt at undersøge, hvornår i forløbet værdierne til beregningen af den endelige totale Eco-factor skal udtages for at en få en anvendelig ydeevneindikator som bedst og mest korrekt beskriver en bygnings samlede ydeevne.

Hvis der udtages én værdi, f.eks. en fraktil-værdi i niveau 1 eller 2, vil det ikke være muligt at få en fordeling af hhv. Indeklima- og Energi-Eco-factoren og dermed også den totale Eco-factor. I niveau 1 og 2 vil det kunne ske, at der estimeres en direkte forkert total Eco-factor, da f.eks. en 95%-fraktil af indelufttemperaturen og CO₂-koncentrationen ikke nødvendigvis vil forekomme på samme tid i bygningen. Resultatet af den beregnede Eco-factor vil således vise en dårligere score, end der egentlig ville forekomme i bygningen. En fraktil-værdi fra niveau 3 eller 4 vil derfor være at foretrække som desuden vil give samme resultat, idet beregningen hermed vil give et rigtigt billede af indeklimaets variation over året og dermed af den beregnede total Eco-factor.

De mange resultater af den totale Eco-factor i arket kan efterfølgende sorteres og præsenteres som en sandsynlighedsfordeling for hele beregningsperioden, som vist i eksemplet i nedenstående figur 9.12, hvor den totale Eco-factor er afbilledet:



Figur 9.12

En fordeling sammen med en middelværdi og spredning giver et meget godt og langt mere detaljeret billede af bygningens ydeevne end én enkelt fast værdi, som Eco-factoren giver i sin oprindelige form. Der vil dog altid være et behov for, i kommunikationen mellem ingeniør og bygherre, at kunne angive bygningens ydeevne i én enkelt ydeevneindikator, da dette er nemmere og mere konkret at forstå for personer der ikke har den samme ekspertviden som f.eks. designeren/brugeren af Eco-factor-værktøjet.

Spørgsmålet er så hvilken indikator der skal bruges i vurderingen af en bygnings ydeevne? Valget af en samlet indikator skal således foretages/estimeres ud fra fordelingen af den totale Eco-factor, hvilket kan gøres ved en middelværdi, median eller adskillige forskellige fraktiler. Det er selvfølgelig nødvendigt, at ydeevneindikatoren afspejler den aktuelle bygnings indeklima og energimæssige egenskaber. Dvs. hvis en bygning har et decideret dårligt eller ikke-tilfredsstillende indeklima skal det gengives i den samlede ydeevneindikator. Endvidere skal den samlede ydeevneindikator have en forholdsvis stor varians, når der f.eks. evalueres på en bygning med en lav ydeevne i forhold til en bygning med en høj ydeevne.

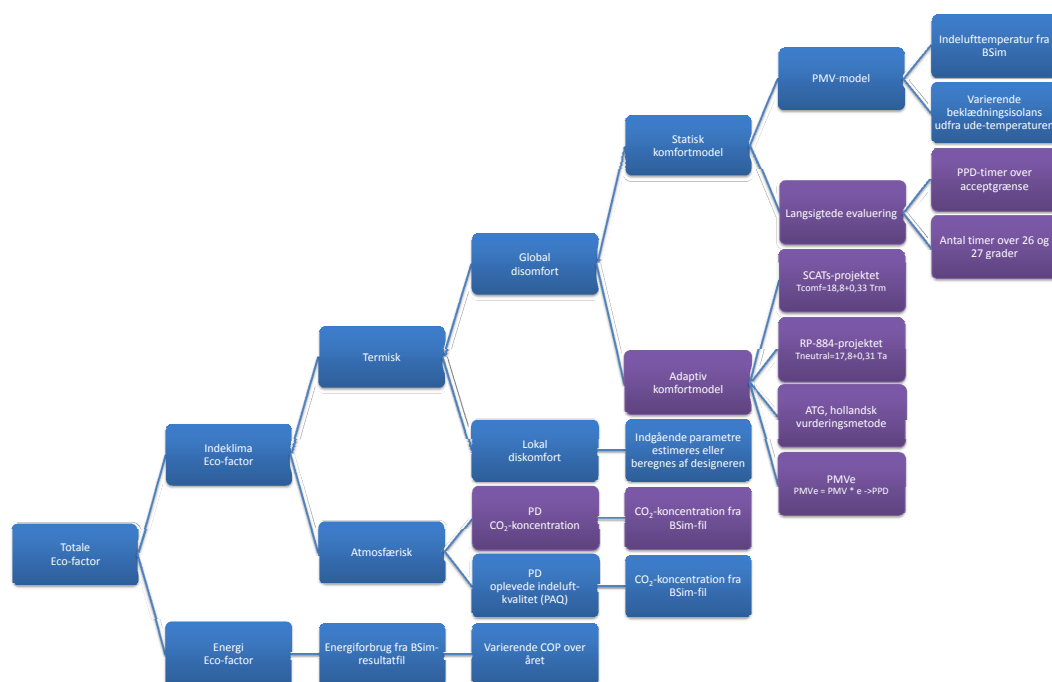
Af ovenstående diskussion er det tydeligt, at det er nødvendigt at tage stilling til, hvordan én samlet indikator for en bygnings ydeevne skal defineres sådan at flere forskellige designløsninger kan sammenlignes og kvantificeres i forhold til hinanden. Ved et større litteraturstudie (del I) i dette projekt er det fundet, at flere forskellige normer og standarder har forsøgt at opstille en brugbar indikator for en bygnings ydeevne. Der er f.eks. angivet i DS 474 [1993], at der som vejledning kan anvendes en tilladelig maksimal overskridelsesgrænse på 100 timer ved 26°C, hvilket ca. svarer til en 5%-fraktile ved en årlig arbejdstid på 2000 timer. I den nye standard DS/EN 15251 [2007] er det foreslået, at der enten kan benyttes 3 eller 5% som maksimal toleranceoverskridelse (yderligere beskrevet i afsnit 2.5.1). Fra de forskellige standarder og normer der findes (DS/EN ISO 7730 [2006]; ANSI/ASHRAE 55 [2004]; DS 474 [1993]; DS/EN 15251 [2007]) foreskrives der altid en tilladelig overskridelsesgrænse (både med hensyn til temperatur og indeluftkvalitet), da det ellers vil kræve et alt for stort energiforbrug under ekstreme udeklimaforhold, at altid opretholde et perfekt indeklima.

Dette kan ligeledes benyttes i vurderingen af en samlet ydeevneindikator for en bygning. Det er ikke retfærdigt at benytte den lavest estimerede totale Eco-factor i en evaluering af en bygnings ydeevne. F.eks. vil det af ovenstående figur 9.12 betyde, at den samlede indikator for bygningen vil være ca. 44%.

Valget af %-fraktil, gennemsnit, etc. vil altid være en subjektiv vurdering af den metode, der ønskes benyttet i evalueringen af en bygnings ydeevne. Designeren kan således gøre brug af sin egen valgte indikator, hvis dette ønskes. Det skal dog altid erindres at samme metode skal benyttes ved sammenligning af forskellige designløsninger. I dette projekt er valget af en samlet ydeevneindikator for en bygning ligeledes foretaget ud fra egen subjektiv vurdering samt med baggrund i litteraturstudiet og de heri benyttede indikatorer. Det er derfor valgt at gøre brug af en 95%-fraktil af den totale Eco-factor, som en samlet ydeevneindikator for en bygnings ydeevne.

9.1.4 ECO-FACTOR-VÆRKTØJETS OPBYGNING

Opbygningen af værktøjet er foretaget i Excel, da det her er muligt at arbejde med store datamængder, som er nødvendigt i beregningen af Eco-factoren og de vurderingsredskaber, der er implementeret til evaluering af indeklimaet. Endvidere er den oprindelige Eco-factor metode opstillet i Excel-regneark. Som nævnt tidligere er der med udgangspunkt i grundprincipperne for det nuværende Eco-factor-værktøj ([Bjørn et al., 2004]), foretaget en videreudvikling af konceptet ved optimering af de bagvedliggende beregningsrutiner. Endvidere er der foretaget en udvidelse med nye termiske komfortmodeller (f.eks. adaptiv indgangsvinkel) samt langtidsevaluering af indeklimaet, som kan anvendes som vejledning til designeren ved en endelige vurdering af bygningens indeklima. Som beskrevet tidligere i diskussionen af valgte koncepter (afsnit 8.6), vil der blive foretaget en optimering af det termiske beregningsmodul i Indeklima Eco-factoren og en udvidelse med dynamiske beregningsmetoder til brug ved langsigtede evalueringer af indeklimaet. Den nedenstående figur 9.13 illustrerer, hvad der implementeres og optimeres i konceptet.



Figur 9.13: Hierarkisk diagram for evalueringsmetode af den totale Eco-factor inkl. de nye beregningsrutiner. Der er ikke foretaget ændringer til estimeringen af den lokale diskomfort. De blå kasser bruges direkte i beregningen af Eco-factoren, hvor de lilla kasser kan anvendes af designeren til evaluering af det generelle termiske indeklime på informativ basis.

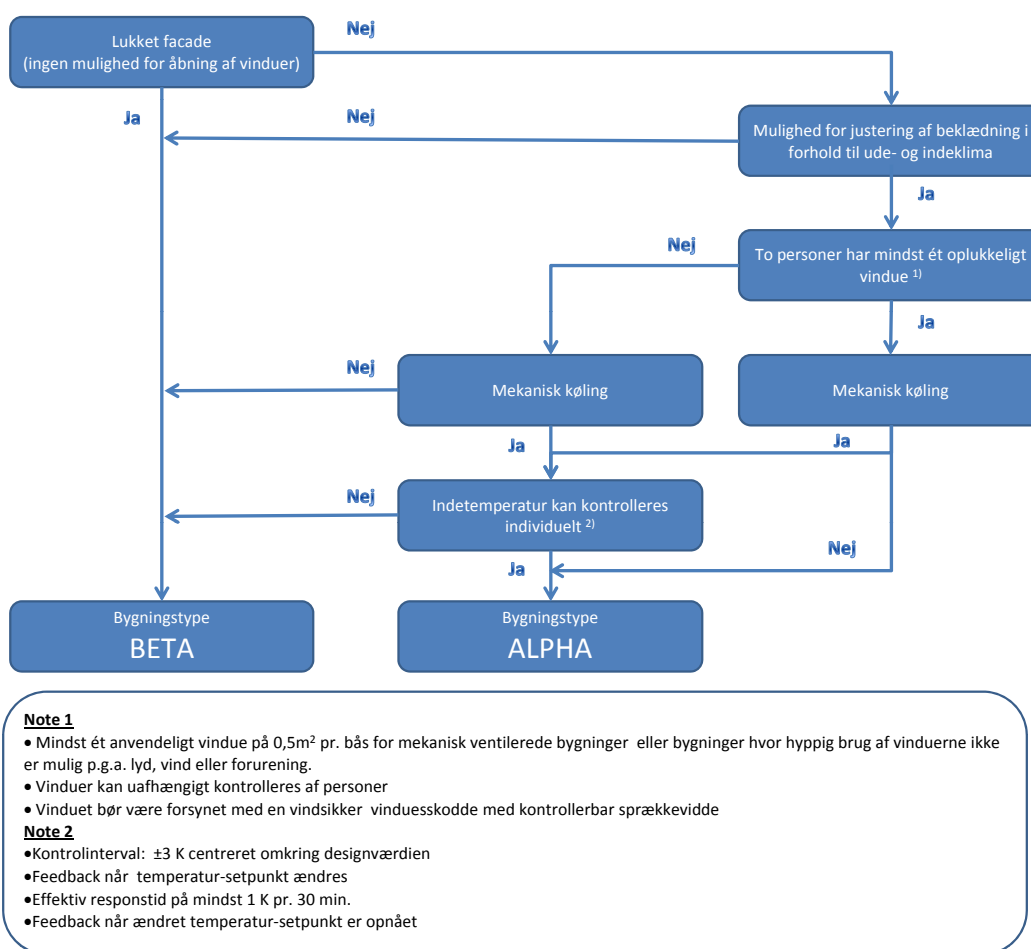
Som det ses af figur 9.13, udvides den oprindelige Eco-factor-metode hovedsageligt med beregninger ud fra en importeret resultatfil fra et TBS-program. Endvidere er der implementeret flere vejledende ark til evaluering af indeklime - f.eks. ud fra den adaptive indgangsvinkel samt metoder til langsigtet evaluering af det termiske indeklime.

Klassificeringsprocedure

Igennem litteraturstudiet i nærværende rapport er det blevet vist, at personer ved varierende temperatur løbende søger at opretholde egen termisk komfort gennem adaptiv adfærd - f.eks. gennem åbning af vinduer eller døre, justering af beklædning mv. (afsnit 4). Den adaptive adfærd er mere udpræget i naturligt ventilerede bygninger - bl.a. som følge af den tættere ”kontakt” med udeklimaet, hvor det også er blevet vist at personer heri generelt accepterer højere temperaturer end i tilsvarende mekanisk ventilerede og luftkonditionerede bygninger (HVAC-bygninger) [de Dear et al., 1997; Brager et al., 2004; de Dear og Morgan, 2003; Nicol et al., 1999; Haldi og Robinson, 2008]. Det er således nødvendigt ved beregning af en ydeevneindikator for det globale termiske miljø, at tage hensyn til denne adaptive adfærd ved differentiering mellem bygningstyperne, hvilket er illustreret på figur 9.13. I standarden DS/EN 15251 [2007] (yderligere beskrevet i afsnit 2.3) foretages opdelingen af bygningstyperne ud fra et miljømæssigt synspunkt, hvor der skelnes mellem bygninger hhv. med og uden mekanisk køling. I det målet med nærværende projekt er en samlet indikator for termisk og atmos-

færisk indeklima samt energi, vil det således være oplagt at medtage hvorvidt en given bygning er med eller uden mekanisk køling i en klassificeringsprocedure.

Der blev i afsnit 4.1.5 vist en videreudvikling af den oprindelige klassificeringsprocedure fra van der Linden et al. [2006] (figur 4.25), hvor fastlæggelsen af bygningstypen ydermere afhænger af om den pågældende bygning er mekanisk kølet eller ej. Det er ligeledes denne klassificeringsprocedure, der vil blive brugt/implementeret i Eco-factor-værktøjet til bestemmelse af, om en bygning er af typen "Alfa" eller "Beta". Nedenstående figur 9.14 illustrerer den implementerede klassificeringsprocedure til bestemmelse af bygningstypen og dermed de efterfølgende beregningsrutiner for det termiske indeklima (PMV/PPD eller t_{comf}) som vist på figur 9.13:



Figur 9.14: Kategorisering af bygninger i hhv. Alpha- og Beta-kategori, hvor klassificeringen afhænger af om bygningen er mekanisk kølet (efter van der Linden et al. [2006]; van Hoof og Hensen [2007])

Af figur 9.14 ses det, at opdelingen i hhv. Alpha- og Beta-bygninger tager både hensyn til muligheden for påvirkning af egen termisk komfort gennem åbning af vinduer samt den adaptive adfærd i form af justering af beklædningen mv.

9.2 IMPLEMENTERING AF ADAPTIV KONTROLALGORITME (ACA)

I afsnit 4.1.4 samt 8.3, blev den adaptive kontrolalgoritme beskrevet. Muligheden for store energibesparelser uden forringelse af det termiske indeklima, fordrer yderligere fokus på dette koncept. Det er valgt at implementere den adaptive kontrolalgoritme i TBS-programmet, BSim, og som tidligere beskrevet i afsnit 8.3 skal setpunktet for indetemperaturen styres som funktion af den løbende middel-udetemperatur efter følgende⁵:

$$T_c = 0,302 \cdot T_{rm} + 19,39 \quad \text{for } T_{rm} > 10^\circ\text{C} \quad (9.20a)$$

$$T_c = 22,88^\circ\text{C} \quad \text{for } T_{rm} \leq 10^\circ\text{C (nedre grænse)} \quad (9.20b)$$

hvor

$$T_{rm} = 0,80 \cdot T_{rm,n-1} + 0,20 \cdot T_{dm,n-1} \quad (9.21)$$

	T_c	=	Setpunktet for indetemperaturen	[°C]
hvor	T_{rm}	=	Den løbende middel-udetemperatur	[°C]
	$T_{rm,n-1}$	=	Den løbende middel-udetemperatur for dag $n-1$	[°C]
	$T_{dm,n-1}$	=	Døgn-middel-udetemperatur for dag $n-1$	[°C]

Ligningerne implementeres i BSim således der på baggrund af de benyttede vejrdata successivt beregnes setpunkter for indetemperaturen som funktion af den løbende middel-udetemperatur (ligning (9.21)).

9.2.1 IMPLEMENTERING I BSIM

Selve implementeringen af den adaptive kontrolalgoritme (i det følgende benævnt 'ACA') foretages gennem programmet Matlab. I samarbejde med SBi, der har opstillet en kobling mellem programmet Matlab og BSim, er der opstillet en række Matlab-procedurer der gør det muligt at styre setpunktet for opvarmning og køling løbende under simuleringen⁶. Af tekniske årsager er det kun muligt at styre setpunktet for hhv. køling og opvarmning for ventilationssystemet⁷. Ved simuleringer vil dette kræve, at ventilationsanlægget også er i drift i weekenderne for at opretholde rumtemperaturen, hvilket vil give et forkert billede af de potentielle energibesparelser. Det vælges derfor at rumtemperaturen opretholdes af varmeanlægget i weekenderne, hvorefter ventilationsanlægget overtager dette.

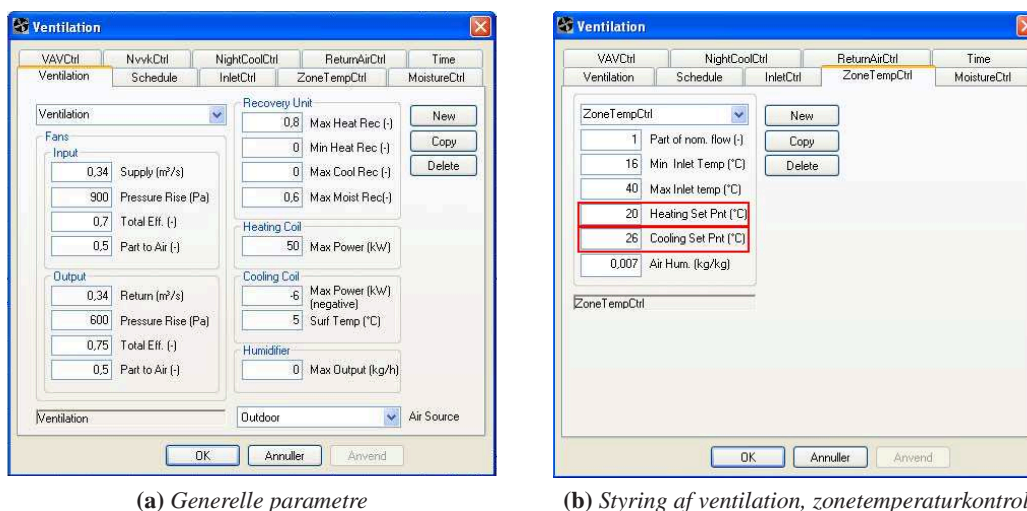
Følgende figur viser skærmprent fra styring af ventilationssystemet i BSim, hvor ACA implementeres.

⁵Ligningerne er nærmere beskrevet i afsnit 4.1.4

⁶Samtlige Matlab-procedurer forefindes på den vedlagte DVD

⁷systemet "Ventilation" i BSim

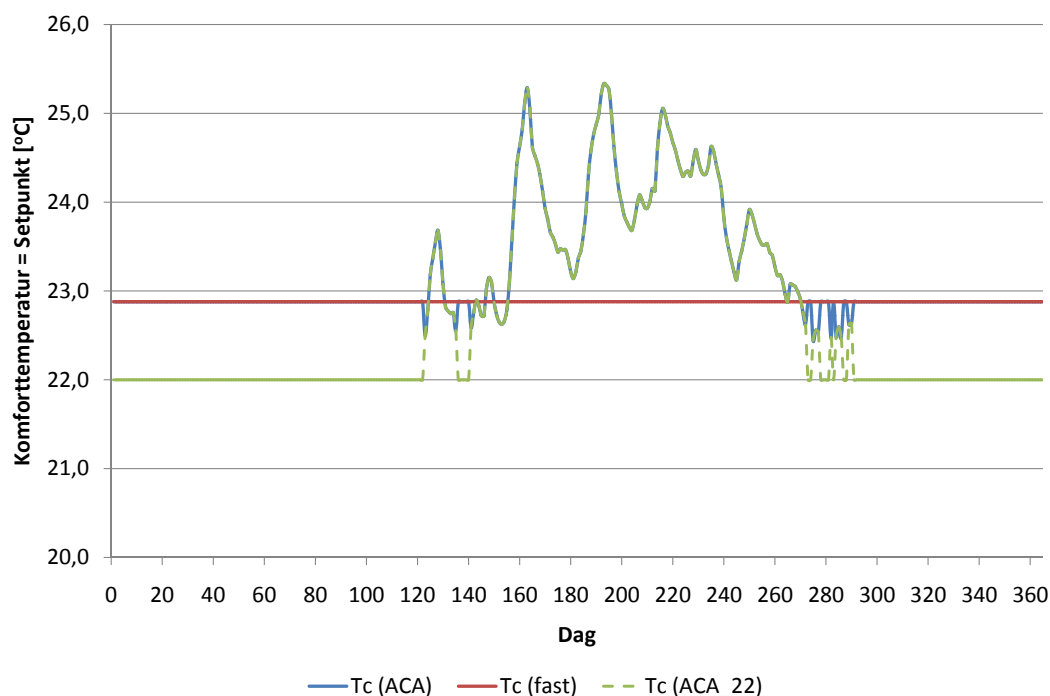
9.2 Implementering af adaptiv kontrolalgoritme (ACA)



Figur 9.15: Skærmpoint fra BSim af styringsstrategi for ventilationsanlæg. Setpunkter der skal styres efter ACA er markeret på figur (b).

De på figur 9.15(b) viste setpunkter for hhv. opvarmning (*Heating Set Pnt*) og køling (*Cooling Set Pnt*) skal styres efter ligning (9.20a) og (9.20b), og setpunkterne vil således variere tidsligt. Setpunktet for hhv. opvarmning og køling må nødvendigvis være adskilt af en lille margin, idet identiske setpunkter vil medføre simultan opvarmning og køling (energidrab).

Følgende figur 9.16 viser setpunktet beregnet efter ACA beregnet på baggrund af dansk DRY sammenlignet med et fast setpunkt på 22,88°C (fra ligning (9.20)).



Figur 9.16: Fast setpunkt sammenlignet med setpunkt beregnet efter ACA (ligning (9.20)) på baggrund af dansk DRY.

Som det fremgår af ovenstående figur, vil det ACA-beregnete setpunkt ligge fast i de kolde måneder og faktisk højere end setpunktet på 22,88°C, der er vist som eksempel. Ideen med selve ACA-konceptet er, at algoritmen implementeres uden væsentlig indflydelse på den termiske komfort, men med store energibesparelser til følge. Med udgangspunkt i dette, må der nødvendigvis knyttes en kommentar til den nedre grænse angivet ved ligning (9.20b). Normerne DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks A] samt DS/EN 15251 [2007, Anneks A] angiver som eksempel designværdier for minimumstemperatur for opvarmning⁸ til hhv. $22^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$ og 20°C for klasse B svarende til PPD<10%. Således kunne den nedre grænse på 22,88°C sænkes yderligere til 22°C, med henblik på større energibesparelser og et stadigt forventet acceptabelt indeklima. Dette er illustreret ved den stiplede linje på figur 9.16. Dog skal kravene til tidlige temperaturvariationer angivet i samme normer undersøges for at undgå termisk diskomfort herved.

For at undersøge de potentielle energibesparelser i forbindelse med en implementering af ACA, vil der i kapitel 11 blive foretaget simuleringer af en fuldt luftkonditioneret bygning. Hertil er det nye domicil for Grøntmij | Carl Bro i Århus udvalgt, og det har her været muligt at skaffe CTS-data for validering af den opstillede BSim-model. Opstillingen af BSim-modellen for den udvalgte bygning er beskrevet i detaljer i appendiks G og der henvises hertil for yderligere information herom.

⁸Forudsætninger: $M = 1,2 \text{ met}$; $I_{cl} = 1,0 \text{ clo}$; $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$; $RH = 50\%$ v. t_{op}

Vurdering af bygningers ydeevne med den udvidede Eco-factor 10

Til undersøgelse af det udvidede Eco-factor-værktøj er der i det følgende foretaget en beregning på to udvalgte bygninger. Den første bygning er Københavns Energi, som er en naturligt ventileret bygning og den anden er Grontmij | Carl Bro's nye domicil, som er en mekanisk kølet bygning med balanceret mekanisk ventilation. Der er ud fra Eco-factor-beregningen foretaget en langtidsevaluering af bygningernes indeklime og energiforbrug samt endvidere en vurdering af den samlede ydeevne gennem den totale Eco-factor.

10.1 INDLEDNING

Der er i det følgende foretaget en eksempelberegning med Eco-factor-værktøjet på to bygninger - hhv. Københavns Energi og Grontmij | Carl Bro. Beskrivelsen samt opbygningen af modellerne i BSim er vist i appendikserne F og G. BSim-modellerne er desuden valideret i forhold til CTS-data og målinger der er lavet i bygningerne, for dermed at sikre at de opstillede modeller er så præcise som muligt mht. simulering af indeklime og energiforbrug.

Resultatfilen fra BSim anvendes efterfølgende som input-data til Eco-factor-værktøjet, som herefter foretager de fornødne beregninger inden designeren/brugeren kan vurdere bygningens indeklime- og energi ydeevne. Eco-factoren anvendes således til at bestemme en bygningens ydeevne ud fra en BSim-resultatfil samt enkelte krævede indtastninger af brugeren i Eco-factor-programmet (f.eks. beklædningsisolans, aktivitetsniveau, etc.). Udover beregningen af Eco-factor-værdierne, vil det også være muligt med værktøjet, at foretage detaljerede vurderinger af indeklimeets ydeevne, da programmet er udvidet med de gængse samt flere af de nyere udviklede evalueringsmetoder, som beskrevet i litteraturstudiet (kapitel 2, 3 og 4). Dette indbefatter langtidsevalueringer (PPD-timer [DS/EN ISO 7730, 2006] og maksimale tolerance-overskridelser [DS 474, 1993]) samt adaptive modeller for estimering af termisk komfort.

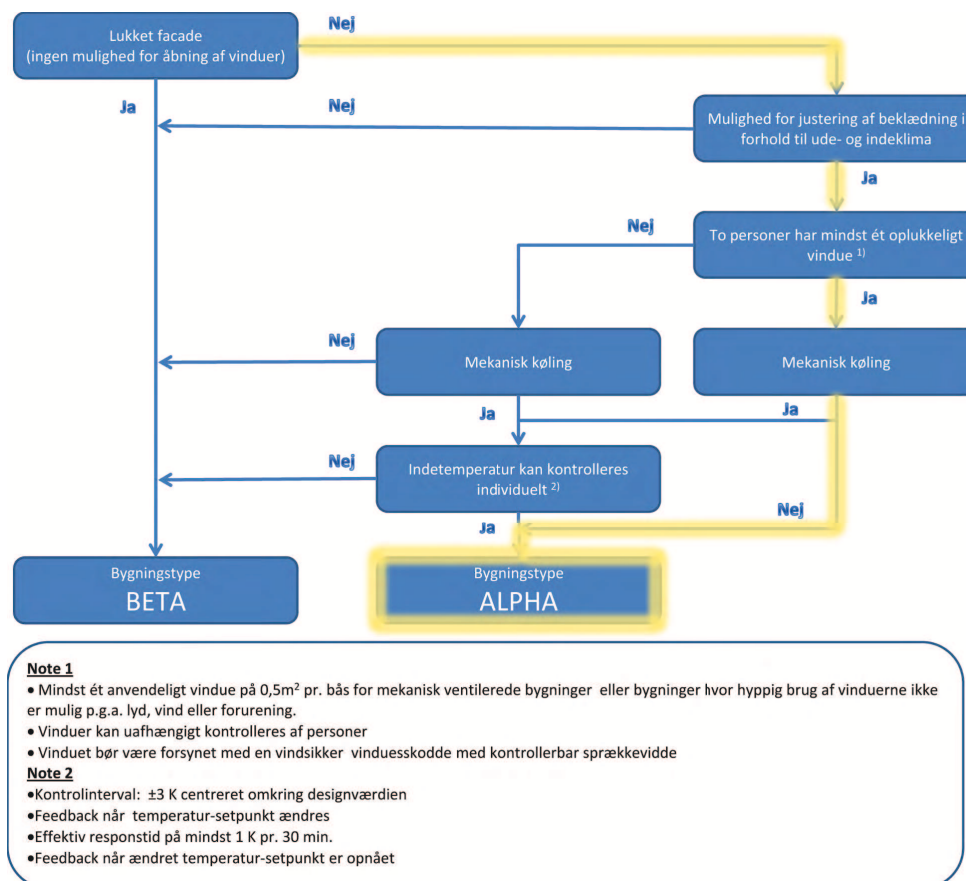
Det er udover en Eco-factor-beregning ønsket, at sammenligne de nuværende metoder for langtidsevaluering af termisk komfort i forhold til de nyere metoder, hvor beregningen af f.eks. antal PPD-timer bygger på Fangers komfortligning (yderligere beskrevet i afsnit 2.5).

10.2 KØBENHAVNS ENERGI

Københavns Energi's (KE) nye domicil er opført i perioden 2003-2005 og er en naturligt ventileret bygning via facaderne og det centrale atrium. Det er valgt at foretage BSim-beregningen på et kon-

torafsnit på 2. sal mod øst, for dermed at forsimple beregningen i TBS-programmet. En yderligere og mere detaljeret beskrivelse af bygningen og det valgte kontor forefindes i appendiks F.

I det udvidede Eco-factor-værktøj (*Eco-factor.08.xls*) foretages en differentiering mellem bygningstyperne ved en klassificeringsprocedure - Alfa- og Beta-bygning (afsnit 4.1.5 og 9.1.3). Ved klassificeringen af bygningstypen er det muligt at bestemme om bygningens termiske indeklimaydeevne kan vurderes efter de nye adaptive vurderingsmetoder som beskrevet i kapitel 9. Nedenstående figur viser "ruten" for den pågældende bygningens klassificering i forhold til bygningstypen.



Figur 10.1: Klassificeringsprocedure for Københavns Energi. Bygningen er en naturligt ventileret bygning og kan klassificeres som en Alfa-bygning.

Der er i det følgende foretaget en forklaring til hver boks igennem "ruten".

Boks 1 Der vil være mulighed for åbne facader, bl.a. fordi bygningen er naturligt ventileret hvor dette er krævet.

Boks 2 Der er ikke opstillet nogen krav omkring beklædning for kontorpersonalet. I naturligt ventilerede bygninger er dette oftest tilfældet, da det termiske indeklima er proportionalt med udeklimaet.

Boks 3 Ud over de automatisk styrede vinduer i bygningen kan personerne desuden åbne ekstra vinduer manuelt når det ønskes.

Boks 4 Der er ikke installeret mekanisk køling i bygningen.

Som det ses af ovenstående figur 10.1 kan bygningen klassificeres som en Alfa-bygning. Det er hermed muligt at vurdere indeklimaet ud fra de nye udviklede adaptive metoder (disse er gennemgået i kapitel 9). Der foretages dog stadig en "normal" beregning af det termiske indeklime ud fra PMV-/PPD-indekset, som desuden altid anvendes i vurderingen af den endelige Eco-factor. De adaptive beregningsmetoder anvendes kun som vejledning til designeren/brugeren af Eco-factor-værktøjet, hvoraf det vil være muligt at foretage en yderligere/ekstra vurdering af det termiske indeklime.

10.2.1 ENERGIFORBRUG

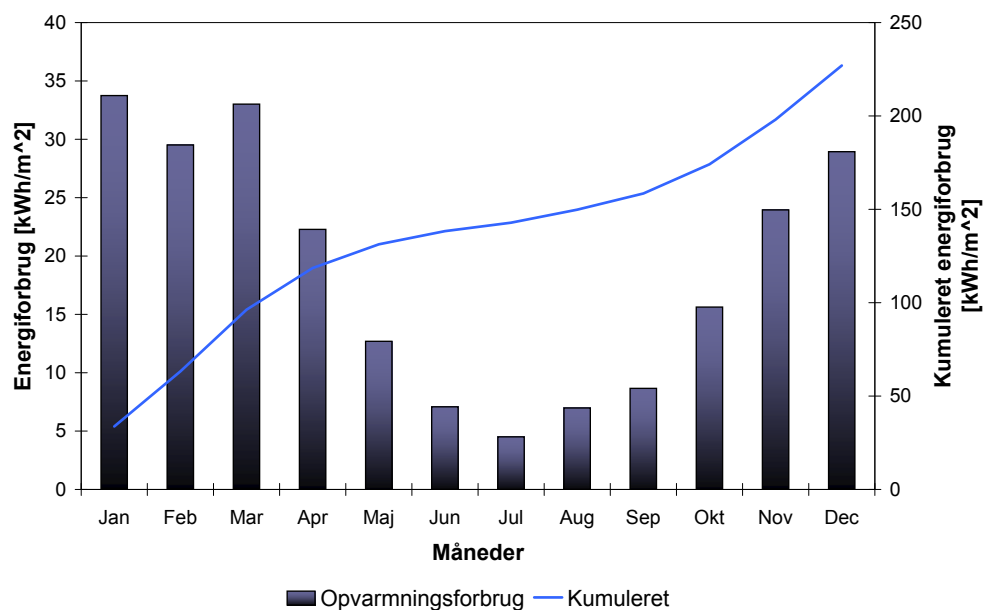
Energiforbruget til opvarmning, belysning, udstyr mv. for hele året beregnes af værktøjet på baggrund af importerede data fra TBS-programmer. Eco-factoren anvender desuden disse beregninger til bestemmelse af Energi-Eco-factoren som indgår i den totale Eco-factor - dette er yderligere beskrevet og diskuteret senere i dette afsnit.

Ud fra den opbyggede BSim-model er det muligt at beregne bygningens årlige energiforbrug.

Tabel 10.1: Københavns Energis energiforbrug over et år fordelt på de forskellige bidrag. Kontorafsnittet er beregnet til 541 m²

	Enhed	Opvarmning	Køling	Ventilator	Belysning	Udstyr	Total
Energiforbrug	kWh/m ²	227	0	0	15,8	17,8	260,6

Udover det samlede energiforbrug til opvarmning for hele året, kan energiforbruget opdeles på de enkelte måneder som vist i nedenstående figur 10.2. Herudfra er det muligt for designeren at se en fordeling over året, samt anvende dette som et optimeringsværktøj af modellens energiforbrug.



Figur 10.2: Energiforbrug til opvarmning fordelt ud på månederne.

Som det ses af ovenstående tabel 10.1 er energiforbruget til opvarmning af bygningen ret stort i forhold til det af projektgruppen forventede. I en naturligt ventileret bygning vil energiforbruget til opvarmning i de fleste tilfælde altid være større end en bygning med mekanisk ventilationsanlæg, da disse bygninger er uden varmegenvinding. Det vurderes dog ikke at opvarmningsbehovet i KE vil være så meget større end opvarmningsforbruget i en gennemsnitsbygning - omkring 50-70 W/m². Forklaringen på dette høje energiforbrug ligger i opbygningen af BSim-modellen, da det desværre ikke har været muligt, af tekniske årsager¹, at opbygge modellen som en naturligt ventileret bygning. Som beskrevet i appendiks F er ventilationen i bygningen opbygget som mekanisk ventileret uden energiforbrug til ventilatorer samt uden varmegenvinding. For at få det termiske indeklima til at "passe" med den målte indelufttemperatur er der justeret på styringen af ventilationsanlægget, hvilket har fået energiforbruget til opvarmning af bygningen til at stige udover hvad der var forventet.

Det simulerede energiforbrug til opvarmning er sammenlignet oplysninger fra Københavns Energi (se evt. appendiks L.2.4. Fjernvarmeforbruget har været 954 MWh for år 2007, hvoraf der er gået 29,2 MWh til opvarmning af varmt vand i bygningen². Da BSim-beregningen er foretaget for 2006, er det nødvendigt at omregne det oplyste energiforbrug fra 2007 til 2006 via graddage (GD). Til beregningen skal det graddøgnsuafhængige forbrug (GUF) fratrækkes det totale energiforbrug til opvarmning, hvormed det graddøgnsafhængige Forbrug (GAF) bliver 924,8 MWh. Der har i 2007 været 2198 GD og i år 2006 har der været 2488 GD. Det omregnet energiforbrug til år 2006 bestemmes af nedenstående ligning (10.1).

¹Begrænset af koblingen mellem Matlab og BSim

²Det er oplyst af KE, at der er brugt 556 m³ varmt vand: $29,2 = \frac{4200 \cdot 1000 \cdot 45}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \frac{556}{1000}$

$$E_{2006} = GAF + GUF \quad (10.1)$$

$$E_{2006} = \frac{E_{2007}}{GD_{2007}} \cdot GD_{2006} + GUF$$

$$E_{2006} = \frac{924,8MWh}{2198GD} \cdot 2488GD + GUF$$

$$E_{2006} = 1046,8MWh + 29,2MWh$$

$$E_{2006} = 1076MWh$$

hvor

$$E_{2006} = \text{Energiforbrug år 2006} \quad [MWh/\text{år}]$$

$$E_{2007} = \text{Energiforbrug år 2007} \quad [MWh/\text{år}]$$

$$GD_{2007} = \text{Graddage år 2007} \quad [GD]$$

$$GD_{2006} = \text{Graddage år 2006} \quad [GD]$$

Det graddøgnskorrigerede energiforbrug for år 2006 er således beregnet til 1076 MWh. Sammen med bygningens opvarmede etageareal er det muligt, at beregne en brugbar værdi til input i Eco-factor-værktøjet. Bygningens etageareal er opmålt til 16500 m², hvormed energiforbruget pr. kvadratmeter bliver 65,2 kWh/m². Det beregnede energiforbrug er ikke den korrekte værdi for det udvalgte kontorafsniit der regnes på i BSim, men det giver i det mindste et mere rigtigt og brugbart energiforbrug til en videre beregning af Eco-factoren.

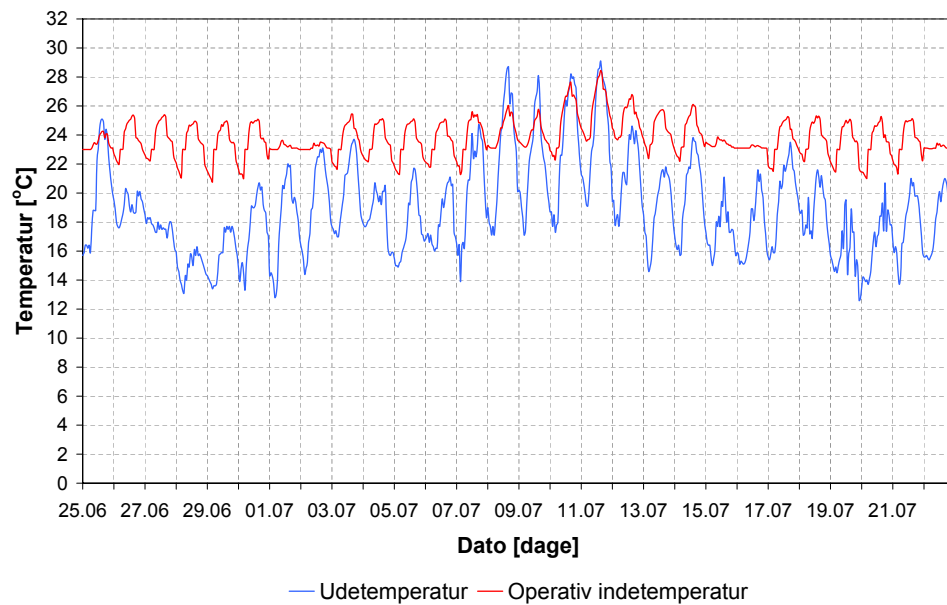
10.2.2 INDEKLIMA

Der er i det følgende foretaget en vurdering af hhv. det termiske og atmosfæriske indeklima i Københavns Energi. Da bygningen er naturligt ventileret må det forventes, at der vil forekomme store variationer i såvel indetemperaturen som CO₂-koncentrationen, da disse faktorer er stærkt afhængige af udeklimaet og dets fluktationer. Beregningerne og vurderingen af indeklimaet indgår på lige fod med energiforbruget, i den totale Eco-factor, som der foretages en beskrivelse og vurdering af senere i dette afsnit.

Vurderingen af indeklimaet er opdelt i to dele - hhv. termisk og atmosfærisk indeklima. Der er desuden foretaget en sammenligning af de traditionelle langsigtede metoder til vurdering af det termiske indeklima med de nyere og mere informative metoder, som bl.a. er beskrevet i afsnit 2.5 og kapitel 3. Endvidere, idet bygningen er naturligt ventileret og kategoriseret som en Alfa-bygning, er de nye adaptive vurderingsmetoder undersøgt som evalueringsform.

Termisk indeklima

Der er i den nedenstående figur 10.3 vist hhv. den operative indetemperatur samt udelufttemperaturen for en 4 ugers sommerperiode. Herved ses den operative indetemperaturs variation over dagen samt ugevis ved den korresponderende udelufttemperatur.

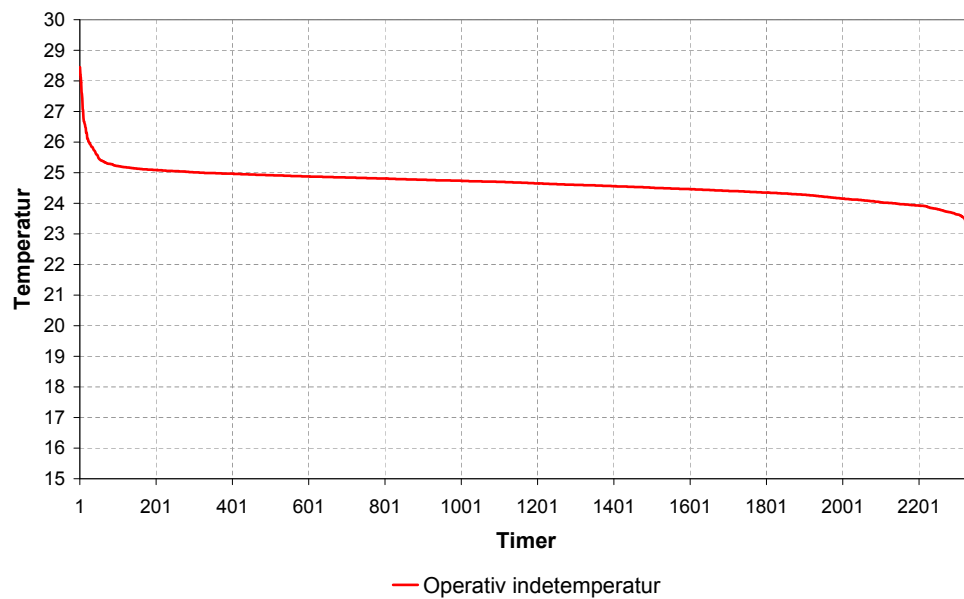


Figur 10.3: Simuleret operative indetemperatur i kontorafsnittet sammenlignet med udelufttemperaturen. Temperaturerne er vist for en 4 ugers periode om sommeren.

Selv ved høje udelufttemperaturer holder den operative indetemperatur sig på et acceptabelt niveau. Dette skyldes tildels bygningens høje varmekapacitet samt det faktum at bygningen natkøles.

Temperaturoverskridelse

Følgende figur viser en fordeling af den operative indetemperatur for arbejdstiden (mandag-fredag, 8-17) i bygningen. Udfra figuren er det muligt at se, hvor mange timer der overstiger f.eks. 26 og 27°C jf. DS 474 [1993], hvor det vejledende antal overskridelsestimer vejledende er angivet til hhv. 100 og 25 timer.



Figur 10.4: Fordeling af den operative indetemperatur for arbejdstiden.

I Eco-factor-værktøjet bliver antallet af timer over hhv. 26 og 27°C beregnet, for dermed at kunne evaluere indeklimaet efter de hidtil anvendte vurderingsmetoder, som beskrevet i afsnit 2.5. Tabel 10.2 opsummerer resultaterne for KE-bygningen.

Tabel 10.2: Resultat af bygningens antal timer over hhv. 26 og 27°C.

	DS 474 [1993] Timer over 26°C	DS 474 [1993] Timer over 27°C
	Timer	Timer
Københavns Energi	24	9

Ved en vurdering af det termiske indeklima ud fra ovenstående langsigtede metode, hvor antallet af timer over hhv. 26 og 27°C summeres op over året, vil bygningens termiske indeklima blive evalueret som værende acceptabelt/(godt), idet de ikke overskrider de vejledende maksimalt tilladte værdier på hhv. 100 og 25 timer. Som diskuteret i afsnit 2.5 tager den ovenstående metode fra DS 474 [1993] ikke højde for størrelsen af overskridelsen - dvs. om temperaturen overskrider f.eks. 27°C med 1, 2 eller 3 grader. Den beskrevne metode, hvor der tages højde for størrelsen af overskridelsen, er ofte omtalt som "gradtimer"-metoden og er yderligere beskrevet i afsnit 2.5. Nedenstående tabel viser antallet af "gradtimer" over hhv. 26 og 27°C.

Tabel 10.3: Antal ”gradtimer” over hhv. 26 og 27° C. Metoden tager højde for overskridelsens størrelse.

	DS/EN ISO 7730 [2006] Gradtimer over 26° C <i>Timer</i>	DS/EN ISO 7730 [2006] Gradtimer over 27° C <i>Timer</i>
Københavns Energi	44,9	20,9

Foretages en langsigtet evaluering af det termiske indeklima ud fra ”gradtime”-metoden istedet for den traditionelle metode fra DS 474 [1993] ses det, at antallet af timer ca. er fordoblet, men dog stadig holder sig indenfor de anbefalede maksimale antal timer på hhv. 100 og 25. En samlet vurdering af det termiske indeklima i bygningen vurderes hermed stadig som værende *godt*.

Oplevelse af det termiske indeklima

Når der foretages en evaluering af det termiske indeklima ud fra temperaturer i bygningen, er denne vurdering bygget på en forholdsvis simpel indikator som ikke direkte kan fortælle hvor mange personer i bygningen der vil opleve indeklimaet som værende utilfredsstillende. Det vil derfor i fremtiden være en bedre og mere informativ metode at anvende PMV-indekset som indikator for det termiske indeklimas ydeevne. Ved brug af PMV-indekset vil det muliggøre en direkte fortolkning af, hvor mange personer i bygningen der vil opleve det termiske indeklima som utilfredsstillende ud fra nogle forudsætninger omkring bygningen og personernes adfærdsmæssige adaptivitet (beklædningsisolans og aktivitetsniveau). Det beregnede antal utilfredse kan ligeledes anvendes i en langsigtet evaluering af det termiske indeklima. Dette gøres ved brug af antal PPD-timer, hvor antallet af utilfredse over en bestemt acceptgrænse beregnes for hver time indenfor arbejdstiden og efterfølgende summeres op over året (yderligere og mere detaljeret beskrevet i afsnit 2.5).

I Eco-factoren beregnes antal utilfredse for hver time automatisk på baggrund af importerede data, hvor der i værktøjet ligeledes foretages en automatisk opsummering af antal kolde og varme PPD-timer - dvs. hvor de beregnede PMV-værdier har været hhv. under og over nul (termisk neutral). Designeren/brugeren kan herefter foretage sin vurdering af det forventede termiske indeklima ud fra disse værdier og tilhørende grafiske fremstillinger af hhv. PMV- og PPD-variationen over året.

Som beskrevet ovenfor skal der af designeren foretages enkelte forudsætninger (beklædningsisolans, aktivitetsniveau og middel lufthastighed) inden beregningen af antal utilfredse kan foretages:

Beklædningsisolans Forudsætninger omkring personernes beklædningsisolans og variationen over året er nødvendig for, at der kan foretages en beregning af PMV-indekset. Der er i Eco-factor-værktøjet indlagt tre forskellige metoder til fastsættelse af brugernes beklædning:

- *fast værdi for vinter og sommer periode* (efter DS/EN ISO 7730 [2006])
- *opdeling i fire perioder hen over året*
- *beregnet af algoritme som funktion af løbende middel-udetemperatur* (beskrevet i afsnit 4.2.1 og afsnit 9.1)

Ud fra disse metoder er det muligt for brugeren at opdele personernes beklædning tilstrækkeligt

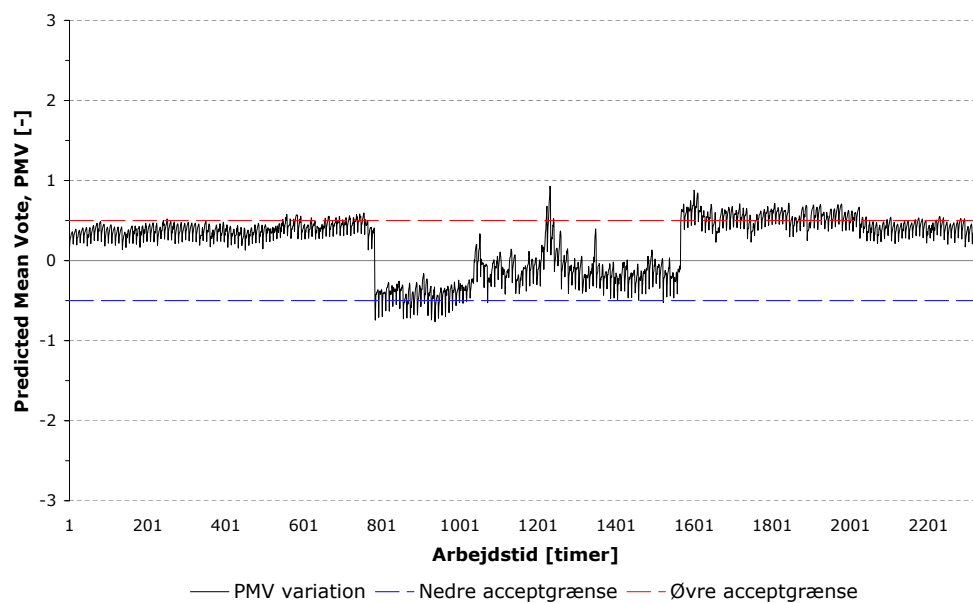
detaljeret over året. Det er i det følgende ønsket at undersøge de enkelte metoders indflydelse på beregningen af antal utilfredse.

Aktivitetsniveau Personernes aktivitetsniveau fastsættes ud fra én værdi for hele året. Da den pågældende bygning er en kontorbygning med hovedsageligt siddende aktivitet, vurderes personernes middel-aktivitetsniveau over døgnet til 1,2 met.

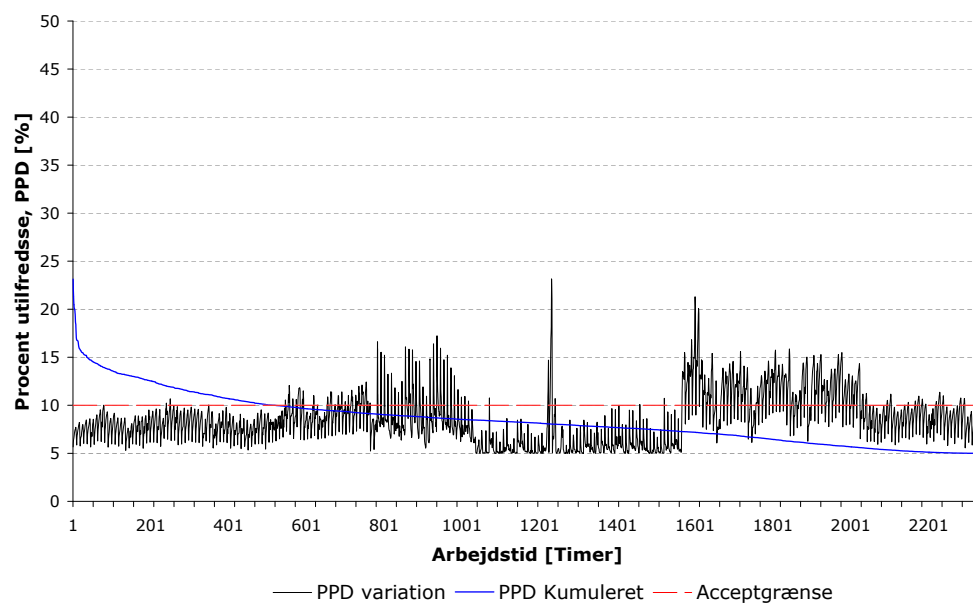
Middel lufthastighed En estimering af middellufthastigheden i bygningen kan i mange tilfælde være svær for brugeren, da denne afhænger af mange faktorer. Der anvendes ofte, og også her, en middellufthastighed i bygninger på 0,15 m/s.

De fastsatte værdier for aktivitetsniveau og middellufthastighed fra ovenstående gennemgang - hhv. 1,2 met og 0,15 m/s, anvendes i Eco-factor-værktøjet til beregning af antal utilfredse vha. PMV-/PPD-indekset. Beklædningsisolansens samt beregningsmetodens indflydelse er i det følgende undersøgt for Københavns Energi. Fastsættelsen af personernes beklædning er først estimeret ved brug af værdierne fra DS/EN ISO 7730 [2006] og derefter ved anvendelse af en algoritme beregnet ud fra en løbende middel-udetemperatur.

I DS/EN ISO 7730 [2006] er der angivet en beklædningsisolans for en vinter- og sommersituation til hhv. 1,0 og 0,5 clo. Resultaterne for beregningen af PMV- og PPD-indekset, ved brug af de nævnte clo-værdier, er vist i nedenstående figurer 10.5.



(a) *PMV-variation. De to vandrette linjer (blå og rød) viser acceptgrænsen i forhold til beregningen af antal PPD-timer.*



(b) *PPD-variation. Den vandrette linje (rød) viser grænsen for accepteret antal utilfredse. Den blå linje viser den kumuleret PPD-værdi.*

Figur 10.5: Variationen af beregnet PMV- og PPD-værdier over året indenfor arbejdstiden. Beregningen bygger på den importeret resultatfil fra BSim samt forudsætningerne omkring aktivitetsniveau og middel lufthastighed på hhv. 1,2 met og 0,15 m/s. Desuden er der forudsat en fast beklædning om vinteren og om sommeren på hhv. 1,0 og 0,5 clo.

Som det ses af PMV-beregningen illustreret i figur 10.5(a), vil personerne om vinteren med en clo-værdi på 1,0 føle det en lille smule for varmt, men stort set stadig holde sig inden for den valgte acceptgrænse på maksimalt 10% utilfredse. I forårs- og efterårsperioderne, hvor personerne stadig har en beklædning svarende til 1,0 clo, vil personerne i bygningen føle det termiske indeklima som værende for varmt. Desuden vil personerne ved overgangen til en beklædningsisolans på 0,5 clo opleve temperaturen i rummet som værende for kold, hvormed antallet af utilfredse vil overstige den tilladte grænse på 10% utilfredse. I selve sommerperioden vil de beregnede PMV-værdier i største del af tiden ligge inden for acceptgrænserne og vil kun i et enkelte tilfælde overstige den øvre acceptgrænse og medføre at lige under 25% af personerne i bygningen vil føle indeklimaet som værende for varmt.

Som beskrevet tidligere beregnes ligeledes antallet af PPD-timer der overstiger den nedre og øvre acceptgrænse - her er valgt en klasse II bygning iht. DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] med en maks. grænse på 10% utilfredse (svarende til en PMV-værdi på hhv. -0,5 og +0,5). Resultaterne for antallet af PPD-timer er vist i nedenstående tabel 10.4.

Tabel 10.4: Antal PPD-timer fordelt på personernes termiske oplevelse af indeklimaet.

	DS/EN ISO 7730 [2006] Varme PPD-timer (PMV > +0,5)	DS/EN ISO 7730 [2006] Kolde PPD-timer (PMV < -0,5)	Totale PPD-timer
Fast beklædningsisolans vinter (1,0 clo) og sommer (0,5 clo)	571	65	636

Som beskrevet i afsnit 2.5 er der fra litteraturen en anbefalet maksimal overskridelses grænse af den valgte acceptgrænse på ca. 100-150 PPD-timer indenfor arbejdstiden [Olesen, 2004]; [van der Linden et al., 2002]. Af ovenstående tabel 10.4 er det tydeligt, at den vejledende grænse overskrides med mange PPD-timer ud fra de forudsætninger der er gjort omkring beklædningsisolansen ved denne beregning.

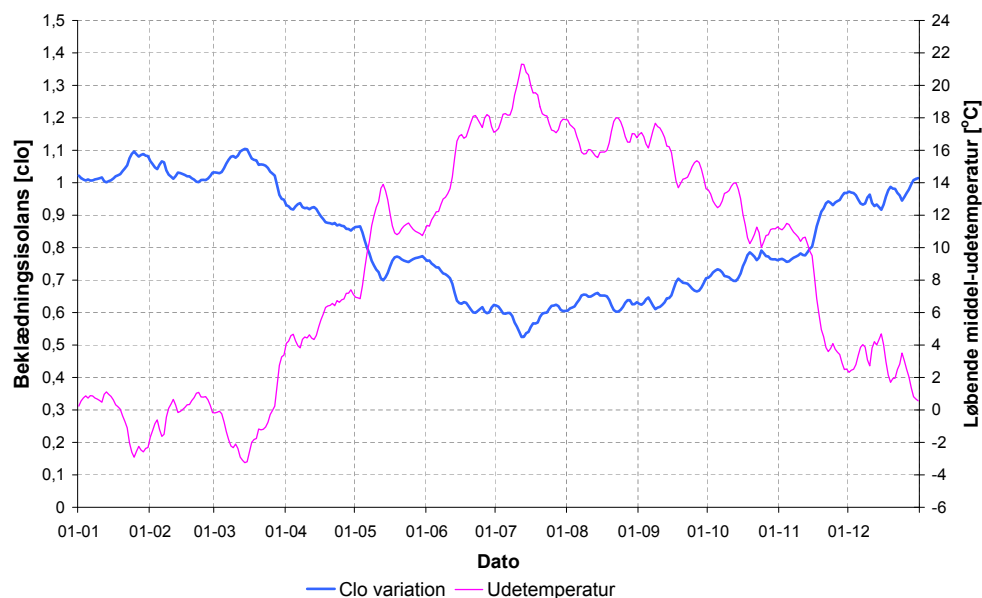
Ved en estimering af personernes beklædningsisolans er det vigtigt, at medtage den isolerende effekt fra stolen når der er tale om hovedsageligt siddende kontorarbejde (beskrevet yderligere i afsnit 4.1.1 samt appendiks B.2). Der er i DS/EN ISO 7730 [2006, Annex C] angivet vejledende isolanser for forskellige kontorstole, hvor en normal nyere kontorstol regnes som havende en termisk isoleringsevne på 0,15 clo. Når stolens isoleringseffekt medregnes i estimeringen af beklædningsisolansen vil antallet af totale PPD-timer forøges til 1777 PPD-timer. Det er således tydeligt, at isolansen fra kontorstolen ikke er uden betydning ved en langtidsevaluering af det termiske indeklima.

Til estimering af personernes beklædningsisolans kan der udover at gøre brug af værdierne fra DS/EN ISO 7730 [2006] anvendes algoritmer til beregning af variationen over året som funktion af en løbende middel-udetemperatur som beskrevet i afsnit 4.2.1. Der er i Eco-factor-værktøjet implementeret flere af disse empirisk udviklede algoritmer, som er fundet anvendelige samt tilstrækkeligt veldokumenteret³.

Der er i det følgende foretaget en vurdering af bygningens termiske indeklima, hvor beklædningsisolansen beregnes ud fra en algoritme fundet ved en regressionsanalyse fra et studie i Schweiz [Haldi og Robinson, 2008]. Nedenstående figur viser beklædningsisolansens variation over året, bereg-

³En yderligere diskussion heraf kan findes i afsnit 4.2 og 9.1

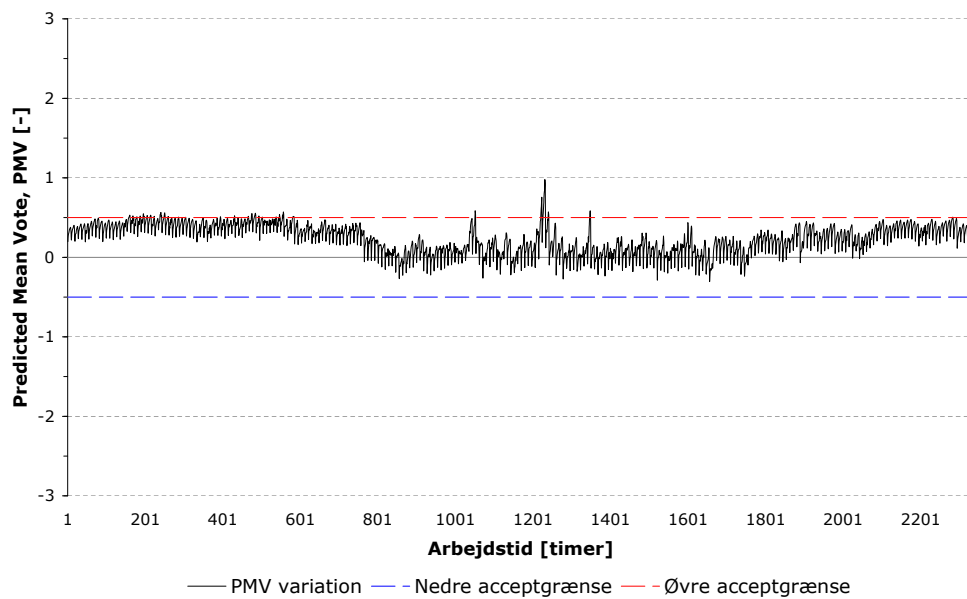
net udfra den løbende middel-udetemperatur.



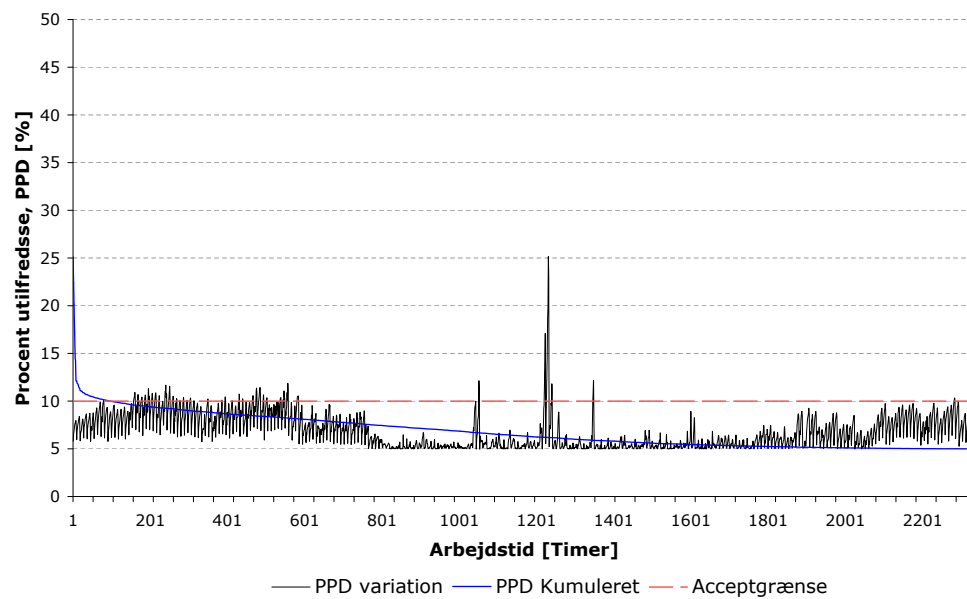
Figur 10.6: Beklædningsisolansens variation over året i forhold til den løbende middel-udetemperatur.

Som det ses af figur 10.6 vil beklædningsisolansen variere fra omkring 1,0 clo om vinteren til ca. 0,6 clo om sommeren. De beregnede isolanser stemmer således fint overens med de vejledende værdier der angives i DS/EN ISO 7730 [2006]. Ved at gøre personernes beklædningsisolans afhængig af udetemperaturen vil der således også skabes en relation til indelufttemperaturen i Københavns Energi, da bygningen er naturligt ventileret og det termiske indeklima vil derfor være stærkt afhængig af udetemperaturens forløb. Populært sagt er det termiske indeklima i "tættere kontakt" med det termisk udeklima i en naturligt ventileret bygning.

Resultaterne fra beregningen af hhv. PMV- og PPD-indekset med en varierende beklædningsisolans ses af nedenstående figur 10.7.



(a) PMV-variation. De to vandrette linjer (blå og rød) viser acceptgrænsen i forhold til beregningen af antal PPD-timer.



(b) PPD-variation. Den vandrette linje (rød) viser grænsen for accepteret antal utilfredse. Den blå linje viser den kumuleret PPD-værdi.

Figur 10.7: Variationen af beregnede PMV- og PPD-værdier over året indenfor arbejdstiden. Beregningen bygger på den importerede resultatfil fra BSim samt forudsætningerne omkring aktivitetsniveau og middellufthastighed på hhv. 1,2 met og 0,15 m/s. Desuden varierer beklædningsisolansen efter udetemperaturens forløb, givet ved figur 10.6

Ved at anvende en beklædningsisolans for personerne i bygningen, der varierer i forhold til den beregnede løbende middel-udetemperatur, vil der forekomme et færre antal utilfredse. Fra ovenstående figurer ses det, at personernes vurdering af det generelle termiske indeklima kun overstiger den valgte acceptgrænse indenfor arbejdstiden forholdsvis få gange i løbet af året. Af figur 10.7(a) observeres det, at der ikke vil forekomme situationer hvor det termiske indeklima vil føles som værende køligt ved den anvendte beklædningsisolans. Igen registreres det, ligesom i figur 10.5(a), at de beregnede PMV-værdier om vinteren ligger oppe omkring +0,5 i hele perioden, men dog sjældent over de 10% utilfredse. Dette kan f.eks. betyde at indetemperaturen i bygningen har været lidt højere end det neutrale niveau, at beklædningsisolansen er vurderet for højt, at aktivitetsniveauet er vurderet for højt eller at middellufthastigheden er sat for lavt. BSim-beregningen viser, at den operative indetemperatur i arbejdstiden om vinteren ligger i området omkring 24-25°C (yderligere beskrevet i appendiks F), hvilket må siges at være en forholdsvis høj temperatur i en periode, hvor beklædningsisolansen ofte vurderes til omkring 1,0 clo.

Når der foretages en langtidsevaluering af det termiske indeklima ved brug af antal PPD-timer som overstiger den valgte acceptgrænse på 10% utilfredse, er det muligt at vurdere det samlede termiske indeklima ved brug af en varierende beklædningsisolans. Resultaterne fra herfra er vist i nedenstående tabel 10.5.

Tabel 10.5: Antal PPD-timer fordelt på personernes termiske følelse af indeklimaet.

	DS/EN ISO 7730 [2006] Varme PPD-timer (PMV > +0,5)	DS/EN ISO 7730 [2006] Kolde PPD-timer (PMV < -0,5)	Totale PPD-timer
Fast beklædningsisolans varierende i forhold til T_{rm}	109	0	109

Som det ses er antallet af PPD-timer ved brug af en ligning til beskrivelse af beklædningsisolansens variation over året, under den vejledende grænse på ca. 150 PPD-timer. Ved evaluering af det generelle termiske indeklima i bygningen, vil det nu blive kvalificeret som værende et acceptabelt termisk indeklima.

Af ovenstående gennemgang af de langsigtede evalueringsmetoder for det termiske indeklima, er det tydeligt at den nyere metode, PPD-timer, der anvender antal utilfredse til en langsigtet vurdering af det termiske indeklima er en langt bedre indikator end den nuværende gængse metode hvor evalueringen foretages ud fra antal timer over hhv. 26 og 27°C jf. DS 474 [1993], idet den medtager flere betydende faktorer i beregningen (aktivitetsniveau, beklædningsisolans, middel lufthastighed, etc.). F.eks. er der, som beskrevet tidligere, registreret indelufttemperaturer op over 25°C om vinteren, hvilket sammen med en normal vinter-beklædningsisolans på 1,0 clo vil give et større antal utilfredse end den tilladte acceptgrænse. Desuden kan indelufttemperaturen om sommeren være så lav, f.eks. pga. natkøling, at der i forhold til den beklædning personerne møder op med om morgenen (omkring 0,5-0,6 clo), vil det termisk indeklima opleves som køligt eller direkte koldt for personerne i bygningen. Det er derfor en langt bedre indikator, at anvende PPD for bygningens termiske indeklimateevne i fremtiden, ved evaluering af både det momentane og langsigtede termiske indeklima.

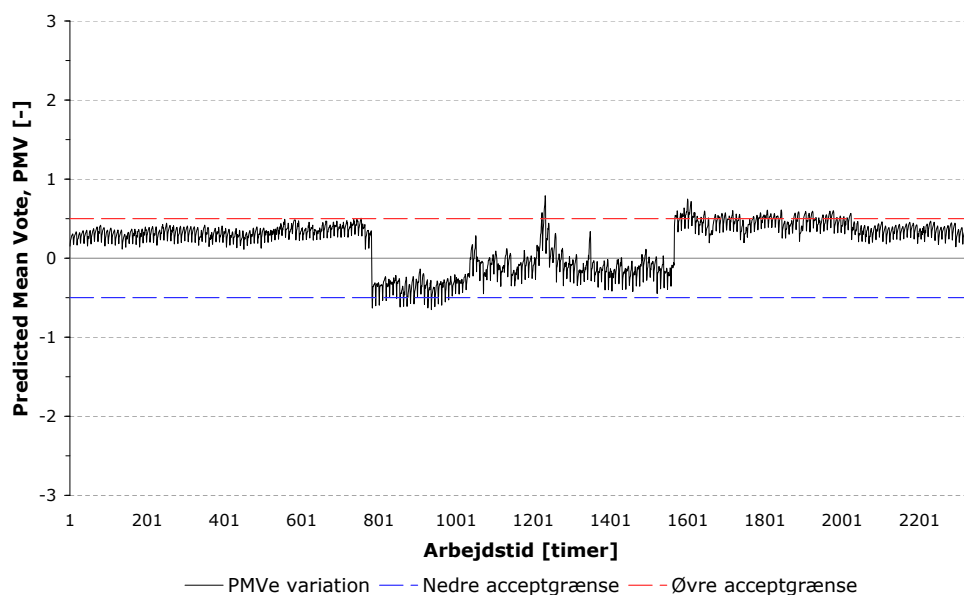
Adaptiv vurderingsmetode

Udover den traditionelle vurderingsmetode, hvor PMV-/PPD-indekset anvendes til evaluering af det termiske indeklima, er de nye adaptive modeller implementeret i Eco-factor-værktøjet som på informativ basis - dvs. beregninger og grafer indgår ikke i beregningsproceduren af Eco-factoren. Metoderne er desuden beskrevet og diskuteret i kapitel 4 og implementeringen af de adaptive modeller i Eco-factoren er beskrevet i afsnit 9.1).

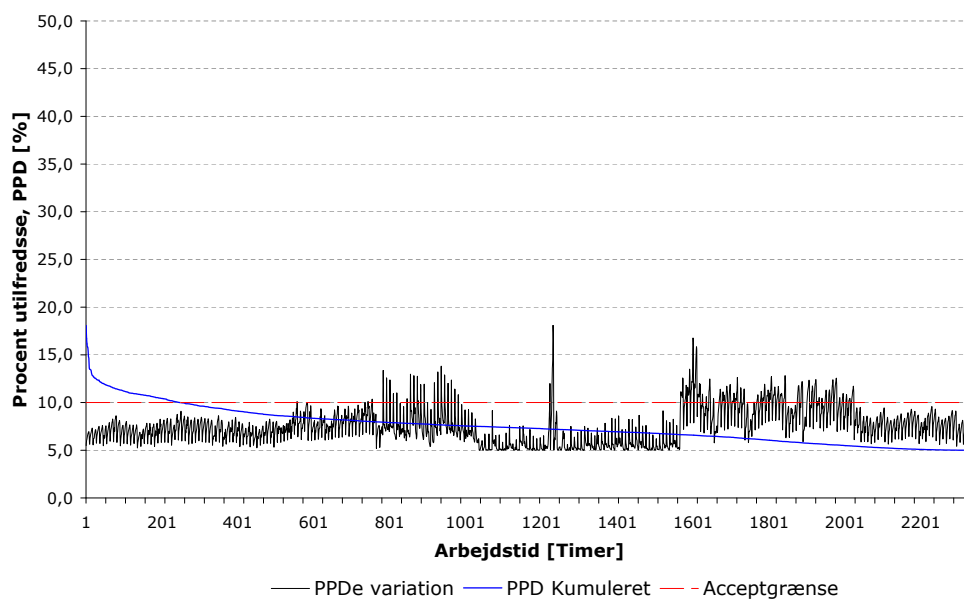
Der vil i det følgende blive gennemgået beregnede resultater fra de forskellige adaptive modeller - PMV_e (Fanger og Toftum [2002]), SCATs (Nicol og McCartney [2001]) og RP-884 (de Dear et al. [1997]). Der er i det følgende foretaget en vurdering af resultaterne for de enkelte projekter samt en sammenligning heraf. For hhv. SCATs- og RP-884-modellerne gælder det, at der er gjort nogle forudsætninger omkring personernes aktivitetsniveau og beklædningsisolans i bygningen.

Københavns Energi er i klassificeringsproceduren (beskrevet ovenfor) fundet til, at være en Alfa-bygningstype. Ved en Alfa-bygning er det muligt, udover de traditionelle metoder, at undersøge det termiske indeklima med de adaptive modeller, som beskrevet i kapitel 4.

Der er først foretaget en analyse af de adaptive resultater ved brug af PMV_e, som er en normal beregning af PMV og PPD, men hvor der ganges en forventningsfaktor e på det beregnede PMV-indeks (beskrevet i afsnit 4.1.3). Forventningsfaktoren beskriver personernes "forventning" til det termiske indeklima. Faktoren afhænger af længden af de varme perioder og af hvordan de omkringliggende bygninger ventileres (f.eks. mekanisk kølet eller naturligt ventileret). Forventningsfaktoren er for Københavns Energi vurderet til $e = 0,85$ ud fra tabel 4.5 i afsnit 4.1.3. Der er i beregningen forudsat en beklædningsisolans om vinteren på 1,0 clo og om sommeren på 0,5 clo.



(a) PMV_e -variation. De to vandrette linjer (blå og rød) viser acceptgrænsen i forhold til beregningen af antal PPD_e -timer.



(b) PPD_e -variation. Den vandrette linje (rød) viser grænsen for accepteret antal utilfredse. Den blå linje viser den kumulerede PPD_e -værdi.

Figur 10.8: Variationen af beregnede PMV_e - og PPD_e -værdier over året indenfor arbejdstiden. Beregningen bygger på den importerede resultatfil fra BSim samt forudsætningerne omkring aktivitetsniveau og middellufthastighed på hhv. 1,2 met og 0,15 m/s. Desuden er der forudsat en fast beklædning om vinteren og sommeren på hhv. 1,0 og 0,5 clo. Forventningsfaktoren er vurderet til 0,85 for den pågældende bygning.

Figur 10.8 viser hhv. PMV_e og PPD_e variationen over året med en fast beklædningsisolans for vinter og sommer. I forhold til figur 10.5, hvor der er foretaget en normal beregning af PMV- og PPD-variationen er det tydeligt, at antallet af utilfredse er mindsket en del ved en forventningsfaktor på 0,85. Dette kan ligeledes illustreres ved at opsummere antallet af PPD_e -timer over året og sammenligne med det tidligere beregnede antal PPD-timer.

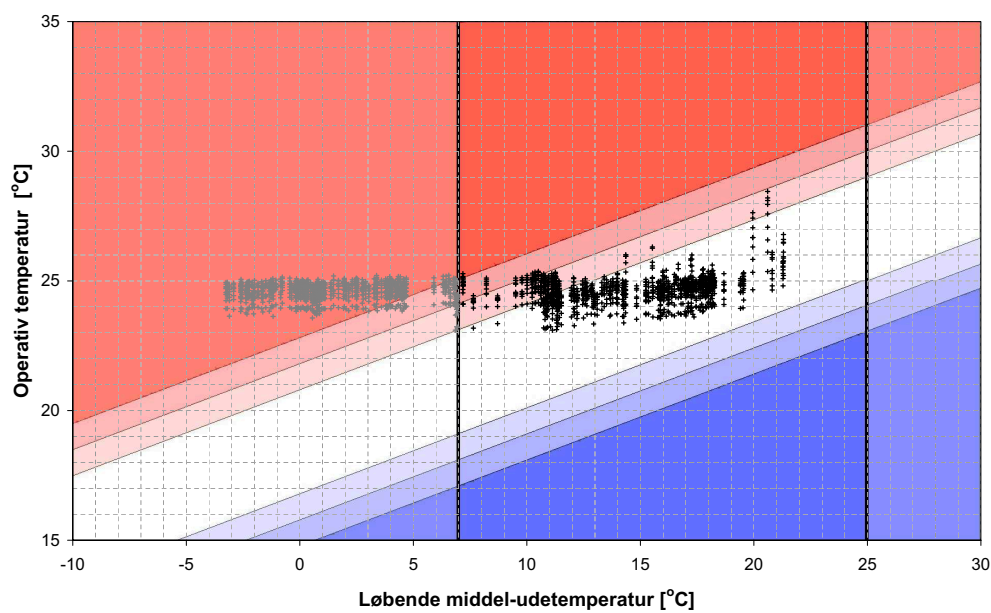
Tabel 10.6: Antal PPD_e -timer sammenlignet med konventionelle PPD-timer. Acceptgrænsen er fastsat til 10% utilfredse.

	DS/EN ISO 7730 [2006] Varme PPD-timer ($PMV > +0,5$)	DS/EN ISO 7730 [2006] Kolde PPD-timer ($PMV < -0,5$)	Totale PPD-timer
Fast beklædningsisolans, PMV vinter (1,0 clo) og sommer (0,5 clo)	571	65	636
Fast beklædningsisolans, PMV_e vinter (1,0 clo) og sommer (0,5 clo)	253	27	280

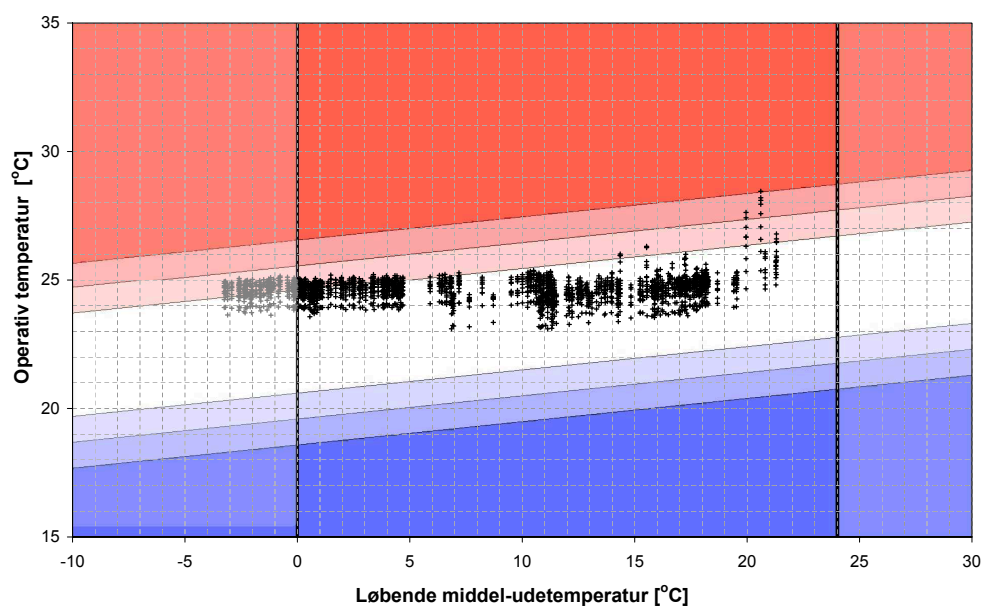
Ved den forudsatte forventningsfaktor er antallet af PPD-timer ca. halveret i forhold til den normale beregning.

I Eco-factoren kan der ligeledes foretages en vurdering af de termiske forhold ud fra de fundne resultater fra SCATs-projektet (yderligere beskrevet i afsnit 4.1.4). Resultaterne skal kun benyttes som vejledning.

Resultaterne fra den adaptive analyse ved brug af SCATs-projektet er vist i nedenstående figur 10.9.



(a) Grænser i forhold til Alfa-bygning



(b) Grænser i forhold til Beta-bygning

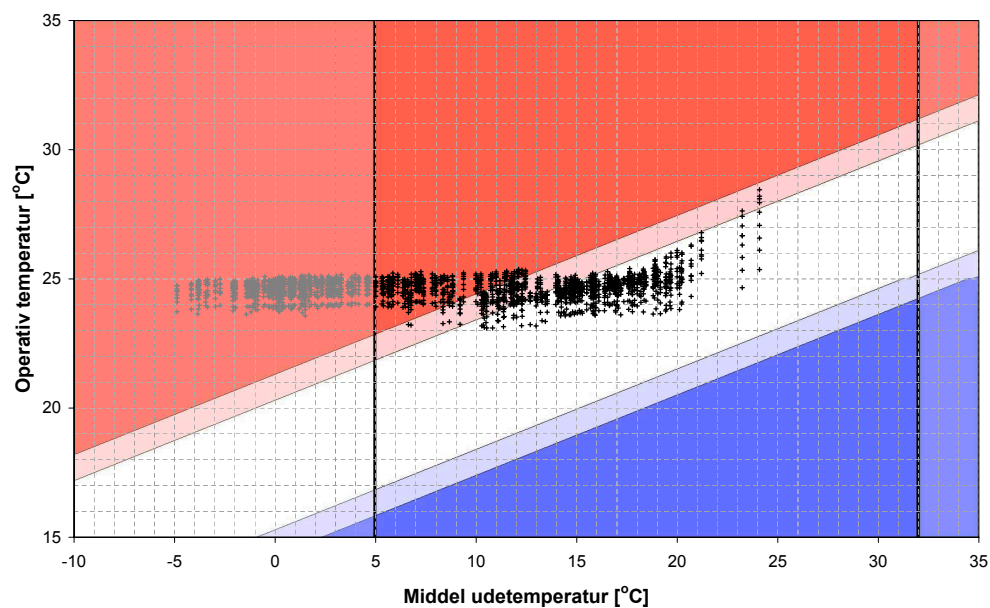
Figur 10.9: Visualisering af den operative indetemperatur i forhold til den løbende middel-udetemperatur. De lodrette grænser viser gyldighedsområdet. Antal utilfredse stiger fra det hvide område og ud til hver side - første markerede område svarer til klasse I (10% utilfredse), andet område svarer til klasse II (20% utilfredse) og det sidste område svarer til klasse III (35% utilfredse) - alle iht. DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007].

Da bygningstypen er fundet til en Alfa-bygning er det tydeligt, at mange (ca. 45%) af de beregnede operative temperaturer i rummet ligger uden for SCATs-projektets angivne gyldighedsområde. Hvis der kun foretages en vurdering af de beregnede punkter der ligger indenfor gyldighedsområdet ligger ca. 19% af de operative temperaturer udenfor en accepteret grænse på 10% utilfredse. Ved en vurdering af det totale antal procent der overstiger den tilladelig grænse på 10% utilfredse, hvor punkterne udenfor gyldighedsområdet medregnes som værende større end 10% utilfredse, vil ca. 55% af alle punkterne overstige denne grænse. En samlet klassificering af resultaterne fra KE indenfor gyldighedsområdet vil blive en *klasse III*, da det forekommer én gang, at den operative temperatur i rummet vil medføre 35% utilfredse eller højere.

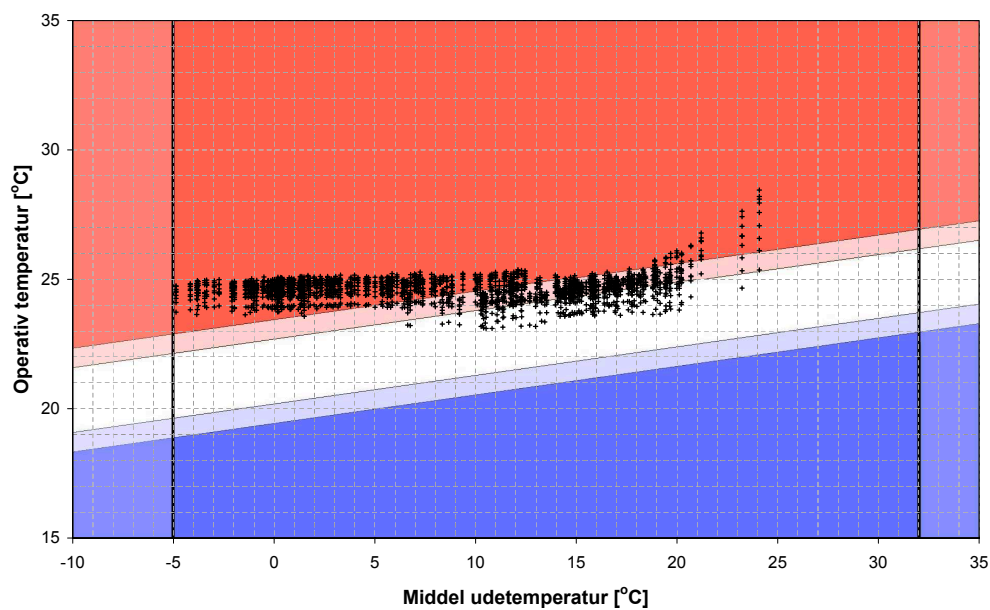
Den nederste figur 10.9(b) viser den operative indetemperatur i forhold til de angivne grænser for en Beta-bygning (HVAC-bygning). Der er her ca. 13,5% af punkterne der ligger udenfor det angivne gyldighedsområde. Ved en evaluering af de operative temperaturer indenfor gyldighedsområdet, er der ca. 11% der overstiger en grænse på 10% utilfredse. Når antallet af punkter der ligger udenfor modellens gyldighedsområde medtages i vurderingen af den totale procent over acceptgrænsen, svarer dette til ialt ca. 23% som overstiger 10% utilfredse.

Det fremgår endvidere tydeligt af ovenstående figur 10.9, at den beregnede operative indetemperatur i store perioder af året ligger i intervallet 23-25°C og altså ikke har den variation, som kendetegner en naturligt ventileret bygning, hvor indelufttemperaturen følger udetemperaturen. Desuden viser det sig ved en vurdering af det termiske indeklima i forhold til de to bygningstyper, at de beregnede operative temperaturer passer bedst til Beta-bygningen, som ifølge Nicol og Humphreys [2007] viser grænserne for en mekanisk kølet bygning.

Udover resultaterne fra SCATs-projektet kan der ligeledes foretages en evaluering af det termiske indeklima udfra resultaterne fra RP-884-projektet. Der er i dette projekt fundet lidt andre grænser samt hældninger på linjerne end SCATs-projektet, og desuden angives x-aksen ved en middel udetemperatur. Nedenstående figur 10.10 viser visualiseringen af resultaterne fra beregningen.



(a) Grænser i forhold til Alfa-bygning



(b) Grænser i forhold til Beta-bygning

Figur 10.10: Visualisering af den operative indetemperatur i forhold til middeludelufttemperaturen. De lodrette grænser viser gyldighedsområdet. Antal utilfredse stiger fra det hvide område og ud til hver side - første markeret område svarer til klasse I (10% utilfredse), andet område svarer til klasse II (20% utilfredse) - alle iht. DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007].

Vurderingen af det termiske indeklima skal foretages ud fra den øverste figur 10.10(a), da bygningen

er blevet klassificeret som en Alfa-bygning og dermed evalueres i forhold til de adaptive metoder. Som det ses, er der mange af punkterne der ligeledes her ligger uden for det angivne gyldighedsområde. Da det er svært at vide, hvordan grænserne imellem de forskellige klasser skal forløbe udenfor det angivne gyldighedsområde, medtages disse ikke i evalueringen af det termiske indeklima. Der i alt ca. 36% af punkterne, der ligger udenfor gyldighedsområdet. Til vurdering af punkterne indenfor området anvendes, som tidligere, procent-antallet af punkter der ligger udenfor en valgt acceptgrænse. Det er fundet at omkring 45% af de operative indetemperaturer ligger over en grænse på 10% utilfredse. Den totale procent, der ligger udenfor acceptgrænsen og gyldighedsområdet, er fundet til ca. 65%. Igen ses det her i figur 10.10(a), at de beregnede operative indetemperaturer ligger over de specificerede grænser ved lave middel-udelufttemperaturer og vil altså medføre et stort antal utilfredse i bygningen. Ved middel-udelufttemperaturer over 15°C ses det, at den operative indetemperatur følger de angivne grænser bedre og dermed mere udelufttemperaturens forløb.

