Luftstrømninger i store rum med mange

mennesker

- Mennesket som randbetingelse

Civilingeniøruddannelsen i Indeklima og Energi, B-sektoren, De Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakulteter, Aalborg Universitet

1.0

Michael Tøgersen, 2009

Titel:

Luftstrømninger i store rum med mange mennekser

Undertitel:

Mennesket som randbetingelse

Projektperiode:

Indeklima og Energi, Afgangsprojekt 2. september 2008 - 11. juni 2009

Projektforfatter:

Michael Aa. Tøgersen

Vejledere: Henrik Brohus Peter V. Nielsen

Oplag: 4

Rapport sideantal: 220

Vedlagt: 2 DVD'er

Synopsis:

Følgende rapport omhandler luftstrømninger i store rum med mange mennesker og hvordan de kan behandles som randbetingelse ved opstilling af CFD simuleringer. Rapporten skal ses som et indledende forløb, der kan føre til vejledninger om, hvordan mange personer kan modelleres.

Rapporten er indledt med et litteraturstudie for at anskueliggøre den eksisterende viden omkring termisk vekselvirkning mellem personer. Under litteraturstudiet er det endvidere undersøgt, hvordan mennesket behandles som randbetingelse ved opstilling af CFD simuleringer for rumtyper med stor personbelastning som arenaer og auditorier etc. Hertil er der også foretaget en undersøgelse om, hvordan CFD anvendes for store rum med mange mennesker i praksis ved interviews med fire rådgivende ingeniørvirksomheder.

Til anskueliggørelse af om der indtræffer en termisk vekselvirkning mellem personer, er der opstillet et forsøg, hvor overfladetemperaturen af en gruppe personer ved fire tætheder er undersøgt. Fra forsøget er personernes termiske opfattelse i afhængighed af persontætheden også undersøgt.

Der præsenteres forslag til, hvordan mange personer kan modelleres ud fra personmodeller. Der opstilles en række cases til at undersøge, hvilken indflydelse valget af personmodel vil have på temperatur- og strømningsfeltet i et stort rum ventileret efter fortrængningsprincippet med stor personbelastning.

Abstract

This report is a final thesis documenting the finalisation of a degree in Master of Science in Indoor Environmental Engineering at The Faculties of Engineering, Science and Medicine at Aalborg University. The objective for the thesis is to investigate how to model many people when using a CFD code to simulate airflows in large enclosures with high density of people as for instance cinemas, concert halls, lecture halls etc.

From a litterature study there was found no distinct sign of thermal reciprocal action between people subject to the density of people which can be expected in cinemas, concert halls, lecture halls etc. By using four different densities of people the thermal reciprocal action was investigated experimentally in an auditorium. From the experiment there was not found any indication of thermal reciprocal action between the people or that the investigated density of people would have influence on their thermal state of mind. In the litterature study it was also found that people are assumed to act as individuals when simulating airflow in large enclosures with many people and thereby taking no account to thermal reciprocal action between the people. Therefore it was concluded in the project that when modelling many people they can be assumed to act as individuals and not include any thermal reciprocal effects.

Different proposals to model many people in a large enclosure were examined with the use of numerical models in the CFD code *ANSYS-CFX*. Main findings from the simulations was that the temperature fields indicate that the temperature gradient is not constant in the height of the room and a high level of mixing in the air above the occupied zone occurs. Moreover it was found that the highest velocities occurs above the persons and increases in the height of the room.

Forord

Nærværende rapport er resultatet af et langt afgangsprojekt på civilingeniøruddannelsen i Indeklima og Energi ved Aalborg Universitet under De Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelige Fakulteter. Rapporten er udarbejdet i perioden 2. september 2008 – 11. juni 2009 og omhandler luftstrømninger i store rum med mange mennesker, hvor der er fokuseret på mennesket som randbetingelse.

Bagerst i rapporten findes to DVD'er, hvor den ene indeholder nærværende rapport, billeder og filmklip (DVDI). Den anden DVD indeholder de opstillede CFD modeller samt forsøgsmåledata (DVDII).

I rapporten er der henvist til figurer og tabeller ved hhv. kapitel og figur-/tabelnummer, hvor eksempelvis figur 1 i kapitel 3 er angivet som figur 3.1. Samme princip er anvendt til formelhenvisninger dog yderligere angivet med omsluttet parentes, så formel 1 i kapitel 3 benævnes (3.1). Appendiks er placeret bagerst i rapporten, hvor henvisningerne hertil er benævnt alfabetisk. Fodnoter er markeret med hævet tal, hvor selve noten er anført nederst på samme side. Kildehenvisninger er foretaget ved efternavn og årstal og angivet i firkantede parenteser, eksempelvis [Fanger, 1972]. Henvisninger til standarder er foretaget efter nummeret på standarden og årstallet, eksempelvis [DS 15251, 2007]. Litteraturlisten kan findes bagerst i rapporten umiddelbart før appendiks.