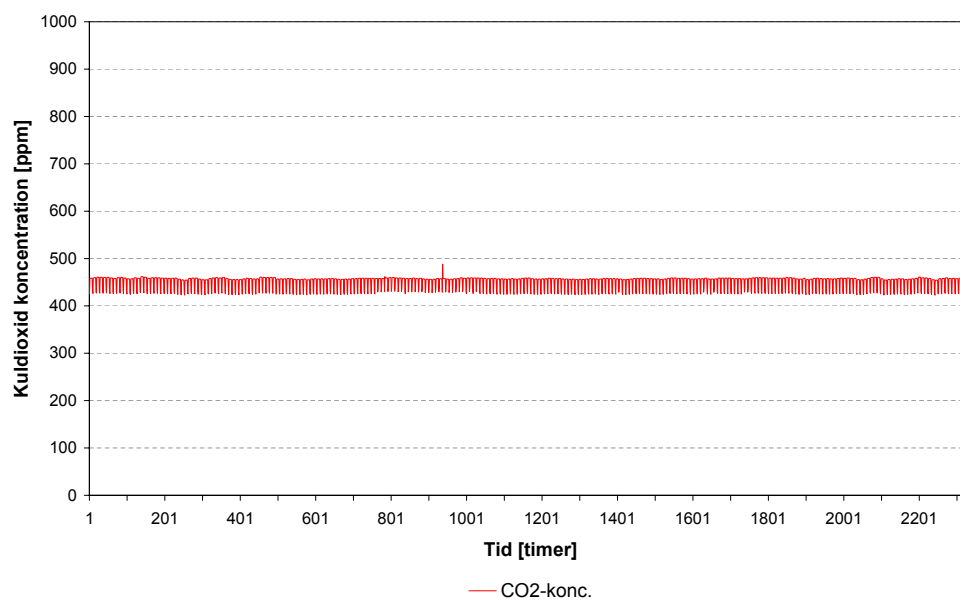
Den nederste figur 10.10(b) viser ligeledes den operative indetemperatur i bygningen som funktion af middel-udelufttemperaturen - dog her sammenlignet med grænserne for en Beta-bygning. Ved disse grænser er der ingen punkter, som ligger udenfor gyldighedsområdet. Derimod ligger omkring 92% af punkterne over acceptgrænsen på maksimum 10% utilfredse, hvilket må siges at være stærkt utilfredsstillende.

Ved en generel vurdering af det termiske indeklima efter de adaptive modeller er det tydeligt, at den operative indetemperatur i bygningen har været for høj i mange perioder af året. Dette skyldes at de opstillede grænser fra de respektive studier følger udetemperaturens forløb (både for den løbende middel-udetemperatur og middel udetemperaturen), og da den operative indetemperatur i Københavns Energi har ligget i området omkring 23-25°C stort set hele året, vil det medføre et stort antal utilfredse.

Som det ses af hhv. figur 10.9 og 10.10 er der mange af punkterne, der ligger udenfor det angivne gyldighedsområde af de enkelte studier. Dette skyldes, at der i det danske klima vil forekomme udetemperaturer der er lavere end det område, hvor graferne i hensigten er blevet udviklet til.

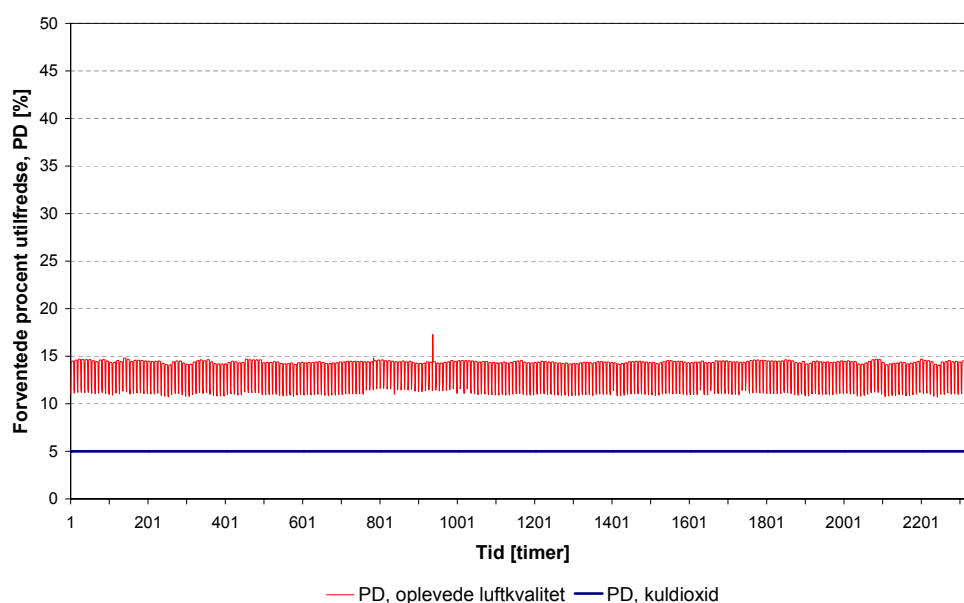
Atmosfærisk indeklima

Til vurdering af det atmosfæriske indeklima foretages der i Eco-factor-værktøjet to forskellige metoder til beregning af antal utilfredse. Den mest simple metode anvender CO₂-koncentrationen fra de importerede BSim-data til beregningen af et forventet antal utilfredse med indeluftkvaliteten. Den anden metode anvender personernes vurdering af den oplevede luftkvalitet ved indtræden i rummet, hvor der både tages højde for forureningen fra personer samt bygningen. Figur 10.11 viser CO₂-koncentrationens variation over året beregnet i BSim.



Figur 10.11: CO_2 -koncentrationens variation over året indenfor arbejdstiden.

Fra BSim-beregningen ses det af ovenstående figur, at CO_2 -koncentrationen vil ligge omkring 400-500 ppm for hele den beregnede periode (resultaterne er desuden yderligere beskrevet i appendiks F). Den beregnede CO_2 -koncentrationen indgår efterfølgende i beregningen af de forventede antal utilfredse ud fra begge vurderingsmetoder (beskrevet i afsnit 9.1.1). Resultaterne herfra er vist i figur 10.12:



Figur 10.12: Forventede procent utilfredse som funktion af den beregnede CO₂-koncentration fra BSim simulering. Den blå linje viser antal utilfredse i forhold til kuldioxid-koncentrationen. Den røde linje viser antal utilfredse i forhold til den oplevede indelukvalitet (PAQ) ved indtræden i rummet.

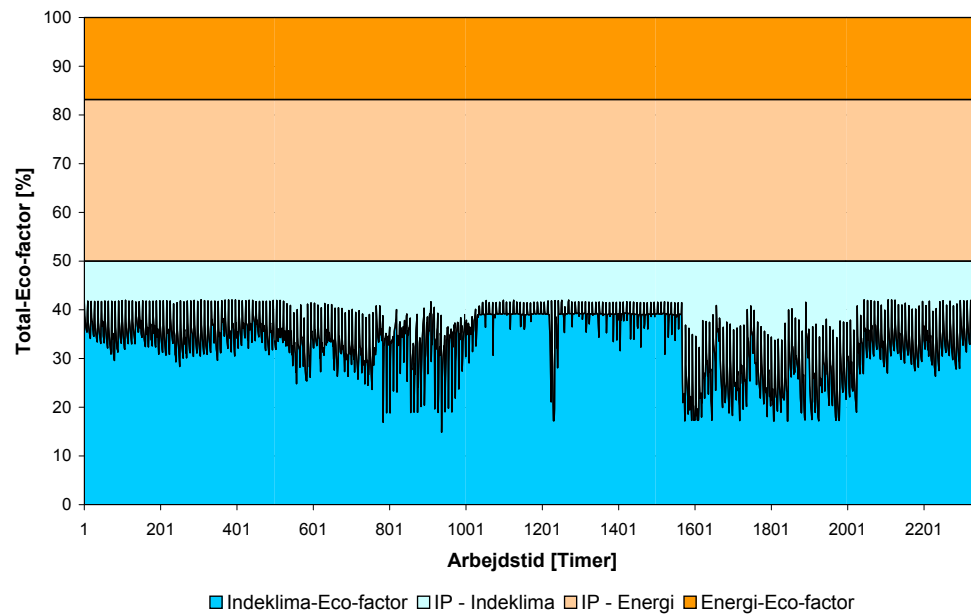
Den simulerede CO₂-koncentration vil ikke give anledning til et stort antal utilfredse i bygningen - vurderet såvel efter den ene som den anden metode. Dette var også helt klart at forvente, da den beregnede CO₂-koncentration fra BSim aldrig overstiger 500 ppm (inkl. udendørs-koncentrationen).

10.2.3 ECO-FACTOR

Til den samlede vurdering af en bygningens ydeevne anvendes den totale Eco-factor, som består af et bidrag fra hhv. Indeklima-Eco-factoren og Energi-Eco-factoren. Beregningerne foretages automatisk i arket ud fra den importerede resultatfil fra BSim, samt ud fra de forudsætninger der er gjort omkring de adfærdsmæssige parametre for personer i bygningen. Ydermere skal der foretages nogle valg omkring energikilderne for hhv. opvarmning og elektriciteten. Ved evalueringen af Eco-factoren skal det desuden vælges, hvordan der skal vægtes imellem indeklimaet og energiforbruget. Der er her valgt at benytte en 50/50%'s vægtning mellem Indeklima-Eco-factoren og Energi-Eco-factoren. Udvidelsen af Eco-factoren vil som resultat give en fordeling, som sammen med informationerne fra den oprindelige Eco-factor kan give en langt bedre mulighed for designeren at optimere bygningen baseret på langtidsevalueringer.

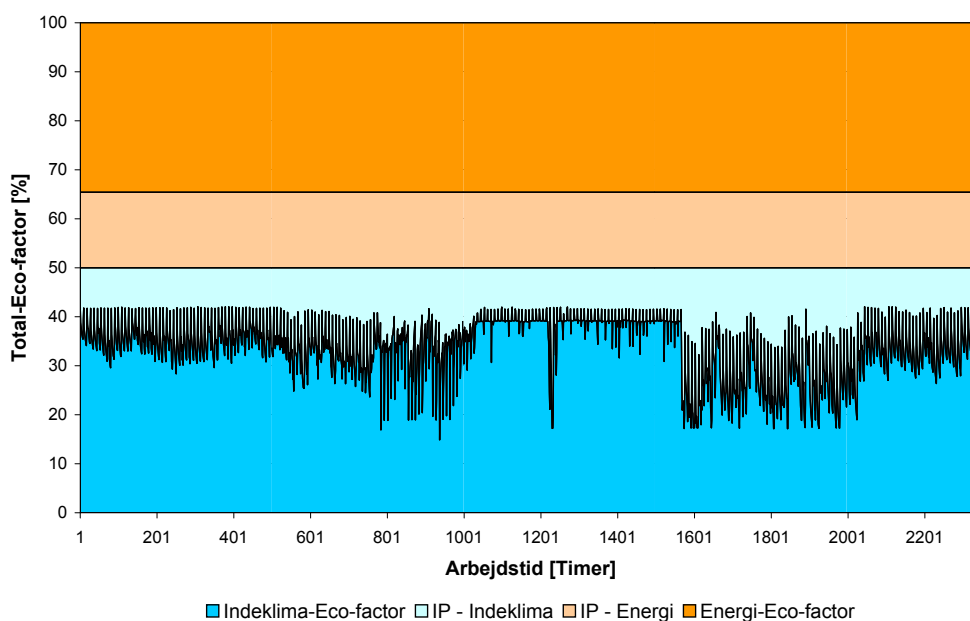
Nedenstående figur viser variationen af Eco-factoren fordelt på hhv. energi og indeklima indenfor brugstiden. Desuden er det muligt at se hvor stort forbedringspotentialet⁴, fordelt på de to bidrag, er i bygningen.

⁴Engelsk: Improvement Potential, IP



Figur 10.13: Variationen over året for de to bidrag til den totale Eco-factor.

Af figur 10.13 er det tydeligt, at Energi-Eco-factoren har et stort forbedringspotentiale (IP). Dette skyldes, som beskrevet tidligere, at der i simuleringen er anvendt et ventilationsanlæg i opbygningen af BSim-modellen. Da det desværre ikke har været muligt, at simulere både det termiske indeklima og energiforbruget korrekt via BSim, er det valgt at kunne beregne det termiske indeklima så tæt på målingerne som muligt. Energiforbruget til opvarmning i bygningen er herefter fundet ud fra oplysninger fra Københavns Energi, og er beregnet til $65,2 \text{ kWh/m}^2$ (yderligere beskrevet ovenfor i afsnittet omkring energiforbrug). Nedenstående figur 10.14 viser den ændrede Energi-Eco-factor ved ændring af energiforbruget.



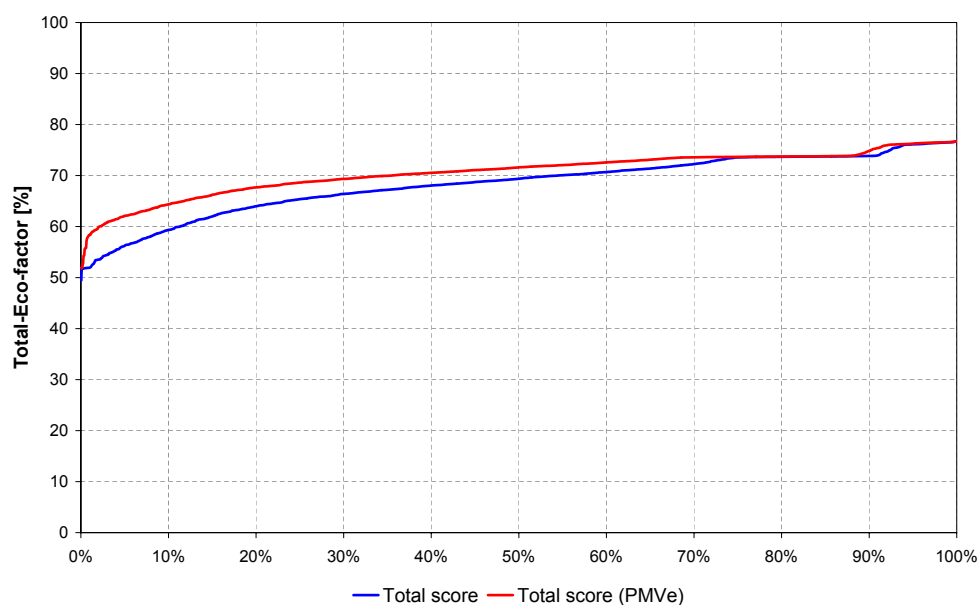
Figur 10.14: Variationen over året for de to bidrag til den totale Eco-factor. Energi-Eco-factoren er her vurderet ud fra et oplyst energiforbrug til opvarmning af Københavns Energi (se evt. appendiks L.2.4).

Indeklima-Eco-factoren varierer her altid i takt med antallet af utilfredse med det generelle termiske indeklima (PPD), da det er denne der er udslagsgivende i beregningen. Dette skyldes at de resterende indgangsparametres værdier for det termiske indeklima - lokal diskomfort - er sat så lave at de ikke vil have nogen indflydelse. Dette skal selvfølgelig vurderes fra bygning til bygning om den lokale diskomfort er udslagsgivende. Beregningen af indeluftkvaliteten giver ikke noget bidrag, da CO_2 -koncentrationerne er fundet til at ligge omkring 400-500 ppm i bygningen (som beskrevet ovenfor i afsnittet omkring *atmosfærisk indeklima*).

Det er ligeledes tydeligt af figuren, at der er rig mulighed for optimering af modellen, og sammen med de oprindelige figurer fra Eco-factoren, hvor det angives hvilke parametre der har den største indflydelse på hhv. Energi og Indeklima-Eco-factoren, er dette et godt optimeringsværktøj.

Beregningerne af den totale Eco-factor for arbejdstiden kan efterfølgende sorteres, hvorefter en grafisk fordeling kan opstilles. Herudfra er det muligt for brugeren, at foretage en vurdering af den totale Eco-factor for bygningen, som sammen med de resterende beregninger i arket kan indgå i den endelige vurdering af bygningens samlede ydeevne - både med hensyn til energi såvel som termisk og atmosfærisk indeklima.

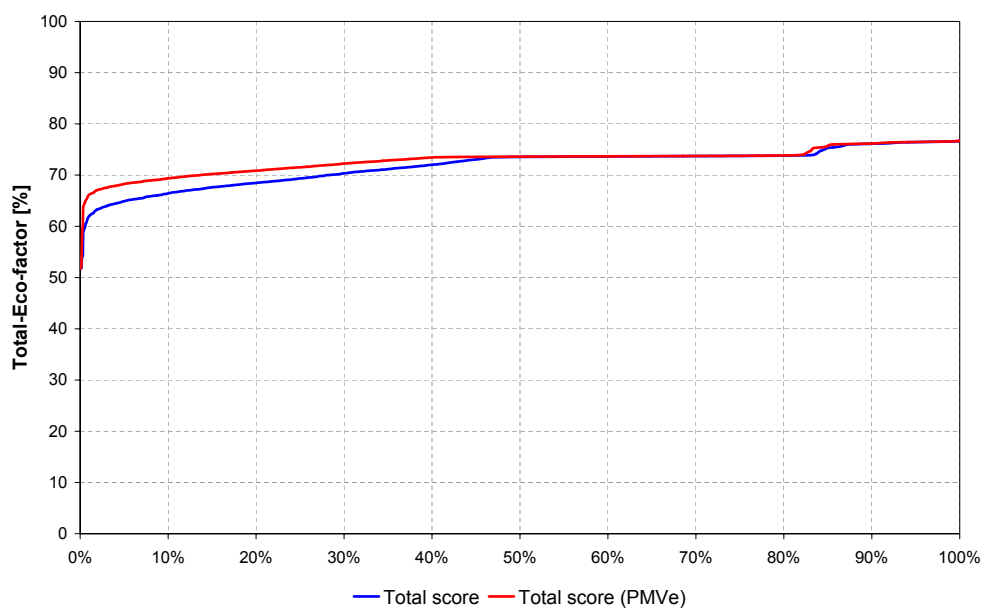
Figur 10.15 viser resultaterne for fordelingen af den totale Eco-factor ud fra den almindelige beregning af PPD, men også hvor der tages hensyn til adaptiviteten ved brug af PMV_e . Det er i Københavns Energi muligt at gøre brug af PMV_e i vurderingen af den totale Eco-factor, da bygningen er fundet til at være en Alfa-bygningstype ved klassificeringsproceduren.



Figur 10.15: Fordelingen af den totale Eco-factor med hensyn til den almindelig beregning af PMV samt ved hensyntagen til adaptivitet ved brug af PMV_e.

Det er ud fra ovenstående figur 10.15 muligt, at se hvor stor en procentdel af tiden bygningen kan overholde et bestemt kriterie. Det er i afsnit 9.1.3 diskuteret, hvordan en endelig vurdering af den totale Eco-factor i én værdi kan foretages. Det blev fundet, at der skal anvendes en 5%-fraktil ved en endelig vurdering af bygningens samlede ydeevne. Ud fra figur 10.15 svarer dette til en Eco-factor-score på 56%, og hvis personernes adaptivitet medtages i vurderingen, giver dette en score på 62% - altså en forbedring på 6%.

Eco-factor-værktøjet anvendes ofte i en design-situation, hvor forskellige løsninger skal undersøges for at finde frem til den bedste. For Københavns Energi er dette ligeledes muligt, hvor det er tydeligt at den simulerede operative indetemperatur ved brug af BSim, om vinteren samt overgangen til sommerperioden har en stor indflydelse på den beregnede totale Eco-factor. Der kan foretages en beregning, hvor der istedet for en opdelt beklædningsisolans på hhv. en vinter- og sommerperiode, kan anvendes en varierende beklædningsisolans i forhold til den løbende middel-udetemperatur. Resultat af den totale Eco-factor ved anvendelse af en varierende beklædningsisolans er vist på nedenstående figur 10.16



Figur 10.16: Fordelingen af den Totale-Eco-factor med hensyn til den almindelig beregning af PMV samt ved hensyntagen til adaptivitet ved brug af PMV_e . Anvender en ligning til beskrivelse af beklædningsisolansens variation over året.

Det er tydeligt i forhold til figur 10.15, at den totale Eco-factor er forbedret, ved anvendelsen af algoritmen for beregning af beklædningsisolansens variation over året som funktion af den løbende middel-udetemperatur. Det blev ligeledes fundet under vurderingen af det generelle termiske indeklima, at anvendelsen af en algoritme til bestemmelsen af personernes beklædning i bygningen, vil give et mere rigtigt billede af antallet af utilfredse i bygningen, da springet mellem vinter og sommer beklædning således ikke vil forekomme som det er tilfældet ved brug af de vejledende værdier i DS/EN ISO 7730 [2006].

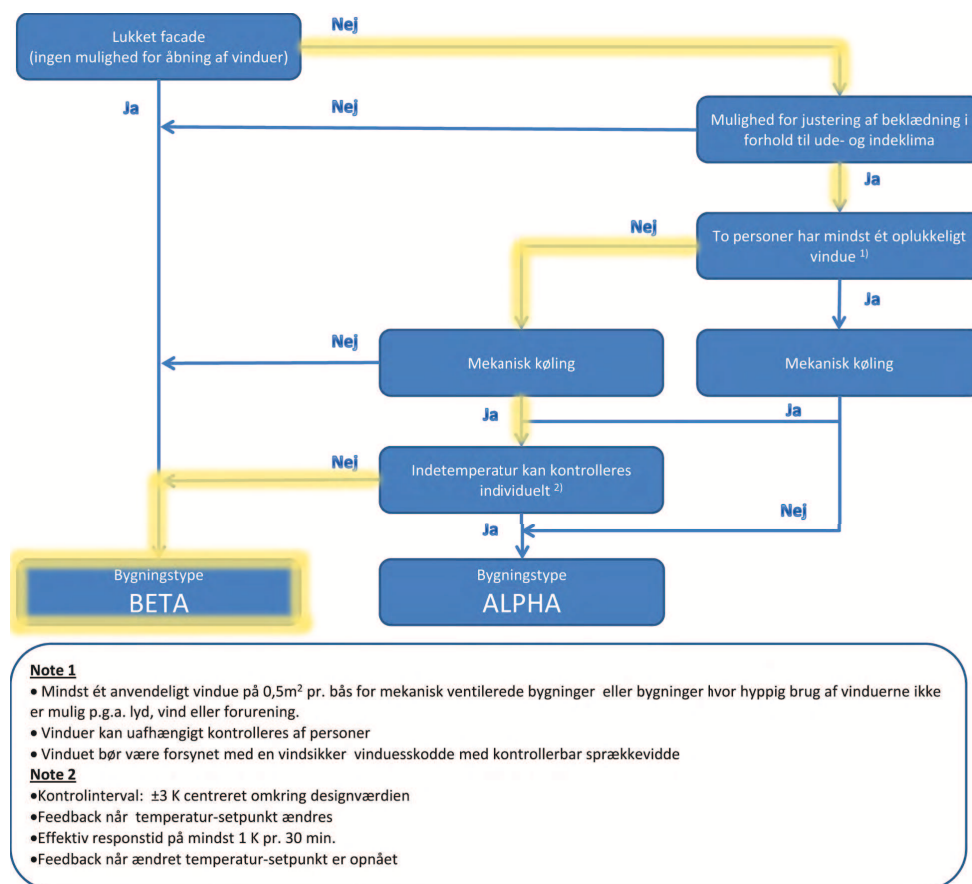
Det ses af figuren, at score-værdien for bygningen ved en 5%-fraktil vil give en total Eco-factor på 65%, når der foretages en vurdering ud fra den statiske PMV-ligning. Hvis der derimod ses på PMV_e -beregningen, vil scoren for den totale Eco-factor blive 68%, hvilket vurderes som en acceptabel score for bygningen ud fra de givne forudsætninger omkring estimeringen af energiforbruget til opvarmning af kontorlokalet. Ved en optimering af modellen, er det personernes oplevelse af det termiske indeklima der skal fokuseres på, da denne indgående parameter har det største potentiale for forbedring, hvilket også er beskrevet og diskuteret ovenfor i afsnit 10.2.2.

10.3 GRONTMIJ | CARL BRO

Grontmij | Carl Bro's nye domicil beliggende i Århus er opført i perioden 2006/2007 og har et areal på ca. $3.200m^2$ fordelt på tre etager samt kælder. Bygningen er en klassisk mekanisk kølet bygning med køleunit tilsluttet ventilationsanlæggets køleflade. Bygningen er styret af et avanceret CTS-anlæg, der bl.a. styrer belysning, udvendig solafskærmning, ventilationsanlæg samt opvarmningen. Til simulering af det termiske indeklima er det valgt at opbygge BSim-modellen for et kontorafsnit på 1. sal orienteret mod syd. Der forefindes i appendiks G.1 en mere detaljeret beskrivelse af bygningen og

det udvalgte kontorområde sammen med detaljerede beskrivelser af den opbyggede BSim-model. Der vil i det følgende blive foretaget gentagelser af enkelte elementer fra ovenstående afsnit 10.2, for at nærværende afsnit kan læses separat uden henvisninger til foregående.

I det udvidede Eco-factor-værktøj (*Eco-factor:08.xls*) foretages der en differentiering mellem bygningstyperne ved en klassificeringsprocedure - Alfa- og Beta-bygning (afsnit 4.1.5 og 9.1.3). Ved klassificeringen af bygningstypen er det muligt at bestemme om bygningens termiske indeklimaydeevne kan vurderes efter de nye adaptive vurderingsmetoder, som beskrevet i kapitel 9. Nedenstående figur viser ”ruten” for den pågældende bygningens klassificering i forhold til de to bygningstyper.



Figur 10.17: Klassificeringsprocedure af Grøntmij | Carl Bros bygningstype. Bygningen er en mekanisk kølet bygning og kan klassificeres som en Beta-bygning.

Der er i det følgende foretaget en forklaring til hver boks igennem ”ruten”.

Boks 1 Facaden er ikke lukket, idet personer i bygningen har mulighed for at åbne enkelte vinduer.

Boks 2 Der er ikke opstillet krav omkring fast beklædning for personer.

Boks 3 Antallet af oplukkelige vinduer i kontorafsnittet er 4 stk, og med et personantal på 14 personer, vil der således ikke være et oplukkeligt vindue pr. 2 personer.

Boks 4 Der er installeret mekanisk køling i bygningen.

Boks 5 Personerne i bygningen har ikke mulighed for individuel styring af anlægget.

Som det ses af ovenstående figur 10.17, ender klassificeringsproceduren ud med, at Grontmij | Carl Bros bygning kan klassificeres som en type Beta-bygning, hvormed det ikke er muligt, at gøre brug af de adaptive modeller til evaluering af det termiske indeklima.

10.3.1 ENERGIFORBRUG

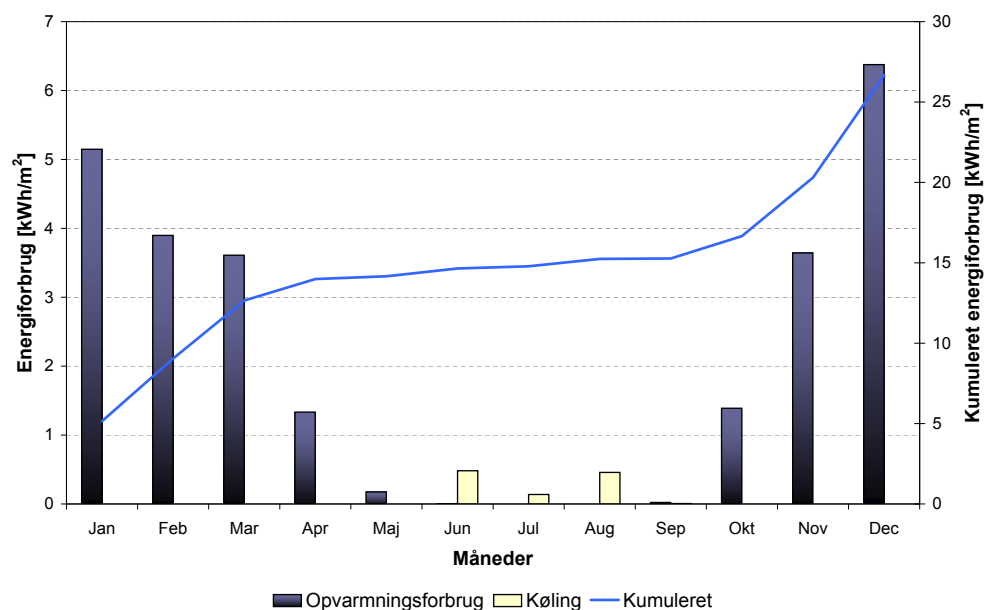
Energiforbruget til opvarmning, køling, ventilation, luftkonditionering, belysning samt udstyr beregnes er importeret fra BSim-data og opsummeres over året i værktøjet. Eco-factoren anvender desuden disse beregninger til bestemmelse af Energi-Eco-factoren, som indgår i den totale Eco-factor - dette er yderligere beskrevet og diskuteret senere i dette afsnit.

Ud fra den opbyggede BSim-model, som er et kontorafsniit af hele bygningen, er det muligt at beregne bygningens årlige energiforbrug. Det har dog ikke været muligt at kontrollere de beregnede værdier mod oplyste værdier fra Grontmij | Carl Bro, idet disse ikke kunne fremskaffes.

Tabel 10.7: Grontmij | Carl Bros energiforbrug over et år fordelt på de forskellige bidrag. Arealet af kontorafsniittet er beregnet til 118 m²

	Enhed	Opvarmning	Køling	Ventilator	Belysning	Udstyr	Total
Energiforbrug	kWh/m ²	25,6	1,1	2,7	13,7	17,2	60,3

Udover det samlede energiforbrug til opvarmning og køling for hele året, kan energiforbruget opdeles på de enkelte måneder som vist i nedenstående figur 10.18. Heraf er det muligt for brugeren, at se en fordeling over året samt anvende dette som et optimeringsværktøj med fokus på energiforbrug.



Figur 10.18: Energiforbrug til opvarmning og køling fordelt ud på månederne.

Som det ses af ovenstående tabel 10.7 og figur 10.18 er energiforbruget til opvarmning af kontorafs-nittet ikke specielt stort, hvilket skyldes det simulerede kontors beliggenhed i bygning. Det er valgt, at simulere for et rum der kun har et varmetab ud gennem to ydervægge/facader, og da bygningen er nyopført vil varmetabet gennem disse være stærkt begrænset som følge af den senere tids skærpn-ning af krav til varmetabet for nybygninger angivet i bygningsreglementet. Det vurderes derfor, at det beregnede energiforbrug til opvarmning er simuleret korrekt og ca. vil svare til det rigtige i bygnin-gen.

Energiforbruget til køling ses kun at være indsat i de 3 sommermåneder, og at det samlede energi-forbrug er meget lavt i bygningen. På trods af at kontoret vender mod syd og med en forholdsvis stor intern varmebelastning var dette forventet, idet den udvendige solafskærmning (afskærmnings-faktor på 0,14) samt rudens lave g-værdi på 0,4 kombineret med automatisk styring af belysningen har reduceret kølebehovet væsentligt.

10.3.2 INDEKLIMA

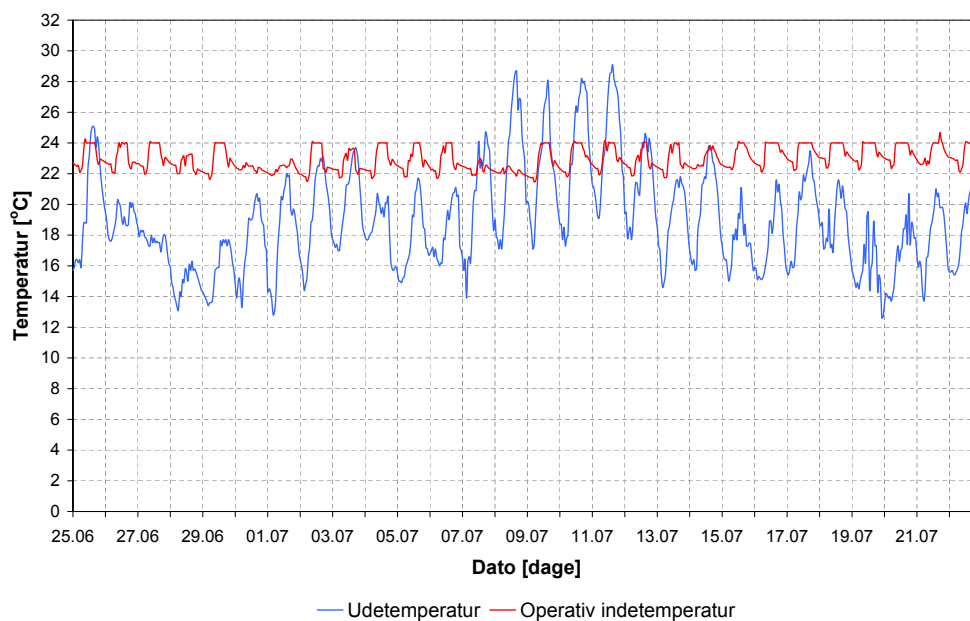
Der er i det følgende foretaget en vurdering af hhv. det termiske og atmosfæriske indeklima i Grontmij | Carl Bro. Da bygningen er mekanisk kølet samt gør brug af mange passive teknologier for begræn-sning af kølebehovet, må det forventes, at indetemperaturen vil holde et nogenlunde stabilt niveau, og at der kun vil forekomme små udsving ved ekstreme situationer. Beregningerne og vurderingen af indeklimaet indgår, på lige fod med energiforbruget, i den totale Eco-factor, som der foretages en beskrivelse og vurdering af senere i afsnit 10.3.3.

Vurderingen af indeklimaet er opdelt i to dele hhv. termisk og atmosfærisk indeklima. Der er desu-den foretaget en sammenligning af de traditionelle langsigtede metoder til vurdering af det termiske

indeklima, med de nyere og mere informative metoder, som bl.a. er beskrevet i afsnit 2.5 samt kapitel 3. Da bygningen er kategoriseret som en Beta-bygning er det her ikke muligt, at vurdere det termiske indeklima ved brug af de nye adaptive modeller.

Termisk indeklima

Der er i den nedenstående figur 10.19 vist den operative indetemperatur samt udelufttemperaturen for en 4 ugers sommerperiode. Herved ses den operative indetemperaturs variation over dagen samt ugevis ved den korresponderende udelufttemperatur.

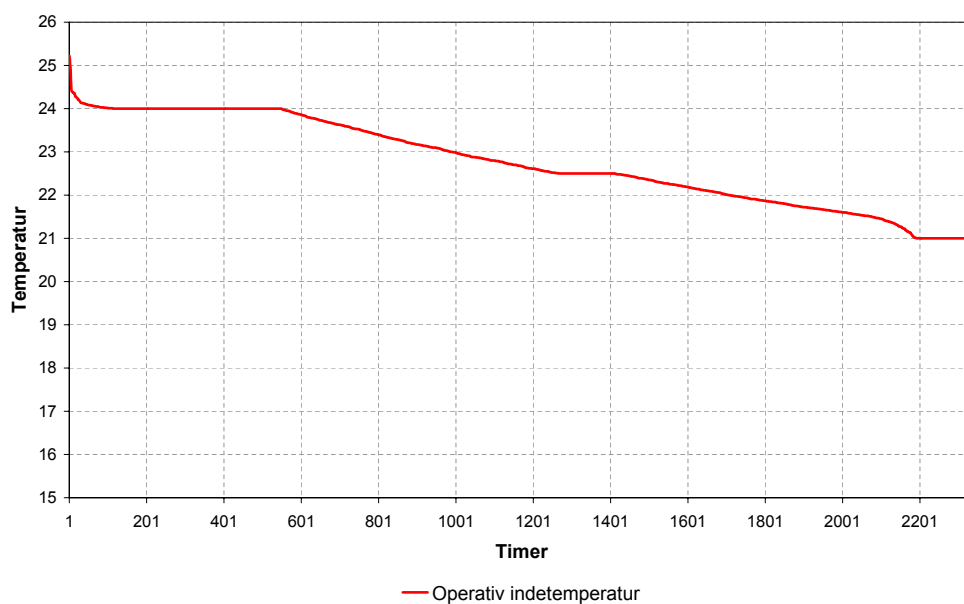


Figur 10.19: Simuleret operativ indetemperatur i kontoraftsnittet sammenlignet med udelufttemperaturen. Temperaturerne er vist for en 4 ugers periode om sommeren.

Selv ved høje udelufttemperaturer vil den operative indetemperatur i rummet stort set aldrig overstige de 24°C, som ligeledes er kølesetpunktet for det pågældende kontoraftsnit. Den operative indetemperatur har således været ret konstant over året, hvilket desuden kendetegner en (veldimensioneret) mekanisk kølet bygning. En yderligere beskrivelse af bygningens termiske indeklima kan findes i appendiks G.

Temperaturoverskridelse

Følgende figur viser en fordeling over indelufttemperaturen for arbejdstiden (mandag-fredag 8-17) i bygningen. Af figuren er det muligt at se, hvor mange timer der overstiger f.eks. 26 og 27°C iht. den vejledende metode i DS 474 [1993], hvor der er opstillet et vejledende maksimalt antal overskridelsestimer på hhv. 100 og 25 timer.



Figur 10.20: Fordeling over den operative indetemperatur for arbejdstiden.

I Eco-factor-værktøjet bliver antallet af timer over hhv. 26 og 27°C beregnet, for dermed at kunne evaluere indeklimaet efter de hidtil anvendte vurderingsmetoder som beskrevet i afsnit 2.5. Tabel 10.8 opsummerer resultaterne for den udvalgte bygning:

Tabel 10.8: Resultat af bygningens antal timer over hhv. 26 og 27°C.

	DS 474 [1993] Timer over 26°C	DS 474 [1993] Timer over 27°C
	Timer	Timer
Grontmij Carl Bro	0	0

Af tabellen ses det, at bygningen vil blive evalueret som havende et godt termisk indeklima, da der ikke er registreret nogle overskridelsestimer.

Oplevelse af det termiske indeklima

Når der foretages en evaluering af det termiske indeklima ud fra temperaturer i bygningen, er denne vurdering bygget på en forholdsvis simpel indikator, som f.eks. ikke direkte kan fortælle noget om hvor mange personer i bygningen, der vil opleve indeklimaet som værende tilfredsstillende. Det vil derfor i fremtiden være en bedre og mere informative metode, at anvende PMV-indekset som indikator for indeklimaets ydeevne. Ved brug af PMV-indekset vil det være muligt direkte at kunne forudsige hvor mange personer i bygningen, der vil opleve det termiske indeklima som tilfredsstillende på baggrund af forudsætninger omkring bygningen samt personernes adfærdsmæssige adaptivitet (beklædningsisolans og aktivitetsniveau). Det beregnede antal utilfredse kan ligeledes anvendes

des i en langtidsevaluering af det termiske indeklima. Dette gøres ved brug af antal PPD-timer, hvor antallet af utilfredse over en bestemt acceptgrænse beregnes for hver time indenfor arbejdstiden og efterfølgende summeres op over året (yderligere og mere detaljeret beskrevet i afsnit 2.5).

I Eco-factoren beregnes antal utilfredse for hver time automatisk, hvoraf der i værktøjet ligeledes foretages en automatisk opsummering af antal kolde og varme PPD-timer - dvs. hvor de beregnede PMV-værdier har været hhv. under og over nul. Brugeren kan herefter foretage sin vurdering af det beregnede termiske indeklima ud fra disse værdier samt grafiske fremstillinger af hhv. PMV og PPD variationen over året. Som beskrevet ovenfor, skal der af brugeren foretages og indtastes enkelte forudsætninger (beklædningsisolans, aktivitetsniveau og middellufthastighed) inden beregningen af antal utilfredse kan foretages:

Beklædningsisolans Forudsætninger omkring personernes beklædningsisolans og variationen over året er nødvendig for at der kan foretages en beregning af PMV-indekset. Der er i det udvidede Eco-factor-værktøj implementeret tre forskellige metoder til fastsættelse af brugernes beklædning:

- *fast værdi for vinter og sommer periode* (efter DS/EN ISO 7730 [2006])
- *opdeling i fire perioder hen over året*
- *beregnet af algoritme som funktion af løbende middel-udetemperatur* (beskrevet i afsnit 4.2.1 og afsnit 9.1)

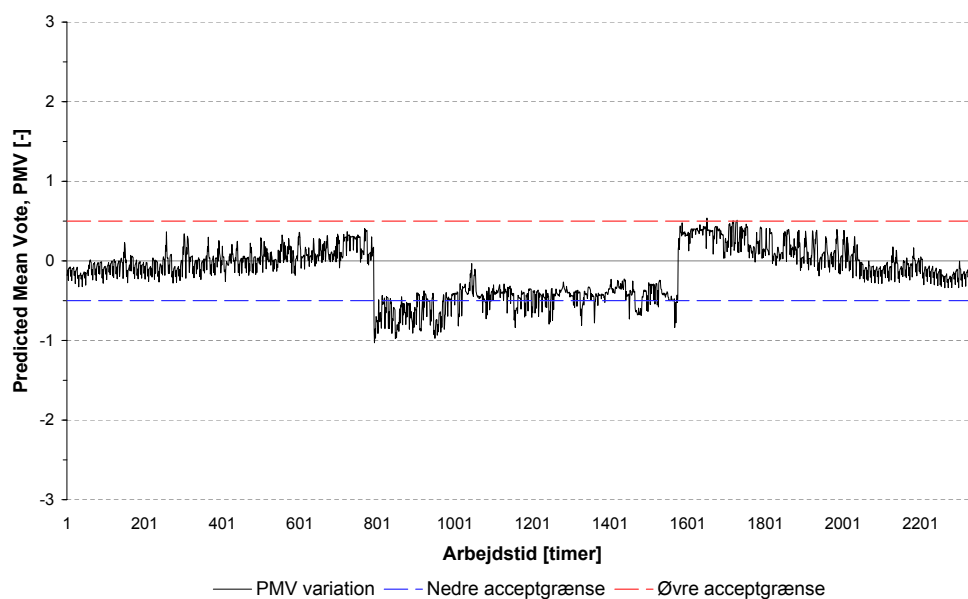
Ud fra disse metoder er det muligt for brugeren, at opdele personernes beklædning tilstrækkelig detaljeret over året. Det er i det følgende ønsket at undersøge de enkelte metoders indflydelse på beregningen af antal utilfredse.

Aktivitetsniveau Personernes aktivitetsniveau fastsættes ud fra én værdi for hele året. Da den pågældende bygning er en kontorbygning med hovedsageligt siddende aktivitet, vurderes personernes middel-aktivitetsniveau over døgnet til 1,2 met.

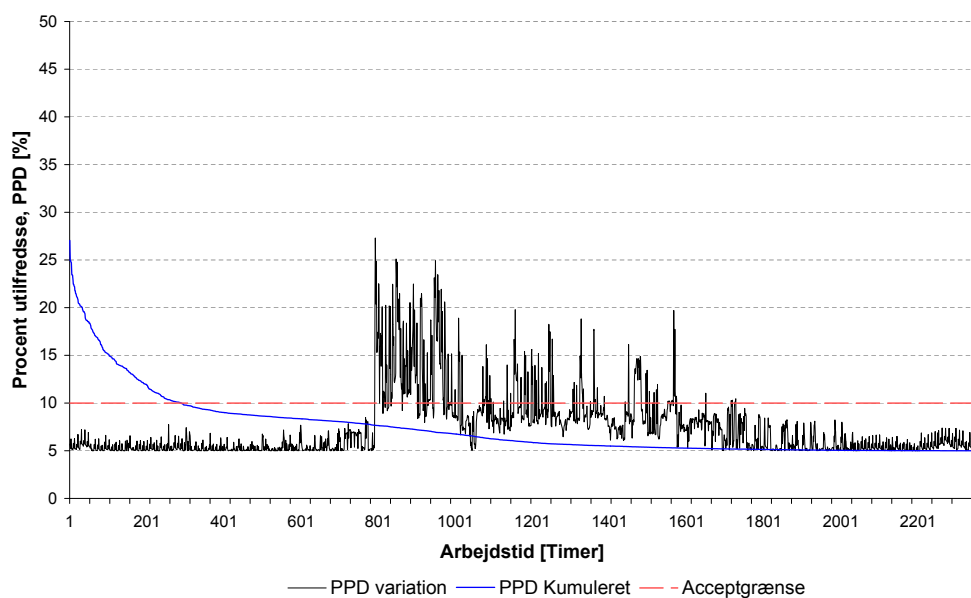
Middellufthastighed En estimering af middellufthastigheden i bygningen kan i mange tilfælde være svær for brugeren, da denne afhænger af mange faktorer. Der anvendes ofte, og også her, en middellufthastighed i bygninger på 0,15 m/s.

De fastsatte værdier for aktivitetsniveauet og middellufthastigheden, fra ovenstående gennemgang - hhv. 1,2 met og 0,15 m/s, anvendes i Eco-factor-værktøjet til beregningen af antal utilfredse ved PMV-/PPD-indekset. Beklædningsisolansens samt beregningsmetodens indflydelse er i det følgende undersøgt for Grontmij | Carl Bros domicil. Fastsættelsen af personernes beklædning er først estimeret ved brug af værdierne fra DS/EN ISO 7730 [2006] og derefter ved anvendelse af en algoritme hvor isolansen beregnes som funktion af den løbende middel-udetemperatur.

Fra DS/EN ISO 7730 [2006] er der angivet en beklædningsisolans for vinter- og sommersituationer til hhv. 1,0 og 0,5 clo. Resultaterne for beregningen af PMV- og PPD-indekset ved brug af de nævnte clo-værdier, er vist i nedenstående figurer 10.21.



(a) *PMV-variation. De to vandrette linjer (blå og rød) viser acceptgrænsen i forhold til beregningen af antal PPD-timer.*



(b) *PPD-variation. Den vandrette linje (rød) viser grænsen for accepteret antal utilfredse. Den blå linje viser den kumuleret PPD-værdi.*

Figur 10.21: Variationen af beregnede PMV- og PPD-værdier over året indenfor arbejdstiden. Beregningen bygger på den importerede resultatfil fra BSim samt forudsætningerne omkring aktivitetsniveau og middellufthastighed på hhv. 1,2 met og 0,15 m/s. Desuden er der forudsat en fast beklædning om vinteren og om sommeren på hhv. 1,0 og 0,5 clo.

Som det ses af PMV-beregningen illustreret i figur 10.21(a), vil personerne om vinteren med en clo-værdi på 1,0 føle temperaturen i rummet som værende fuldt ud tilfredsstillende, idet den valgte acceptgrænse på maksimalt 10% utilfredse aldrig overstiges. I forårs- og efterårsperioderne, hvor personerne stadig har en beklædning svarende til 1,0 clo, vil personerne i bygningen stadig føle det termiske indeklima som værende tilfredsstillende og kun få gange opleve indeklimaet som for varmt. Personerne vil, ved overgangen til en beklædningsisolans på 0,5 clo, opleve temperaturen i rummet som værende for kold, hvormed antallet af utilfredse vil overstige den tilladte grænse på 10% utilfredse. I selve sommerperioden vil de beregnede PMV-værdier i største del af tiden ligge nede omkring -0,5 hvilket betyder, at det termiske indeklima vil opleves for koldt og i store perioder vil medføre en overskridelse af acceptgrænsen. Der vil maksimalt være omkring 25% af personerne i rummet, der vil opleve det termiske indeklima som utilfredsstillende koldt under de givne forudsætninger.

Som beskrevet tidligere, beregnes ligeledes antallet af PPD-timer, der overstiger den nedre og øvre acceptgrænse. Her er valgt en klasse II bygning iht. DS/EN ISO 7730 [2006]; DS/EN 15251 [2007] med en grænse på 10% utilfredse (svarende til en PMV-værdi på hhv. -0,5 og +0,5). Resultaterne for antallet af PPD-timer er vist i nedenstående tabel 10.9:

Tabel 10.9: Antal PPD-timer fordelt på personernes termiske følelse af indeklimaet.

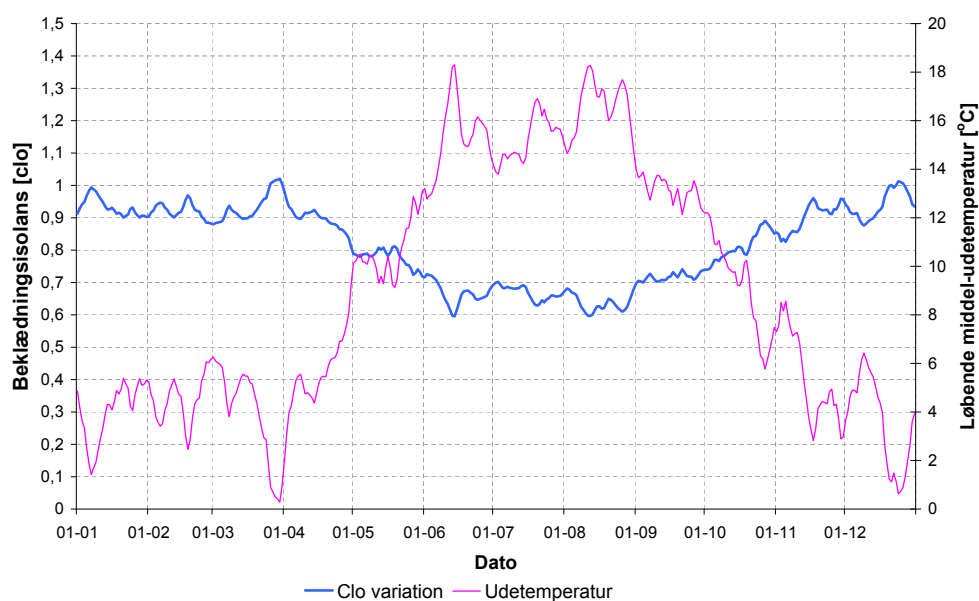
	DS/EN ISO 7730 [2006] Varme PPD-timer (PMV > +0,5)	DS/EN ISO 7730 [2006] Kolde PPD-timer (PMV < -0,5)	Totale PPD-timer
Fast beklædningsisolans vinter (1,0 clo) og sommer (0,5 clo)	7	411	418

Som beskrevet i afsnit 2.5 er der i litteraturen angivet et anbefalet maksimalt antal PPD-timer indenfor arbejdstiden på ca. 100-150 [Olesen, 2004; van der Linden et al., 2002]. Af ovenstående tabel 10.9 er det tydeligt, at den vejledende grænse er overskredet en del. Endvidere er det ligeledes tydeligt, at personerne i bygningen oftest vil føle, at det er for koldt i bygningen.

Ved en estimering af personernes beklædningsisolans er det vigtigt, at medtage den isolerende effekt fra stolen når der er tale om hovedsageligt siddende kontorarbejde (beskrevet yderligere i afsnit 4.1.1 og appendiks B.2). Der er i DS/EN ISO 7730 [2006, Annex C] angivet vejledende isolanser for forskellige kontorstole, hvor en normal nyere kontorstol regnes som havende en isolans på 0,15 clo. Når stolens isoleringseffekt medregnes i estimeringen af beklædningsisolansen vil antallet af varme PPD-timer forøges til 202 PPD-timer, mens antallet af kolde PPD-timer mindskes til 35 PPD-timer, hvormed det totalt set vil give 237 PPD-timer. Det er således tydeligt, at isolansen fra kontorstolen er af stor betydning ved en langtidsevaluering af det termiske indeklima.

Til estimering af personernes beklædningsisolans kan der udover, at gøre brug af værdierne fra DS/EN ISO 7730 [2006] anvendes beregningsalgoritmer til beskrivelse af variationen over året som funktion af en løbende middel-udetemperatur. Algoritmerne er beskrevet nærmere i afsnit 4.2.1. Der er i Eco-factor-værktøjet implementeret flere af disse empirisk udviklede modeller, som er fundet anvendelige samt tilstrækkeligt veldokumenteret. Yderligere diskussioner heraf kan findes i afsnit 4.2 samt 9.1.

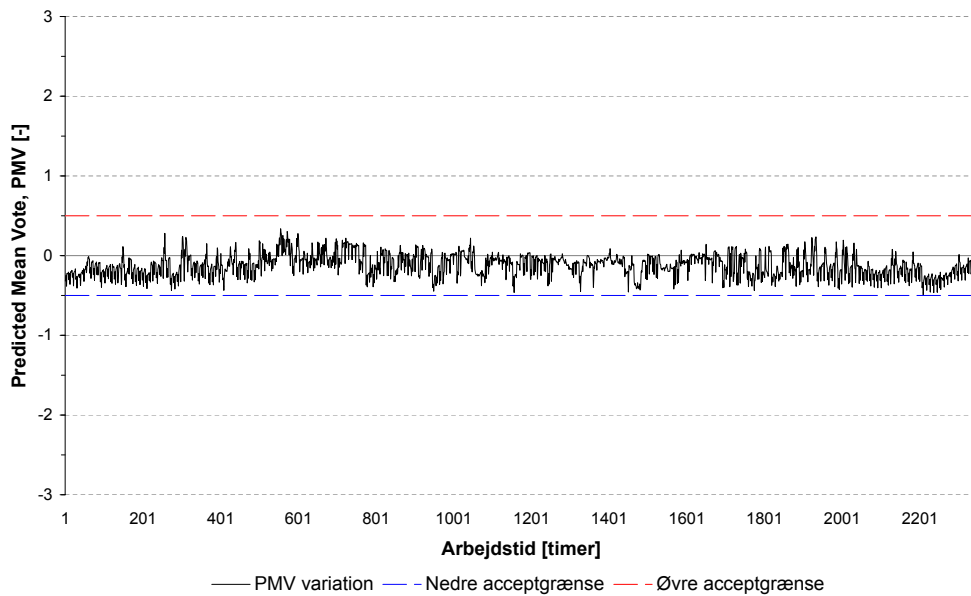
Der er i det følgende foretaget en vurdering af bygningens termiske indeklima, hvor beklædningsisolansen beregnes ud fra en algoritme fundet ved en regressionsanalyse fra et studie i Schweiz [Haldi og Robinson, 2008]. Nedenstående figur viser beklædningsisolansens variation over året.



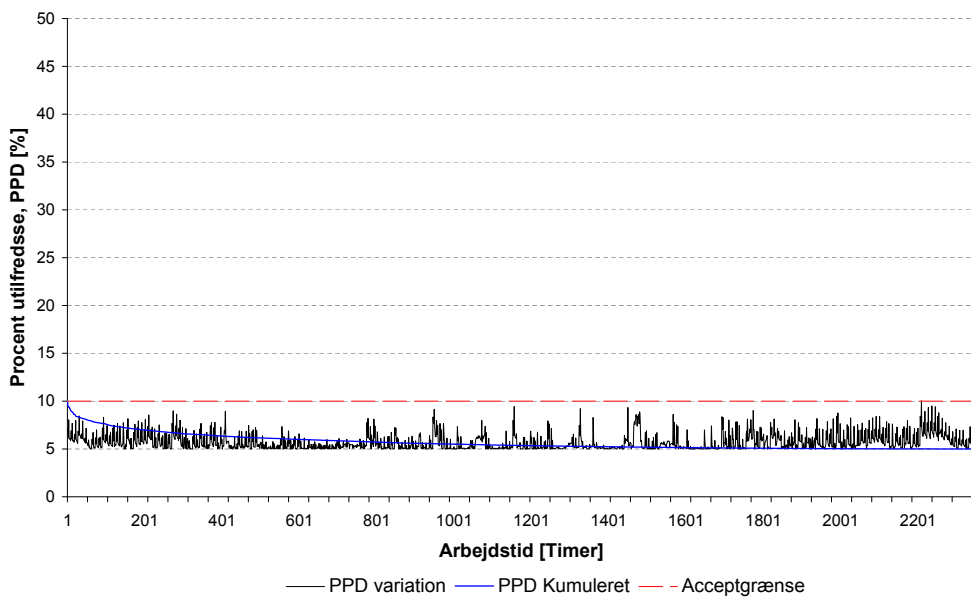
Figur 10.22: Beklædningsisolansens variation over året i forhold til den løbende middel-udetemperatur.

Som det ses af figur 10.22 vil beklædningsisolansen variere fra omkring 1,0 clo om vinteren til ca. 0,6 clo om sommeren. De beregnede isolanser stemmer således fint overens med de vejledende værdier, der er angivet i DS/EN ISO 7730 [2006].

Resultaterne fra beregningen af hhv. PMV- og PPD-indekset med en varierende beklædningsisolans fremgår af nedenstående figur 10.23:



(a) PMV-variation. De to vandrette linjer (blå og rød) viser acceptgrænsen i forhold til beregningen af antal PPD-timer.



(b) PPD-variation. Den vandrette linje (rød) viser grænsen for accepteret antal utilfredse. Den blå linje viser den kumuleret PPD-værdi.

Figur 10.23: Variationen af beregnede PMV- og PPD-værdier over året indenfor arbejdstiden. Beregningen bygger på den importerede resultatfil fra BSim samt forudsætningerne omkring aktivitetsniveau og middellufthastighed på hhv. 1,2 met og 0,15 m/s. Desuden varierer beklædningsisolansen efter udetemperaturens forløb, givet ved figur 10.22

Ved at anvende en beklædningsisolans, der varierer i forhold til den beregnede løbende middeldetemperatur, vil der forekomme et færre antal utilfredse. Endvidere vil der ikke komme et spring i beklædningen, men derimod en mere jævn overgang fra vinter- til sommerbeklædning. Fra ovenstående figurer ses det, at personernes vurdering af det generelle termiske indeklima kun overstiger den valgte acceptgrænse én gang over hele arbejdstiden. Af figur 10.23(a) observeres det, at der ikke vil forekomme situationer hvor det termiske indeklima vil opleves som værende for varmt ved den anvendte beklædningsisolans. Det observeres derimod, at de beregnede PMV-værdier både om vinteren og om sommeren vil ligge fra det neutrale niveau ($PMV = 0$) og ned til $PMV = -0,5$ for stort set hele perioden, men dog kun overstige de 10% utilfredse én gang.

Når der foretages en langtidsevaluering af det termiske indeklima ved brug af antal PPD-timer som overstiger den valgte acceptgrænse på 10% utilfredse, er det muligt at vurdere det samlede termiske indeklima ved brug af en varierende beklædningsisolans. Resultaterne fra Eco-factor-værktøjet er vist i nedenstående tabel 10.10:

Tabel 10.10: Antal PPD-timer fordelt på personernes termiske oplevelse af indeklimaet.

	DS/EN ISO 7730 [2006]	DS/EN ISO 7730 [2006]	Totale PPD-timer
	Varme PPD-timer ($PMV > +0,5$)	Kolde PPD-timer ($PMV < -0,5$)	
Beklædningsisolans varierende i forhold til T_{rm}	0	1	1

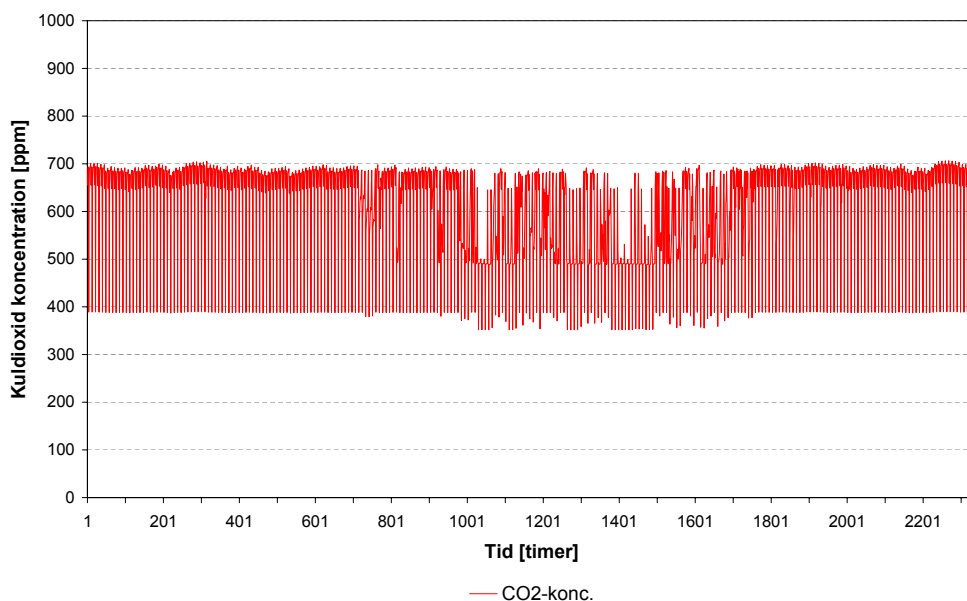
Som det ses er antallet af PPD-timer ved brug af en dynamisk model til beskrivelse af beklædningsisolansens variation over året, langt under den vejledende grænse på ca. 150 PPD-timer. Ved en evaluering af det generelle termiske indeklima i bygningen vil det blive kvalificeret som havende et godt indeklima.

Af ovenstående gennemgang af de langsigtede evalueringsmetoder for det termiske indeklima, er det tydeligt at den nyere metode, PPD-timer, der anvender antal utilfredse til en langsigtet vurdering af det termiske indeklima er en langt bedre indikator end den nuværende gængse metode hvor evalueringen foretages udfra antal timer over hhv. 26 og 27°C jf. DS 474 [1993], idet den medtager flere betydende faktorer i beregningen (aktivitetsniveau, beklædningsisolans, middelluftshastighed, etc.). F.eks. er der, som beskrevet tidligere, registreret operative indetemperaturer om sommeren nede omkring 22°C, hvilket sammen med en normal sommer-beklædningsisolans på 0,5 clo vil give et større antal utilfredse end den tilladte acceptgrænse. Da metoden fra DS 474 [1993] kun vurderer antallet af varme timer over en bestemt grænse, vil de perioder hvor personerne i bygningen vil opleve temperaturen som for kold ikke blive medtaget i den samlede evaluering af det termiske indeklima. Det er derfor en langt bedre metode, at anvende PPD-beregningen for bygningens indeklimaydeevne i fremtiden - både ved evaluering af det momentane og langsigtede termiske indeklima.

Atmosfærisk indeklima

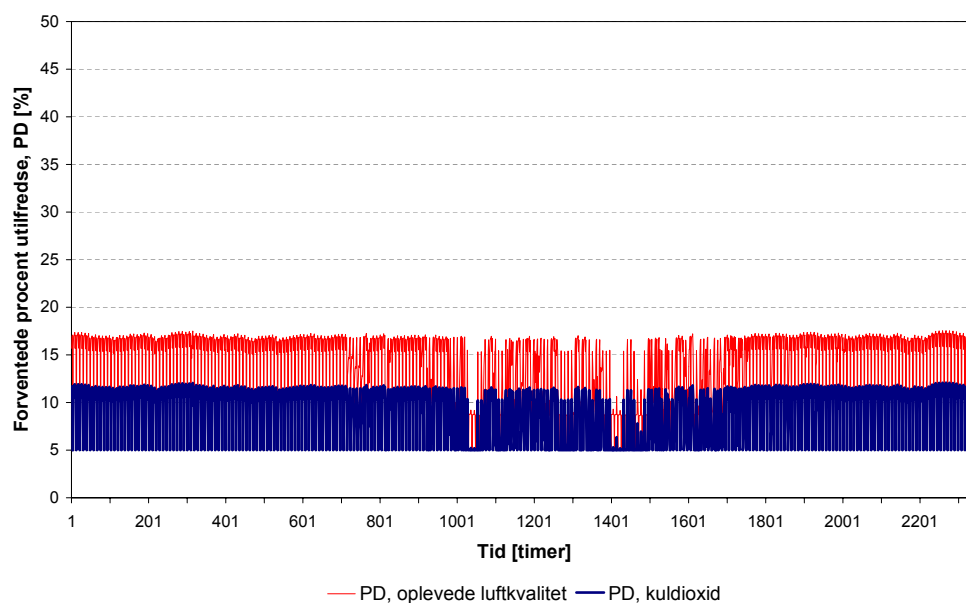
Til vurdering af det atmosfæriske indeklima i bygningen, foretages der i Eco-factor-værktøjet to forskellige beregninger af antal utilfredse. Den mest simple metode anvender CO₂-koncentrationen fra de importerede BSim-data til beregningen af et forventet antal utilfredse med indeluftkvaliteten. Den anden metode anvender personernes vurdering af den oplevede luftkvalitet ved indtræden i rummet, hvor der både tages højde for forureningen fra personer samt bygningen.

Figur 10.24 viser CO₂-koncentrationens variation over året simuleret i BSim.



Figur 10.24: CO₂-koncentrationens variation over året indenfor arbejdstiden.

Af ovenstående figur fremgår det, at CO₂-koncentrationen vil ligge i området 400-700 ppm for hele den beregnede periode (resultaterne er desuden yderligere beskrevet i appendiks G). Den beregnede CO₂-koncentration indgår efterfølgende i beregningen af det forventede antal utilfredse ud fra begge vurderingsmetoder (beskrevet i afsnit 9.1.1). Resultaterne herfra er vist i figur 10.25:



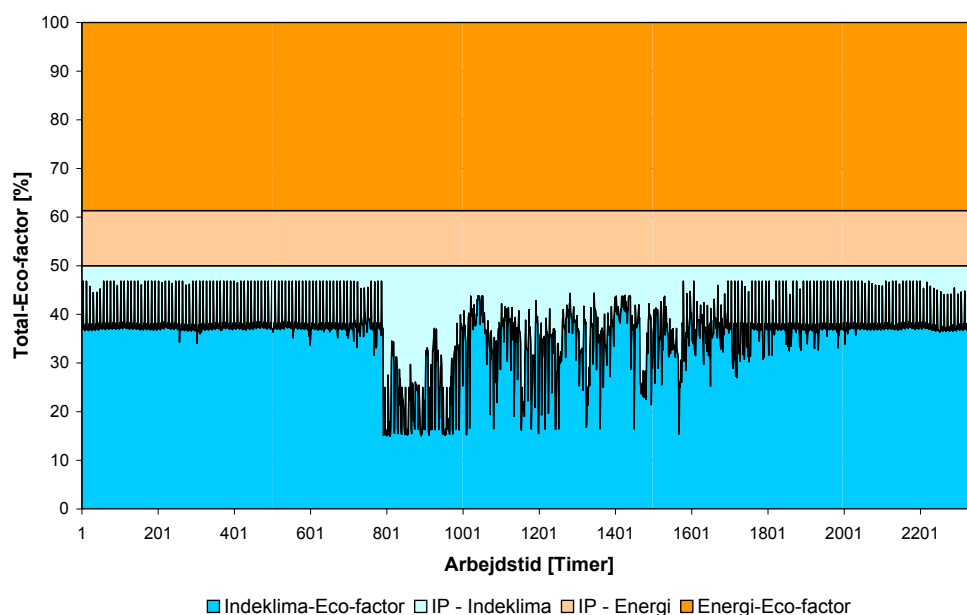
Figur 10.25: Forventet procent utilfredse som funktion af den beregnede CO_2 -koncentration fra BSim. Den blå linje viser antal utilfredse i forhold til CO_2 -koncentrationen. Den røde linje viser antal utilfredse i forhold til den oplevede indeluftkvalitet (PAQ) ved indtræden i rummet.

Den simulerede CO_2 -koncentration vil ikke give anledning til et stort antal utilfredse i bygningen beregnet efter såvel den ene som den anden metode. Dette var også forventet, idet den simulerede CO_2 -koncentration aldrig overstiger 700 ppm (inkl. udendørs-koncentrationen).

10.3.3 ECO-FACTOR

Til den samlede vurdering af en bygnings ydeevne anvendes den totale Eco-factor, som består af et bidrag fra hhv. Indeklima-Eco-factoren og Energi-Eco-factoren. Beregningerne foretages automatisk i arket ud fra den importerede resultatfil fra BSim samt de forudsætninger der er foretaget omkring de adfærdsmæssige parametre for personerne i bygningen. Ydermere skal der foretages valg omkring energikilderne for hhv. opvarmning samt elektricitet. Ved evalueringen af Eco-factoren skal det desuden vælges, hvordan der skal vægtes imellem indeklimaet og energiforbruget. Der er her valgt at benytte en 50/50 %'s vægtning mellem Indeklima-Eco-factoren og Energi-Eco-factoren. Udvidelsen af Eco-factoren vil således som resultat, give en fordeling som sammen med informationerne fra den oprindelig Eco-factor kan give en langt bedre mulighed for brugeren at optimere bygningen. Nedenstående figur viser variationen af Eco-factoren fordelt på hhv. energi og indeklima indenfor brugstiden. Desuden er det muligt at se hvor stort forbedringspotential⁵, fordelt på de to bidrag, er i bygningen.

⁵Engelsk: Improvement Potential, IP



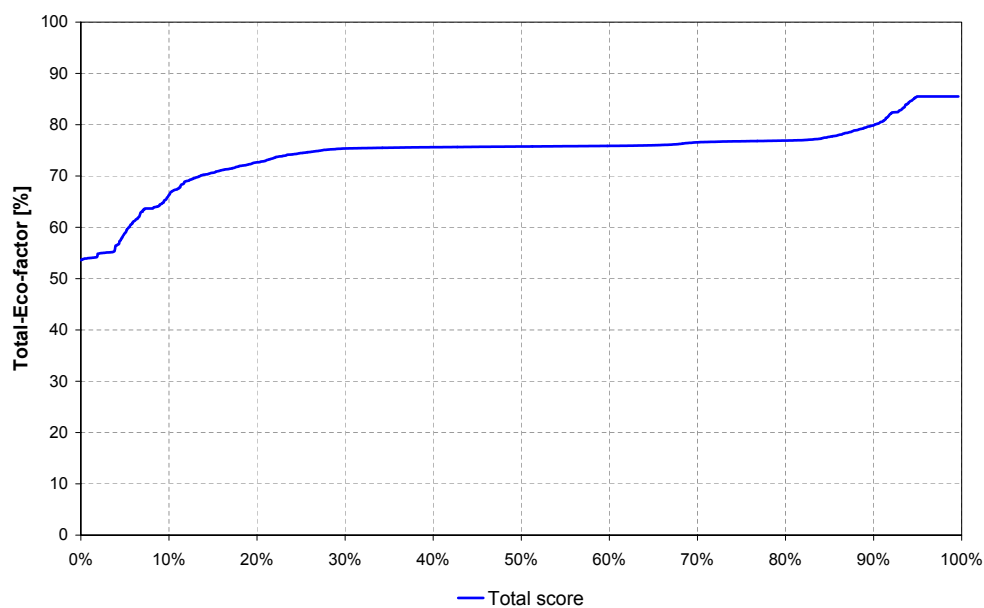
Figur 10.26: Variationen over året for de to bidrag til den totale Eco-factor. Forudsat beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006].

Indeklima-Eco-factoren varierer her altid i takt med antallet af utilfredse med det generelle termiske indeklima (PPD), da det er denne der er udslagsgivende i beregningen. Dette skyldes, at de resterende indgangsparametres værdier for det termiske indeklima - lokal diskomfort - er sat så lave, at de ikke vil have nogen indflydelse. Dette skal selvfølgelig vurderes fra bygning til bygning, om den lokale diskomfort har en betydning for det termiske indeklima. Beregningen af indeluftkvaliteten giver ikke noget bidrag, da CO_2 -koncentrationerne er simuleret til at ligge i intervallet 400-700 ppm (som beskrevet ovenfor i afsnittet omkring *atmosfærisk indeklima*).

Det er ligeledes tydeligt af figuren, at der er rig mulighed for optimering af modellen og sammen med de oprindelige figurer fra Eco-factoren, hvor det angives hvilke parametre der har den største indflydelse på hhv. Energi- og Indeklima-Eco-factoren, er dette et godt optimeringsværktøj.

Beregningerne af den totale Eco-factor for arbejdstiden kan efterfølgende sorteres og en grafisk fordeling kan herefter opstilles. Herudfra er det muligt for brugeren af det udvidede Eco-factor-værktøj, at foretage en vurdering af Eco-factoren for bygningen som, sammen med de resterende beregninger i arket, kan indgå i den endelige vurdering af bygningens samlede ydeevne både med hensyn til energi og indeklima.

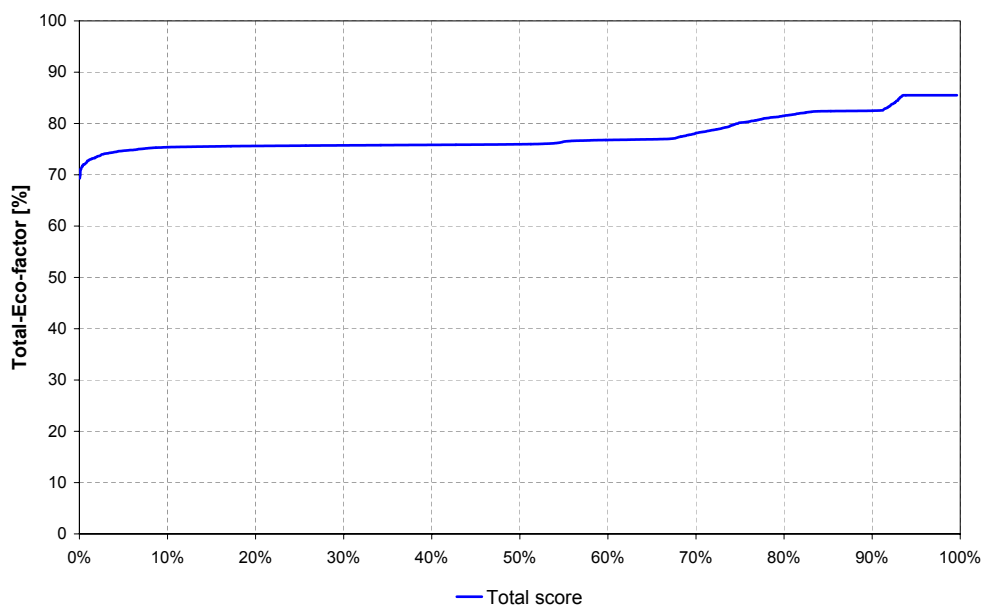
Figur 10.27 viser resultaterne for fordelingen af den totale Eco-factor for en Beta-bygningstype.



Figur 10.27: Fordelingen af den totale Eco-factor med hensyn til den almindelig beregning af PMV.

Det er ud fra ovenstående figur 10.27 muligt at se, hvor stor en procentdel af tiden bygningen kan overholde et bestemt kriterie. Det er i afsnit 9.1.3 diskuteret, hvordan en endelig vurdering af den totale Eco-factor i én værdi kan foretages. Det blev fundet, at der skal anvendes en 5%-fraktil ved en endelig vurdering af bygningens samlede ydeevne. På figur 10.27 svarer dette til en Eco-factor-score på 59%.

Eco-factor-værktøjet anvendes ofte i en design-situation, hvor forskellige løsninger skal undersøges for at finde frem til den bedste. For Grontmij | Carl Bro er dette ligeledes muligt, hvor det er tydeligt, at den simulerede operative indetemperatur om vinteren samt overgangen til sommerperioden har en stor indflydelse på den totale Eco-factor. Der kan foretages en beregning, hvor der istedet for en opdelt beklædningsisolans på hhv. en vinter- og sommerperiode, kan anvendes en varierende beklædningsisolans beregnet som funktion af den løbende middel-udetemperatur, som anvendt ovenfor i vurderingen af det termiske indeklima. Resultat af den totale Eco-factor ved anvendelse af en dynamisk varierende beklædningsisolans er vist i nedenstående figur 10.28



Figur 10.28: Fordelingen af den totale Eco-factor med hensyn til den almindelig beregning af PMV.

Det er tydeligt i forhold til figur 10.27, at den totale Eco-factor er forbedret, såfremt der anvendes en ligning til beskrivelse af beklædningsisolansens variation over året. Det blev ligeledes under vurderingen af det generelle termiske indeklime fundet, at anvendelsen af en algoritme til bestemmelsen af personernes beklædning i bygningen vil give et mere rigtigt billede af antallet af utilfredse i bygningen, da springet mellem vinter- og sommerbeklædning således ikke vil forekomme.

Det ses af figuren, at score-værdien for bygningen ved en 5%-fraktil vil give en total Eco-factor på 75%, når der foretages en vurdering ud fra den statistiske PMV-model. Ved en optimering af modellen, er det både energiforbruget til udstyret og belysningen samt personernes oplevelse af det termiske indeklime, der skal fokuseres på, idet disse indgående parametre har det største potentiale for forbedring.

10.4 DISKUSSION

Det er tydeligt af ovenstående eksempelberegninger med det udvidede Eco-factor-værktøj, at brugeren vil have langt flere (og bedre) muligheder for, at vurdere og ikke mindst optimere bygningens ydeevne. Udover beregningen af Eco-factoren, som nu istedet foretages på baggrund af en importeret resultatfil fra BSim hvormed resultatet vil variere i forhold til det beregnede indeklime, er det muligt for brugeren at foretage yderligere vurderinger af hhv. det termiske og atmosfæriske indeklime. Dette i kraft af de mange forskellige evalueringsmetoder, som værktøjet er blevet udvidet med, og som kan anvendes informativt. Brugeren kan på baggrund heraf foretage bedre og mere kvalificerede langtidsevalueringer af hovedsageligt det termiske indeklime. Anvendelsen af PMV- og PPD-indekset samt den langsigtede evalueringsmetode PPD-timer er et langt bedre værktøj til evaluering af det termiske indeklime, da flere betydende faktorer medtages i beregningen. F.eks. vil den traditionelle metode fra DS 474 [1993] aldrig kunne fortælle noget om, hvordan indetemperaturen vil opleves.

De adaptive modeller indgår ikke i beregningen af Eco-factoren, da modellerne ikke er fundet anven-

delige endnu til evaluering af det termiske indeklima. Derimod kan brugeren gøre brug af beregningerne, for de forskellige metoder (SCATs, RP-884, PMV_e), som vejledning ved en evaluering af en Alfa-bygnings indeklimaydeevne.

Simuleringer med adaptiv kontrolalgoritme 11

Som nævnt i afsnit 9.2 er Grontmij | Carl Bro's domicil i Århus udvalgt til undersøgelse af energibesparelsespotentialer ved brug af den adaptive kontrolalgoritme. Bygningen blev opført i 2006/07 og er fuldt luftkonditioneret med mekanisk køling. Endvidere er bygningen styret af et avanceret CTS-anlæg, der aktivt styrer såvel ventilationsanlæg som belysning, udvendig solafskærmning, rumopvarmning etc. Et sydvendt kontor i bygningen er udvalgt for simuleringerne, og selv opbygningen af BSim-modellen er beskrevet i detaljer i appendiks G, hvor en mere detaljeret beskrivelse af bygningen og CTS-anlægget også forefindes.

I det følgende vil den opstillede model blive underlagt undersøgelser af energibesparelsespotentialer ved brug af den adaptive kontrolalgoritme sammen med den forventede indflydelse på det termiske indeklima ved brug af diverse komfortindikatorer herfor.

11.1 MODIFICERING AF BSIM-MODEL FOR SIMULERING MED ACA

Af tekniske grunde er det, som beskrevet tidligere i afsnit 9.2, kun muligt under simuleringen løbende at styre setpunktet for hhv. opvarmning og køling i BSim via ventilationen, og endvidere er dette kun muligt for ventilationssystemer, der kører med konstante luftmængder (CAV). Idet den udvalgte bygning er ventileret gennem et ventilationsanlæg der løbende regulerer luftmængden efter behov (VAV), er det nødvendigt at foretage en modificering af modellen således der skiftes til et CAV-anlæg. Endvidere vil varmeanlæggets driftsperiode blive indskrænket til de perioder hvor ventilationsanlægget ikke er i drift. Dette gøres for at undgå misvisende billeder af de potentielle energibesparelser såfremt der forekommer kølebehov udenfor den faktiske driftstid for ventilationsanlægget. Følgende modificeringer af den validerede model foretages:

- VAV-styring ændres til CAV-styring med "ZoneTempCtrl"
- 100% luftmængde ($0,52 \frac{m^3}{s}$)
- Maksimal tilladelig indblæsningstemperatur¹: 100°C
- Minimal tilladelig indblæsningstemperatur²: 0°C (for at sørge for tilstrækkelig kølekapacitet)
- Varmefladeeffekt: 1e20kW
- Kølefladeeffekt: -1e20kW
- Opvarmningsanlæg kun i drift udenfor ventilationsanlæggets driftstid.

¹for at opnå tilstrækkelig opvarmningskapacitet

²for at opnå tilstrækkelig kølekapacitet

11.2 SIMULERINGSRUTINER OG SCENARIER

I nærværende underafsnit beskrives rutinerne for simulering hhv. med og uden adaptiv kontrolalgoritme.

På baggrund af vejrdata fra DMI [2008], beregnes setpunkter for indetemperaturen for den udvalgte periode (7/5 2007 - 6/5 2008) efter formel (9.20). Beregningen af den løbende middeludetemperatur, T_{rm} , ved ligning (9.21) fordrer kendskab til den løbende middeludetemperatur for den foregående dag. For den første dag i den angivne periode benyttes ligning (2.7) til beregning af T_{rm} , hvorefter ligning (9.21) benyttes for de resterende dage. Matlab-procedurer for beregning af setpunkter forefindes på den vedlagte DVD.

Til undersøgelse af energibesparelsespotentialer samt det forventende termiske indeklima ved implementering af den adaptive kontrolalgoritme, opstilles tre forskellige simuleringsscenarier jf. følgende tabel 11.1.

Tabel 11.1: Simuleringsscenarier for undersøgelse af energibesparelsespotentialer ved ACA.

Scenario nr.	
1	Fast ^{a)} setpunkt for opv./køl. på hhv. 22,88/22,98°C vs. Adaptiv kontrolalgoritme
2	Fast ^{b)} setpunkt for opv./køl. på hhv. 22/24,5°C vs. Adaptiv kontrolalgoritme
3	Adaptiv kontrolalgoritme vs. Modificeret ^{c)} adaptiv kontrolalgoritme

a) De to setpunkter er adskilt af en lille margin, for at undgå simultan opvarmning og køling.

b) Efter DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks A]

c) Nedre grænse for $T_{rm} \leq 10^\circ\text{C}$ på 22°C frem for $22,88^\circ\text{C}$ (formel (9.20b))

Første scenario er opstillet i overensstemmelse med undersøgelserne foretaget i McCartney og Nicol [2002], hvor der blev foretaget undersøgelser i to bygninger³. Her blev energibesparelsespotentialer ved implementering af ACA i et kontorområde i den engelske bygning fundet til ca. 30% ift. styring efter et fast setpunkt. I scenario 1 undersøges den tilsvarende energibesparelse ved implementering i den udvalgte bygning - Grontmij | Carl Bro.

I andet scenario sammenlignes energiforbruget i en bygning, hvor setpunkterne er fastsat efter de vejledende grænser angivet i DS/EN ISO 7730 [2006, Appendiks A], med energiforbruget såfremt setpunktet er styret efter ACA. De vejledende projekteringskriterier angivet i denne norm er normalt benyttet i Danmark.

I det sidste scenario er der foretaget en modificering af ACA, hvor den nedre grænse for $T_{rm} \leq 10^\circ\text{C}$ i formel (9.20b) er nedjusteret til 22°C . Herved vil energiforbruget til opvarmningen kunne reduceres yderligere, og denne modificerede algoritme sammenlignes med den oprindelige ACA.

Samtlige simuleringresultater vurderes i forhold til såvel energiforbrug som forventet termisk indeklima før og efter implementering. I forhold til energiberegningerne er der skønsmæssigt forudsat en virkningsgrad (COP⁴) for køleanlægget på 2,5. Idet energiberegningerne i det følgende vurderes relativt ift. de opstillede scenarier, er denne kun af betydning ved opgørelse af besparelserne i kroner. De procentvise energibesparelser er uden indflydelse fra COP-værdien.

I den følgende præsentation af simuleringresultater, er der foruden beregninger af energiforbruget

³En bygning i Sverige og en bygning i England.

⁴Coefficient Of Performance

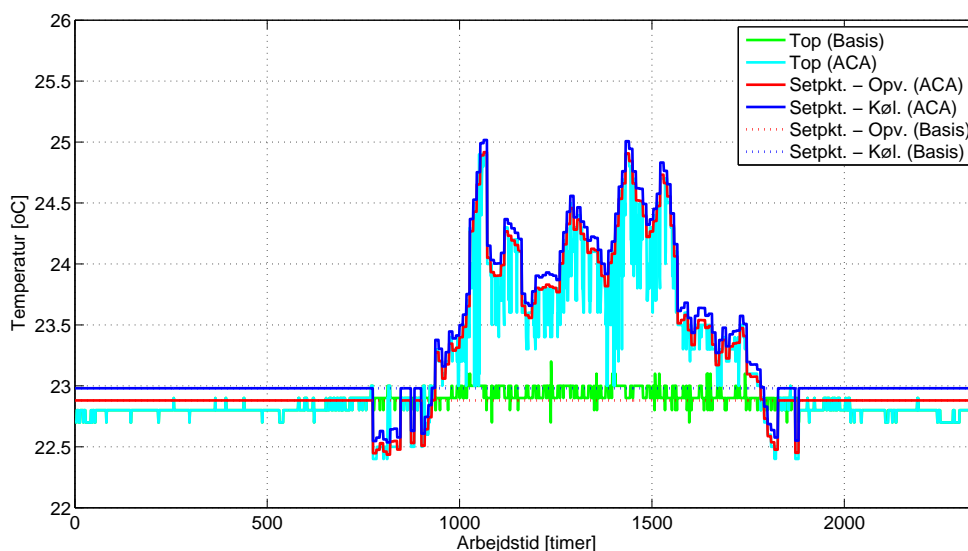
også foretaget beregninger af det forventede termiske indeklima efter DS/EN ISO 7730 [2006]. I samtlige af de følgende simuleringsresultater, er der foretaget beregninger med beklædningsisolanser efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006]⁵ samt dynamiske⁶ beregninger af beklædningsisolansen efter formel (4.30)[Haldi og Robinson, 2008].

I følgende tre afsnit præsenteres resultater fra de opstillede scenarier jf. tabel 11.1.

11.3 RESULTATER - SCENARIO 1

I dette scenario er energibesparelsespotentialet, jf. tabel 11.1, undersøgt ved implementering af ACA ift. styring efter faste setpunkter for opvarmning og køling på hhv. 22,88 og 22,98°C.

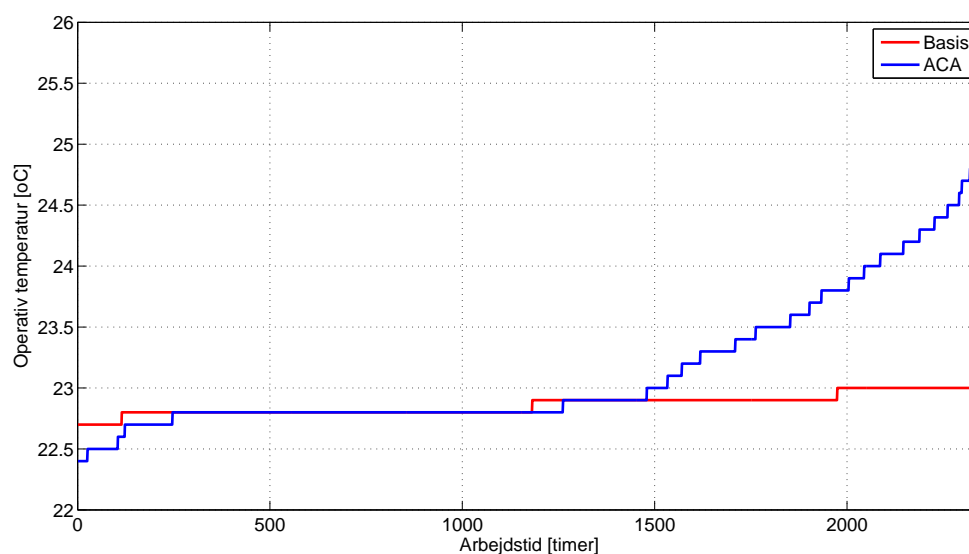
Følgende figur 11.1 og 11.2 viser hhv. de simulerede operative indetemperaturer og fordeling heraf.



Figur 11.1: Operativ indetemperatur samt setpunkt for opvarmning og køling ved styring efter hhv. faste setpunkter (basis) og efter ACA.

⁵1,0/0,5 clo i vinter/sommer

⁶I de følgende figurer benævnt 'dynamisk beklædn.'



Figur 11.2: Fordelinger af den operative indetemperatur ved styring efter hhv. faste setpunkter (basis) og efter ACA.

Som det fremgår af figur 11.1 er de operative temperaturer for de to tilfælde været ens i de kolde måneder, hvor der i den varme periode ses en klar forskel. I enkelte tilfælde har forskellen i de operative indetemperaturer været ca. 2°C. Endvidere bør der fokuseres på overgangen mellem kold og varm periode (for $T_{rm} = 10^{\circ}\text{C}$). Her er vil de beregnede setpunkter overskride den teoretiske grænse på 22,88°C iht. formel (9.20). Dette har ikke kun indflydelse på energiforbruget, men i høj grad også den termiske komfort, hvilket vil blive vist i det senere afsnit 11.3.2.

Som det tidligere blev nævnt i afsnit 9.2.1, er det nødvendigt at kontrollere kravet vedr. de tidlige variationer af indetemperaturen angivet i DS/EN ISO 7730 [2006], der er nærmere beskrevet i afsnit 2.2.3. Her angives det, at såfremt den tidlige variation af den operative indetemperatur er under $2,0 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{time}}$, kan metoderne for stationære omgivelser benyttes (PMV/PPD). Følgende tabel viser de maksimale variationer i operativ temperatur ved styring efter fast setpunkt hhv. ACA.

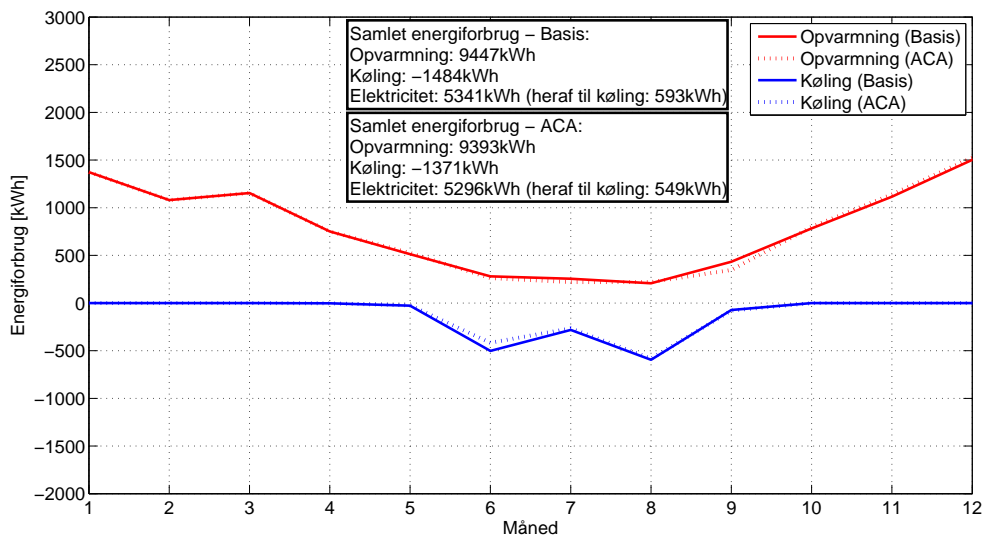
Tabel 11.2: Tidslig variation af operativ indetemperatur.