I forbindelse med udarbejdelse af rapporten vil projektforfatteren gerne sige tak til Jens Christian Bennetsen, Lau Markussen, Niels Varming og Christian Anker Hviid for, at de ville deltage i interviewene om anvendelse af CFD i praksis. Derforuden vil projektforfatteren også gerne takke Peter Vester og Sidsel Warming for deres assistance under udførslen af forsøget samt takke Uffe Riis Sørensen for udarbejdelse af nærværende rapports omslag.

Michael Tøgersen d. 11/6 2009

Indhold

1 Indledning					
	1.1 Problemanalyse	2			
	1.2 Problemafgrænsning				
	1.3 Problemformulering				
Ι	State of the art	7			
2	Interaktion mellem personer og ventilation				
	2.1 Mellem personer	9			
	2.2 Mellem personer og ventilation	10			
3	CFD cases	15			
	3.1 Forelæsningslokaler og auditorier	15			
	3.2 Arenaer	22			
	3.3 Teatre	28			
4	Interviews				
	4.1 Firma 1	33			
	4.2 Firma 2	34			
	4.3 Firma 3	35			
	4.4 Firma 4	35			
II	Undersøgelse af personers termiske interaktion	39			
5	Forsøg	41			
	5.1 Beskrivelse af forsøgsrum	41			
	5.1.1 Ventilation \ldots	44			

		5.1.2 Luftfordelingsprincip	47						
	5.2	Forsøgsbeskrivelse	48						
		5.2.1 Opstillinger	49						
		5.2.2 Målepunkter	51						
	5.3	Pilotforsøg	55						
	5.4	Måleresultater fra forsøg	58						
		5.4.1 Rumtilstand	58						
		5.4.2 Overfladetemperatur af personer	67						
		5.4.3 Opfattelse af temperatur	71						
		5.4.4 Accept af luftkvalitet	74						
		5.4.5 Opfattelse af luftbevægelser	75						
	5.5	Undersøgelse af indflydelse på vinkelforhold	77						
II	IN	Numerisk modellering af personer	83						
6	Ind	ledende betragtninger	85						
	6.1	Indledning	85						
	6.2	Varmebalance under ikke stationære forhold	86						
		6.2.1 Rumluftens varmebalance	87						
		6.2.2 Overfladernes varmebalance	87						
		6.2.3 Varmebalance for de varmeakkumulerende lag	88						
	6.3	Valg af "værktøj"	89						
	6.4	Personmodeller	94						
7	Cas	Cases med fortrængningsventilation							
	7.1	Rumgeometri og randbetingelser	97						
	7.2	Simularinger med 150 personer	02						
		7.2.1 Opstilling af modeller	03						
		7.2.2 Netpunktsanalyse	04						
		7.2.3 Simularingsresultater	16						
	7.3	Simularinger med 25 personer	27						
		7.3.1 Modeller og randbetingelser	27						
		7.3.2 Simularingsresultater	30						
IV	/ K	Konklusion og perspektivering 1	35						
8	Ger	perel diskussion og konklusion	37						
Litteratur 1									

Appendiks					
\mathbf{A}	Menneskets varmebalance	147			
	A.1 Varmebalancen	147			
	A.1.1 Varmeproduktion	148			
	A.1.2 Varmeafgivelse	148			
	A.1.3 Konvektion	152			
	A.1.4 Stråling	152			
	A.1.5 Fordampning	154			
	A.1.6 Respiration	154			
	A.2 Regularing af legemstemperatur	155			
в	Kalibrering af termoelementer 15				
\mathbf{C}	Bestemmelse af auditoriets luftskifte 163				
D	9 Spørgeskema til indeklimaanalyse 167				
\mathbf{E}	Statistik på forsøgspersoner 17				
\mathbf{F}	Måleresultater	179			
	F.1 Målinger	179			
	F.2 Evaluering af indeklima	182			
	F.3 Helbredstilstand	187			
G	Spørgsmål til interviews 193				
н	Beregning af indflydelse på vinkelforhold	193			
I	Beregning af luftmængder	199			
	I.0.1 Luftmængde efter den oplevet luftkvalitet	199			
	I.0.2 Luftmængde efter indholdet af CO_2	200			
J	Pilotsimuleringer med CFD	203			
	J.1 Geometri og randbetingelser for 150 personer	203			
	J.1.1 Simuleringsresultater for 150 personer	206			
	J.2 Geometri og randbetingelser for 25 personer	213			
	J.2.1 Simularingsresultater for 25 personer	214			

Kapitel 🗳

Indledning

I et moderne samfund tilbringer mennesket størstedelen af sit liv indendørs [Wargocki et al., 2006], hvorfor det må erkendes, at opretholdelsen af et fysiologisk og hygiejnisk indeklima er af særlig vigtighed. Dette være sig gældende for den almene bolig til store offentlige bygningsværker, da et dårligt indeklima vil have en negativ indflydelse på menneskets komfort og sundhed samt produktivitet [Wargocki et al., 2006]. Heraf følger det, at muligheden for at forudsige en bygnings indeklima under drift for designeren er af vital betydning. Til dette formål anvendes ofte computersimuleringsprogrammer, hvor de anvendte randbetingelser får afgørende betydning for resultatet.