	Maksimal variation pr. time [$\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{time}}$]
Fast setpunkt	0,5
ACA	1,9

Som tabel 11.2 viser, er kravet til tidslig variation i operativ indetemperatur også overholdt ved styring efter ACA.

11.3.1 ENERGI

Følgende figur viser energiforbruget til hhv. opvarmning, køling, samt elektricitet pr. måned for den betragtede periode, og efterfølgende tabel 11.3 viser de beregnede besparelser.



Figur 11.3: Energiforbrug ved styring efter hhv. faste setpunkter (basis) og efter ACA.

Følgende tabel viser energibesparelserne for den betragtede periode.

Tabel 11.3: Energiforbrug ved styring efter hhv. faste setpunkter og ACA.

	Fast setpunkt [kWh]	ACA [kWh]	Energibesparelse [kWh]
Opvarmning	9447	9393	54
Køling	1484	1371	113
Elektricitet til køling ^{a)}	593	549	44

a) COP for køleanlægget skønsmæssigt fastsat til 2,5

Som såvel figur 11.3.1 og ovenstående tabel 11.3 viser, er energibesparelsespotentialen ved implementering af ACA i den udvalgte bygning ift. styring efter faste setpunkter for opvarmning og køling på hhv. 22,88 og 22,98°C lille. Kun 54 kWh til opvarmning og 44 kWh elektricitet til køling svarende til hhv. 0,6% og 7,4% er sparet efter implementeringen. Simuleringerne er foretaget for et udvalgt område på 130 m² af bygningen på i alt 3200 m², og såfremt det forudsættes at samtlige rum er identiske med de betragtede vil de samlede besparelser skønsmæssigt⁷ være 1329 kWh og 1083 kWh for hhv. opvarmning og elektricitet til køling. Elektricitetsbesparelserne ift. køling er imidlertid overvurderet, idet det udvalgte område er orienteret direkte mod syd med høj solbelastning til følge, og kølebehovet i andre områder i bygningen orienteret mod nord vil derfor være mindre. Her vil der dog i de kolde perioder sandsynligvis forekomme et større varmebehov som følge af det mindre solindfald. I den

⁷f.eks. $54 \cdot \frac{3200}{130} = 1329$

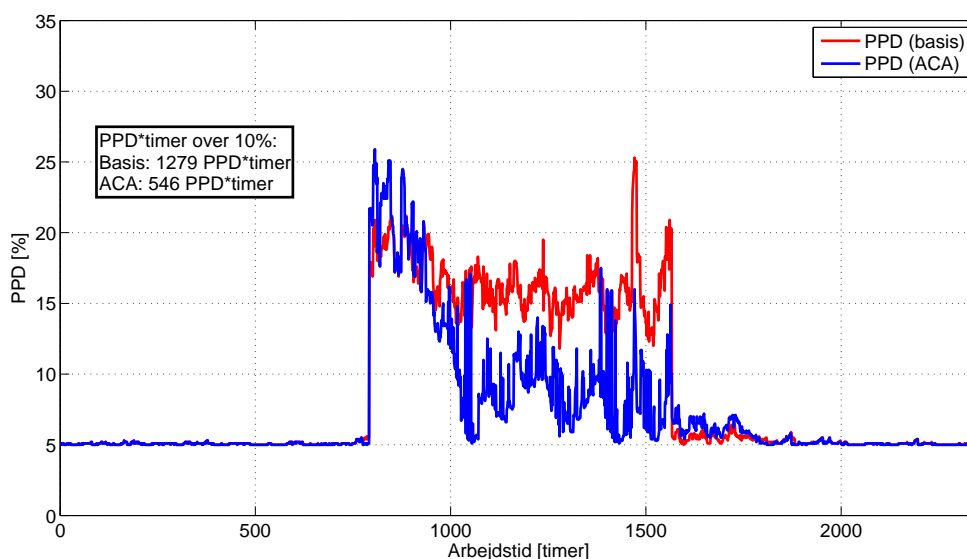
betragtede periode (7/5 2007 - 6/5 2008) forekom der generelt ikke høje temperaturer ift. det normale danske klima. Således vil simuleringer med vejrdato indeholdende højere temperaturer i de varme perioder sandsynligvis vise større potentielle energibesparelser.

11.3.2 TERMISK INDEKLIMA

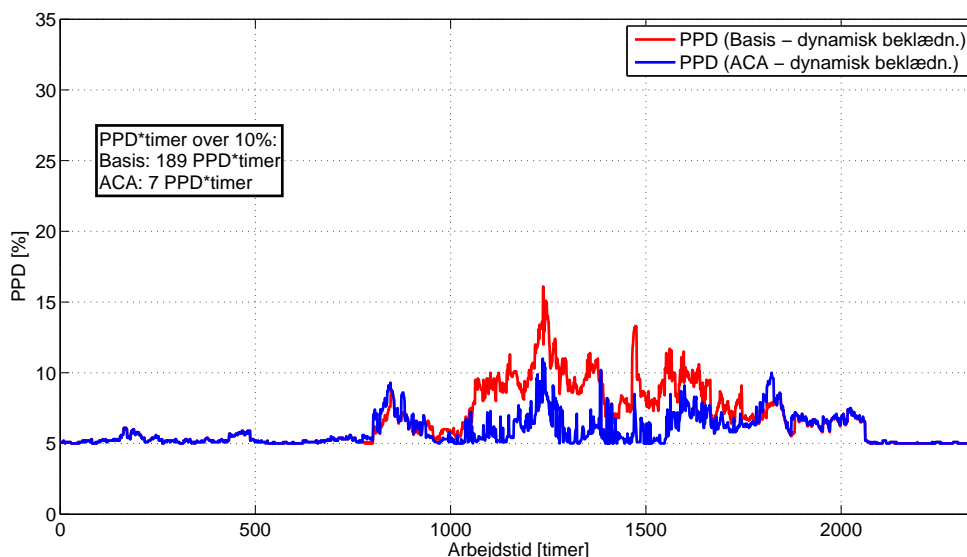
I nærværende afsnit vil den forventede indflydelse på det termiske indeklima efter implementering af ACA blive undersøgt.

Følgende figur 11.4(a) og (b) viser det forventede antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) beregnet på baggrund af fastsættelse af beklædningsisolansen efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](figur a) og en variation som funktion af den løbende middeludetemperatur, T_{rm} , efter Haldi og Robinson [2008](figur b). Endvidere er antallet af PPD-timer⁸ over 10% utilfredse vist.

⁸Beregnet efter formel (2.18)



(a) Beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006] (0,5/1,0 clo for sommer/vinter)



(b) Beklædningsisolans efter Haldi og Robinson [2008](formel (4.30))

Figur 11.4: Forventet antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) beregnet med beklædningsisolans efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](a) og Haldi og Robinson [2008](b). Beregningsforudsætninger for begge figurer: $M = 1,2 \text{ met}$, $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

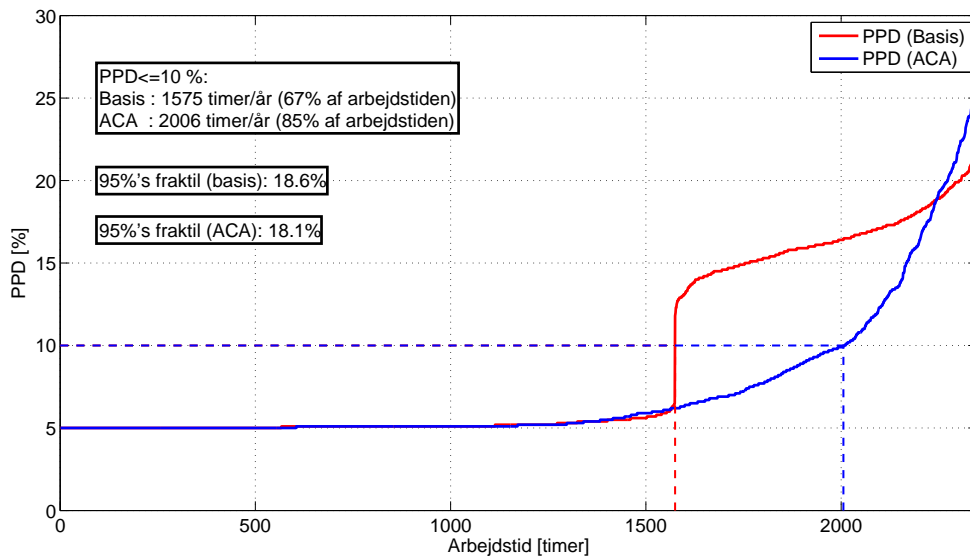
Som det fremgår af figur 11.4(a) er det forventede termiske indeklima ved implementering meget bedre end såfremt der styres efter et fast setpunkt for rumtemperaturen på ca. 23°C . Det ses endvidere, at der i overgangsperioden mod varmere udelufttemperaturer, forekommer et højere forventet antal utilfredse ved simuleringen med ACA. Dette sker som følge af den førnævnte overskridelse af den teoretiske minimumstemperatur på $22,88^\circ\text{C}$, hvilket medfører et øget antal utilfredse p.g.a. for lav

temperatur (jf. figur 11.1).

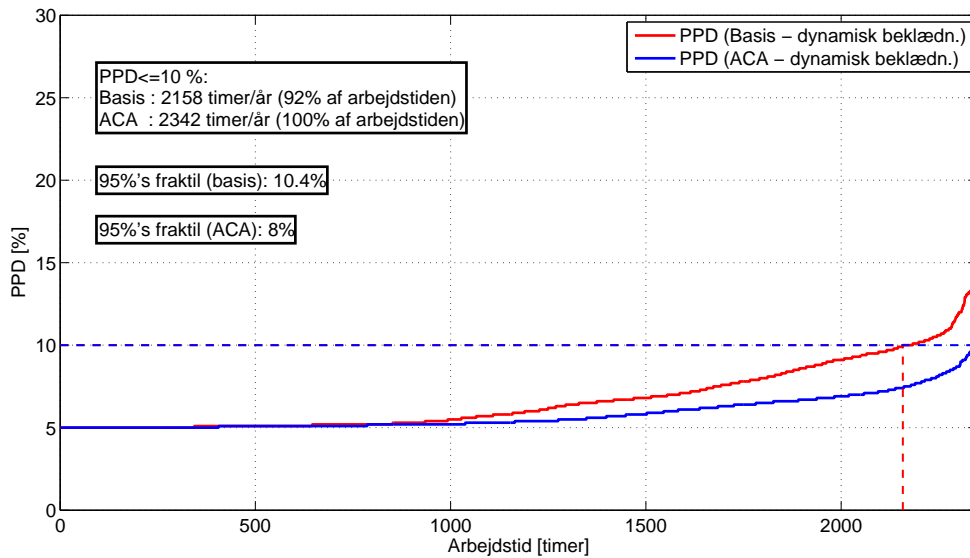
Det forventede antal utilfredse er imidlertid meget højt for begge tilfælde i den varme periode. Sammenlignes figur 11.4(a) med de tilsvarende resultater i figur 11.4(b) ses det, at indflydelsen fra fastsættelsen af beklædningsisolansen har stor effekt på beregningerne af det forventede antal utilfredse. Antallet af PPD-timer er ved beregning af beklædningsisolansen efter ligning (4.30) reduceret med 1090 og 539 PPD-timer for simuleringen med hhv. faste setpunkter og ACA. Antallet af PPD-timer bør ifølge van der Linden et al. [2002] maksimalt være 150⁹, og det fremgår således, at dette langt fra overholdt såfremt beklædningsisolansen bestemmes efter DS/EN ISO 7730 [2006].

Følgende figur 11.5(a) og (b) viser fordelingerne af det forventede antal utilfredse (PPD) i arbejdstiden.

⁹Yderligere beskrevet i afsnit 2.5



(a) Beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006] (0,5/1,0 clo for sommer/vinter)



(b) Beklædningsisolans efter Haldi og Robinson [2008](formel (4.30))

Figur 11.5: Fordelinger af forventet antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) beregnet med beklædningsisolans efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](a) og Haldi og Robinson [2008](b). Beregningsforudsætninger for begge figurer: $M = 1,2 \text{ met}$, $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

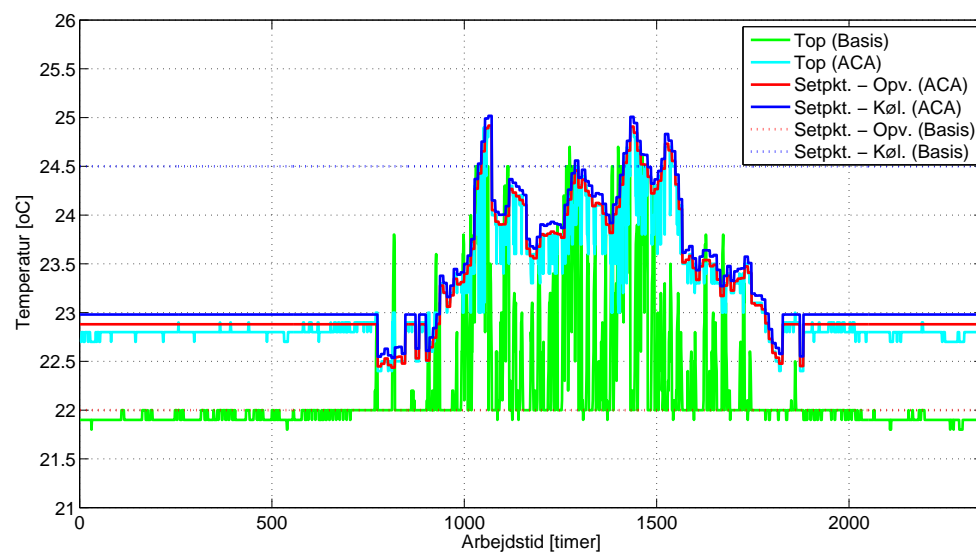
Fordelingerne af PPD i figuren ovenfor viser, at det forventede antal utilfredse generelt er lavere ved setpunktstyring efter ACA. Også her ses indflydelsen fra fastsættelsen af beklædningsisolansen. Ved brug af DS/EN ISO 7730 [2006] hertil, er PPD under 10% i hhv. 67 og 85% af arbejdstiden for tilfældet med hhv. fast setpunkt og ACA. Og ved beregning af beklædningsisolansen efter Haldi og Robinson [2008], er PPD under 10% i hhv. 92 og 100% af arbejdstiden. Fastsættelsen af

beklædningsisolansen er således af stor betydning for resultaterne mht. vurdering af det termiske indeklima. En spørgeskemaundersøgelse i den simulerede periode, ville have kunnet afsløre det aktuelle antal utilfredse med de termiske omgivelser, men dette har ikke været muligt at foretage i nærværende projekt.

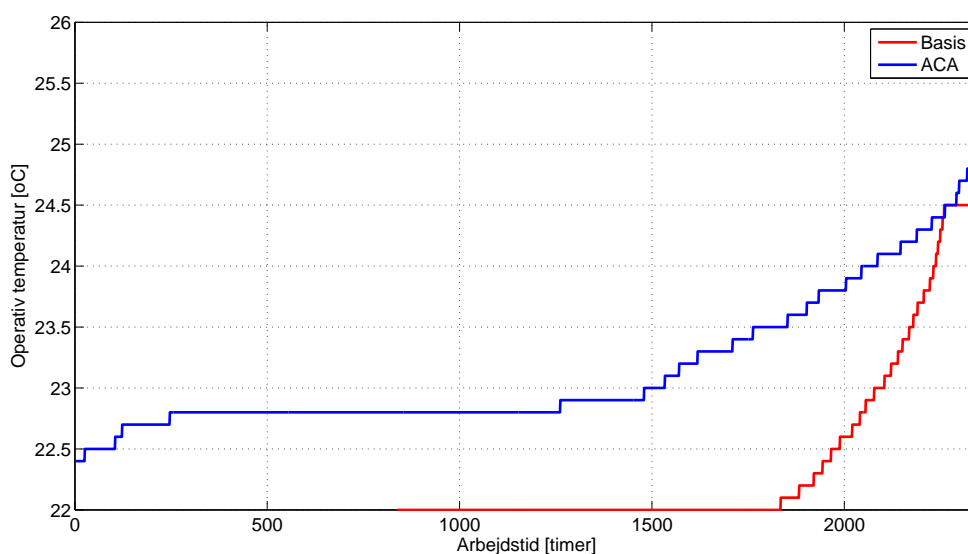
11.4 RESULTATER - SCENARIO 2

I scenario 2 sammenlignes simuleringer med konventionelle setpunkter for opvarmning og køling efter DS/EN ISO 7730 [2006] på hhv. 22 og 24,5°C og simulering med ACA (uændret).

Følgende figur 11.6 viser de simulerede operative indetemperaturer samt setpunkter, og efterfølgende figur 11.7 viser fordelingerne af operative indetemperaturer for de to førnævnte tilfælde.



Figur 11.6: Operativ indetemperatur samt setpunkt for opvarmning og køling ved styring efter hhv. faste setpunkter (basis) og efter ACA.



Figur 11.7: Fordelinger af den operative indetemperatur ved styring efter hhv. faste setpunkter (basis) og efter ACA.

Figur 11.6 viser, at på trods af det højere kølesetpunkt på 24,5°C ift. ACA, overstiger den operative indetemperatur sjældent dette. Kølebehovet er således kraftigt reduceret ift. styring efter et fast setpunkt på ca. 23°C jf. scenario 1 præsenteret i ovenstående afsnit 11.3. Det må således forventes at energiforbruget til køling er større ved styring efter ACA i forhold til de faste setpunkter efter DS/EN ISO 7730 [2006]. Det samme gør sig gældende for energiforbruget til opvarmning jf. figur 11.6. Her ses det, at setpunktet på 22,88°C vil medføre et større opvarmningsforbrug.

Som ved scenario 1, undersøges den tidlige variation af det termiske miljø iht. DS/EN ISO 7730 [2006] (beskrevet nærmere i afsnit 2.2.3). Følgende tabel viser den maksimale variation pr. time af den operative indetemperatur for de to tilfælde.

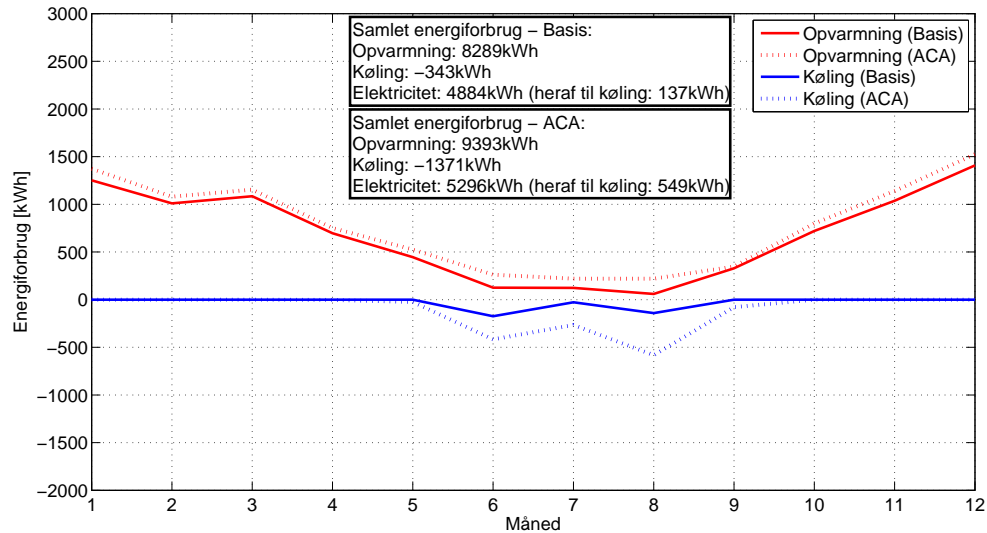
Tabel 11.4: Tidslig variation af operativ indetemperatur.

Maksimal variation pr. time	
	$[\frac{^{\circ}C}{time}]$
Fast setpunkt	1,2
ACA	1,9

Ifølge DS/EN ISO 7730 [2006] kan PPD-indekset benyttes såfremt den tidlige variation i den operative indetemperatur ikke overstiger $2,0 \frac{^{\circ}C}{time}$. Som det fremgår af ovenstående tabel 11.4 er dette overholdt.

11.4.1 ENERGI

Følgende figur samt efterfølgende tabel 11.5 viser energiforbruget for den betragtede periode for de to simuleringer - fast setpunkt for opvarmning/køling på 22/24,5°C samt ACA.



Figur 11.8: Energiforbrug ved styring efter hhv. faste setpunkter (basis) og efter ACA.

Tabel 11.5: Energiforbrug ved styring efter hhv. faste setpunkter og ACA.

	Fast setpunkt [kWh]	ACA [kWh]	Energibesparelse [kWh]
Opvarmning	8289	9393	-1104
Køling	343	1371	-1028
Elektricitet til køling ^{a)}	137	549	-412

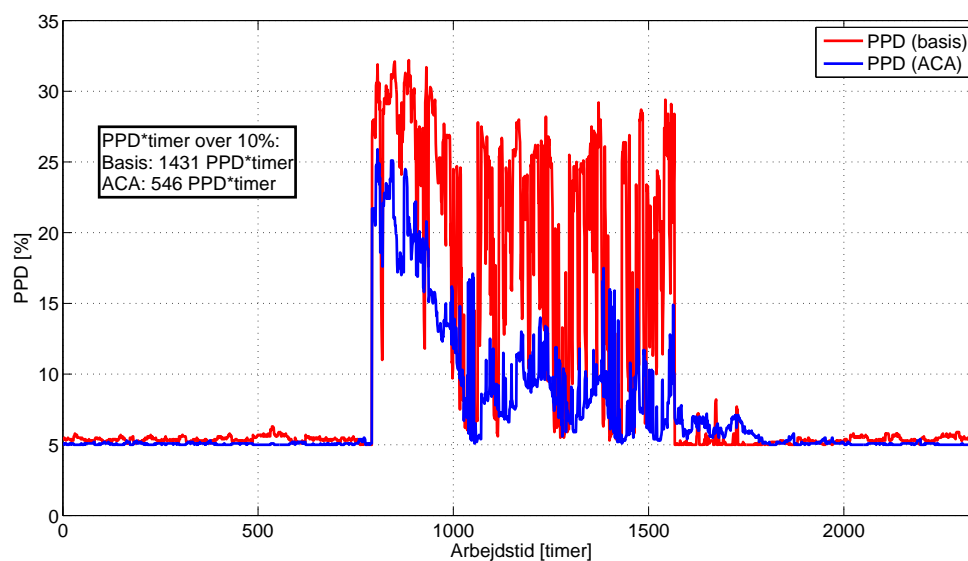
a) COP for køleanlægget skønsmæssigt fastsat til 2,5

Som det indledningsvist blev diskuteret ifm. figur 11.6, er der et øget energiforbrug ved styring efter ACA ift. konventionelle setpunkter på 22/24,5°C. Det gør sig gældende for såvel opvarmning samt køling, hvor den procentvise stigning i energiforbruget er hhv. 13 og 300%. Det fremgår af figur 11.8, at der også forekommer en øget opvarmning i den varme periode (måned 6-8). Den aktuelle bygning er udført med solafskærmende glas og endvidere forsynet med solafskærmning samt lysstyring efter lysniveauet i rummet, og varmebelastningen hidrørende fra solen samt belysningen er ikke stor ift. rummets størrelse. Derfor er kølebehovet om sommeren ikke stort sammenlignet med en tilsvarende bygning uden disse styringer, og således vil det øgede setpunkt for rumtemperaturen efter ACA medføre et højere energiforbrug til opvarmning som det også fremgår af figur 11.8 samt tabel 11.5. Det øgede energiforbrug til køling kan forklares via figur 11.6. Her ses det, at det faste setpunkt for køling efter DS/EN ISO 7730 [2006] generelt ligger højere end setpunktet efter ACA. Kun i enkelte tilfælde er det faste setpunkt lavere end ACA-setpunktet. Dette vil medføre et større kølebehov ved styring efter ACA ift. styring efter de faste setpunkter. En styring efter ACA vil således i dette tilfælde føre

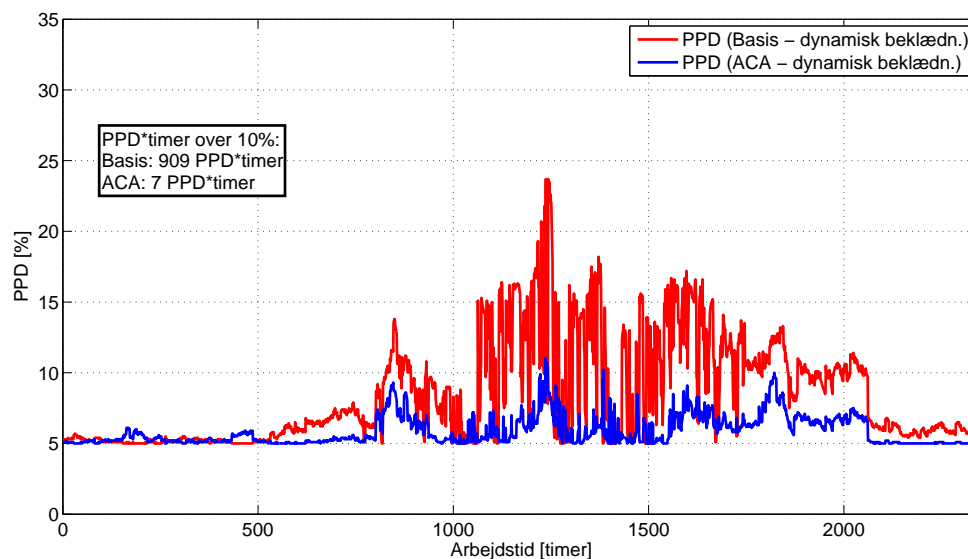
til et øget energiforbrug.

11.4.2 TERMISK INDEKLIMA

På trods af det øgede energiforbrug ved styring efter ACA i dette scenario, undersøges indvirkningen på det termiske indeklima også her. Følgende figur 11.9(a) og (b) viser hhv. det forventede antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) i arbejdstiden, og fordelingen heraf.



(a) Beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006] (0,5/1,0 clo for sommer/vinter)



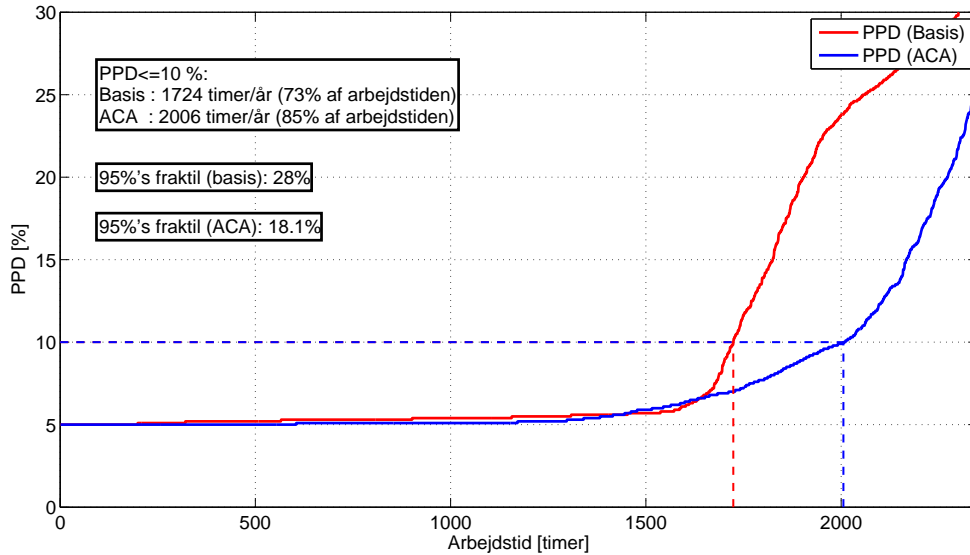
(b) Beklædningsisolans efter Haldi og Robinson [2008](formel (4.30))

Figur 11.9: Forventet antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) beregnet med beklædningsisolans efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](a) og Haldi og Robinson [2008](b). Beregningsforudsætninger for begge figurer: $M = 1,2 \text{ met}$, $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

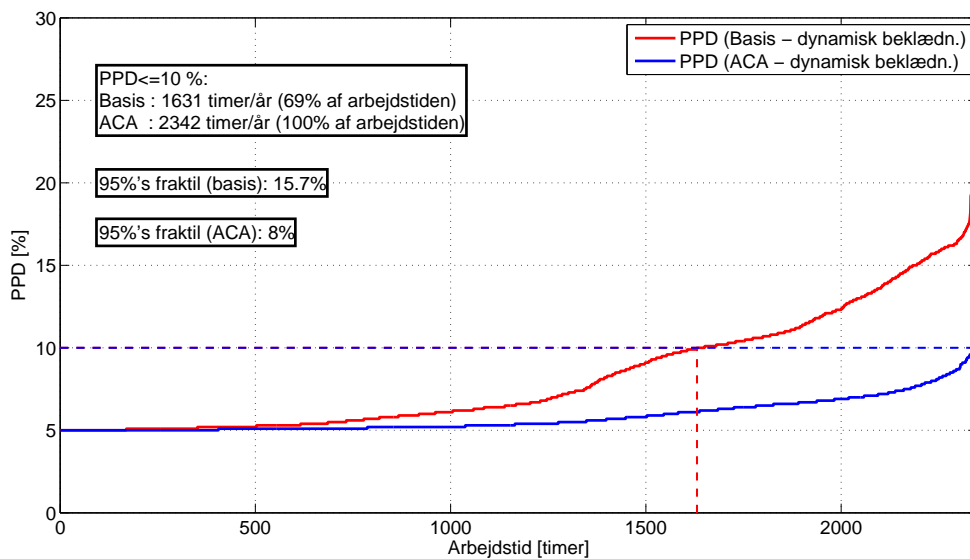
Som det også var tilfældet i scenario 1, er det forventede antal utilfredse ved styring efter ACA noget mindre ift. styring efter faste setpunkter. For tilfældet hvor beklædningsisolansen bestemmes efter DS/EN ISO 7730 [2006](figur (a)), er antallet af PPD-timer over 10% ved styring efter ACA kun ca. 1/3 ift. de faste setpunkter. Antallet af PPD-timer bør som nævnt ovenfor maksimalt være 150, og det fremgår således, at dette langt fra overholdt. Ved beregning af beklædningsisolansen efter ligning

(4.30) er antallet af PPD-timer reduceret væsentligt. Som ved scenario 1 ses det, at indflydelsen fra fastsættelsen af beklædningsisolansen er stor.

Følgende figur 11.10 viser fordelingerne af det forventede antal utilfredse for de simulerede tilfælde.



(a) Beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006] (0,5/1,0 clo for sommer/vinter)



(b) Beklædningsisolans efter Haldi og Robinson [2008](formel (4.30))

Figur 11.10: Fordelinger af forventet antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) beregnet med beklædningsisolans efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](a) og Haldi og Robinson [2008](b). Beregningsforudsætninger for begge figurer: $M = 1,2 \text{ met}$, $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

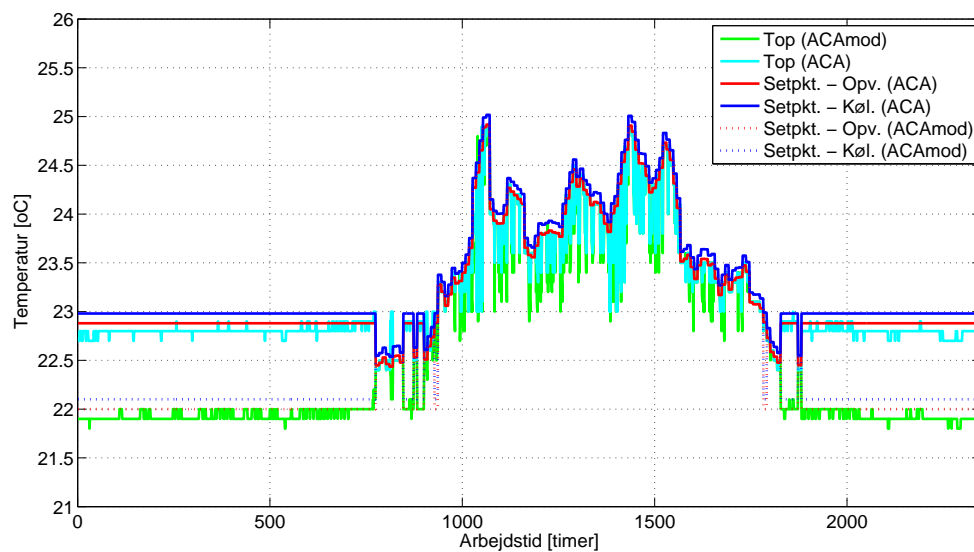
Også her ses den tydelige forskel i det forventede antal utilfredse ved de to simuleringer. Det fremgår tydeligt, at det forventede antal utilfredse ved styring efter faste setpunkter er højere ift. styring efter

ACA.

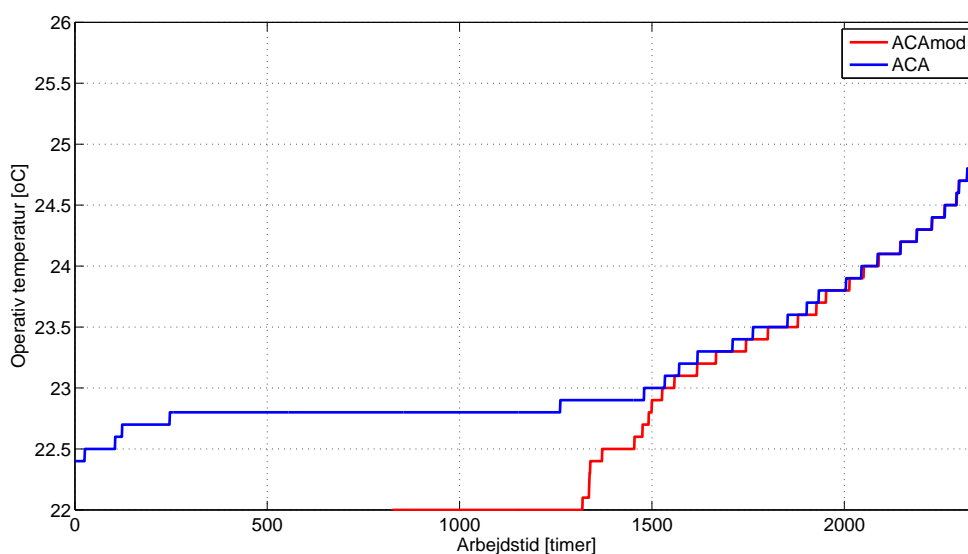
11.5 RESULTATER - SCENARIO 3

I dette tredje scenario er den adaptive kontrolalgoritme modificeret således at den nedre grænse ændres til 22° fremfor 22,88°C. I andet scenario blev det vist, at sammenlignet med konventionelle faste setpunkter for opvarmning og køling på hhv. 22 og 24,5°C medførte styring efter ACA et forventeligt øget energiforbrug til opvarmning som følge af det højere setpunkt for opvarmning på 22,88°C. I scenario 3 undersøges energiforbruget til opvarmning ved en modificeret kontrolalgoritme.

Figur 11.11 og 11.12 viser hhv. de simulerede operative temperaturer og fordelingerne heraf.



Figur 11.11: Operativ indetemperatur samt setpunkt for opvarmning og køling ved styring efter hhv. ACA og modificeret ACA (ACAmod).



Figur 11.12: Fordelinger af den operative indetemperatur ved styring efter hhv. ACA og modificeret ACA (ACAmod).

Af figur 11.11 fremgår den lavere operative indetemperatur for $T_{rm} \leq 10^{\circ}C$ ved den modificerede kontrolalgoritme ift. den konventionelle ACA. Endvidere ses det, at den operative indetemperatur for den modificerede algoritme også er lavere i enkelte tilfælde i den varme periode hvor $T_{rm} > 10^{\circ}C$. Årsagen til dette er, at udenfor ventilationsanlæggets driftstid, kører varmeanlægget efter et setpunkt svarende til den nedre grænse for den benyttede kontrolalgoritme. Således vil temperaturniveauet i bygningen udenfor driftstiden være lavere ved den modificerede kontrolalgoritme ift. den konventionelle ACA, og varmeakkumuleringen i bygningens tunge konstruktioner medfører lavere operative indetemperatureer i arbejdstiden.

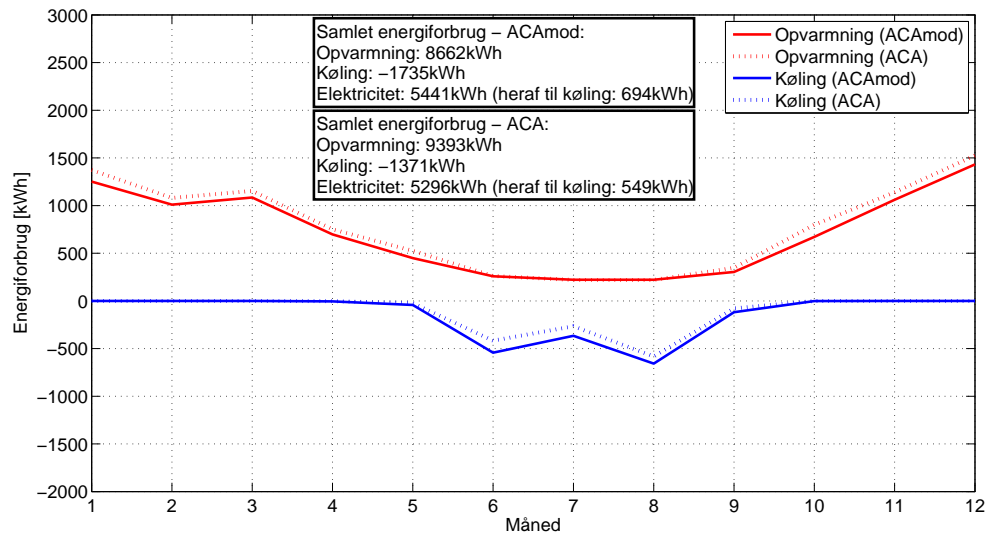
Den maksimale tidslige variation af den operative indetemperatur er vist i følgende tabel 11.6.

Tabel 11.6: Tidslig variation af operativ indetemperatur.

Maksimal variation pr. time	
	$[\frac{^{\circ}C}{time}]$
ACA	1,9
ACAmod	1,9

11.5.1 ENERGI

Følgende figur 11.13 viser det simulerede energiforbrug ved hhv. konventionel og modificeret ACA (i det følgende benævnt 'ACAmod'), og efterfølgende tabel 11.7 viser de opnåede energibesparelser.



Figur 11.13: Energiforbrug ved styring efter konventionel ACA sammenlignet med en modificeret algoritme.

Tabel 11.7: Energiforbrug ved styring efter hhv. konventionel og modificeret ACA.

	ACA [kWh]	ACAmod [kWh]	Energibesparelse [kWh]
Opvarmning	9393	8662	731
Køling	1371	1735	-364
Elektricitet til køling ^{a)}	549	694	-145

a) COP for køleanlægget skønsmæssigt fastsat til 2,5

Som hhv. figur 11.13 og tabel 11.7 viser, er der sparet 731kWh på opvarmningen ved styring efter den modificerede kontrolalgoritme ift. den konventionelle svarende til en besparelse på 7,8%.

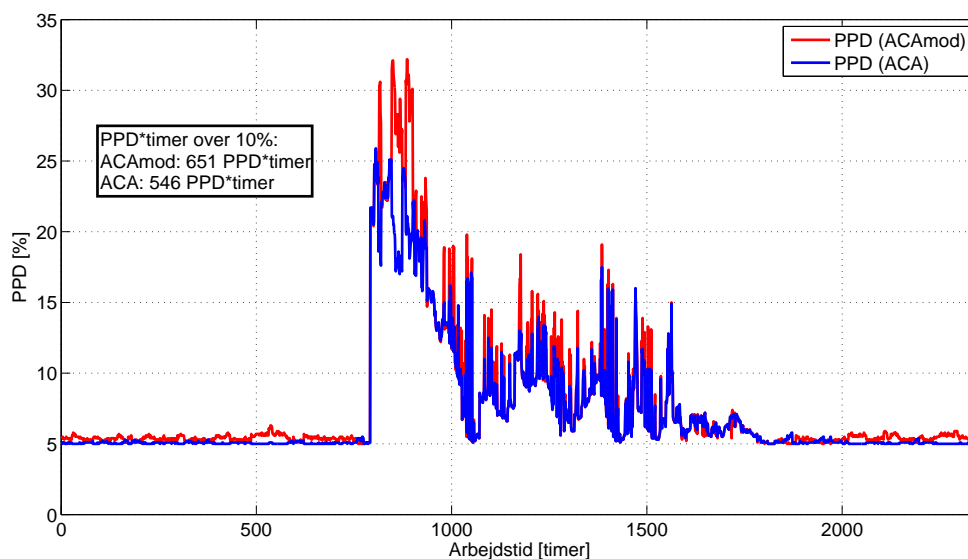
Som det også fremgår er kølebehovet forøget væsentligt med næsten 27%. Idet setpunkterne for køling i algoritmerne er identiske for $T_{rm} \leq 10^{\circ}C$, må forklaringen ligge i overgangsperioderne, hvor setpunktet fluktuerer¹⁰. Her vil styringen efter den modificerede algoritme (og for den sags skyld også efter den konventionelle algoritme) først medføre en opvarmning samt efterfølgende køling, og da da den nedre grænse i kontrolalgoritmen er ændret til 22°C, vil dette medføre et større kølebehov i de nævnte perioder.

11.5.2 TERMISK INDEKLIMA

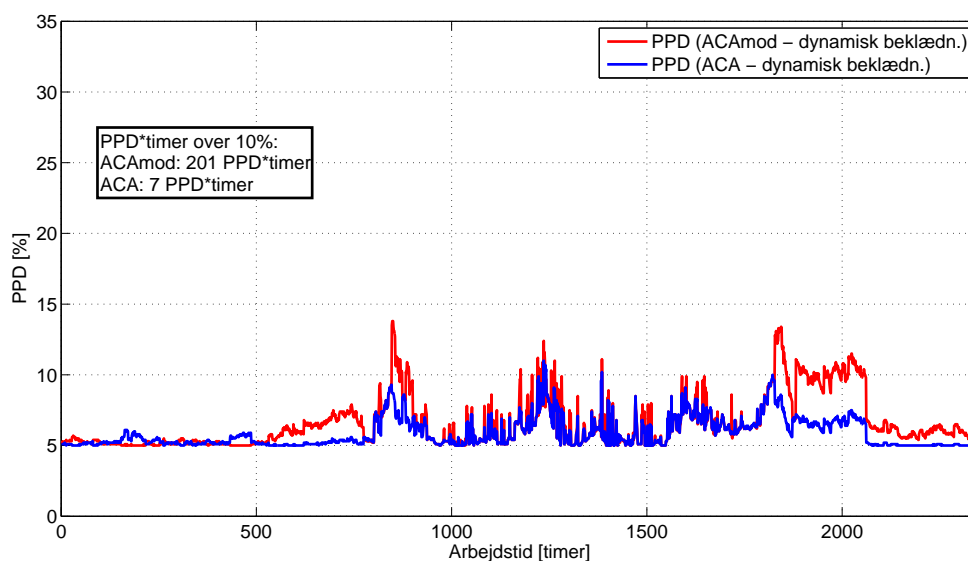
Som ved de to foregående scenarier, undersøges det forventede antal utilfredse ved styring efter den modificerede algoritme. Følgende figur 11.14(a) og (b) viser hhv. beregnede PPD-værdier i arbejd-

¹⁰ca. time 750-900 og 1750-1850 i figur 11.11

stiden samt fordelingerne heraf for de to tilfælde.



(a) Beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006] (0,5/1,0 clo for sommer/vinter)



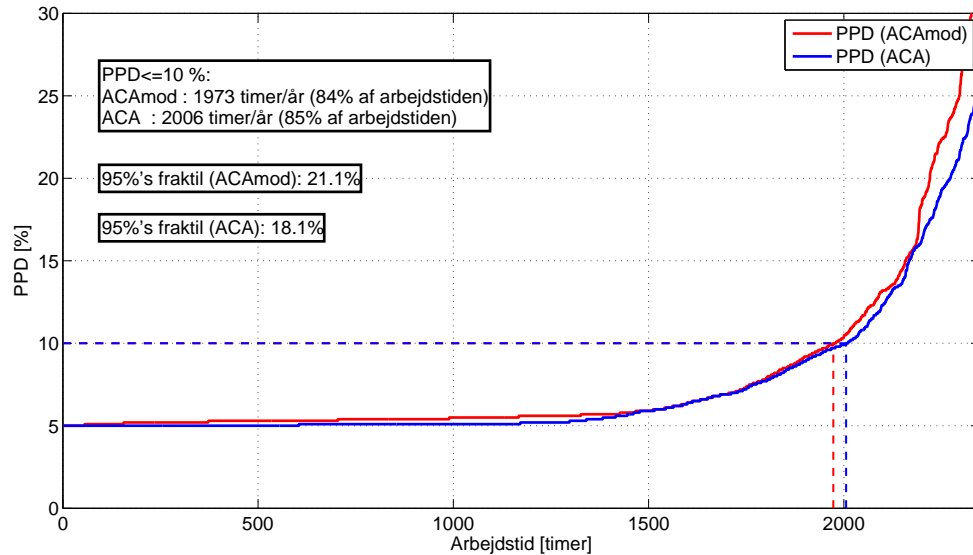
(b) Beklædningsisolans efter Haldi og Robinson [2008](formel (4.30))

Figur 11.14: Forventet antal utilfredse med det termiske indeklima (PPD) beregnet med beklædningsisolans efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](a) og Haldi og Robinson [2008](b). Beregningsforudsætninger for begge figurer: $M = 1,2 \text{ met}$, $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

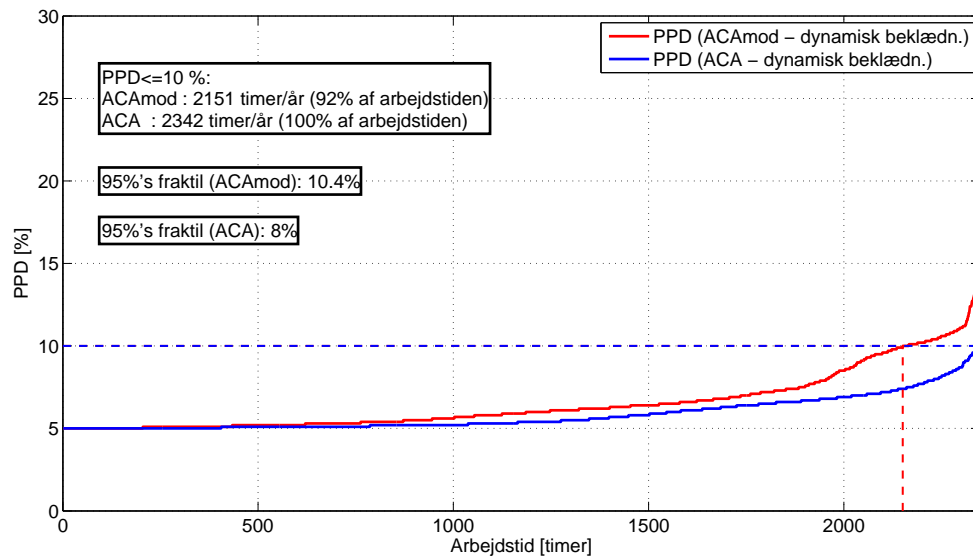
Af figur 11.14 ses det, at den modificerede algoritme medfører et højere forventet antal utilfredse. Dette forekommer dels i den førnævnte periode, hvor setpunkterne fluktuerer i overgangsperioden mellem lav og høj udelufttemperatur ($T_{rm} \leq 10^\circ\text{C}$), men også i den varme periode. Som beskrevet ifm. figur 11.11, er opvarmningen udenfor ventilationsanlæggets driftstid styret efter et setpunkt svar-

ende til den nedre grænse i den benyttede algoritme. For den modificerede algoritme er denne grænse 22°C ift. den konventionelle algoritme hvor grænsen er $22,88^{\circ}\text{C}$. Det lavere temperaturniveau om morgenen ved starten af arbejdstiden kombineret med bygningens varmeakkumulering, vil medføre de lavere operative indetemperaturer.

Følgende figur 11.15 viser fordelingerne af det forventede antal utilfredse for de simulerede tilfælde.



(a) Beklædningsisolans efter DS/EN ISO 7730 [2006] (0,5/1,0 clo for sommer/vinter)



(b) Beklædningsisolans efter Haldi og Robinson [2008](formel (4.30))

Figur 11.15: Fordelinger af forventet antal utilfredse med det termiske indeklime (PPD) beregnet med beklædningsisolans efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006](a) og Haldi og Robinson [2008](b). Beregningsforudsætninger for begge figurer: $M = 1,2 \text{ met}$, $v_a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Også her fremgår det generelt højere antal utilfredse ved styring efter den modificerede algoritme. Dog er forskellen mellem disse ikke så stor, som det var tilfældet ved de andre scenarier.

11.6 KONKLUSION - ADAPTIV KONTROLALGORITME

I de tre ovenstående scenarier er den adaptive kontrolalgoritme sammenlignet med alternative styringer af setpunktet for opvarmning og køling. Formålet med kontrolalgoritmen er som jf.

Nicol og McCartney [2001] og McCartney og Nicol [2002] at styre setpunktet for rumtemperaturen som funktion af den løbende middeludetemperatur efter formel (9.20). Ved stigende udelufttemperaturer vil setpunktet blive øget med et reduceret køleenergiforbrug til følge. Nedenstående tabel 11.8 viser en opsummering af de simulerede energiforbrug i de tre scenarier.

Tabel 11.8: *Opsummering af energiforbrug for de tre scenarier.*

Scenario nr.	Opvarmning [kWh]	Køling [kWh]	Elektricitet til køling ^{a)} [kWh]
1 Fast setpunkt for opv./køl. på 22,88/22,98°C	9447	1484	593
2 Fast setpunkt for opv./køl. på 22/24,5°C efter DS/EN ISO 7730 [2006]	8289	343	137
3 Adaptiv kontrolalgoritme (ACA)	9393	1371	549
3 Modificeret kontrolalgoritme (ACAmo)	8662	1735	694

a) COP for køleanlægget skønsmæssigt fastsat til 2,5

Som tabel 11.8 viser, forekom der kun en egentlig energibesparelse i scenario 1, hvor der blev sammenlignet med et fast setpunkt for opvarmning og køling på hhv. 22,88 og 22,98°C. Her blev elenergien til kølekompressoren reduceret med ca. 7% ift. styring efter et fast setpunkt for køling på ca. 23°C. Ved sammenligningen mellem en styring efter det anbefalede interval for den operative indetemperatur angivet i DS/EN ISO 7730 [2006, Appendiks A] og en styring efter den adaptive kontrolalgoritme i den aktuelle bygning medføre et øget energiforbrug for såvel opvarmning(13%) som køling(300%). Den benyttede bygning er, som før nævnt, udført med energibesparende tiltag i form af solafskærmende vinduer, aktiv solafskærmning i form af udvendige screens samt kontinueret lysstyring af almenbelysningen efter lysniveauet i rummet. Kombineret med en forholdsvis lav vinduesprocent¹¹ på 27,6% samt en begrænset intern varmebelastning fra udstyr og personer, vil det operative temperaturniveau sjældent være højt - heller ikke i de varme perioder. Derfor vil en styring efter den adaptive kontrolalgoritme medføre et øget energiforbrug til opvarmning i de varme perioder, hvor setpunktet herfor, ift. de andre scenarier, øges. Endvidere forekom der, som før

¹¹ $\frac{\text{Vinduesareal}}{\text{Bruttoetageareal}} = \frac{35,9}{130} = 27,6\%$

nævnt, ikke høje udelufttemperaturer i den simulerede periode¹², og kølebehovet er således mindre ift. simuleringer med klimadata fra en varmere periode. Dette vil sandsynligvis medføre en øget energibesparelse ift. køling for scenario 1, men højst sandsynligt ikke for andet scenario. Ved et kig på figur 11.6, hvor de faste setpunkter efter DS/EN ISO 7730 [2006] samt for ACA er plottet, overskrider ACA-setpunkterne sjældent kølesetpunktet efter DS/EN ISO 7730 [2006] på 24,5°C. Derfor må det forventes, at styringer efter et kølesetpunkt på 24,5°C resulterer i et lavere energiforbrug til køling sammenlignet med styring efter ACA.

Den modificerede kontrolalgoritme, hvor den nedre grænse for setpunktet blev nedjusteret fra 22,88 til 22°, gav en lille ændring i energiforbruget til opvarmning (ca. 8%). Derimod blev energiforbruget til køling kraftigt forøget. Årsagen hertil er sandsynligvis de fluktuerende setpunkter for opvarmning og køling ved overgangen mellem koldere og varmere udeklima. Her vil styringen medføre en skiftende opvarmning og efterfølgende køling af bygningen, med et forøget opvarmnings¹³- og kølebehov til følge.

Indflydelsen fra bygningens varmeakkumulerende evne bør også kommenteres. Idet den udvalgte bygning hovedsageligt består af tunge betonkonstruktioner med stor termisk masse, vil svingningerne i den operative indetemperatur blive udjævnet. Endvidere er der mulighed for natkøling af bygningen, hvilket også medfører lavere operative indetemperaturer og dermed kølebehov. Sammen med de ovennævnte reduktioner af sol- og intern varmebelastning er kølebehovet i den valgte bygning mere eller mindre minimeret. I en bygning bestående af hovedsageligt lette konstruktioner, samt uden natkøling, solafskærmning mv., vil det operative temperaturniveau være højere, og energibesparelser til køling ved implementering af ACA vil med stor sandsynlighed være større her. Dog er det ikke sandsynligt, at energiforbruget ved styring efter ACA vil være mindre end en styring efter grænserne angivet i DS/EN ISO 7730 [2006].

Af det ovenstående ses det således, at en implementering af den adaptive kontrolalgoritme kun vil medføre energibesparelser såfremt bygningen er styret efter et fast setpunkt for opvarmning og køling på ca. 23°C (scenario 1). Energimæssigt vil det, i nærværende tilfælde, være mest fordelagtigt at styre efter et setpunkt for opvarmning på 22°C og køling på 24,5°C. Der er, jf. ovenstående afsnit 11.1, foretaget en modificering af den opstillede BSim-model af tekniske grunde. Her er systemet for ventilation ændret fra løbende behovsregulering af luftmængderne (VAV) til konstant (og maksimal) luftmængde (CAV). Dette har naturligvis indflydelse på de simulerede energiforbrug, men forholdsmæssigt, må de procentvise energibesparelser mellem de forskellige styringer være nogenlunde ens.

Sammen med undersøgelserne af de potentielle energibesparelser, blev det forventede antal utilfredse med det termiske indeklima efter DS/EN ISO 7730 [2006] også undersøgt. Følgende tabeller viser en opsummering af resultaterne herfra. Første tabel 11.9 viser beregninger af komfortindekset, PPD, hvor beklædningsisolansen er bestemt efter DS/EN ISO 7730 [2006] (sommer/vinter = 0,5/1,0 clo), og efterfølgende tabel 11.10 viser selvsamme med bestemmelse af beklædningsisolansen efter ligning (4.30).

¹²7/5 2007 - 6/5 2008

¹³Fremgår ikke direkte af det totale forbrug til opvarmning, idet besparelserne i de kolde perioder er store. Det samlede opvarmningsbehov er derfor mindre ved den modificerede kontrolalgoritme.

Tabel 11.9: Opsummering af evaluering af det termiske indeklima efter DS/EN ISO 7730 [2006] for de tre scenarier.

Scenario nr.	$PPD \leq 10\%$ [timer/år]/[% af arb.tid]	PPD-timer over $PPD=10\%$ [PPD-timer]	95% fraktil [%]
1 Fast setpunkt for opv./køl. på 22,88/22,98°C	1575 / 67	1279	18,6
2 Fast setpunkt for opv./køl. på 22/24,5°C efter DS/EN ISO 7730 [2006]	1724 / 73	1431	28,0
3 Adaptiv kontrolalgoritme (ACA)	2006 / 85	546	18,1
3 Modificeret kontrolalgoritme (ACAmod)	1973 / 84	651	21,1

Tabel 11.10: Opsummering af evaluering af det termiske indeklima efter DS/EN ISO 7730 [2006] for de tre scenarier, hvor beregningen af beklædningsisolansen er foretaget efter ligning (4.30).

Scenario nr.	$PPD \leq 10\%$ [timer/år]/[% af arb.tid]	PPD-timer over $PPD=10\%$ [PPD-timer]	95% fraktil [%]
1 Fast setpunkt for opv./køl. på 22,88/22,98°C	2158 / 92	189	10,4
2 Fast setpunkt for opv./køl. på 22/24,5°C efter DS/EN ISO 7730 [2006]	1724 / 73	909	15,7
3 Adaptiv kontrolalgoritme (ACA)	2342 / 100	7	8,0
3 Modificeret kontrolalgoritme (ACAmod)	2151 / 92	201	10,4

Ved evaluering af det termiske indeklima ved brug af PPD-indekset, viste styringen efter den adaptive kontrolalgoritme et meget lavere forventet antal utilfredse med det termiske miljø i alle de tre scenarier. Dette blev til dels også fundet ved undersøgelserne foretaget af McCartney og Nicol [2002]. Her var der generelt en større tilfredshed med det termiske indeklima efter installeringen af ACA ift. undersøgelserne foretaget umiddelbart inden implementeringen. På trods af det lave niveau for de operative indetemperaturer, ses det af tabellerne, at såfremt der evalueres iht. et maksimalt antal PPD-timer på 150¹⁴ er det termiske indeklima kun acceptabelt ved styring efter ACA, og ved beregning af beklædningsisolansen efter ligning (4.30). Endvidere ses det ved sammenligning af tabel 11.9 og 11.10, at indflydelsen fra beregningen af beklædningsisolansen har stor indflydelse på vurderingen af det termiske indeklima. F.eks. ses det ved styring efter ACA er antallet af PPD-timer over 10% hhv. 546 og 7 PPD-timer ved beregning af beklædningsisolansen efter hhv. DS/EN ISO 7730 [2006] og ligning (4.30).

¹⁴Ifølge van der Linden et al. [2002]. Yderligere beskrevet i afsnit 2.5

Den samlede konklusion på det ovenstående er, at en implementering af den adaptive kontrolalgoritme i den udvalgte bygning kun vil medføre energibesparelser såfremt denne bygning normalt styres efter et fast setpunkt for opvarmning og køling på hhv. 22,88 og 22,98°C. Sammenlignet med et setpunkt for opvarmningen på 22°C og kølingen på 24,5°C iht. anbefalingerne i DS/EN ISO 7730 [2006] vil dette kun forøge energiforbruget til såvel opvarmning som køling væsentligt. Idet formålet med en eventuel implementering af den adaptive kontrolalgoritme er at reducere energiforbruget uden en egentlig ofring af det termiske indeklime, må det således konkluderes at dette ikke er opfyldt mht. energibesparelserne. McCartney og Nicol [2002] fandt en energibesparelse på ca. 30% ift. styring efter et fast setpunkt i en bygning i England, hvilket langt fra er tilfældet i nærværende undersøgelse. Analyser af det forventede antal utilfredse med det termiske indeklime viste imidlertid et forbedret indeklime ved styring efter den adaptive kontrolalgoritme.

Følsomheds- og usikkerheds- analyse 12

I det følgende afsnit foretages en følsomhedsanalyse med Morris-metoden samt en usikkerhedsanalyse med Monte Carlo på BSim-modellen af Københavns Energi og Eco-factor-værktøjet. Følsomhedsanalysen anvendes til at identificere de parametre, der har størst indflydelse på modellens output. Usikkerhedsanalysen bruges til at bestemme modellens samlede usikkerhed udfra den givne parametervariation. Det er her valgt at benytte en randomiseret stikprøveplan i usikkerhedsanalysen.

12.1 INDLEDNING

Der er i det følgende foretaget en følsomheds- og usikkerhedsanalyse på en termisk bygningssimulering af Københavns Energi samt på Eco-factor-værktøjet. Modellen for bygningen er opstillet i TBS-programmet BSim ([BSim vejledning, 2005]) og er beskrevet yderligere i appendiks F. Outputfilerne fra BSim-modellen er efterfølgende anvendt som input i excel-regnearket *Eco-factor.08.xls*, hvor der ligeledes er foretaget en følsomheds- og usikkerhedsanalyse af enkelte parametre i arket. Herefter er der som resultat anvendt forskellige indikatorer til beskrivelse og vurdering af bygningens ydeevne - f.eks. energiforbrug, termisk indeklima (PPD-timer, timer over 26°C), total Eco-factor, etc. Resultaterne fra Eco-factoren er efterfølgende evalueret i Simlab (Simlab [2007]), hvori selve følsomheds- og usikkerhedsanalysen foretages.

12.2 PARAMETERANALYSE

I det følgende gennemgås parameterværdierne og deres variationsområde, som anvendes til hhv. følsomheds- og usikkerhedsanalyse af modellen i BSim og det udvidede Eco-factor-værktøj. De indgående parametre til analysen er fundet udfra egen vurdering af hvilke der vil have en betydning for modellen - både med hensyn til energiforbrug samt atmosfærisk og termisk indeklima. Parametrenes variansområde (maksimum/minimum, middelværdi og standardafvigelse) og fordelingsfunktion (normalfordeling, log-normalfordeling eller ligefordelt) er vurderet på baggrund af et grundigt litteraturstudie¹, byggeprogrammet, indeklimarapport (Larsen et al. [2006]) samt udfra egne erfaringer og skøn.

Der er foretaget en analyse af de vigtigste parameter for en bygnings ydeevne (energi og indeklima). Resultatet af parameteranalysen er vist i den nedenstående tabel 12.1 for Københavns Energi - det har dog ikke været muligt at vælge alle ”interessante” parametre til analysen, da koblingen

¹Macdonald [2002], BSim vejledning [2005]

mellem Matlab og BSim ikke er fuldt udviklet endnu. En yderligere og mere detaljeret beskrivelse og grafisk fremstilling af de nedenstående parameter og deres variationsområde, middelværdi, standardafvigelse og fordelingsfunktion kan ses i appendiks K. Endvidere er der foretaget en beskrivelse af de forskellige fordelingsfunktioner der benyttes, denne kan ses i appendiks J.

Tabel 12.1: Parametre og variationsområde der ønskes undersøgt i en følsomheds- og usikkerhedsanalyse for Københavns Energi (naturligt ventileret)

Parameter Nr.	Navn	Enhed	Variationsområde				Fordeling	Forklaring
			Maks.	Min.	Middel	Stdafv.		
BSim-parameter								
<i>Materialeegenskaber</i>								
1	U-værdi for væg	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	0,2375	0,1425	0,19	0,019	Normalfordelt	U-værdien kan være forringet op imod 50%, det er her dog kun ønsket at undersøge en 25% forringelse [Holck og Rode, 2004]
2	U-værdi for ruden	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	1,4	0,9	1,1	0,2	Normalfordelt	U-værdien for den nuværende rude i bygningen (middelværdien) er oplyst af KE og WindowMaster. Variationsområdet beskriver andre "normale" u-værdier for en rude.
3	g-værdi for ruden	-	0,6	0,3	0,4	0,1	Normalfordelt	g-værdien for den nuværende rude i bygningen (middelværdien) er oplyst af KE og WindowMaster. Variationsområdet beskriver andre "normale" g-værdier for en rude.
<i>Bygningssegenskaber</i>								
4	Bygningsorientering	°	180	360	-	-	Ligefordelt	Ønsket at undersøge orienteringens indflydelse på bygningens ydeevne.
<i>Personer</i>								
5	Antal personer i bygn.	Antal	40	25	35	4	Normalfordelt	Middelværdi og standardafvigelse er beregnet ud fra indeklimarapportens registreringer [Larsen et al., 2006]. Maksimum og minimum er vurderet ud fra indretningsplaner og KE.
<i>Udstyr</i>								
6	Varmeafgivelse	kW	4,94	3,2	4,36	0,76	Normalfordelt	Antallet af tændte computere er proportional med antallet af personer i rummet. Antallet af printere er vurderet ud fra indretningsplaner og information fra KE. Varmeafgivelsen fra computere og printere er bestemt ud fra Andersen et al. [2002].
7	Andel til luften	-	0,8	0,6	-	-	Ligefordelt	Varierende fra 60% til 80% med lige stor sandsynlighed for at forekomme. [Macdonald, 2002, s. 110]
<i>Infiltration</i>								
8	Luftskifte	h^{-1}	0,5	0,03	0,2	0,1	Normalfordelt	Middelværdi vurderet til $0,2 h^{-1}$ ud fra indeklimarapport (Larsen et al. [2006]). Standardafvigelse fastsat til 50% af middelværdien og maksimum til 2,5 gange middelværdien [Macdonald, 2002, s. 111]
<i>Ventilation</i>								
9	Luftskifte	h^{-1}	5,18	0,79	3,71	0,37	Normalfordelt	Maksimum, minimum, middel og spredningen er vurderet ud fra WindowMaster's beregninger og de i indeklimarapportens målte CO ₂ -koncentrationer i bygningen. [Larsen et al., 2006]
Eco-factor parameter								
<i>Adfærdafhængige</i>								
10	Clo, vinter	clo	1,1	0,9	1,0	0,05	Normalfordelt	
11	Clo, forår	clo	1,0	0,8	0,9	0,05	Normalfordelt	
12	Clo, sommer	clo	0,65	0,45	0,55	0,05	Normalfordelt	Beklædningsisolansens variationsområde er vurderet ud fra normalt kontorarbejde og de i DS/EN ISO 7730 [2006] samt DS/EN/ISO 9920 [2007] angivet værdier
13	Clo, efterår	clo	1,0	0,8	0,9	0,05	Normalfordelt	
14	Aktivitetsniveau	met	1,3	1,1	1,2	0,05	Normalfordelt	Normalt kontorarbejde ligger på 1,2 met, men det er ligeledes ønsket at vurdere et højere og lavere aktivitetsniveau da folk også vil være gående (1,3 met) og mere afslappet (1,1 met). Værdierne er desuden vurderet ud fra DS/EN ISO 7730 [2006]
<i>Lufthastighed</i>								
15	Middel luft-hastighed	m/s	0,3	0,12	0,15	0,05	Normalfordelt	Middelværdien er lufthastigheden i en "normal" bygning. Af [Larsen et al., 2006] er det fundet ved spørgeskemaundersøgelse at personer i bygning er generet af træk. Det må derfor vurderes at middel lufthastigheden i bygningen vil være noget højere i visse perioder af året.
<i>Adaptivitet</i>								
16	Forventningsfaktoren	-	1,0	0,8	0,9	0,05	Normalfordelt	Middelværdien er vurderet til 0,9 for en naturligt ventileret bygning beliggende i København med korte varme perioder. I Danmark vil en minimum værdi på 0,8 højest sandsynligt være den lavest mulige.

12.3 FØLSOMHEDSANALYSE (SCREENING)

Som følsomhedsanalyse er der foretaget en screeninganalyse, ved brug af Morris-metoden, til at identificere modellens vigtigste parametre (yderligere beskrevet i appendiks I). Analysens resultater vil således give en rangorden af de mest indflydelsesrige parametre på BSim-modellens og Eco-factorværktøjets output - f.eks. det samlede energiforbrug, antal timer over 26°C, antal PPD-timer over en 10% acceptgrænse, Total-Eco-factor etc.

Som beskrevet i appendiks I kan der vælges forskellige beregningsegenskaber ved Morris-metoden. Det er her valgt at benytte $r = 10$ og $p = 4$ - dvs. hver parameters variationsområde opdeles i fire mulige spring med en fast afstand i *p-niveau-nettet* på $\Delta = \frac{4}{2 \cdot (4-1)} = 2/3$. De fire spring i hver parameters variationsområde er valgt for at sikre en fuld dækning af variationsområdet ved det maksimalt mulige antal orienteringsmatricer, $r = 10$ (Simlab har en begrænsning på $r = 10$). Hvis det var muligt at vælge et større antal orienteringsmatricer, ville det være fordelagtigt at opdele parametrene variationsområder i mindre spring, for dermed at tage større højde for en eventuel korrelation og ulinearitet. En yderligere diskussion af størrelsen på r og p forefindes i appendiks I.

Der er genereret ti orienteringsmatricer med hver 17 parameterkombinationer ($k + 1$), hvormed analysen kræver $(k + 1) \cdot r = 170$ simuleringer i BSim og Eco-factoren. Kørslen af hver simulering er foretaget fra Matlab, hvormed det hele foregår automatisk udfra den genererede input-fil fra Simlab. En detaljeret forklaring af fremgangsmåden for beregningen er at finde på den vedlagte DVD.

I det følgende er de vigtigste parametre identificeret i forhold til forskellige resultater fra hhv. BSim-modellen og Eco-factoren. Herved undersøges det, hvilke parametre der har den største betydning for det pågældende output - energiforbruget, termisk og atmosfærisk indeklima samt Eco-factoren. Til sidst er der foretaget en opsummering og vurdering af, om det er de samme parametre der går igen, eller om der skal foretages en rangering indenfor hver kategori.

Ud fra de viste figurer bestemmes modellens vigtigste parametre. Som beskrevet i appendiks I indikerer en stor middelværdi, at parameteren er vigtig i hele dens variationsområde, hvorimod en stor standardafvigelse indikerer, at parameterens vigtighed er afhængig af den værdi parameteren antager - dvs. at parameteren er korreleret med andre parametre eller her et ulineært forløb og dermed bidrag til variationen i modellens output [Saltelli et al., 2004; Morris, 1991; Bendtsen og Sørensen, 2005].

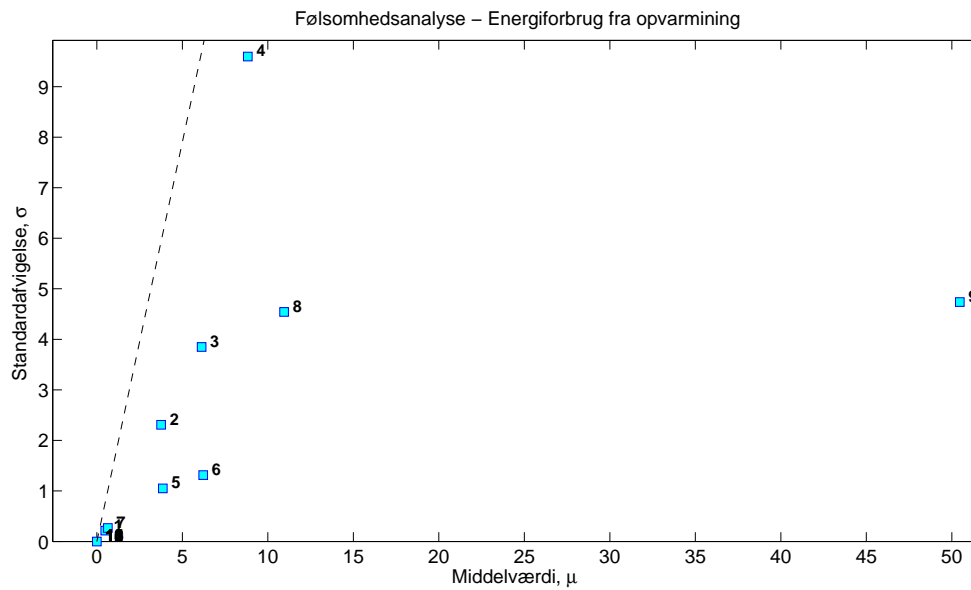
Hvis en parameter har et koordinatsæt (μ_i, σ_i) under linjen på figurerne er dette en indikation af, at parameterens middelværdi er vigtig. Er parameterens koordinater derimod over linjen, indikerer dette at parameteren er ulineær og/eller korreleret med andre parametre i dens variationsområde. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

12.3.1 ENERGIFORBRUG

Det er i det følgende undersøgt, hvilke parametre der har størst indflydelse på det samlede energiforbrug til opvarmning samt det totale forbrug for Københavns Energi.

Resultaterne er givet ved standardafvigelsen σ som funktion af den absolutte middelværdi af hver elementæreffekt μ^* .

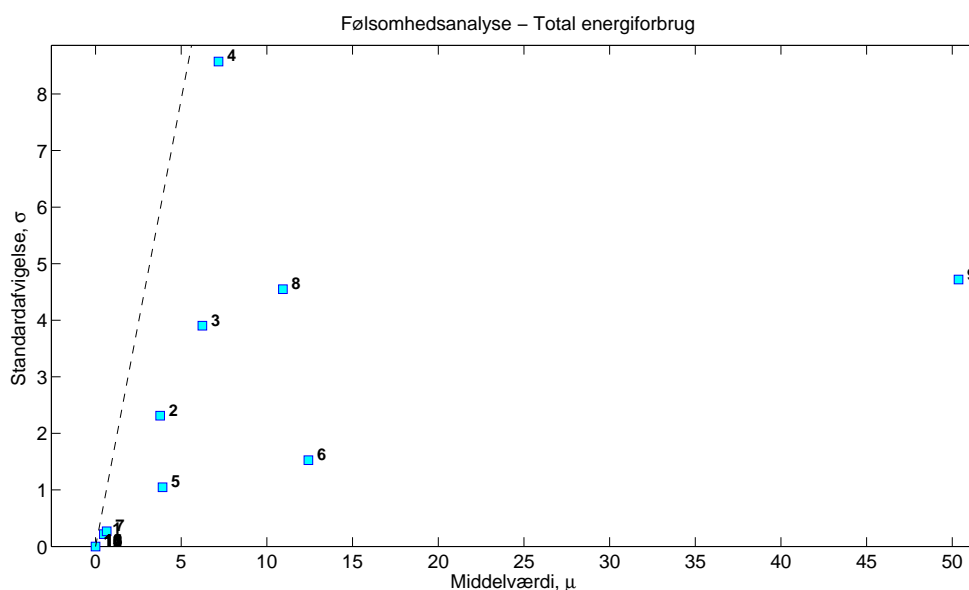
Nedenstående figur 12.1 viser de vigtigste parametre i forhold til opvarmningsbehovet i Københavns Energi.



Figur 12.1: Elementæreffekternes standardafvigelse σ som funktion af middelværdien af den absolutte værdi af hver elementæreffekt μ^* . Linjen er bestemt ved ligning (I.4) i appendiks I og angiver grænsen hvorover parametre har et korreleret og/eller ulineært forløb.

Umiddelbart ses det, at alle parametre ligger under den stiplede linje, hvilket indikerer at parametrenes middelværdi er vigtig. Endvidere ses det, at parameter nr. 9, ventilationsluftskiftet, er den mest følsomme parameter og vil have den største indflydelse på modellens samlede energiforbrug til opvarmning. Herefter er det parametrene 8, 4 og 3, hhv. infiltration, bygningens orientering og g-værdien for ruden, som ligeledes har en indflydelse på modellens usikkerhed/output. De næst mest følsomme parametre i modellen er 6, 5 og 2, varmeafgivelse fra pc'ere, antal personer i rummet og U-værdien for ruden. De resterende parametre ses at ligge nær origo, da de både har en lille middelværdi og standardafvigelse hvilket vil sige, at de kun har en lille indflydelse på modellens følsomhed.

Figur 12.2 viser de mest følsomme parametre i forhold til Københavns Energis totale energiforbrug til hhv. opvarmning og el-forbrug til lys og udstyr:



Figur 12.2: Elementæreffekternes standardafvigelse σ som funktion af middelværdien af den absolutte værdi af hver elementæreffekt μ^* . Linjen er bestemt ved ligning (I.4) i appendiks I og angiver grænsen hvorover parametre har et korreleret og/eller ulineært forløb.

Igen ses det her, at parameter nr. 9, ventilationsluftskiftet, er den mest følsomme parameter i forhold til det totale energiforbrug for bygningen. Yderligere observeres det, at parametrene 6, 8 og 4 (hhv. energiforbrug til udstyr, infiltrationen og orienteringen) ligeledes her er de næst mest følsomme parametre. De resterende parametre ses at have en forholdsvis lille eller ingen betydning for modellens output.

Nedenstående tabel opsummerer kort de mest følsomme parametre for hhv. energiforbruget til opvarmning og det totale energiforbrug for Københavns Energi. Parametrene er endvidere rangeret efter deres vigtighed for modellens output. Middelværdien prioriteres højere end standardafvigelsen ved den nedenstående rangering.

Tabel 12.2: Rangering af modellens fem mest følsomme og vigtigste parametre i forhold til energiforbruget.

Rangorden	Nr	Parameter	Opvarmning		Total	
			μ^*	σ	μ^*	σ
1	9	Ventilationsluftskifte	50,5	4,7	50,4	4,7
2	8	Infiltration	10,9	4,5	10,9	4,5
3	6	Varmeafgivelse fra udstyr	6,2	1,3	12,4	1,5
4	4	Bygningens orientering	8,8	9,6	7,2	8,6
5	3	g-værdi for ruden	6,1	3,8	6,2	3,9

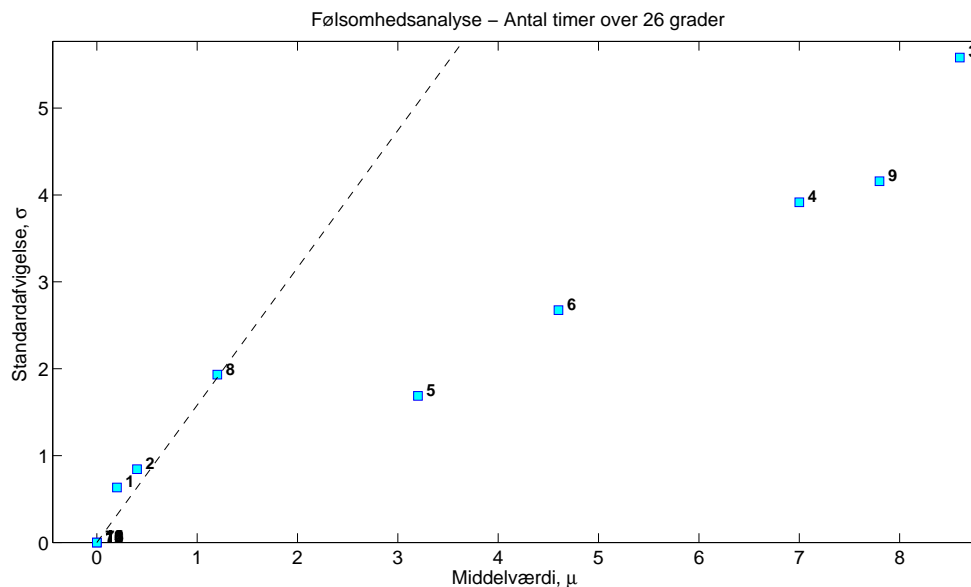
Af tabel 12.2 ses det tydeligt, at ventilationsluftskiftet i bygningen har den største betydning for

energiforbruget til hhv. opvarmning og det totale energiforbrug. At luftskiftet i bygningen har en stor indflydelse på energiforbruget til opvarmning var forventet, idet bygningen er naturlig ventileret, og al frisk luft der kommer ind gennem vinduerne skal opvarmes af varmeanlægget (beskrivelse af bygningen forefindes i appendiks F.1).

12.3.2 INDEKLIMA

I det følgende er resultaterne fra følsomhedsanalysen i forhold til det termiske indeklima præsenteret og diskuteret. Det er først vist, hvor følsomme parametrene i modellen er overfor antallet af timer over 26°C, idet denne metode ofte er anvendt i praksis ved langtidsevaluering af det termiske indeklima. Efterfølgende er det vist hvilke parametre, der er mest følsomme i forhold til antallet af PPD-timer, som er en nyere og mere informativ metode til vurdering af det termiske indeklima (yderligere beskrevet og diskuteret i afsnit 2.5).

Resultatet af følsomhedsanalysen er vist i følgende figur 12.3. Der kan herudfra foretages en vurdering af de mest følsomme parametre i modellen i forhold til antallet af timer over 26°C.



Figur 12.3: Elementæffekternes standardafvigelse σ som funktion af middelværdien af den absolute værdi af hver elementæffekt μ^* . Linjen er bestemt ved ligning (I.4) i appendiks I og angiver grænsen hvorover parametre har et korreleret og/eller ulineært forløb.

De fleste parametre ligger under eller tæt på den stiplede linje hvilket indikerer, at parametrenes middelværdi er vigtig for outputtet, og at de dermed ikke er korreleret med andre parametre eller har et ulineært forløb i variationsområdet.

Der er her flere betydende følsomme parametre i modellen. Det ses f.eks. at parametrene 3, 9, 4, 6, 5 og 8 (hhv. g-værdien, luftskiftet, bygningens orientering, varmeafgivelse fra pc'ere, antallet af personer i bygningen og infiltrationen) har i større eller mindre grad en effekt på antallet af timer over 26°C. De resterende parametre ses at ligge tæt på origo, da de har en meget lille eller ingen

middelværdi og standardafvigelse, hvorfor disse vurderes til kun at have en ringe indflydelse på modellens usikkerhed.

I nedenstående tabel 12.3 er resultaterne fra modellens vigtigste parametre i figur 12.3 opsummeret og rangeret efter deres indflydelse på modellens usikkerhed.

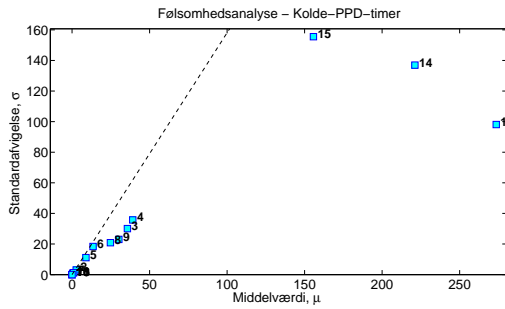
Tabel 12.3: Rangering af modellens mest følsomme og vigtigste parametre i forhold til antallet af timer over 26°C.

Rangorden	Nr	Parameter	Timer over 26°C	
			μ^*	σ
1	3	g-værdien for ruden	8,6	5,6
2	9	Ventilationsluftskiftet	7,8	4,2
3	4	Bygningens orientering	7,0	3,9
4	6	Varmeafgivelse fra pc'ere	4,6	2,7
5	5	Antal personer i bygn.	3,2	1,7
6	8	Infiltrationen	1,2	1,9

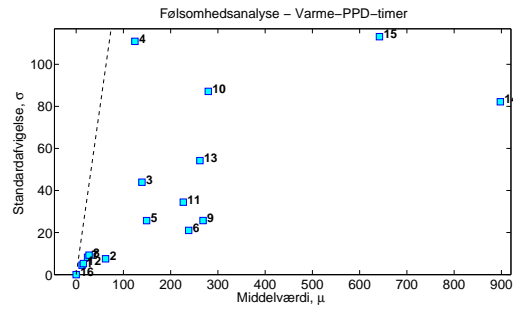
Som det tydeligt ses af tabel 12.3 og figur 12.3, er der en del parametre i modellen som alle har en forholdsvis stor indflydelse på outputtet. Det er dog svært at forudsige og kvantificere hvilken parameter der har den største indflydelse, da der både skal tages højde for middelværdien og standardafvigelsen.

Udover at undersøge den simple indikator, hvor antallet af timer over 26°C benyttes som komfortindikator for det termiske indeklima, er det interessant at undersøge den mere informative indikator, hvor antallet af PPD-timer der overstiger en acceptgrænse på 10% kvantificeres. En yderligere beskrivelse af de forskellige langsigtede vurderingsmetoder der findes fra litteraturen er diskuteret i litteraturstudiet i afsnit 2.5.

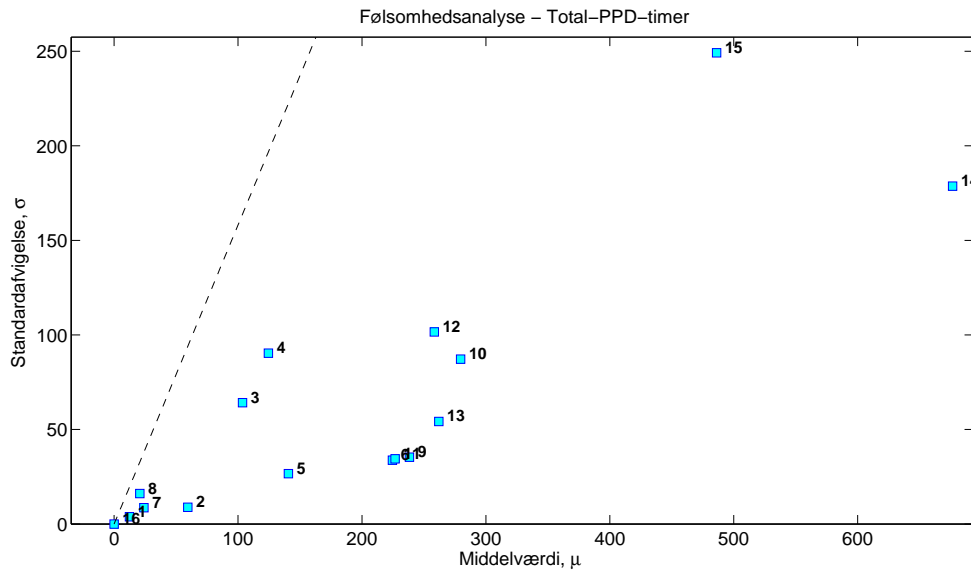
Følgende figur 12.4 angiver, hvilke parametre der er vigtige/følsomme ved evaluering af det termiske indeklima i forhold til antal PPD-timer.



(a) Følsomme parametre i forhold til de kolde PPD-timer (PMV-værdier under nul)



(b) Følsomme parametre i forhold til de varme PPD-timer (PMV-værdier over nul)



(c) Følsomme parametre i forhold til de totale PPD-timer

Figur 12.4: Elementæffektens standardafvigelse σ som funktion af middelværdien af den absolute værdi af hver elementæffekt μ^* . Linjen er bestemt ved ligning (I.4) i appendiks I og angiver grænsen hvorover parametre har et korreleret og/eller ulineært forløb.

Som det ses i ovenstående figur 12.4 ligger alle parametre under den stiplede linje hvilket indikerer, at middelværdien er vigtig og at parametrene ikke er korreleret og/eller ulineære. Det er endvidere tydeligt af figurene, at mange af de indgående parametre i modellen har en indvirkning på de ovenstående output, hvilket indikeres ved at meget få parametre ligger nede omkring origo. Der er dog en tendens til, at færre parametre har en påvirkning på de kolde PPD-timer end de varme.

Ydermere ses det, at det ikke er de samme parametre der er vigtige for modellens usikkerhed ved den foretagende analyse for hhv. kolde, varme og totale antal PPD-timer. Nedenstående tabel 12.4 opsummerer resultaterne samt rangerer de mest følsomme parametre i modellens output i forhold til hhv. kolde PPD-timer, varme PPD-timer og totale PPD-timer.

Tabel 12.4: Rangering af modellens ti mest følsomme parametre i forhold til antallet af PPD-timer over en acceptgrænse på 10%.

Kolde PPD-timer			Varme PPD-timer			Totale PPD-timer		
Nr.	μ^*	σ	Nr.	μ^*	σ	Nr.	μ^*	σ
12	273,6	98,1	14	897,7	82,2	14	676,6	178,7
14	221,1	137,0	15	641,8	113,1	15	486,2	249,2
15	155,7	155,4	10	279,6	87,1	10	279,6	87,2
4	39,1	35,7	9	268,5	25,7	13	262,0	54,2
3	35,7	30,1	13	262,0	54,2	12	258,4	101,6
9	30,2	23,0	6	238,1	21,0	9	238,3	35,3
8	24,7	20,9	11	226,8	34,5	11	226,7	34,5
6	13,5	18,4	5	149,1	25,7	6	224,6	33,7
5	9,0	11,1	3	139,3	43,9	5	140,6	26,6
2	2,7	3,0	4	124,4	110,9	4	124,5	90,4

Som det ses af tabel 12.4 adskiller de vigtige parametre sig for de kolde PPD-timer i forhold til de to andre output-værdier, hvorimod de varme og totale PPD-timer stort set har de samme parametre rangeret på de samme pladser. Det ses f.eks. for de kolde PPD-timer, at parameter nr. 12, beklædningsisolansen om sommeren, er den vigtigste parameter i forhold til modellens output. I modsætning er denne parameter slet ikke rangeret blandt de 10 mest vigtige parametre for de varme PPD-timer. Grunden til at beklædningsisolansen om sommeren har så stor indflydelse på de kolde PPD-timer skyldes højst sandsynligt, at indelufttemperaturen om sommeren har været for lav i forhold til den clo-værdi der er regnet med, hvormed personerne i bygningen vil vurdere det termiske indeklima som køligt eller direkte koldt.

Ved analysen af PPD-timer er det i alle situationer vurderet at parametrene 14 og 15, aktivitetsniveauet og middel lufthastigheden, har en stor indflydelse på modellens output. Desuden vurderes beklædningsisolansen som en vigtig parameter for hele året, når vurderingen foretages i forhold til de totale antal PPD-timer.