Nærværende projekt vil omhandle luftstrømninger i store rum med mange mennesker, hvor der menes rumtyper som auditorier, biografer, koncertsale etc. For sådanne rumtyper har anvendelsen af CFD modeller vundet mere indpas gennem de sidste 15 – 20 år som et værktøj til evaluering af indeklimaet [Stamou et al., 2007], [Stamou et al., 2008b] og [Awbi, 2007] i takt med computerkraftens udvikling [Kunugiyama, 2002]. For at de opstillede CFD modeller skal kunne anvendes til evaluering af indeklimaet, er det nødvendigt, at de anvendte randbetingelser er i overensstemmelse med problemstillingen for, at modellerne vil give en valid løsning. I sin "simpelhed" kan en CFD model betragtes som ekstrapolation af randbetingelser på et domæne:

"A CFD solution is nothing more than the extrapolation of boundary conditions into the domain interior" [Versteeg og Malalasekera, 1995]

Som antydet af ovenstående citat vil de anvendte randbetingelser diktere den numeriske løsning for en given opstillet CFD model, hvormed løsningen kun vil være valid såfremt randbetingelserne er.

1.1 Problemanalyse

I det følgende foretages en problemanalyse med henblik på opstilling af problemformuleringen, som ønskes besvaret gennem nærværende projektet. I projektet fokuseres der primært på ventilation af store rum med mange mennesker og interaktionen herimellem, hvorfor problemanalysen vil tage udgangspunkt i denne problemstilling.

Anvendelsen af computersimuleringsprogrammer benyttes delvist til anskueliggørelse af det forventede indeklima og dermed de i rummet opholdende personers komfort samt den pågældende bygnings forventede energiforbrug. Til evaluering af personernes komfort er indeklimaparametrene såsom temperatur, luftkvalitet, støj og lys de, som har størst indflydelse [Wargocki et al., 2006], hvor personens opfattelse af dets komfort påvirkes både af det fysiologiske og psykologiske aspekt [Stenn-Thøde et al., 2001] som illustreret ved figur 1.1.



Figur 1.1: Indeklimaets fysiske og psykiske indeklimafaktorer. Gengivet efter [Stenn-Thøde et al., 2001]

Indeklimabegrebet består af de fire komponenter belyst via figur 1.1, og kan opsummeres i ord som:

- **Termisk indeklima** De operative temperaturer og lufthastigheder, som har indflydelse på den enkelte persons komfort.
- Atmosfærisk indeklima De fysiske størrelse, som har indflydelse på menneskets opfattelse af indeluften.
- Akustisk indeklima De fysiske egenskaber af materialerne som har indflydelse på lydniveauet.
- Lys indeklima Den nødvendige belysningsstyrke.

To eller flere personer vil i afhængighed af deres psykiske tilstand kunne give forskellig vurdering af det samme fysiske klima, hvorfor indeklimaet også indeholder det psykiske aspekt jf. figur 1.1. I et studie udført af [Zhong og Leonardelli, 2008] er en gruppe personernes opfattelse af et rums temperatur undersøgt i afhængighed af personernes sociale status. Her blev det fundet, at når forsøgspersonerne tænkte på en situation, hvor de var udenfor fællesskabet, så følte de en given rumtemperatur koldere end når de tænkte på en situation, hvor de var en del af fællesskabet. Eksperimentet belyser kompleksiteten for om alle brugerne af et rum vil føle sig i en tilstand af termisk komfort, da deres opfattelse af indeklimaet vil afhænge af deres psykiske tilstand.

Det ville være ønskeligt, at etablere indeklimaet så alle brugerne vil være i komfort, men dette må dog forventes at medføre relative høje etablerings- og driftsomkostninger, hvorfor indeklimaet i praksis dimensioneres efter et forventet antal utilfredse. Til dette formål anvendes forventningsklasserne til det termiske og atmosfæriske indeklima jf. [DS 15251, 2007] gengivet i tabel 1.1.

Kategori	Atmosfærisk komfort	Termisk komfort
Ι	$PD \le 15 \%$	$PPD \leq 6 \%$
II	$PD \le 20 \%$	$PPD \le 10\%$
II	$PD \leq 30 \%$	$PPD \le 15\%$
IV	$PD \ge 30 \%$	$PPD \geq 15\%$

Tabel 1.1: Procentdelen af utilfredse med h
hv. det atmosfæriske og termiske indeklima i afhængighed af forvent
ningsklasse [DS 15251, 2007]. I tabellen betegner PD procentdelen af utilfredse med det atmosfæriske indeklima og PPD procentdelen af utilfredse med det termiske indeklima.

Ud fra de opstillede krav til forventningsklassen samt energiforbruget for en given bygning er det op til designeren at dokumentere opfyldelsen af de opstillede krav. Til dokumentation af en given bygnings forventede energiforbrug og tidslige profil af den operative temperatur anvendes der ofte termiske bygningssimuleringsprogrammer. Derudover har anvendelsen af CFD modeller til anskueliggørelse af luftstrømningen i store og komplekse rum med mange personer såsom biografer, auditorier og koncertsale eksempelvis Operaen i København og Musikkens Hus i Aalborg vundet mere indpas i takt med computerkraftens udvikling. For anvendelsen af et termiske simuleringsprogram eller et CFD program skal den på rummet påførte belastning fastlægges, da den påvirker den operative temperatur samt strømningen i rummet, eftersom der tilføres energi til rummet [Stenn-Thøde et al., 2001]. Den termiske belastning fra elektrisk udstyr kan f.eks. fastlægges af produktkataloger eller fra tabelopslag for lignende produkter. Belastningen fra personerne kan ligeledes bestemmes af tabelopslag, men disse værdier er bestemt ud fra, at individet er enkeltstående og ikke er omsluttet af andre [Fanger, 1972], [Stenn-Thøde et al., 2001]. For rumtyper som auditorier, teatre og koncertsale er dette ikke tilfældet, eftersom personerne her er omsluttet af andre som vist på figur 1.2, hvor tætheden af publikummet under en forestilling i Operaen kan ses.



Figur 1.2: Placering af publikum i Operahusets koncertsal. Foto: Adam Mørk [Copenhagen X, 2009].

For personer med et aktivitetsniveau svarende til stillesiddende afslappende aktivitet, som f.eks. i en biograf eller teater, afgives varmen primært ved konvektion og stråling, fri varmeafgivelse, samt en andel med udåndingsluften, bundet varmeafgivelse [Fanger, 1972]. Den konvektive varmeafgivelse fra en person er en funktion af individets overfladetemperatur og det strømmende luftmediums temperatur samt strømningstypen heraf fri eller tvungen konvektion [Stenn-Thøde et al., 2001]. Varmemængden som afgives ved stråling kan betragtes som en funktion af individets og de omkringliggende fladers overfladetemperatur samt vinkelforholdet fra individet til disse flader og det omgivende miljø [Stenn-Thøde et al., 2001]. For de personer som omsluttes af andre jf. figur 1.2, må vinkelforholdet til de omsluttende flader og miljø forventes at blive reduceret som følge af de omsluttende personernes afgrænsning. Eftersom overfladetemperaturen af personerne må forventes at antage tilnærmelsesvis samme værdi, afgives der ikke varme ved stråling mellem personerne, hvorfor betingelsen for varmeafgivelsen ved stråling må forventes at blive forringet som følge af persontætheden. Såfremt varmeafgivelsen ved stråling fra personerne reduceres, kan en højere overfladetemperatur af personerne tænkes, hvormed den konvektive varmeafgivelse forøges som følge af en højere temperaturforskel mellem personernes overflade og det strømmende luftmedium. Herudover indeholder mennesket også en kompleks reguleringsmekanisme, som er nærmere beskrevet i appendiks A for et enkeltstående individ, der kan øge eller mindske varmeafgivelsen for at opretholde individet i komfort i afhængighed af det omgivende miljø.

Som indikeret af ovenstående problemanalyse vil det for rumtyper med stor personbelast-

ning ikke være sikkert, at personerne kan behandles som enkeltstående individer, eftersom en forringelse af deres betingelse for varmeafgivelse kan indtræffe.

1.2 Problemafgrænsning

Som følge af projektets emne samt tidshorisonten foretages der i det følgende en afgrænsning af ovenstående problemanalyse, hvorefter den initierende problemformulering opstilles.

I nærværende projekt vil der hovedsagligt blive fokuseret på, hvordan mennesket kan behandles som randbetingelse til simuleringer af luftstrømninger i store rum med mange mennesker ved anvendelse af CFD. Med mennesket som randbetingelse menes der blandt andet, hvordan personerne modelleres med hensyn til varmeafgivelse samt geometrisk.

1.3 Problemformulering

Som det er anskueliggjort af ovenstående problemanalyse, vil en persontæthed, som den der kan forventes i en biograf, koncertsal etc. kunne give anledning til en forringelse af betingelserne for personernes varmeafgivelse. Til at anskueliggøre om der for store rum med stor personbelastning indtræffer en termisk vekselvirkning imellem personerne, samt hvordan personer kan modelleres, er der opstillet følgende initierende spørgsmål, som ønskes besvaret gennem projektet:

- hvordan ændres betingelserne for varmeafgivelse for en person omsluttet af andre?
- hvordan behandles mennesket som randbetingelse?
- hvordan simuleres luftstrømninger i store rum med mange mennesker?