Ved en endelig rangordning af modellens 10 vigtigste parametre er der hovedsageligt set på, hvordan parametrene for de totale PPD-timer er rangeret. Dette er gjort med baggrund i, at personerne i bygningen vil vurdere det termiske indeklima efter det totale antal PPD-timer der overskrider acceptgrænsen. I tabel 12.5 er den endelige rangering af parametrene i forhold til den mere avanceret langsigtede indikator for det termiske indeklima, PPD-timer, vist.

Tabel 12.5: Rangordning af modellens 10 mest følsomme og vigtigste parametre i forhold til det totale antal PPD-timer over en acceptgrænse på 10% utilfredse. Parametrenes middelværdi vægtes højere end standardafvigelsen.

Rangorden	Nr	Parameter	Totale PPD-timer	
			μ^*	σ
1	14	Aktivitetsniveau	676,6	178,7
2	15	Middel lufthastighed	486,2	249,2
3	10	Beklædningsisolans, vinter	279,6	87,2
4	13	Beklædningsisolans, efterår	262,0	54,2
5	12	Beklædningsisolans, sommer	258,4	101,6
6	9	Ventilationsluftskiftet	238,3	35,3
7	11	Beklædningsisolans, forår	226,7	34,5
8	6	Varmeafgivelse fra pc'ere	224,6	33,7
9	5	Antal personer i bygn.	140,6	26,6
10	4	Bygningens orientering	124,5	90,4

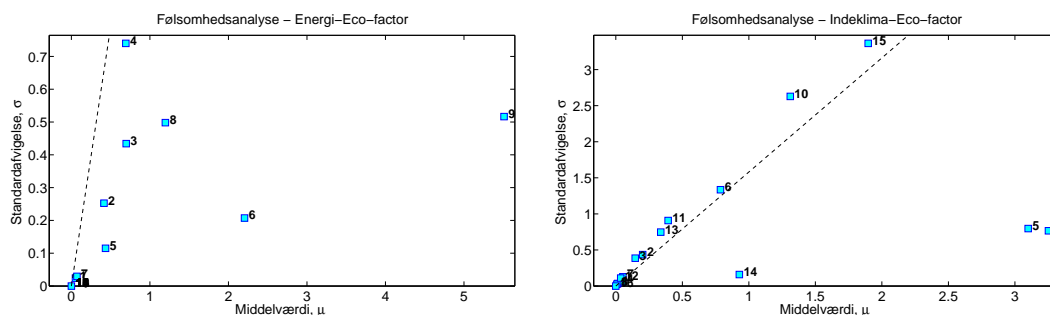
Det vurderes ud fra ovenstående tabel 12.5 og 12.4 samt figur 12.4(c), at parametre 2, 7, 8, 1 og 16 i form af U-værdi for ruden, andel til luften fra udstyret, infiltrationen, U-værdien for væggen og forventningsfaktoren, således ikke har en afgørende betydning for modellens samlede usikkerhed.

12.3.3 ECO-FACTOR

Eco-factoren bruges som et vurderingsværktøj til evaluering af bygningers samlede ydeevne med hensyn til termisk og atmosfærisk indeklime samt energiforbrug. Det er derfor interessant at se hvilke parametre i modellen, der har den størst indflydelse på hhv. Indeklima-Eco-factoren, Energi-Eco-factoren samt den totale Eco-factor. Ved at identificere de mest følsomme parametre kan der efterfølgende foretages en optimering af disse, hvormed den samlede usikkerhed mindskes.

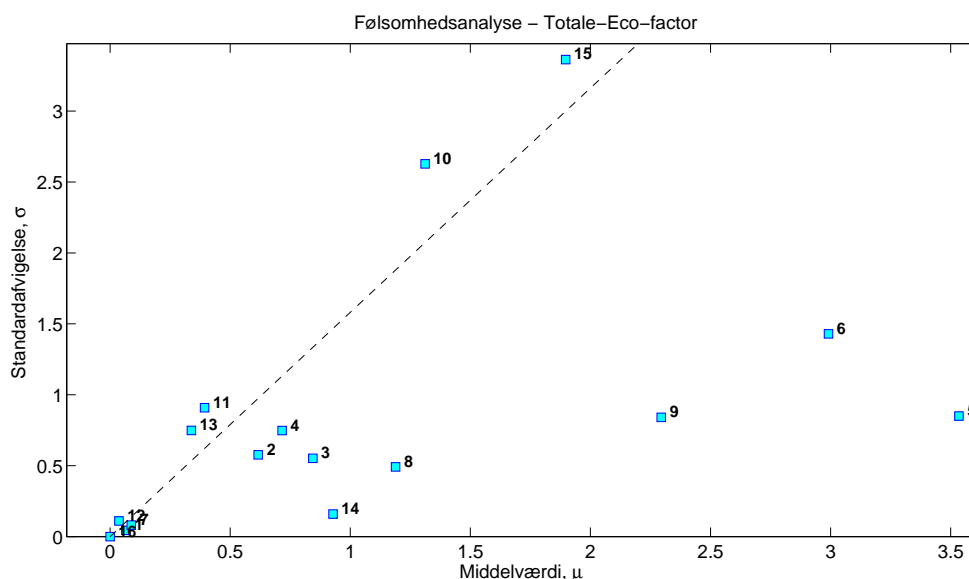
Nedenstående figurer viser resultaterne fra følsomhedsanalysen af de indgående parameter ved en vurdering i forhold til antal PPD-timer.

12.3 Følsomhedsanalyse (screening)



(a) Følsomme parametre i forhold til den samlede Energi-Eco-factor

(b) Følsomme parametre i forhold til Indeklima-Eco-factoren



(c) Følsomme parametre i forhold til den Totale-Eco-factor

Figur 12.5: Elementæreffekternes standardafvigelse σ som funktion af middelværdien af den absolutte værdi af hver elementæreffekt μ^* . Linjen er bestemt ved ligning (I.4) i appendiks I og angiver grænsen hvorover parametre har et korreleret og/eller ulineært forløb.

For Energi-Eco-factoren (figur 12.5(a)) ligger alle parametre under den stiplede linje, hvilket indikerer at middelværdien er vigtig i dens variationsområde.

Energi-Eco-factoren ses at være mest følsom over for ændringer i parameter nr. 9, ventilationsluftskiftet, og herefter parametrene 6, 8, 4, 3, 5 og 2 (hhv. energiforbruget til udstyret, infiltrationen, orientering af bygningen, g-værdi for ruden, antal personer og U-værdi for tuden). Endvidere observeres det, at de følsomme parametre her stemmer godt overens med de fundne følsomme parametre for det totale energiforbrug.

Ved en vurdering af de indgående parametre i forhold til Indeklima-Eco-factoren ses det af figur 12.5(b), at flere af de betydende parametre ligger over den stiplede linje. F.eks. ligger parameter nr.

15, middel lufthastigheden, over linjen hvilket indikerer at parameteren er korreleret og/eller har et ulineært forløb. Middellufthastigheden må forventes at være korreleret med eksempelvis beklædningsisolansen for de forskellige perioder (vinter, forår, sommer, efterår), da den har betydning for hvordan personerne i bygningen oplever det termiske indeklima. F.eks. vi personerne om sommeren ved høje indetemperaturer blive kølet af den højere lufthastighed og dermed opleve det termiske indeklima som værende bedre.

Generelt observeres det, at parametrene 9 og 5 (ventilationsluftskiftet og antal personer) har en stor indflydelse på modellens usikkerhed med hensyn til Indeklima-Eco-factoren, idet begge parametre har en høj middelværdi. Desuden ses det, at modellen er forholdsvis følsom overfor parametrene 15, 10, 14 og 6, hhv. middellufthastigheden, beklædningsisolansen om vinteren, personernes aktivitetsniveau og varmeafgivelsen fra udstyret. De resterende parametre vurderes til at have en lille eller ingen indflydelse på modellens samlede usikkerhed i forhold til Indeklima-Eco-factoren.

For den totale Eco-factor ses det af figur 12.5(c), at det er parametrene 5, 6, 9, 15, 10 og 8 (antal personer i bygningen, varmeafgivelsen fra udstyret, ventilationsluftskiftet, middellufthastigheden, beklædningsisolansen om vinteren og infiltrationen), der har den største indflydelse på outputtet. Parametrene 14, 3, 4, 2, 11 og 13 ses at ligge i nogenlunde samme område og have en mindre betydning for modellens usikkerhed. De resterende parametre vurderes til at have en meget lille eller ingen betydning for modellens output.

Endvidere er det her igen parametrene middellufthastigheden (nr. 15) og beklædningsisolansen om vinteren (nr. 10), der har den største spredning og derfor er korreleret med andre af de indgående parametre.

Nedenstående tabel opsummerer og rangerer resultaterne af følsomhedsanalysen i forhold til den totale Eco-factor. Der er kun foretaget en rangering af de indgående parametre i forhold til den totale Eco-factor, da denne anvendes i vurderingen af en bygnings samlede ydeevne.

Tabel 12.6: Rangering af modellens ti mest følsomme og vigtigste parametre i forhold til den totale Eco-factor. Parametrenes middelværdi vægtes højere end standardafvigelsen.

Rangorden	Nr	Parameter	Total Eco-factor	
			μ^*	σ
1	5	Antal personer i bygn.	3,5	0,9
2	6	Varmeafgivelse fra pc'ere	3,0	1,4
3	9	Ventilationsluftskiftet	2,3	0,8
4	15	Middel lufthastighed	1,9	3,4
5	10	Beklædningsisolans, vinter	1,3	2,6
6	8	Infiltrationen	1,2	0,5
7	14	Aktivitetsniveau	0,9	0,2
8	3	g-værdien for ruden	0,8	0,6
9	4	Bygningens orientering	0,7	0,7
10	2	U-værdi for ruden	0,6	0,6

Ud fra ovenstående tabel 12.6 sammen med figur 12.5 kan der opnås meget nyttig information som kan anvendes i en designfase af en naturligt ventileret bygning. Det vil herudfra være muligt at optimere

de vigtigste parametre fundet ved analysen, for dermed at opnå en bygning med en højere energi- og indeklimaydeevne.

12.3.4 OPSUMMERING OG VURDERING

I en følsomhedsanalyse med Morris-metoden foretages en screening af de indgående parametre i modellen, for dermed at undersøge hvilke af disse, der har større betydning end andre. Endvidere identificeres de parametre, der helt kan negligeres fra modellen og dermed fastsættes med en fast værdi istedet for fastsættelse ved en fordelingsfunktion. Det er bl.a. fundet at parametrene nr. 1 og 7 (U-værdi for væggen og den andel af varmen der går fra udstyret til luften) stort set ikke har nogen indflydelse på den opbyggede models usikkerhed. Disse kan derfor fremover blot fastsættes med en fast værdi, f.eks. middelværdien, i de efterfølgende analyser.

Ved en rangering af modellens vigtigste parametre i forhold til den totale Eco-factor som angivet i tabel 12.6, undersøges det hvilke parametre der har afgørende betydning for modellens usikkerhed. Ud fra middelværdien μ kan det vurderes, hvor vigtig den enkelte parameter er afhængigt af hvilken værdi den antager i dens variationsområde. Ved standardafvigelsen σ beskrives det, hvorvidt parameteren er korreleret og/eller har et ulineært bidrag til modellens usikkerhed.

Simuleringsprogrammet Simlab (Simlab [2007]) anvender middelværdien μ , som den absolutte værdi af hver parameters elementæreffekt til at beskrive og afbillede resultatet af analysen. Det kunne dog være interessant i en følsomhedsanalyse, stadig at medtage den oprindelige beregning hvor der også kunne forekomme negative middelværdier. Herudfra ville det således være muligt at kunne vurdere med hvilket fortegn og dermed effekt de enkelte parametre har på det pågældende resultat. F.eks. kunne det være af stor interesse at se, om ventilationsluftskiftet ville sænke eller øge antallet af timer over 26°C.

Ud fra de vigtigste parametre angivet i de ovenstående tabeller 12.2-12.6 er det efterfølgende muligt at foretage en optimering af parametrenes værdier, for herved at mindske deres variationsområde og dermed den samlede usikkerhed for modellen. Den samlede usikkerhed i modellen undersøges i den efterfølgende usikkerhedsanalyse.

12.4 USIKKERHEDSANALYSE

Udover en følsomhedsanalyse, hvor de enkelte parametres følsomhed bestemmes, er det ligeledes interessant at undersøge og kvantificere bygningens samlede usikkerhed. Dette er gjort ved en Monte Carlo-analyse med en randomiseret stikprøveplan som beskrevet i appendiks I. Der er ligeledes her benyttet den opbyggede BSim-model af Københavns Energi (appendiks F) samt Eco-factor-værktøjet (appendiks 9.1) til analysen og vurdering af resultaterne. Som inputparametre og variationsområde er der gjort brug af parametrene beskrevet i ovenstående afsnit 12.2. Vinduesparametrene, U-værdi og g-værdi, er dog ikke medtaget i analysen, da det desværre ikke har været teknisk muligt - endnu - at foretages fuldstændig automatisk i koblingen mellem Matlab og BSim, der er opstillet i samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut (SBI). Det viste sig imidlertid ved følsomhedsanalysen, at g-værdien var den eneste parameter af de to, der havde en større effekt på modellen ved vurdering i forhold til antal timer over 26°C.

Med resultatet af usikkerhedsanalysen vil det være muligt, at udtrykke med hvilken sandsynlighed et

bestemt kriterie kan opnås ud fra modellens output værdier.

Til den randomiserede stikprøveplan er der foretaget ialt 120 stikprøver/simuleringer af modellens usikkerhed. Der kan efterfølgende, på baggrund af de mange simuleringer, dannes en sandsynlighedskurve, hvoraf middelværdien og spredningen samt en ønsket fraktil kan bestemmes for de forskellige output-parametre.

I kapitel 10 er der via Eco-factor-værktøjet foretaget en fuld beregning af Københavns Energi, både med hensyn til energiforbrug, termisk og atmosfærisk indeklima samt Eco-factor-værdier. Resultaterne fra denne beregning benævnes i det følgende "reference"-bygningen, for dermed at gøre det muligt at sammenligne de nedenstående beregnede usikkerheder for Københavns Energi med en referenceværdi fra den oprindelige bygning.

Nedenfor viste resultater fra analysen er opdelt i tre punkter - energiforbrug, indeklima og Eco-factoren.

12.4.1 ENERGIFORBRUG

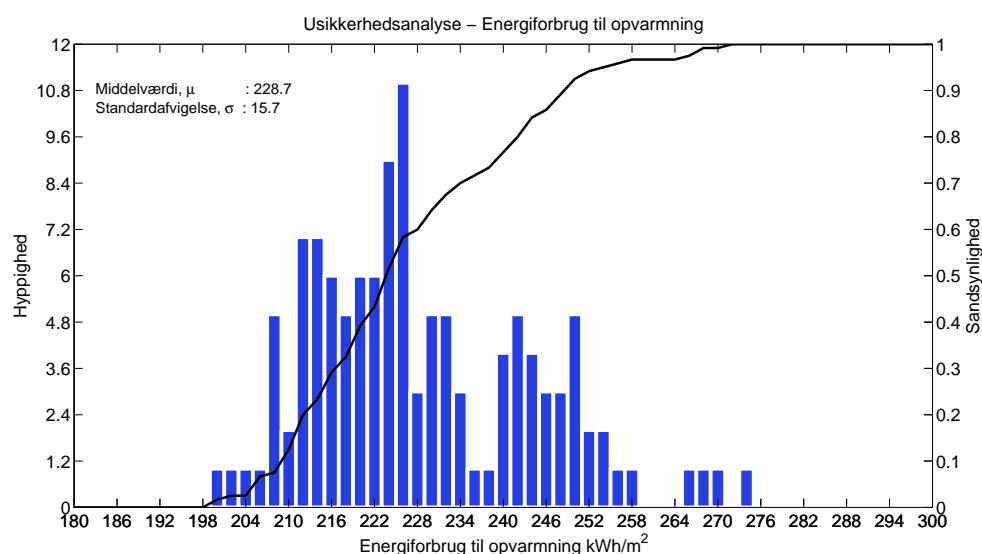
Energiforbrugets variation ud fra de givende parametres variationsområde er af stor interesse for designeren og ikke mindst bygherren, da det hermed vil være muligt at sige med hvilken sandsynlighed det samlede energiforbrug for bygningen vil blive.

Nedenstående tabel 12.7 angiver middelværdien og standardafvigelsen efter hhv. 20, 40, 80 og 120 stikprøver for parametrene opvarmningsbehov og total energiforbrug over året.

Tabel 12.7: Middelværdi og standardafvigelse for den randomiserede stikprøve angivet ved opvarmningsforbruget og det totale energiforbrug.

Stikprøve nr.	Opvarmningsforbrug [kWh/m^2]		Totale energiforbrug [kWh/m^2]	
	μ	σ	μ	σ
20	228,5	14,5	261,7	13,7
40	227,4	16,0	260,3	16,6
80	225,9	15,3	259,1	15,0
120	228,7	15,7	261,9	15,6

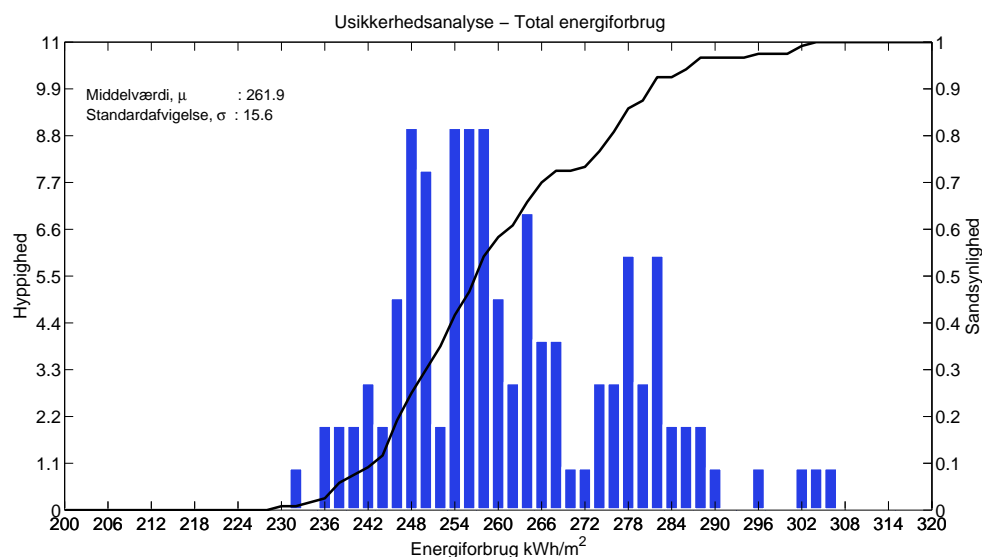
Figur 12.6 viser hyppigheden og sandsynlighedskurven for bygningens energiforbrug til opvarmning. De indgående inputparametre er beskrevet i ovenstående parameteranalyse samt yderligere i appendiks K.



Figur 12.6: Histogram samt sandsynlighedskurve for energiforbruget til opvarmning af bygningen opnået med en randomiseret stikprøveplan efter 120 stikprøver.

Det blev i kapitel 10 beregnet, at energiforbruget til opvarmning af reference-bygningen er 227 kWh/m². Som det fremgår af ovenstående figur ligger det beregnede energiforbrug meget tæt på middelværdien. Af de variationsområder der er opstillet for inputparametrene ses det, at opvarmningsforbruget kan stige med op til 20%.

Nedenstående figur viser hyppigheden og sandsynlighedskurven for bygningens totale energiforbrug.



Figur 12.7: Histogram samt sandsynlighedskurve for bygningens totale energiforbrug (opvarmning + elektricitet til belysning og udstyr), opnået med en randomiseret stikprøveplan efter 120 stikprøver.

Det totale energiforbrug for reference-bygningen er beregnet til 260,6 kWh/m², og det ses ligeledes her at ligge meget tæt på den beregnede middelværdi. Reference-bygningens totale energiforbrug svarer ca. til en 60% fraktil af hele variationsområdet.

12.4.2 INDEKLIMA

Det termiske indeklima har en stor betydning for hvordan personerne i bygningen samlet set vurderer og oplever indeklimaet. Det er derfor vigtigt at undersøge usikkerheden omkring estimeringen af hhv. antal timer over 26°C og antallet af PPD-timer over valgt acceptgrænse - her 10% (klasse II bygning iht. DS/EN 15251 [2007]). Ved at kunne give bygherren en sandsynlighed for, hvordan det termiske indeklima vil blive i bygningen, vil det give ham et bedre og mere detaljeret vurderingsgrundlag i en designfase. Desuden vil en sandsynlighedskurve sammen med en middelværdi og spredning give et langt bedre billede af bygningens forventede indeklimaydeevne.

Der er i det følgende foretaget en usikkerhedsanalyse af bygningens termiske indeklima i forhold til den tidligere anvendte metode, hvor vurderingen foretages ud fra antallet af timer over 26°C (mere detaljeret beskrevet i afsnit 2.5 samt DS 474 [1993]). Ydermere er der foretaget en analyse i forhold til den nyere og mere informative metode, hvor vurderingen af det termiske indeklima er udtrykt ved antallet af PPD-timer.

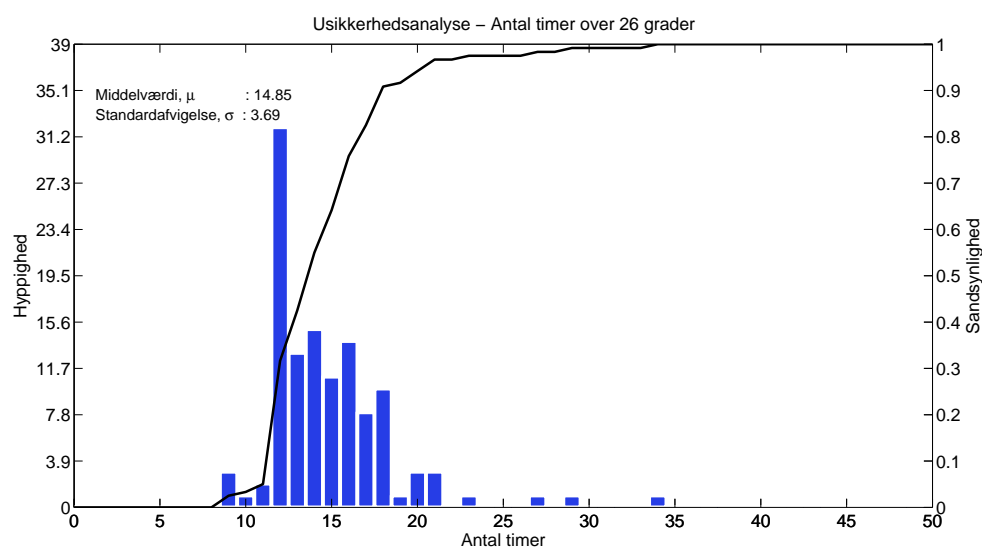
Antal timer over 26°C

Nedenstående tabel 12.8 viser middelværdien og standardafvigelsen for antallet af timer over 26°C efter hhv. 20, 40, 80 og 120 stikprøver/simuleringer.

Tabel 12.8: Middelværdi og standardafvigelse for den randomiserede stikprøve angivet i antal timer over 26°C.

Stikprøve nr.	Antal timer over 26°C [<i>timer</i>]	
	μ	σ
20	15,0	5,3
40	14,7	4,6
80	15,0	4,1
120	14,9	3,7

Hypigheden og den kumulerede frekvens for antallet af timer over 26°C er illustreret på nedenstående figur 12.8. Det ses af figuren, at der er størst sandsynlighed for at have omkring 10-20 timer over 26 grader, hvilket efter metoden klassificerer bygningens termiske indeklima som acceptabelt(/godt). Det gennemsnitlige antal timer er beregnet til ca. 15 timer, som desuden ses at kunne opnås 65% af tiden.



Figur 12.8: Histogram samt sandsynlighedskurve for antallet af timer over 26°C i brugstiden for bygningen opnået med en randomiseret stikprøveplan efter 120 stikprøver.

Antal timer over 26°C er for reference-bygningen (kapitel 10) beregnet til 24 timer. Af figur 12.8 ses det, at dette ligger i den høje ende af variationsområdet og svarer ca. til en 95%-fraktil, hvilket vil sige, at der i 95% af tiden ville kunne opnås et færre antal timer over 26°C i bygningen.

Ifølge DS 474 [1993] er der en vejledende maksimale overskridelsesgrænse på 100 timer over 26°C i bygningens brugstid. Af ovenstående figur 12.8 ses, at denne vejledende grænse aldrig vil blive overskredet i bygningen.

Antal PPD-timer

I det følgende er der foretaget en usikkerhedsanalyse af antallet af PPD-timer over en valgt acceptgrænse på 10%-utilfredse - svarende til en klasse II bygning iht. DS/EN 15251 [2007]. PPD-timer er fundet som en god metode for langtidsevaluering af det termiske indeklima i en bygning, som beskrevet i afsnit 2.5.

Følgende tabel viser middelværdien og standardafvigelsen for antallet af hhv. kolde-, varme- og totale PPD-timer, som overstiger en valgt acceptgrænse på 10% utilfredse.

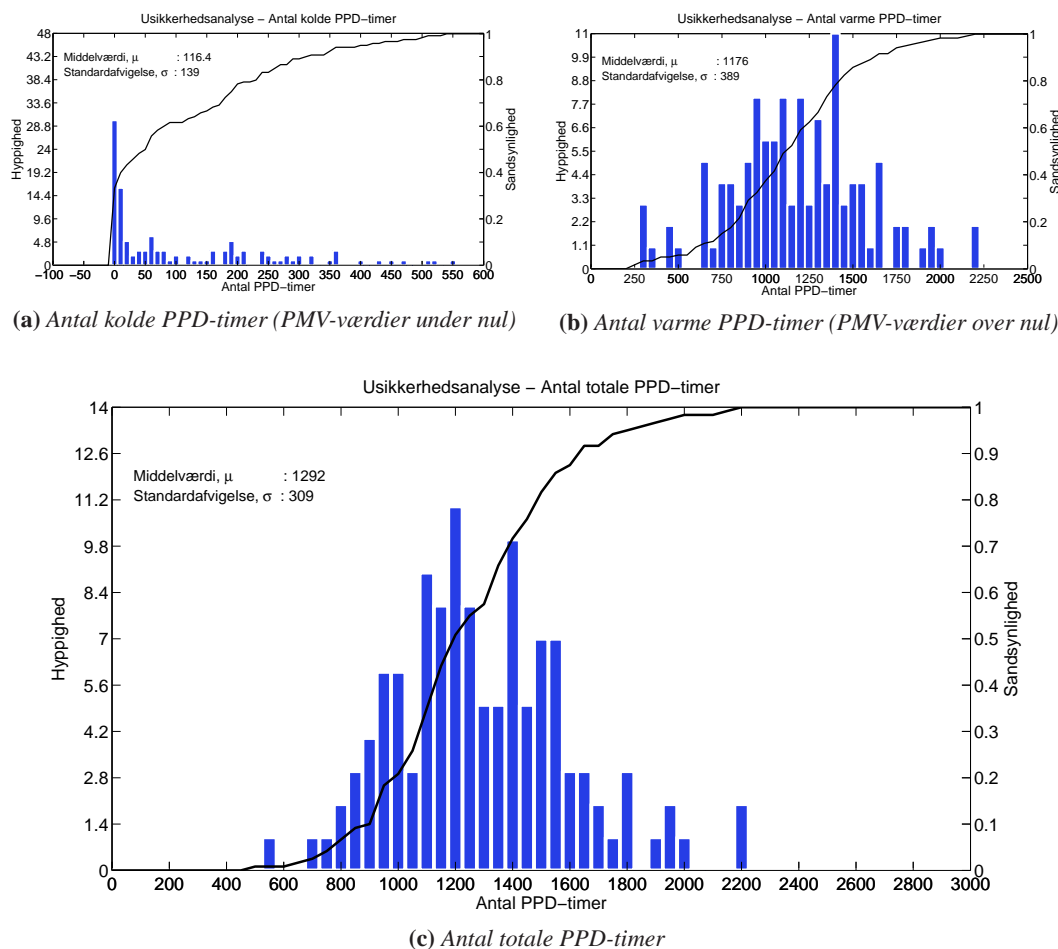
Tabel 12.9: Middelværdi og standardafvigelse for den randomiserede stikprøve angivet ved antal PPD-timer.

Stikprøve nr.	Antal varme PPD-timer		Antal kolde PPD-timer		Antal totale PPD-timer	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
20	1218,4	316,4	104,7	128,1	1323,1	234,1
40	1231,1	367,7	95,2	127,2	1326,2	294,2
80	1199,6	358,1	110,2	132,3	1309,8	290,0
120	1175,5	389,1	116,4	129,0	1291,9	309,1

Af ovenstående tabel fremgår det, at der er stor sandsynlighed, ud fra forudsætningerne omkring inputparametrenes variationsområde, at der vil forekomme mange varme PPD-timer i bygningen. Det er herudfra tydeligt, at det termiske indeklime med stor sandsynlighed kan kvantificeres som værende for varmt i store dele af året.

Nedenstående figurer 12.9 viser hyppigheden og den kumulerede frekvens for antallet af hhv. varme, kolde og totale PPD-timer.

12.4 Usikkerhedsanalyse



Figur 12.9: Histogram samt sandsynlighedskurve for antallet af PPD-timer over en acceptgrænse på 10% utilfredse opnået med en randomiseret stikprøveplan efter 120 stikprøver.

Af figur 12.9(a) ses det, at bygningen generelt ikke har mange kolde PPD-timer (PMV-værdi under nul). Der er størst sandsynlighed for, at der vil forekomme mellem 0-100 PPD-timer i bygningen. For reference-beregningen blev det vist, at der vil være 65 kolde PPD-timer, hvilket ca. svarer til en 50%-fraktil. De varme PPD-timer ses at have et større variationsområde gående fra ca. 200-2000 PPD-timer og en middelværdi på 1176 PPD-timer. For reference-bygningen blev der beregnet 576 varme PPD-timer, som ses at svarer til en 10%-fraktil for bygningens samlede usikkerhed. Der vil altså være stor sandsynlighed for, at der vil kunne opleves et større antal varme PPD-timer i bygningen under de givne forudsætninger omkring inputparametrenes variationsområde. For de totale antal PPD-timer er der ligeledes en stor usikkerhed på resultatet gående fra ca. 500 til 2200 PPD-timer. Der er for de 120 stikprøver der er udtaget beregnet en middelværdi på ca. 1300 PPD-timer og en standardafvigelse på 309 PPD-timer. Dette viser, at personer i bygningen vil vurdere det generelle termiske indeklima som værende utilfredsstillende. For resultaterne fra reference-beregningen (afsnit 10) er det totale antal PPD-timer ved brug af Eco-factor-værktøjet beregnet til 636 PPD-timer. Dette svarer kun til ca. en 2%-fraktil af den totale usikkerhed, og der er dermed stor sandsynlighed for at

der vil forekomme flere PPD-timer.

Udfra ovenstående usikkerhedsanalyse af PPD-timernes beregnede variationsområde er det tydeligt, at antallet af PPD-timer med stor sandsynlighed vil overskride den vejledende maksimale overskridelsesgrænse på 150 PPD-timer om året (afsnit 2.5.1). Usikkerhedsanalysen anvendes hermed som et værktøj til, at undersøge hvor stor sandsynlighed der er for at modellen overholder et bestemt kriterie. Ydermere er der foretages en vurdering af bygningens indeklimaydeevne, udfra modellens samlede usikkerhed hvor det kan konkluderes, at personerne i bygningen med stor sandsynlighed vil opleve det termiske indeklima som værende for varmt en stor del af året.

12.4.3 ECO-FACTOREN

I Eco-factor-værktøjet kan der udover den individuelle vurdering af hhv. det termiske og atmosfæriske indeklima samt energiforbruget foretages en samlet vurdering af bygningens ydeevne i en samlet indikator - Eco-factoren. Der er udfra Indeklima-, Energi- og den totale Eco-factor foretaget en usikkerhedsanalyse i forhold til hvert output for dermed at kunne vurdere de enkelte bidrags samlede usikkerhed på modellen.

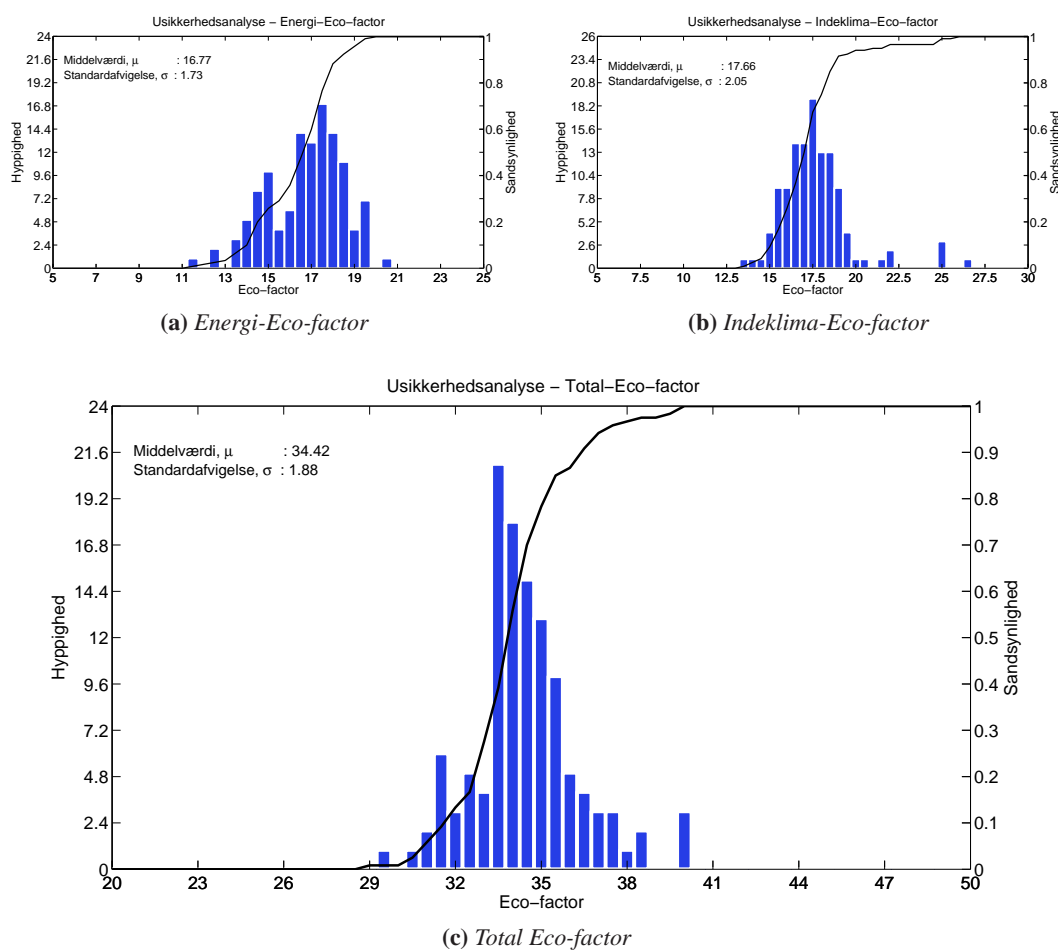
Nedenstående tabel 12.10 angiver middelværdien og standardafvigelsen efter hhv. 20, 40, 80 og 120 stikprøver for parametrene Indeklima-Eco-factor, Energi-Eco-factor og den totale Eco-factor.

Tabel 12.10: Middelværdi og standardafvigelse for den randomiserede stikprøve angivet ud fra Eco-factoren.

Stikprøve nr.	Indeklima-Eco-factor		Energi-Eco-factor		Total Eco-factor	
	μ	σ	μ	σ	μ	σ
20	17,7	1,2	16,8	1,4	34,5	1,4
40	17,6	1,6	17,0	1,8	34,6	1,5
80	17,3	1,6	17,1	1,6	34,4	1,6
120	17,7	2,0	16,8	1,7	34,4	1,7

Af tabel 12.10 er det tydeligt, at den beregnede middelværdi af Eco-factoren for hhv. indeklima og energi ligger i den nederste del af skalaen. Det er således klart, at den totale Eco-factor for bygningen, samlet set, heller ikke kan få en høj score for bygningens ydeevne. Endvidere er standardafvigelsen forholdsvis lille hvilket vil sige, at der ikke er en særlig stor spredning på de beregnede Eco-factor-værdier.

Resultaterne af den udførte analyse, hyppigheden og den kumulerede frekvens er vist i nedenstående figur 12.10.



Figur 12.10: Histogram samt sandsynlighedskurve for de beregnede Eco-factor-værdier opnået med en randomiseret stikprøveplan efter 120 stikprøver.

Energi-Eco-factoren ses at ligge i området fra ca. 11 til 20% og har en middelværdi på 16,8%. Reference-bygningen har en beregnet Energi-Eco-factor på 17%, som ligger meget tæt på middelværdien og svarer ca. til en 60%-fraktil af hele variationsområdet. For Indeklima-Eco-factoren varierer resultatet mellem 12,5 til ca. 25% og med en middelværdi på 17,7%. Det er hovedsageligt det termiske indeklima i bygningen som medfører den lave indeklima-score for bygningen. For referencebygningen er der beregnet en Indeklima-Eco-factor på 22%, som ligger i den øvre del af det beregnede usikkerhedsområde. En indeklima-score på 22% eller derover vil kun kunne opnås i ca. 7% af tiden. Med de angivne inputparametres variationsområde vil der således være stor sandsynlighed for at opnå en Indeklima-Eco-factor der er lavere end den tilsvarende opnået ved referencebygningen. For den totale Eco-factor ses variationsområdet at spænde fra ca. 29 til ca. 40% i score, og der er i de 120 stikprøver opnået en middelværdi på 34,4%. Referencebygningen har opnået en total Eco-factor-værdi på 39% hvilket, ud fra de givne forudsætninger, svarer til en 2-3%-fraktil. Dvs. at det med stor sandsynlighed vil forekomme værdier af den totale Eco-factor som vil være lavere end den beregnede fra referencebygningen (afsnit 10).

12.4.4 OPSUMMERING OG VURDERING

Formålet med usikkerhedsanalysen er at kunne vurdere modellens samlede usikkerhed i forhold til de variationsområder, der er opstillet for inputparametrene. Udfra analysen vil det være muligt, at kunne forudsige med hvilken sandsynlighed et bestemt kriterie kan opfyldes. Dette kan eksempelvis være opstillet i et byggeprogram af bygherren.

Ved brug af randomiseret stikprøveplan i Monte Carlo-analysen, foretages hver stikprøve helt tilfældigt og uafhængigt af den foregående. Der er dermed risiko for, at hele parametrenes variationsområde ikke dækkes ved analysen. Som beskrevet i appendiks I anbefales det fra litteraturen, at anvende omkring 80 stikprøver for at sikre hele variationsområdets dækning, der dog i ovenstående analyse anvendt 120 stikprøver, da beregningsproceduren er foregået automatisk og har ikke taget nævneværdigt længere tid. Det skønnes herved, at der med stor sandsynlighed har været en stikprøve i hele variationsområdet for hver parameter.

Resultaterne fra ovenstående usikkerhedsanalyse skal ikke ses som et entydigt svar på modellens usikkerhed, da analysen bygger på forudsætninger omkring inputparametrenes variationsområde, den opbyggede BSim model samt den opstillede udeklimatest for det pågældende år. Det kan f.eks. sagtens forekomme, at antallet af timer over 26°C kan være højere eller lavere fra det ene år til det andet, idet udeklimatest har en stor indflydelse på bygningens termiske indeklimatest og dermed også antallet af timer over 26°C.

Del III

Konklusion og perspektivering

I det følgende opsummeres og diskuteres projektets del I og II. Nærværende konklusion danner grundlag for den efterfølgende perspektivering, hvor anbefalinger vedrørende fremtidig forskning præsenteres.

I problemformuleringen for nærværende projekt blev der opstillet følgende spørgsmål, der igennem projektet er søgt besvaret.

1. *Hvilke metoder til evaluering af termisk indeklima er der til rådighed?*
2. *Hvilke indikatorer for den termiske komfort er der til rådighed, og hvordan adskiller de sig fra hinanden?*
3. *Hvilken indflydelse har den menneskelige adaptivitet på den termiske oplevelse?*
4. *Hvilke adaptive modeller er der opstillet, og hvad er kvaliteten af disse?*
5. *Hvilken indvirkning har indeklimaet på den menneskelige præstationsevne?*
6. *Kan der opstilles en ydeevneindikator til evaluering af det termiske indeklima i såvel nyt som eksisterende byggeri med brug adaptive modeller sammen med modeller for evaluering af præstationsevnen?*

I det følgende vil de enkelte punkter i ovenstående problemformulering blive diskuteret og besvaret.

Metoder til evaluering af termisk indeklima

Ved projektering af bygninger stiller bygningsreglementet krav til det termiske indeklima som skal overholdes. Det danske bygningsreglement angiver blot, at der i rum hvor personer opholder sig i længere tid skal kunne opretholdes sundhedsmæssigt tilfredsstillende temperaturer under hensyn til den menneskelige aktivitet i rummene. Som vejledning henvises der til normerne DS 474 [1993] samt DS/EN ISO 7730 [2006], hvor der forefindes metoder til såvel momentan som langsigtet evaluering af det termiske indeklima. Metoden i DS 474 [1993] er en simpel metode, hvor antallet af timer med operative temperaturer over hhv. 26 og 27°C ikke må overstige hhv. 100 og 25 timer om året. Metoden er i Danmark blevet mere eller mindre de facto blandt rådgivende ingeniører, men overholdelse af de vejledende værdier er ikke nødvendigvis ensbetydende med et tilfredsstillende indeklima. Graden af overskridelsen af de angivne temperaturgrænser tages ikke i betragtning, og en operativ temperatur på f.eks. 27,1°C vægtes identisk med en operativ temperatur på f.eks. 35°. En mere detaljeret metode, der tager udgangspunkt i menneskets varmebalance gennem PMV- og PPD-indekset er angivet i normen DS/EN ISO 7730 [2006], der ikke kun benyttes i Danmark med også i udlandet. Heri opstilles metoder for såvel momentan samt langsigtet evaluering af det termiske indeklima. Den momentane evaluering er baseret på en kategorisering af det termiske indeklima i tre klasser med varierende krav til såvel generel som lokal termisk komfort. Til langtidsevaluering af generel termisk komfort, angives fem metoder baseret på PMV/PPD-indekset samt operativ indetemperatur. Disse strækker sig fra simple evalueringer gennem den gennemsnitlige PPD-værdi for en given periode,

til vægtninger ift. overskridelsen af en given PPD-værdi(grænse). Idet metoderne direkte tager udgangspunkt i menneskets varmebalance, og afvigelsen fra denne som indikator for graden af termisk diskomfort, giver disse mere detaljeret information om det termiske indeklimas påvirkning af komforten og den menneskelige termiske oplevelse ift. metoden i DS 474 [1993]. Problemet er imidlertid, at PMV- og PPD-indekset fordrer kendskab til flere betydende parametre bl.a. de personlige parametre: beklædningsisolans, aktivitetsniveau samt de fire klassiske indeklimaparametre: lufttemperatur, middelstrålingstemperatur, luftfugtighed samt lufthastighed, der alle har en vel anerkendt indflydelse på den termiske komfort. Desuden, som det senere i nærværende konklusion vil blive diskuteret, har fastsættelsen af disse parametre stor indflydelse på estimeringen af den generelle termiske diskomfort gennem PMV- og PPD-indekset. De samme metoder er præsenteret i den nyeste norm DS/EN 15251 [2007]. Metoden der har tiltrukket mest opmærksomhed er en beregning af antallet af såkaldte PPD-timer. Her summeres antal timer, hvor PPD-værdien forholdsmæssigt overskrider en valgt grænse. Der er imidlertid ingen af normerne DS/EN ISO 7730 [2006] eller DS/EN 15251 [2007] der angiver acceptable grænser for antallet af PPD-timer. I Holland har denne metode længe været benyttet, og her er en anbefalet grænse på 150 PPD-timer fundet gennem computersimuleringer og analyser af indflydelsen på dels termisk komfort men også energiforbruget. Senere har Olesen og Parsons [2002] foreslået et bredere interval på 100-150 PPD-timer med henvisning til, at der bør skelnes mellem naturligt ventilerede bygninger og fuldt luftkonditionerede bygninger med mekanisk køling. Olesen [2004] påpeger imidlertid, at det er essentielt at udvikle en ny standardisering af estimeringen af beklædningsisolansen før man kan lave standardiserede metoder for langtidsevaluering af den termiske komfort. Som det blev vist ifm. validiteten af PMV-indekset (beskrives yderligere i det nedenstående), samt ved vurderingerne af de udvalgte bygninger gennem den udvidede Eco-factor, herunder følsomhedsanalyse, og simuleringerne med den adaptive kontrolalgoritme, har beklædningsisolansen stor indflydelse på den termiske oplevelse.

Normen DS/EN 15251 [2007] samt den amerikanske norm ANSI/ASHRAE 55 [2004] angiver en alternativ metode for bygninger hhv. bygninger uden mekanisk køling og naturligt ventilerede bygninger, hvor de termiske omgivelser hovedsageligt er reguleret gennem personlig kontrol over vinduer. Disse er baseret på forskningsprojekter, hvor det er vist, at personer i naturligt ventilerede bygninger tillader højere temperaturer end personer i fuldt luftkonditionerede omgivelser. Hvor DS/EN 15251 [2007] bygger på resultater fra det europæiske SCATs-projekt fra undersøgelser i 26 bygninger i Europa, bygger metoden i ANSI/ASHRAE 55 [2004] på det større RP-884-projekt, hvor der er foretaget meta-analyser af målinger fra 160 bygninger hovedsageligt placeret i varme klimaer. Ud fra hhv. en løbende middel-udetemperatur, der tager hensyn til de foregående dages udelufttemperaturer, eller en simpel udelufttemperatur bestemmes de operative indetemperatur hvor personerne vil føle sig hhv. i termisk komfort (DS/EN 15251 [2007]) eller termiske neutrale (ANSI/ASHRAE 55 [2004]).

For at undersøge dels kvaliteten af normernes metoder for momentan og langtidsevaluering af termisk komfort, er de i normerne benyttede samt alternative komfortindikatorer undersøgt gennem litteraturstudier kombineret med egne beregninger og simuleringer.

Indikatorer for termisk komfort

Til evaluering af det generelle termiske indeklima benyttes ofte PMV-/PPD-indekset, der siden udviklingen for snart 40 år siden, har været underlagt talrige undersøgelser. I de senere år har undersøgelser sat spørgsmålstegn ved validiteten af indekserne og deres evne til at forudsige den termiske oplevelse præcist. Især er fokus rettet på brugen af PMV-modellen i naturligt ventilerede bygninger, hvor modellen har vist en overestimering af den termiske oplevelse. Undersøgelser har hovedsageligt omhandlet PMV-indeksets følsomhed overfor estimeringen af de personlige parametre: beklædnings-

sisolans og aktivitetsniveau.

For beklædningsisolansen er de tabellerede værdier i DS/EN ISO 7730 [2006], der oftest benyttes blandt rådgivende ingeniører, opstillet på baggrund af forsøg med stillestående termiske manikiner i kontrollerede termiske omgivelser, men undersøgelser har vist, at dels fordampningsmodstanden samt med pumpeeffekten¹ er vigtige parametre, der er nødvendige at tage med i betragtning. Pumpeeffekten har vist en mulig reduktion af beklædningsisolansen med op til 50%, og denne har endvidere stor indflydelse på tøjets fordampningsmodstand. PMV-modellen forudsætter, at al sved der udskilles fra huden fordampes gennem tøjet, og tager således ikke hensyn til fordampningsmodstanden i tøjet men benytter middeltemperaturen af hudoverfladen samt svedproduktionen som komfortbetingelser. Kritikere af PMV-modellen mener at årsagen til PMV-modellens overestimering af den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger i varme fugtige klimaer er, at der ikke tages nok hensyn til luftfugtighedens indflydelse på den termiske komfort gennem påvirkningen af det evaporative varmetab. Her er det foreslået at benytte de termiske indeks, ET^* , istedet for lufttemperatur og middelstrålingstemperatur ved beregning af PMV (PMV^*). Dette blev imidlertid vist i nærværende projekt, at PMV^* -modellen ikke forudsiger en mere præcis termisk oplevelse i de naturligt ventilerede bygninger ift. det konventionelle PMV-indeks. På trods af at DS/EN ISO 7730 [2006] angiver et gyldighedsinterval for beklædningsisolansen på 0-2,0 clo, har undersøgelser vist, at dette interval reelt set skal indskrænkes til 0,3-1,2 clo. Ved beklædningsisolanser lavere eller højere end dette, kan fejlen variere med op til én skala-enhed på ASHRAE-skalaen. En yderligere fejlkilde er, at isolansen hidrørende fra stolen ikke er medtaget, hvilken har stor indflydelse på evalueringen af den termiske oplevelse. Værdier for denne er angivet i DS/EN ISO 7730 [2006] og kan variere fra 0-0,4 clo. Empiriske modeller for estimering af beklædningsisolansen er i den senere tid præsenteret, og fælles for disse er bl.a., at de beregner den gennemsnitlige beklædningsisolans på baggrund af udelufttemperaturen. Samtlige af disse modeller argumenterer, at beklædningsisolansen ikke kun er påvirket af det termiske indeklima, men i høj grad også af det termiske udeklima. Endvidere bygger enkelte modeller på teorien om, at beklædningsisolansen er påvirket af de foregående dages udelufttemperaturer, hvorfor disse modeller beregner beklædningsisolansen som en funktion af den løbende middel-udetemperatur, der beregnes som en vægtning af de foregående dages udelufttemperaturer. Det empiriske grundlag for disse modeller er imidlertid ikke stort nok til en eventuel implementering i de gældende normer, men teorien om at beklædningsisolansen varierer som funktion af såvel inde- som udelufttemperaturen er alment anerkendt, og fremtidige undersøgelser må således tage udgangspunkt i denne tilgang.

Udover beklædningsisolansen, er estimeringen af aktivitetsniveauet af afgørende betydning. Simple beregninger af PMV ved varierende forudsætninger i projektet har vist, at en fejlestimering af aktivitetsniveauet med bare 15% kan medføre en fordobling af det forventede antal utilfredse ved lave aktivitetsniveauer. Ved højere aktivitetsniveauer bliver fejlen større. I DS/EN ISO 7730 [2006] er gyldighedsintervallet for aktivitetsniveauet angivet til 0,8-4,0 met, men undersøgelser har vist, at dette ikke bør overskride 1,4 met.

De seneste undersøgelser koncentrerer sig alle om termen ”menneskelig adaptivitet”, og det er mere eller mindre blevet alment anerkendt, at årsagen til PMV-modellens overestimering af den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger skal findes heri. Som nævnt ovenfor, er PMV-modellen udledt på baggrund af menneskets varmebalance med omgivelserne, med afvigelsen herfra som indikator for generel termisk diskomfort. Kritikere af denne tilgang angiver, at undersøgelser har vist, at folk i kolde klimaer som regel ønsker det lidt varmere end neutralt, og omvendt ønsker personer i varme klimaer det lidt koldere end neutral. Der skelnes således mellem termisk komfort og termisk præference, og kan være en del af forklaringen på PMV-modellens fejlestimeringer af termisk

¹Luftudveksling med omgivelserne gennem åbninger i tøjet (krave, revers, ærmer mv.), der fører til øget varmetab.

komfort.

Menneskelig adaptivitet

Den menneskelige adaptivitet er de seneste år blevet en vel anerkendt faktor, der har stor indflydelse på den termiske komfort. I RP-884-projektet, blev adaptiviteten defineret i form af tre bidrag:

- Adfærdsmæssig
- Psykologisk
- Fysiologisk

Undersøgelser har vist, at den fysiologiske adaptivitet i form af akklimatisering, dvs. kroppens tilvæning til de termiske omgivelser, er mere eller mindre uden betydning for den termiske oplevelse. Derimod har den adfærdsmæssige del af den menneskelige adaptivitet stor indflydelse. Denne omfatter brugernes aktive påvirkning af deres egen termiske situation gennem åbning af vinduer og døre, justering af beklædning mv. I RP-884-projektet blev det fundet, at halvdelen af den klimatiske indflydelse på den termiske neutralitet i naturligt ventilerede bygninger kan tilskrives den adfærdsmæssige adaptivitet, hvorefter det blev konkluderet, at den resterende halvdel må findes i psykologisk adaptivitet i form af forventningen til det termiske indeklima. I fuldt luftkonditionerede bygninger forventer brugerne et strengere kontrolleret termisk indeklima med små variationer i indetemperaturen, hvor der i naturligt ventilerede bygninger sættes mindre krav. Endvidere indbefatter den psykologiske adaptivitet det faktum, at personer med mulighed for påvirkning af egen termisk situation, generelt accepterer højere temperaturer.

Den ovenstående definition samt opdeling af den menneskelige adaptivitet er blevet generelt accepteret, og hovedparten af de seneste forskningsprojekter vedrørende termisk komfort og adaptivitet, bevæger sig væk fra den fysiologiske indgangsvinkel, hvor termisk komfort sidestilles med den menneskelige varmebalance med omgivelserne.

Adaptive modeller

Siden Humphreys [1978] fremlagde teorien om, at personer i fritløbende bygninger generelt accepterede højere temperaturer, er der foretaget mange undersøgelser heraf. Fælles for hovedparten af disse undersøgelser er, at de beskriver termisk neutralitet eller komfort ved en simpel lineær funktion af udelufttemperaturen. Resultaterne fra RP-884-projektet, der indbefatter meta-analyser af ca. 21.000 datasæt fra 160 bygninger, er implementeret i den amerikanske norm ANSI/ASHRAE 55 [2004], mens resultaterne fra det europæiske SCATs-projekt, indeholdende data fra 25 bygninger i Europa, er implementeret i den nye europæiske norm DS/EN 15251 [2007] - begge som alternative metoder til hhv. naturligt ventilerede bygninger og bygninger uden mekanisk køling. Idet PMV-modellen har vist sig at forudsige den termiske oplevelse i luftkonditionerede bygninger godt, benyttes denne stadig i disse tilfælde.

Som nævnt, beregnes neutral- eller komforttemperaturen i hovedparten af de nye adaptive modeller, som en simpel funktion af udelufttemperaturen. Det er imidlertid vanskeligt at forestille sig, hvordan noget så komplekst som termisk komfort kan beskrives ved en simpel lineær funktion af kun én parameter. Og selvom de adaptive modeller forudsiger den termiske oplevelse i nutidens bygninger godt, er det spørgsmålet om dette også er tilfældet i fremtidige bygninger. PMV-modellen er generelt antaget værende en statisk model, der kun kan benyttes i situationer, hvor de termiske

omgivelser er mere eller mindre stationære. Men da PMV-indekset beregnes direkte som funktion af bl.a. beklædningsisolansen, der gennem adfærdsmæssig adaptivitet løbende justeres, tager PMV-modellen delvist hensyn til personers adaptivitet. Fanger og Toftum [2002] erkender indflydelsen fra den psykologiske adaptivitet gennem skiftende forventninger, men stiller spørgsmålstejn ved indflydelsen fra muligheden for åbning af vinduer og døre på den termiske oplevelse. Dette er kun gældende for personer, der sidder umiddelbart ved siden af vinduet, og ved vurdering af den termiske komfort for en større gruppe personer, bør indflydelsen herfra ikke tages i betragtning. På baggrund heraf er PMV_e-modellen opstillet, der medtager effekten fra den psykologiske adaptivitet gennem en simpel faktor der multipliceres med den konventionelt beregnede PMV.

Samtlige af de seneste forskningsprojekter har stillet spørgsmålstejn ved PMV-modellens validitet, og ved undersøgelser er det i samtlige tilfælde vist, at PMV-modellen overestimerer den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger (generelt bygninger der er i tæt kontakt med udeklimaet som følge af funktionsdygtige vinduer og minimal mekanisk luftkonditionering). Som konsekvens heraf, blev PMV_e-modellen opstillet, men der mangler stadig mange undersøgelser for at kunne benytte denne i praksis.

Endvidere bør de benyttede klassificeringer af bygningerne i de enkelte projekter kommenteres. I RP-884-projektet er der skelnet mellem naturligt ventilerede bygninger defineret som enkelt- eller tomandskontorer, med adgang til funktionsdygtige vinduer samt loftsventilatorer, og hvor de adaptive muligheder er store mens den anden gruppe er defineret som lukkede centralt styrede luftkonditionerede bygninger med åbne kontormiljøer, og hvor brugerne ingen mulighed har for åbning/lukning af vinduer. I SCATs-projektet er der skelnet mellem bygninger i hhv. fritløbende drift, hvor varme- eller køleanlægget ikke er i drift, og bygninger i opvarmet eller kølet drift. Problemet med disse definitioner er imidlertid, at de fleste bygninger der projekteres og bygges i dag, ikke entydigt kan placeres i en af disse kategorier. Som alternativ til disse definitioner, har man i Holland indført et klassificeringskoncept, hvor der gennem et flow-diagram foretages en kategorisering i hhv. Alfa og Beta-bygning, hvor førstnævnte overvejende tilbyder store adaptive muligheder samt minimal mekanisk luftkonditionering, og sidstnævnte overvejende er mekanisk ventilerede bygninger med lille eller ingen mulighed for adaptiv tilpasning. Denne tilgang er mere anvendelig ved projektering af bygningers termiske indeklima.

Gennem litteraturstudiet er det undersøgt, om kvaliteten af disse adaptive modeller er stor nok til at kunne benyttes til såvel momentan som langtidsevaluering af termisk komfort. For begge af de største forskningsprojekter, RP-884 og SCATs, gælder det, at gyldighedsintervallet herfor er meget snævert og kan endvidere kun benyttes i kontorbygninger. Endvidere består det empiriske grundlag for SCATs-projektet udelukkende af målinger foretaget i europæiske bygninger, og resultaterne herfra kan således kun benyttes i lignende klimatiske zoner. Den største begrænsning af begge modeller er gyldighedsintervallet for såvel aktivitetsniveau som beklædningsisolans. I kraft af, at modellerne er opstillet på baggrund af måledata fra kontorbygninger, er modellerne kun anvendelige i tilsvarende indeklimatiske forhold. Endvidere blev det i nærværende projekt vist, at for tempererede og koldere klimazoner som f.eks. Danmark, vil der forekomme mange situationer, hvor udelufttemperaturen er lavere end gyldighedsområdet for de opstillede modeller tillader. Der mangler således stadig undersøgelser af den termiske komfort og indflydelsen fra den menneskelige adaptivitet i disse situationer.

Som det blev vist i nærværende projekt, er PMV-modellens følsomhed overfor estimeringen af såvel beklædningsisolans som aktivitetsniveau stor. I forbindelse med litteraturstudiet viste de behandlede undersøgelser, at aktivitetsniveauet var uden påvirkning fra det termiske inde- eller udeklima. Idet fastsættelsen af aktivitetsniveauet har beroet på de adspurgte personers egen vurdering heraf, må denne konklusion nødvendigvis ikke ses som endegyldig. Derimod har beklædningsisolansen vist

korrelation med såvel inde- som udetemperaturen, og forskellige modeller for estimering af beklædningsisolansen som funktion af enten inde- eller udetemperaturen er blevet undersøgt. Yderligere undersøgelser af korrelationen mellem udetemperatur og beklædningsisolans har endvidere vist, at denne ikke kun forekommer ift. den aktuelle dags udetemperatur, men i høj grad også af de foregående dages udetemperaturer. Forskellige undersøgelser i nærværende projekt, bl.a. evalueringen af det termiske indeklima med den udvidede Eco-factor samt simuleringerne med den adaptive kontrolalgoritme, har vist indflydelsen fra estimeringen af beklædningsisolansen på evalueringen af termisk komfort - såvel momentant som langsigtet. Det er fundet, at metoden for fastsættelse af beklædningsisolansen iht. DS/EN ISO 7730 [2006] er for grov og medfører at det termiske indeklima forudsiges dårligere end det faktisk er. Foruden dette har, som før omtalt, pumpeeffekten stor indflydelse på beklædningsisolansen, og vil således også påvirke forudsigelsen af den termiske komfort gennem PMV-indekset. PMV-modellens fejlestimeringer kan måske tilskrives en forkert fastsættelse af beklædningsisolansen, så før man kan lave en standardiseret metode for evaluering af termisk komfort, må man nødvendigvis udvikle en mere detaljeret og standardiseret metode til beregning af beklædningsisolansen. Man kunne fristes til at sige, at idet afvigelser mellem det forventede og det aktuelle termiske indeklima kun blev fundet i naturligt ventilerede bygninger, kan forklaringen ikke tilskrives beklædningsisolansen. Grunden til at der ikke blev fundet disse store afvigelser i de fuldt luftkonditionerede bygninger er højst sandsynligt, at de termiske omgivelser heri er mere moderate ift. luftkonditionerede bygninger, hvorfor beklædningsisolansen ikke har varieret nævneværdigt her (adfærdsmæssig adaptivitet).

Af ovenstående diskussion kan det således konkluderes, at kvaliteten af de adaptive modeller der er til rådighed ikke er tilstrækkelig til brug ved momentan eller langtidsevaluering af termisk komfort. PMV-indekset er gennemprøvet, og på trods af de påviste fejlestimeringer af den termiske oplevelse i naturligt ventilerede bygninger, er denne stadig den mest benyttede. Det er imidlertid indlysende, at undersøgelser vedrørende validiteten af PMV-indekset kræves, men indtil videre anses denne model fortsat for værende den mest troværdige.

Indeklimaets indvirkning på præstationsevnen

I litteraturstudiet er der foretaget undersøgelser af indeklimaets indvirkning på den menneskelige præstationsevne. Antallet af undersøgelser der vedrører dette emne, er øget de seneste år. Resultaterne herfra er mere eller mindre entydige, og viser at der er en sammenhæng mellem præstationsevnen og det termiske og atmosfæriske indeklima. Ved forbedring af indeklimaet, er der fundet forøgelse af præstationsevnen med op til 15%, og omkostningerne i forbindelse hermed er minimale ift. den øgede produktivitet. Beregninger og analyser viser, at tilbagetalingstiderne ifm. etablering af et tilstrækkeligt termisk og atmosfærisk indeklima ligger i omegnen 1-2 år.

Formålet med litteraturstudiet af indeklimaets indvirkning på præstationsevnen var, at undersøge muligheden for implementering af modeller for estimering heraf til brug ved langtidsevaluering af termisk komfort, og gennem disse tilføje et yderligere værktøj til kvalitativ vurdering af indeklimaet. Førnævnte undersøgelser er alle foretaget i enten klimakamre/rum under velkontrollerede indeklimatiske forhold eller i skoler, hvorfor resultaterne herfra ikke umiddelbart kan benyttes for alle typer bygninger og aktiviteter. Konklusionen ifm. denne del af litteraturstudiet har således været, at modellerne for estimering af præstationsevnen som funktion af indeklimatiske parametre for termisk og atmosfærisk indeklima ikke kan benyttes ved opstilling af ydeevneindikatorer for bygning generelt.

Langtidsevaluering af termisk komfort under hensyntagen til menneskelig adaptivitet

I projektet er der præsenteret og diskuteret forskellige koncepter for langtidsevaluering af termisk komfort. Som beskrevet ovenfor, er de adaptive modeller vurderet for usikre og begrænsede til en egentlig implementering og videre brug i projektet. Det er på baggrund heraf valgt, kun at benytte og implementere modellerne på informativ basis.

Ved opstilling af de forskellige koncepter med henblik på udvælgelse af det bedst egnede koncept for såvel momentan som langtidsevaluering af termisk komfort, er der foretaget en udvælgelse iht. kriterier om, at det valgte koncept skal være anvendeligt for såvel momentan som langtidsevaluering, fleksibelt og brugervenligt samt at det skal være muligt at benytte i samtlige faser af byggeriet og endvidere i eksisterende bygninger. Det koncept der opfylder samtlige af ovenstående kriterier, og endvidere er fundet mest anvendeligt er Eco-factor-konceptet. Som nævnt er de adaptive modeller for termisk komfort og præference ikke af tilstrækkelig høj kvalitet til en egentlig implementering i det valgte koncept. Endvidere er de i DS/EN ISO 7730 [2006] samt DS/EN 15251 [2007] angivne metoder for langtidsevaluering af termisk komfort i form af PPD-time-konceptet ikke tilstrækkeligt udviklede til at dette kan implementeres, idet der endnu ikke er opstillet vejledende krav til antallet af PPD-timer, der bør tillades i en bygning.

Som tidligere beskrevet er det konkluderet, at modellerne for påvirkning af præstationsevnen som følge af utilstrækkeligt indeklima ikke kan benyttes. En implementering af heraf ville ellers give brugeren et yderligere redskab til økonomisk vurdering af indflydelsen fra det målte eller simulerede indeklima på produktiviteten og dermed foretage en udvidet vurdering, hvor økonomiske aspekter indgår mere detaljeret end blot en energimæssig tilgang.

Følgende liste angiver de tilføjelser der er foretaget:

- Mulighed for importering af data fra målinger eller simuleringer (f.eks. BSim)
- Langtidsevaluering baseret på PMV-/PPD-modellen
- Adaptive modeller til evaluering af generel termisk komfort
- Adaptive modeller for estimering af beklædningsisolans
- Statistiske analyser af langtidsevalueringer af generel termisk komfort samt Eco-factor

Muligheden for brug af data fra termiske bygningssimuleringsprogrammer eller målinger er implementeret i konceptet hvilket muliggør langtidsevalueringer af såvel det termiske indeklima baseret på PMV-/PPD-modellen samt atmosfærisk indeklima og energi i kraft af Eco-factorens nuværende muligheder. De implementerede adaptive modeller til evaluering af generel termisk komfort samt estimering af beklædningsisolans sammen med diverse metoder for langtidsevaluering af termisk komfort bidrager med mere detaljerede vurderingsmetoder samt muligheden for vurdering af det termiske indeklima iht. nyeste forskning ift. det eksisterende Eco-factor-koncept. Endvidere giver de implementerede statistiske værktøjer brugeren yderligere muligheder for evaluering af det termiske indeklima over en given periode.

Den udvidede Eco-factor for langtidsevaluering er benyttet på to bygninger - en fuldt naturligt ventilerede bygning (Københavns Energi A/S) og en fuldt mekanisk kølet bygning med balanceret mekanisk ventilation (Grontmij | Carl Bro A/S). Her er der foretaget langtidsevalueringer af det termiske og atmosfæriske indeklima samt energiforbruget - dels vurderet ved de ovenfor beskrevne metoder samt ved beregning af Eco-factor for hvert af de importerede datasæt. Der er således foretaget dynamiske beregninger med det udvidede Eco-factor-værktøj.

For den naturligt ventilerede bygning, er der foretaget følsomheds- og usikkerhedsanalyser af det udvidede Eco-factor-koncept. Disse er foretaget gennem en kobling af programmerne BSim og Matlab, der er udfærdiget i samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut (SBI). I følsomhedsanalysen blev de parametre, der har størst indflydelse på hhv. generel termisk komfort, energiforbrug og Eco-factor-score undersøgt. I usikkerhedsanalysen, blev det med baggrund i usikkerhederne ifm. estimering af de indgående parametre undersøgt, hvilke usikkerheder der er forbundet med langtidsevalueringen af den generelle termiske komfort, energiforbrug samt Eco-factor-score.

Det konkluderes, at den udvidede Eco-factor med mulighed for langtidsevaluering af termisk og atmosfærisk indeklime under hensyntagen til menneskelig adaptivitet giver mere detaljerede oplysninger om det oplevede indeklime ved påvirkning af mange parametre. Sammen med det faktum, at værktøjet er fleksibelt såvel som brugervenligt, vurderes det at værktøjet vil være attraktivt for rådgivende ingeniører, ved kvalitativ langtidsevaluering af en bygnings indeklimaydeevne.

Udover den udvidede metode for langtidsevaluering gennem Eco-factoren, er der i nærværende projekt også foretaget undersøgelser af en adaptiv kontrolalgoritme, hvor setpunktet for hhv. opvarmning og køling styres som funktion af udelufttemperaturen. Gennem føromtalt kobling mellem BSim og Matlab, har det været muligt at foretage computersimuleringer, hvor setpunktet for hhv. opvarmning og køling løbende er beregnet efter den udvalgte kontrolalgoritme. I tidligere undersøgelser af Nicol og McCartney [2001] samt McCartney og Nicol [2002] blev det fundet, at en sådan styring medfører store energibesparelser uden væsentlig påvirkning af det generelle oplevede termiske indeklime. I nærværende projekt, er der foretaget lignende undersøgelser gennem computersimuleringer i programmet BSim, hvor der kun blev fundet energibesparelser ved styring af setpunkter efter kontrolalgoritmen såfremt der sammenlignes med faste setpunkter for opvarmning og køling på ca. 23°C. Sammenlignet med konventionelle setpunkter iht. DS/EN ISO 7730 [2006] førte de af kontrolalgoritmen beregnede setpunkter til et øget energiforbrug for såvel opvarmning som køling. Det må nødvendigvis konkluderes, at en styring af setpunkterne efter den adaptive kontrolalgoritme i den udvalgte bygning, ikke vil føre til energibesparelser. Dog bør det nævnes, at det af tekniske årsager har været nødvendigt at foretage modificeringer af den opstillede BSim-model. Disse indebar bl.a. ændring fra drift med behovsstyret luftmængde til drift med konstant luftmængde. Simuleringerne viste dog, at en styring efter kontrolalgoritmen havde en positiv effekt på det forventede generelle termiske indeklime. Gennem langtidsevalueringer af den generelle termiske komfort blev det vist, at antallet af PPD-timer blev reduceret betydeligt ift. styring efter faste setpunkter.

I følgende kapitel 14 foretages en perspektivering, hvor forslag til det videre arbejde med de adaptive teorier og modeller diskuteres.

I nærværende projekt blev der foretaget litteraturstudier for at afdække stadiet for udviklingen af adaptive modeller med henblik på at undersøge hvorvidt disse kan benyttes ved evaluering af termisk komfort. Med baggrund i konklusionen i forrige kapitel, må det nødvendigvis erkendes, at status for forskningen ikke tilbyder færdige adaptive modeller af tilstrækkelig høj kvalitet for brug ved evaluering af generel termisk komfort. I de følgende underafsnit præsenteres de områder, hvor projektgruppen anbefaler der lægges størst vægt i det fremtidige arbejde ved udvikling af adaptive modeller samt indikatorer for bygningers indeklimaydeevne.

Langtidsevaluering - termisk komfort og menneskelig adaptivitet

Det må konstateres, at de adaptive modeller der er undersøgt i nærværende projekt kun er et skridt på vejen i retning af opstilling af modeller under hensyntagen til menneskelig adaptivitet. De opstillede modeller, dækker kun et smalt spektrum af de forskellige klimazoner, og yderligere forskning er nødvendig. Det er umiddelbart vanskeligt at forestille sig, at den kompleksitet der ligger i vurderingen af termisk komfort kan beskrives ved en simpel lineær funktion såfremt denne skal være langtidsholdbar. De adaptive modeller der er til rådighed på nuværende tidspunkt er begrænset af dels et snævert gyldighedsinterval samt en geografisk afgrænsning.

I projektet er validiteten af PMV-indekset undersøgt, og det er tydeligt, at indvirkningen fra den menneskelige adaptivitet er af stor betydning for den termiske oplevelse og dermed komfort. De største usikkerheder ved PMV-modellen er fastsættelsen af aktivitetsniveauet og beklædningsisolansen. Især beregningen af beklædningsisolansen kræver yderligere fokus. Samtlige af de i litteraturstudiet præsenterede undersøgelser viser beklædningsisolansens tydelige korrelation med både det termiske ude- og indeklima. De modeller der på nuværende tidspunkt er til rådighed er imidlertid ikke af tilstrækkelig kvalitet til direkte at benytte disse ved langtidsevaluering af termisk komfort. Det blev præsenteret i projektet, at det er af stor nødvendighed at medtage pumpeeffekten ved estimering af beklædningsisolansen. DS/EN ISO 7730 [2006] angiver metoder for beregning af dynamisk beklædningsisolans som funktion af den relative lufthastighed samt ganghastigheden, hvorved pumpeeffekten medtages. Endvidere er det umiddelbart svært at forestille sig, at beregningen af beklædningsisolansen i forskellige geografisk områder kan foretages gennem én universal model. Det er projektgruppens klare overbevisning, at før der kan laves standardiserede metoder for langtidsevaluering af termisk komfort, er det nødvendigt at undersøge og opstille detaljerede og standardiserede metoder til beregning af beklædningsisolansen under hensyntagen til den menneskelige adaptivitet samt geografisk placering.

De undersøgte metoder for langtidsevalueringer angivet i DS/EN ISO 7730 [2006] samt DS/EN 15251 [2007] kræver også yderligere forskning. Der skal opstilles vejledende krav til tilladte toleranceoverskridelser - f.eks. hvor mange PPD-timer over et givet niveau der bør tillades. Metoderne er i projektet blevet benyttet til langtidsevaluering af termisk komfort, og giver mere detaljerede oplysninger

om det oplevede termiske indeklima samt graden af diskomfort. Undersøgelser vedrørende toleranceoverskridelser er således af stor nødvendighed.

Det er projektgruppens opfattelse, at på trods af de påviste overestimeringer af den termiske oplevelse ved brug af PMV-modellen, er denne metode stadig den bedste til evaluering af det termiske indeklima. Det er imidlertid vigtigt, at disse overestimeringer undersøges grundigt, med henblik på en korrektion for den psykologiske adaptivitet. Dette kan enten gøres som Fanger og Toftum [2002] selv har foreslået (PMV_e), eller der skal udvikles en anden metode baseret på empiriske undersøgelser. Før PMV_e-modellen kan benyttes, skal der udføres mange flere studier af forventningsfaktoren, og hvilke værdier den kan antage i forskellige scenarier. En PMV_e-model kombineret med en model for dynamisk beregning af beklædningsisolansen som funktion af ude- og/eller indetemperaturen vil efter projektgruppens overbevisning være attraktivt at forfølge. De adaptive modeller for beklædningsisolansen skal endvidere være opdelt mht. geografi, arbejdsplads (dress-code etc.).

Lokale felter

I nærværende projekt er der hovedsageligt fokuseret på det generelle termiske indeklima. Yderligere undersøgelser af den lokale termiske diskomfort bør indeholde detaljerede undersøgelser af lokale felter gennem CFD-analyser. Lokal diskomfort indgår i beregningen af Eco-factoren, og for at optimere denne er det således nødvendigt at udføre CFD-analyser.

Indeklima og præstationsevne

Yderligere fokus bør rettes mod studier af indeklimaets indvirkning på den menneskelige præstationsevne. De modeller der er til rådighed er alle opstillet på baggrund af forsøg i enten klimakamre eller i skoler. Før modellerne kan benyttes er det således nødvendigt at foretage undersøgelser i kontorbygninger og lign. De indledende undersøgelser har imidlertid vist, at investeringer i et godt indeklima ikke kun har betydning for den enkelte bygnings økonomi, men i høj grad også i større skala (samfundsøkonomisk, BNP mv.).

Eco-factor

Den udvidede Eco-factor giver som tidligere beskrevet mulighed for langtidsevaluering af indeklimaets ydeevne. Det videre arbejde med den udvidede metode omfatter atmosfærisk indeklima og lokal termisk diskomfort. Begge områder kræver yderligere undersøgelser. Især ift. lokal termisk diskomfort hvor der er fundet beviser på, at personer ved stigende temperaturer ønsker højere lokal lufthastighed, og at der tillades øgede lufthastigheder såfremt disse er under personlig kontrol af den eksponerede.

I fremtiden, vil det endvidere være oplagt at implementere modeller for indeklimaets indvirkning på præstationsevnen, hvorved Eco-factoren kan benyttes til evaluering under hensyntagen til dette. Ved implementering af disse modeller, vil Eco-factor-værktøjets økonomiske vurderingsperspektiv blive styrket, og denne udvidelse vil åbne flere muligheder for evaluering af en bygnings indeklimaydeevne samt indvirkningen herpå ved forskellige tiltag.

I nærværende projekt blev der foretaget følsomhedsanalyser af den udvidede metode, ved brug af en naturligt ventileret bygning. Indenfor projektperioden har det ikke været tidsmæssigt muligt at foretage tilsvarende analyser på en mekanisk ventileret og kølet bygning. Det vil dog være interessant at se, hvorvidt det er de samme parametre der er af størst betydning for indeklimaydeevnen samt

energiforbruget i de to typer bygninger - evalueret gennem det udvidede Eco-factor-værktøj.

Adaptiv kontrolalgoritme

Undersøgelserne af den adaptive kontrolalgoritme viste, at en styring af setpunkterne for opvarmning og kølingen herefter, vil lede til at øget energiforbrug. Den udvalgte bygning er forsynet med talrige energibesparende funktioner i form af solafskærmning, solafskærmende glas, automatisk lysstyring efter belysningsniveauet i rummet, behovsstyret ventilation (VAV), PIR-følere mv., hvorfor energiforbruget til køling allerede er minimeret. Før en endelig konklusion kan drages vedr. løbende styring af setpunkterne som funktion af udelufttemperaturen, må der nødvendigvis foretages flere undersøgelser heraf.

Fremtidige udvidelser til BSim

Ved simuleringer i programmet BSim beregnes samtlige indvendige overfladetemperaturer for konstruktionerne. Muligheden for at kunne beregne strålingstemperasymmetrien i forskellige punkter i rummet, vil være oplagt at implementere. Gulvet kunne inddeles i et net, hvor vinkelforholdene mellem en fiktiv person/arbejdsplads og de enkelte rumflader kunne beregnes, hvorefter strålingstemperasymmetrien kunne beregnes. Det vil således være muligt at bestemme den lokale diskomfort herved, for udvalgte punkter i rummet. Det vil endvidere være oplagt, at implementere beregninger af PMV/PPD direkte i BSim, således programmet selv beregner disse. Eventuelt kunne disse beregninger kombineres med døgnprofiler for den menneskelige aktivitet. Ydermere vil beregningen af Eco-factoren, herunder de ifm. nærværende projekt implementerede udvidelser, være oplagt at implementere i programmet. Som omtalt i konklusionen, vil dette give mulighed for detaljerede og kvalitative vurderinger af bygningers ydeevne.

Litteratur

- Alfano, G. og d'Ambrosio, F. R. (1991). Clothing: An essential individual adjustment factor for obtaining general thermal comfort. *Environmental International*, 17:205-209.
- Andersen, K. T., Heiselberg, P. og Aggerholm, S. (2002). *By og Byg Anvisning 202: Naturlig ventilation i erhvervsbygninger - Beregning og dimensionering*. By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut, 1. udgave. ISBN 87-563-1128-1.
- ANSI/ASHRAE 55 (2004). *ASHRAE Standard - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISSN 1041-2336.
- Arbejdstilsynet - AT-vejledning A.1.2. (2008). Indeklima - vejledning om de hyppigste årsager til indeklimagener samt mulige løsninger. AT-vejledning A.1.2. "Arbejdsstedets indretning".
- ASHRAE (2005). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. <http://www.ashrae.org>. ISBN 1-931862-71-0.
- Ayyub, B. M. og McCuen, R. H. (1997). *Probability, Statistics, & Reliability for Engineers*. CRC Press, 1. udgave.
- Bako-Biro, Z. (2004). *Human perception, SBS symptoms and performance of office work during exposure to air polluted by building materials and personal computers*. Ph.d.-afhandling, International Centre for Indoor Environment and Energy. Technical university of Denmark.
- Bedford, T. (1936). The warmth factor in comfort at work. Report no. 76, Medical Research Council Industrial Health Board, HMSO, London.
- Beier, L. og Kuszon, L. (1992). Human response to draught and vertical temperature difference. M.sc. thesis, Technical University of Denmark. in danish.
- Bendtsen, A. og Sørensen, M. (2005). Usikkerhed i bygningssimulering. M.sc. thesis, Aalborg Universitet.
- Berg-Munch, B., Clausen, G. og Fanger, P. O. (1986). Ventilation requirements for the control of body odor in spaces occupied by women. *Environment International*, 12:195-199.
- Berglund, L. og Fobelets, A. (1987). Subjective human response to low-level air currents and asymmetric radiation. *ASHRAE Transactions*, 93(1):497-523.
- Bjørn, E., Wahlström, . og Brohus, H. (2004). Eco-factor method. IDEEB report no. 2, SP Swedish National Testing and Research Institute, Sweden. ISBN 91-7848974-1.

- Boerstra, A. C., Raue, A. K., Kurvers, S. R., van der Linden, A. C., Hogeling, J. J. N. M. og de Dear, R. J. (2003). A new dutch adaptive thermal comfort guideline. *Proceedings of Healthy Buildings*, side 743-748.
- BR08 (2008). *Bygningsreglement 2008*. Erhvervs- og Byggestyrelsen.
- Brager, G., de Dear, R. og Paliaga, G. (2004). Operable windows, personal control and occupant comfort. Final report ashrae rp-1161, Macquarie University, Sydney, Australia. www.cbe.berkeley.edu/research/pdf_files/Brager2004_OpWindows_Trans.pdf.
- Brohus, H. (1997). *Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms*. Ph.d.-afhandling, Aalborg University.
- Brohus, H. (2006). Combined optimisation of indoor environmental and energy consumption using the eco-factor. *Healthy Buildings*, side 219-224.
- Brohus, H., Bendtsen, A. og Sørensen, M. (2006). Comfort indicators for the assessment of indoor environmental building performance. *Proceedings of healthy buildings*, 3:169-174.
- Brohus, H. og Bjørn, E. (2006a). An iterative assessment concept for building design based on the eco-factor. *Journal of civil engineering and management*, 12(1):51-56.
- Brohus, H. og Bjørn, E. (2006b). Overall evaluation of indoor climate and energy for alternative office design using the eco-factor. *Journal of civil engineering and management*, 12(1):43-49.
- BSim vejledning (2005). *BSim Brugervejledning, version 5.7.1.19*. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI, Aalborg Universitet. <http://www.bsim.dk/>.
- Cain, W. S., Leaderer, B. P., Isseroff, R., Berglund, L. G., Hwey, R. J., Lipsitt, E. D. og Perlman, D. (1983). Ventilation requirements in buildings - i. control of occupancy odor and tobacco smoke odor. *Atmospheric Environment*, 17:1183-1197.
- Campolongo, F., Cariboni, J., Saltelli, A. og Schoutens, W. (2004). Enhancing the morris method. *European Commission, Joint Research Centre, Italy*, side 369-379. <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getdoc?event=SAMO2004&document=samo04-52.pdf>.
- Campolongo, F., Tarantola, S. og Saltelli, A. (1999). Tackling quantitatively large dimensionality problems. *Computer Physics Communications*, 17:75-85.
- Charles, K. E. (2003). Fanger's thermal comfort and draught models - irc-rr-162. Rapport, National Research Council Canada.
- CIBSE (1999). *Environmental factors affecting office worker performance: review of evidence*. Technical Memorandum TM24. ISBN 0900953950.
- Clausen, G., Carrick, L., Fanger, P. O., Kim, S. W., Poulsen, T. og Rindel, J. H. (1993). Forringet indeklima. en sammenlignende undersøgelse af diskomfort forårsaget af forringet luftkvalitet, termisk belastning og støj. *Byggeindustrien*, (5):12-15.
- Clements-Croome, D. J. (2000). Environmental quality and the productive workplace. Rapport, The University of Reading. <http://www.extra.rdg.ac.uk/ib/Links%20and%20Downloads/ENVIRONMENTAL%20QUALITY%20AND%20THE%20PRODUCTIVE%20WORKPLACE.pdf>.
- Dammann, S. (2004). *Environmental indicators for buildings*. Ph.d.-afhandling, By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut.

- de Dear, R., Brager, G. og Cooper, D. (1997). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. Final report ASHRAE RP-884, Macquarie University, Sydney, Australia. http://aws.mq.edu.au/rp-884/ashrae_rp884_home.html.
- de Dear, R. og Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ashrae standard 55. *Energy and Buildings*, 34:549-561.
- de Dear, R. og Morgan, C. (2003). Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate. *Climate Research*, 24:267-284.
- de Dear, R. J. (1998). A global database of thermal comfort field experiments. *ASHRAE Transactions*, 104(1):1141-1152.
- Dinesen, J., Hansen, A. og Trelldal, J. (2001). *Miljødeklarering og -klassificering af bygninger*. By og Byg, 1. udgave. ISBN 87-563-1104-4.
- DMI (2008). Danmarks Meteorologiske Institut. www.dmi.dk.
- DR-byen (2003). Miljødeklarering og -klassificering af dr-byen. http://www.sbi.dk/download/pdf/miljoedekl_af_tv-byen.pdf.
- DS 418 (2002). *Beregning af bygningers varmetab*. Dansk Standard, 6. udgave.
- DS 447 (2005). *Norm for mekaniske ventilationsanlæg*. Dansk Standard, 2. udgave.
- DS 474 (1993). *Norm for specifikation af termisk indeklima*. Dansk Standard, 1. udgave.
- DS/CEN/CR 1752 (2001). *Ventilation i bygninger - Projekteringskriterier for indeklimaet*. Dansk Standard.
- DS/EN 15251 (2007). *Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik*. Dansk Standard, 1. udgave.
- DS/EN ISO 7730 (2006). *Ergonomi indenfor termisk miljø - Analytisk bestemmelse og fortolkning af termisk komfort ved beregning af PMV- og PPD-indekser og lokale termiske komfortkriterier*. Dansk Standard, 2. udgave.
- DS/EN/ISO 8996 (2004). *Ergonomi - Termisk miljø - Bestemmelse af varmeproduktion ved stofskifte*. Dansk Standard, 1. udgave.
- DS/EN/ISO 9920 (2007). *Ergonomi - Termisk miljø - Vurdering af et beklædningsstykkets termiske isolation og fordampningsmodstand*. Dansk Standard, 1. udgave.
- Energistyrelsen (2008). Aftale mellem regeringen (venstre og det konservative folkeparti), socialdemokraterne, dansk folkeparti, socialistisk folkeparti, det radikale venstre og ny alliance om den danske energi-politik i årene 2008-2011. <http://www.ens.dk/sw65608.asp>.
- Fanger, P. O. (1972). *Thermal Comfort - Analysis and Applications in Indoor Environmental Engineering*. McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-019915-9.
- Fanger, P. O. og Christensen, N. K. (1986). Perception of draught in ventilated spaces. *Ergonomics*, 29:215-235.
- Fanger, P. O., Melikov, A. K., Hanzawa, H. og Ring, J. (1988). Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12:21-39.

- Fanger, P. O. og Toftum, J. (2002). Extension of the pmv model to non-air-conditioned buildings in warm climates. *Energy and Buildings*, 34:533-536.
- Federspiel, C. C., Fisk, W. J., Price, P. N., Liu, G., Faulkner, D., Dibartolomeo, D. L., Sullivan, D. P. og Lahiff, M. (2004). Worker performance and ventilation in a call center: analyses of work performance data for registered nurses. *Proceedings of Indoor Air*, 14:41-50.
- Fiala, D., Lomas, K. J. og Stohrer, M. (1999). A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*, 87:1957-1972.
- Fisk, W., Seppänen, O. og Faulkner, D. (2003). Cost benefit analysis of the night-time ventilative cooling in office buildings. *Proceedings of the Healthy Buildings*, 2:394-399.
- Fountain, M., Arens, E., de Dear, R. J., Bauman, F. og Miura, K. (1994). Locally controlled air movement preferred in warm isothermal environments. *ASHRAE Transactions*, 100(2):937-952.
- Gagge, A. P., Burton, A. C. og Bazett, H. D. (1941). A practical system of units for the description of the heat exchange of man with his environment. *Science*, 94:428-430.
- Gagge, A. P., Fobelets, A. P. og Berglund, L. G. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Transactions*, 92(2).
- Goto, T., Toftum, J., de Dear, R. og Fanger, P. O. (2002). Thermal sensation and comfort with transient metabolic rates. *Proceedings of Indoor Air*, side 1038-1043.
- Griefahn, B., KuKnemund, C. og Gehring, U. (2001). The impact of draught related to air velocity, air temperature and workload. *Applied Ergonomics*, 32:407-417.
- Griefahn, B., Künemund, C., Gehring, U. og Mehnert, P. (2000). Drafts in cold environments - the significance of air temperature and direction. *Industrial Health*, 38:30-40.
- H., B. og A., J. (2004). Uncertainty and sensitivity analysis of the performances of natural night ventilation. *Proceedings of Roomvent 2004, 9th International Conference on Air Distribution in Rooms, Coimbra, Portugal, 5 Ú 8 September*.
- Haldi, F. og Robinson, D. (2008). On the behaviour and adaptation of office occupants. *Building and Environment*. Acceptoreret manuskript.
- Hansen, H. E., Kjerulf-Jensen, P. og Stampe, O. B. (1997). *Danvak Grundbog - Varme- og klimateknik*. Danvak ApS, 2. udgave. ISBN 87-982652-8-8.
- Hanssen, S. O. (1997). Economical consequences of poor indoor air quality and its relation to the total building operation costs. *Proc. EuroFM/IFMA Conference And Exhibition, Torino, Italy. pp. 1-21, International Facility Management Association*.
- Havenith, G., Holmér, I., den Hartog, E. og Parsons, K. (1999). Clothing evaporative heat resistance - proposal for improved representation in standards and models. *Annals of Occupational Hygiene*, 43(5):329-337,339-346.
- Havenith, G., Holmér, I. og Parsons, K. (2002). Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and Buildings*, 34:581-591.
- Holck, O. og Rode, C. (2004). Overraskende resultater fra målinger af ydervægges isoleringsevne. *HVAC magasinet*, 40(10):14-19.