Ovenstående problemformulering er i nærværende projekt forsøgt besvaret gennem et litteraturstudie for at give et overblik over den eksisterende viden omkring termisk vekselvirkning mellem personer. Derforuden er der også søgt på eksisterende viden for en eventuel interaktion mellem ventilationen og personer, når der er mange. Herforuden er der i litteraturen også undersøgt, hvordan mange mennesker behandles som randbetingelse ved simulering af luftstrømninger i store rum med mange mennesker. For at undersøge hvad der sker med en gruppe personers overfladetemperatur og termiske opfattelse i afhængighed af persontætheden, er der udført et forsøg til anskueliggørelse af dette. Den opsamlede viden fra litteraturstudiet og genererede fra forsøget er dernæst anvendt til at opstille en række cases for et rum ventileret efter fortrængningsprincippet med stor personbelastning ved anvendelse af forskellige personmodeller.

Del I

State of the art

Kapitel 2

Interaktion mellem personer og ventilation

I det følgende kapitel gives et overblik over den eksisterende viden som er fundet i litteraturen omkring interaktion mellem personer samt personer og ventilationen.

2.1 Mellem personer

Menneskets varmebalance opretholdes ved, at der afgives varme til omgivelserne ved konvektion, stråling og fordampning, hvor effektiviteten heraf delvis kan betragtes som en funktion af omgivelserne [Fanger, 1972]. Eksempelvis vil varmeafgivelsen ved stråling fra en person afhænge af vinkelforholdet mellem personen og de omsluttende flader, hvorfor en høj persontæthed eventuelt kan give anledning til en reduktion af varmeafgivelsen ved stråling. I litteraturen er persontæthedens indflydelse på mennesket varmeafgivelse undersøgt, hvilket omtales i det følgende.

Persontæthedens indflydelse for en gruppe personers termiske opfattelse er undersøgt af [Yaglou og Drinker, 1928] ved at placere hhv. otte og 25 personer i et klimakammer med et gulvareal på 44 m^2 , hvormed personbelastning var 0,2 personer/m² og 0,6 personer/m² for de to opstillinger. Af de 25 personer blev otte af personernes opfattelse af, hvornår de følte sig i termisk komfort ved de to persontætheder undersøgt. Forsøget viste, at de otte personer ønskede en reduktion af lufttemperaturen på 0,8 °C for at føle sig i komfort, når personbelastningen var 0,6 personer/m². Grunden hertil blev vurderet, at skyldes reduktionen af varmeafgivelsen ved stråling og en forøgelse af den konvektive varmeafgivelse for, at personerne ville være i en tilstand af termisk komfort krævede en lavere lufttemperatur.

Effekten af persontæthedens indflydelse på den indre legemstemperatur er undersøgt af

[Rohles Jr. et al., 1967] ved at placere grupper af hhv. 8, 18, 32 og 48 personer i et rum på $3.6 \,\mathrm{m} \times 7.3 \,\mathrm{m} \times 2.4 \,\mathrm{m}$ svarende til en personbelastning på hhv. $0.3 \,\mathrm{personer} / \mathrm{m}^2$, 0,7 personer/m², 1,2 personer/m² og 1,8 personer/m². Studiet blev udført ved forskellige rumtemperaturer mellem 35.0 - 37.8 °C og en relativ fugtighed mellem 60 - 90% over en række forsøgsserier af en varighed på hhv. fire eller otte timer, hvor personerne kun var beklædt med underbukser og strømper . Under forsøgene blev antallet af personer hvis hhv. den indre legemstemperatur steg 1 °C eller de blev dårlige talt. Resultatet for studiet udført af [Rohles Jr. et al., 1967] indikerede, at når rumtemperaturen er tilnærmelsesvis lig med personernes overfladetemperatur og ved en høj persondensitet forringes betingelserne for personernes varmeafgivelse og den indre legemstemperatur steg hurtigere end for lavere persondensiteter. Det observerede resultat af forsøget kan delvis skyldes, at varmeafgivelsen ved stråling bliver forringet som følge af personernes tilnærmelsesvis samme overfladetemperatur som rummets flader, hvormed der ingen energiudveksling indtræffer [Stenn-Thøde et al., 2001]. Heraf følger det, at den indbyrdes energiudveksling mellem personerne også er nul eftersom tilnærmelsesvis samme overfladetemperatur af personerne må forventes, da de antager samme aktivitetsniveau og beklædning. Såfremt det ikke er muligt for kroppen at afgive varme ved fordampning og konvektion for at opretholde dets varmebalancen med omgivelserne vil den indre temperatur stige [Fanger, 1972].