- Holmér, I., Nilsson, H., Havenith, G. og Parsons, K. (1999). Clothing convective heat resistance - proposal for improved prediction in standards and models. *Annals of Occupational Hygiene*, 43(5):329-337.
- Houghten, F. C. og Yaglou, C. P. (1923). Determination of the comfort zone - research report no. 673. *ASHVE Transactions*, 29:361.
- Humphreys, M. A. (1973). Clothing and comfort of secondary school children in summertime. thermal comfort and moderate heat stress. *proceedings of CIB commission W45 (Human Requirements)*, HMSO, London.
- Humphreys, M. A. (1975). Field studies of thermal comfort compared and applied - department of the environment. Current paper cp 76/75, Building Research Establishment, Watford, UK.
- Humphreys, M. A. (1978). Outdoor temperatures and comfort indoors. *Building Research and Practice (Journal of CIB)*, 6:92-105.
- Humphreys, M. A. (1981). The dependence of comfortable temperature upon indoor and outdoor climate. *Thermal Physiology and Comfort*, Elsevier, London:229-250.
- Humphreys, M. A. (1990). Thermal comfort of office workers. *Journal of the Institution of Heating and Ventilating Engineers*, 30:181-189.
- Humphreys, M. A. og Hancock, M. (2007). Do people like to feel 'neutral'? exploring the variation of the desired thermal sensation on the ashrae scale. *Energy and Buildings*, 39:867-874.
- Humphreys, M. A. og Nicol, J. F. (1995). *An adaptive guideline for UK office temperatures. in Standards for thermal comfort: indoor air temperature standards for the 21st century. (Ed. Nicol J.F., Humphreys M.A., Sykes O. and Roaf S.)*. E and FN Spon, London.
- Humphreys, M. A., Nicol, J. F. og Iftikhar, A. R. (2007). Field studies of indoor thermal comfort and the progress of the adaptive approach. *Advances in building research*, 1:55-88.
- INDCRIT07 (2007). *Proposal for Coordination Project on Indoor Environmental Performance Criteria*. Olesen, B.W.
- Iwashita, G., Kimura, K., Tanabe, S., Yoshizawa, S. og Ikeda, K. (1990). Indoor air quality assessment based on human olfactory sensation. *Journal of Archit Plann Environ Engng, AIJ.*, 410:9-19.
- Joint Research Centre (2004). Joint research centre of the european commission, ispra, italien. <http://sensitivity-analysis.jrc.cec.eu.int/>.
- Kaczmarczyk, J., Melikov, A. og Fanger, P. O. (2004). Human response to personalized ventilation and mixing ventilation. *Proceedings of Indoor Air*, 14:17-29.
- Kurvers, S. R., Raue, A. K., van der Linden, K., Plokker, W. og Boerstra, A. C. (2006). Adaptive thermal comfort set to practice: Considerations and experiences with the new dutch guideline. *Healthy Buildings*, side 87-92.
- Larsen, T. S., Jensen, R. L. og Kalyanova, O. (2006). Indeklimaundersøgelse hos københavns energi. Rapport, Aalborg Universitet.
- Lund, H. (1985). Short reference years and test reference years for EEC countries. Final report, Technical University of Denmark.

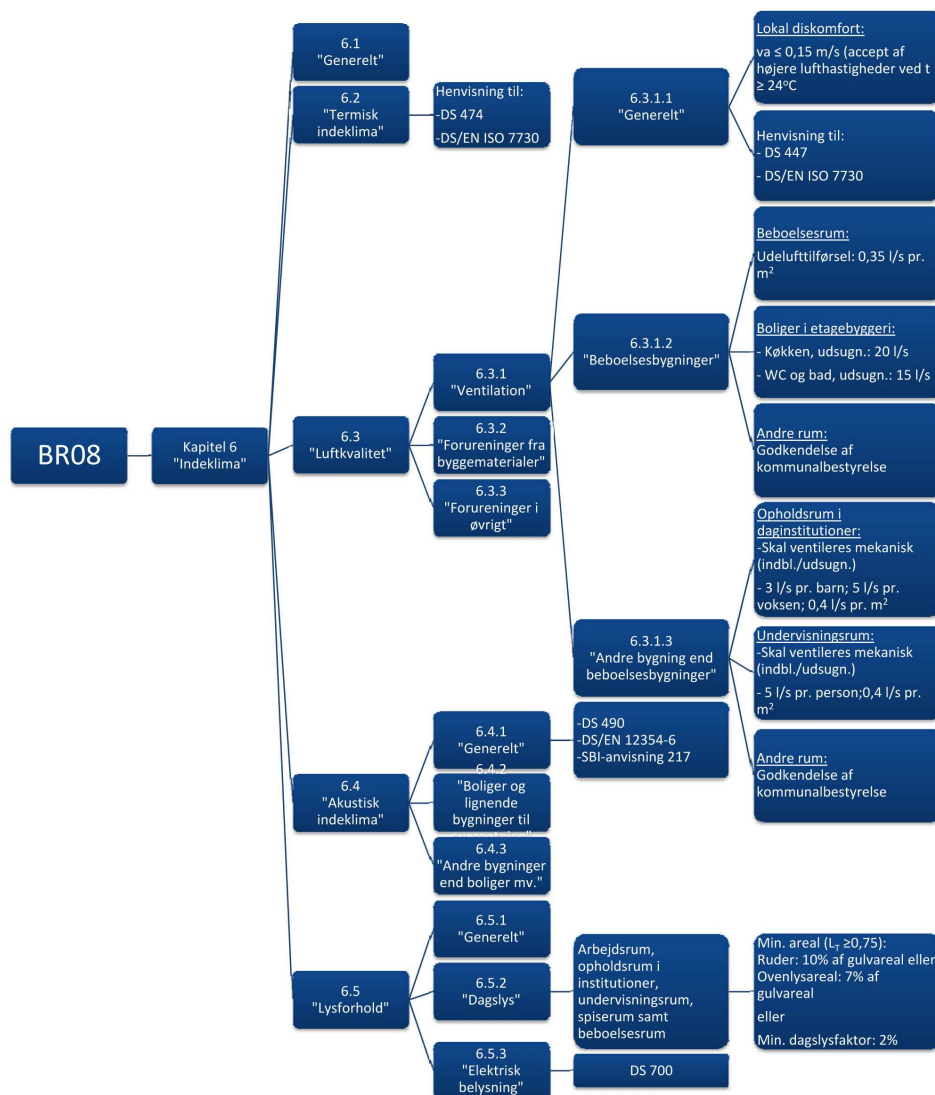
- Macdonald, A. I. (2002). *Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation*. Ph.d.-afhandling, Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde.
- Malkawi, A. M. og Augenbroe, G. (2004). *Advanced Building Simulation*. Taylor & Francis. ISBN 0415321220.
- McCartney, K. J. og Nicol, J. F. (2002). Developing an adaptive control algorithm for europe. *Energy and Buildings*, 34:623-635.
- Morgan, C. A., de Dear, R. og Brager, G. (2002). Climate, clothing and adaptation in the built environment. *Proceedings of Indoor Air*, 5:98-103.
- Morris, M. D. (1991). Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. *Technometrics*, 33(2):161-174. <http://www.jstor.org/pss/1269043>.
- Newsham, G. (1997). Clothing as a thermal moderator and the effect on energy consumption. *Energy and Buildings*, 26:283-291.
- Nicol, J. F. (2000). *Time and thermal comfort, evidence from the field in Renewables: the energy for the 21st century*. Pergamon Press. part 1, s. 477-482. ISBN 0-080-43865.
- Nicol, J. F. og Humphreys, M. A. (2002a). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34:563-572.
- Nicol, J. F. og Humphreys, M. A. (2002b). The validity of iso-pmv for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, 34:667-684.
- Nicol, J. F. og Humphreys, M. A. (2007). Maximum temperatures in european office buildings to avoid heat discomfort. *Solar Energy*, 81:295-304.
- Nicol, J. F. og McCartney, K. J. (2001). SCATs: Final Report - Public. Rapport, Oxford Brookes University, UK.
- Nicol, J. F. og Raja, I. A. (1996). Thermal comfort, time and posture: exploratory studies in the nature of adaptive thermal comfort. Rapport, School of Architecture, Oxford Brookes University.
- Nicol, J. F., Raja, I. A., Allaudin, A. og Jamy, G. N. (1999). Climatic variations in comfortable temperatures: the pakistan projects. *Energy and Buildings*, 30:261-279.
- Niemelä, R., Hannulab, M., Rautioa, S., Reijulaa, K. og Railioc, J. (2002). The effect of air temperature on labour productivity in call centres - a case study. *Energy and Buildings*, 34:754-764.
- Niemelä, R., Seppänen, O. og Reijula, K. (2003). Prevalence of sbs-symptoms as an indicator of health and productivity in office buildings. *Proceedings of Healthy Buildings*, side 251-255.
- Olesen, B. W. (2000a). Guidelines for comfort. *ASHRAE Journal*, 42(8):41-46.
- Olesen, B. W. (2000b). Indoor environment-health-comfort and productivity. Rapport, Technical University of Denmark.
- Olesen, B. W. (2004). International standards for the indoor environment. *Proceedings of Indoor Air*, 14:18-26.
- Olesen, B. W. (2007). The philosophy behind en 15251: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings. *Energy and Buildings*, 39:740-749.

- Olesen, B. W. og Boerstra, A. (2005). "Criteria for the indoor environment including thermal, indoor air quality, light and noise". REHVA Seminar, CLIMA2005. http://www.rehva.com/?download=6a_EPBD-WI31-indoor_environment_Bjarne_W._Olesen.pdf.
- Olesen, B. W. og Parsons, K. C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of en iso 7730. *Energy and Buildings*, 34:537-548.
- Olesen, B. W., Seppänen, O. og Boerstra, A. (2006). Criteria for the indoor environment for energy performance of buildings - a new european standard. *Facilities*, 24:445-457.
- Parsons, K. C. (2003). *Human Thermal Environments - The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance*. Taylor & Francis, London, 2. udgave. ISBN 0-415-23793-9.
- Pellerin, N. og Candas, V. (2003). Combined effects of temperature and noise on human discomfort. *Physiology & Behavior*, 78:99-106.
- Prek, M. (2005). Thermodynamic analysis of human heat and mass transfer and their impact on thermal comfort. *International Journal of Heat Mass Transfer*, 48:731-739.
- Roelofsen, P. (2002). The impact of office environments on employee performance: The design of the workplace as a strategy for productivity enhancement. *Journal of Facilities Management*, 1(3):247-264.
- Roluet, C. A. (2001). Indoor environment quality in buildings and its impact on outdoor environment. *Energy and Buildings*, 33:183-192.
- S., A. og Grau, K. (2005). *Bygningers energibehov - beregningsvejledning*. Statens Byggeforskningsinstitut, vers. 1.03.06. udgave.
- Saltelli, A., Chan, K. og Scott, E. M. (2000). *Sensitivity Analysis: Gauging the Worth of Scientific Models*. John Wiley & Sons, 1. udgave. ISBN 978-0-471-99892-1.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F. og Retto, M. (2004). *Sensitivity Analysis In Practice - A Guide to Assessing Scientific Models*. John Wiley & Sons, 1. udgave. ISBN 0470870931.
- Seppänen, O. (1999). Estimated cost of indoor climate in finnish buildings. *Proceedings of healthy buildings*, 3:13-18.
- Seppänen, O. og Fisk, W. J. (2005). Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health. *Proceedings of Indoor Air*, 16:40-53.
- Seppänen, O., Fisk, W. J. og Lei, Q. H. (2006a). Room temperature and productivity in office work. Rapport, University of California.
- Seppänen, O., Fisk, W. J. og Lei, Q. H. (2006b). Ventilation and performance in office work. *Proceedings of Indoor Air*, 16:28-36.
- Simlab (2007). *Simlab User manual*. European Commission, Joint Research Centre.
- Simonsen, A. og Sørensen, K. C. (2007). Usikkerhed ved energiforbruget i danmark. M.sc. thesis, Aalborg Universitet.
- Tham, K. W. og Willem, H. C. (2004). Effects of reported neurobehavioral symptoms on call center operator performance in the tropics. *Proceedings of RoomVent*.

- Toftum, J. (1994). A field study on draught complaints in the industrial environment. *ICEE '94 6th International Conference on Environmental Ergonomics. Quebec, Canada*, side 252-254.
- Toftum, J. (2002). Human response to combined indoor environment exposures. *Energy and Buildings*, 34:601-606.
- Toftum, J. (2004). Air movement - good or bad? *Indoor Air*, 14:40-45.
- Toftum, J. og Nielsen, R. (1996). Draught sensitivity is influenced by general thermal sensation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 18:295-305.
- van der Linden, A. C., Boerstra, A. C., Raue, A. K., Kurvers, S. R. og de Dear, R. J. (2006). Adaptive temperature limit: A new guideline in the netherlands. a new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate. *Energy and Buildings*, 38:8-17.
- van der Linden, K., Boerstra, A. C., Raue, A. K. og Kurvers, S. R. (2002). Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response. *Energy and Buildings*, 34:737-744.
- van Hoof, J. og Hensen, J. L. M. (2007). Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. *Building and Environment*, 42:156-170.
- Wargocki, P., Seppänen, O., Andersson, J., Boerstra, A., Clements-Croome, D., Fitzner, K. og Hanssen, S. O. (2006). *Rehva Guidebook no. 6 - Indoor Climate and Productivity in Offices*. Rehva. ISBN 2-9600468-5-4.
- Wargocki, P., Wyon, D. P., Baik, Y. K., Clausen, G. og Fanger, P. O. (1999). Perceived air quality, sick building syndrome (sbs) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Proceedings of Indoor Air*, 9:165-179.
- Wargocki, P., Wyon, D. P. og Fanger, P. O. (2000a). Pollution source control and ventilation improve health, comfort and productivity. *Proceedings of Cold Climate HVAC'2000*, side 445-450.
- Wargocki, P., Wyon, D. P., Sundell, J., Clausen, G. og Fanger, P. O. (2000b). The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (sbs) symptoms and productivity. *Proceedings of Indoor Air*, 10:222-236.
- WHO (1982). Indoor air pollutants: Exposure and health effects. Euro reports and studies no. 78, World Health Organization Regional Office for Europe, Copenhagen.
- Wyon, D. P. (2004). The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Proceedings of Indoor Air*, 14:92-101.

Skematisk opstilling af krav i BR08

A



Figur A.1: Skitsering af krav til indeklima angivet i BR08 [2008, kap. 6]. Specifikke krav til akustik og kunstig belysning er ikke medtaget

Termisk komfort

B

De i nærværende projekt behandlede komfort-indicier, PMV/PPD, er opstillet på baggrund af en rationel opstillet model for termisk komfort. Modellen tager udgangspunkt i menneskets varmebalance med omgivelserne, og vil i nærværende appendiks blive præsenteret og diskuteret i detaljer. Det følgende er baseret på Fanger [1972].

B.1 MODEL FOR TERMISK KOMFORT

Termisk komfort er defineret som den tilstand hvor kroppens interne varmeproduktion er i ligevægt med varmetabet til omgivelserne, og derfor udtrykker det oplevede indeklime i forhold til en persons beklædningsniveau, aktivitetsniveau (metabolisme) og dermed termiske tilstand. De vigtigste parametre i forhold til termisk komfort er [Fanger, 1972, s. 15]:

- Aktivitetsniveau (intern varmeproduktion)
- Termisk modstand i beklædning
- Lufttemperatur
- Middelstrålingstemperatur
- Relativ lufthastighed
- Luftfugtighed

Som funktion af aktivitetsniveauet har middeltemperaturen af menneskets hud samt svedafgivelsen vist sig at være tæt knyttet til den termiske komfort. Disse benyttes derfor som grundlæggende betingelser og kan sammen med kroppens varmebalance danne grundlag for en samlet komfortligning indeholdende de ovennævnte parametre, hvilke har indflydelse på den termiske komfort.

I modsætning til tidligere studier, der præsenterede resultater baseret på konstante værdier af aktivitetsniveau, beklædning etc., udleder Fanger [1972] metoder til estimering af termisk komfort ud fra et givet aktivitetsniveau og beklædningsisolans samt forskellige kombinationer af de fire ovennævnte indeklimaparametre. Grundlæggende er metoden baseret på opretholdelsen af tre grundlæggende betingelser for optimal termisk komfort:

1. Varmebalance
2. Hudtemperatur (varmetab ved stråling)
3. Svedafgivelse (varmetab gennem fordampning)

Da effektiviteten af menneskets termoreguleringsystem er højt, vil der på trods af manglende termisk komfort stadig kunne opnås varmebalance med omgivelserne. Derfor er varmebalancen i punkt 1

ikke alene et fyldestgørende kriterie ved estimering af det termiske komfortniveau. På baggrund af ovenstående opstiller Fanger [1972] følgende ligning for varmebalancen:

$$f\left(\frac{H}{A_{Du}}, I_{cl}, t_a, t_{rmt}, p_a, v, t_s, \frac{E_{sw}}{A_{Du}}\right) = 0 \quad (\text{B.1})$$

hvor

$\frac{H}{A_{Du}}$	=	Intern varmeproduktion pr. enhed overfladeareal af kroppen
A_{Du}	=	DuBois-areal, $A_{Du} = 0,20236 \cdot W_e^{0,425} \cdot H_e^{0,725}$ [m^2]
W_e	=	Personens vægt [kg]
H_e	=	Personens højde [m]
I_{cl}	=	Beklædningsisolans [$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$]
t_a	=	Lufttemperatur af omgivende luft [$^\circ C$]
t_{rmt}	=	Middelstrålingstemperatur [$^\circ C$]
p_a	=	Vanddampstryk i omgivende luft [Pa]
v	=	Relativ lufthastighed [$\frac{m}{s}$]
t_s	=	Middeltemperatur af hud [$^\circ C$]
$\frac{E_{sw}}{A_{Du}}$	=	Varmetab pr. enhed overfladeareal af kroppen gennem fordampning af sved

Hudtemperaturen og varmetabet som følge af svedfordampning er beskrevet ved ligningerne (B.2) og (B.3) fundet ved forsøg, hvor de to parametre er blevet målt ved varierende aktivitetsniveauer:

$$t_s = f\left(\frac{H}{A_{Du}}\right) \quad (\text{B.2})$$

$$E_{sw} = A_{Du} \cdot f\left(\frac{H}{A_{Du}}\right) \quad (\text{B.3})$$

Ved at benytte dette i ligning (B.1) fås den endelige komfortligning (B.4):

$$f\left(\frac{H}{A_{Du}}, I_{cl}, t_a, t_{rmt}, p_a, v\right) = 0 \quad (\text{B.4})$$

Ved brug af ligning (B.4) er det således muligt ved et givet aktivitetsniveau ($\frac{H}{A_{Du}}$) samt beklædning (I_{cl}) at beregne samtlige kombinationer af lufttemperatur (t_a), middelstrålingstemperatur (t_{rmt}), vanddampstrykket (p_a) samt relativ lufthastighed (v), hvilke tilsammen vil skabe optimal termisk komfort.

I det følgende gennemgås og diskuteres de enkelte elementer og parametre, der indgår i komfortligningen. Dette er vigtigt for forståelsen af menneskets termiske komfort, og i relationen til det videre arbejde med estimering, evaluering og klassificering af indeklimaet. Udledningen af de enkelte bidrag til menneskets varmebalance er ikke præsenteret i nærværende afsnit, men der henvises til Fanger [1972] for mere information herom.

B.1.1 VARMEBALANCE

Menneskets termoreguleringssystem tilstræber kontinuert en konstant kropstemperatur. Det er således forventet, at efter en given mængde tid i et moderat termisk miljø ved en konstant metabolisme, vil der forekomme varmebalance mellem kroppen og omgivelserne. Dette kan beskrives ved følgende:

$$\begin{aligned}
 H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L &= R + C & (B.5) \\
 \Downarrow \\
 H &= \underbrace{E_d + E_{sw}}_{\text{Fordampning}} + \underbrace{E_{re} + L}_{\text{Respiration}} + \underbrace{R + C}_{\text{Strlingogkonvektion}}
 \end{aligned}$$

hvor

H	=	Intern varmeproduktion
E_d	=	Varmetab ved diffusion af vanddamp gennem huden
E_{sw}	=	Varmetab ved fordampning af sved fra overfladen af huden
E_{re}	=	Varmetab ved respiration
L	=	Varmetab ved tør respiration
R	=	Varmetab ved stråling fra den ydre overflade af den beklædte krop
C	=	Varmetab ved konvektion fra den ydre overflade af den beklædte krop

Som det fremgår af ovenstående ligning, er varmetabet ved ledning ikke medtaget. Dette bør dog kommenteres idet varmetabet via ledning for f.eks. siddende personer er større end for f.eks. stående personer. Modsat vil beklædningsisolansen for en siddende person øges som følge af stolen, og ydermere vil det konvektive varmetab reduceres for det område af kroppen som stolen dækker, hvilket medfører et mindre varmetab. Det kan umiddelbart ikke vurderes hvorvidt dette vil føre til et øget eller formindsket varmetab. Dette vil kræve nærmere studier bl.a. med inkludering af varmetabet ved ledning givet ved Fouriers varmeledning ligning:

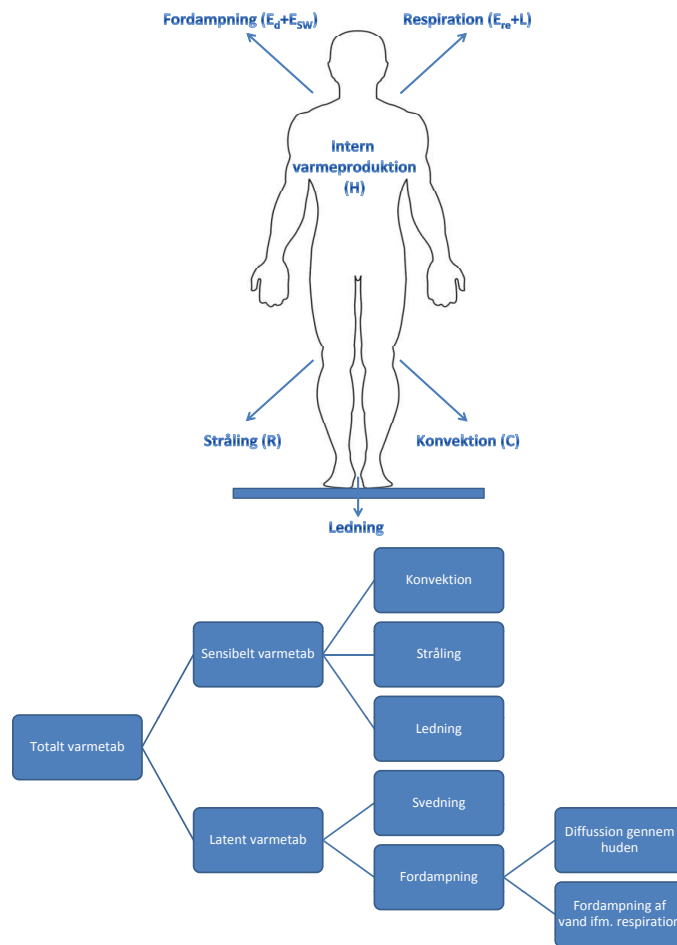
$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau} = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \cdot A \quad (B.6)$$

$$(B.7)$$

hvor

Φ	=	Varmestrømmen	$[W]$
Q	=	Varmemængden	$[J]$
τ	=	Tid	$[s]$
λ	=	Varmekonduktiviteten	$[\frac{W}{m \cdot K}]$
A	=	Arealet	$[m^2]$

Ligning (B.5) er illustreret ved følgende figur B.1.



Figur B.1: Menneskets varmebalance (efter Brohus [1997]. Varmetabet ved ledning medtager ikke i varmebalancen i dette tilfælde.)

For at forstå de enkelte parametres indflydelse på menneskets varmebalance, vil disse i det følgende blive beskrevet.

Intern varmeproduktion, H

I en proces hvor energi omsættes i kroppen, tilstræber menneskets autonome funktioner at opretholde en indre kropstemperatur på ca. 37°C. Denne omsætning af energi afhænger af aktivitetsniveauet. Således vil et lavt aktivitetsniveau medføre en lav forbrænding af energi (og dermed intern varmeudvikling), hvilket igen medfører at blodkarrene i kroppens yderpunkter - dvs. hænder og fødder - trækker sig sammen hvilket vil afstedkomme en lavere overfladetemperatur på huden med diskomfort til følge. Menneskets krop frigør ved omsætningsprocesser af ilt og mad en vis mængde energi, der delvist frigøres til ydre mekanisk arbejde men primært intern varme. Den interne varmeproduk-

tion kan i grundform beskrives ved:

$$M = H + W \quad (\text{B.8})$$

og udtrykt ved systemets virkningsgrad, η :

$$H = M \cdot (1 - \eta) \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{H}{A_{Du}} = \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) \text{ udtrykt per enhed kropsareal} \quad (\text{B.10})$$

hvor

M	=	Metabolisme	[W]
H	=	Intern varmereproduktion	[W]
W	=	Ydre mekanisk arbejde	[W]
η	=	Systemets virkningsgrad bestemt ved $\eta = \frac{W}{M}$	[-]

Virkningsgraden, η , ligger i intervallet 0-25% , hvor en virkningsgrad på 0 optræder ved stillesiddende arbejde og gradvist stiger i takt med en øgning af aktivitetsniveauet og derved metabolismen [Havenith et al., 2002; Fanger, 1972, s. 588; s. 27]. Dog kan virkningsgraden godt antage værdier mindre end 0. Dette forekommer f.eks. når en person går ned ad en bakke. Den potentielle energi oplagret i personen omdannes til varmeenergi i led (friktion) og muskler. På baggrund af forsøg er metabolismen samt virkningsgraden undersøgt og tabelleret - kategoriseret efter aktivitet. Et uddrag herfra er vist i følgende tabel B.1.

Tabel B.1: Metabolisme samt mekanisk virkningsgrad ved forskellige aktiviteter (uddrag fra [Fanger, 1972, tabel 1, s. 24-26])

Aktivitet	Metabolisme $\frac{W}{m^2} / met$	Mekanisk virkningsgrad, η	Relativ hastighed i stillestående luft $\frac{m}{s}$
Indkøb	93 / 1,6	0	0,2-1
<i>Kontorarbejde</i>			
Maskinskrivning, 30 ord pr. min.	52 / 0,9	0	0,05
Maskinskrivning, 40 ord pr. min.	58 / 1,0	0	0,05
Regnemaskine	70 / 1,2	0	0
Forsk. kontorarb. (arkivering etc.)	58-70 / 1,0-1,2	0	0-0,1
<i>Fritidsaktiviteter</i>			
Gymnastik	174-233 / 3,0-4,0	0-0,1	0,5-2
Dans	140-256 / 2,4-4,4	0	0,2-2
Tennis	268 / 4,6	0-0,1	0,5-2
Fægtning	407 / 7,0	0	0,5-2
Squash	419 / 7,2	0-0,1	0,5-2
Basketball	442 / 7,6	0-0,1	1-3
Brydning	506 / 8,7	0-0,1	0,2-0,3

Varmetab gennem huden ved fordampning, E_d

Varmetab gennem huden sker som følge af fordampning gennem huden ved diffusion, og er antaget proportional med forskellen mellem det mættede vanddampstryk ved hudtemperaturen og det partielle vanddampstryk i den omgivende luft, hvilket er udtrykt ved:

$$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot A_{Du} \cdot (256 \cdot t_s - 3373 - p_a) \quad (\text{B.11})$$

hvor

$$\begin{aligned} E_d &= \text{Varmetab ved fordampning gennem huden} & [W] \\ A_{Du} &= \text{DuBois-areal (se ligning (B.1))} & [m^2] \\ p_a &= \text{Vanddampstryk i omgivende luft} & [Pa] \end{aligned}$$

Varmetab ved fordampning af sved, E_{sw}

Ved afgivelse af sved, vil den varme der er bundet i svedsekretet ved fordampning blive afgivet til den omkringliggende luft. For personer i termisk komfort med normal svedafgivelse i moderate lufttemperaturer, antages det at al sved fordampes. Mængden af varmetab ved fordampning af sved beregnes på baggrund af empirisk formel, der omtales senere i afsnit B.1.2.

Varmetab gennem respiration (latent), E_{re}

Ved indånding af luft opstår der udveksling af varme og fugt mellem den indåndede luft og kroppen. Indåndingsluften varmes op og befugtes, hvorved der ved udånding sker et varmetab opdelt i dels latent (bundet i den fugtige luft) og tørt varmetab. Varmetabet som følge af respiration er afhængigt af lungeventilationen samt fugtigheden af dels indåndings- samt udåndingsluften. Ved at udtrykke lungeventilationen som funktion af aktivitetsniveauet og udtrykke forskellen i fugtigheden af indåndings- og udåndingsluften som en funktion af partialtrykket i den indåndede luft, kan varmetabet gennem respiration udtrykkes ved følgende:

$$E_{re} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) \quad (\text{B.12})$$

hvor

$$\begin{aligned} E_{re} &= \text{Varmetab gennem respiration} & [W] \\ M &= \text{Metabolisme} & [W] \\ p_a &= \text{Vanddampstryk i omgivende luft} & [Pa] \end{aligned}$$

Varmetab - tør respiration, L

Varmetabet som følge af en temperaturforskel mellem ind- og udåndingsluften er i komfortligningen baseret på en konstant temperatur af udåndingsluften på 34°C. Denne estimation af udåndingsluftens temperatur er præcis nok, idet varmetabet ved tør respiration er minimalt i forhold til de resterende

varmetab fra kroppen. Varmetabet ved tør respiration kan beregnes ved:

$$L = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \quad (\text{B.13})$$

hvor

L	=	Varmetab gennem tør respiration	[W]
M	=	Metabolismen	[W]
t_a	=	Lufttemperatur af omgivende luft	[°C]

Varmeledning gennem tøj, K

Varmeledning gennem tøj er kompliceret at beregne med nøjagtighed. Denne afhænger dels af tøjets isoleringsevne, lufthastigheden omkring den beklædte krop mv. Varmeafgivelsen fra overfladen af kroppen - dvs. huden - til overfladen af tøjet kan beregnes ved:

$$K = A_{Du} \cdot \frac{t_s - t_{cl}}{I_{cl}} \quad (\text{B.14})$$

hvor

K	=	Varmetab gennem tøj	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (se ligning (B.1))	[m ²]
t_s	=	Overfladetemperaturen af huden	[°C]
t_{cl}	=	Udv. overfladetemperatur af tøjet	[°C]
I_{cl}	=	Beklædningsisolans	[$\frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{W}}$]

Forsøg har vist at materialet i sig selv ikke er af afgørende betydning for den termiske modstand af tøjet der først og fremmest afhænger af tykkelsen af de enkelte lag. På baggrund af forsøg, hvor beklædningsisolanser er målt ved brug af termisk manikin, er disse tabelleret til brug ved beregning af varmeledningen gennem tøj (se f.eks. [DS/EN ISO 7730, 2006, Anneks C s. 19]).

Varmetab ved stråling, R

Varmetab ved stråling forekommer mellem kroppen og omgivelserne. Strålingsudvekslingen er afhængig af temperaturforskellen mellem kroppen og omgivelserne, kropsbygningen, kroppspositionen samt beklædningen. Beregning af varmetabet ved stråling fra overfladen af den beklædte krop til omgivelserne, kan foretages ved følgende ligning baseret på Stefan-Boltzmann's lov om varmestråling:

$$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot A_{Du} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4] \quad (\text{B.15})$$

hvor f_{cl} beregnes efter [Hansen et al., 1997, A.01.02 s. 462]:

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,29 \cdot I_{cl} & \text{for } I_{cl} < 0,078 \\ 1,05 + 0,654 \cdot I_{cl} & \text{for } I_{cl} \geq 0,078 \end{cases}$$

(B.16)

og

R	=	Varmetab ved stråling	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (se ligning (B.1))	[m ²]
f_{cl}	=	Forhold mellem overfladeareal af beklædt krop og nøgen krop	[-]
t_{cl}	=	Overfladetemperaturen af tøjjet	[°C]
t_{rmt}	=	Middelstrålingstemperaturen	[°C]

Varmetab ved konvektion, C

Det konvektive varmetab fra en person til omgivelserne forekommer enten ved fri eller tvungen konvektion. Fri konvektion forekommer i de tilfælde, hvor lufthastigheden af den omgivende luft er meget lav (stillestående luft). Omvendt vil der i situationer, med stigende lufthastigheder forekomme tvungen konvektion. Hvorvidt der eksisterer fri eller tvungen konvektion, har stor indflydelse på varmetabet fra personer ved konvektion, der kan beregnes ved følgende:

$$C = A_{Du} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a) \quad (\text{B.17})$$

hvor

C	=	Varmetab ved konvektion	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (se ligning (B.1))	[m ²]
f_{cl}	=	Forhold mellem overfladeareal af beklædt og nøgen krop beregnet efter ligning (B.16)	[-]
h_c	=	Den konvektive varmetabskoefficient	[$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]
t_{cl}	=	Overfladetemperaturen af tøjjet	[°C]
t_a	=	Lufttemperatur af omgivende luft	[°C]

Ved lave lufthastigheder vil den konvektive varmetabskoefficient kunne bestemmes som en funktion af forskellen mellem overfladetemperaturen af tøjjet og lufttemperaturen af omgivelserne. Derimod er den konvektive varmetabskoefficient bestemt som en funktion af lufthastigheden i situationer med tvungen konvektion. Det er således nødvendigt i hvert enkelt tilfælde, at vurdere i hvor vidt et omfang der er tale om fri eller tvungen konvektion. Grænsen mellem disse skal dog ikke ses så skarp, idet der vil forekomme et område mellem hhv. fri og tvungen konvektion, hvor både temperaturforskelle mellem overfladen af tøjjet og det omgivende luft såvel som lufthastigheden har indflydelse på den konvektive varmetabskoefficient. Til beregning heraf foreslår Fanger [1972] følgende:

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{for } 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v} \quad (\text{Fri konvektion}) \\ 12,1 \cdot \sqrt{v} & \text{for } 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1 \cdot \sqrt{v} \quad (\text{Tvungen konvektion}) \end{cases}$$

(B.18)

hvor

h_c	= Den konvekktive varmetabskoefficient	$[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$
t_{cl}	= Overfladetemperaturen af tøjet	$[^\circ C]$
t_a	= Lufttemperatur af omgivende luft	$[^\circ C]$
v	= Den relative lufthastighed	$[\frac{m}{s}]$

På trods af at ligning (B.18) bygger på forsøg foretaget ved siddende personer under påvirkning af konstant vindretning, vil de med god nøjagtighed kunne bruges til beregning af den konvekktive varmetabskoefficient for såvel stående som siddende personer, med vindretning på tværs af kroppen.

Ligning for varmebalance

I det foregående er ligningerne for de enkelte bidrag til det totale varmetab for en person præsenteret og gennemgået. Følgende tabel opsummerer det ovenstående:

Tabel B.2: Opsummering af bidrag til varmetab i ligning (B.5)

	Formel	Ligning
Intern varmeproduktion	$\frac{H}{A_{Du}} = \frac{M}{A_{Du}}(1 - \eta)$	(B.10)
Varmetab gennem huden	$E_d = 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot A_{Du} \cdot (256 \cdot t_s - 3373 - p_a)$	(B.11)
Varmetab ved fordampning	(behandles i følgende afsnit B.1.2)	
Varmetab ved respiration	$E_{re} = 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a)$	(B.12)
Varmetab ved tør respiration	$L = 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a)$	(B.13)
Varmedledning gennem tøj	$K = A_{Du} \cdot \frac{t_s - t_{cl}}{I_{cl}}$	(B.14)
Varmetab ved stråling	$R = 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot A_{Du} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4]$	(B.15)
Varmetab ved konvektion	$C = A_{Du} \cdot f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)$	(B.17)

Formlerne angivet i tabel B.2 indsættes i ligning (B.5), hvorved den menneskelige varmebalance kan udtrykkes ved:

$$\begin{aligned}
 H - E_d - E_{SW} - E_{re} - L &= R + C \\
 \Downarrow \\
 \underbrace{\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta)}_H - \underbrace{3,05 \cdot 10^{-3} \cdot (256 \cdot t_s - 3373 - p_a)}_{E_d} - \underbrace{\frac{E_{sw}}{A_{Du}}}_{E_{SW}} - \underbrace{1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (5867 - p_a)}_{E_{re}} \\
 - \underbrace{0,0014 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (34 - t_a)}_L &= \underbrace{\frac{t_s - t_{cl}}{I_{cl}}}_K = \underbrace{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4]}_R \\
 + \underbrace{f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)}_C & \qquad \qquad \qquad (B.19)
 \end{aligned}$$

hvor

B.1 Model for termisk komfort

M	=	Metabolismen	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (ligning (B.1))	[m ²]
η	=	Systemets virkningsgrad bestemt ved $\eta = \frac{W}{M}$	[-]
W	=	Ydre mekanisk arbejde	[W]
t_s	=	Overfladetemperaturen af huden	[°C]
p_a	=	Vanddampstryk i omgivende luft	[Pa]
E_{SW}	=	Varmetab ved fordampning af sved fra overfladen af huden	[W]
t_a	=	Lufttemperatur af omgivende luft	[°C]
t_{cl}	=	Overfladetemperaturen af tøjet	[°C]
I_{cl}	=	Beklædningsisolans	[$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$]
t_{rmt}	=	Middelstrålingstemperaturen	[°C]
f_{cl}	=	Forhold mellem overfladeareal af beklædt krop og nøgen krop beregnet efter ligning (B.16)	[-]
h_c	=	Den konvektive varmetabskoefficient	[$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]

Af varmebalanceligningen (B.19) fremgår det, at ved et givet aktivitetsniveau, M , er overfladetemperaturen af huden, t_s , samt varmetabet ved fordampning af sved, E_{SW} , de eneste fysiske parametre, der har indflydelse på menneskets varmebalance.

B.1.2 BETINGELSER FOR TERMISK KOMFORT

I nærværende afsnit præsenteres betingelser for termisk komfort. I det foregående afsnit, blev varmebalanceligningen (B.19) samt de enkelte bidrag hertil præsenteret. Fanger [1972] opstiller tre betingelser for termisk komfort:

1. Varmebalance (ligning (B.19) opfyldt)
2. Krav til overfladetemperatur af huden, t_s
3. Krav til varmetabet ved fordampning af sved, E_{sw}

Som følge af den høje effektivitet af menneskets termoregulerende system, vil det for brede grænser af de fysiske parametre være muligt at opnå varmebalance uden nødvendigvis at være i termisk komfort. Derfor er opfyldelse af varmebalanceligningen (B.19) ikke tilstrækkeligt i sig selv, hvis termisk komfort skal opnås. Ved forsøg hvor personer ved et givet aktivitetsniveau oplever termisk komfort, er der fundet følgende udtryk for hhv. middelovertemperaturen af huden samt middelvarmetabet ved fordampning af sved:

$$\bar{t}_s = 35,7 - 0,0275 \frac{H}{A_{Du}} \quad (\text{B.20})$$

$$\bar{E}_{sw} = 0,42 \cdot A_{Du} \cdot \left(\frac{H}{A_{Du}} - 58,15 \right) \quad (\text{B.21})$$

hvor

\bar{t}_s	=	Middelovertemperaturen af huden	[°C]
H	=	Intern varmeproduktion	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (se ligning (B.1))	[m ²]
\bar{E}_{sw}	=	Middelvarmetab ved fordampning af sved	[W]

Af de ovenstående ligninger, (B.20) og (B.21), ses det at ved stigende aktivitetsniveau i konstant komfort og derved stigende intern varmeproduktion, H , falder middelloverfladetemperaturen af huden og middelvarmetabet ved fordampning af sved øges.

B.1.3 KOMFORTLIGNING

Ved at benytte de netop præsenterede udtryk for hhv. middelloverfladetemperatur af huden (B.20) samt middelvarmetabet ved fordampning af sved (B.21) og implementere dem i varmebalanceligningen (B.19) kan komfortligningen opstilles:

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta)}_H - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot \underbrace{\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - p_a}_{E_d}] - 0,42 \cdot \underbrace{(\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - 58,15)}_{E_{sw}} \\
 & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \underbrace{\frac{M}{A_{Du}} \cdot (5867 - p_a)}_{E_{re}} - 0,0014 \cdot \underbrace{\frac{M}{A_{Du}} \cdot (34 - t_a)}_L = \\
 & \underbrace{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mrt} + 273)^4]}_R + \underbrace{f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)}_C \quad (B.22)
 \end{aligned}$$

hvor t_{cl} beregnes af følgende:

$$\begin{aligned}
 t_{cl} = & 35,7 - 0,0275 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - I_{cl} \cdot [\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - \\
 & 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - p_a] - \\
 & 0,42 \cdot (\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - 58,15) - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (5867 - p_a) \\
 & - 0,0014 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (34 - t_a)] \quad (B.23)
 \end{aligned}$$

og

M	=	Metabolisme	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (ligning (B.1))	[m ²]
η	=	Systemets virkningsgrad bestemt ved $\eta = \frac{W}{M}$	[-]
W	=	Ydre mekanisk arbejde	[W]
p_a	=	Vanddampstryk i omgivende luft	[Pa]
t_a	=	Lufttemperatur af omgivende luft	[°C]
f_{cl}	=	Forhold mellem overfladeareal af beklædt og nøgen krop beregnet efter ligning (B.16)	[-]
t_{cl}	=	Overfladetemperaturen af tøjet ([Fanger, 1972, s. 41])	[°C]
I_{cl}	=	Beklædningsisolans	[$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$]
t_{rmt}	=	Middelstrålingstemperaturen	[°C]
h_c	=	Den konvektive varmetabskoefficient beregnet ved (B.18)	[$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]

Som beskrevet ovenfor, er de tre kriterier/betingelser for komfort implementeret i komfortligningen (B.22), hvilket medfører, at opfyldelse af denne er nødvendig for tilstedeværelsen af termisk komfort.

Komfortligningen (B.22) er baseret på forsøg med personer i kontrollerede statiske moderate omgivelser, hvor samtlige parametre er fastholdte. I ekstreme tilfælde, vil der således muligvis forekomme afvigelser.

Ydermere har Fanger [1972] undersøgt indflydelse på en række menneskelige parametre idet komfortligningen er baseret på eksperimenter hvor forsøgspersonerne var en række unge studerende. Følgende parametres indflydelse på komfortligningen er undersøgt:

- Geografisk placering
- Alder
- Køn
- Kropsbygning
- Menstrationscyklus
- Etniske forskelle
- Mad
- Døgnrytme
- Termiske påvirkninger
- Ensidedig opvarmning og afkøling af kroppen (herunder strålingsasymmetri, træk samt varme og kolde gulve)
- Farver (på vægge osv.)
- Tætpakkede mængder af mennesker
- Lufttryk

Forsøgene viste lille eller ingen indflydelse på graden af komfort, hvorfor komfortligningen uden modifikationer kan benyttes i de fleste tilfælde.

B.2 TERMISKE INDEKSER

I det følgende præsenteres baggrunden for de termiske indekser PMV og PPD udledt af Fanger [1972].

B.2.1 PMV

Komfortligningen (B.22) er et udtryk for optimal termisk komfort beregnet ud fra de ovennævnte parametre. Ligningen giver imidlertid udelukkende mulighed for at vurdere hvorledes disse parametre skal kombineres for at skabe optimal termisk komfort, men er ikke egnet til direkte vurdering og estimering af indeklimaets indflydelse på den termiske følelse. Som følge heraf indføres der et termisk indeks, der er baseret på den psyko-fysiske 7-punkts-skala [Fanger, 1972, s. 110]:

-3	Koldt
-2	Køligt
-1	Let køligt
0	Neutral
+1	Let varmt
+2	Varmt
+3	Hedt

Ved opfyldelse af komfortligningen (B.22) vil en stor mængde angive en middelvotering på '0' svarende til neutral termisk tilstand. Kroppens termiske reguleringsfunktioner (sammentrækning og udvidelse af blodkar, muskelsammentrækninger samt svedafgivelse) kan indenfor brede grænser opretholde varmebalance med omgivelserne, men der vil kun i et lille interval heri kunne forventes termisk komfort. Graden af diskomfort kan udtrykkes ved den termiske belastning af kroppens termiske reguleringsfunktioner, TL , (forskul mellem intern varmeproduktion og varmetabet til omgivelserne), hvor det antages at $TL = 0$ ved termisk komfort. Den termiske belastning af kroppen er således et udtryk for påvirkningen af kroppens termiske reguleringsfunktioner, hvorfor den matematiske sammenhæng nødvendigvis kan skrives som [Fanger, 1972, s. 112]:

$$Y = f\left(TL, \frac{H}{A_{Du}}\right) \quad (\text{B.24})$$

hvor

Y	=	Middelvoteringen på 7-punkts-skalaen
TL	=	Den termiske belastning (se [Fanger, 1972, s. 112])
H	=	Intern varmeproduktion
A_{Du}	=	DuBois-areal (se ligning (B.1))

Ligning (B.24) kan udelukkende løses ved forsøg, hvor de influerende indeklimaparametre måles, og forsøgspersonerne vurderer det oplevede termiske indeklima på 7-punkts-skalaen. På baggrund af forsøgsresultater er følgende ligning for beregning af den forventede middelvotering opstillet [Fanger, 1972, s. 114]:

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot (\frac{M}{A_{Du}})} + 0,0275) \cdot \underbrace{\left[\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - H\right]}_H - \\
 & \underbrace{3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - p_a]}_{E_a} - \\
 & \underbrace{0,42 \cdot \left[\frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - 58,15\right]}_{E_{sw}} - \\
 & \underbrace{1,7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (5867 - p_a)}_{E_{re}} - \underbrace{0,0014 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (34 - t_a)}_L - \\
 & \underbrace{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rmt} + 273)^4]}_R - \underbrace{f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)}_C \quad (\text{B.25})
 \end{aligned}$$

hvor t_{cl} beregnes af følgende:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,0275 \cdot \frac{M}{A_{Du}} \cdot (1 - \eta) - I_{cl} \cdot [3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rmt} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)] \quad (\text{B.26})$$

og

PMV	=	Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering	[-]
M	=	Metabolisme	[W]
A_{Du}	=	DuBois-areal (se ligning (B.1))	[m ²]
I_{cl}	=	Beklædningsisolans	[$\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$]
η	=	Systemets virkningsgrad bestemt ved $\eta = \frac{W}{M}$	[-]
W	=	Ydre mekanisk arbejde	[W]
p_a	=	Vanddampstryk i omgivende luft	[Pa]
t_a	=	Lufttemperatur af omgivende luft	[°C]
f_{cl}	=	Forhold mellem overfladeareal af beklædt og nøgen krop beregnet efter ligning (B.16)	[-]
t_{cl}	=	Overfladetemperaturen af tøjet	[°C]
t_{rmt}	=	Middelstrålingstemperaturen	[°C]
h_c	=	Den konvektive varmetabskoefficient beregnet ved (B.18)	[$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$]

Det termiske indeks er udledt på baggrund af forsøgsresultater, hvor de termiske betingelser kun afstedkom mindre diskomfort, hvorfor den største nøjagtighed må forventes i tilfælde hvor PMV-indekset ligger i intervallet $-2 \leq PMV \leq +2$.

Ydermere bør det påpeges, at ovenstående er udledt med antagelse om en relativ luftfugtighed på, $RH = 50\%$ og at middelstrålingstemperaturen er lig med lufttemperaturen ($t_{rmt} = t_a$). Afviger de aktuelle forhold meget, skal den efter ligning (B.25) beregnede PMV-værdi korrigeres (se [Fanger, 1972, s. 125-126]).

Tabellerede værdier for PMV ved varierende indeklimaparametre, aktivitetsniveauer og beklædningsisolanser forefindes bl.a. i DS/EN ISO 7730 [2006, Anneks E, s. 26] eller Hansen et al. [1997, A.01.04 s. 464-467].

B.2.2 PPD

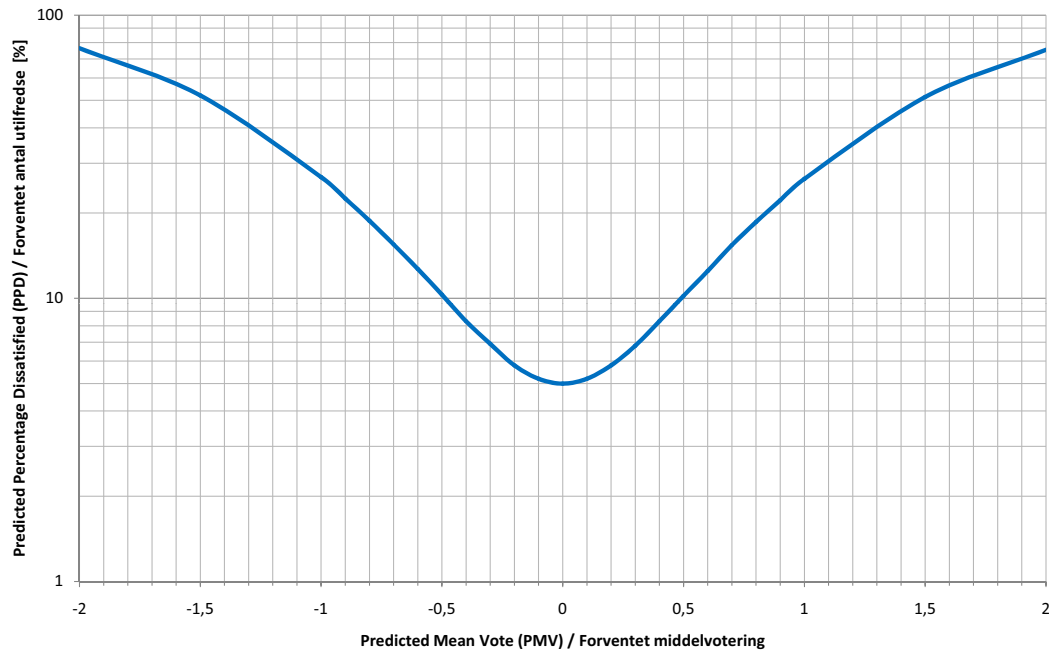
Den ovenfor beskrevne middelvotering angiver den generelle grad af diskomfort for en stor gruppe mennesker. Dette er imidlertid vanskeligt at benytte i praksis, idet følgerne af en given PMV-værdi er svær at tolke. Som følge heraf er der på baggrund af forsøg udviklet et indeks til beregning af det forventede antal utilfredse - PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Som navnet antyder, angiver PPD-indekset det forventede antal utilfredse ud fra en given middelvotering (PMV), og kan i praksis benyttes til evaluering af det termiske indeklima og det antal utilfredse de aktuelle indeklimaparametre afstedkommer. PPD-indekset kan beregnes af følgende [DS/EN ISO 7730, 2006, s. 4]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (\text{B.27})$$

hvor

$$PMV = \text{Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering} \quad [-]$$

eller aflæses på følgende figur B.2:



Figur B.2: PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) / Forventet antal utilfredse) som funktion af PMV (Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering) (efter [Fanger, 1972])

Som det ses af figur B.2, vil der på trods af en middelvotering på '0' svarende til neutral stadig forekomme et forventet antal utilfredse på 5%. Dette er i tråd med forventningen om, at det er umuligt at skabe et indeklima, der vil tilfredsstille samtlige personer, idet der er forskel på den menneskelige fysik, beklædning, psyke etc

B.2.3 GYLDIGHEDSOMRÅDE FOR PMV

Ovenstående PMV-model for vurdering af global diskomfort er underlagt følgende gyldighedsområde [DS/EN ISO 7730, 2006]:

- Aktivitetsniveau, M : $46 - 232 \frac{W}{m^2} / 0,8 - 4,0 met$
- Beklædningsisolans, I_{cl} : $0 - 0,31 \frac{m^2}{W \cdot K} / 0clo - 2,0clo$
- Lufttemperatur, t_a : $10 - 30^\circ C$
- Middelstrålingstemperatur, t_{mrt} : $10 - 40^\circ C$

- Lufthastighed, v_{ar} : $0 - 1,0 \frac{m}{s}$
- Luftfugtighed, p_a : $0 - 2700 Pa$

B.3 LOKAL DISKOMFORT

De to ovennævnte termiske indekser, PMV og PPD, benyttes som beskrevet til generel evaluering af graden af diskomfort for en større gruppe personer udsat for et ensartet termisk indeklime og er udledt på baggrund af varmebalancen for hele kroppen. På trods af, at der kan opnås generel termisk komfort, er tilfældet anderledes i de lokale felter omkring hver enkelt person, hvorfor der i DS/EN ISO 7730 [2006] angives fire muligheder, hvor lokal diskomfort at forekomme:

- Træk
- Vertikal forskel i lufttemperatur
- Varme og kolde gulve
- Strålingstemperatursymmetri

Risikoen for lokal termisk diskomfort er mere udpræget for siddende personer (lavt aktivitetsniveau), og modsat er risikoen mindre for personer med et højere aktivitetsniveau. I det følgende vil empiriske formler til brug ved beregning af antal utilfredse som følge af de ovennævnte muligheder for lokal diskomfort blive præsenteret. Ligningerne er hentet fra [DS/EN ISO 7730, 2006].

B.3.1 TRÆK

Lufthastigheden omkring en person har stor indflydelse på det konvektive varmetab mellem personen og omgivelserne i hvilke denne befinder sig (se ligning (B.17)). Graden af diskomfort som følge af træk, kan beregnes af følgende:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3,14) \quad (B.28)$$

hvor

DR	= Draught Rating / Træk-vurdering	[%]
$t_{a,l}$	= Lokal lufttemperatur	[°C]
$\bar{v}_{a,l}$	= Lokal middellufthastighed (hvis: $\bar{v}_{a,l} < 0,05 \Rightarrow \bar{v}_{a,l} = 0,05 \frac{m}{s}$)	$[\frac{m}{s}]$
Tu	= Turbulensintensiteten (hvis ukendt: $Tu = 40\%$)	[%]

B.3.2 VERTIKAL LUFTTEMPERATUR

En stor difference mellem temperaturen ved hhv. hoved- og ankelniveau, medfører lokal diskomfort. Følgende ligning er baseret på en stigende temperatur fra ankler til hoved, da det omvendte tilfælde ikke har nær så stor indflydelse på den lokale termiske komfort, og i sjældnere grad forekommer i

praksis:

$$PD_{vert.temp.diff.} = \frac{100}{1 + e^{5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v}}} \quad (\text{B.29})$$

hvor

$$\begin{aligned} PD_{vert.temp.diff.} &= \text{Procent utilfredse som følge af vertikal forskel i lufttemperatur} && [\%] \\ &\text{mellem hoved og fødder} \\ t_{a,v} &= \text{Vertikal forskel i lufttemperatur mellem hoved og fødder} && [^{\circ}\text{C}] \end{aligned}$$

Graf til aflæsning af $PD_{vert.temp.diff.}$ forefindes i DS/EN ISO 7730 [2006, s. 7].

B.3.3 VARME OG KOLDE GULVE

I tilfælde af for varme eller kolde gulve vil der forekomme lokal diskomfort. På baggrund af forsøgsresultater er følgende ligning til beregning af antal utilfredse som følge af varme eller kolde gulve udledt:

$$PD_{temp.gulv} = 100 - 94 \cdot e^{-1,387 + 0,118 \cdot t_f - 0,0025 \cdot t_f^2} \quad (\text{B.30})$$

hvor

$$\begin{aligned} PD_{temp.gulv} &= \text{Procent utilfredse som følge af for kolde eller varme gulve} && [\%] \\ t_f &= \text{Gulvtemperatur} && [^{\circ}\text{C}] \end{aligned}$$

Graf til aflæsning af $PD_{temp.gulv}$ forefindes i DS/EN ISO 7730 [2006, s. 8].

B.3.4 STRÅLINGSTEMPERATURASYMMETRI

Strålingstemperaturasymmetri forekommer i situationer, hvor de begrænsende flader i rummet har en temperatur der afviger fra lufttemperaturen i rummet. Personer føler diskomfort som følge af varme eller kolde lofter samt varme eller kolde vægge, men er mest sensitive overfor strålingstemperaturasymmetri forårsaget af varme lofter og kolde vægge (vinduer). Følgende ligninger kan benyttes til beregning af antal utilfredse som følge af strålingstemperaturasymmetri i den netop omtalte situationer:

Varmt loft

$$PD_{varmt.loft} = \frac{100}{1 + e^{2,84 - 0,174 \cdot \Delta t_{pr}}} - 5,5 \quad (\text{B.31})$$

$$\Delta t_{pr} < 23^{\circ}\text{C}$$

Koldt loft

$$PD_{koldt.loft} = \frac{100}{1 + e^{9,93 - 0,50 \cdot \Delta t_{pr}}} \quad (\text{B.32})$$

$$\Delta t_{pr} < 15^{\circ}\text{C}$$

Varm væg

$$PD_{varm.væg} = \frac{100}{1 + e^{3,72 - 0,052 \cdot \Delta t_{pr}}} - 3,5 \quad (\text{B.33})$$

$$\Delta t_{pr} < 35^{\circ}\text{C}$$

Kold væg

$$PD_{kold.væg} = \frac{100}{1 + e^{6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr}}} \quad (\text{B.34})$$

$$\Delta t_{pr} < 15^{\circ}\text{C}$$

hvor

$PD_{varmt.loft}$	=	Procent utilfredse som følge af varmt loft	[%]
$PD_{koldt.loft}$	=	Procent utilfredse som følge af koldt loft	[%]
$PD_{varm.væg}$	=	Procent utilfredse som følge af varm væg	[%]
$PD_{kold.væg}$	=	Procent utilfredse som følge af kold væg	[%]
t_{pr}	=	Strålingstemperatursymmetri	[$^{\circ}\text{C}$]

Graf til aflæsning af $PD_{varmt.loft}$, $PD_{koldt.loft}$, $PD_{varm.væg}$ samt $PD_{kold.væg}$ forefindes i DS/EN ISO 7730 [2006, s. 10].

B.3.5 GYLDIGHEDSOMRÅDE FOR LOKAL DISKOMFORT

Ovenstående modeller for vurdering af lokal diskomfort er underlagt følgende gyldighedsområder [DS/EN ISO 7730, 2006]:

- **Draught Rate / Trækvurdering**

- Lokal lufttemperatur: $20^{\circ}\text{C} \leq t_{a,l} \leq 26^{\circ}\text{C}$
- Lokal middellufthastighed: $\bar{v}_{a,l} < 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Turbulensintensitet: $10\% \leq Tu \leq 60\%$

- **Vertikal lufttemperatur**

- Vertikal lufttemperatur mellem hoved og fødder: $t_{a,v} < 8^{\circ}\text{C}$

- **Varme og kolde gulve**

- Ingen krav. Dog ikke gyldig for ophold på opvarmede gulve i længere perioder.

- **Strålingstemperaturasymmetri**

- Varmt loft: $t_{pr} < 23^{\circ}C$
- Koldt loft: $t_{pr} < 15^{\circ}C$
- Varm væg: $t_{pr} < 35^{\circ}C$
- Kold væg: $t_{pr} < 15^{\circ}C$

2-knude-modellen

C.1 2-KNUDE-MODELLEN - TSENS & DISC

2-knude-modellen opstillet af Gagge et al. [1941, 1986] benyttes til transient estimering af termisk komfort i et givet miljø ud fra de termiske indekser TSENS¹ eller DISC². TSENS er identisk med ASHRAE-skalaen benyttet i PMV-modellen opstillet af Fanger [1972] blot med to ekstra grader: ± 4 (meget varmt/koldt) og ± 5 (utåleligt varmt/koldt). De to skalaer er vist nedenfor, hvor en negativ score henviser til kold diskomfort og modsat henviser en positiv score til varm diskomfort:

Score	TSENS	DISC
-5	Utåleligt koldt	Utåleligt
-4	Meget koldt	Begrænset tolerance
-3	Koldt	Meget ukomfortabelt
-2	Køligt	Ukomfortabelt og ubehageligt
-1	Let køligt	Let ukomfortabelt men acceptabelt
0	Neutral	Komfortabelt
1	Let varmt	Let ukomfortabelt men acceptabelt
2	Varmt	Ukomfortabelt og ubehageligt
3	Hedt	Meget ukomfortabelt
4	Meget hedt	Begrænset tolerance
5	Utåleligt varmt	Utåleligt

Følgende gennemgang af modellen er baseret på ASHRAE [2005].

Hvor PMV-modellen af Fanger [1972] er opstillet for stationære tilstande, kan 2-knude-modellen benyttes for transiente tilstande. Kroppen betragtes som to koncentriske termiske voluminer, der repræsenterer hhv. huden³ og den indre del af kroppen. Indenfor hver af de to voluminer antages temperaturen ensartet, således den eneste temperaturgradient der forekommer er mellem de to voluminer. I kolde omgivelser vil blodkarrene i kroppens ydre punkter trække sig sammen (vasoconstriction), hvilket vil medføre aksiale temperaturgradienter i hænder, arme, fødder og ben. Endvidere vil asymmetrisk arbejde, hvor en enkelt muskelgruppe aktiveres, medføre højere temperatur heri, hvorfor der også i dette tilfælde vil forekomme uensartet temperaturer på tværs af de to voluminer. De nævnte forhold er med til at begrænse modellens nøjagtighed.

I 2-knude-modellen antages det, at al varme genereres i kerne-voluminet⁴. Herudover vil kroppen i kolde omgivelser foretage kulderystelser gennem gentagne muskelsammentrækninger, hvilket

¹ Thermal Sensation / Termisk oplevelse

² Thermal Discomfort / Termisk Diskomfort

³ epidermis og dermis / over- og læderhuden

⁴ Det inderste af de to voluminer

bidrager yderligere til varmeproduktionen. Denne yderligere varmeproduktion er beskrevet ved følgende ligning (temperatur-leddene sættes til '0' såfremt $t_{sk} < 34^\circ\text{C}$ og/eller $t_{cr} < 37^\circ\text{C}$):

$$M_{shiv} = 19,4 \cdot (34 - t_{sk}) \cdot (37 - t_{cr}) \quad (\text{C.1})$$

hvor

$$\begin{aligned} M_{shiv} &= \text{Varmeproduktion ved kulderystelser} && \left[\frac{W}{m^2}\right] \\ t_{sk} &= \text{Overfladetemperatur af huden} && [^\circ\text{C}] \\ t_{cr} &= \text{Kernetemperatur} && [^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

Varmetabet til omgivelserne omfatter:

- Ydre mekanisk arbejde (W)
- Latent og sensibelt varmetab ved respiration (E_{re} og L)
- Latent varmetab ved stråling og konvektion (C og R)
- Sensibelt varmetab ved diffusion af sved gennem huden samt fordampning heraf (E_d og E_{sw})

Varmen genereret i kerne-voluminet er forudsat ledet til det ydre hud-volumen modelleret som en simpel masseløs leder ($K_{trans} = 5,28 \frac{W}{m^2 \cdot K}$). Herudover vil der forekomme en varmetransport som følge af blodtilstrømningen til huden, der afhænger af kropstemperaturen samt overfladetemperaturen af huden - mere specifikt afvigelsen fra disses setpunkter. Blodtilstrømningen er beskrevet ved ligning (C.2).

$$Q_{bl} = \frac{BFN + c_{dil} \cdot (t_{cr} - 37)}{1 + S_{tr} \cdot (34 - t_{sk})} \quad (\text{C.2})$$

hvor

$$\begin{aligned} Q_{bl} &= \text{Periferisk blodstrøm} (Q_{bl,max} = 90 \frac{l}{h \cdot m^2}) && \left[\frac{l}{h \cdot m^2}\right] \\ BFN &= \text{Neutral blodstrøm i huden, } BFN = 6,3 \frac{g}{m^2 \cdot s} && \left[\frac{g}{m^2 \cdot s}\right] \\ c_{dil} &= \text{Specifik varmekonstant for blodstrømning, } c_{dil} = 50 && [-] \\ S_{tr} &= \text{Konstant for sammentrækning af blodkar, } S_{tr} = 0,5 && [-] \end{aligned}$$

Det sensible varmetab der forekommer ved fordampning af sved kan beskrives som (temperatur-leddene sættes lig 0 såfremt disse er negative):

$$E_{sw} = w \cdot E_{max} \quad (\text{C.3})$$

hvor

E_{sw}	=	Varmetab ved fordampning af sved (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
w	=	Fugtighed af huden	$[-]$
		$w = \frac{E_{rsw}}{E_{max}}$	
E_{max}	=	Maksimalt fordampningsvarmetab	$[\frac{W}{m^2}]$
E_{rsw}	=	Regulatorisk fordampningsvarmetab	$[\frac{W}{m^2}]$
		$E_{rsw} = c_{sw} \cdot (t_b - t_{bset}) \cdot e^{\frac{-(t_{sk}-34)}{10,7}}$	
c_{sw}	=	Proportionalitetskonstant for svedkontrol	$[\frac{W}{m^2} \cdot K]$
		$c_{sw} = 170 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	
t_b	=	Middel kropstemperatur	$[^\circ C]$
		$t_b = (1 - \alpha_{sk}) \cdot t_{cr} + \alpha_{sk} \cdot t_{sk}$	
t_{bset}	=	Setpunkt for kropstemperatur	$[^\circ C]$
α_{sk}	=	Andel af kroppen, der antages i det ydre volumen (hud-voluminet)	$[-]$
		$\alpha_{sk} = 0,0418 + \frac{0,745}{Q_{bl}-0,585}$	

En opstilling af energibalancen for hhv. kerne- og hud-voluminet giver:

Energibalance for kernen:

$$M + M_{shiv} = W + \underbrace{E_{re} + L}_{Respiration} + (K_l + SkBF \cdot c_{p,bl}) \cdot (t_{cr} - t_{sk}) + m_{cr} \cdot c_{cr} \cdot \frac{dt_{cr}}{d\theta} \quad (C.4)$$

Energibalance for huden:

$$(K_{trans} + SkBF \cdot c_{p,bl}) \cdot (t_{cr} - t_{sk}) = \underbrace{C + R}_{Sensibelt} + \underbrace{E_d + E_{sw}}_{Fordampning} + m_{sk} \cdot c_{sk} \cdot \frac{dt_{sk}}{d\theta} \quad (C.5)$$

hvor

M	=	Metabolismen (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
W	=	Ydre mekanisk arbejde (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
E_{re}	=	Latent varmetab ved respiration (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
L	=	Sensibelt varmetab ved tør respiration (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
C	=	Latent varmetab ved konvektion (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
R	=	Latent varmetab ved stråling (appendiks B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
E_d	=	Sensibelt varmetab ved diffusion af sved gennem huden (app. B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
E_{sw}	=	Sensibelt varmetab fordampning af sved fra huden (app. B.1)	$[\frac{W}{m^2}]$
K_{trans}	=	Effektiv ledning mellem kerne og hud	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$
		$K_{trans} = 5,28 \frac{W}{m^2 \cdot K}$	

$SkBF$	=	Blodstrøm i huden $SkBF = \rho_{bl} \cdot Q_{bl}$	$[\frac{g}{m^2 \cdot s}]$
ρ_{bl}	=	Densitet af blod $\rho_{bl} = 12,9 \frac{kg}{l}$	$[\frac{kg}{l}]$
m_{cr}	=	Massen af kernen ⁵	$[kg]$
m_{sk}	=	Massen af huden ⁶	$[kg]$
$c_{p,bl}$	=	Specifik varmekoefficient for blod (v. konstant tryk) $c_{p,bl} = 4190 \frac{J}{kg \cdot K}$	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$
c_{cr}	=	Specifik varmekoefficient for kernen $c_{cr} = 3500 \frac{J}{kg \cdot K}$	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$
c_{sk}	=	Specifik varmekoefficient for huden $c_{sk} = 3500 \frac{J}{kg \cdot K}$	$[\frac{J}{kg \cdot K}]$
θ	=	Tid	$[s]$

Ligningerne (C.4) og (C.5) løses for hhv. $\frac{dt_{cr}}{d\theta}$ og $\frac{dt_{sk}}{d\theta}$ og integreres numerisk med tidskridt af 10-60s hvorved hud- og kernetemperaturen bestemmes for hvert af disse tidskridt.

Efter bestemmelse af hhv. t_{cr} og t_{sk} benyttes disse til vurdering af den termiske oplevelse i det pågældende miljø gennem komfortindekserne TSENS⁷ og DISC⁸. TSENS er bestemt på baggrund af forskellen mellem kroppens middeltemperatur, t_b , og det kolde og varme setpunkt hvilken repræsenterer nedre og øvre grænse af zonen for evaporativ regulering bestemt ved:

$$t_{b,c} = \frac{0,194}{58,15} \cdot (M - W) + 36,301 \quad (C.6)$$

$$t_{b,h} = \frac{0,347}{58,15} \cdot (M - W) + 36,669 \quad (C.7)$$

$$(C.8)$$

hvor

$$t_{b,c} = \text{Temperatur for nedre grænse for evaporativ reguleringszone} \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{b,h} = \text{Temperatur for øvre grænse for evaporativ reguleringszone} \quad [^{\circ}C]$$

TSENS bestemmes herefter ved følgende ligning.

$$TSENS = \begin{cases} 0,4685 \cdot (t_b - t_{b,c}) & \text{for } t_b < t_{b,c} \\ 4,7 \cdot \eta_{ev} \cdot \frac{t_b - t_{b,c}}{t_{b,h} - t_{b,c}} & \text{for } t_{b,c} \leq t_b \leq t_{b,h} \\ 4,7 \cdot \eta_{ev} + 0,4685 \cdot (t_b - t_{b,h}) & \text{for } t_{b,h} < t_b \end{cases} \quad (C.9)$$

hvor

$$\eta_{ev} = \text{Fordampningseffektivitet, } \eta_{ev} = 0,85 \quad [-]$$

⁷Thermal Sensation / Termisk oplevelse

⁸Thermal Discomfort / Termisk diskomfort

Komfortindekset DISC er numerisk identisk for $t_b < t_{b,c}$, og er foruden afhængig af hudfugtigheden, w :

$$DISC = \begin{cases} 0,4685 \cdot (t_b - t_{b,c}) & \text{for } t_b < t_{b,c} \\ \frac{4,7 \cdot (E_{rsw} - E_{rsw,req})}{E_{max} - E_{rsw,req} - E_{dif}} & \text{for } t_{b,c} \leq t_b \end{cases} \quad (C.10)$$

hvor

$$\begin{aligned} E_{rsw,req} &= \text{Nødv. regulatorisk fordampningsvarmetab [Fanger, 1972]}^9 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right] \\ &= E_{rsw,req} = \bar{E}_{sw} = 0,42 \cdot (M - W - 58,15) \end{aligned}$$

Efter beregning af hhv. TSENS og DISC, benyttes skalaerne vist ovenfor til estimering af niveauet for den termiske komfort i det aktuelle termiske miljø.

⁹appendiks B.1.2

Notater - Adaptive modeller

D

Nærværende appendiks indeholder notater vedrørende de i litteraturstudiet behandlede adaptive modeller for termisk komfort. Notaterne er benyttet i forbindelse med vejledermøder, og opsummerer kort fakta vedrørende de enkelte projekter med samtidig angivelse af egne kommentarer hertil.

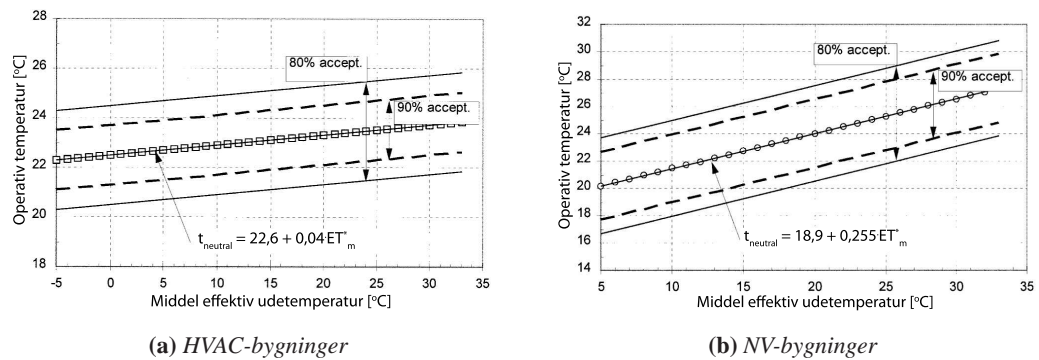
D.1 RP-884 - 1997

Generelt:

- 160 bygninger i landende: Australien, Canada, Grækenland, Indonesien, Pakistan, Singapore, Thailand, England og USA.
- Ca. 21.000 observationer

Resultater:

- Der skelnes mellem HVAC- og NV-bygninger med følgende definitioner:
 - NV-bygninger: *Bygninger med funktionsdygtige vinduer og loftsventilatorer i små en- eller tomandskontorer, hvor adaptive muligheder er store.*
 - HVAC-bygninger: *Lukkede centralt styrede luftkonditionerede bygninger med åbne kontormiljøer, og hvor brugerne ingen mulighed har for åbning/lukning af vinduer.*
- Følgende grafer er opstillet på baggrund af målingerne:



Figur D.1: Dynamiske grænser for termisk accept bestemt for hhv. HVAC- og NV-bygninger på baggrund af PMV/PPD-indekset. 90 og 80%’s termisk accept bygger på temperaturintervaller på hhv. 1,25 og 2,0° C fundet ved statistisk analyse (standardafvigelser) (efter de Dear et al. [1997])

De viste ligninger er også omskrevet således neutraltemperaturen ($PMV=0$) beregnes som funktion af middel-udelufttemperaturen frem for middel effektiv udetemperatur, ET_m^* :

$$t_{op,neutral,HVAC,tude} = 21,45 + 0,11 \cdot t_{a,ude} \quad (D.1)$$

$$t_{op,neutral,NV,tude} = 17,8 + 0,31 \cdot t_{a,ude} \quad (D.2)$$

hvor

$$\begin{aligned} t_{op,neutral,HVAC,tude} &= \text{Middel operativ indetemperatur, HVAC-bygninger} & [^{\circ}C] \\ t_{op,neutral,NV,tude} &= \text{Middel operativ indetemperatur, NV-bygninger} & [^{\circ}C] \\ t_{a,ude} &= \text{Middel udelufttemperatur} & [^{\circ}C] \end{aligned}$$

Grænser for accept-linjerne fundet ved statistisk analyse (standardafvigelser for komfortvoteringer):

- 90%’s termisk accept: $\pm 1,25^{\circ}C$
- 80%’s termisk accept: $\pm 2,00^{\circ}C$

Begrænsninger:

- Aktivitetsniveau: 1,2-1,6 met
- Beklædning kan varieres frit i intervallet 0,5-1,0 clo
- Adgang til funktionsdygtige vinduer (gælder kun for NV-modellen)
- Mindre end 4 personer per rum

Kommentarer:

- Ligningerne er opstillet ud fra termisk neutralitet ($PMV = 0$) i modsætning til SCATs, der er baseret på termisk komfort (defineret ved: $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$)
- Snævert gyldighedsområde (Hvad med andre arbejdspladser end kontorer, hvor aktivitetsniveauet og/eller beklædningsisolansen er højere?)

- Stort empirisk grundlag
- Ens databehandling
- Semantisk afvigelse (forskel mellem neutral og ønsket temperatur - semantic discrepancy) blev kun fundet for HVAC-data.

Referencer:

- [de Dear et al., 1997]
- [de Dear, 1998]

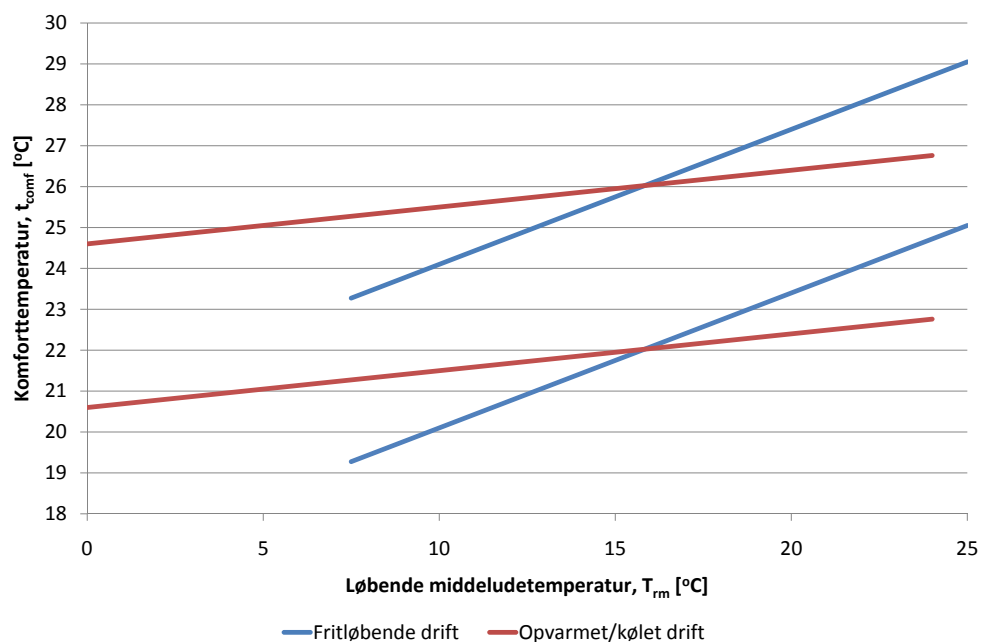
D.2 SCATs - 2001

Generelt:

- 26 bygninger i landende: Frankrig, Grækenland, Portugal, Sverige og England.
- 4.500 observationer

Resultater:

- Der skelnes mellem bygninger i fritløbende og opvarmet/kølet drift med følgende definitioner:
 - Fritløbende bygninger: *Bygninger hvor varme- eller køleanlægget ikke er i drift. Disse bygninger er i "tættere kontakt" med udeklimaet.*
 - Opvarmede/kølede bygninger: *Bygninger hvor varme- eller køleanlægget er i drift.*
- Følgende grafer er opstillet på baggrund af målingerne:



Figur D.2: Grænser for operativ indetemperatur som funktion af løbende middel-udetemperatur bestemt ved ligning (4.13). Grænserne for den operative temperatur er bestemt på baggrund af ligning (4.14) og (4.15) med en grænse på $\pm 2^\circ\text{C}$ for 80%'s accept af det termiske indeklima (efter Nicol og McCartney [2001]; Nicol og Humphreys [2007])

De viste ligninger er også omskrevet således komforttemperaturen ($-0,5 \leq PMV \leq +0,5$) beregnes som funktion af den løbende middeludetemperatur idet studier har vist, at temperaturerne de foregående dage også har stor indflydelse på beklædningsisolans, forventning og dermed termisk oplevelse og accept.

$$\text{Fritløbende drift:} \quad t_{comf} = 0,33 \cdot T_{rm} + 18,8 \quad (\text{D.3})$$

$$\text{Opvarmet/kølet drift:} \quad t_{comf} = 0,09 \cdot T_{rm} + 22,6 \quad (\text{D.4})$$

hvor

$$t_{comf} = \text{Komforttemperatur} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{rm} = \text{Løbende middeludetemperatur bestemt ved nedenstående ligning} \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T_{rm} = \frac{T_{ed-1} + 0,8T_{ed-2} + 0,6T_{ed-3} + 0,5T_{ed-4} + 0,4T_{ed-5} + 0,3T_{ed-6} + 0,2T_{ed-7}}{3,8} \quad (\text{D.5})$$

Komfortgrænser: $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$

I Nicol og Humphreys [2007] angiver figur 9, at grænserne på $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$ er baseret på 80%’s termisk accept fundet på baggrund af standardafvigelserne angivet i tabel 2 i samme kilde. Hvis der sammenlignes med kildens figur 8 ses det, at ved en afvigelse fra komforttemperaturen på $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$, vil antallet af personer i termisk komfort være ca. hhv. 75-80% og 68-73%. Dette stemmer ikke overens med kildens figur 9. Endvidere er SCATs-modellerne opstillet for termisk komfort defineret ved $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ svarende til PPD=10% og dermed et acceptniveau på 90%. Dette er i modstrid med de 80% angivet i kildens figur 9.

Begrænsninger:

- Aktivitetsniveau: 1,0-1,3 met
- Beklædning kan varieres frit
- Mekanisk ventilation tillades, men ikke mekanisk køling
- Kan benyttes i kontorbygninger og lignende med hovedsageligt siddende aktivitet

Kommentarer:

- Ligningerne er opstillet ud fra termisk komfort i projektet defineret ved $-0,5 \leq PMV \leq +0,5$ i modsætning til RP-884, der er baseret på termisk neutralitet ($PMV = 0$)
- Kan bruges i bygninger i Europa eller tilsvarende klimatiske zoner.
- Snævert gyldighedsområde (Hvad med andre arbejdspladser end kontorer, hvor aktivitetsniveauet er højere?)
- Middelstort empirisk grundlag
- Ens databehandling
- Ens måleudstyr
- DS/EN 15251 [2007] gør brug af resultaterne fra SCATs-projektet. Dog bør det nævnes, at hvor SCATs angiver at intervallet på $\pm 2,00^{\circ}\text{C}$ omkring komforttemperaturen svarer til 80%’s termisk accept, angiver DS/EN 15251 [2007] dette til 94%.

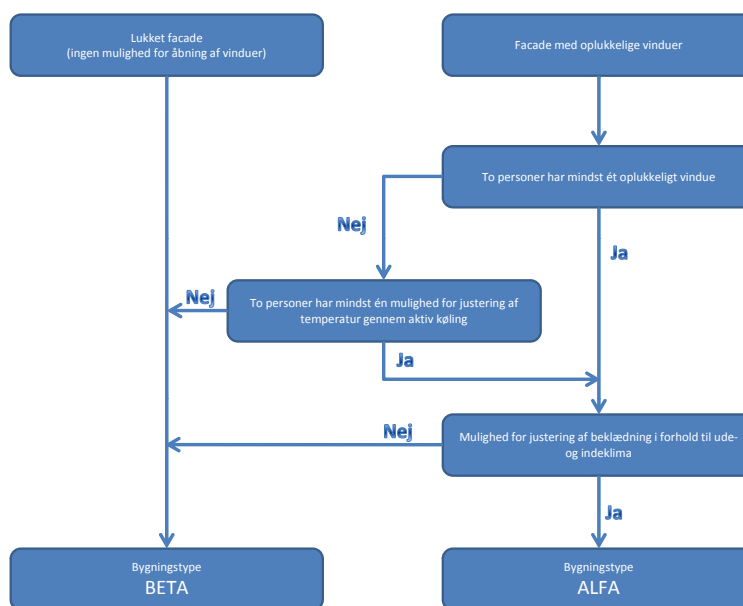
Referencer:

- [Nicol og McCartney, 2001]
- [Nicol og Humphreys, 2007]
- [McCartney og Nicol, 2002]

D.3 ATG - ADAPTIVE TEMPERATURGRÆNSER - 2003

Generelt:

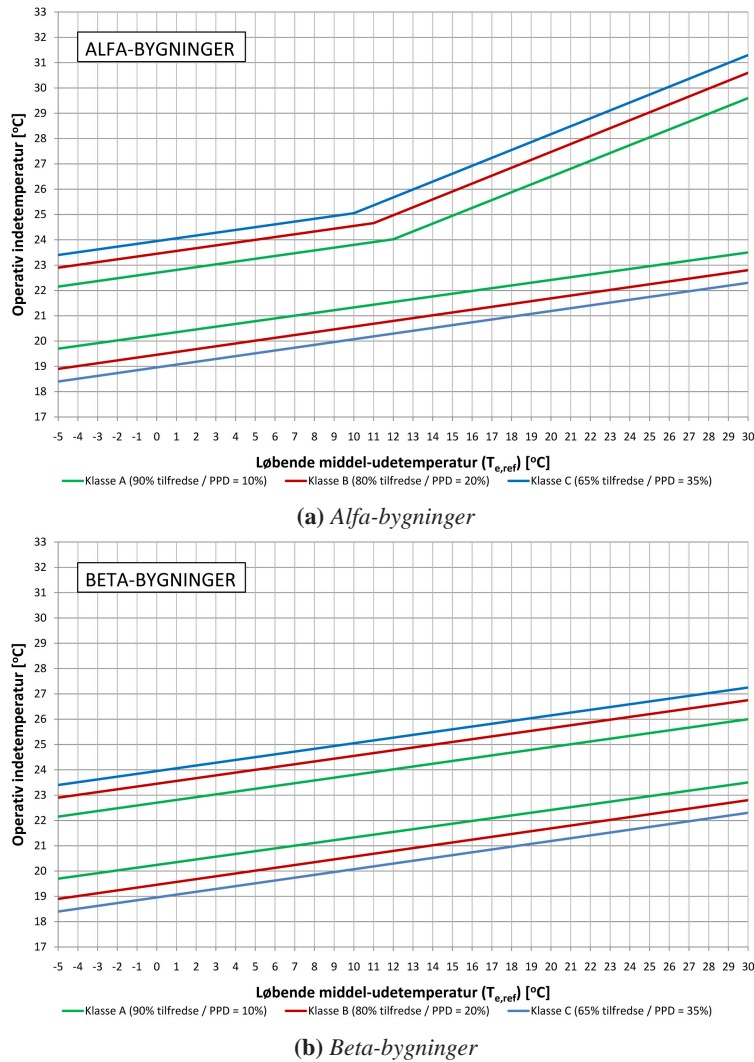
- Bygger på resultater fra RP-884-projektet (adaptive modeller er direkte benyttet - blot med udskiftning af middeludlufttemperatur med løbende middel-udetemperatur.
- Udviklet designgraf til vurdering af bygningers termiske ydeevne ved sammenbygning af de to ligninger for hhv. HVAC- og NV-bygninger. Der hvor kurven knækker (figur til venstre) er det punkt, hvor personer i bygningen ikke vil åbne vinduerne mere, da udelufttemperaturen er for lav. ($T_{rm} = 12^{\circ}C$). Der er ikke foretaget nogen undersøgelser af om dette passer i realiteten. Det er derfor svært at sige om springet fra den ene bygningstype til den anden lige ved sker ved $12^{\circ}C$.
- Tilføjet en klasse C (35% utilfredse) i forhold til RP-884 - i tråd med DS/EN ISO 7730 [2006] og DS/CEN/CR 1752 [2001]. De har ikke foretaget nogen dybere undersøgelse der underbygger tilføjjelsen af en ekstra klasse.
- Udskiftet udelufttemperaturen, ift. RP-884, med en løbende middel-udetemperatur (T_{rm}) i stedet. Må give en forskel i ligningerne og designgraferne om man bruger middel udelufttemperaturen eller en løbende middel-udetemp.
- Udviklet en udvælgelsemetode mellem bygningstyperne Alfa og Beta efter følgende flow chart:



Figur D.3: Kategorisering af bygninger i hhv. Alfa- og Beta-kategori (efter van der Linden et al. [2006]; Kurvers et al. [2006])

Holland har udviklet deres egen løbende middel-udetemperatur uden empirisk eller teoretisk begrundelse. SCATs tager de seneste syv dage med i beregningen.

Udviklet 2 stk. designgrafer til evaluering af det termiske indeklima samt klassificering af en bygnings totale ydeevne. Hvis indetemperaturen aldrig overstiger grænsen for 10% utilfredse vil ydeevnen blive klassificeret som klasse I(A). De opstillede designgrafer til hhv. Alfa- og Beta-bygninger er:



Figur D.4: Afbildning af grænser for operativ indetemperatur som funktion af løbende middel udelufttemperatur for hhv. 90, 80 og 65%'s acceptniveau (efter van der Linden et al. [2006])

Følgende formler ligger til grund for ovenstående grafer:

$$t_{comf,alfa} = 0,31 \cdot T_{rm} + 17,8 \quad (D.6)$$

$$t_{comf,beta} = 0,11 \cdot T_{rm} + 21,45 \quad (D.7)$$

hvor

$t_{comf,alfa}$	=	Komforttemperatur, Alfa-bygninger	[°C]
$t_{comf,beta}$	=	Komforttemperatur, Beta-bygninger	[°C]
T_{rm}	=	Løbende middel-udetemperatur, bestemt ved nedenstående ligning	[°C]

$$T_{rm} = \frac{1,0 \cdot T_{ude,n} + 0,8 \cdot T_{ude,n-1} + 0,4 \cdot T_{ude,n-1} + 0,2 \cdot T_{ude,n-3}}{2,4} \quad (D.8)$$

hvor

T_{rm}	=	Løbende middel-udetemperatur	[°C]
$T_{ude,n}$	=	Middel-udetemperatur for dag nr. n (gennemsnit af maksimum og minimum udetemperatur)	[°C]
n	=	dag-nr.	

De respektive komfortgrænser og antal utilfredse kan ses af nedenstående tabel.

Tabel D.1: Tilladelige afvigelser i °C fra komforttemperaturen bestemt ved ligning (4.21)-(4.22) for hhv. 80 og 90%'s accept [de Dear et al., 1997; Boerstra et al., 2003]. De øgede grænser i Alfa-bygninger er markeret med fed.

Bygningstype	Acceptniveau	Grænser (Øvre/Nedre)	$T_{rm} \leq 12^{\circ}C$	$T_{rm} > 12^{\circ}C$
Alfa	90%	Ø	$t_{comf} + 1,25$	$t_{comf} + \mathbf{2,50}$
		N	$t_{comf} - 1,25$	$t_{comf} - 1,25$
	80%	Ø	$t_{comf} + 2,00$	$t_{comf} + \mathbf{3,50}$
		N	$t_{comf} - 2,00$	$t_{comf} - 2,00$
	65%	Ø	$t_{comf} + 2,40$	$t_{comf} + \mathbf{4,00}$
		N	$t_{comf} - 2,40$	$t_{comf} - 2,40$
Beta	90%	Ø	$t_{comf} + 1,25$	$t_{comf} + 1,25$
		N	$t_{comf} - 1,25$	$t_{comf} - 1,25$
	80%	Ø	$t_{comf} + 2,00$	$t_{comf} + 2,00$
		N	$t_{comf} - 2,00$	$t_{comf} - 2,00$
	65%	Ø	$t_{comf} + 2,40$	$t_{comf} + 2,40$
		N	$t_{comf} - 2,40$	$t_{comf} - 2,40$

Kommentar: De har i Holland taget udgangspunkt i resultaterne fra RP-884-projektet og herefter foretaget ændringer i de adaptive modeller således de beregnes som funktion af den løbende middel-udetemperatur i modsætning til de oprindelige modeller der beregnes som funktion af middel-udeluft-temperaturen. Der er dog ikke foretaget empiriske undersøgelser eller teoretiske begrundelser for at foretage disse ændringer, såsom udskiftning til T_{rm} samt bygningskategoriseringen efter Alfa-/Beta-konceptet. Der er således intet empirisk eller teoretisk grundlag for ændringen af de adaptive modeller.