Menneskets fysiologiske reaktion på omgivelserne i et forsøgsrum er undersøgt af [Kang et al., 2001] ved at placere 12 personer i et forsøgsrum, som er mekanisk ventileret. Forsøgsrummet målte $2,6 \text{ m} \times 2,0 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$, hvormed personantallet svarede til en personbelastning på $2,3 \text{ personer/m}^2$. Ved at opretholde enten en konstant rumtemperatur eller konstant indblæsningstemperatur blev personernes overflade-, oral- og armhuletemperatur målt kontinuerlig over tre timer og for en tredje situation, hvor ventilationsanlægget var inaktiv blev de målt kontinuerligt over 50 min. Af målinger blev det fundet, at såfremt ventilationsanlægget var aktivt antog forsøgspersonerne overflade-, oral- og armhuletemperatur en tilnærmelsesvis konstant temperatur, hvorimod de steg når ventilationsanlægget var inaktiv. Af studiet udført [Kang et al., 2001] tyder det på, at for selv en relativ høj persondensitet vil det ikke have nogen betydning for personernes varmeafgivelse, da overfladetemperaturen forbliver tilnærmelsesvis konstant, såfremt rummet ventileres.

Jævnfør [Fanger, 1972] vil en høj persontæthed kun give anledning til en forøgelse af middelstrålingstemperaturen, men hvis persontætheden dog bliver så ekstrem, at personernes grænselag begynder at interagere vil det få indflydelse på varmeafgivelsen ved konvektion og medfører et krav om lavere lufttemperatur for, at personerne vil være i komfort.

2.2 Mellem personer og ventilation

Lufthastigheden i opholdszonen er af interesse med henblik på bestemmelsen af den termiske komfort. Hastighedsfeltet i opholdszonen må forventes at afhænge af positionen for indblæsningen, volumenstrømmen samt den på rummet tilførte termiske belastning. Der er søgt i litteraturen omkring interaktion mellem ventilationen og den termiske belastning på rumluften i form af personer, hvor den fundne viden omtales i det følgende.

Den termiske belastnings indflydelse på strømningsmønsteret for et rum ventileret efter opblandingsprincippet er undersøgt af [Müller et al., 2004]. Rummet målte $6 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 2 \text{ m}$, hvor 64 cylindriske varmekilder blev placeret. Strømningsmønsteret blev herefter undersøgt ved variation af den termiske belastnings størrelse og den tilførte volumenstrøm. Heraf blev tre forskellige principielle strømningsmønstere i afhængighed af den termiske belastnings størrelse observeret som gengivet på figur 2.1.



Figur 2.1: Illustration af de tre principielle observerede strømningsmønster i studiet udført af [Müller et al., 2004].

Når den på rummet tilførte termiske belastning var 0 W/m^2 blev strømningsmønsteret fundet at være styret af indblæsningernes placering samt volumenstrømmen jf. 2.1a. Når rummet påførtes en termisk belastning, blev luften indblæst med en undertemperatur og ved en værdi under 20 W/m^2 blev det fundet, at den kolde luft strømmede ned til gulvniveau, hvor den blev opvarmet og derefter steg op ad igen i rummets højde som vist på figur 2.1b. Ved en værdi af den termiske belastning over $20 - 50 \text{ W/m}^2$ i afhængighed af volumenstrømmen størrelse blev de termiske drivkræfter fundet at være mere dominerende og den stabile cellestruktur erstattet af hvirvelstrømning i hele rummet som vist på figur 2.1c. Endvidere viste studiet også, at maksimal hastigheden i opholdszonen steg i takt med den termiske belastning blev øget.

I et studie udført af [Møller, 2008] er det undersøgt, hvad der sker med luftstrømningen i et

stort rum ved fire forskellige personbelastninger, hvilket blev gjort ud fra skalaforsøg med en eksperimentel personmodel. Den eksperimentelle personmodel bestod af en matsort dåse med en diameter på 0,095 m og en højde på 0,245 m, hvor der indeni blev placeret en glødepære, hvormed personmodellen kunne simulere varmeafgivelsen fra en person. Skalaen for den anvendte personmodel blev bestemt ud fra forholdet mellem højden af en "virkelig" siddende voksen person (1,2 m) og højden af dåsen (0,245 m). Ved opstilling af forskellige tætheder for den eksperimentelle personmodel på hhv. 150, 75 og 25 enheder samt 1 enhed, blev hastigheds-, temperaturfordelingen samt CO₂-koncentrationen undersøgt. Afstanden mellem de opstillede enheder af den eksperimentelle personmodel blev fastlagt ud fra afstanden mellem stollerækkerne i en "virkelig" biograf og derefter skaleret ned med skaleringsfaktoren på 4,9. På figur 2.2 er en skitse af det anvendte forsøgsrum vist.



Figur 2.2: Skitse af det anvendte forsøgsrum i studiet udført af [Møller, 2008].