Referencer:

- [van der Linden et al., 2002]
- [Boerstra et al., 2003]
- [van der Linden et al., 2006]
- [Kurvers et al., 2006]

D.4 PMV_e - 2002

PMV_e - 2002 **Generelt:**

- **Oprindelig PMV-model:**
 - Forsøg i klimakammer
 - 1396 personer
- **PMV_e -model:**
 - Baseret på metaanalyse af data fra RP-884 for udvalgte placeringer: Bangkok, Singapore, Brisbane og Athen. Alle bygningerne er NV-bygninger.
 - 3.200 observationer

Resultater: Baseret på den oprindelige PMV-model. Anerkender indvirkningen fra ”forventningen”, hvorfor der indføres en forventningsfaktor, e . Den konventionelle PMV-model multipliceres med denne faktor, hvorved der tages højde for, at personer i varme klimaer tillader højere temperaturer.

$$PMV_e = PMV \cdot e \quad (D.9)$$

hvor

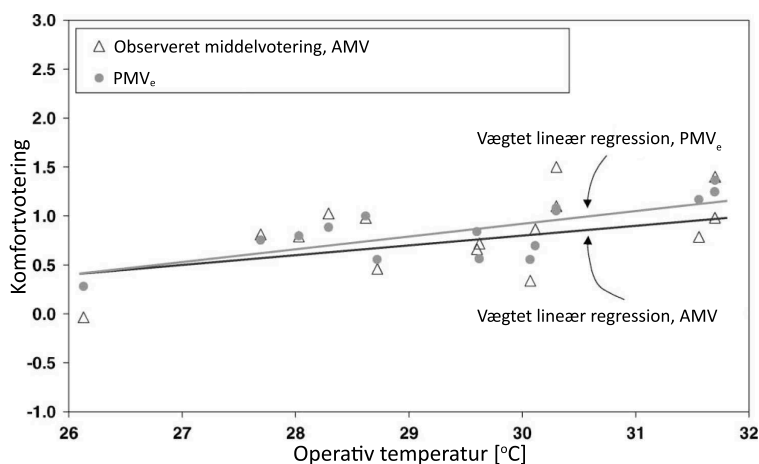
$$\begin{aligned} PMV &= \text{Predicted Mean Vote / Forventet middelvotering} \quad [-] \\ e &= \text{Forventningsfaktor i intervallet } 0,5 \leq e \leq 1,0 \quad [-] \end{aligned}$$

Hvor forventningsfaktoren bestemmes ved:

Tabel D.2: Forventningsfaktor for naturligt ventilerede bygninger i varme klimaer ud fra lav, moderat eller høj forventning (fra Fanger og Toftum [2002])

Forventning	Klassificering af NV-bygninger		e
	Placering	Varme perioder	
Høj	I områder hvor HVAC-bygninger er almindelige	Forekommer kort i løbet af sommersæsonen	0,9-1,0
Moderat	I områder med nogle HVAC-bygninger	Sommersæsonen	0,7-0,9
Lav	I områder med få HVAC-bygninger	Alle sæsoner	0,5-0,7

Foruden dette nedjusteres metabolismen med 6,7% for hver skalaenhed afvigelse fra neutral ($PMV = 1,5 \Rightarrow M_{korr} = -10\%$). Denne nedjustering er baseret på de benyttede data fra RP-884-databasen.



Figur D.5: Sammenligning mellem observerede og forudsagte komfortvoteringer ved brug af PMV_e-modellen. De viste lineære regressioner er vægtet ift. antallet af voteringer i de enkelte bygninger (efter Fanger og Toftum [2002])

Begrænsninger:

- **Oprindelig PMV-model:**

- Aktivitetsniveau: 0,8-4,0 met
- Beklædningsisolans: 0-2 clo
- Lufttemperatur, t_a : 10-30°C
- Middelstrålingstemperatur, t_{mrt} : 10-40°C
- Lufthastighed, v_a : 0-1 $\frac{m}{s}$
- Vanddampstryk, p_a : 0-2700 Pa

- **PMV_e-model:**

- Aktivitetsniveau: 1,2-1,6 met
- Beklædning: kan varieres frit i intervallet 0,5-1,0 clo
- Adgang til funktionsdygtige vinduer (gælder kun for NV-modellen)
- Mindre end 4 personer pr. rum (kun for NV-bygninger)

Kommentarer:

- Bygger på PMV-model, der er gennemprøvet
- Der mangler empirisk belæg for fastsættelse af forventningsfaktoren, e . Undersøgelser skal fastlægge forventningsfaktoren for forskellige typer bygninger i forskellige områder
- Beregningstung (Kræver iterativ beregning)
- PMV-modellen er meget følsom overfor beklædningsisolans og aktivitetsniveau, hvor en lille fejlestimering heraf giver stort udslag på PMV- og PPD-værdien.
- Fleksibel
- Tager direkte hensyn til beklædningsisolans og aktivitetsniveau
- Virker umiddelbart som et hurtigt modtræk til de opstillede adaptive modeller til et forsvar af PMV-modellen

Referencer:

- [Fanger, 1972]
- [Fanger og Toftum, 2002]

By og Byg Miljødeklarering og -klassificering

E

Følgende afsnit indeholder skemaer (forklaringsskemaer, deklareringskemaer etc.) til bruge ved vurdering af bygningers miljødeklarering og -klassificering efter den i kapitel 6.1 beskrevne metode. Følgende beskrivelse og skemaer er taget direkte fra projektet Dinesen et al. [2001], hvor skemaer og ideer bag metoden bruges ved en evt. optimering af indeklimadelen, som beskrevet i afsnit 6.1.

E.1 FORKLARINGSKEMAER

På de følgende sider er vist skemaer, hvor deklarerings- og klassificeringskriterierne er anført, og som danner grundlag for klassificeringen af de enkelte indikatorer. I skemaernes kolonne 1 er indikatorerne opført. Kolonne 2 beskriver kort det miljømæssige formål med den enkelte indikator. I kolonne 3 er konkretiseret, hvordan indikatorerne opgøres. I kolonne 4 er niveauet for referencebygningen angivet. Referencebygningen er her en normal kontorbygning, som overholder gældende lovgivning. Referencebygningen anvendes som sammenligningsgrundlag ved miljødeklareringen. I de tre sidste kolonner er kriterierne for, at en aktuell bygning kan klassificeres som en klasse C, B eller A-bygning, angivet.

Det første skema omfatter indikatorerne energiforbrug, materialeforbrug, affald, klimapåvirkning og luftforurening, som kan beregnes ved hjælp af pcværktøjet BEAT. Klassificeringsværdierne på skemaet er fastlagt på grundlag af beregningerne, som beskrevet i [Dinesen et al., 2001, Bilag 4]. Der er altså tale om foreløbige værdier, som skal efterprøves.

De følgende fire skemaer omfatter indeklimaets fire delelementer: Luftkvalitet, termisk klima, dagslys, udsyn og kunstlys samt støj og akustik. Hver af delelementerne indeholder 4-5 indeklimakriterier, som for nogle kriteriers vedkommende er kvalitative udsagn, for andres kvantitative. Ved hjælp af udsagnene kan bygningen placeres i klasse A, B eller C for hvert kriterium. Skemaerne indeholder desuden et pointsystem, som gør, at indikatorerne kan adderes til én samlet talværdi for indeklimaet som helhed. Det skal pointeres, at der, både hvad angår kriterier og pointsystem, er tale om et første udspil til, hvordan indeklimaet kan håndteres på en forenklet måde i en overordnet miljösammenhæng.

Det sidste skema indeholder ”Øvrige indikatorer” omfattende uønskede kemikalier, vandforbrug, bygningens drift, bygningens lokalisering og ”eget valg”. Hver indikator kan klassificeres A, B eller C ved hjælp af kvalitative udsagn, og et pointsystem kan give en samlet talværdi for ”øvrige” indikatorer på samme måde som under indeklima. Også her skal det pointeres, at der er tale om et første udspil, som skal afprøves og justeres i en senere udgave.

Indikatorer som beregnes med BEAT						
Talværdierne er personækvivalenter gange 100.000						
Indikator	Formål	Konkretisering	Referencebygning	Klasse C	Klasse B	Klasse A
Energiforbrug	Reducere brændselsforbruget til produktion af energi.	Livscyklusforbruget beregnet ved hjælp af BEAT, Bv98 mv. (PE/m ² /år).	20	18	16	14
Materialeforbrug	Reducere råstofforbruget til produktion af byggematerialer.	Livscyklusforbruget af udvalgte råstoffer beregnet ved hjælp af BEAT (PE/m ² /år).	20	18	16	14
Affald	Reducere affaldsmængderne fra byggeri.	Samlet mængde af volumenaffald, slagge og aske samt farligt affald. BEAT (PE/m ² /år).	240	220	200	180
Klimapåvirkning	Reducere drivhuseffekt og nedbrydning af ozonlag.	Beregnet ved hjælp af BEAT (PE/m ² /år).	200	180	160	140
Luftforurening	Reducere forsurening og fotoke-misk ozondannelse.	Beregnet ved hjælp af BEAT (PE/m ² /år).	75	65	55	45

Indeklima, luftkvalitet						
Indikator	Formål	Konkretisering	Referencebygning	Klasse C	Klasse B	Klasse A
Afgasning	Reducere afgasningen til indeklimaet fra byggematerialer.	Indeklimamærkede (el. tilsvarende dok.) byggevarer skal anvendes til indvendige overflader i følgende omfang:	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Min. gulvbelægningen. 6 point	Alle overflader uden angivelse af tidsværdi. 4 point	Alle overflader med lavest multi-ge tidsværdier. 2 point
Støv	Reduktion af støv gennem valg af byggematerialer samt rengøring og vedligeholdelse.	Ikke lødne, ikke smudsskjulende, rengøringsvenlige byggematerialer, lettilgængelige overflader, tilstrækkelig og rigtig rengøring og vedligeholdelse.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Rengøringsvenlige materialer. 6 point	Rengøringsvenlige materialer, få utilgængelige overflader. 4 point	Rengøringsvenlige, slidstærke og holdbare materialer, ingen utilgængelige overflader, rengørings- og vedligeholdelsesprogram. 2 point
Ventilation	Ventilation skal kunne sikre en god luftkvalitet.	Reguleringsvenlighed, mulighed for forceret ventilation, oplukkelige vinduer.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Oplukkelige vinduer. 6 point	Oplukkelige vinduer, regulerbar (gerne naturlig) ventilation. 4 point	Oplukkelige vinduer, regulerbar (gerne naturlig) ventilation med mulighed for forcering. 2 point
Fugtsikkerhed	Undgå fugt i konstruktioner mv., især skjulte steder.	Inspicerbare konstruktioner, ikke letnedbrydelige materialer i våd-rum, ikke skjulte rørføringer, tage med hældning, dræn og kapillarbrydende lag.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Inspicerbare konstruktioner i tag, vådrum uden let nedbrydelige materialer i vægge og gulv. 6 point	Inspicerbare konstruktioner i tag, vådrum uden let nedbrydelige materialer i vægge og gulv, ikke skjulte rørføringer. 4 point	Inspicerbare konstruktioner i tag, vådrum uden organiske materialer i vægge og gulv, ikke skjulte rørføringer, tage med hældning, dræn og kapillarbrydende lag. 2 point
I alt:	Indeklima, luftkvalitet			24 point	18 point	12 point

Indeklima, termisk klima						
Indikator	Formål	Konkretisering	Referencebygning	Klasse C	Klasse B	Klasse A
Undertemperaturer	Temperatur- forholdene skal kunne overholde fastlagte kriterier.	Beregning af temperaturforholdene skal vise, at følgende forhold kan opretholdes:	Eksisterende lovgivning er overholdt.	> 20°C ved -12 ude med bidrag af anden opvarmning end varmeanlægget. 6 point	> 20°C ved -12°C ude. 4 point	> 22°C ved -12°C ude. 2 point
Overtemperaturer	Temperatur- forholdene skal kunne overholde fastlagte kriterier.	Beregning af temperaturforholdene skal vise, at følgende forhold kan opretholdes.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	< 28°C ud over ekstremt varme dage. 6 point	< 26°C ud over ekstremt varme dage. 4 point	< 24°C ud over ekstremt varme dage. 2 point
Træk	Der må ikke forekomme for høje hastigheder i opholdszonen pga. høje glaspartier eller ventilation.	Beregning skal godtgøre flg. maks. hastigheder i opholdszonen:	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Normalt < 0,2 m/s. 6 point	Normalt 0,15 - 0,20 m/sek. 4 point	Normalt < 0,15 m/sek., altid < 0,2 m/sek. 2 point
Stråling til kold flade	Strålings- temperaturen mod kold flade må ikke være for lav i forhold til rumtemperaturen.	Beregning skal vise, at følgende forhold kan opretholdes.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Strålingstemperatur maks. 10° lavere end rumtemperatur. 6 point	Strålingstemperatur maks. 6-10° lavere end rumtemperatur. 4 point	Strålingstemperatur < 6° lavere end rumtemperatur. 2 point
Individuelle reguleringsmuligheder	Det er vigtigt at der findes individuelle reguleringsmuligheder som oplukkelige vinduer, temperatur- og ventilationsluftsregulering mv.	Følgende reguleringsmuligheder skal findes:	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Rumtemperatur- regulering. 6 point	Rumtemperatur- regulering, oplukkelige vinduer. 4 point	Rumtemperatur- regulering, oplukkelige vinduer, regulering af ventilationsluft. 2 point
I alt:	Indeklima, termisk			30 point	22 point	14 point

Indeklima, dagslys, udsyn og kunstlys						
Indikator	Formål	Konkretisering	Referencebygning	Klasse C	Klasse B	Klasse A
Dagslysforhold	Der skal sikres dagslys til arbejdspladser og passende luminansforhold i lokalet.	Beregning/vurdering af dagslysfaktor (DF) på arbejdsplan samt blændings- og kontrastforhold ved alle arbejdspladser.	DF = 2,0 (alle arbejdspladser)	DF = 2,0 Lyse vinduesrammer og -karme. 6 point	DF > 2,5 Lyse vinduesrammer og -karme. 4 point	DF > 3,0. Lyse vinduesrammer og -karme. Lyse vinduesomgivelser (R > 0,5). Lyse overflader. Rloft > 0,7; Rvæg > 0,5; Rgulv > 0,25. 2 point
Udsyn	Der skal være mulighed for visuel kontakt med omgivelser fra alle arbejdspladser.	Maks. afstand fra arbejdspladser til vindue. Passende vinduesbredde i forhold til murdybde.	Vinduesareal > 10 % af gulvareal	Glasareal > 18% af facade (indv. målt). Afstand fra arbejdsplads til vindue < 5 m. 6 point	Glasareal > 20% af facade (indv. målt) Lystransmittans > 0,69. Afstand fra arbejdsplads til vindue < 4 m. 4 point	25% < glasareal < 35% af facade (indv. målt). Lystransmittans > 0,75. Afstand fra arbejdsplads til vindue < 3 m. 2 point
Solafskærmning	Der skal sikres en effektiv, regulerbar solafskærmning mod direkte sol på arbejdspladserne.	Afskærmningsfaktor for solvarme Bevaring af udsyn fra arbejdspladser.	Fast udhæng over vindue, solafskærmende rude	Delvis variabel afskærmning fx faste, drejelige lameller) over vindue. 6 point	Regulerbar afskærmning f _a f _s < 0,4. Delvis bevaring af udsyn. 4 point	Opdelt, regulerbar afskærmning f _a f _s < 0,3. Automatisk styring af afskærmning med brugeroverstyring. Begrænset farvning af sol-/dagslys. Bevaring af udsyn. 2 point
Kunstig belysning	Der skal sikres tilstrækkeligt lys uden blænding eller refleksioner ved arbejdspladser.	Beregnet belysningsstyrke og blændingsindeks ved arbejdspladser.	Opfyldelse af krav i DS 700 (Dansk Standard, 1997) og BR 95 (Boligministeriet, 1995).	>200 lux. Automatisk styring uden brugerkontrol. 6 point	>200 lux ved hver arbejdsplads, en vis variation i belysningsstyrke og luminansfordeling (10:3:1). Brugerstyret regulering. 4 point	>250 lux ved hver arbejdsplads, god variation i belysningsstyrke og luminansforhold. Automatisk regulering med manu-el overstyring. 2 point
I alt:	Indeklima, dagslys, udsyn og kunstlys			24 point	18 point	12 point

Indeklima, støj og akustik						
Indikator	Formål	Konkretisering	Referencebygning	Klasse C	Klasse B	Klasse A
Støj gennem klimaskærm	Dæmpning af støj gennem klimaskærm: Støj indendørs fra trafik.	Maks. A-vægtet ækvivalent lydtryksniveau i opholds- og arbejdsrum i kontorbygninger.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	40 6 point	35 4 point	30 2 point
Støj fra installationer	Dæmpning af støj fra installationer i bygningen.	Maks. A-vægtet ækvivalent lydtryksniveau i kontorer - mødelokaler - kontorlandskaber.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	40 - 35 - 45 6 point	35 - 30 - 40 4 point	30 - 25 - 35 2 point
Støj mellem opholdsrum	Dæmpning af støj mellem opholdsrum.	Min. vægtet tilsyneladende reduktionstal mellem møde/kontor - kontor/kontor - kontor/ gang.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	44 - 35 - 30 6 point	48 - 40 - 35 4 point	52 - 44 - 40 2 point
Efterklangstid	Efterklangstid: Akustisk regulering.	Min. Ækvivalent absorptionssareal i forhold til gulvareal, kontor: > 100 m ² - < 100 m ² - for én person.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	0,7 - 0,6 - 0,5 6 point	0,8 - 0,7 - 0,6 4 point	0,9 - 0,8 - 0,7 2 point
I alt:	Indeklima, støj og akustik			24 point	18 point	12 point
I alt:	Indeklima			102 point	76 point	50 point

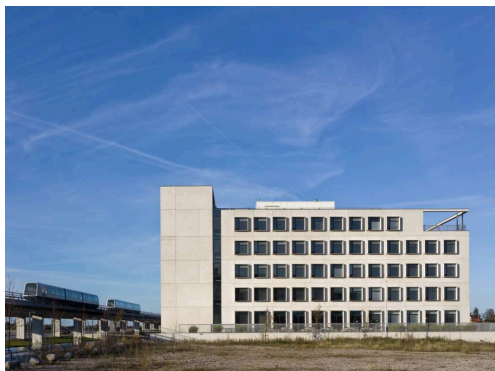
Øvrige indikatorer						
Indikator	Formål	Konkretisering	Referencebygning	Klasse C	Klasse B	Klasse A
Uønskede kemikalier	Reducere indholdet af uønskede kemikalier i byggevarer.	Producenter skal udarbejde sikkerhedsdatablade for kemiske produkter	Eksisterende lovgivning er overholdt.	En procedure for indsamling af sikkerhedsdatablade for de anvendte kemiske produkter har været opstillet. 20 point.	En systematik til behandling af sikkerhedsdatabladene har været udarbejdet. 15 point	En prioritering af stofferne har været opstillet og gennemførte tiltag til at undgå dem er dokumenteret. 10 point
Vandforbrug	Reducere forbruget af rent grundvand.	Tiltag til reduktion af forbruget i driftsfasen.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Der er anvendt vandbesparende installationer overalt i bygningen. 20 point	Som C + overfladevand er nedsivet på grunden og/eller regnvand anvendes til toiletskyl/vaskeri. 15 point	Som B + anvendelse af gråt spildevand ? og/eller lokal rensning af spildevand (rodzoeanlæg)? 10 point
Bygningens drift	Sikre hensigtsmæssig drift og vedligeholdelse af hensyn til energi- og vandforbrug samt levetider.	Tiltag der foreskriver drifts- og vedligeholdelsesprocedurer mv.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Der er udarbejdet drifts- og vedligeholdelsesinstruktion, hvori miljøforhold er behandlet. 20 point	Som C + opstillet systematik for gennemførelse af grønne regnskaber i forbindelse med bygningens drift, herunder inddragelse af brugere samt plan for løbende opfølgning/forbedringer. 15 point	Som B + et CTS-anlæg, som i vid udstrækning inddrager miljømæssige forhold (aut. styring af varme, belysning - forbrugsregistrering mv.). 10 point
Bygningens lokalisering	Overveje lokaliseringen af hen-syn til transportforhold (reduktion af energiforbrug).	Tiltag til fremme af offentlig og cykeltransport.	Eksisterende lovgivning er overholdt.	Afstanden til kollektiv trafik er maks. 500 m 20 point	Afstanden til kollektiv trafik er 250-500 m. Der er bade- og omklædningsfaciliteter. 15 point	Som B + afstanden til kollektiv trafik med en afgangshyppighed på maks. 10 min. er 250-500 m. 10 point
Eget valg	Overveje andre tiltag hvis miljømæssige nytte kan dokumenteres.	(Gøres i de enkelte byggerier).		20 point	15 point	10 point
I alt:	Øvrige indikatorer			100 point	80 point	60 point

Nærværende appendiks indeholder dels beskrivelse af bygningen København Energi samt beskrivelse af den opbyggede model i TBS-programmet BSim.

F.1 BYGNINGSBESKRIVELSE

Den udvalgte bygning placeret i Ørestaden er opført i perioden 2003-2005 er tegnet af arkitektfirmaet Schmidt Hammer Lassen og huser Københavns Energi A/S, der er en af Danmarks førende energivirksomheder. Bygningen er naturligt ventileret gennem det centrale atrium omkring hvilket kontorplanerne er placeret. De ca. 330 medarbejdere er fordelt på fem etager, hvor nederste etage udelukkende indeholder de offentlige funktioner samt møderum. De enkelte etager er udformet som åbne kontorlandskaber med direkte adgang til det centrale atrium, og kun møderum, kantinen samt kælderregionens fitness-rum er mekanisk kølede. Facaden er endvidere forsynet med udvendig solafskærmning i form af motoriserede markiser.

Følgende figurer F.1-F.3 viser hhv. billeder samt tegninger af den udvalgte bygning.



(a) *Facade mod syd*



(b) *Kontorlandskab*

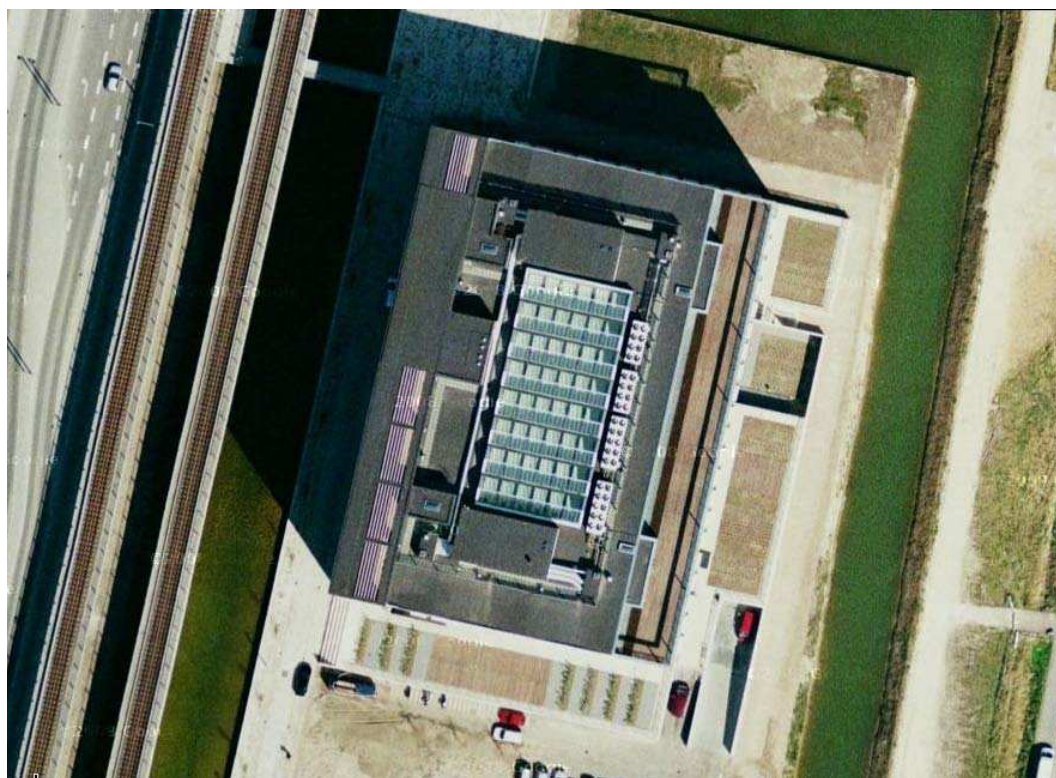


(c) *Facade mod vest*

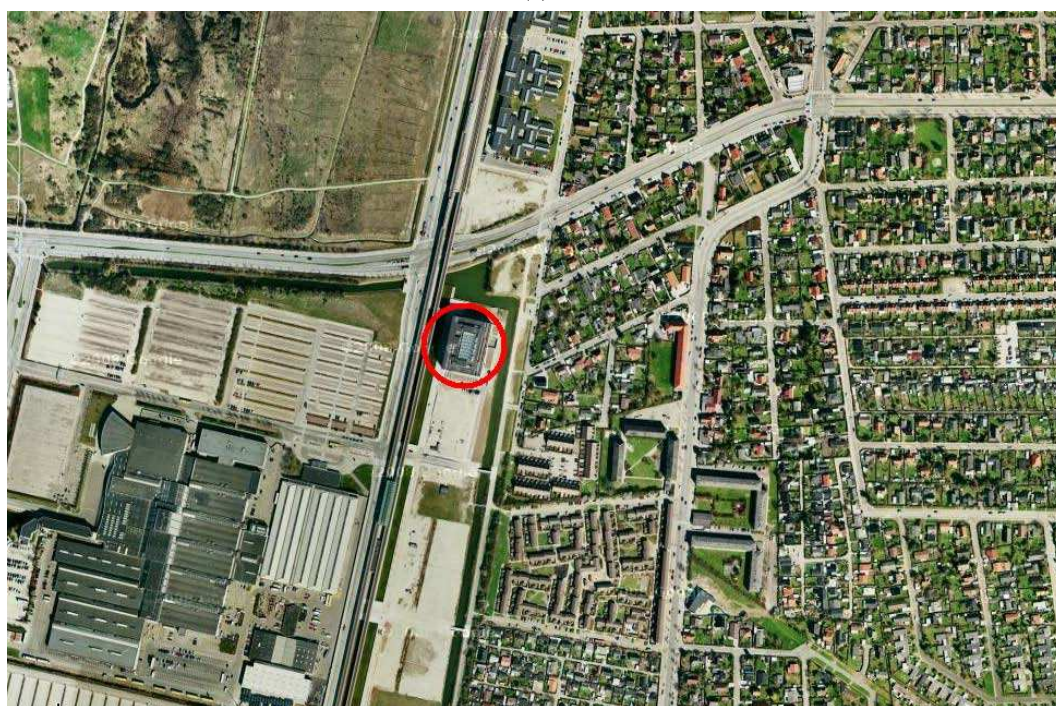


(d) *Atrium*

Figur F.1: *Billeder af Københavns Energi A/S (fra www.shl.dk).*



(a)



(b) (Bygning markeret med rød cirkel)

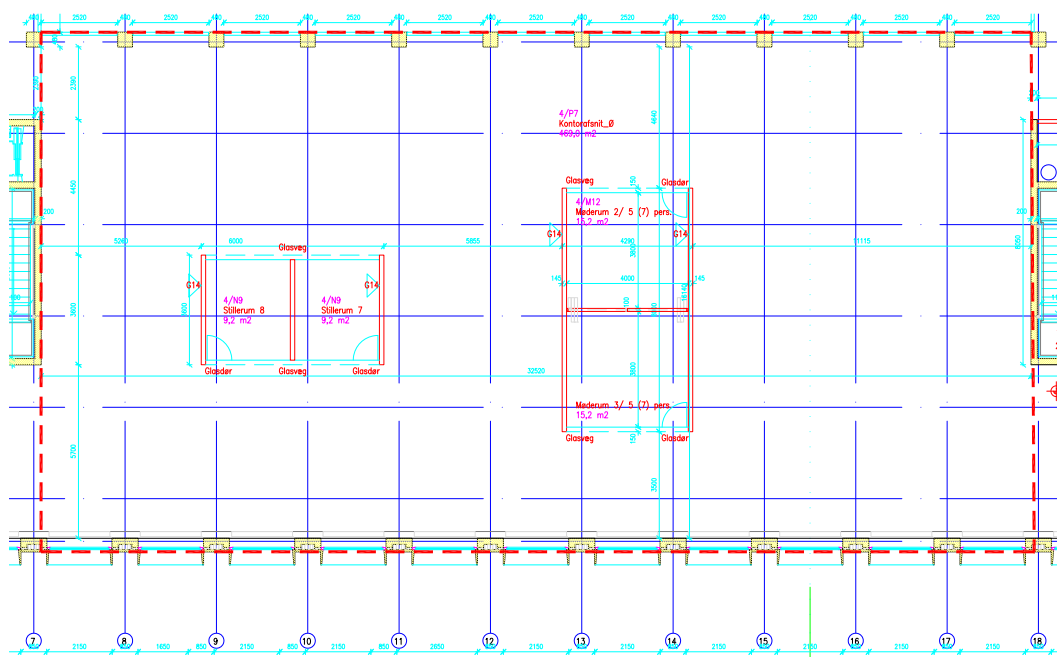
Figur F.2: Luffotos (fra www.maps.google.com).

F.2 OPBYGNING AF BSIM-MODEL

I de nedenstående afsnit præsenteres opbygningen af modellen i BSim sammen med en angivelse af samtlige opsatte systemer.

F.2.1 GENERELLE FORHOLD

For simulering af det termiske og atmosfæriske indeklima, er der foretaget en afgrænsning således der kun opstilles en BSim-model for et udvalgt område af bygningen. I dette tilfælde er det valgt at opbygge modellen for det østvendte kontorområde på 2. sal (nederste kontorområde på figur F.3). Baggrunden for dette er, at indeklimate målinger foretaget af Larsen et al. [2006] viste højeste temperaturer i dette område. Følgende figur viser det udvalgte område med viste afgrænsninger.



Figur F.4: Tegning af det udvalgte kontorområde med viste afgrænsninger markeret med rød stiplede linje. Nederste facade er østvendt.

Ved den på figur F.4 viste afgrænsning vil den åbne forbindelse til de nord- og sydvendte kontorer ikke blive modelleret. De termiske forhold er tæt på værende ens, og idet åbningen mod de andre områder er lille vurderes det derfor, at den foretagne afgrænsning med god overensstemmelse kan bruges ved opstillingen af BSim-modellen. Idet bygningen primært er naturligt ventileret (beskrevet i starten af nærværende appendiks), vil der reelt set forekomme luftstrømninger mellem de enkelte områder. Yderligere bør det bemærkes, at ved den på figur F.4 viste afgrænsning forudsættes det således, at der udelukkende forekommer luftstrømninger gennem vinduerne i den østvendte facade samt mod det central atrium (foruden in-/eksfiltration). Idet det samlede åbningsareal mod atriet er meget større end mod de nord- og sydvendte kontorer vurderes det, at den benyttede afgrænsning med god overensstemmelse kan benyttes.

Arbejdstiden er i den opstillede BSim-model angivet til 8.00-17.00, på baggrund af oplysninger fra Københavns Energi A/S.

I de følgende underafsnit vil samtlige konstruktioner blive præsenteret sammen med opsætningen af de enkelte bygningssystemer i BSim.

F.2.2 KONSTRUKTIONER

Følgende tabeller F.1-F.4 angiver opbygningen af de enkelte konstruktioner i forbindelse med opstillingen af BSim-modellen. Oplysningerne er hentet fra arkitekt- og ingeniørtegninger. Alt materiale er placeret på den vedlagte DVD.

For at kompensere for det øgende varmetab som følge af sprosserne i vinduerne, er den lineære transmissionskoefficient, Ψ_g , i tabel F.4 forøget for at opnå vinduets reelle totale U-værdi¹.

Tabel F.1: Opbygning af ydervægge i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
<i>Sandwich-element</i>			
<i>bestående af</i>			
Beton	0,200	1,72	800
Isolering	0,175	0,037	800
Beton	0,070	0,5	800
Samlet U-værdi:	0,19 $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$		

Tabel F.2: Opbygning af etageadskillelser i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Trægulv	0,014	0,17	1800
Afretning	0,076	0,25	1000
Betonelement	0,400	1,5	800
Luft	0,050	(0,16) ^{a)}	
Rockfon-plader	0,070	0,06	800
Samlet U-værdi:	0,44 $\frac{W}{m^2 \cdot K}$		
a) Termisk modstand af luftlag iht. DS 418 [2002] [$\frac{m^2 \cdot K}{W}$]			

¹Til beregning af den forventede U-værdi er beregningsværktøjet på www.velfac.dk benyttet

Tabel F.3: Opbygning af indervægge i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Betonelement	0,200	0,4	1000
Samlet U-værdi:	$1,32 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$		

Tabel F.4: Opbygning af vinduer i BSim.

Materiale	Lineær transmissionskoeff., Ψ_g [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Bredde af ramme/karm [m]
Cool-lite SKN 172	0,2 ^{b)}	
Alu-træ		0,1
U-værdi, glas (center)	$1,1 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	
Varmetransmittans (g-værdi)	0,4	
Sollystransmittans (LT)	0,67	
Reflektans (indv./udv.)	0,24/0,24	
Absorbans (indv./udv.)	0,37/0,02	
Samlet U-værdi:	$1,35 - 1,50 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	

b) Forøget for at opnå samlet U-værdi mht. sprosser.

Ved valideringen af modellen er densiteten af de enkelte materialer justeret for at opnå korrekt varmekapacitet for det udvalgte område. Atriet, der ikke er medtaget ved opstillingen af modellen, indvirker på det termiske indeklima i det udvalgte område, og den store termiske masse i atriets konstruktioner har en buffer-effekt på temperatursvingningerne i rummet. For at tage højde for dette og opnå ensartede temperatursvingninger iht. målingerne, har det været nødvendigt at justere densiteten for de enkelte konstruktioner. Dette er foretaget iterativt ifm. valideringen af modellen ved sammenligning med målingerne foretaget af Larsen et al. [2006].

F.2.3 INDEKLIMAMÅLINGER

I perioden 1/7 2005 - 30/6 2006 er der foretaget indeklimamålinger, hvor der foruden inde- og udelufttemperaturer, CO₂-koncentrationer blev udført spørgeskemaundersøgelser [Larsen et al., 2006]. Udover langtidsmålinger i den førnævnte periode, blev der endvidere foretaget korttidsmålinger i følgende perioder:

- 22-26/8 2005 (Sommersituation)
- 6-10/2 2006 (Vintersituation)
- 2-4/5 2006 (Forårs-/efterårssituation)

De udførte indeklimamålinger, der sammen med analyser heraf havde til hensigt at dokumentere det termiske og atmosfæriske indeklima, vil i det nedenstående blive benyttet til validering af den

opstillede BSim-model.

F.2.4 GENERERING AF VEJRDATA FOR SIMULERING

Data indhentet fra DMI [2008] benyttes til generering af vejrdatabaser. Målingerne er hentet fra stationerne i hhv. Kastrup samt Toldboden (kun global solstråling). Følgende data er indhentet:

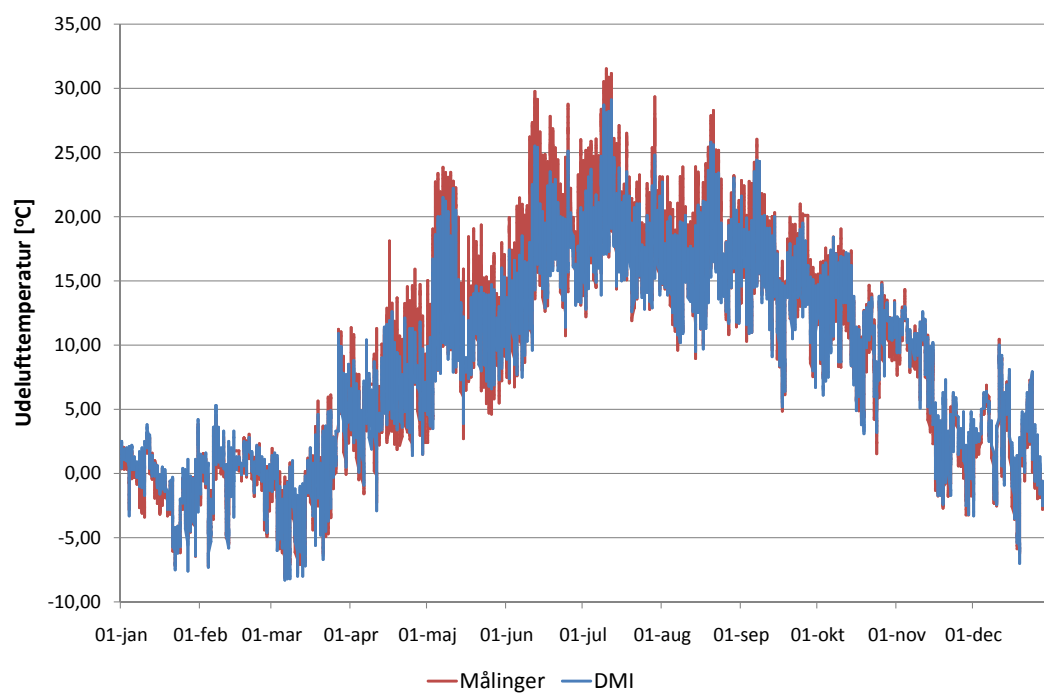
- Udelufttemperatur
- Daglig minimumstemperatur
- Daglig maksimumstemperatur
- Relativ luftfugtighed
- Vindhastighed
- Vindretning
- Lufttryk
- Skydække
- Global solstråling

Idet DMI [2008] ikke kan levere værdier for den diffuse stråling, er det nødvendigt at beregne denne for samtlige timer af den betragtede periode. Her er det valgt at benytte beregningsmodellerne opstillet af Lund [1985], og der henvises til appendiks H for information om disse beregninger. I de modtagne data forekommer der huller enkelte steder af en times varighed. Her er det valgt, at benytte middelværdien af timen før hhv. efter de manglende data.

I de følgende underafsnit sammenlignes de modtagne data fra DMI [2008] med data målt af Larsen et al. [2006]. Endvidere foretages der sammenligninger med data fra det danske design reference år (DRY).

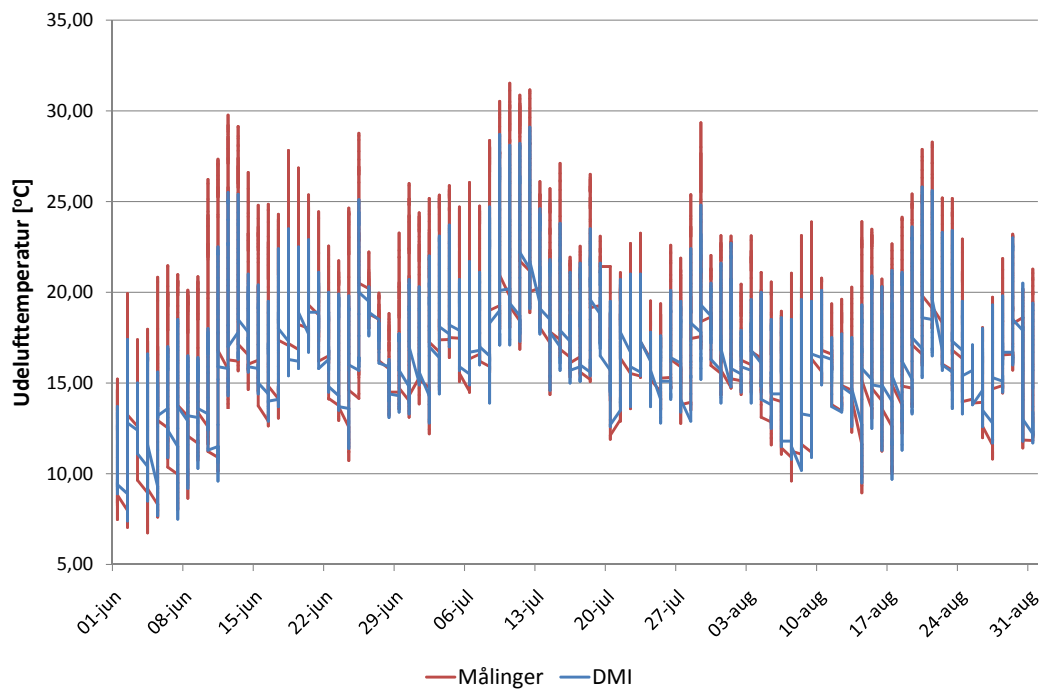
Udelufttemperaturer

Følgende figur viser de af DMI [2008] målte udelufttemperaturer sammenlignet med temperaturer målt af Larsen et al. [2006].



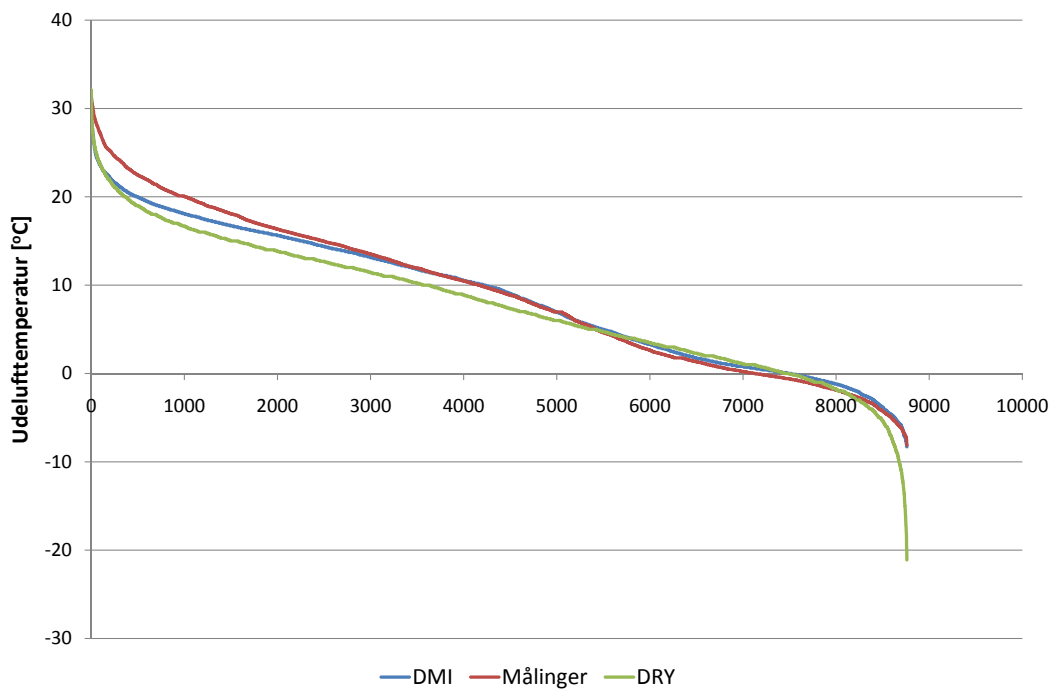
Figur F.5: Målinger af udelufttemperaturen foretaget af Larsen et al. [2006] sammenlignet med data fra DMI [2008] for den udvalgte periode.

Som det fremgår af figur F.5, ligger de to målinger tæt i de kolde perioder. Der forekommer dog en stigende forskel mod varmere perioder, og for at undersøge dette nærmere viser følgende figur målinger fra hhv. juni, juli og august.



Figur F.6: Målinger af udelufttemperaturen foretaget af Larsen et al. [2006] sammenlignet med data fra DMI [2008] i månederne juni, juli og august.

Af figur F.6 ses det, at den målte udelufttemperatur af Larsen et al. [2006] ligger generelt højere end værdierne fra DMI [2008]. Forskellen imellem de betragtede data er op mod ca. 5°C i den valgte periode. En yderligere belysning af forskellen mellem de behandlede data fremgår af følgende figur F.7, der viser fordelinger af udelufttemperaturen for de to datasæt samt for det danske design reference år (DRY).



Figur F.7: Fordelinger af udelufttemperaturen målt af Larsen et al. [2006] samt data fra DMI [2008]. Endvidere vises fordelingen for det danske design reference år (DRY).

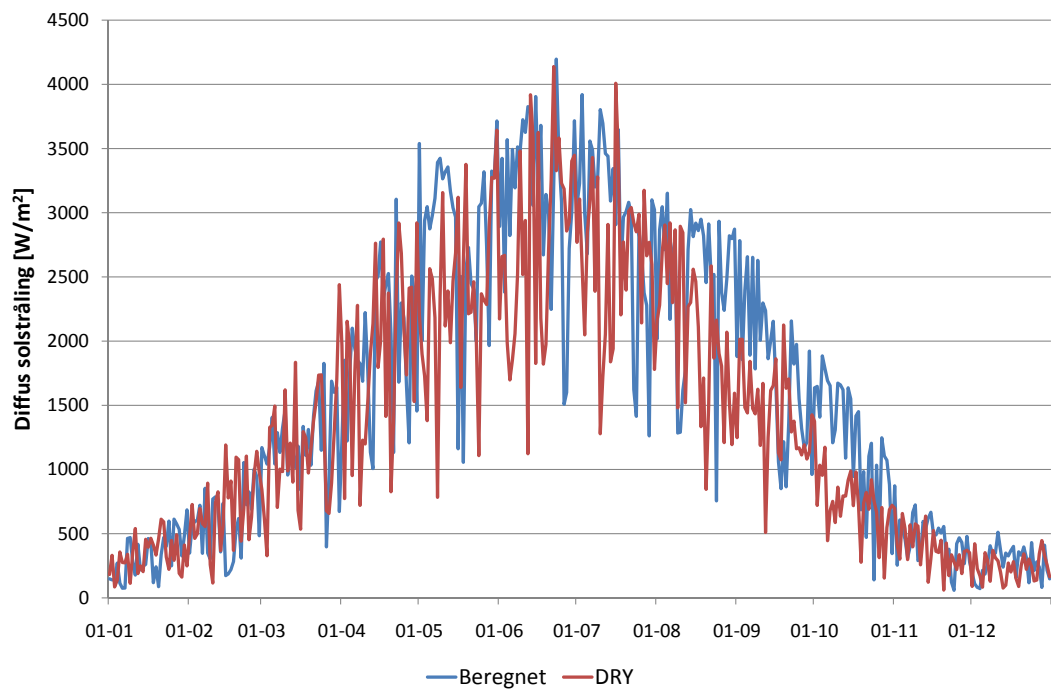
Som ovenstående figur også viser, er der af Larsen et al. [2006] generelt målt højere udelufttemperaturer end de tilsvarende data fra DMI [2008]. Foruden dette bør det kommenteres, at udelufttemperaturerne fra det danske DRY, ligger langt begge datasæt. Idet data fra DMI [2008] vurderes som værende af højere kvalitet end de af Larsen et al. [2006] målte, vælges det at benytte disse som grundlag for vejrdatabasen til BSim-modellen.

Solstråling

Som beskrevet tidligere har det været nødvendigt at beregne den diffuse fraktion af solstrålingen, idet DMI [2008] ikke har kunnet levere disse data, og hertil er beregningsmodellen af Lund [1985] er benyttet. Der henvises til appendiks H for eksempelberegning heraf.

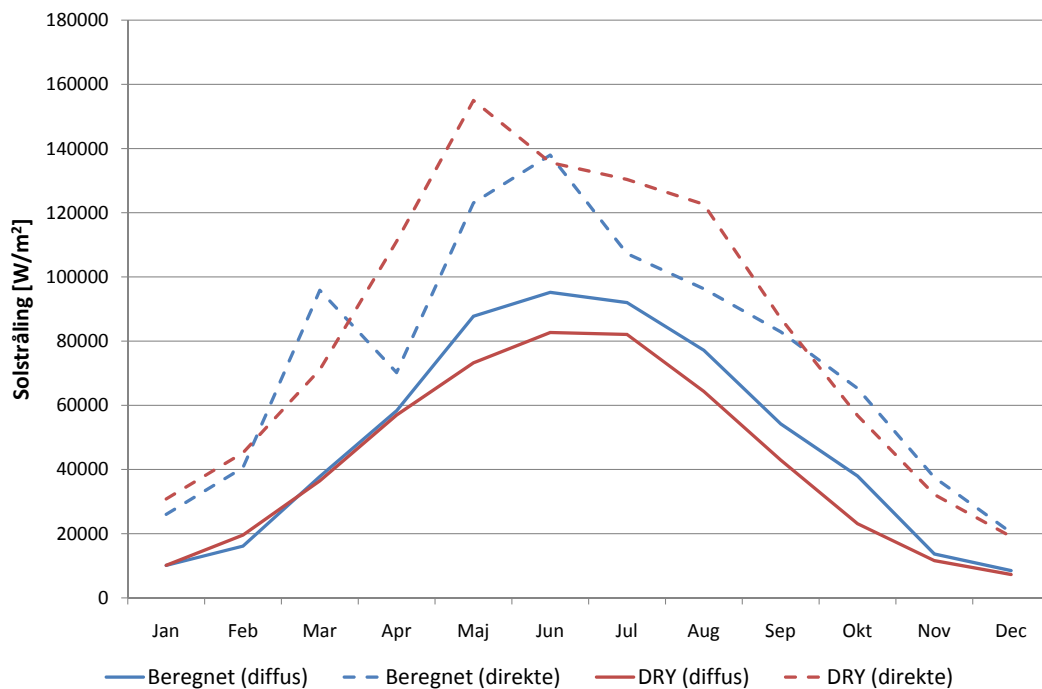
I det følgende sammenlignes den beregnede diffuse solstråling med det danske design reference år, der normalt benyttes ved simuleringer, hvor vejrdatabasen ikke er indhentet.

En sammenligning mellem de beregnede værdier (døgnsomme) for den diffuse solstråling og data fra det danske DRY er vist i følgende figur.



Figur F.8: Beregnede værdier (døgnsum) for den diffuse fraktion af den totale solstråling sammenlignet med data fra dansk DRY.

Af figur F.8 fremgår det, at den beregnede diffuse solstråling og den i det danske DRY ligger tæt på hinanden i månederne januar-april samt november-december, men at der i de resterende måneder hovedsageligt er beregnet højere værdier. Følgende figur viser måned-summen af den beregnede diffuse solstråling sammenlignet med data fra det danske DRY. Endvidere er den beregnede direkte solstråling også vist.



Figur F.9: Total beregnet diffus og direkte stråling pr. måned sammenlignet med data fra dansk DRY.

Figur F.9 viser tydeligt den højere beregnede diffuse solstråling ift. de normalt benyttede klimadata, såfremt målinger ikke er indhentet. For den direkte solstråling er det modsatte gældende. Fra marts til september ligger data fra det danske DRY over de beregnede værdier. Ved simuleringer med det danske design reference år, vil solbelastningen og dermed kølebehovet være en del større end i det aktuelle tilfælde.

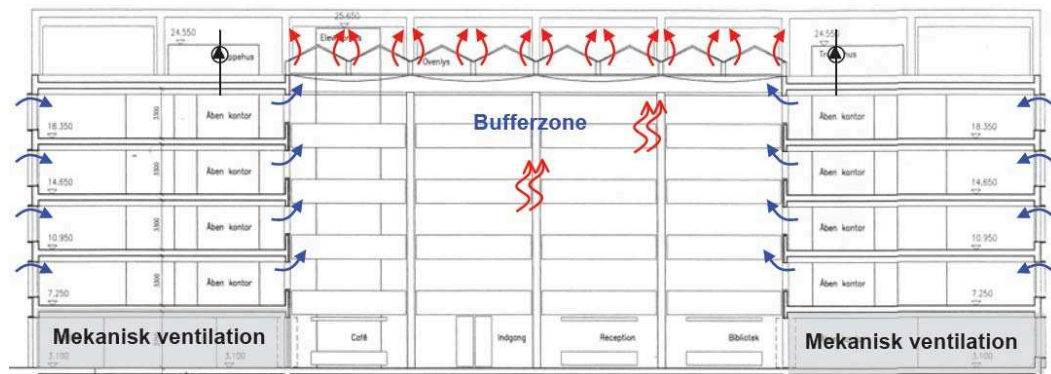
På baggrund af ovenstående genereres vejrdata gennem BSim med følgende parametre:

- Måned (1-12)
- Dag (1-365)
- Time (1-24)
- Udelufttemperatur [$^{\circ}C$]
- Relativ luftfugtighed [%]
- Skydække [oktas] (0-8)
- Vindhastighed [$\frac{m}{s}$]
- Vindretning [$^{\circ}$] (0° : Nord, 90° : Øst, 180° : Syd, 270° : Vest)
- Lufttryk [Pa]
- Global solstråling [$\frac{W}{m^2}$]
- Diffus solstråling, beregnet [$\frac{W}{m^2}$]

I det følgende afsnit vil opsætningen af systemerne i BSim til simulering af hhv. varmeanlæg, ventilation, infiltration, intern varmebelastning fra personer og udstyr, belysning samt solafskærmning blive præsenteret.

F.2.5 OPSÆTNING AF SYSTEMER

Bygningen er primært ventileret naturligt gennem automatisk styrede åbninger i facaden samt i loftet i atriet. Følgende figur viser ventilationsprincippet for bygningen.



Figur F.10: Ventilationsprincip for den udvalgte bygning.

Som vist på figur F.10 er der kun mekanisk ventilation i stueetagen. På øverste etage er der, som følge af det mindre termiske drivtryk i forhold til de andre etager, endvidere monteret mekanisk udsugning, der er styret automatisk sammen med åbningerne i facader samt atrie-loftet. Endvidere kan det nævnes, at de enkelte kontorlandskaber er i åben forbindelse til atriet - kun afskærmet af et mindre glasværn.

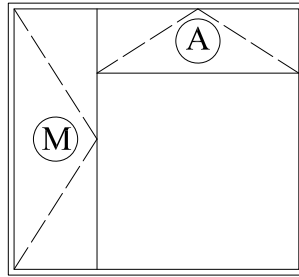
I det følgende vil styringen samt opsætningen af samtlige systemer i BSim-modellen blive præsenteret.

Varmeanlæg

Varmeanlægget er et traditionelt vandbåret varmeanlæg forsynet med blandekreds for udetemperaturkompensering. I den opstillede BSim-model simuleres varmeanlægget gennem systemet for ventilation, der beskrives i følgende afsnit.

Ventilation(*Ventilation*)

Som tidligere beskrevet, er bygningen primært naturligt ventileret. Kun stueetagen samt øverste etage er mekanisk eller hybrid ventileret, men idet fokus for nærværende model er rettet mod 2. etage, er dette mere eller mindre uden interesse. Følgende billede viser en principtegning for vinduerne i facaden.



Figur F.11: Principtegning for vinduerne i facaden. "M" angiver at sektionen er manuelt styret, og "A" angiver at sektionen er styret automatisk.

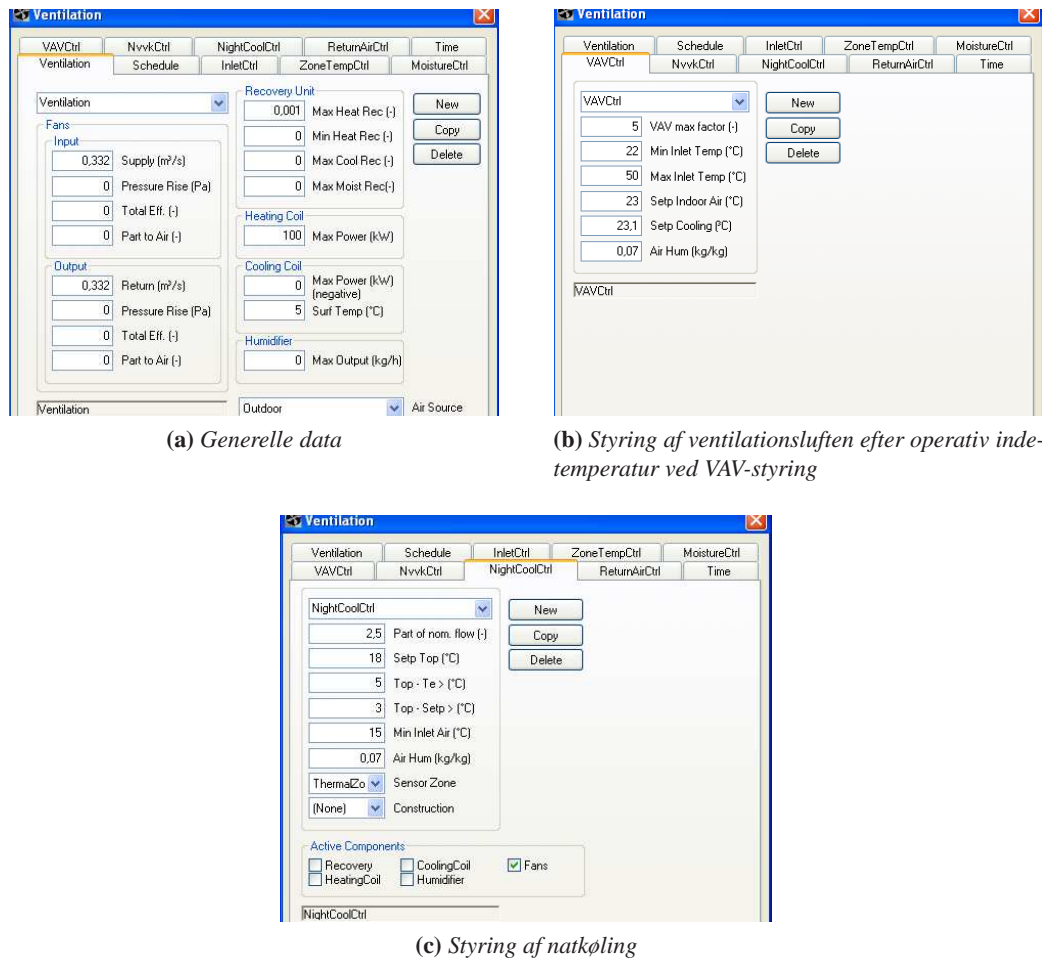
Ved simulering af den naturlige ventilation antages det, at den manuelle åbningsfunktion ikke er i brug. Åbningsgraden af facade- og atrie-åbningerne styres efter CO_2 -koncentrationen samt indelufttemperaturen. Den naturlige ventilation samt styringen heraf, kan med fordel simuleres gennem systemet for ventilation (forudsat at luftstrømningen forekommer i den tilsigtede retning). Automatikken på vinduerne justerer åbningsgraden i afhængighed af dels CO_2 -niveauet samt et setpunkt for rumtemperaturen på 23°C . Til beregning af luftskiftet i den udvalgte zone, er der på baggrund af målingerne af CO_2 -koncentrationerne samt forudsætninger om antal personer og deres aktivitetsniveau foretaget beregninger² af det aktuelle luftskifte ved de benyttede konditioner. Det gennemsnitlige luftskifte er beregnet til $3,5h^{-1}$, der sammen med et vurderet infiltrationsluftskifte på $0,2h^{-1}$ svarer til en luftmængde på $1,66\frac{m^3}{s}$. Styringen af ventilationen foretages gennem systemet for variabel luftmængde (VAVCtrl), hvor den beregnede maksimale luftmængde på $1,66\frac{m^3}{s}$ opnås ved spidsbelastning. I systemet for ventilation angives en basisluftmængde, hvorefter VAV-styringen kan behovsregulere denne. Basisluftmængden er bestemt ved beregninger af luftskiftet ved maksimal målt CO_2 -koncentration ud fra fortyndingsligningen. Denne er beregnet til $0,332\frac{m^3}{s}$.

Foruden den almindelige ventilation, er der endvidere etableret styring for natkøling af bygningen. Natkølingen er styret efter et setpunkt for den operative indetemperatur på 18°C .

Følgende figur viser opsætningen for den naturlige ventilation gennem systemet for mekanisk ventilation med VAV-styring.

²Vha. fortyndingsligningen (Ligning (8.11) i Andersen et al. [2002])

F.2 Opbygning af BSim-model



Figur F.12: Opsætning af system for ventilation.

Idet systemet for mekanisk ventilation benyttes til simulering af den naturlige ventilation, er varmeafgivelsen fra ventilatorer³ sat til '0'. Ved fokus på energiforbrug skal der således ses bort fra bidraget fra ventilatorerne, og foruden dette er samtlige parametre for genvinding (varme, fugt etc.) sat til '0'⁴.

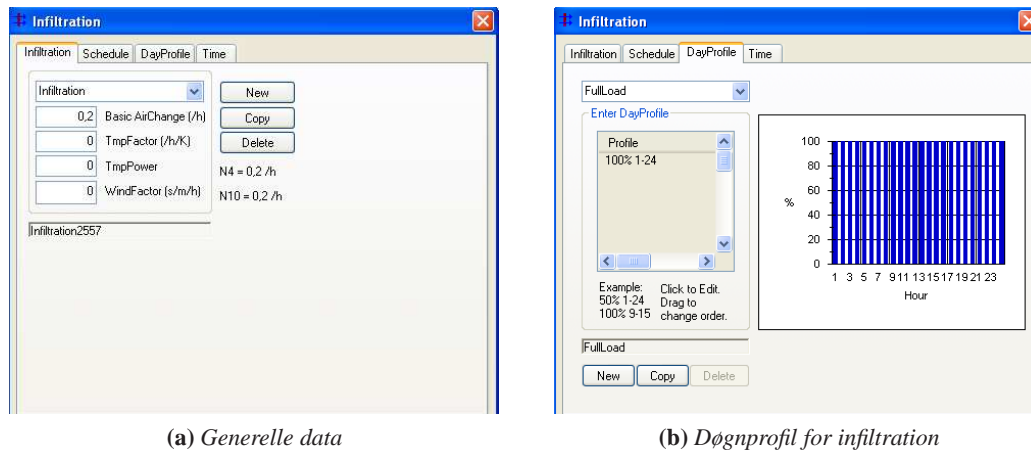
Infiltration (*Infiltration*)

Infiltrationen gennem utætheder i klimaskærmen samt sporadiske åbninger af vinduer og døre antages kun til stede udenfor brugstiden, idet infiltrationen regnes som en del af den samlede naturlige ventilation i brugstiden (jf. ovenstående vedr. ventilation). Luftsiftet for den samlede infiltration udenfor brugstiden er beregnet som middelværdien af infiltrationsluftsiftet undersøgt ved indeklimamålingerne foretaget af Larsen et al. [2006], og er regnet konstant.

Følgende figur viser opsætningen af systemet i BSim.

³"Part to Air" i figur F.12

⁴Af tekniske grunde kan samtlige parametre for varmegenvindingen ("Recovery Unit" i figur F.12(a)) ikke være "0".



Figur F.13: Opsætning af system for infiltration.

Personbelastning (PeopleLoad)

Antallet af personer i det valgte kontorområde, er vurderet på baggrund af optællinger foretaget Larsen et al. [2006] i forbindelse med indeklimaundersøgelserne. Følgende tabel F.5 opsummerer en personoptælling for de enkelte etager.

Tabel F.5: Registreret antal personer i bygningen for de forskellige etager. [Larsen et al., 2006]

Tid	Stuen	1. sal	2. sal	3. sal	4. sal	Total	Total	Antal personer
							1.-3. sal	pr. kvm., 1.-3. sal
10:05	8	73	76	108	72	337	257	0,0768
11:00	6	82	81	93	70	332	256	0,0765
11:50	16	69	71	65	60	281	205	0,0613
12:45	10	73	72	73	43	271	218	0,0652
14:45	6	70	88	112	61	337	270	0,0807
Areal, [m ²] kontorområde	343	1114,76	1114,76	1114,76	910,66	4597,94	3344,28	

På baggrund af ovenstående tabel er personbelastningen pr. kvadratmeter for etage 1-3⁵ beregnet for hvert af de i tabel F.5 angivne tidspunkter. Disse er angivet i sidste kolonne. Den gennemsnitlige personbelastning er således $0,0721 \frac{\text{personer}}{\text{m}^2}$, hvilket medfører et gennemsnitligt personantal for det betragtede område på 35 personer⁶.

Idet samtlige personer ikke er tilstede konstant samt at personoptællingen er foretaget ved ”spidsbelastninger” er der foretaget en vægtning af personbelastningen hen over arbejdstiden. Vægtningen er

Koblingen mellem Matlab og BSim tillader ikke dette. Derfor er værdien for varmegenvinding sat til ”0,001”).

⁵Stueetage ikke medtaget da denne indeholder reception, mødelokaler samt offentlig adgang og 4. etage ikke medregnet idet denne afviger arkitektonisk fra den betragtede etage.

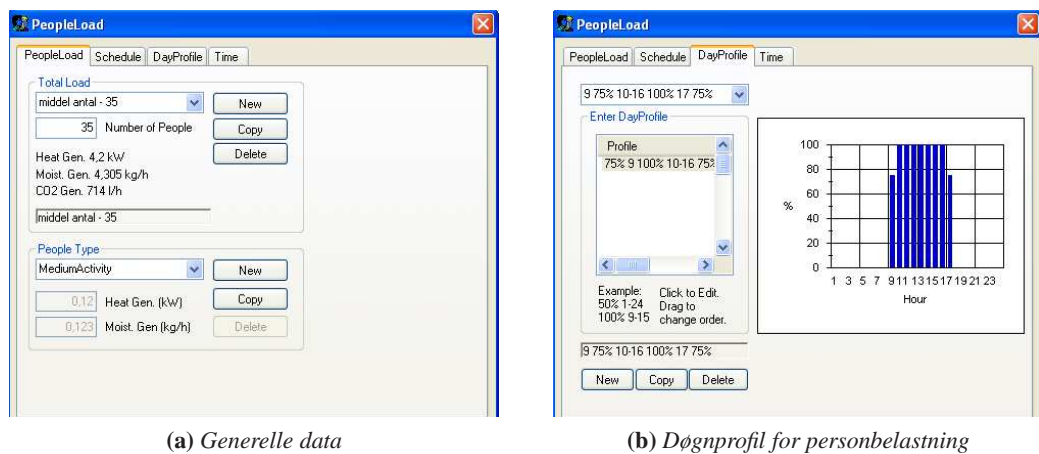
⁶Rummet er 491m^2

foretaget således:

- kl. 8.00-9.00: 75% (ca. 26 personer)
- kl. 9.00-16.00: 100% (35 personer)
- kl. 16.00-17.00: 75% (ca. 26 personer)

Mht. aktivitetsniveau er dette forudsat værende almindeligt stillesiddende kontorarbejde svarende til 1,2met iht. DS/EN ISO 7730 [2006]. Der er ikke foretaget en yderligere reducere af personantallet i frokostpausen, idet kantinen ikke kan servicere samtlige medarbejdere samtidig, hvorfor der holdes forskudte frokostpauser⁷.

Følgende figur viser opsætningen af systemet for den interne personbelastning.



Figur F.14: Opsætning af system for intern belastning fra personer.

Udstyr (*Equipment*)

I forbindelse med opsætning af systemet for den interne varmebelastning hidrørende fra udstyr i form af computere, skærme, printere etc., er den i ovenstående afsnit beregnede personbelastning benyttet som grundlag sammen med indretningsplanerne⁸ samt ud fra oplysninger fra Københavns Energi. Følgende tabel viser det installerede udstyr samt varmeafgivelsen herfra. De angivne effekter er vurderet iht. Andersen et al. [2002].

⁷Oplyst af Allan Bendtsen, Ejendomsinspektør, Københavns Energi A/S

⁸Disse forefindes på den vedlagte DVD

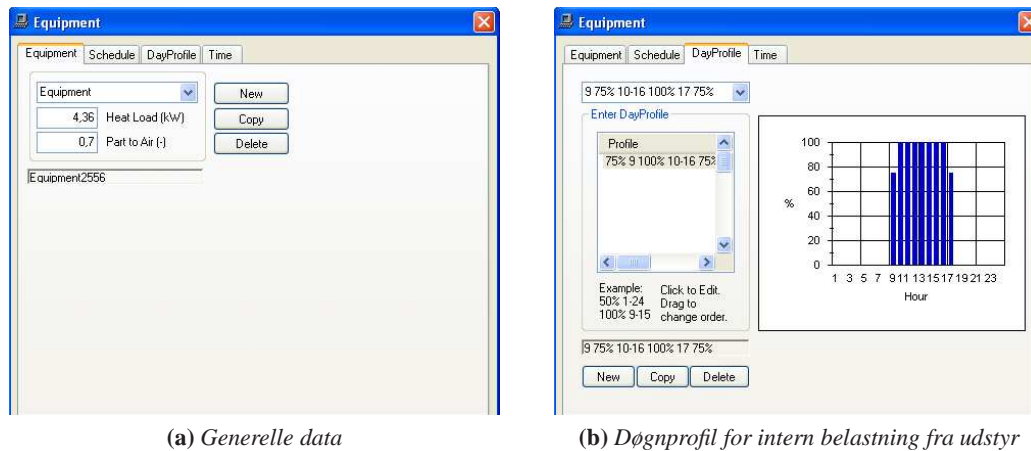
Tabel F.6: Internt varmetilskud fra udstyr (tal i parentes angiver effekten i standby-tilstand).

Apparat	Antal	Varmebelastning	Samlet
		$[\frac{W}{stk}]$	$[W]$
PC, standard	35	40(25)	1400(875)
PC-fladskærm, 17"	14	40(30)	560(420)
PC-skærm, 17"	21	100(30)	2100(630)
Printer	2	150(30)	300(60)
Total			4360(1985)

Med henvisning til angivelse af døgnprofilet for personbelastningen i det foregående, er der ved opsætning af systemet for intern varmebelastning fra udstyr foretaget samme procentvise fordeling. Opsummeret er denne:

- kl. 8.00-9.00: 75% (ca. 26 computere i brug)
- kl. 9.00-16.00: 100% (35 computere i brug)
- kl. 16.00-17.00: 75% (ca. 26 computere i brug)

Følgende figur viser opsætningen af systemet for intern varmebelastning hidrørende fra udstyr i BSim.


Figur F.15: Opsætning af system for intern belastning fra udstyr.

Belysning (Lighting)

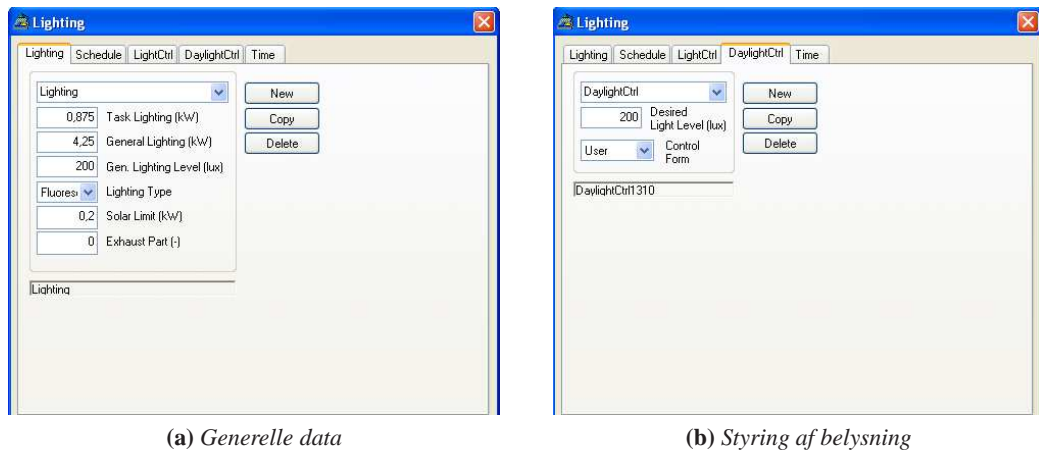
Det installerede anlæg for den almene belysning opretholder et belysningsniveau på 200lux. Den installerede effekt er vurderet på baggrund af Andersen et al. [2002] samt oplysninger fra Københavns Energi. Følgende tabel viser beregninger af den samlede effekt hidrørende fra hhv. almen og arbejdsbelysning.

Table F.7: Internt varmetilskud fra almen og arbejdsbelysning.

Kilde	Installeret effekt [$\frac{W}{stk}$]/[$\frac{W}{m^2}$]	Antal/Areal [stk]/[m^2]	Samlet [W]
Almen belysning	8,0	541 ^{a)}	4328
Arbejdsbelysning	25	35	875

a) Inkl. stillekontor og møderum.

Styringen af almenbelysningen er foretaget manuelt efter et setpunkt på 200 lux. Følgende figur viser opsætningen af systemet for belysning i BSim.



(a) Generelle data

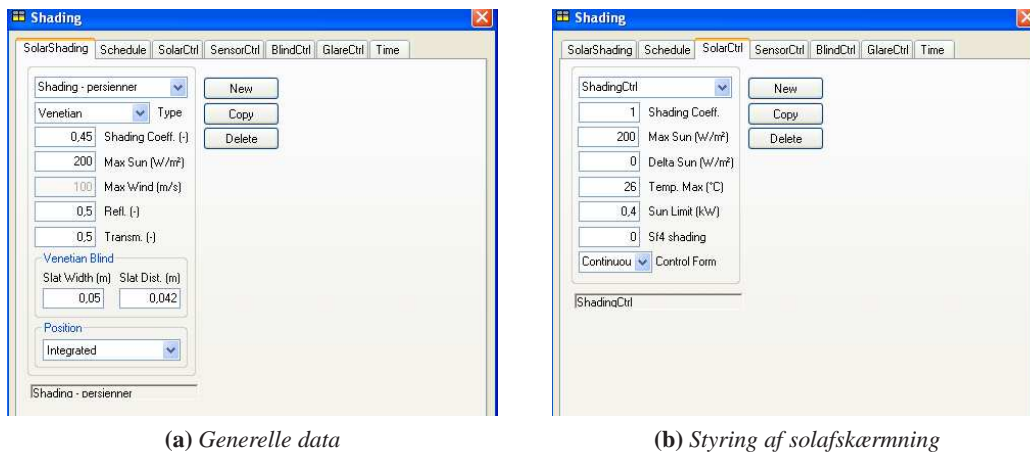
(b) Styring af belysning

Figur F.16: Opsætning af system for intern belastning fra belysning

Solafskærmning (SolarShading)

I det udvalgte område, er der etableret solafskærmning i form af manuelt styrede persienner mellem glassene i samtlige vinduer. På baggrund af oplysninger fra såvel Københavns Energi samt WindowMaster, der har projekteret den naturlige ventilation i bygningen, er afskærmningsfaktoren for de integrerede persienner 0,45. Foruden dette vurderes det, at persiennerne gradvist bliver drejet for løbende solafskærmning, og at det maksimale solindfald for aktivering af solafskærmning er $200 \frac{W}{m^2}$.

Følgende figur viser opsætningen af systemet for solafskærmning i BSim.



(a) Generelle data

(b) Styring af solafskærmning

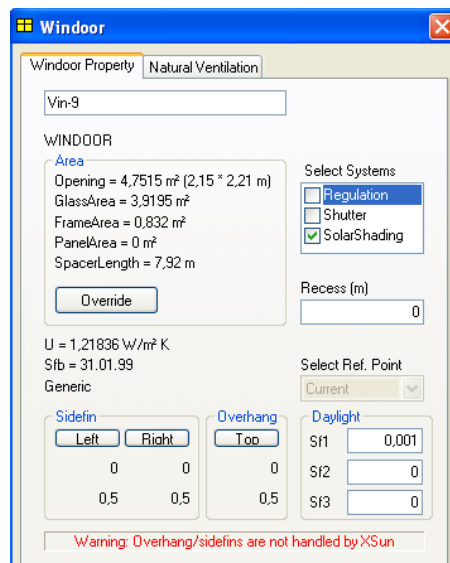
Figur F.17: Opsætning af system for solafskærmning.

Foruden den aktive solafskærmning, er der konstruktivt udført passiv solafskærmning i form af udhæng. Følgende figur viser udhænget, der er etableret på samtlige fire sider af alle vinduer.



Figur F.18: Tegning af det konstruktive udhæng på 0,5m, der er udført omkring hele vinduet.

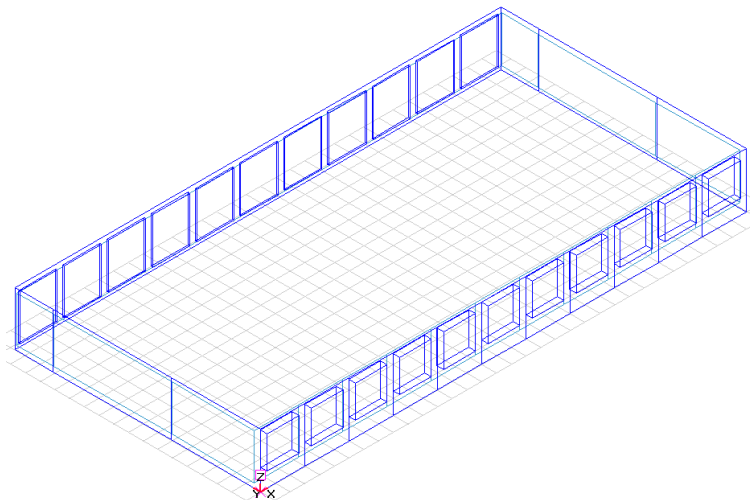
I BSim, vil disse udhæng blive modelleret som hhv. "Sidefins" og "Overhang" på 0,5m iht. figur F.18 samt følgende figur F.19.



Figur F.19: Angivelse af data for udhæng i BSim gennem "Sidefins" og "Overhang".

F.2.6 ENDELIG BSIM-MODEL

BSim-modellen, der er opstillet på baggrund af ovenstående inddata og forudsætninger, er illustreret på følgende figur.



Figur F.20: BSim-model

I den opstillede model er det endvidere forudsat, at der i de tilstødende rum er samme termiske forhold som i det simulerede rum.

I de følgende afsnit vil den opstillede model først blive valideret i forhold til målingerne udført af

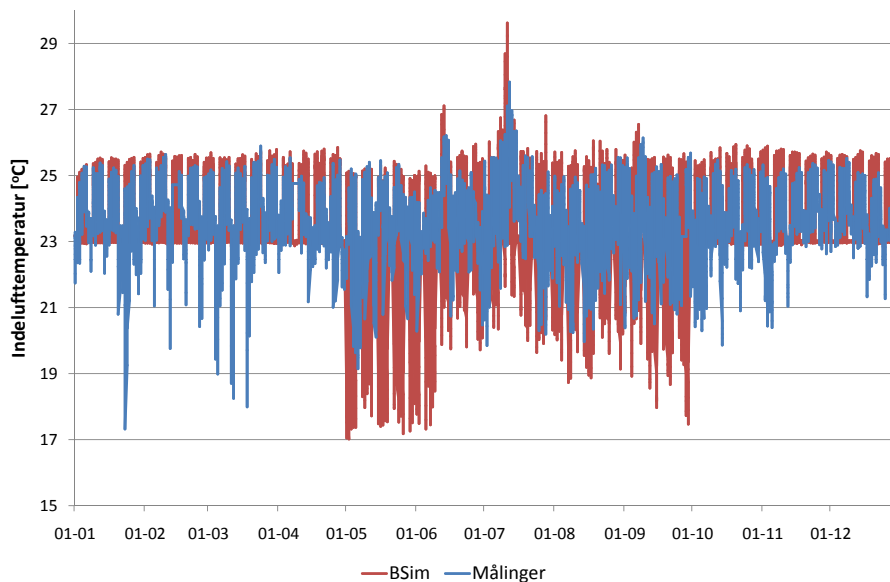
Larsen et al. [2006], hvorefter modellen benyttes i forbindelse med simuleringer med henblik på:

- Brug af data til evaluering af bygningens indeklimate og energiydeevne gennem det opstillede koncept
- Følsomhedsanalyser
- Usikkerhedsanalyser

F.2.7 VALIDERING AF MODEL

I nærværende underafsnit valideres den opstillede BSim-model ved sammenligning af de simulerede og de af Larsen et al. [2006] målte indelufttemperaturer.

Følgende figur viser simulerede og målte indelufttemperaturer for hele den betragtede periode.

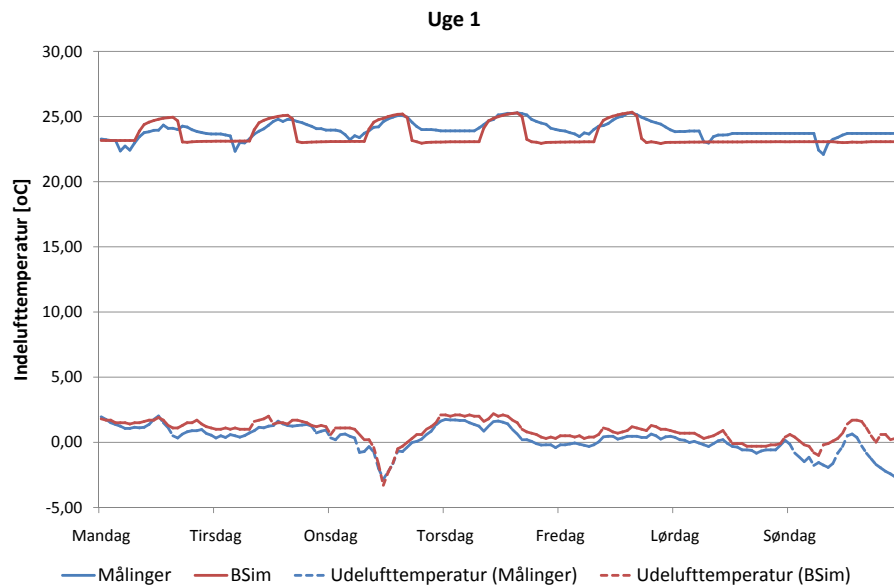


Figur F.21: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med målinger for hele den betragtede periode på et år.

Af figur F.21 fremgår det, at simulerede og målte indelufttemperaturer i de kolde måneder har ligger tæt på hinanden med enkelte undtagelser. Efter oplysninger fra WindowMaster, er natkølingen kun aktiv i perioden fra maj-september, men af figur F.21 antyder de målte indelufttemperaturer, at natkølingen også har været aktiv udenfor denne periode (f.eks. i januar og marts). Af figuren ses det endvidere, at den simulerede natkøling forekommer mere effektiv end den aktuelle om sommeren, idet de simulerede indelufttemperaturer generelt ligger under de målte. Årsagen hertil kan være setpunktet for natkølingen samt angivelsen af andre kriterier for denne ift. krav til ude- og indelufttemperatur mv. i modellen. De oplyste setpunkter er efter ibrugtagningen af bygningen løbende blevet justeret for at optimere det termiske og atmosfæriske indeklimate i bygningen, hvilket der ikke kan tages højde for i den opstillede BSim-model.

En nærmere undersøgelse af det termiske indeklimate i udvalgte uger er vist i de nedenstående figurer.

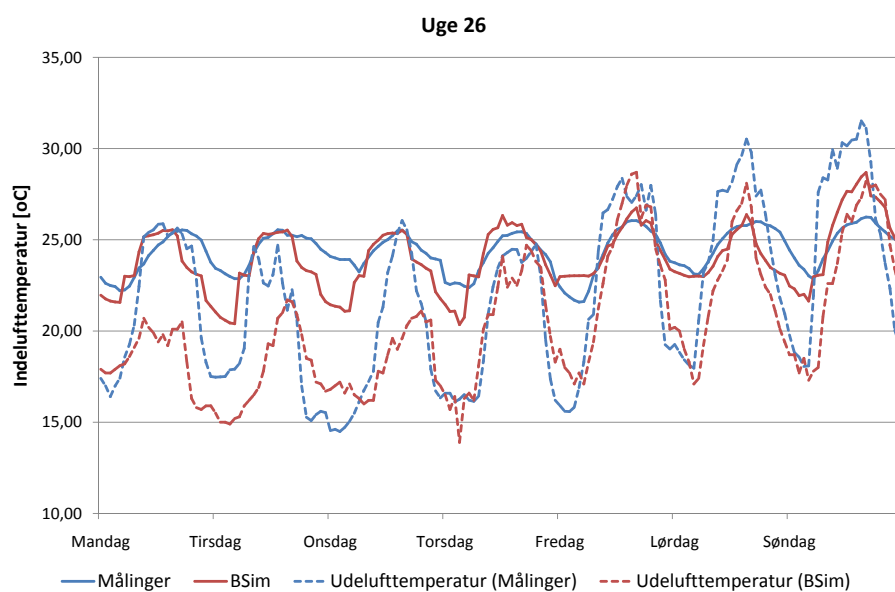
Følgende figur F.22 viser hhv. den simulerede og målte indelufttemperatur i uge 1.



Figur F.22: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med målinger for uge 1 (januar). Endvidere vises udelufttemperaturen fra de benyttede vejrdata samt den af Larsen et al. [2006] målte.

Som det fremgår af figur F.22, ligger de simulerede og målte indelufttemperaturer tæt på hinanden. Dog antydes det af de målte indelufttemperaturer, at rummet enten har været i brug udover den forudsatte arbejdstid, hvilket er sandsynligt, eller at varmekapaciteten for den opstillede model er for lille. En anden forklaring kan også være forskellen mellem det aktuelle luftskifte og det simulerede. Den naturlige ventilation er i høj grad afhængig af såvel udelufttemperaturen, vindforholdene samt det termiske indeklima, og luftskiftet i rummet varierer løbende i afhængig af de termiske konditioner. Dette er vanskeligt at simulere i den opstillede model, hvor systemet for mekanisk ventilation med styring efter variabel luftmængde er benyttet til simulering af den naturlige ventilation.

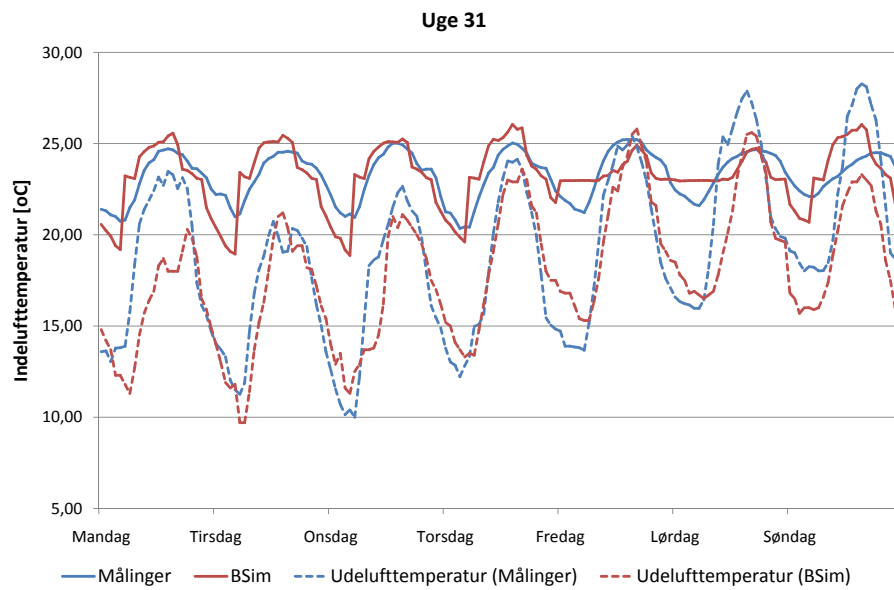
Følgende figur F.23 viser de simulerede og målte indelufttemperaturer for uge 26 (juni).



Figur F.23: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med målinger for uge 26 (juni). Endvidere vises udelufttemperaturen fra de benyttede vejrdato samt den af Larsen et al. [2006] målte.

Figur F.23 viser, at de simulerede og målte indelufttemperaturer i den udvalgte uge ligger tæt på hinanden. De målte indelufttemperaturer ligger en anelse over de simulerede, men en sammenligning af de målte udelufttemperaturer med de af DMI [2008] målte, viser også at den lokalt målte udelufttemperatur har ligget højere i perioder.

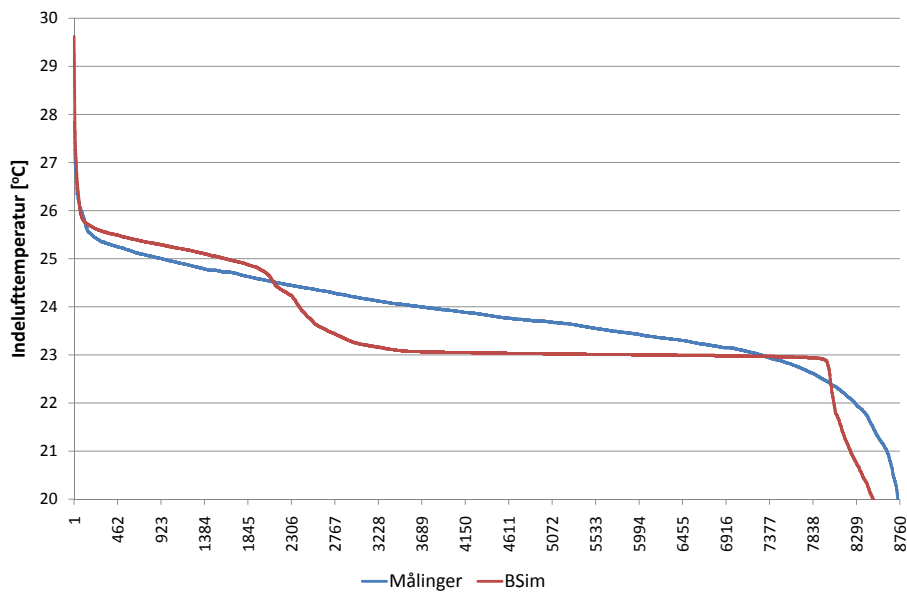
Figur F.24 nedenfor viser simulerede og målte indelufttemperaturer for uge 31 i august.