Rummet er ventileret efter fortrængningsprincippet som antydet på figur 2.2, hvor der indblæses frisk luft gennem en indblæsningspose ved gulvniveau og udsuges ved loftsniveau. Over indblæsningsposen placeres de forskellige tætheder af den eksperimentelle personmodel, hvor en opstilling med 150 enheder er gengivet på figur 2.3



Figur 2.3: Illustration for placering af 150 enheder af eksperimentelle personmodel, hvor der er placeret en matsort dåse over en elpære [Møller, 2008].

Studiet viste, at midt over personerne indtraf de største lufthastigheder samt voksende i rummets højde, da der blev skabt et undertryk idet plumen over personerne medrev den omkringliggende luft. Denne tendens blev ligeledes anskueliggjort ud fra røgforsøg, hvor strømningen ved tre forskellige volumenstrømme er gengivet på figur 2.4. Røgforsøget til venstre, i midten og til højre på figur 2.4 er den tilførte volumenstrøm hhv. $0,018 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$ og $0,054 \text{ m}^3/\text{s}$, hvor Arkimedes tal er hhv. 8619, 1968 og 779. Den totale termiske belastning på rummet er for alle tre situationer 453 W.



Figur 2.4: Røgforsøg ved tre forskellige indblæsningsmængder for opstilling med 150 enheder. Røgforsøget til venstre, i midten og til højre på figuren er udført ved hhv en indblæsningsmængde på $0,018 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,037 \text{ m}^3/\text{s}$ og $0,054 \text{ m}^3/\text{s}$, hvilket svarer til et luftskifte, n, på hhv. 2 h^{-1} , 4 h^{-1} og 6 h^{-1} . Arkimedes tal for røgforsøget til venstre, i midten og til højre på figuren er hhv. 8619, 1968 og 779 og ΔT er hhv. 4,8 K, 4,5 K og 3,8 K. Den totale tilførte termiske belastning for alle tre situationer er 451 W. Billederne er taget ca. 40 s efter forsøgets start [Møller, 2008].

Det blev ud fra røgforsøgene fundet, at der var en tendens til en forøgelse af medrivningen for den omkringliggende luft ved en forøgelse af indblæsningsmængden. Endvidere blev det fundet, at lavere volumenstrøm medførte større lufthastigheder i forhold til højere volumenstrømme. Dette blev tilskrevet den termiske opdrift, idet de målte temperaturer var større ved lavere volumenstrømme.

De største temperaturgradienter blev observeret lokalt omkring personerne, hvor der over personerne indtraf en stor medrivning af den omkringliggende luft, hvilket medførte en stor opblanding af denne, indikeret af tilnærmelsesvise rette temperaturprofiler var herskende over personerne. Heraf følger det, at modelforsøgene indikerede at anvendelsen af den såkaldte 50 % regel ikke var gældende for det pågældende forsøg, da denne forudsætter at temperaturgradienten er en lineær funktion af rummets højde [Skistad et al., 2002]. Måling af CO₂-koncentrationen indikerede ligeledes en lagdeling, hvor den forurenede luft samlede sig i området fra den øverste del af personerne og op til loftet, hvorimod forureningen nede omkring personerne var relativ lav.

Kapitel 3

CFD cases

Ud fra et litteraturstudie er det undersøgt, hvordan mennesket behandles som randbetingelse ved anvendelse af CFD for luftstrømninger i store rum med mange mennesker såsom forelæsningslokaler, arenaer, teatre etc., hvor der i det følgende gives et resume af de fundne cases. Herudover følger også, hvordan de afgrænsende flader for de betragtede rum samt indblæsning og udsugning behandles som randbetingelse. Endvidere er der også præsenteret generelle simuleringsresultater for nogle af de omtalte cases.

3.1 Forelæsningslokaler og auditorier

I et studie udført af [Noh et al., 2007] er den termiske og atmosfæriske komfort undersøgt eksperimentel og numerisk i et forelæsningslokale med en dimension på $11,2 \text{ m} \times 6,4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$. Rummet belastes af 30 personer placeret i fem rækker med seks personer i hver række som antydet på figur 3.1, hvor det pågældende rum og beregningsmodellen kan ses. For de fire midterste rækker er afstanden mellem personer dog mindre end for to yderste rækker.



Figur 3.1: a) Layout af forelæsningslokale og b) det anvendte beregningsnet for CFD modellen i studiet udført af [Noh et al., 2007].

For den numeriske analyse er hver af de 30 personers geometri modelleret som et kubisk rektangel med en højde på 1,2 m svarende til en siddende person og et volumen på 1,62 m³, men det er ikke angivet, hvilken bredde eller tykkelse kroppen er antaget at have. For personernes rand anvendes en overfladetemperatur på 33 °C og en CO₂ afgivelse på 0,014 m³/h som randbetingelse, hvor der for de afgrænsende flader, døre og vinduer benyttes et varmetransmissionstal og en ydre temperatur. Det er ikke angivet, om der for de anvendte varmetransmissionstal er inkluderet hhv. den ydre og indre overgangsisolans. Indblæsningsluftens randbetingelse er defineret ud fra en temperatur, volumenstrøm samt CO₂-koncentrationen af udeluften. Den kommercielle CFD kode *STAR-CD* er benyttet med en $k - \epsilon$ turbulensmodel. Der er benyttet et samlet antal strukturerede celler på 450.000, hvor det af figur 3.1 også fremgår, at celletætheden øges i områderne, hvor indblæsningerne og udsugningerne er placeret. I studiet er det kontrolleret, at netpunktsuafhængighed er opnået ved at øge celleantallet, men størrelse heraf er dog ikke omtalt.