Figur F.24: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med målinger for uge 31 (august). Endvidere vises udelufttemperaturen fra de benyttede vejrdato samt den af Larsen et al. [2006] målte.

Af figuren fremgår det, at der er god overensstemmelse mellem de simulerede og målte indelufttemperaturer. Dette også i kraft af, at udelufttemperaturerne ligger tættere på hinanden en stor del af tiden. Det vurderes endvidere, med baggrund i figuren, at den simulerede varmekapacitet af rummet, er i god overensstemmelse med den aktuelle.

Følgende figur F.25 viser fordelingerne af de simulerede og målte indelufttemperaturer for hele den betragtede periode.



Figur F.25: Fordelinger af simulerede og målte indelufttemperaturer.

Ovenstående figur F.25 viser forskel mellem fordelingerne af de simulerede og målte indelufttemperaturer. WindowMaster oplyser, at den naturlige ventilation udelukkende styres efter et setpunkt for indelufttemperaturen på 23°C. Ved den senere figur F.26 og F.27 under behandling af simulerede og målte CO₂-koncentrationer forekommer ventilationen at være styret efter et maksimalt CO₂-niveau, idet indelufttemperaturen generelt ligger over 23° uden regulering er foretaget. Det er imidlertid også oplyst af Københavns Energi, at styringen i vintersæsonen foretages efter et maksimalt CO₂-niveau på 800ppm, hvor der om sommeren styres efter den maksimale indelufttemperatur på 23°C.

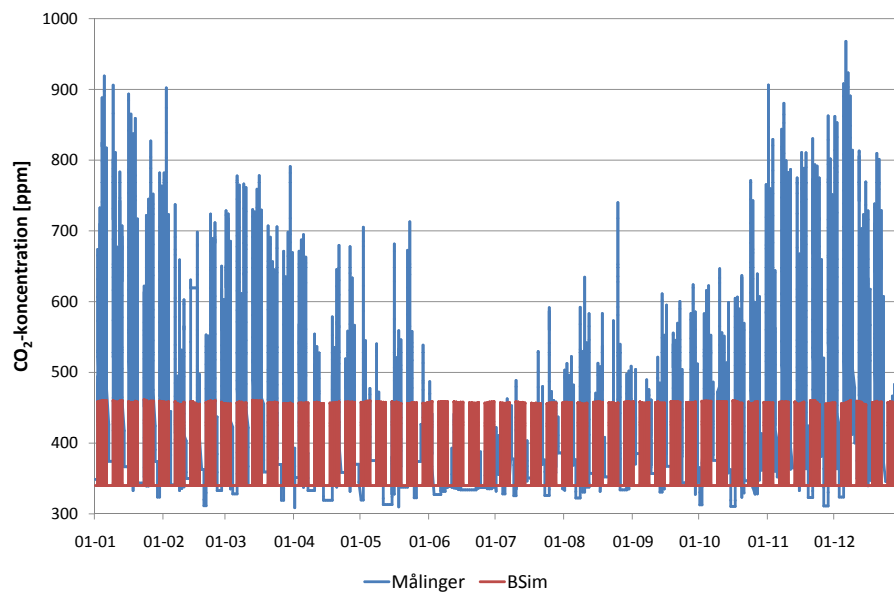
Følgende tabel F.8 viser statistiske data for de simulerede og målte inde- og udelufttemperaturer opdelt pr. måned for hele den betragtede periode.

Tabel F.8: Statistiske data for inde- og udelufttemperaturer.

	Indelufttemperatur, [°C] (Målinger/BSim)			Udelufttemperatur, [°C] (Målinger/BSim)		
	Min.	Middel	Maks.	Min.	Middel	Maks.
Januar	17,3/22,9	23,9/23,6	25,4/25,6	-7,2/-7,6	-1,2/-0,7	3,8/4,2
Februar	19,8/22,9	24,2/23,6	25,6/25,7	-7,3/-7,3	-0,1/0,2	4,6/5,3
Marts	18,0/22,8	23,9/23,6	25,9/25,8	-8,1/-8,3	-0,5/-0,2	11,2/10,9
April	21,0/22,8	23,8/23,6	25,5/25,9	-2,3/-2,9	6,6/6,0	18,1/12,6
Maj	19,1/17,0	23,5/22,7	25,4/25,4	2,4/3,5	12,7/11,6	23,9/22,2
Juni	20,3/17,3	23,8/23,2	26,2/27,1	6,7/7,4	18,5/16,4	29,8/25,5
Juli	19,9/19,6	24,2/23,6	27,8/29,6	11,9/12,6	20,3/18,8	31,5/29,1
August	20,0/18,7	23,5/23,2	25,6/26,1	9,0/9,5	17,4/16,5	28,3/25,8
September	20,4/17,5	23,5/23,0	26,1/26,6	4,9/5,2	15,8/15,1	26,0/24,4
Oktober	19,9/22,8	23,6/23,6	25,5/25,9	1,5/3,1	11,2/11,7	19,0/18,4
November	20,4/22,9	23,8/23,6	25,5/25,9	-3,2/-3,3	5,6/6,0	14,3/13,0
December	21,3/22,9	23,8/23,6	25,5/25,8	-6,2/-7,0	1,9/2,6	10,4/10,0

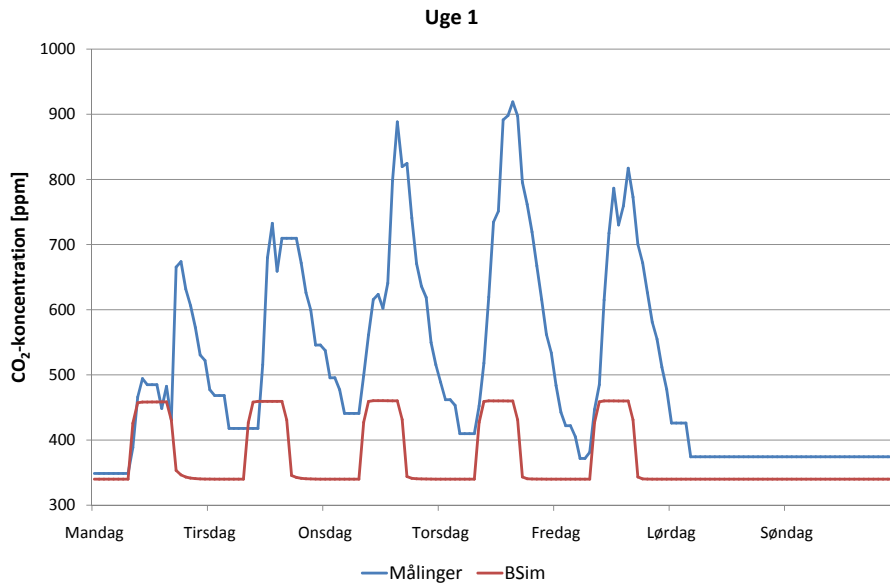
Tabel F.8 viser, at de af Larsen et al. [2006] målte udelufttemperaturer generelt har været højere i de varme perioder ift. de ved simuleringen benyttede fra DMI [2008]. De simulerede indelufttemperaturer er generelt i god overensstemmelse med de målte. Dog viser føromtalt natkøling uden for den oplyste periode, at indelufttemperaturen er målt en del lavere i hhv. januar, marts og oktober.

Efter sammenligningen af de simulerede og målte indelufttemperaturer foretages i det følgende en sammenligning mellem simulerede og målte CO₂-koncentrationer. Følgende figur F.26 viser simulerede og målte koncentrationer for hele den betragtede periode.



Figur F.26: Simuleret CO₂-niveau sammenlignet med målinger for hele den betragtede periode på et år.

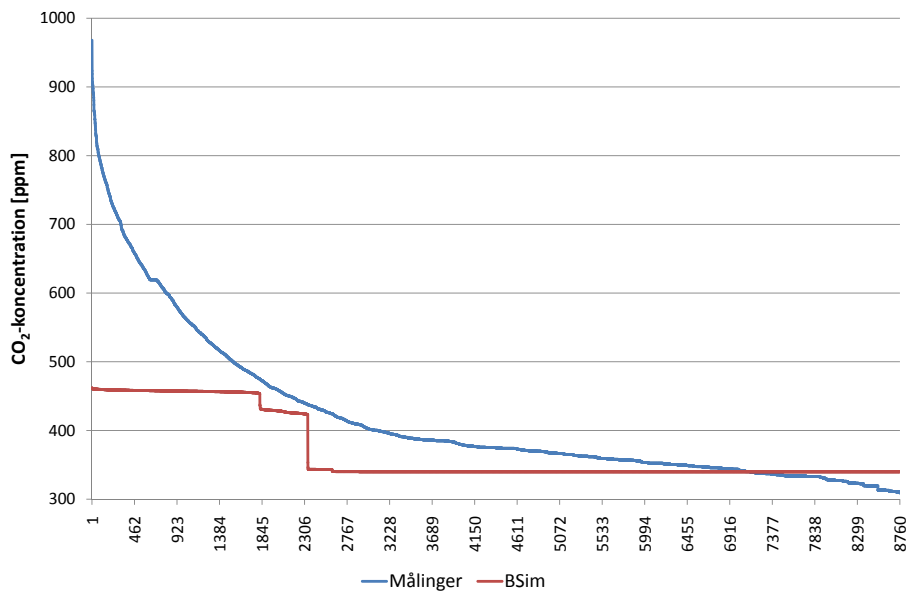
Figur F.26 viser, at på trods af styringen efter variabel luftmængde, har setpunktet for indetemperatur medført, at systemet har kørt med maksimal luftmængde konstant i arbejdstiden. Herved fremkommer de ensartede CO₂-koncentrationer. Som også nævnt ifm. med figur F.25, antyder ovenstående figur også, at automatikken har været styret efter et maksimalt CO₂-niveau i vinterperioden, hvor der i sommerperioden styres efter et setpunkt for rumtemperaturen. Dette illustreres også på følgende figur, der viser simulerede og målte koncentrationer i uge 1.



Figur F.27: Simuleret CO₂-niveau sammenlignet med målinger for uge 1 (januar).

Af figur F.27 ses det, at den simulerede styring efter setpunktet for rumtemperaturen medfører et konstant maksimalt luftskifte med et reduceret CO₂-niveau til følge. Endvidere bør det også nævnes, at der i den opstillede model er forudsat en konstant personbelastning på 35 personer⁹. Personbelastningen varierer meget i løbet af dagen og ikke mindst året, hvorfor det vil være vanskeligt at opnå identiske forløb af CO₂-koncentrationerne. Følgende figur viser simulerede og målte koncentrationer for uge 26 (juni).

⁹Der er 40 arbejdspladser i rummet.



Figur F.29: Fordelinger af simulerede og målte CO_2 -koncentrationer.

Af figuren ses den omtalte forskel mellem simulerede og målte koncentrationer. De simulerede værdier viser en mere eller mindre konstant koncentration som følge af den konstant maksimale luftmængde i brugstiden. Endvidere bør det nævnes, at de aktuelle område er simuleret som et lukket rum, og ikke som værende i åben forbindelse med dels atriets men også de andre kontorområder på den betragtede etage. Dette har imidlertid også en indflydelse på det målte CO_2 -niveau. Af tekniske årsager¹⁰ er det ikke muligt at benytte andre systemer for simulering af den naturlige ventilation, og den valgte styring efter en variabel luftmængde er den bedste i nærværende tilfælde. Afvigelserne mellem målte og simulerede CO_2 -koncentrationer må således accepteres. Dog viste sammenligningerne mellem målte og simulerede indelufttemperaturer, at modellen med god overensstemmelse simulerer det termiske indeklima i den udvalgte bygning, og vil herefter blive benyttet i nærværende projekt.

¹⁰P.g.a. koblingen mellem BSim og Matlab.

Nærværende appendiks indeholder dels beskrivelse af bygningen Grontmij | Carl Bro samt beskrivelse af den opbyggede model i TBS-programmet BSim.

G.1 BYGNINGSBESKRIVELSE

Grontmij | Carl Bro's nye domicil beliggende i Århus N er på ca. $3.200m^2$ fordelt på tre etager samt kælder. Bygningen blev opført i 2006/07 og taget i brug i starten af maj 2007. Bygningen er tegnet af Arkitema A/S, og huser ca. 120 medarbejdere fordelt på de to øverste etager. Stueetagen indeholder udelukkende reception, køkken og kantine mens der i kælderen forefindes arkiv, serverrum, laboratorier samt omklædningsrum.

Selve bygningen er styret af et avanceret CTS-anlæg, der styrer bygningens to ventilationsanlæg herunder køleunit, udsugningsanlæg fra køkkenet, toiletter og laboratorier, belysning, udvendig solafskærmning samt brugsvand og varme. Til anlægget er tilkoblet vejrstation, der måler udelufttemperatur, vindhastighed, vindretning, nedbør samt solintensitet.

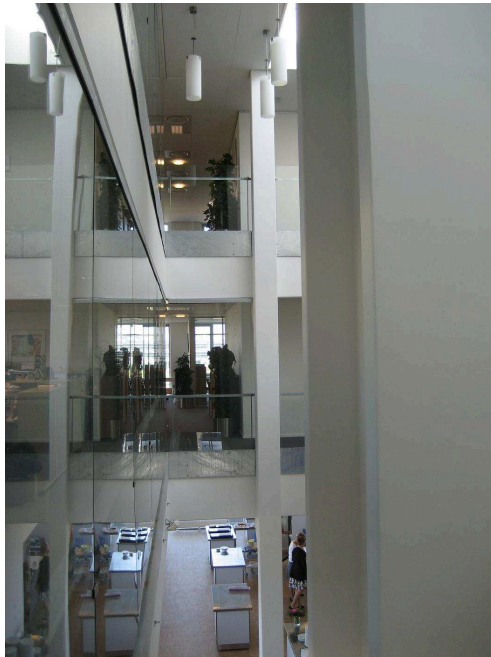
Følgende figurer G.1-G.4 viser billeder samt tegninger af den udvalgte bygning. Flere billeder samt arkitekt- og ingeniørtegninger forefindes på den vedlagte DVD.



(a) Facade mod syd-øst



(b) Syd-øst facade med solafskærmning aktiveret



(c) Atrium



(d) Kontorlandskab

Figur G.1: *Billeder af Grontmij | Carl Bro.*



(a) Ventilationsanlæg VE01



(b) Ventilationsanlæg VE02



(c) Køleanlæg til anlæg VE01 og VE02

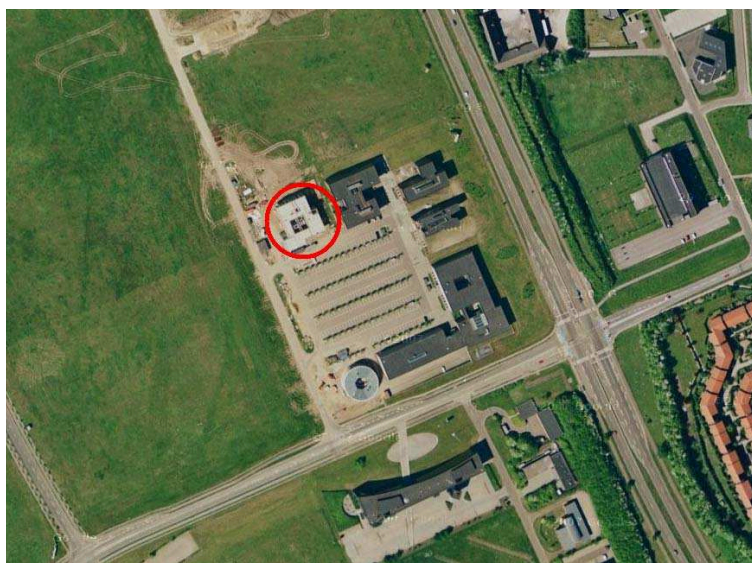


(d) Vejrstation

Figur G.2: Ventilationsanlæg, køleunit og vejrstation.

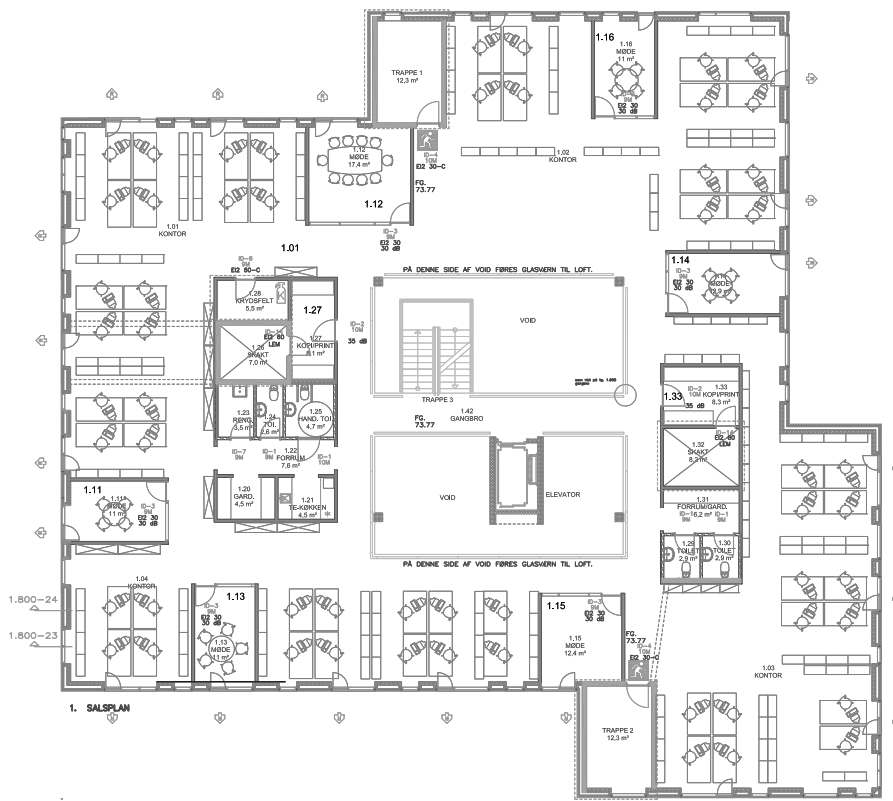


(a)

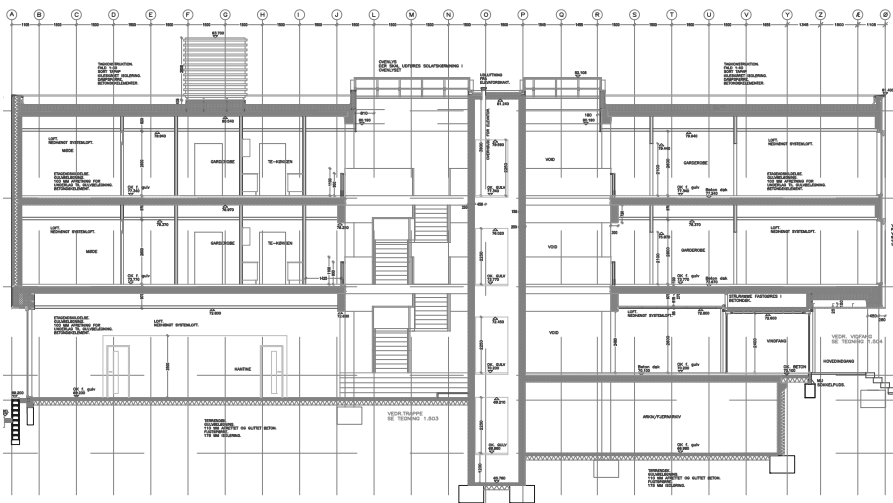


(b) (Bygning markeret med rød cirkel)

Figur G.3: Luftfotos (fra www.maps.google.com). Området omkring bygningen er i mellemtiden blevet bebygget.



(a) Plantegning, 1. sal (nederste facade er sydvest-vendt)



(b) Snit

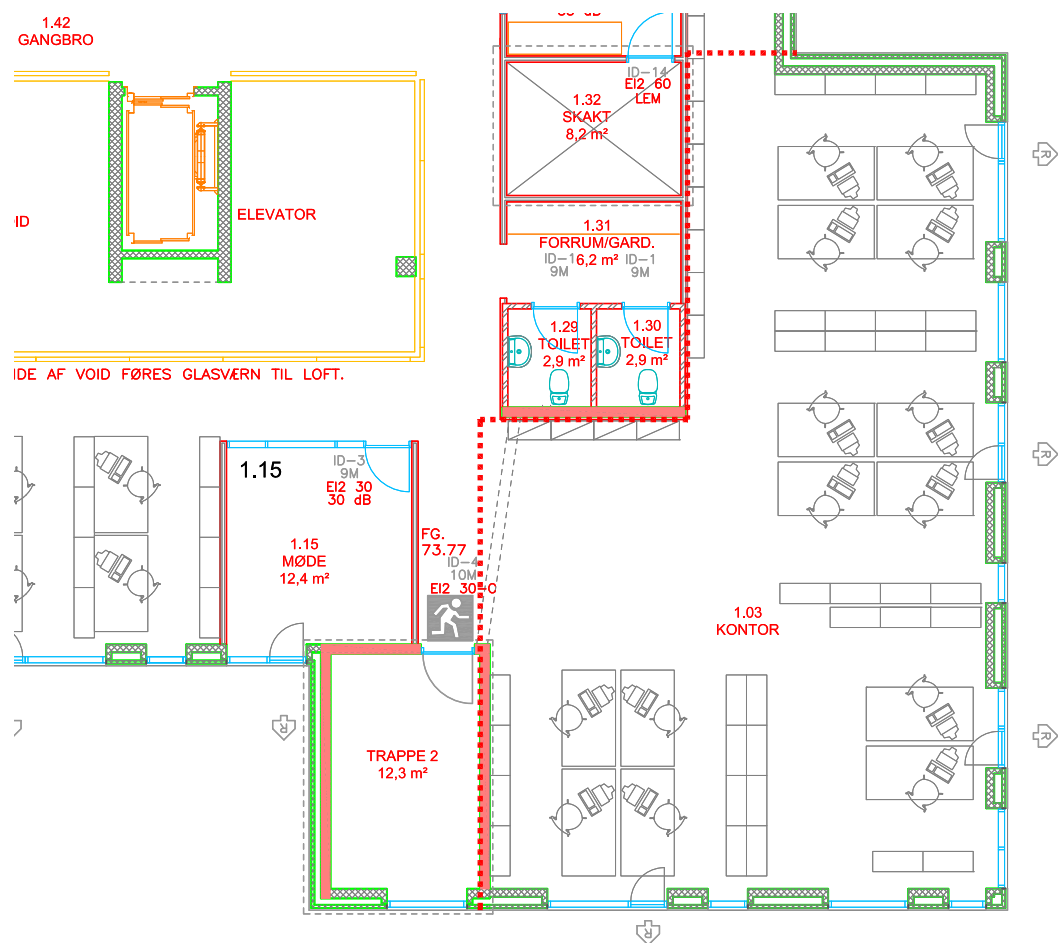
Figur G.4: Plantegning og snit.

G.2 OPBYGNING AF BSim-MODEL

I de nedenstående afsnit præsenteres opbygningen af modellen i BSim sammen med en angivelse af samtlige opsatte systemer.

G.2.1 GENERELLE FORHOLD

Til simulering af det termiske og atmosfæriske indeklima i den udvalgte bygning, er der foretaget en afgrænsning således der kun opstilles en BSim-model for et udvalgt område af bygningen. I dette tilfælde er det valgt at opbygge modellen for kontorområdet placeret i den sydlige del af bygningen betegnet som kontor 1.03 (nederste højre hjørne på figur G.4(a)). Følgende figur viser det udvalgte kontor med viste afgrænsninger.



Figur G.5: Tegning af udvalgt rum 1.03 med viste afgrænsninger markeret med rød stiplede linje. Nederste facade er sydvest-vendt mens facaden mod højre er sydøst-vendt.

Ved den på figur G.5 viste afgrænsning vil den åbne forbindelse til atriet ikke blive modelleret. På trods af at atriet er forsynet med oplukkelige tagvinduer, der styres efter CTS-anlægget, er disse

meget sjældent i drift. Endvidere vil de termiske forhold være tæt på ens, og idet åbningen mod atriet er lille vurderes det derfor, at den foretagne afgrænsning med god overensstemmelse kan bruges ved opstillingen af BSim-modellen.

Arbejdstiden er i den opstillede BSim-model angivet til 8.00-17.00, på baggrund af oplysninger fra Grøntmij | Carl Bro.

I de følgende underafsnit vil samtlige konstruktioner blive præsenteret sammen med opsætningen af de enkelte bygningssystemer i BSim.

G.2.2 KONSTRUKTIONER

Følgende tabeller G.1-G.6 angiver opbygningen af de enkelte konstruktioner i forbindelse med opstillingen af BSim-modellen. Oplysningerne er hentet fra arkitekt- og ingeniørtegninger samt beskrivelser af anlæggenes funktionalitet. Alt materiale er placeret på den vedlagte DVD.

I forbindelse med opbygningen af vinduerne (tabel G.5 og G.6), er disse opdelt i vinduer med og uden sprosser iht. arkitekttegningerne. For at kompensere for det øgende varmetab ved vinduer med sprosser, er den lineære transmissionskoefficient, Ψ_g , forøget for at opnå vinduets reelle totale U-værdi¹.

Tabel G.1: Opbygning af ydervægge i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Profilerede alu-plader	Medregnes ikke		
Afstandslistes	Medregnes ikke		
Forplade	0,060	0,25	1000
Isolering	0,150	0,037	800
Betonelement	0,150	2,1	1000
Samlet U-værdi:	$0,22 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$		

Tabel G.2: Opbygning af indervægge i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Betonelement	0,120	2,1	1000
Samlet U-værdi:	$3,15 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$		

¹Til beregning af den forventede U-værdi er beregningsværktøjet på www.velfac.dk benyttet

Tabel G.3: Opbygning af etageadskillelser i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Gulvbelægning (tæppe)	Medregnes ikke		
Afretning	0,100	0,25	1000
Betonelement	0,270	2,1	1000
Luft	0,500	(0,15) ^{a)}	
Nedhængt systemloft	0,025	0,25	800
Samlet U-værdi:	$1,04 \frac{W}{m^2 \cdot K}$		

a) Termisk modstand af luftlag iht. DS 418 [2002] [$\frac{m^2 \cdot K}{W}$]

Tabel G.4: Opbygning af dæk over det fri i BSim.

Materiale	Tykkelse [m]	Varmeledningsevne, λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Termisk kapacitet, C_p [$\frac{J}{kg \cdot K}$]
Gulvbelægning (tæppe)	Medregnes ikke		
Afretning	0,100	0,35	1000
Betonelement	0,270	2,1	1000
Ophængt isolering	0,250	0,037	1000
Luft	0,300	Ventileret hulrum (ingen isolans)	
Nedhængte stålprofiler	Medregnes ikke		
Samlet U-værdi:	$0,14 \frac{W}{m^2 \cdot K}$		

Tabel G.5: Opbygning af vinduer uden sprosser i BSim.

Materiale	Lineær transmissionskoeff., Ψ_g [$\frac{W}{m \cdot K}$]	Bredde af ramme/karm [m]
Cool-lite SKN 172	0,06	
Alu-træ		0,1
U-værdi, glas (center)	$1,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	
Varmetransmittans (g-værdi)	0,4	
Sollystransmittans (LT)	0,67	
Reflektans (indv./udv.)	0,24/0,24	
Absorbtans (indv./udv.)	0,37/0,02	
Samlet U-værdi:	$1,39 - 1,51 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	

Tabel G.6: Opbygning af vinduer med sprosser i BSim.

Materiale	Lineær transmissionskoeff., Ψ_g	Bredde af ramme/karm
	$[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$	$[m]$
Cool-lite SKN 172	0,15 ^{b)}	
Alu-træ		0,1
U-værdi, glas (center)	$1,2 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	
Varmetransmittans (g-værdi)	0,4	
Sollystransmittans (LT)	0,67	
Reflektans (indv./udv.)	0,24/0,24	
Absorbans (indv./udv.)	0,37/0,02	
Samlet U-værdi:	$1,49 - 1,56 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$	

b) Forøget for at opnå samlet U-værdi mht. sprosser.

G.2.3 CTS-DATA

Idet bygningen blev opført i 2006/07 og blev taget i brug i maj 2007, har det kun været muligt at indhente CTS-data herfra. For det udvalgte rum har det været muligt at udtrække følgende data for perioden 7/5 2007 - 6/5 2008:

- Lufttemperatur
- Indblæsningstemperatur, ventilation
- Udelufttemperatur
- Vindhastighed
- Vindretning
- Solintensitet

Ovenstående data har været tilgængeligt som timeværdier i den angivne periode. Dog optræder der sporadisk huller i de indhentede data, hvor f.eks. indelufttemperaturen er angivet til 0°C. Her er det valgt at erstatte de manglende data med middelværdien af målingen timen før og efter den angivne periode. Idet der ved validering af den opstillede model foretages en sammenligning mellem de målte og simulerede rumtemperaturer, og da variationerne mellem de manglende data er meget små, vurderes det at denne behandling af dataene er acceptabel.

G.2.4 GENERERING AF VEJRDATA FOR SIMULERING

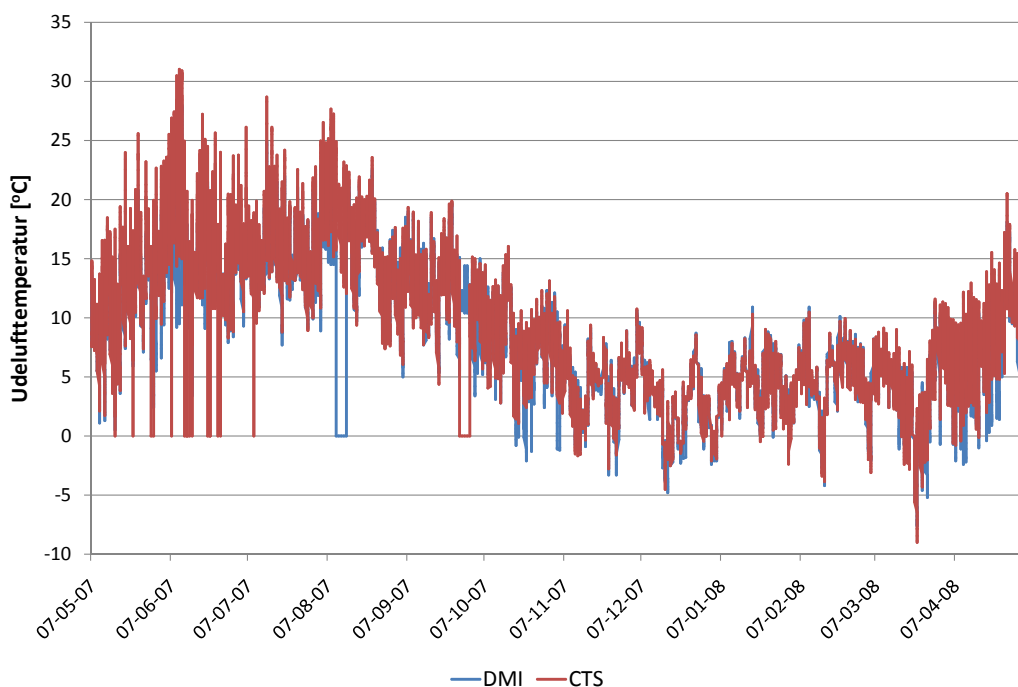
Data indhentet fra DMI [2008] benyttes til generering af vejrdatabaser. De benyttede data er fra vejrstationer i hhv. Århus Syd samt Ødum (kun globalstråling), og består af målinger af:

- Udelufttemperatur
- Daglig minimumstemperatur
- Daglig maksimumstemperatur

- Relativ luftfugtighed
- Vindhastighed
- Vindretning
- Lufttryk
- Global solstråling

For Århus-stationerne har det ikke været muligt at fremskaffe hhv. skydække samt diffus solstråling. Værdier for skydækket vil, såfremt dette ikke angives ved konvertering af vejrdata, blive beregnet automatisk af BSim ud fra data for solstråling og relativ luftfugtighed. Med hensyn til den diffuse fraktion af solstrålingen, har det været nødvendigt at beregne denne ud fra ovenstående data. Det er valgt at benytte modeller af Lund [1985], og der henvises til appendiks H for eksempelberegninger heraf.

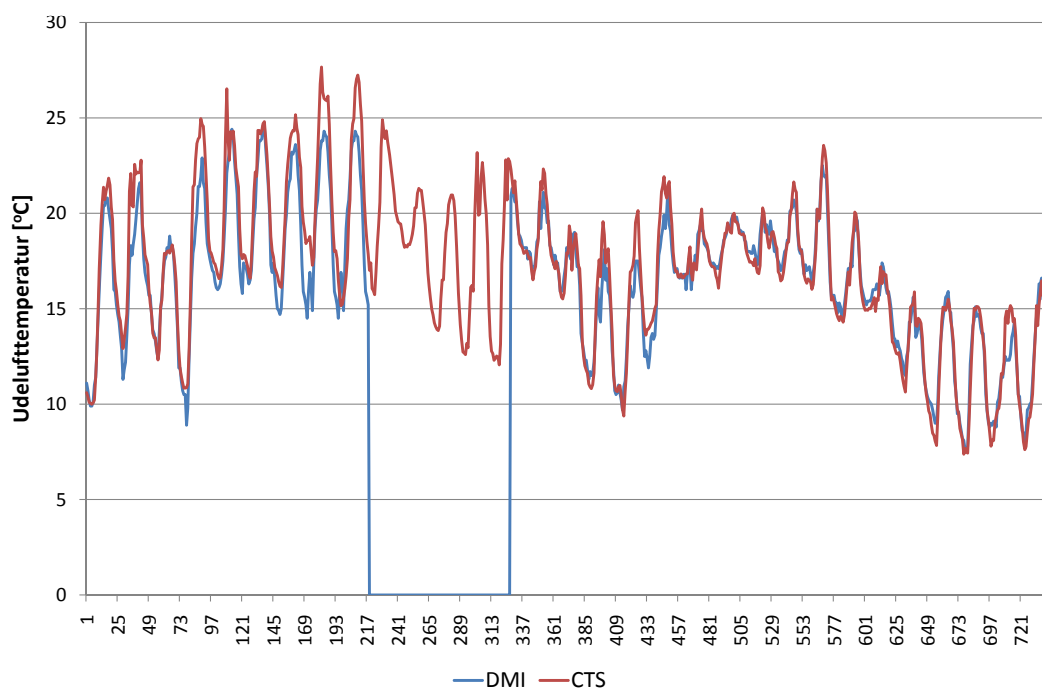
I de modtagne data, optræder der huller af én times varighed. Her er det valgt at benytte gennemsnittet af målingerne hhv. før og efter den manglende time. Herudover forekommer der et hul af fire dages varighed. Her er det nødvendigt at benytte data fra CTS-anlægget. Inden dette udføres, er det imidlertid nødvendigt at foretage en sammenligning af de målte temperaturer fra hhv. CTS-anlægget og DMI [2008]. Følgende figur G.6 viser udelufttemperaturen målt af CTS-anlægget sammenlignet med målinger af DMI [2008] for hele perioden.



Figur G.6: Målinger af udelufttemperaturen fra CTS-anlægget sammenlignet med data fra DMI [2008] for den udvalgte periode.

Figur G.6 viser huller i data fra DMI [2008], der forekommer i perioden 10-14/8 2007 (de timer hvor grafen 'springer' til 0°C). Som det også fremgår af ovenstående figur, indeholder data fra bygningens CTS-anlæg også huller af større varighed. Disse huller optræder imidlertid ikke samtidig med data fra DMI [2008].

For at undersøge forskellen mellem de af CTS-anlægget og de af DMI [2008] målte udelufttemperaturer, viser følgende figur G.7 data for august måned.

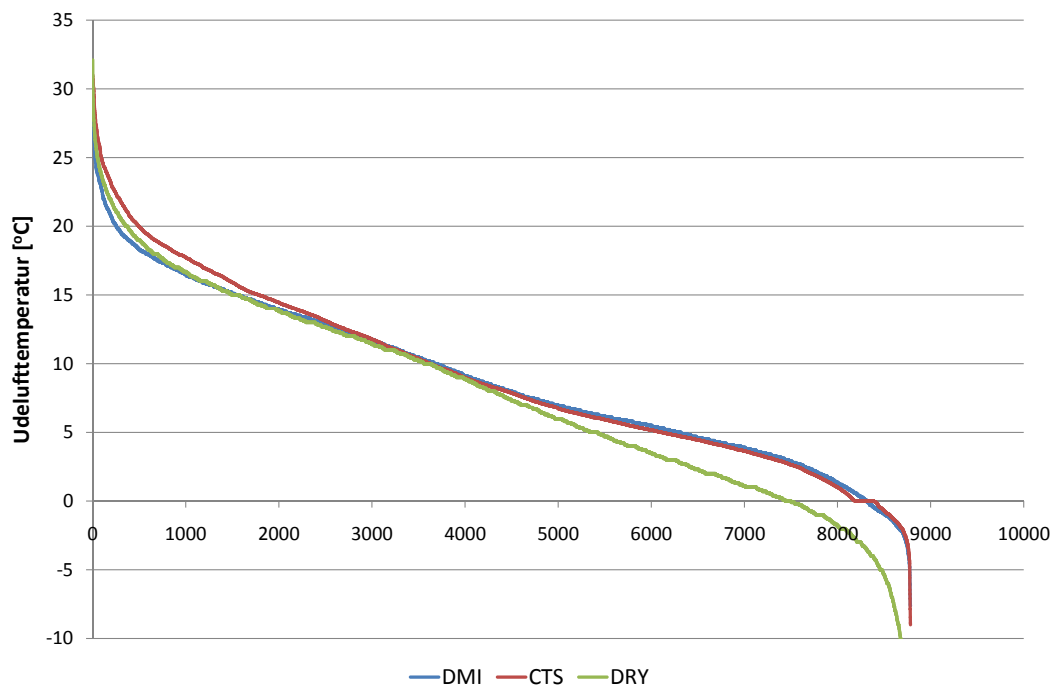


Figur G.7: Målinger af udelufttemperaturen fra CTS-anlægget sammenlignet med data fra DMI [2008] i august.

Af figuren ses en lille forskel mellem de to målte udelufttemperaturer, men det generelle forløb er tæt ens for de to måleserier. For den første del af den betragtede periode ligger temperaturerne målt af CTS-anlægget generelt lidt højere (ca. 2°C), hvor temperaturerne for den sidste del af perioden er tættere på hinanden. Ved brug af CTS-data for de manglende data fra DMI [2008] må disse nødvendigvis justeres. Det vælges på baggrund af ovenstående, at nedjustere udelufttemperaturen målt af CTS-anlægget med 2,0°C, og herefter benytte disse ved de manglende data fra DMI [2008].

Følgende figur viser fordelinger af de målte udelufttemperaturer fra hhv. CTS og DMI [2008]². Ydermere er fordelingen af data fra det danske design reference år (DRY) vist.

²efter erstatning af manglende data med korrigerede CTS-data



Figur G.8: Fordeling af data fra hhv. CTS-anlæg og DMI [2008] med modificeret CTS-data for den manglende periode. Endvidere er fordelingen for det danske design reference år (DRY) vist.

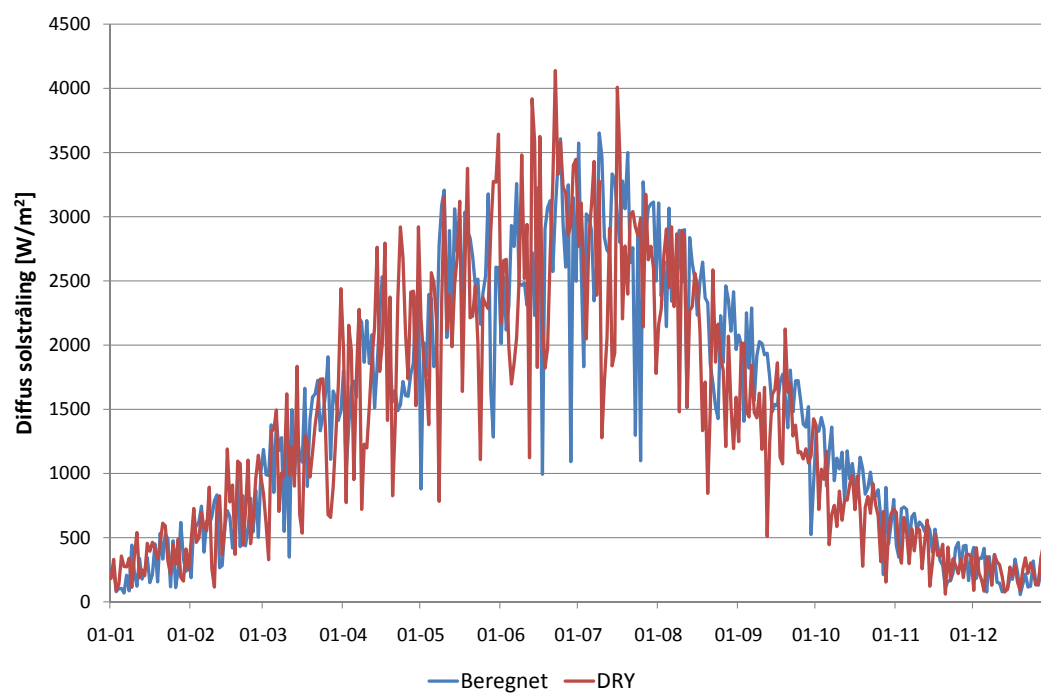
Som det fremgår af figur G.8 er der generelt målt højere udelufttemperaturer af CTS-anlægget, end de tilsvarende data fra DMI [2008]. Dette er i tråd med tendensen vist i de foregående figurer G.6 og G.7. Som det yderligere ses af figuren, indeholder det danske design reference år (DRY) en del lavere udelufttemperaturer.

Solstråling

Som beskrevet tidligere har det været nødvendigt at beregne den diffuse fraktion af solstrålingen, idet DMI [2008] ikke har kunnet levere disse data, og hertil er beregningsmodellen af Lund [1985] er benyttet. Der henvises til appendiks H for eksempelberegning heraf.

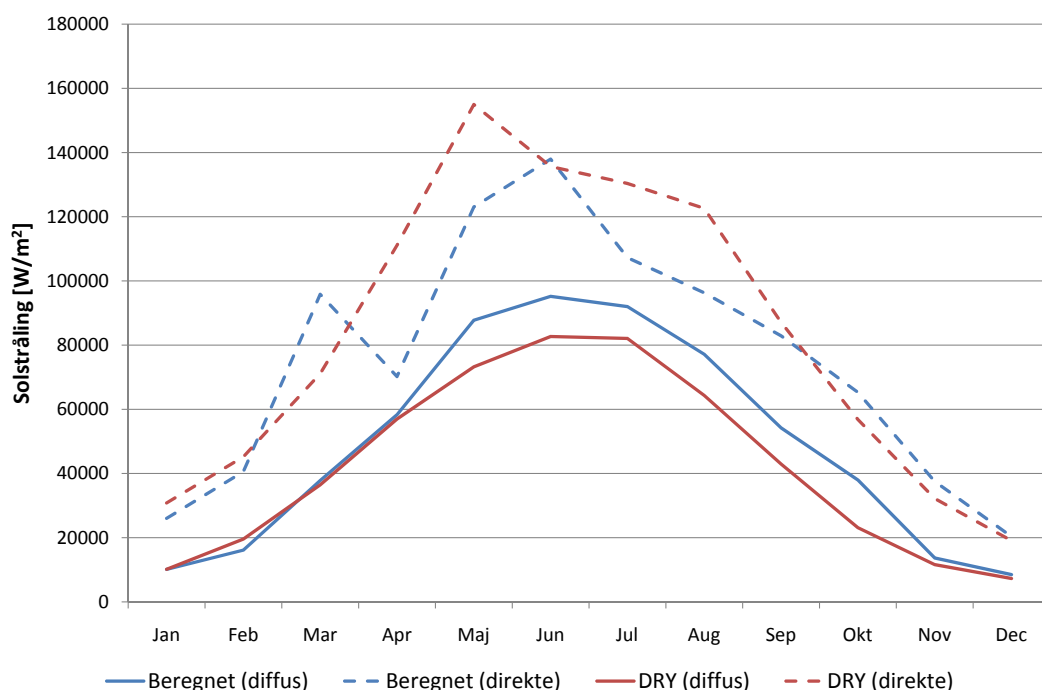
I det følgende sammenlignes den beregnede diffuse solstråling med det danske design reference år, der normalt benyttes ved simuleringer, hvor vejrdata ikke er indhentet.

En sammenligning mellem de beregnede værdier (døgnsum) for den diffuse solstråling og data fra det danske DRY er vist i følgende figur.



Figur G.9: Beregnede værdier (døgnsam) for den diffuse fraktion af den totale solstråling sammenlignet med data fra dansk DRY.

Af figur G.9 ses det, de beregnede værdier for den diffuse solstråling ligger tæt på værdierne i det danske DRY i månederne januar-april samt i november-december. For at tydeliggøre sammenligningen, viser følgende figur måned-summen af den beregnede diffuse solstråling sammenlignet med data fra det danske DRY. Endvidere er den beregnede direkte solstråling også vist.



Figur G.10: Total beregnet diffus og direkte stråling pr. måned sammenlignet med data fra dansk DRY.

Figur G.10 viser, at den beregnede diffuse fraktion ligger højere i månederne maj-oktober. For den direkte stråling ligger værdierne i det danske DRY konstant højere end de beregnede, hvilket også var tilfældet ved databehandlingen i forbindelse med opstillingen af modellen for Københavns Energi (appendiks F, figur F.9). Også i dette tilfælde, vil simuleringer med det danske DRY give en højere solbelastning og derved kølebehov.

På baggrund af ovenstående genereres vejrdata for brug ved simuleringer på baggrund af data fra DMI [2008] samt egne beregninger med følgende parametre:

- Måned [-]
- Dag-nr. [-]
- Time [-]
- Udelufttemperatur [$^{\circ}C$]
- Relativ luftfugtighed [%]
- Vindhastighed [$\frac{m}{s}$]
- Vindretning [$^{\circ}$]
- Lufttryk [Pa]
- Global solstråling [$\frac{W}{m^2}$]
- Diffus solstråling, beregnet [$\frac{W}{m^2}$]

I den nævnte periode³ hvor data mangler, indsættes data målt af CTS-anlægget, med en justering på $-2^{\circ}C$. Den endelige vejrdata-fil forefindes på den vedlagte DVD.

³10-14/8 2007

I det følgende vil opsætningen af samtlige systemer i BSim blive præsenteret.

G.2.5 OPSÆTNING AF SYSTEMER

Som nævnt i starten af nærværende appendiks, er bygningen styret af et avanceret CTS-anlæg, der styrer såvel ventilation herunder køleunit, belysning, solafskærmning samt brugsvand og varme. I det følgende vil styringen af såvel varme-, ventilations- samt belysningsanlægget blive præsenteret. Som tidligere nævnt, er bygningens brugstid er fra kl. 8.00 - 17.00.

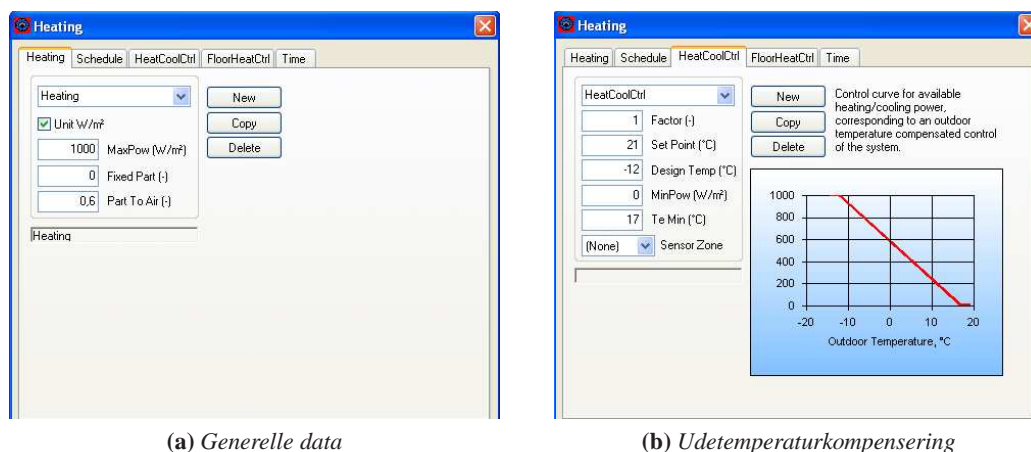
Rumtemperaturstyring

Varmeanlægget er et normalt vandbåret anlæg med almindelige konvektorer. I driftstiden holdes rumtemperaturen i de enkelte rum konstant på 22°C. Ved varmebehov indblæses der med fast indblæsningstemperatur på 18°C, og rumtemperaturreguleringen foretages ved CTS-styring af termostatventilerne på radiatorerne. Ved kølebehov er termostatventilerne lukkede, hvorefter indblæsningstemperaturen nedjusteres mod et minimum på 15°C som funktion af udelufttemperaturen. Udenfor driftstiden er ventilationsanlæggene normalt slukket. Dog vil der ved høje udetemperaturer køres med natkøling efter styringen angivet i det følgende. De ansatte har selv mulighed for at angive et offset af rumtemperaturen med op til $\pm 3^\circ\text{C}$. Denne funktion bliver imidlertid ikke benyttet.

I det følgende vil samtlige opstillede systemer blive præsenteret.

Varmeanlæg (*Heating*)

Varmeanlægget er udført som direkte anlæg med blandesløjfe for justering af fremløbstemperaturen (udetemperaturkompensering). Det forudsættes at varmeanlægget er dimensioneret således at den aktuelle effekt der er tilråde er tilstrækkelig. Derfor sættes effekten for varmeanlægget i modellen højt. Følgende figur viser indstillingen for varmeanlægget.



Figur G.11: Opsætning af system for opvarmning.

Ventilationsanlæg (*Ventilation*)

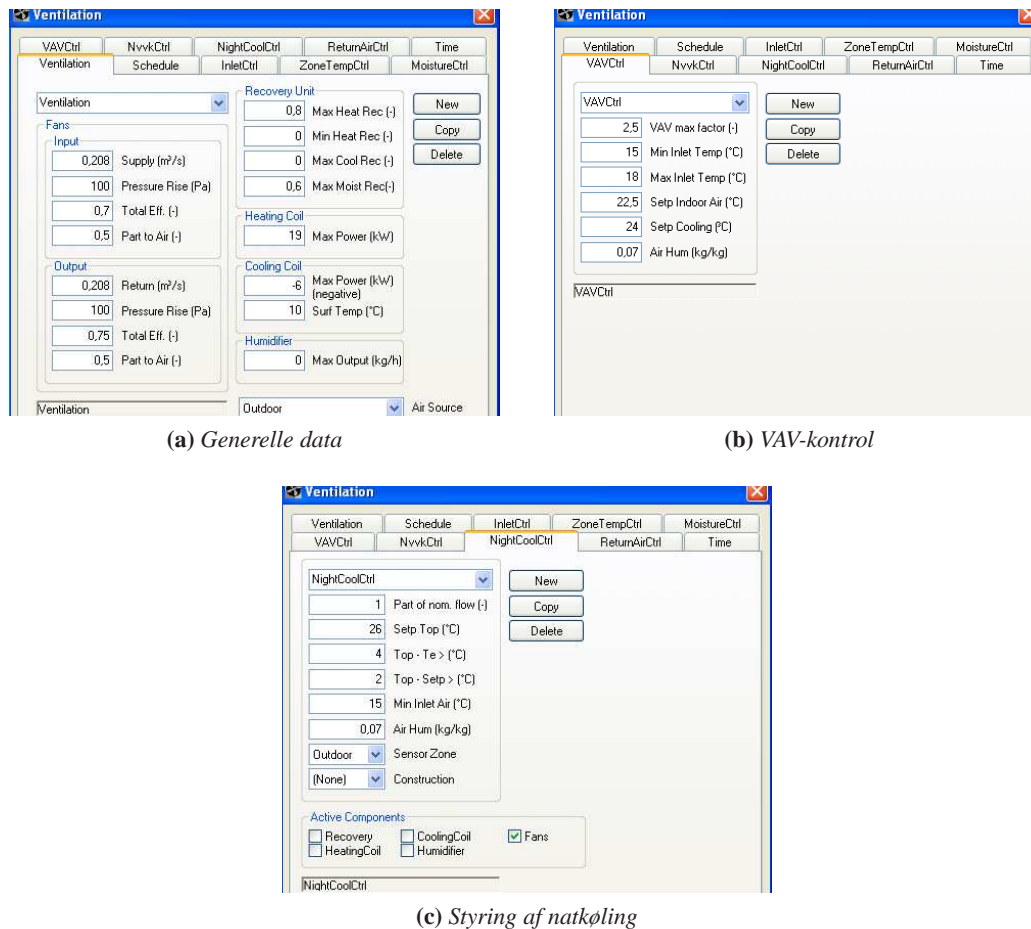
Bygningen er forsynet med to ventilationsanlæg der ventilerer hhv. nord- og sydafsnittet af kontoret opdelt af en diagonal skillelinje ned gennem bygningen (fra øverste højre hjørne til nederste venstre hjørne på figur G.4(a)). Anlæg VE02 forsyner det udvalgte område, hvorfor der kun arbejdes videre med dette. Anlægget er foruden varme- og køleflade forsynet med roterende varmeveksler. Kølefladen er vandbåren (vand/glycol) og er forsynet fra en køleunit, der sammen med de to ventilationsanlæg er placeret på taget.

Anlægget er udført som VAV-anlæg, hvor ventilatorerne opretholder et konstant tryk i hovedkanalerne. Reguleringspjæld holder konstant tryk i fordelingskanalerne på de enkelte etager, hvorefter VAV-regulatorerne i de enkelte indblæsningsarmaturer regulerer luftmængden til de enkelte rum efter behov. I arbejdstiden køres der med en basisluftmængde (40% af maksimal), der holdes konstant så længe der ikke er kølebehov. Ved kølebehov øges luftmængden gradvist mod maksimal. Udenfor driftstiden er anlægget normalt stoppet, men såfremt et sæt kriterier er opfyldt, køres der med natkøling. Disse kriterier er (alle skal være opfyldt):

- Tiden er mellem dagdrift, start og 6 timer før.
- Udetemperaturen er større end minimum indblæsningstemperatur (15°C).
- Udetemperaturen er minimum 4°C lavere end rumtemperaturen med 2°C's hysteres.
- Rumtemperaturen er 2°C over setpunktet for natkøling (24°C).

Endvidere skal det bemærkes, at der udover arbejdstiden er udvidet driftstid for ventilationsanlægget. Anlægget er i drift alle hverdage i tidsrummet 5.00-20.00 og i weekenderne 7.30-17.00.

Følgende figur G.12 viser opsætningen af systemet for ventilation, herunder natkøling, i BSim.



Figur G.12: Opsætning af system for ventilation herunder natkøling.

Den totale luftmængde for det udvalgte område er $1872 \frac{m^3}{h}$ ($0,52 \frac{m^3}{s}$). Ved brug af *VAVCtrl*-systemet i BSim, angives basisluftmængden under "Ventilation" (figur G.12(a)) til 40% af de $0,52 \frac{m^3}{s}$ ($0,208 \frac{m^3}{s}$) hvorefter der under "VAVCtrl" (figur G.12(b)) angives en forøgelsesfaktor på 2,5 hvormed den totale ydelse på $0,52 \frac{m^3}{s}$ opnås ved spidsbelastning. De angivne effekter for hhv. køle- og varmepladen er ved overslagsberegninger fundet til:

$$\begin{aligned}\Phi_{vf} &= q_v \cdot c_{p,luft} \cdot \rho_{luft} \cdot \Delta t_{vf} & (G.1) \\ &= 0,52 \frac{m^3}{s} \cdot 1,0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot (18 + 12)^\circ C \\ &= 19 kW\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{kf} &= q_v \cdot c_{p,luft} \cdot \rho_{luft} \cdot \Delta t_{kf} & (G.2) \\ &= 0,52 \frac{m^3}{s} \cdot 1,0 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot (15 - 30)^\circ C \\ &= -6 kW\end{aligned}$$

$$(G.3)$$

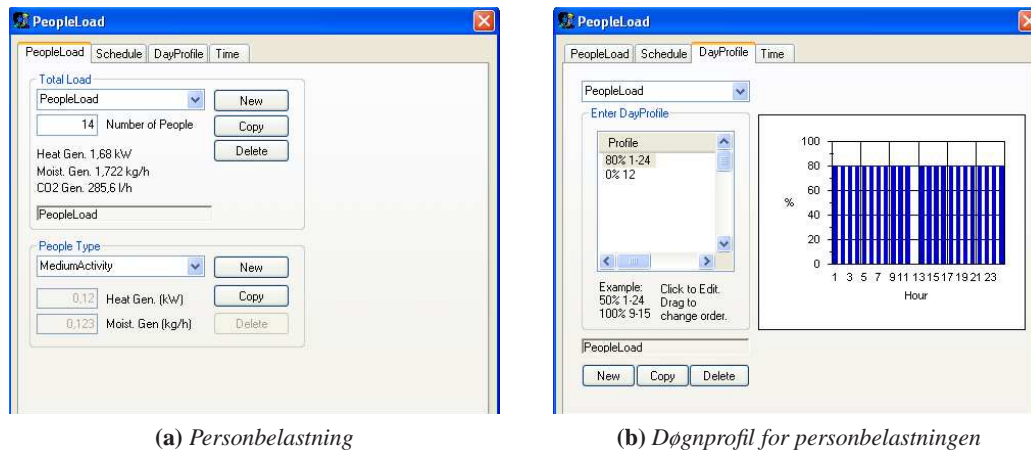
hvor

Φ_{vf}	=	Varmefladeeffekt	[kW]
Φ_{kf}	=	Kølefladeeffekt	[kW]
q_v	=	Dimensionsgivende luftmængde	$[\frac{m^3}{s}]$
$c_{p,luft}$	=	Specifik varmekapacitet for luft	$[\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}]$
ρ_{luft}	=	Densitet for luft	$[\frac{kg}{m^3}]$
Δt_{vf}	=	Temperaturdifferens over varmeblade	[$^\circ C$]
Δt_{kf}	=	Temperaturdifferens over køleblade	[$^\circ C$]

Personbelastning (*PeopleLoad*)

Af plantegningen på vist på figur G.5 fremgår det, at der er indrettet arbejdspladser til 14 personer. Aktivitetsniveauet for disse personer sættes til stillesiddende kontorarbejde svarende til 1,2met iht. DS/EN ISO 7730 [2006]. Af de 14 personer forudsættes det, at 80% af personerne svarende til ca. 11 personer er tilstede konstant i hele arbejdstiden. Det er umiddelbart vanskeligt at angive en præcis fordeling for antal personer der er til stede i rummet, idet dette ikke er kendt. Det forudsættes endvidere, at der i tidsrummet fra 11-12 er frokostpause, hvor der ingen personer er i rummet.

Følgende figur viser opsætningen af systemet for personbelastningen.



Figur G.13: Opsætning af system for intern belastning fra personer.

Udstyr (Equipment)

Samtlige arbejdspladser i det udvalgte rum er forsynet med en stationær PC med fladskærm. Printer og kopieringsmaskiner er placeret i separat rum udenfor den aktuelle zone. Varmebelastninger fra disse medtages således ikke. Til bestemmelse af den interne varmebelastning fra udstyr benyttes Andersen et al. [2002]. Følgende tabel G.7 viser de beregnede interne varmetilskud hidrørende fra udstyr.

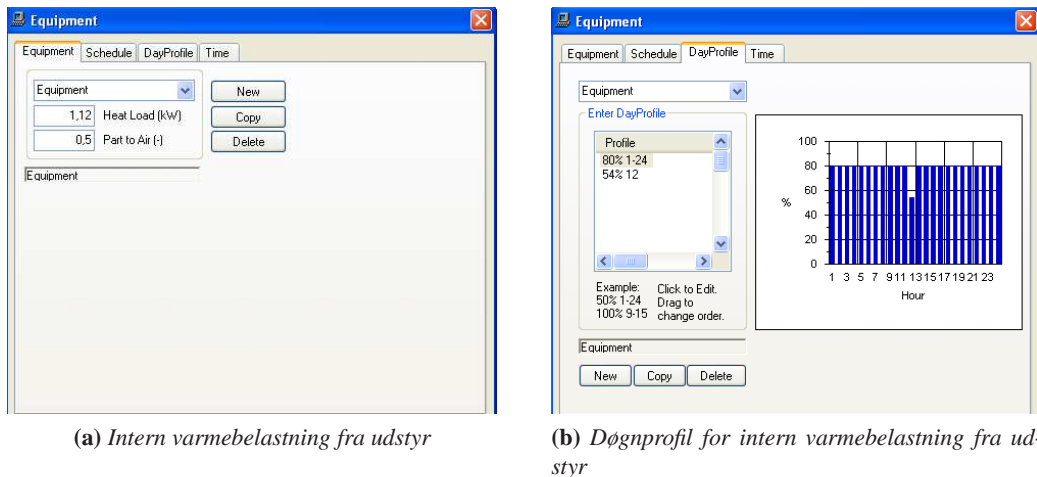
Tabel G.7: Internt varmetilskud fra udstyr (tal i parentes angiver effekten i standby-tilstand).

Apparat	Antal	Varmebelastning	Samlet
		$[\frac{W}{stk}]$	$[W]$
PC, standard	14	40(25)	560(350)
PC-fladskærm, 17"	14	40(30)	560(420)
Total			1120(770)

Under opsætningen af systemet for personbelastningen blev det forudsat, at kun 80% af personerne er tilstede samtidigt svarende til 11 personer. Det er således også kun 80% af computerne der er i brug, hvorfor varmebelastningen fra disse også fastsættes på baggrund heraf. Det antages at udstyret indtræder i standby-tilstand i perioden, hvor medarbejderne er til frokost - dvs. i tidsrummet 11-12. Opsummeret vil udstyret køre med 80% af den totale effekt i arbejdstiden, 54%⁴ af den totale effekt i frokospausen og være helt slukket udenfor arbejdstiden.

Følgende figur viser opsætningen af systemet for den interne varmebelastning fra udstyr.

⁴ 11 computere i standby: $\frac{11 \cdot (25+30)}{1120}$



Figur G.14: Opsætning af system for intern belastning fra udstyr.

Belysning (Lighting)

Belysningsanlægget er også styret af CTS-anlægget opdelt i to zoner. Set fra facaden er der tre rækker belysningsarmaturer, hvor yderste række mod ydervæggene udgør en zone mens de resterende to rækker udgør en anden zone. Belysningen styres kontinuert efter lysniveauet i zonen samt ved bevægelsesmeldere (PIR⁵-følere). Setpunktet for lysniveauet er 800 lux og slukker ved tilstrækkeligt dagslys eller inaktivitet i 15 min. Det antages, at der er personer i rummet hele tiden (eller mindst hvert kvarter), således at lyset aldrig slukker som følge af inaktivitet.

Foruden det overordnede belysningsanlæg, er der skrivebordslamper ved hver arbejdsplads. Styringen heraf er manuel men på trods af at medarbejderne går til frokost i tidsrummet 11-12 vurderes det, at lamperne forbliver tændt. Til beregning af det interne varmetilskud fra såvel almen som arbejdsbelysning benyttes Andersen et al. [2002]. Følgende tabel G.8 viser de beregnede interne varmebelastninger hidrørende fra belysning⁶.

Tabel G.8: Internt varmetilskud fra almen og arbejdsbelysning.

Kilde	Installeret effekt $[\frac{W}{stk}]/[\frac{W}{m^2}]$	Antal/Areal $[stk]/[m^2]$	Samlet $[W]$
Almen belysning	6,0	118,4	710
Arbejdsbelysning	18	14	252

Som følge af forudsætningerne ved opsætningen af systemet for den interne personbelastning, antages det, at 80% af arbejdsbelysningen (202W) er tændt hele arbejdstiden. Det vurderes iøvrigt, at arbejdsbelysningen ikke slukkes i frokostpausen.

⁵Passiv Infrarød Rumsøger

⁶Effekter og setpunkter er oplyst af Tage Hjelm, Grontmij | Carl Bro. Se evt. e-mail-korrespondance i appendiks L.2.2.

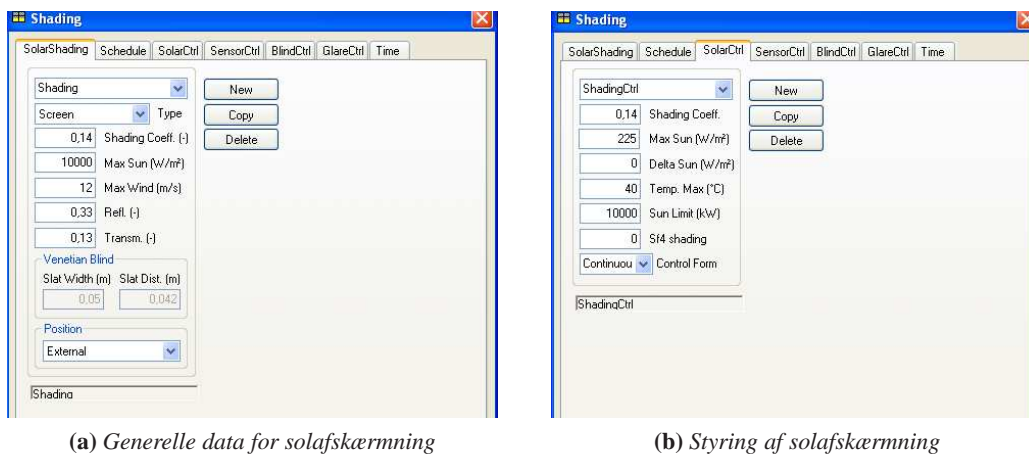


Figur G.15: Opsætning af system for intern belastning fra belysning

Solafskærmning (SolarShading)

På facaderne mod øst, vest og syd er der etableret udvendig solafskærmning i form af motoriserede screens (se evt. figur G.1(b)). Disse er opdelt facademæssigt iht. geografisk orientering og er styret efter solintensiteten. Ved en solintensitet over $225 \frac{W}{m^2}$ aktiveres solafskærmningen. Den maksimale tilladte vindhastighed for afskærmningen er $12 \frac{m}{s}$ (øjeblikkelig) og/eller en gennemsnitlig vindhastighed over en periode på 5 min på $9 \frac{m}{s}$. Afskærmningsfaktoren for de installerede screens er 0,14⁷. Endvidere er styringen af solafskærmningen aktiv hele tiden, og vil således også aktiveres udenfor arbejdstiden såfremt de angivne kriterier er opfyldt.

Følgende figur viser opsætningen af systemet for solafskærmning.



Figur G.16: Opsætning af system for solafskærmning.

⁷Screen-dug type 525, grå-hvid, Jyllands Markisefabrik (datablad forefindes på den vedlagte DVD, hvor samtlige benyttede data fremgår).

Infiltration (*Infiltration*)

Fastsættelsen af luftskiftet hidrørende fra infiltrationen er forholdsvis vanskelig. S. og Grau [2005] angiver, at der for nye bygninger regnes med følgende infiltration beregnet ud fra bruttoetagearealet:

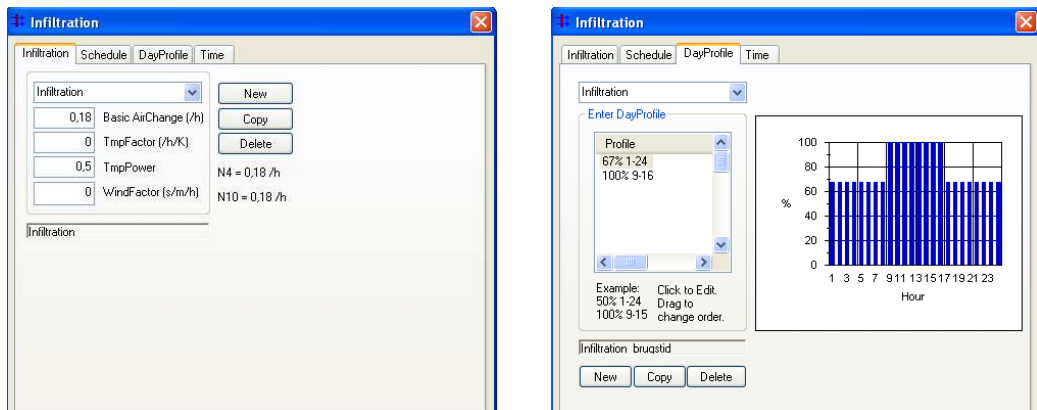
$$q_{inf.brugstid} = 0,13 \frac{l}{s \cdot m^2} \quad \text{i brugstiden} \quad (G.4)$$

$$q_{inf.u.brugstid} = 0,09 \frac{l}{s \cdot m^2} \quad \text{udenfor brugstiden} \quad (G.5)$$

Idet rumhøjden i det udvalgte rum er $2,6m$, svarer ovenstående til en infiltrationsluftskifte på hhv. $0,18h^{-1}$ i brugstiden og $0,12h^{-1}$ udenfor brugstiden. Infiltrationen i brugstiden dækker foruden utætheder i klimaskærmen også over tilfældig åbning af vinduer og døre.

Infiltrationen gennem bygningens klimaskærm defineres således som et konstant luftskifte på $0,18h^{-1}$ i brugstiden samt et konstant luftskifte på $0,12h^{-1}$ ⁸ udenfor brugstiden idet bygningen er nyopført, og det forudsættes derfor, at tæthedskravene er overholdt.

Følgende figur viser opsætningen af systemet for infiltration.



(a) Infiltration

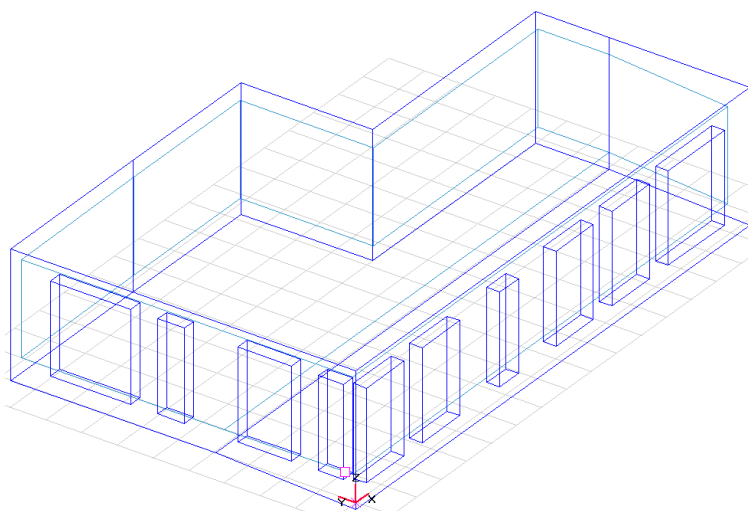
(b) Døgnprofil for infiltration

Figur G.17: Opsætning af system for infiltration.

G.2.6 ENDELIG BSIM-MODEL

BSim-modellen, der er opstillet på baggrund af ovenstående inddata og forudsætninger, er illustreret på følgende figur.

⁸defineres som $\frac{0,12}{0,18} = 67\%$ af det maksimale luftskifte.



Figur G.18: *BSim-model*

I den opstillede model er det endvidere forudsat, at der i de tilstødende rum er samme termiske forhold som i det simulerede rum.

I de følgende afsnit vil den opstillede model først blive valideret i forhold til målinger indhentet fra bygningens CTS-anlæg, hvorefter modellen benyttes i forbindelse med simuleringer med henblik på:

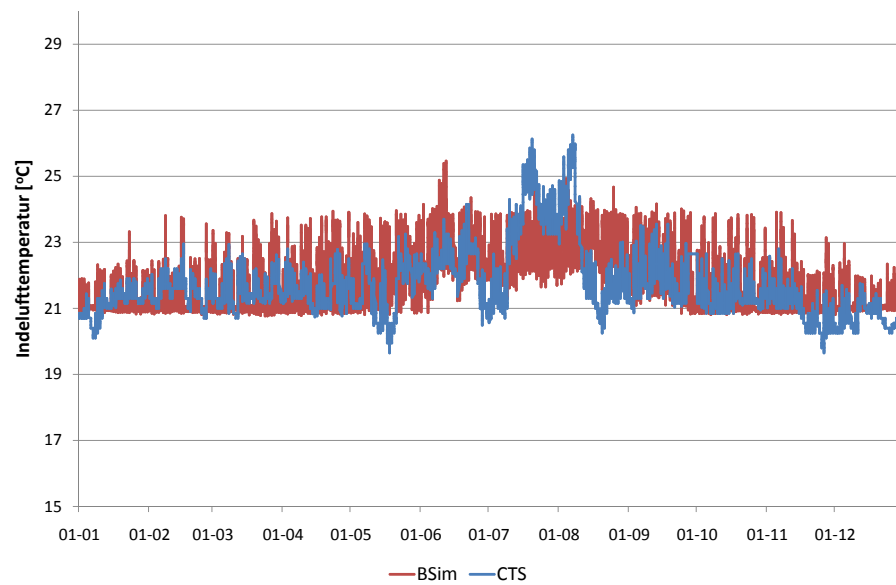
- Brug af data til evaluering af bygningens indeklimate og energiydeevne gennem det opstillede koncept.
- Undersøgelse af mulige energibesparelser ved brug af den adaptive kontrolalgoritme (ACA) samt estimeringer af påvirkningen af det termiske indeklimate.

G.2.7 VALIDERING AF MODEL

I nærværende underafsnit valideres den opstillede BSim-model ved sammenligning af de simulerede og de af CTS-anlægget målte indelufttemperaturer.

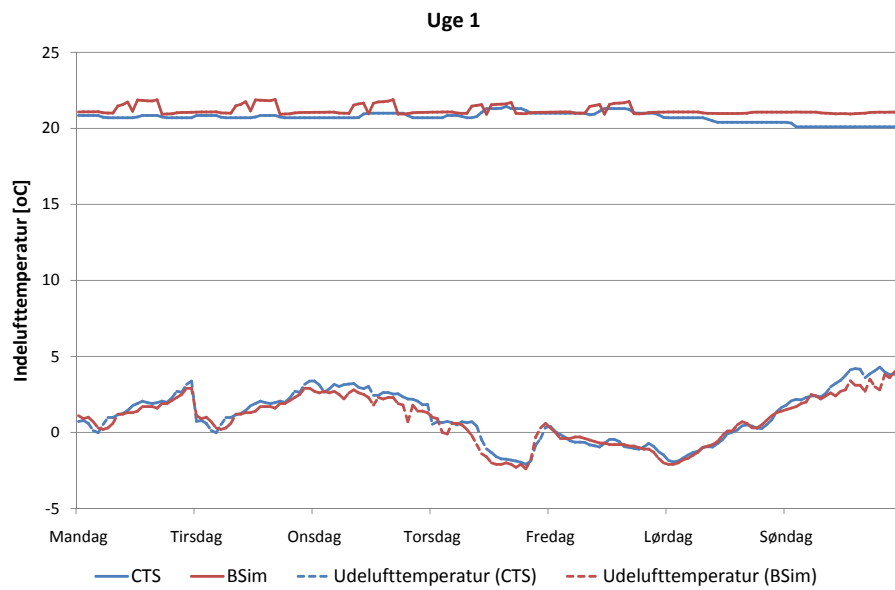
Indledningsvist bør det kommenteres, at de indhentede data stammer fra bygningens ibrugtagning medio 2007 til medio 2008. I indkørselsperioden er setpunkterne samt driftstiderne for ventilationsanlægget løbende justeret og foruden dette var der problemer med lugt fra isoleringsmaterialer omkring kanalerne, hvorfor ventilationsanlægget i en periode har være i konstant drift. Endvidere var der ved ibrugtagningen problemer med kølekompressoren, hvor styringen efterfølgende blev udskiftet. Idet disse driftsafvigelser ikke kan tages højde for i BSim, må der nødvendigvis forekomme større afvigelser mellem de simulerede og de af CTS-anlægget målte indelufttemperaturer i enkelte perioder. Ydermere er de benyttede vejrdata fra en meteorologisk station placeret i Århus syd, og der vil således forekomme temperaturforskelle mellem disse og de lokale temperaturer ved bygningen.

Følgende figur viser de simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med de af CTS-anlægget målte for hele den betragtede periode (et år).

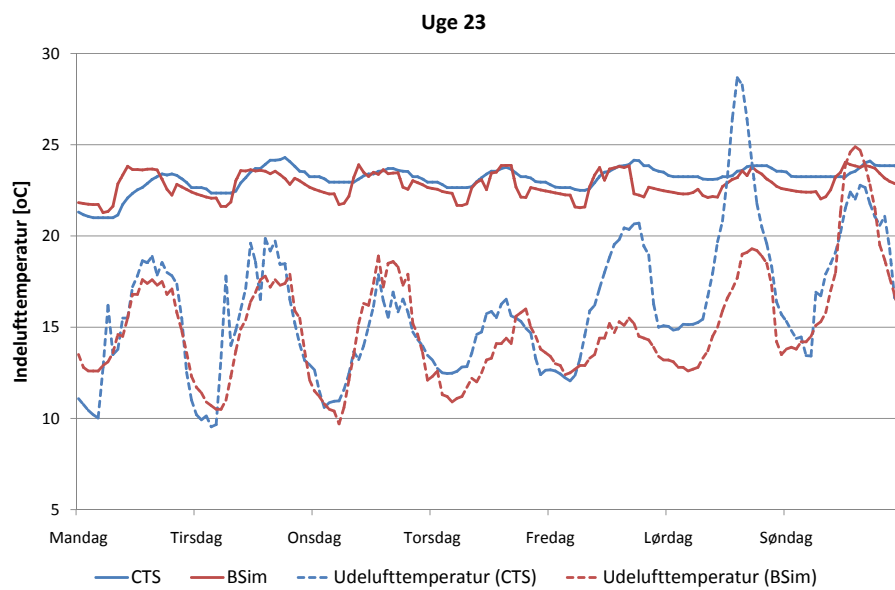


Figur G.19: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med CTS-data for hele den betragtede periode på et år.

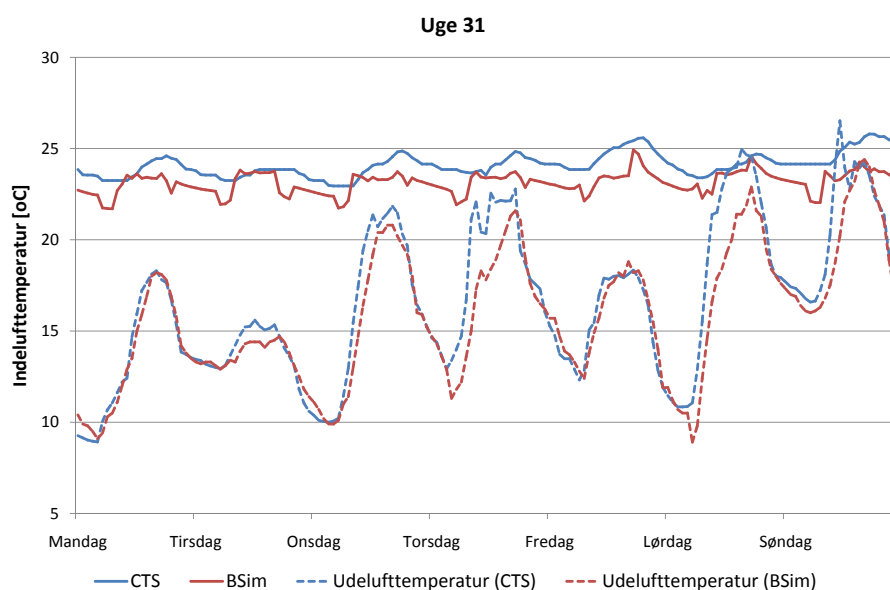
Som det fremgår af ovenstående figur forekommer der perioder, hvor de målte indelufttemperaturer overstiger de simulerede (august). Endvidere ses det, at det oplyste setpunkt for varmeanlægget på 21°C ikke er opnået i enkelte perioder. Følgende figur G.20-G.22 viser simuleringer og målinger af indelufttemperaturen for tre udvalgte uger: 1 (januar), 23 (juni) og 31 (august) (en kold og to varme uger jf. klimadata samt figur G.19).



Figur G.20: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med CTS-data for uge 1 (januar). Endvidere vises udelufttemperaturen fra de benyttede vejrdata samt den af CTS-anlægget målte.



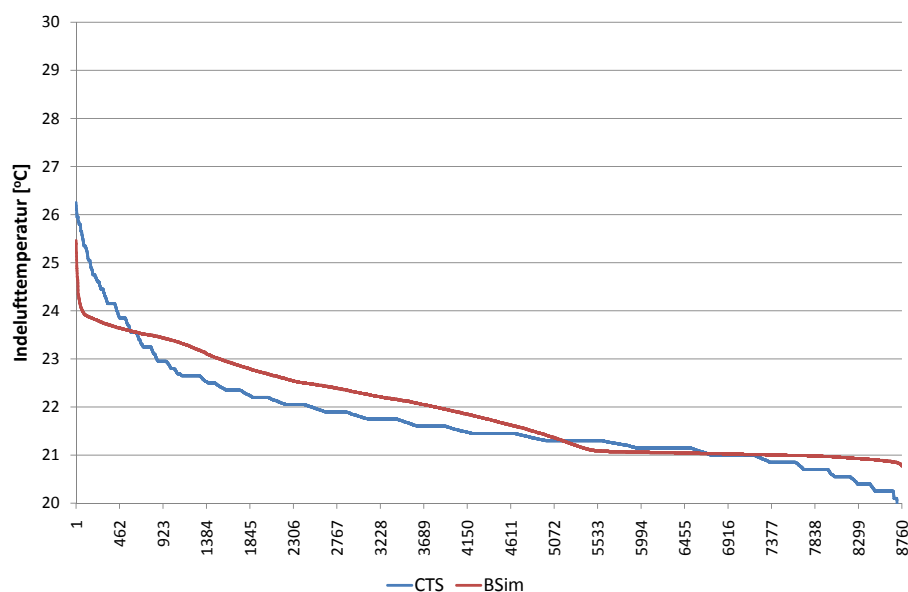
Figur G.21: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med CTS-data for uge 23 (juni). Endvidere vises udelufttemperaturen fra de benyttede vejrdata samt den af CTS-anlægget målte.



Figur G.22: Simulerede indelufttemperaturer sammenlignet med CTS-data for uge 31 (august). Endvidere vises udelufttemperaturen fra de benyttede vejrdata samt den af CTS-anlægget målte.

Af figur G.20 ses det, at de simulerede og målte temperaturer ligger tæt på hinanden, hvilket også er tilfældet for den benyttede udelufttemperatur sammenlignet med den af CTS-anlægget målte. For hhv. juni (uge 23) og august (uge 31) ligger den simulerede temperatur generelt under den målte, men da de benyttede udelufttemperaturer også ligger under dem fra CTS-målingerne, var dette forventeligt. Temperaturforløbene på figur G.21 og G.22 viser i øvrigt, at varmekapaciteten i den simulerede bygning er tæt på den aktuelle.

Endelig viser følgende figur fordelingerne af hhv. de simulerede og de af CTS-anlægget målte indelufttemperaturer, og efterfølgende tabel G.9 viser generelle statistiske data for hhv. inde- og udelufttemperaturen.



Figur G.23: Fordelinger af simulerede og målte indelufttemperaturer.

Tabel G.9: Statistiske data for inde- og udelufttemperaturer.

	Indelufttemperatur, [°C] (CTS/BSim)			Udelufttemperatur, [°C] (CTS/BSim)		
	Min.	Middel	Maks.	Min.	Middel	Maks.
Januar	20,1/20,8	21,1/21,3	21,9/23,3	-2,1/-2,4	4,0/4,1	10,3/10,9
Februar	20,7/20,8	21,5/21,3	23,0/23,8	-3,9/-4,2	4,6/4,7	10,5/10,9
Marts	20,7/20,8	21,5/21,4	22,9/23,9	-9,0/-7,6	3,3/3,3	9,1/8,8
April	20,7/20,8	21,5/21,7	22,8/23,9	-0,8/-2,4	7,8/6,9	20,5/18,1
Maj	19,7/20,8	21,5/22,0	23,3/24,0	1,7/0,5	12,1/11,1	25,6/20,8
Juni	20,5/20,9	22,4/22,9	24,2/25,5	7,7/2,4	17,9/15,5	31,0/28,0
Juli	20,6/21,3	23,3/22,8	26,1/24,7	8,8/7,7	16,2/15,4	28,7/24,9
August	20,3/21,6	22,6/23,1	26,3/24,9	7,4/7,6	17,1/16,5	27,7/24,6
September	20,9/20,8	22,0/22,3	23,6/24,2	4,4/5,0	13,0/12,9	19,9/19,7
Oktober	20,9/20,8	21,4/21,6	22,7/23,9	1,1/-2,1	8,8/8,4	16,0/15,0
November	19,7/20,8	21,0/21,4	22,8/23,9	-2,8/-3,3	4,7/4,8	13,1/13,1
December	20,3/20,8	20,7/21,2	21,8/23,0	-4,5/-4,8	3,6/3,6	10,7/10,6

Figur G.23 viser en forskel mellem fordelingerne af de simulerede og målte indelufttemperaturer. På baggrund af ovenstående diskussion vedr. driftsforholdene for ventilations- og køleanlæg, de løbende ændringer af setpunkter mv. var denne forskel imidlertid mere eller mindre forventet.

Af tabel G.9 ses det, at de simulerede og målte indelufttemperaturer gennemsnitligt har ligget tæt på hinanden. Endvidere viser kolonnen med de maksimale indelufttemperaturer, at disse også ligger tæt. De ovenfor nævnte forskelle i udelufttemperaturen målt af hhv. CTS-anlægget og DMI [2008] fremtræder også tydeligt af tabellen. F.eks. er den maksimale udelufttemperatur målt af CTS-anlægget i maj 25,6°C, hvor data fra DMI [2008] angiver en maksimal temperatur på 20,8°C. Det

er generelt, at CTS-anlægget har målt højere udelufttemperaturer i de varme måneder (april-august) ift. målingerne fra DMI [2008], og denne forskel må nødvendigvis medføre en afvigelse mellem de simulerede og målte indelufttemperaturer, som nævnt tidligere.

På baggrund af ovenstående diskussion vurderes det, at den opstillede BSim-model for den udvalgte bygning, med god overensstemmelse simulerer det termiske indeklima, og vil herefter blive benyttet i nærværende projekt.

Beregning af diffus solstråling

H

In nærværende appendiks er der foretaget en eksempelberegning af diffus og normal stråling. Beregningerne er foretaget efter metoden opstillet af Lund [1985]. I det følgende eksempel er det valgt at beregne den diffuse fraktion af den globale stråling samt direkte stråling ud fra målinger fra DMI [2008] d. 15/8 2007 kl. 12:00.

H.1 FORUDSÆTNINGER OG FORMLER

For det valgte tidspunkt for beregning af diffus og direkte stråling, benyttes følgende måledata mv.:

Minimumstemperatur om morgenen([DMI, 2008]):	t_{min}	$=14,1^{\circ}C$
Global stråling([DMI, 2008]):	G_h	$=618\frac{W}{m^2}$
Dag-nr.:	DN	$=227$
Solhøjde([Hansen et al., 1997, A.02.03]):	h_s	$=47,9^{\circ}$
Forhold mellem global og kosmisk stråling ([Lund, 1985, Appendiks 3])	K_t	$=\frac{G_h}{I_e}$

H.2 BEREGNING

For den pågældende dag beregnes afstandsfaktoren, DA , mellem sol og jord af følgende ligning:

$$\begin{aligned} DA &= 1 + 0,0334 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot DN}{182,5}\right) & (H.1) \\ &= 1 + 0,0334 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 227}{182,5}\right) \\ &= 1,0333 \end{aligned}$$

Herefter beregnes den kosmiske stråling på vandret.

$$\begin{aligned} I_e &= 1353 \cdot DA \cdot \sin(h_s) & (H.2) \\ &= 1353 \cdot 1,0333 \cdot \sin(47,9) \\ &= 1037,3\frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

Den absolutte luftfugtighed beregnes af:

$$\begin{aligned}
 RMIN &= 0,165 + 0,004 \cdot t_{min} & (H.3) \\
 &= 0,165 + 0,004 \cdot 14,1 \\
 &= 0,2214
 \end{aligned}$$

Idet forholdet mellem global stråling på vandret ligger i intervallet, $0,35 \leq K_t \leq 0,75$, beregnes relationen til den absolutte luftfugtighed af følgende:

$$\begin{aligned}
 RELD &= 0,913 - \frac{(0,913 - RMIN) \cdot (K_t - 0,36)}{0,4} & (H.4) \\
 &= 0,913 - \frac{(0,913 - 0,2214) \cdot (\frac{618}{1037,3} - 0,36)}{0,4} \\
 &= 0,5053
 \end{aligned}$$

Endelig beregnes den direkte og diffuse solstråling for den valgte time af følgende:

Direkte stråling:

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \frac{G_h \cdot (1 - RELD)}{\sin(h_s)} & (H.5) \\
 &= \frac{618 \cdot (1 - 0,5053)}{\sin(47,9)} \\
 &= 412 \frac{W}{m^2}
 \end{aligned}$$

Diffus stråling:

$$\begin{aligned}
 D_h &= G_h - I_0 \cdot \sin(h_s) & (H.6) \\
 &= 618 - 412 \cdot \sin(47,9) \\
 &= 312 \frac{W}{m^2}
 \end{aligned}$$

H.3 KONTROL AF BEREGNEDE VÆRDIER FOR DIREKTE STRÅLING

For at undgå unormalt høje værdier for direkte stråling, kontrolleres disse ved følgende metode. Metoden er baseret på luftmassen, m_{luft} , en 'formodet solkonstant', $k_s = 1164 \frac{W}{m^2}$, og en 'udelukkelseskoeficient', k_e .

Luftens relative massefylde beregnes ved:

$$\begin{aligned}
 m_{luft} &= \frac{1,02}{\sin(h_s) + 0,02} & (H.7) \\
 &= \frac{1,02}{\sin(47,9) + 0,02} \\
 &= 1,339
 \end{aligned}$$

Udelukkelseskoefficienten for den pågældende dag beregnes til:

$$\begin{aligned}
 k_e &= 0,007 \cdot t_{min} + 0,12 & (H.8) \\
 &= 0,007 \cdot 14,7 + 0,12 \\
 &= 0,2187
 \end{aligned}$$

Den maksimale 'rimelige' direkte stråling for den betragtede time er:

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= k_s \cdot DA \cdot e^{-k_e \cdot m_{luft}} & (H.9) \\
 &= 1164 \cdot 1,0333 \cdot e^{-0,2187 \cdot 1,339} \\
 &= 897 \frac{W}{m^2}
 \end{aligned}$$

Herefter sammenlignes den beregnede direkte stråling med den maksimalt rimelige, og da $I_0 < I_{max} + 56 \frac{W}{m^2}$ accepteres den beregnede værdi af direkte og diffus stråling. Såfremt dette kriterie ikke havde været overholdt, skulle den beregnede direkte stråling sættes lig den maksimalt rimelige, hvorefter diffus stråling genberegnes.

Beregninger identiske med den ovenstående foretages for samtlige timer af de behandlede vejrdata. Beregnede værdier for den diffuse stråling samt målte værdier for den globale stråling benyttes sammen med de resterende vejrdata ved konstruering af vejrdato-filen til BSim.

Beskrivelse af stokastiske begreber

I

I det følgende appendiks er der foretaget en beskrivelse af de to typer metoder der anvendes til kvantificering af en models usikkerhed, hhv. følsomheds- og usikkerhedsanalysen. I det følgende defineres forskellen mellem de to analyseformer.

I.1 KORT BESKRIVELSE AF FORSKELLEN

Følsomhedsanalyser og usikkerhedsanalyser er nært beslægtede, men det er af afgørende betydning, at der skelnes mellem de to analyseformer [H. og A., 2004].

En usikkerhedsanalyse anvendes til at kvantificere modellens samlede usikkerhed, mens følsomhedsanalysen bruges til at identificere og, afhængigt af analysemetoden, tilmed kvantificere kilderne til modellens samlede usikkerhed.

I hvilken rækkefølge analyserne skal foretages er forholdsvist arbitrært at definere, da der er tale om en iterativ proces. Først må det afgøres om der er en væsentlig usikkerhed i modellens resultat, hvilket udføres ved den omtalte usikkerhedsanalyse. Dog kan det være nødvendigt ved store modeller, som det oftest er tale om i nærværende sammenhæng og generelt ved termisk bygningssimulering, at der forud for en følsomhedsanalyse og en usikkerhedsanalyse bliver foretaget en afgrænsning af antallet af parametre ved brug af en såkaldt screeninganalyse (beskrevet i nedenstående afsnit I.2.1). Derefter afgøres det om disse parametre medfører en (væsentlig) usikkerhed i modellens output, som igen besvares ved en usikkerhedsanalyse. Viser det sig efterfølgende, at der er tale om en model med et væsentligt usikkert resultat, kan der udføres en følsomhedsanalyse for at identificere de mest afgørende parametre, der efterfølgende bestemmes med en mere korrekt værdi. Men for at verificere, at de mere korrekte parameterverdier rent faktisk nedbringer modellens samlede usikkerhed, må der igen udføres en usikkerhedsanalyse. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

Som det fremgår er denne iteration en forholdsvist langsommelig proces, og i praksis vurderes det da også at være tilstrækkeligt med én eller måske to gennemløb af processen for at nedbringe usikkerheden eller blot få kendskab til den.

I.2 BESKRIVELSE AF FØLSOMHEDSANALYSE

Følsomhedsanalyse anvendes til at belyse betydningen af én variabels indflydelse på det samlede model-resultatet. Med andre ord er formålet med følsomhedsanalysen at besvare en række spørgsmål, som beskriver den information der strømmer ind og ud af modellen: [Saltelli et al., 2000]; [Simonsen og Sørensen, 2007]

1. Hvilke inputs forårsager de største variationer i modellens output og bør derfor undersøges yderligere for at styrke vidensgrundlaget?
2. Hvilke inputs er irrelevante for resultater og kan dermed undlades eller blot angives ved en grov værdi i den endelige modellering?
3. Hvilke inputs eller input-grupper er ”væsentligt” korrelerede?

Ad 1.) Her anvendes følsomhedsanalysen til at vurdere modellens parameterværdier. Hermed undersøges det, hvilke parametre der med rimelighed kan fastsættes ud fra erfaring og hvilke der bør underlægges nærmere undersøgelser for derved effektivt at reducere usikkerheden i modellens output. Er der tale om en parameter med lille eller ubetydelig effekt på resultatet, kan middelværdier være tilstrækkelige. Dette kan eksempelvis være værdier baseret på simplificerede udtryk, eller forsøg, hvor forholdene er tilnærmelsesvis ens. Er det derimod en vigtig parameter med høj følsomhed, er det afgørende, at der benyttes en værdi der afspejler virkeligheden, og at usikkerheden, der knytter sig til parameterens natur kvantificeres. I det tilfælde hvor der foretages simulering af komplekse forhold, kan der være stor usikkerhed på flere parameterværdier. Dette grundtes ved den beskrevne problemstilling, hvor mange parameterværdier fastsættes ved estimering eller mindre beregninger - se appendiks K. Denne problemstilling giver netop anledning til et ønske om at identificere de absolut vigtigste parametre, som efterfølgende kan undersøges og fastsættes nærmere - f.eks. gennem litteraturstudier, ekspertviden, CFD-simuleringer eller fuldskalaforsøg. [Simonsen og Sørensen, 2007; Saltelli et al., 2000]

Ad 2.) Irrelevante parametre forstås som dem, der har lille eller ingen indflydelse på variationen i modellens output. Denne form for følsomhedsanalyse er speciel fordelagtig ved simplificeringer af komplicerede modeller. Gennem analysen er det muligt at finde dele eller hele elementer, som er uden betydning for resultatet. Ved at negligere disse opnås en simplificering uden nævneværdig ændring af resultatet. Det kræver stor erfaring at kunne forudsige hvilke dele af en model, der kan simplificeres eller helt elimineres, og ved moderne og komplekse bygninger kan dette endda være helt umuligt. Netop her kan sensitivitetsanalyser være meget anvendelige, og angive hvilken del af modellen der er irrelevant. [Morris, 1991; Saltelli et al., 2000]

Ad 3.) Det er ofte tilfældet, at parametrene er korrelerede. Hermed vil usikkerheden i den enkelte parameterværdi give anledning til en ekstra usikkerhed, hvis den kombineres med en korreleret parameter. Det er derfor vigtigt, at den benyttede metode tager højde for korrelation for derved at opnå den korrekte usikkerhed ved de enkelte parametre. Morris-metoden, som anvendes til alle følsomhedsanalyser i denne rapport, tager højde for korrelationen vha. 1. ordens-effekt. [Bendtsen og Sørensen, 2005; Morris, 1991]

I.2.1 MORRIS-METODEN

Morris-metoden er designet til modeller med et stort antal parametre, hvor der tages højde for både ulinearitet og korrelation. Metoden blev første gang præsenteret i 1991 under betegnelsen *Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments* [Morris, 1991]. Efterfølgende er metoden dog oftest kendt og anvendt i adskillige sammenhænge under navnet *Morris-metoden*. Ideen ved brugen af Morris-metoden er at fastsætte hvilke faktorer, der kan betragtes som lineære, ulineære/korrelerende og ubetydelige.

En anden specielt interessant ting er, at metoden tidligere har været anvendt i forbindelse med kvantificering af usikkerhed i indeklimateknisk bygningssimulering, hvilket ligeledes gør den velegnet til dette projekt. Kort opsummeret er Morris-metodens egenskaber: [Morris, 1991; H. og A., 2004; Saltelli et al., 2004]

- Simuleringsmæssig økonomisk - dvs. få simuleringer i forhold til antal parametre.
- Ikke afhængig af antagelser om korrelation og/eller ulinearitet mellem parametre og modellens output.
- Der opnås information om hvorvidt parametervariationen er lineær eller ulineær.
- Parametrene behandles globalt - dvs. hele parameterens variationsområde afdækkes.
- Der tages hensyn til det samlede bidrag til variationen i modellens output som følge af korrelation mellem parametrene, men der foretages ikke en egentlig kvantificering af korrelationen mellem de enkelte parametre f.eks. bestemmelse af hhv. 2. og 3.ordens-effekten (osv.).
- Resultatet er forholdsvis let at fortolke og præsenteres grafisk.

At der i metoden ikke foretages en egentlig kvantificering af korrelationen mellem parametrene i modellen kan være en begrænsning. Ved en analyse med Morris-metoden vil det, selvom der foreligger detaljeret information om de vigtige parametre, således ikke være muligt at foretage en kvantificering af 2., 3. og højere-ordens-effekter til brug ved en optimering af modellen, da disse ikke bestemmes i metoden¹. I situationer, hvor der *ikke* foreligger ”meget” detaljeret information om de vigtigste parametre, vil det typisk være tilstrækkeligt at bestemme 1. ordens-effekten (middelværdien, μ) samt det samlede bidrag fra korrelationen (standardafvigelsen, σ) og efterfølgende optimere modellen på denne baggrund [Malkawi og Augenbroe, 2004].

Følgende beskrivelse af teorien bag Morris-metoden er et lille uddrag fra litteraturen Macdonald [2002]; Morris [1991]; Saltelli et al. [2004]; Bendtsen og Sørensen [2005]; Simonsen og Sørensen [2007]

Den grundlæggende Morris-metode anvender OAT²-princippet, hvor ændringen af parametrene styres af en forudbestemt designplan, der beskriver med hvilket nominelt mellemrum og hyppighed, OAT-ændringen skal foretages for den enkelte parameter. Denne designplan fastsættes med en række variable, Ω , Δ , k , p og r , som beskrives i det følgende.

De enkelte input-parametre i modellen defineres i et variationsområde ved benyttelse af fordelingsfunktioner (appendiks J). Herved kan der for hver enkelt parameter udvælges en diskret værdi mellem minimum og maksimum. Således diskretiseres hver af parametrenes fordelingsfunktion ved en skalering til et nyt variationsområde, der varierer mellem nul og en, som benævnes ω .

I designplanen defineres Δ , som angiver størrelsen af ændringen i input-parametrene fra simulering til simulering. Den valgte størrelse af Δ er konstant gennem hele analysen, hvorved ændring af alle parametre altid er af samme størrelsesorden. I variationsområdet [0;1] udvælges en tilfældig parameter en ad gangen med en ny tilfældig værdi, mens alle andre fastholdes - dvs. både udvælgelsen af hvilken parameter samt dens værdi ved ændringen af Δ . Denne parameter er en skaleret værdi, som repræsenterer en diskret værdi i parameterens fordelingsfunktion.

¹ Kvantificering af samtlige korrelationer samles i Morris-metoden i én værdi - standardafvigelsen, σ

² One At a Time

Fra simulering til simulering registreres ændringen i modellens output. Ved denne registrering bestemmes størrelsen for hver enkelt parameters bidrag til variationen i modellens output som følge af ændringen Δ , mens de resterende parametre fastholdes. Denne størrelse beskriver den pågældende parameters elementæreffekt - en parameters elementæreffekt er et mål for dens vigtighed.

Hver parameters variationsområde beskrives ved et såkaldt *p-niveau-net*, hvor p er antallet af punkter som variationsområdet inddeles i. Hermed inddeles variationsområdet i et antal, p , lige store spring af størrelsen Δ . De tilfældige værdier for de enkelte parametre i disse inddelinger betegnes efterfølgende ved vektoren X_i for $i = 1, 2, \dots, k + 1$, hvor k er antallet af input-parametre.

For hver fortløbende simulering gentages den tilfældige udtrækning af punkterne x_i i X_i , svarende til en tilfældig kombination af parameterverdier for hver simulering. Som beskrevet gentages den tilfældige udvælgelse af punkter i hver parameters variationsområde r gange, til hele variationsområdet er afdækket - dvs. for hver parameter haves $x^{(1)}, \dots, x^{(r)}$, hvor notationen i parentes angiver, at der for hver enkelt parameter i alt genereres r forskellige input-værdier. Størrelsen af r er afgørende for, at hele parameterens variationsområde afdækkes. Ved at bestemme elementæreffekten for hver parameter r gange - dvs. forskellen i modellens output som følge af ændring af den enkelte parameter fra simulering til simulering, opnås en fordelingsfunktion, F_i , af elementæreffekter for hver parameter. Denne egenskab er i sin natur lokal, men da der foretages sammenligning mellem flere punkter indenfor parameterens variationsområde, afdækkes hele området, hvormed resultatet af metoden kan klassificeres som global.

Elementæreffekten for det i 'te input defineres som [Simlab, 2007; Morris, 1991]:

$$d_i(X) = \frac{y(x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, x_i + \Delta, x_{i+1}, \dots, x_k) - y(X)}{\Delta} \quad (\text{I.1})$$

hvor

- d_i = Elementæreffekt
- y = Modellens output
- x_i = En værdi i ω så længe, at det efterfølgende punkt stadig er indeholdt i ω
- Δ = Det forudbestemte spring i ω

Denne elementæreffekt (ligning (I.4)) anvendes efterfølgende til, at bestemme hver parameters vigtighed. Dette gøres ved at bestemme hhv. middelværdien og standardafvigelsen for hver parameters fordelingsfunktion af elementæreffekter, og beskrives yderligere senere i dette afsnit.

[Bendtsen og Sørensen, 2005; Saltelli et al., 2004; Morris, 1991]

Størrelsen af r

Det nødvendige antal simuleringer er direkte proportional med valget af r , hvorfor der må foretages en vægning, således resultatet er troværdigt samtidigt med at det er simuleringsmæssigt overkommeligt. I litteraturen er der angivet et spænd for r mellem $r = 3$ til $r = 10$ [H. og A., 2004]. Der er desuden tidligere, i forbindelse med kvantificering af usikkerhed i termisk bygningsmodellering, anvendt $r = 5$ og $r = 10$. Fra Joint Research Centre [2004] og Bendtsen og Sørensen [2005] er det anbefalet, at der anvendes $r = 10$ [Saltelli et al., 2004]. I dette projekt er det hermed ligeledes valgt at benytte $r = 10$ i følsomhedsanalysen.

Størrelsen af p

Størrelsen af den mulige ændring i parameterens variationsområde Δ er direkte proportional med valget af størrelsen p , som er antallet af punkter mellem hver ændring, bestemt ved $\Delta = \frac{p}{2(p-1)}$ - dvs. valget af en stor p giver mulighed for at afdække variationsområdet med mindre ændringer og derved større detaljeringsgrad. Derfor er det nødvendigt, at valget af r er tilsvarende stort, for at hver parameter simuleres med så mange ændringer, at der er overvejende sandsynlighed for at hele variationsområdet afdækkes ved den samlede analyse. En analyse med stor p og lille r vil ikke give mulighed, for at hele parameterens variationsområde afdækkes. Hvorimod et stort antal inddelinger af p -niveau-nettet samtidigt med et stort r , vil endvidere øge sandsynligheden for, at eventuel ulinearitet medtages i de beregnede elementæreffekter. Samlet set bør der således foretages nøje overvejelser ved valget af r og p . Det anbefales dog fra Joint Research Centre [2004], at der anvendes $p = 4$ og $r = 10$ i de fleste analyser [Saltelli et al., 2004]. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

Morris-metoden som en screeninganalyse

Morris-metoden bruges oftest som en screeninganalyse, der anvendes indledningsvist til at identificere de følsomme parametre i modeller med stor kompleksitet og sædvanligvis et stort antal parametre. Screeninganalysen er baseret på den empiriske antagelse af, at det oftest er forholdsvis få parametre, der giver stor variation i modellernes output [Saltelli et al., 2000; Campolongo et al., 1999; Macdonald, 2002]. En screeninganalyse kan benyttes til at identificere og rangere de vigtige parametre, men giver ingen information om hvor meget mere den enkelte parameter betyder i forhold til de andre. Dette anses dog ikke i nærværende sammenhæng som en ulempe, da det i dette projekts følsomhedsanalyse er langt mere interessant hvilke parametre der rangerer højest på listen, og dermed hvilke der kræver en mere specifik fastsættelse af variationsområde.

Generelt opnås det bedste resultat med en screeninganalyse, når antallet af vigtige parametre er lille i forhold til det totale antal parametre i modellen. Dette skyldes at formålet, som nævnt ovenfor, er at identificere og rangere de vigtigste. F.eks. er det væsentligt nemmere at rangere de 10% vigtigste parametre fremfor 90% i en model med et stort antal parametre. Med andre ord er metoden mere effektiv under antagelsen om, at det er relativt få vigtige parametre, mens den resterende størstedel ikke medfører en væsentlig forskel i resultatet (usikkerhed) [Saltelli et al., 2004]. Denne antagelse anses ikke i litteraturen som værende noget problem, da modeller i praksis ofte overholder dette [Saltelli et al., 2000, 2004].

Forbedring af Morris-metoden

Siden 1991, hvor den oprindelige Morris-metode blev præsenteret, er der foretaget flere udvidelser og optimeringer af metoden. Den første og mest kendte udvidelse/forbedring af metoden benævnes "den forbedrede Morris-metode" og er desuden beskrevet yderligere og mere detaljeret i Saltelli et al. [2004]. Af den oprindelige Morris-metode opnås en fordeling af elementæreffekten for hver parameter, hvorfra hhv. middelværdien, μ , og standardafvigelsen, σ , bestemmes og efterfølgende afbildes. Der kan således være en række parametre, der samlet set kan have en negativ middelværdi ved en summering. I nogle situationer vil det derfor være muligt, at elementæreffekterne kan udligne hinanden fra simulering til simulering, hvis middelværdien f.eks. er negativ i den ene simulering og positiv i den næste. I værste fald kan dette medføre, at der ved den efterfølgende rangering af modellens vigtigste parametre fejlagtigt negligeres en parameter, der er "vigtig", hvis effekt på modellens output svinger mellem positiv og negativ [Campolongo et al., 2004]. Problemet afhjælpes ved at be-

stemme en fordelingsfunktion, som i modsætning til den oprindelige fordeling, er middelværdien af den absolutte værdi af hver parameters elementæreffekt - størrelsen benævnes i flere litteraturer som μ^* [Campolongo et al., 2004; Saltelli et al., 2004].

Fortolkning af resultat

Elementæreffekten anvendes til at bestemme hver parameters vigtighed. Dette gøres i praksis ved at bestemme middelværdien og standardafvigelsen for hver parameters fordelingsfunktion ud fra elementæreffekterne:

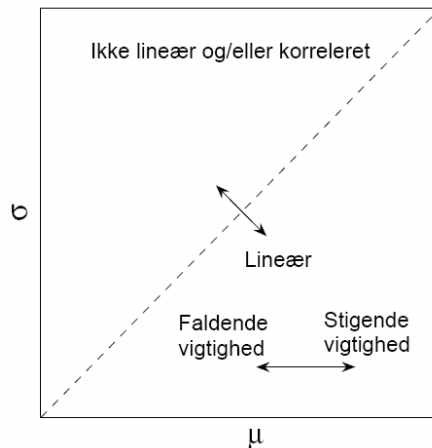
Middelværdien, μ ; Den enkelte parameters samlede bidrag til variation i modellens output [Saltelli et al., 2004]:

$$\mu = \sum_{i=1}^r d_i / r \quad (I.2)$$

Standardafvigelse, σ ; Den enkelte parameters bidrag til variation i modellens output som følge af korrelation (2.- og højere-ordens-effekter samlet i én størrelse) [Bendtsen og Sørensen, 2005; Saltelli et al., 2004]. Desuden kan parameterens eventuelle ulineære bidrag til variation i modellens output vurderes.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^r (d_i - \mu)^2 / r} \quad (I.3)$$

En stor middelværdi af en parameters elementæreffekter, F , indikerer, at parameteren er vigtig i hele dens variationsområde. Derimod indikerer en stor standardafvigelse i elementæreffekten, at parameterens vigtighed er afhængig af den værdi parameteren antager - dvs. en parameter der enten er korreleret med andre parametre eller har et ulineært bidrag til variationen i modellens output [Simonsen og Sørensen, 2007; Saltelli et al., 2000, 2004; Morris, 1991]. Disse to mål for hver parameters elementæreffekter, anvendes i analysen af resultatet, hvilket gøres ved at optegne σ som funktion af μ - se figur I.1. Figuren illustrerer, hvorledes middelværdien og standardafvigelsen optegnes og efterfølgende anvendes til at rangere de enkelte parametre efter deres betydning for modellens samlede usikkerhed. Resultatet er således en liste over modellens vigtigste parametre, hvor de parametre der ligger øverst på listen efterfølgende kan anvendes til at minimere modellens samlede usikkerhed ved at bestemme en mere passende parameterværdi med tilhørende fordelingsfunktion.



Figur I.1: Principtegning over resultatbehandling ud fra de beregnede middelværdier og standardafvigelse. Fra [Simonsen og Sørensen, 2007]

Et vejledende kriterie for grænsen mellem linearitet og ulinearitet/korrelation er illustreret med en linje, der udtrykkes ved:

$$2 \cdot SEM = 2 \cdot \left(\frac{\sigma}{\sqrt{r}} \right) \quad (I.4)$$

hvor

- SEM = Standard Error of Mean
- σ = Standardafvigelsen
- r = Antal orienteringsmatricer

Hvis parametrene har koordinater (μ_i, σ_i) under linjerne, er dette en indikation af, at parameterens middelværdi er vigtig for modellens samlede usikkerhed. Er parameterens koordinater over linjerne, er dette en indikation af, at parameterens effekt er ulinear og/eller er korreleret med andre parametre i dens variationsområde. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

Udfra ligning (I.4) ses det, at som antallet af r orienteringsmatricer øges, vil arealet mellem linjerne ligeledes blive større.

I.3 BESKRIVELSE AF USIKKERHEDSANALYSE

Usikkerhedsanalyser anvendes til at kvantificere en models samlede usikkerhed - dvs. at bestemme størrelsen og kilderne til den variation, der er i modellens resultat, hvormed pålideligheden af det simulerede resultat kan kvantificeres. Kort kan det opsummeres, at en usikkerhedsanalyse bestemmer information om en models samlede usikkerhed som følge af variation i modellens inputparametre. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

Når en bygningssimuleringsmodel er opbygget i et TBS-program (f.eks. BSim), kan det være en fordel at foretage en usikkerhedsanalyse før følsomhedsanalysen, da det derved kan undersøges om

følsomhedsanalysen er nødvendig. Dette kan f.eks. være tilfældet, hvis den samlede usikkerhed ikke overstiger det tilladelige opstillede niveau, og det derfor ikke vil være nødvendigt at foretage følsomhedsanalysen. [Macdonald, 2002; Bendtsen og Sørensen, 2005]

Det er i dette projekt valgt at benytte Monte Carlo-analysen (MCA) til at bestemme den samlede usikkerhed i en opstillet model. Monte Carlo-analysen er en fordelagtig metode ved bestemmelse af usikkerhed i matematiske modeller herunder termisk bygningssimulering.

I en MCA gennemføres der mange simuleringer af modellen med tilfældigt (randomiseret) valgte værdier indenfor inputparametrenes variationsområde. Det kræves derved, at alle de indgående parametre kan beskrives ved en fordelingsfunktion (se appendiks J). I metoden foretages der en udvælgelse af tilfældige kombinationer af inputparametrenes værdier, fra simulering til simulering, hvorefter der udføres et passende antal simuleringer. Fra Bendtsen og Sørensen [2005] fremgår det, at nøjagtigheden af resultaterne fra modellen ikke afhænger af antallet af parametre, men kun af antallet af simuleringer der udføres. Til at analysere resultaterne anvendes hhv. middelværdien og standardafvigelsen, som vist nedenfor: [Macdonald, 2002]

Middelværdien, \bar{Z} , bestemmes af:

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^R Z_i}{R} \quad (I.5)$$

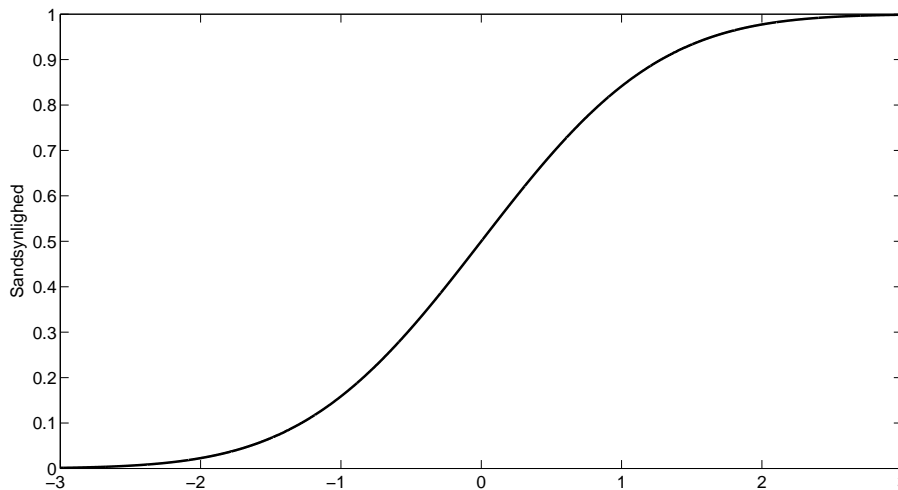
Standardafvigelsen, s , bestemmes af:

$$s = \sqrt{\frac{1}{R-1} \sum_{i=1}^R (Z_i - \bar{Z})^2} \quad (I.6)$$

hvor

- Z_i = Den simulerede værdi
- R = Antal simuleringer

Herudfra kan der efterfølgende optegnes en sandsynlighedskurve, hvoraf resultatet kan vurderes. Nedenstående figur I.2 viser en normalfordelt sandsynlighedskurve for middelværdi $\mu = 0$ og standardafvigelse $\sigma = 1$.



Figur 1.2: Eksempel på en kumuleret sandsynlighedskurve. $\mu = 0$ og $\sigma = 1$. Efter Bendtsen og Sørensen [2005]

I forbindelse med brugen af MCA som analyseværktøj til usikkerhedsanalysen, vil det være nødvendigt at foretage et stort antal simuleringer, før der opnås et tilstrækkeligt nøjagtigt resultat. For at minimere antallet af simuleringer, er det muligt at anvende en *stikprøveplan* som simplificerer processen ved at basere resultatet på en stikprøve. Til at udvælge værdierne fra de respektive fordelingsfunktioner, forefindes der flere forskellige *stikprøveplaner* f.eks. randomiseret, lagdelt, Latin Hypercube, etc. - disse er yderligere beskrevet i bl.a. Simlab [2007]; Bendtsen og Sørensen [2005] og kan alle vælges i Simlab. Det bør desuden overvejes inden valget af *stikprøveplan*, om der skal tages højde for korrelation eller ej. I litteraturen er der lavet flere undersøgelser af et resultats nøjagtighed for de enkelte stikprøveplaner, og det er på baggrund heraf, at det i denne rapport er valgt at arbejde videre med et *Randomiseret stikprøveplan*.

1.3.1 RANDOMISERET STIKPRØVEPLAN

I en randomiseret stikprøveplan³ vælges de enkelte værdier tilfældigt fra de respektive input-parametres fordelingsfunktioner og uafhængigt af den foregående stikprøve. Den første stikprøve foretages ved, at en tilfældig værdi fra hver parameter vælges. Den anden stikprøve laves uafhængigt af den foregående i valget af værdier fra fordelingsfunktionerne. Denne proces gennemføres indtil der er foretaget et tilstrækkeligt antal stikprøver til at parameterens variationsområde er dækket. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

Stikprøven kan beskrives ved følgende:

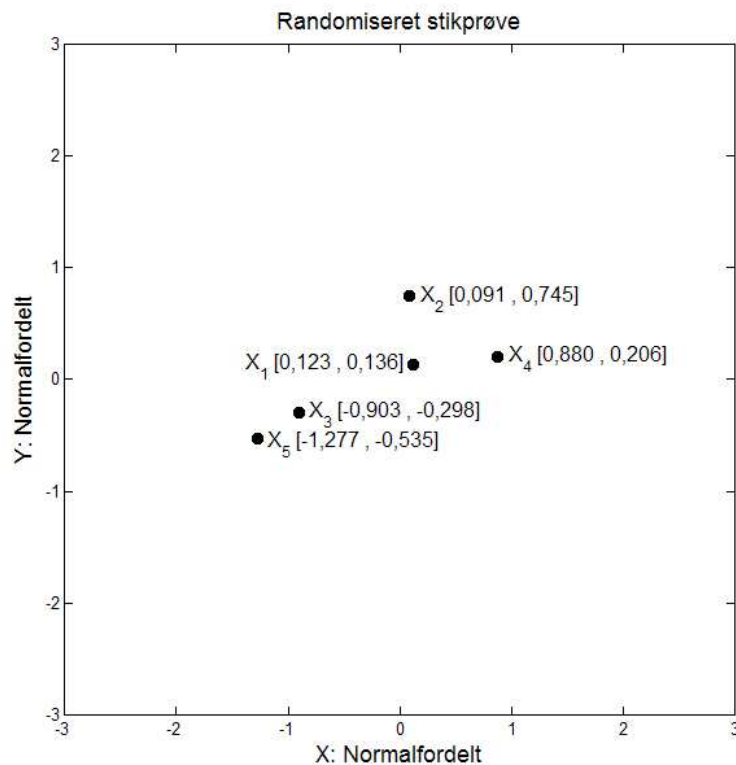
$$X_i = [x_{i,1}, \dots, x_{i,n}], \quad i = 1, \dots, m \quad (I.7)$$

hvor

³Simlab betegnelse: Random sample

- X_i = Stikprøve værdi
- n = Antallet af parametre
- m = Størrelsen af stikprøveplanen

På nedenstående figur I.4 er der vist et eksempel på en randomiseret stikprøveplan for to normalfordelte fordelingsfunktioner, $X = [U, V]$ og fem stikprøver, $m = 5$.

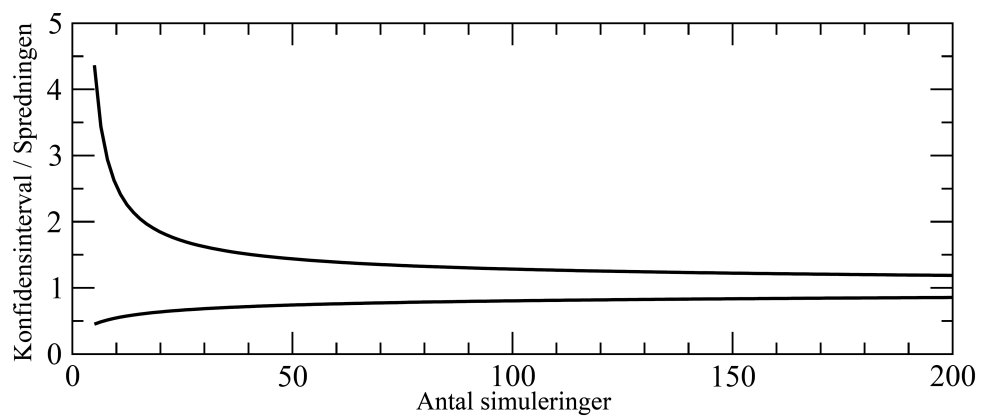


Figur I.3: Eksempel på Randomiseret stikprøveplan for to input-parametre, $X = [U, V]$ og $m = 5$. Hvor U og V er normalfordelte fordelingsfunktioner med $\mu = 0$ og $\sigma = 1$. Fra Bendtsen og Sørensen [2005]

Når simuleringerne er udført med alle de genererede stikprøver, beregnes μ og σ ved hhv. formel (I.5) og formel (I.7). Fordelen ved denne stikprøveplan er, at den giver en middelværdi og standardafvigelse, der ikke er påvirket af måden hvorpå parameterværdierne udvælges - stikprøveplanen refereres ligeledes til som en "pseudo-random" metode i litteraturen [Simlab, 2007]. Ulempen er, at stikprøveplanen kan blive uhensigtsmæssigt stor, hvilket skyldes ønsket om at dække alle parametres variationsområder. Et overslag på den nødvendige størrelse af stikprøveplanen er 60 til 80, men afhængig af modellen. Ved flere simuleringer sker der kun marginale forbedringer [Macdonald, 2002]. Fra Simlab [2007] er det dog foreslået at f.eks. benytte 10 gange antallet af parametre, som størrelsen af stikprøveplaner. [Bendtsen og Sørensen, 2005]

På figur I.4 ses det normaliserede konfidensinterval af standardafvigelsen som funktion af antallet af

simuleringer. Det ses, at efter 60 til 80 simuleringer sker der kun marginale forbedringer.



Figur I.4: Det normaliserede konfidensinterval af standardafvigelsen som funktion af antallet af simuleringer. [Macdonald, 2002]

I følgende afsnit præsenteres kort de fordelingsfunktioner, der senere anvendes til at beskrive de indgående stokastiske parametre i BSim modellen og Eco-factoren. Inputparametrene og beskrivelsen af disse er vist i det efterfølgende appendiks K.

J.1 ANVENDTE FORDELINGSFUNKTIONER

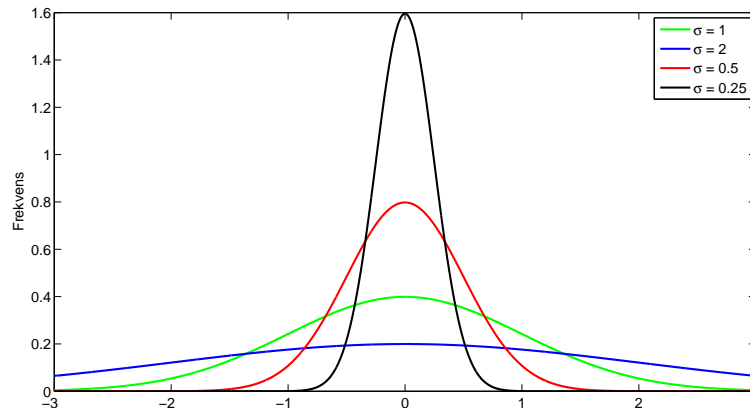
Ved en følsomhedsanalyse og en usikkerhedsanalyse anvendes fordelingsfunktioner til at beskrive parametrenes betydning for modellens output. I det følgende præsenteres kort tre typer fordelingsfunktioner som anvendes ved de senere analyser (appendiks K). Ved at anvende en fordelingsfunktion, kan variationen af en parameter beskrives ved at angive den mindst mulige og størst mulige værdi parameteren kan antage samt evt. middelværdi og standardafvigelse. Problemstillingen afgrænses ved valget af den pågældende parameters trunkeering, hvor minimum og maksimum skal ligge i det fysisk mulige variationsområde - dvs. parameterens fordelingsfunktion afgrænses af den "fysiske" minimums- og maksimumsværdi (beskrevet under de enkelte afsnit).

I dette projekt er de følgende tre fordelingsfunktioner anvendt i den stokastiske analyse:

- Normalfordeling
- Log-normalfordeling
- Ligefordeling

J.1.1 NORMALFORDELING

Normalfordelingen, kaldet $N(\mu, \sigma)$, anvendes i mange statistiske sammenhænge grundet den simple form og brede anvendelighed. Fordelingen er normalt beskrevet ved den velkendte "klokkeformede" kurve som vist på nedenstående figur J.1. Parameteren μ er middelværdien for fordelingen, og kurven er fuldstændig symmetrisk herom. Den anden parameter σ er spredningen.



Figur J.1: Illustration af en normalfordeling med en middelværdi på 0 og varierende standardafvigelser.

Normalfordelingen for en parameter X er givet ved følgende ligning J.1 [Ayyub og McCuen, 1997]:

$$f(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{x - \mu}{\sigma}\right]^2\right) \quad -\infty < x < \infty \quad (\text{J.1})$$

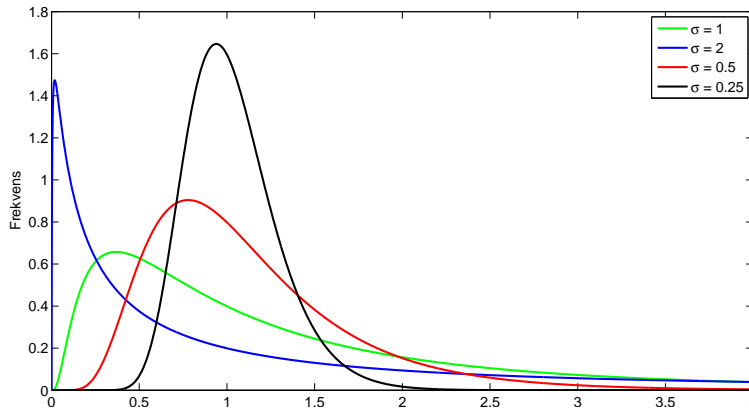
Normalfordelingen har følgende egenskaber:

- $f(\mu, \sigma)$ nærmer sig nul som x nærmer sig enten $-\infty$ eller $+\infty$.
- $f(a + \mu) = f(-a + \mu)$ for alle a - dvs. symmetrisk tæthedsfunktion omkring middelværdi μ .
- Vendetangent er $x = \mu \pm \sigma$.
- Tæthedsfunktion her en klokkeform
- Middelværdien μ og spredningen σ er også parametre i selve funktionen.

Som tommelfingerregel kan man benytte, at ca. 65% af observationerne fra en normalfordeling falder i intervallet $\bar{x} \pm \sigma$, ca. 95% af observationerne falder i intervallet $\bar{x} \pm 2 \cdot \sigma$, mens ca. 99% af observationerne falder i intervallet $\bar{x} \pm 3 \cdot \sigma$.

J.1.2 LOG-NORMALFORDELING

Normal- og log-normalfordelingen er tæt relaterede. Den mest markante forskel er, at den variable af x afbildes natur-logaritmisk. Herved afgrænses fordelingen til kun at benyttes positive variable af x , se figur J.2.



Figur J.2: Illustration af en log-normalfordeling med en middelværdi på 0 og forskellige standardafvigelser.

Log-normalfordelingen er givet ved nedenstående ligning J.2 [Ayyub og McCuen, 1997]:

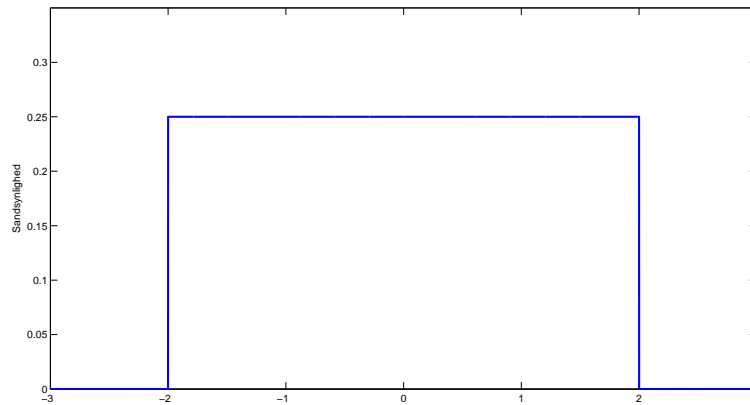
$$f(\mu, \sigma) = \frac{1}{x \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma}\right]^2\right) \quad 0 < x < \infty \quad (\text{J.2})$$

Log-normalfordelingen har følgende egenskaber:

- Værdien af $f(\mu, \sigma)$ er positiv - dvs. $x > 0$.
- $f(\mu, \sigma)$ er *ikke* en symmetrisk tæthedsfunktion omkring middelværdien μ .

J.1.3 LIGEFORDELING

Ligefordelingen anvendes ofte hvis fordelingen ikke er kendt eller at sandsynligheden i få punkter er kendt. For den kontinuerte ligefordeling er det kun nødvendigt at kende maksimum og minimum samt vægtningen af de enkelte intervaller.



Figur J.3: Illustration af en ligefordeling med en minimum og maksimum værdi.

Tæthedsfunktionen for den lige fordeling af en parameter X er givet ved [Ayyub og McCuen, 1997]:

$$f(X) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{for } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{ellers} \end{cases} \quad (\text{J.3})$$

Parametrene a og b er de reelle værdier for hhv. minimum og maksimum - givet $a < b$. Tæthedsfunktionen antager den konstante værdi $\frac{1}{b-a}$, hvorved arealet under kurven er lig 1. Middelværdien og variansen er givet ved:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{a+b}{2} \\ \sigma^2 &= \frac{(b-a)^2}{12} \end{aligned} \quad (\text{J.4})$$

Fordelingsfunktioner for parametre til følsomheds- og usikkerhedsanalyse

K

Følgende afsnit beskriver kort de parametre der ønskes undersøgt i en følsomheds- og usikkerhedsanalyse for den udvalgte bygning - Københavns Energi A/S. Der er således foretaget en beskrivelse af parametrenes valgte fordelingsfunktioner og den dertil hørende middelværdi og spredning samt afgrænsningerne ved maksimum og minimum. De fundne resultater og fordelingsfunktioner bruges som input i simuleringsprogrammet Simlab [Simlab, 2007].

Værdier og beregninger af nedenstående fordelingsfunktioner er oplyst af hhv. Københavns Energi (hovedsageligt ejendomsinspektøren¹), WindowMaster samt den udfærdigede indeklimarapport² af Aalborg Universitet.

K.1 KØBENHAVNS ENERGI

K.1.1 BSIM PARAMETER

U-værdi for væg

Fordelingsfunktion: Normalfordeling

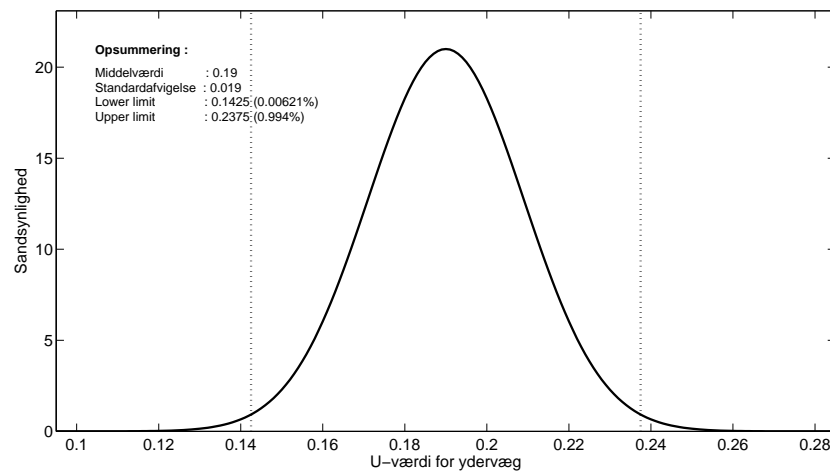
Middelværdi: $0,19 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Standardafvigelse: $0,019 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Afgrænsninger (min / max): $0,1425 / 0,2375 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

¹Udvalgte korrespondancer forefindes i appendiks L.2

²[Larsen et al., 2006]



Figur K.1: Fordelingsfunktion for U-værdi på ydervæg.

Ydervæggens U-værdi er beregnet til $0,19 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ på baggrund af det udleverede tegningsmateriale samt oplysninger fra Københavns Energi (KE). Standardafvigelsen er vurderet til 10% af middelværdien bl.a. ud fra Holck og Rode [2004] og Bendtsen og Sørensen [2005]. Fra en undersøgelse af ydervægges isoleringsevne, Holck og Rode [2004], har det vist sig at U-værdien kan være forringet helt op til 50% i forhold til den beregnede. Det er dog i vores situation skønnet, at U-værdien kun varierer med 25% omkring middelværdien, da ydervæggene er sandwichelementer og de må dermed forventes at have en mere ens U-værdi.

Fordelingsfunktionen er desuden vurderet til bedst at kunne beskrives som en normalfordeling, da der vil være størst sandsynlighed for at væggen har en middel U-værdi på $0,19 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ og herudfra varierer ligeligt til begge sider.

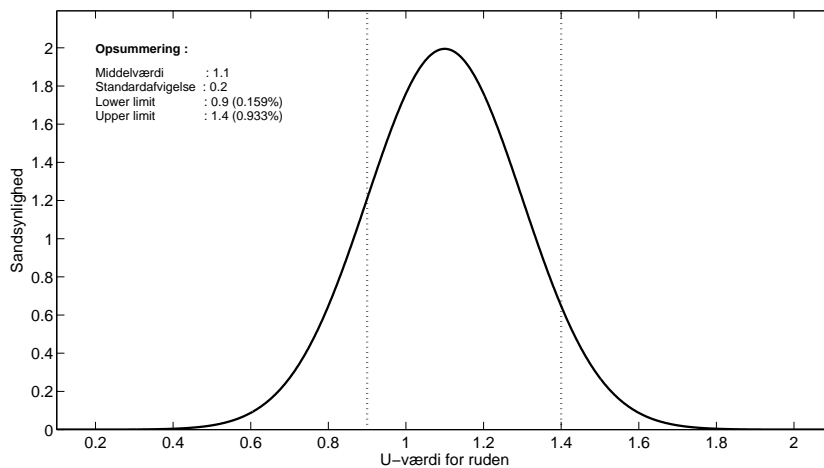
U-værdi for ruden i vinduet

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: $1,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Standardafvigelse: $0,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$

Afgrænsninger (min / max): $0,9 / 1,4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$



Figur K.2: Fordelingsfunktion for U-værdi på rude.

Rudens U-værdi i vinduet er oplyst af den rådgivende ingeniør og Københavns Energi (KE) til $1,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Den isatte rude er af typen Scanglas COOL-LITE SKN 172 med en 90% krypton blanding. Standardafvigelsen er vurderet til $0,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ ud fra egne erfaringer om et muligt variationsområde for en rude. Minimum- og maksimumværdierne er fastsat ud fra eget skøn af en minimal og maksimal U-værdi for en rude samt en vurdering af hvilke andre typer af vinduer KE kunne have sat i bygningen. Fordelingen er vurderet til bedst at kunne beskrives ved en normalfordeling.

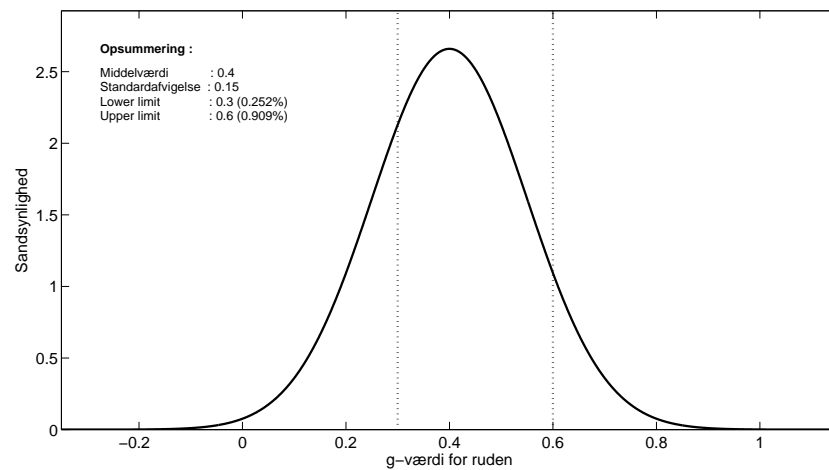
g-værdi for ruden

Fordelingsfunktion: *Log-normalfordeling (Normalfordeling)*

Middelværdi: 0,4

Standardafvigelse: 0,1

Afgrænsninger (min / max): 0,3 / 0,6



Figur K.3: Fordelingsfunktion for g-værdi på rude.

Rudens g-værdi i vinduet er ligeledes oplyst af den rådgivende ingeniør og Københavns Energi (KE) til 0,4. Standardafvigelsen er vurderet til $0,15 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ ud fra egne erfaringer om et muligt variationsområde for en rude. Minimum- og maksimumværdierne er fastsat ud fra eget skøn omkring en min. og maks. g-værdi for en rude og en vurdering af hvilken andre typer af vinduer KE kunne have sat i bygningen. Desuden er en maksimum g-værdi på 0,6 en "normal" værdi for en rude, der sættes i danske bygninger.

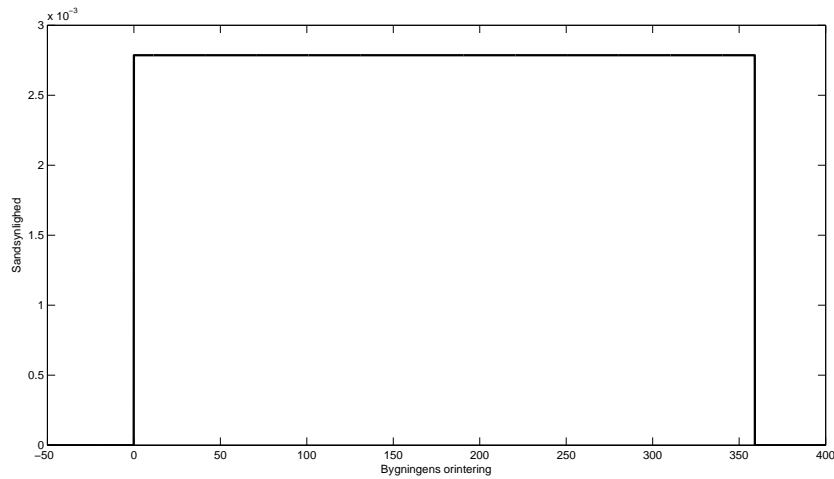
Fordelingsfunktionen er lavet som en normalfordeling, men ud fra afgrænsningerne omdannet til en log-normalfordeling. Dette er gjort på baggrund af, at sandsynligheden for en lav g-værdi vil være noget større idet bygningen er naturligt ventileret, og solbelastningen kan/vil være en hindring for et godt termisk indeklima i sommermånedene.

Bygningens orientering

Fordelingsfunktion: *Ligefordeling*

Minimum: 180°

Maksimum: 360°



Figur K.4: Fordelingsfunktion for bygningens orientering

Det er et ønske at undersøge indflydelsen af bygningens orientering på ydeevnen. Den oprindelige bygning er roteret 281° i forhold til nord. Fordelingsfunktionen er valgt som en ligefordeling, da alle orienteringer dermed har lige stor mulighed for at forekomme.

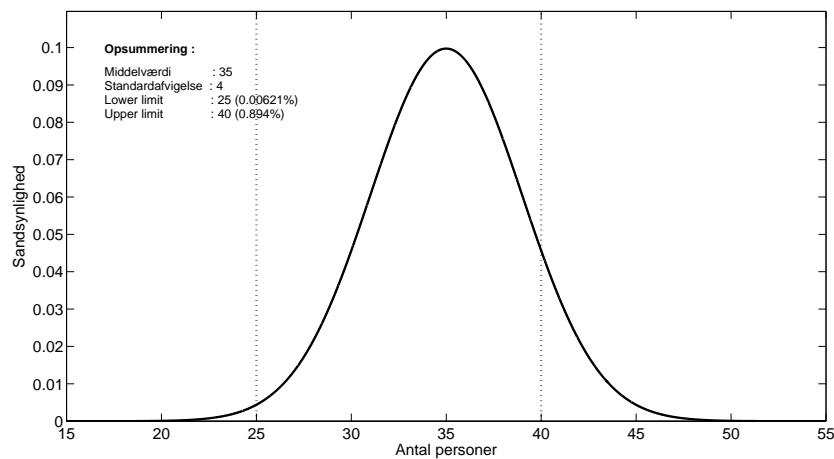
Antal personer

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: 35 pers.

Standardafvigelse: 4 pers.

Afgrænsninger (min / max): 25 / 40 pers.



Figur K.5: Fordelingsfunktion for antal personer i kontoret

Antallet af gennemsnits-personer i det beregnede rum i bygningen er vurderet ud fra oplysninger fra KE, indretningsplaner og indeklimateundersøgelsen af Larsen et al. [2006] samt registreringer. I indeklimateundersøgelsen af Københavns Energi blev der i en periode registreret antallet af personer i bygningen, hvor resultaterne herfra er vist i nedenstående skema:

Tabel K.1: Registreret antal personer i bygningen for de forskellige etager. [Larsen et al., 2006]

Tid	Stuen	1. sal	2. sal	3. sal	4. sal	Total
10:05	8	73	76	108	72	337
11:00	6	82	81	93	70	332
11:50	16	69	71	65	60	281
12:45	10	73	72	73	43	271
14:45	6	70	88	112	61	337
Areal [m ²]	343	1114,76	1114,76	1114,76	910,66	4597,94

Af ovenstående tabel K.1 vil det efterfølgende være muligt at skønne et antal personer i det betragtede/udvalgte kontorafsnit på 2. sal mod øst (491m²) det er valgt at regne på. Til beregning af antal personer i kontorafsnittet er det valgt kun at se på 1.-3. sal, da disse tre etager hovedsageligt er kontorer og iøvrigt meget ens indrettet. Beregningen for antallet af personer i det valgte kontorafsnit er vist i nedenstående tabel K.2:

Tabel K.2: Beregning af antallet af personer i det udvalgte kontorafsnit. Kontorafsnittets etageareal er beregnet til 491 m².

Tid	Antal pers. 1-3 etage	Antal m ²	Pers./m ²	m ² /pers.	Pers. i kontorafsnit
10:05	257	3344,28	0,08	13,01	38
11:00	256	3344,28	0,08	13,06	38
11:50	205	3344,28	0,06	16,31	30
12:45	218	3344,28	0,07	15,34	32
14:45	270	3344,28	0,08	12,39	40
Middelværdi	241	3344,28	0,07	14,02	35
Standardafvigelse					4

I tabel K.2 er der beregnet et gennemsnitligt antal personer i kontorafsnittet på 35 personer med en spredning på 4 personer. Dette stemmer iøvrigt godt overens med oplysninger fra Københavns Energi og WindowMaster. Maksimum og minimum antal personer i kontorafsnittet er skønnet til 40 personer ud fra indretningsplaner samt oplysninger fra KE.

For fordelingsfunktionen kan bedst beskrives ved en normalfordeling, da der vil være størst sandsynlighed for at middelværdien forekommer og herefter aftagende sandsynlighed ved en afvigelse fra

middelværdien.

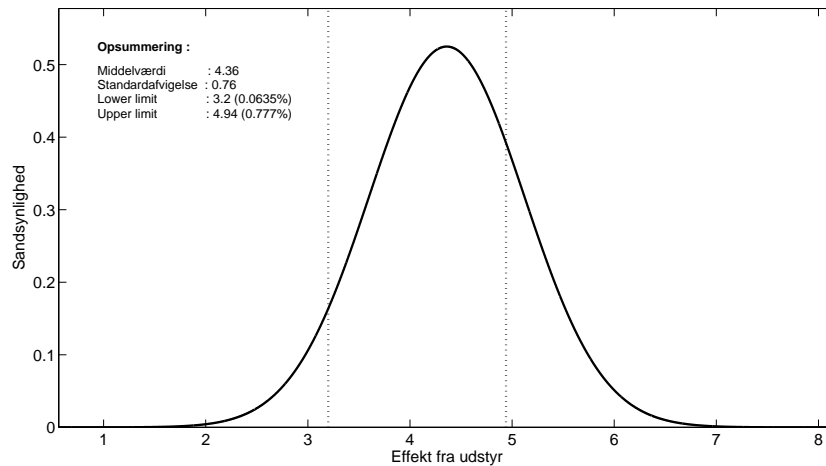
Udstyr (computer, skærm, printer, m.m)

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: 4,36 kW

Standardafvigelse: 0,76 kW

Afgrænsninger (min / max): 3,2 / 4,94 kW



Figur K.6: Fordelingsfunktion for effekten fra udstyret i kontoret.

Antallet af tændte computere, skærme, printere, etc. vil være proportional med antallet af personer i kontoret. Den afgivende varmeeffekt fra udstyret er fundet ud fra metoden i Andersen et al. [2002] samt oplysninger fra KE. Det er oplyst af KE, at computerne afgiver 100 W/stk og at 60% af skærmene er af den gamle type CRT (afgiver 100 W/stk) og de sidste 40% er af den nyere type LCD (afgiver 40 W/stk). Antallet af printere (afgiver 150 W/stk) er skønnet til 2 stk. ud fra indretningsplanerne fra KE. Nedenfor viste tabel K.3 opsummerer beregningen af den afgivne varmeeffekt til kontoret.

Table K.3: Beregning af afgivet varmeeffekt til kontoret i forhold til antal personer. Effekten er vurderet ud fra Andersen et al. [2002] samt oplysninger fra KE.

		Maksimum	Minimum	Middelværdi	Spredning
Antal computere	stk.	40	25	35	4
Effekt, computer	W/stk.	40	40	40	40
Antal CRT-skærme (60%)	stk.	24	15	21	2,5
Effekt, CRT-skærm	W/stk.	100	100	100	100
Antal LCD-skærme (40%)	stk.	16	10	14	1,6
Effekt, LCD-skærm	W/stk.	40	40	40	40
Antal printere	stk.	2	2	2	2
Effekt, printer	W/stk.	150	150	150	150
Samlet varmeeffekt	kW	4,94	3,2	4,36	0,78

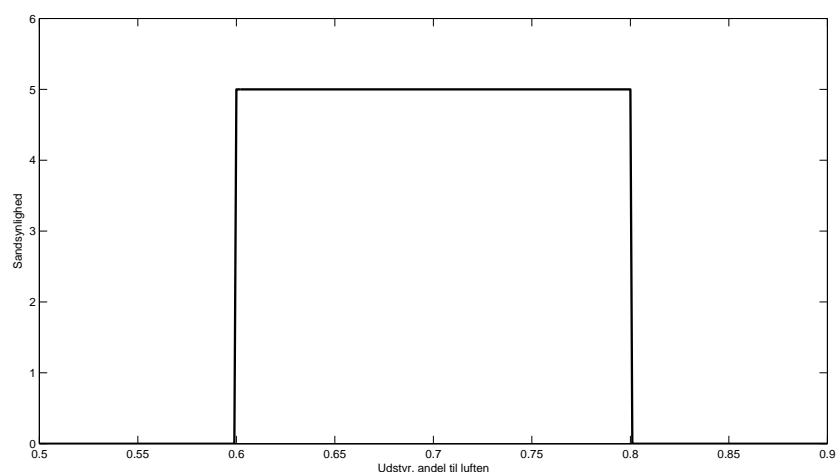
Ligeledes her er det vurderet, at fordelingen bedst beskrives med en normalfordeling med de angivne afgrænsninger som vist ovenfor (maksimum og minimum).

Udstyr - andel til luften

Fordelingsfunktion: *Ligefordeling*

Minimum: 0,6

Maksimum: 0,8



Figur K.7: Fordelingsfunktion for hvor meget af den afgivne varmeeffekt, der går til luften.

Variationen af den afgivne varme der går til luften ønskes ligeledes undersøgt. Det er oplyst i Macdonald [2002, s. 110], at andelen af den afgivne varme ligger i intervallet 60% til 80% for normalt kontorudstyr.

Det er således valgt at beskrive variationen som en ligefordeling, da der vil være lige stor sandsynlighed for at minimum som maksimum kan forekomme.

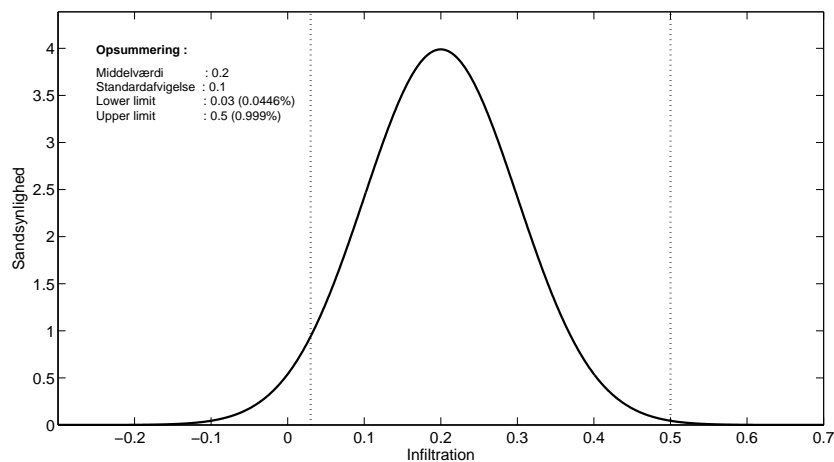
Infiltration

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: $0,2 \text{ h}^{-1}$

Standardafvigelse: $0,1 \text{ h}^{-1}$

Afgrænsninger (min / max): $0,03 / 0,5 \text{ h}^{-1}$



Figur K.8: Fordelingsfunktion for infiltration i bygningen.

Middelværdien er vurderet ud fra indeklimaundersøgelsens resultater [Larsen et al., 2006]. Standardafvigelsen er sat til 50% af middelværdien, da dette er fundet som en god værdi i Macdonald [2002, s. 111]. Maksimum er ligeledes fastsat ud fra resultater fra Macdonald [2002] og er sat til 2,5 gange middelværdien. Minimum er vurderet ud fra skøn af en sandsynlig størrelse.

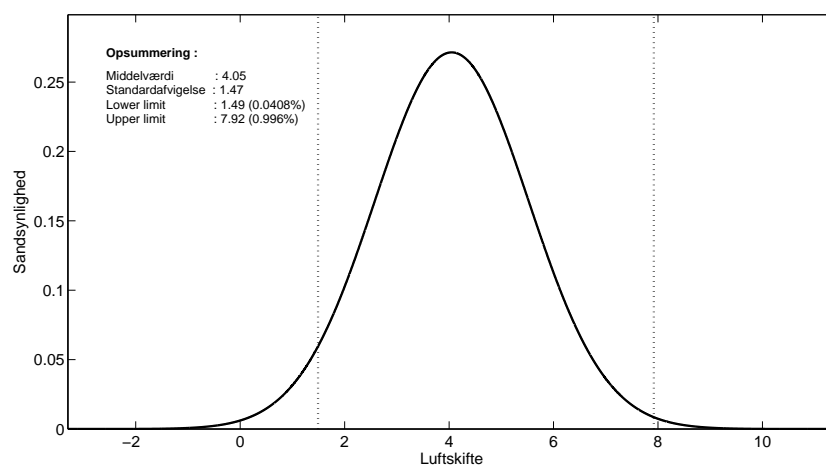
Naturlig Ventilation

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: $3,71 \text{ h}^{-1}$

Standardafvigelse: $0,37 \text{ h}^{-1}$

Afgrænsninger (min / max): $0,79 / 5,18 \text{ h}^{-1}$



Figur K.9: Fordelingsfunktion for luftskiftet ved den naturlige ventilation i bygningen.

I indeklimaundersøgelsen, lavet af Aalborg Universitet (Larsen et al. [2006]) blev der lavet målinger af CO₂-koncentrationen i bygningen over en periode på et år (juli 2005 til juni 2006). Disse målinger er brugt til at estimere det gennemsnitlige luftskifte i bygningen. Målingerne viste en middelmiddelt koncentration på ca. 450 ppm, hvilket sammen med en koncentration i udeluften på 340 ppm og et gennemsnitligt personantal på 35 giver den beregnede middelværdi som vist ovenfor. Lignende beregninger er foretaget for standardafvigelsen, minimum og maksimum-værdierne. Fordelingsfunktionen er vurderet til bedst at kunne beskrives ved en normalfordeling.

K.1.2 ECO-FACTOR PARAMETER

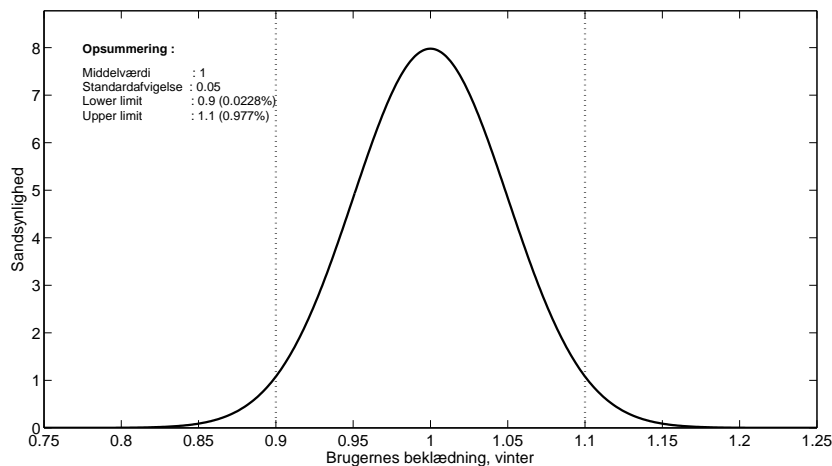
Beklædningsisolans - vinter

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: *1,0 met*

Standardafvigelse: *0,05 met*

Afgrænsninger (min / max): *0,9 / 1,1 met*



Figur K.10: Fordelingsfunktion for personernes beklædningsisolans i vinterperioden.

Vurderingen af en gennemsnitlig beklædningsisolans for personerne i bygningen er skønnet ud fra DS/EN ISO 7730 [2006] og egne vurderinger. Minimum og maksimum er ligeledes valgt ud fra vurderinger af, hvor meget beklædningen hos personerne kan variere for den betragtede periode.

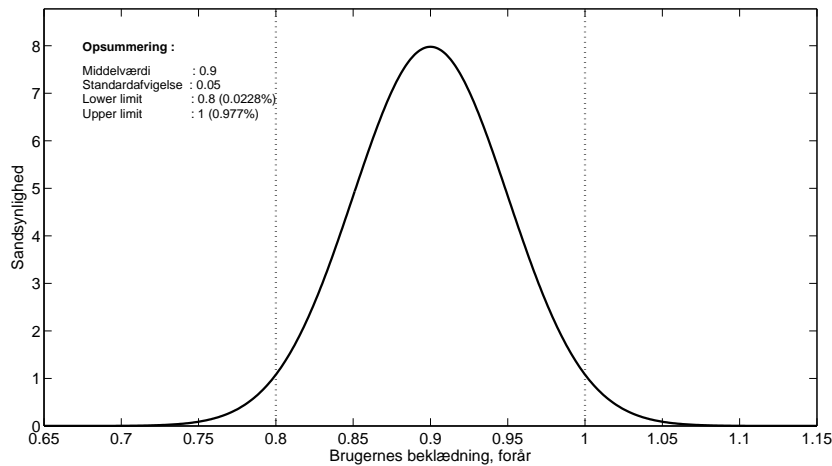
Beklædningsisolans - forår

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: 0,9 met

Standardafvigelse: 0,05 met

Afgrænsninger (min / max): 0,8 / 1,0 met



Figur K.11: Fordelingsfunktion for personernes beklædningsisolans i forårsperioden.

Vurderingen af en gennemsnitlig beklædningsisolans for personerne i bygningen er skønnet ud fra

DS/EN ISO 7730 [2006] og egne vurderinger. Minimum og maksimum er ligeledes valgt ud fra vurderinger af, hvor meget beklædningen hos personerne kan variere for den betragtede periode.

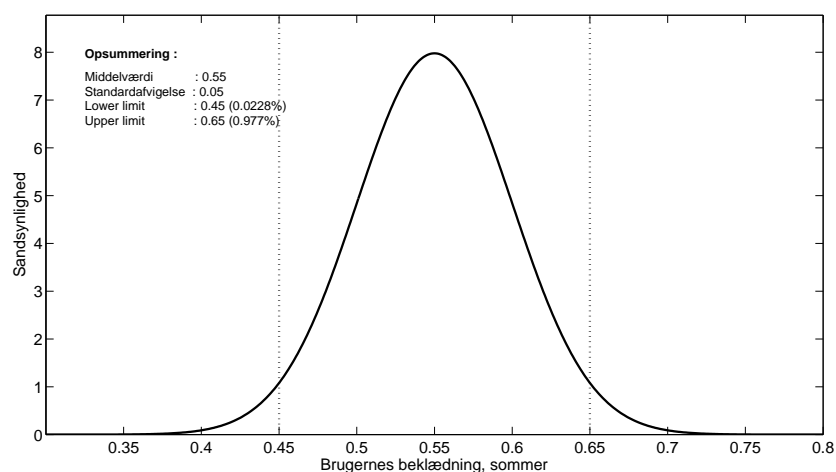
Beklædningsisolans - sommer

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: *0,55 met*

Standardafvigelse: *0,05 met*

Afgrænsninger (min / max): *0,45 / 0,65 met*



Figur K.12: Fordelingsfunktion for personernes beklædningsisolans i sommerperioden.

Vurderingen af en gennemsnitlig beklædningsisolans for personerne i bygningen er skønnet ud fra DS/EN ISO 7730 [2006] og egne vurderinger. Minimum og maksimum er ligeledes valgt ud fra vurderinger af, hvor meget beklædningen hos personerne kan variere for den betragtede periode.

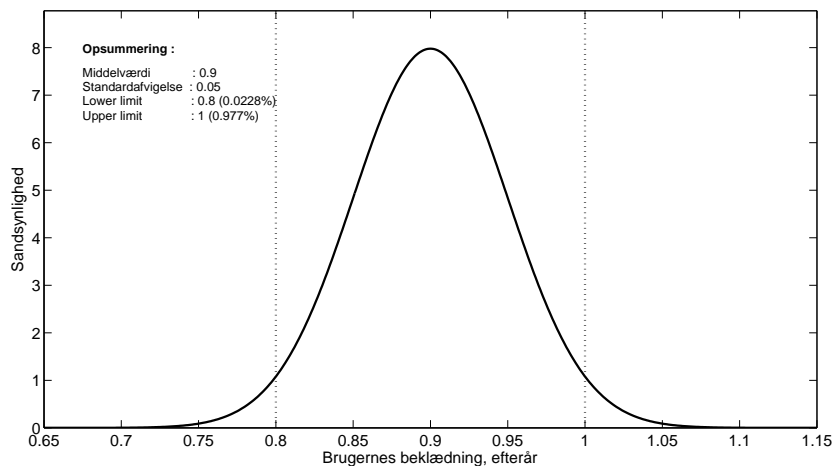
Beklædningsisolans - efterår

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: *0,9 met*

Standardafvigelse: *0,05 met*

Afgrænsninger (min / max): *0,8 / 1,0 met*



Figur K.13: Fordelingsfunktion for personernes beklædningsisolans i efterårsperioden.

Vurderingen af en gennemsnitlig beklædningsisolans for personerne i bygningen er skønnet ud fra DS/EN ISO 7730 [2006] og egne vurderinger. Minimum og maksimum er ligeledes valgt ud fra vurderinger af, hvor meget beklædningen hos personerne kan variere for den betragtede periode.

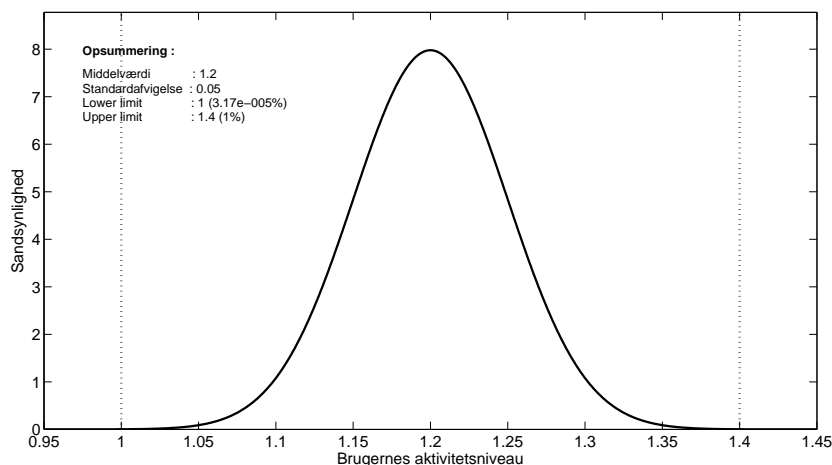
Aktivitetsniveau

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: *1,2 met*

Standardafvigelse: *0,05 met*

Afgrænsninger (min / max): *1,1 / 1,3 met*



Figur K.14: Fordelingsfunktion for personernes aktivitetsniveau under normalt kontorarbejde.

Personers metabolisme ligger for normalt kontorarbejde omkring 1,2 met, hvilket ligeledes er vurderet i den pågældende bygning. Der vil dog være situationer hvor kontorarbejdet vil medføre lidt højere aktivitetsniveau - gående (1,3 met) - samt situationer hvor det vil være et arbejde af mindre fysisk grad (1,1 met).

Det er ligeledes her vurderet, at fordelingen bedst beskrives ved en normalfordeling, da der vil være størst sandsynlighed for at middelværdien vil forekomme og herefter aftagende sandsynlighed for minimum og maksimum-værdierne.

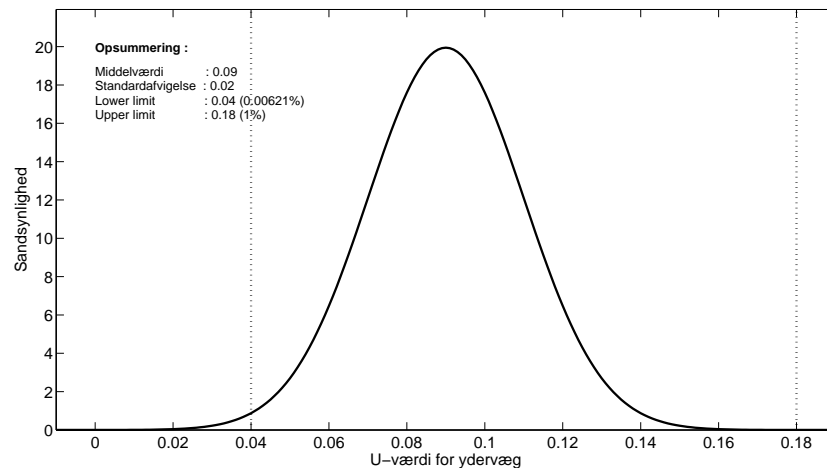
Middellufthastighed

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: 0,15 m/s

Standardafvigelse: 0,05 m/s

Afgrænsninger (min / max): 0,12 / 0,30 m/s



Figur K.15: Fordelingsfunktion for middellufthastigheden i det simulerede rum i Københavns Energi

Middellufthastighederne i bygningen er først og fremmest vurderet ud fra lufthastigheder der forekommer i en "normal" bygning, som oftest vurderes til 0,15 m/s. Det er dog vurderet her, at der vil kunne opleves højere middellufthastigheder, da bygningen er naturligt ventileret. Ud fra denne antagelse, samt de målinger der er blevet foretaget af middellufthastigheden i opholdszonen i bygningen, er maksimum- og minimum-værdien estimeret [Larsen et al., 2006]. Ydermere er der i indeklimateundersøgelsen (Larsen et al. [2006]) blevet foretaget en spørgeskemaundersøgelse, som ligeledes viser at personerne har været udsat for træk og dermed høje middellufthastigheder.

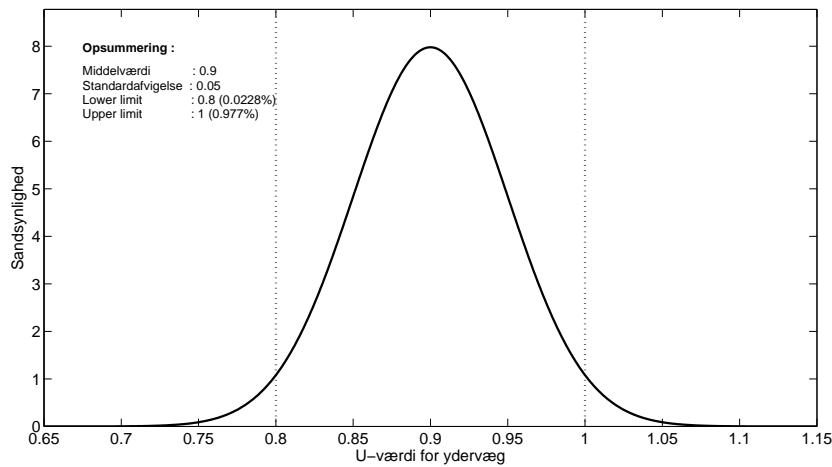
Forventningsfaktoren

Fordelingsfunktion: *Normalfordeling*

Middelværdi: 0,9

Standardafvigelse: 0,05

Afgrænsninger (min / max): 0,8 / 1,0



Figur K.16: Fordelingsfunktion for forventningsfaktoren ved beregning efter PMV_e .

Forventningsfaktoren har betydning for, hvordan personer i bygningen vurderer det termiske indeklima. Det har i den seneste forskning vist sig, at personer i en naturlig ventileret bygning oplever indeklimaet bedre end PMV-indekset forudsår/angiver. Det er dermed muligt at tage højde for dette ved en forventningsfaktor som ganges på PMV-indekset (nærmere beskrevet i afsnit 4.1.3).

Forventningsfaktoren kan variere mellem 0,6 - 1,0 alt efter hvilket klima der regnes på. I Danmark må det forventes, at faktoren ikke kan blive lavere end 0,8, da vores sommerperioder er forholdsvis korte og de omkringliggende bygninger ikke kun er naturligt ventileret, men oftest også mekanisk luftkonditioneret og kølet.

Korrespondancer

L

Dette appendiks indeholder udvalgte e-mail-korrespondancer samt telefonnotater foretaget i forbindelse med nærværende projekt. De følgende afsnit er separate korrespondancer/notater.

L.1 TELEFONNOTATER

L.1.1 YORK / JOHNSON CONTROLS

Kontaktperson: Claus Monrad

Stilling: Tekniker

Telefon: 87 36 31 00

Mobil: 29 22 77 27

Vedr.: Bestemmelse af praktisk effektfaktor for køleanlæg som funktion af driftspunkt.

Notat:

Bestemmelse af praktisk effektfaktor som funktion af driftspunkt er nemmest gennem brug af, at forholdet mellem den praktiske og teoretiske COP (betegnet Carnot-virkningsgraden) er konstant givet ved:

$$n_c = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} \quad (\text{L.1})$$

hvor

n_c	=	Carnot-virkningsgraden	[-]
ϵ_p	=	Praktisk effektfaktor (COP)	[-]
ϵ_c	=	Carnot-effektfaktor	[-]

Carnot-virkningsgraden er konstant. Ved bestemmelse af den praktiske effektfaktor (ϵ_p) samt Carnot-effektfaktoren for et givet driftspunkt, kan Carnot-virkningsgraden (n_c) bestemmes. Denne er konstant, hvorefter der for et hvilket som helst driftspunkt kan bestemmes en praktisk effektfaktor efter beregning af Carnot-effektfaktoren. Den praktiske effektfaktor og Carnot-effektfaktoren bestemmes af formlerne (L.2) og (L.3).

$$\epsilon_p = \frac{Q_{brutto}}{W_{brutto}} \quad (\text{L.2})$$

$$\epsilon_c = \frac{T_o}{T_c - T_o} \quad (\text{L.3})$$

hvor

Q_{brutto}	=	Køleaggregatets bruttokøleydelse	[kW]
W_{brutto}	=	Sum af kompressorens optagne effekt og samtlige effekter til hjælpeudstyr	[kW]
T_o	=	Fordampningstemperaturen	[K]
T_c	=	Kondenseringstemperaturen	[K]

Eksempelberegning af praktisk effektfaktor for køleanlæg

Følgende beregning viser et eksempel på dynamisk beregning af den nødvendige køleydelse ved varierende driftsforhold.

I følgende beregning er der forudsat et køleanlæg med følgende specifikationer:

Fabrikat:	RC GROUP
Model:	EASY.ELN (double circuit)
Kølekapacitet:	160,9 kW
El-forbrug:	59,9 kW
<i>Betingelser/driftsforhold for ovenstående forbrug:</i>	
Fordampertemperatur (frem/retur):	12/7°C (285/280 K)
Kondensortemperatur:	35°C (308 K)

På baggrund af ovenstående forudsætninger beregnes den teoretisk maksimale opnåelige effektfaktor, carnot-effektfaktoren¹:

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \frac{T_o}{T_c - T_o} & (\text{L.4}) \\ &= \frac{\frac{285+280}{2}}{308 - \frac{285+280}{2}} \\ &= \frac{282,5}{308 - 282,5} \\ &= 11,08 \end{aligned}$$

¹Fordampertemperatur beregnet som gennemsnit af frem og retur.

Ved de ovenfor angivne driftsforhold er den praktiske effektfaktor (COP) beregnet til:

$$\begin{aligned}\epsilon_p &= \frac{Q_{brutto}}{W_{brutto}} & (L.5) \\ &= \frac{160,9}{59,9} \\ &= 2,69\end{aligned}$$

Endelig bestemmes carnot-virkningsgraden:

$$\begin{aligned}n_c &= \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c} & (L.6) \\ &= \frac{2,69}{11,08} \\ &= 0,24\end{aligned}$$

For varierende driftsforhold er carnot-virkningsgraden, n_c , forholdsvis konstant. Således kan den praktiske effektfaktor beregnes ved varierende driftsforhold ved brug af ligning (L.6). Følgende tabel viser beregnede praktiske effektfaktorer for varierende udelufttemperaturer (kondensatortemperaturer).

Tabel L.1: Praktiske effektfaktorer for varierende driftsforhold.

Udelufttemperatur/ kondensatortemperatur	Fordampertemperatur	Carnot-effektfaktor	Praktisk effektfaktor ($\epsilon_c \cdot n_c$)
T_o [°C]/[K]	T_c [°C]/[K]	ϵ_c [–]	ϵ_p [–]
20/293	9,5/282,5	26,9	6,52
22/295	9,5/282,5	22,6	5,48
24/297	9,5/282,5	19,5	4,72
26/299	9,5/282,5	17,1	4,15
28/301	9,5/282,5	15,3	3,70
30/303	9,5/282,5	13,8	3,34
32/305	9,5/282,5	12,6	3,04
34/307	9,5/282,5	11,5	2,80

L.2 E-MAIL-KORRESPONDANCER

L.2.1 FERGUS NICOL - VEDR. ADAPTIV KONTROLALGORITME

E-mail-forespørgsel:

I'm allowing myself to write to you again, as I have a question regarding the adaptive control algorithm which I'm hoping you can answer.

In the final report (p. 32) you specify the adaptive control algorithm as:

$$\begin{aligned} T_c &= 21.61 \text{ }^\circ\text{C} && \text{if} && T_{rm80} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_c &= 0.267 * T_{rm80} + 18.88 && \text{if} && T_{rm80} > 10 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Which is the results from the level 1 (transverse) data. However, in the following paper:

"Developing an adaptive control algorithm for Europe" by Kathryn J. McCartney & J. Fergus Nicol, Energy and Buildings 34 (2002), p. 623-635

you specify the ACA as:

$$\begin{aligned} T_c &= 22.88 \text{ }^\circ\text{C} && \text{if} && T_{rm80} \leq 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_c &= 0.302 * T_{rm80} + 19.39 && \text{if} && T_{rm80} > 10 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

based on the level 2 data. Can you explain this, as we can't find any comments in the final report on this.

Best regards!

Rasmus Lautrup
Stud. M. Sc. Indoor Environmental Engineering
Aalborg University

Svar:

Dear Rasmus

Sorry about this discrepancy, you are right. The later algorithm ($T_c = 0.302 T_{rm} + 19.4$) is the one which is normally used. the version you have found is from the less accurate longitudinal surveys (see Task 3 report p12). I am not sure why this was used in the testing of the algorithm, but if anything it will reduce the energy savings from the use of the algorithm (because the temperature set-points are lower) and this may have been the reasoning.

Best wishes

Fergus

Fergus Nicol

Dept of Architecture
Oxford Brookes University
Gipsy Lane
Oxford OX3 0BP, UK
Email: jfnicol@brookes.ac.uk
Tel (44)(0) 1865 483226, fax (44) 1865 483298

At London Metropolitan University
E-mail: f.nicol@londonmet.ac.uk
Tel (44)(0) 20 7133 2178, Fax (44) 20 7133 2472

L.2.2 TAGE MAIGAARD HJELM - GRONTMIJ | CARL BRO A/S

Hej Rasmus.

Her er de resterende oplysninger du efterlyser
Setpunktet for belysningen er ved facaden 800 lx.
Setpunktet er fremkommet ved klager over lysniveauet ved arbejdspladser længst borte fra vinduer.

Hilsen
Tage

From: Rasmus Lautrup [mailto:rlautrup@gmail.com]
Sent: 9. maj 2008 18:40
To: tah@gmcb.dk
Subject: Afgangprojekt

Hej Tage!

Jeg har brug for følgende oplysninger:

- Ventilationsanlæg
 - Driftstid (starter det f.eks. en time før medarbejderne møder?)
 - SVAR: Driftstider er mandag - fredag 05.00 - 20.00, Lørdag - søndag 07.30 - 17.00
- Belysning
 - Installeret effekt i rum 1.03A og B. (W/m²)
 - SVAR: Ca. 6 W/m²
 - Setpunkt for belysningsniveau i rum 1.03A og B (lux)
 - SVAR: 800 lux ved facade
 - Setpunkt for PIR-føler (hvor lang tid går der før lyset slukker ved inaktivitet)
 - SVAR: 15 min
- Solafskærmning, udvendig

- Hvem har leveret dem, Jysk Markisefabrik?
- SVAR: Ja tele 8622 7500
- Evt. hvilken type. Hvis du ikke umiddelbart ved det, så ringer jeg selv til leverandøren.

Endnu engang tusind tak for din store hjælp! Den er uvurderlig!

Rigtig go' pinse!

Med venlig hilsen

Rasmus Lautrup

L.2.3 ALLAN BENDTSEN - KØBENHAVNS ENERGI A/S - VEDR. SOLAFSKÆRMNING

E-mail-forespørgsel:

Hej Allan!

Jeg sidder lige med et lille spørgsmål som jeg vil høre om du ved noget om.

Vi har valgt at arbejde med kontorafsnittet på 2. sal mod øst. Så vidt jeg kan forstå er der solafskærmning mellem 2 ruder i det kontor?

Ved du hvordan solafskærmningen styres? temperatur? maksimal solintensitet på ruden?

mvh

Steffen

Svar:

Hej Steffen,

Det er korrekt at der er solafskærmning mellem 2 ruder. Solafskærmningen består af alm. persienner. Der er ingen automatik. Manuel betjening.

Med venlig hilsen

Allan S. Bendtsen
Ejendomsinspektør

L.2.4 ALLAN BENDTSEN - KØBENHAVNS ENERGI A/S - VEDR. ENERGIFORBRUG

E-mail-forespørgsel:

Hej Allan!

Jeg sidder lige nu og ser lidt på nogle simuleringer af energiforbruget i ”din” bygning.

I den anledning vil jeg høre dig, om du har nogle tal for hvor stort energiforbruget er i bygningen? Gerne opdelt på opvarmning og elforbrug? Eller hvordan i nu har det opdelt.

Perioden må gerne være over et år hvis det kan lade sig gøre, og gerne for 2006 hvis du ligger inde med det?

Håber meget det er noget du vil hjælpe mig med.

På forhånd mange tak for din store hjælp i vores projekt.

mvh

Steffen

Svar:

Hej Steffen,

Desværre har jeg ikke alle tal for 2006. Derfor får du 2007:

EL: 1.708.410 kWh heraf er der brugt 324.785 kWh til IT-serverrum

Fjernvarme: 954 MWh - 16.741 m³

Vand: 3.877 m³ heraf er der brugt 556 m³ til varmt vand.

Håber det er hvad du skal bruge.

Med venlig hilsen

Allan S. Bendtsen
Ejendomsinspektør

Langtidsevaluering af termisk komfort

Komfortindikatorer og menneskelig adaptivitet

Denne rapport er et afgangsprøveprojekt udarbejdet som afslutning af uddannelsen til civilingeniør i indeklima og energi ved Aalborg Universitets Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakulteter.

Rapporten er indledt med et grundigt litteraturstudie, hvor eksisterende metoder til evaluering af en bygnings indeklimaydeevne er undersøgt. Fokus er hovedsageligt rettet mod evaluering af termisk indeklima, men også luftkvalitet samt indeklimaets indflydelse på energiforbrug, produktivitet og økonomi er behandlet.

Baseret på litteraturstudiet, er eksisterende metoder til evaluering af en bygnings indeklimaydeevne, såvel momentant som langsigtet, udbygget og optimeret. Metoderne omfatter ydeevneindikatorer for såvel termisk og atmosfærisk indeklima som energi med udgangspunkt i Eco-factor-metoden. Udvidelsen af Eco-factor-metoden for langtidsevaluering af termisk komfort giver mere detaljeret information om det oplevede termiske indeklima og er i nærværende projekt benyttet på to udvalgte bygninger. På baggrund af importerede data fra termiske bygningssimuleringsprogrammer indeholder den udvidede Eco-factor endvidere evalueringemetoder i form af statistiske analyser.

Foruden dette er der i samarbejde med Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) udfærdiget en kobling mellem programmerne BSim og Matlab. Denne er, foruden følsomheds- og usikkerhedsanalyser af de udvalgte bygninger, benyttet til undersøgelse af en adaptiv kontrolalgoritme, der styrer setpunktet for såvel opvarmning som køling som funktion af udelufttemperaturen. Baggrunden herfor er empiriske undersøgelser hvor det er fundet, at en sådan styring vil medføre store energibesparelser uden forringelse af det termiske indeklima. Potentielle energibesparelser, sammen med den teoretiske indflydelse på det oplevede termiske indeklima, er undersøgt ved simuleringer af en udvalgt bygning. Det blev fundet, at en styring af setpunkterne for hhv. opvarmning og køling efter denne algoritme i den udvalgte bygning medfører et øget energiforbrug sammenlignet med en traditionel styringsstrategi. Simuleringerne af det forventede antal utilfredse med det termiske indeklima viste imidlertid en klar forbedring heraf ved styring efter kontrolalgoritmen ift. konventionelle faste setpunkter for opvarmning og køling.

Adaptiv kontrolalgoritme

Middel effektiv PMV: $f = 25^a \cdot T_{ude} + b$

præferenc