I et andet studie er den termiske komfort i et forelæsningslokale lokaliseret i Singapore med et varmt og fugtigt klima studeret numerisk af [Cheong et al., 2003]. Forelæsningslokalet har en gulvdimension på $14,9 \text{ m} \times 11,5 \text{ m}$ og en faldende rumhøjde fra 3,7 m til 2,9 m i rummets længde og kan ses på figur 3.2 med en personbelastning på 100 personer. Som en anden del af studiet blev der over to dage foretaget feltmålinger af lufttemperatur, lufthastighed, relativ fugtighed og CO₂-koncentrationen i opholdszonen under belastning af rummet.



Figur 3.2: Illustration af den anvendte CFD model i studiet udført af [Cheong et al., 2003].

Fra personernes rande defineres en fri varmeafgivelse hidrørende fra konvektion og stråling på 42 W/m^2 , hvor personernes geometri er modelleret ud fra kubiske rektangler inkluderende skinneben, lår, krop og hoved som antydet på figur 3.2. Det samlede overfladeareal af den anvendte personmodel eller dimension af personmodellens enkelte dele er ikke nævnt. For de afgrænsende flader af rummet anvendes overfladetemperaturerne fra de foretagne feltmålinger som randbetingelse, hvor der for indblæsningsdyserne og udsugningerne anvendes målte lufthastigheder samt lufttemperaturer. Der er for den numeriske modellering ikke betragtet CO₂-koncentrationen i rummet og som kommerciel CFD kode er programmet *Fluent* anvendt med en $k - \epsilon$ turbulensmodel, hvor der for beregningsnettet er genereret et ustruktureret. Det er nævnt, at beregningsnettets endelige størrelse er fastlagt ud fra en netpunktsanalyse, men betydningen af nettets opløsning samt størrelsen af de undersøgte og det endelige anvendte er ikke omtalt.

Studiet udført af [Cheong et al., 2003] indikerede, at der indtraf en termisk stratifikation i rummets højde, samt farten aftog ned gennem opholdszonen. De højeste værdier af farten blev fundet at indtræffe omkring indblæsningsåbningerne. Herudover blev de simulerede temperaturer og farten generelt overestimeret med den anvendte model i forhold til de målte værdier. De i studiet gjorte observationer for temperaturen og farten er gengivet på figur 3.3.



Figur 3.3: Temperatur og farten for rummets yz-plan i afstanden x = 6,10 m, med en personbelastning på 100 personer, hvor den frie varmeafgivelse pr. person udgør 42 W/m^2 [Cheong et al., 2003].

Indflydelsen på den termiske og atmosfæriske komfort ved anvendelse af naturlig eller mekanisk ventilation er undersøgt ved anvendelse af en numerisk model af [Holmes og Tucker, 2002] for et vilkårligt forelæsningslokale med en dimension på $8,5 \text{ m} \times 7,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$, som belastes af 30 personer jf. figur 3.4.



Figur 3.4: Illustration af den anvendte CFD model af forelæsningslokalet [Holmes og Tucker, 2002].

De 30 elever behandles som enkeltstående, hvor geometrien af én person modelleres af et kubisk rektangel, men størrelsen heraf er ikke angivet. Fra randen af personernes geometri foreskrives en fri varmeafgivelse på 100 W med en 50/50 fordeling på hhv. konvektion

og stråling samt en CO₂-afgivelse på 0,0041/s. For rummets fire vægge vender tre mod tilstødende rum, hvor der for disse tre foreskrives en overfladetemperatur på randen. Den fjerde væg indeholder et vindue og for både væggen samt vinduet defineres randbetingelse af et varmetransmissionstal og en ydre temperatur. Eftersom der foreskrives en ydre temperatur, må det forventes, at transmissionstallet for væggen og vinduet indeholder den ydre overgangsisolans, men det er uklart om den indre overgangsisolans også indgår. Det er ikke angivet, hvilken CFD kode som anvendes samt beregningsnettets størrelse, men det er angivet, at en $k - \epsilon$ turbulensmodel benyttes.

Ud fra simuleringsresultaterne fra studiet udført af [Holmes og Tucker, 2002] kan der ikke ses nogen udvikling eller generering af plumen over personerne. Herudover er der heller ikke gengivet nogen resultater, som kan anskueliggøre en eventuel direkte interaktionen mellem personerne og ventilationen. Af resultaterne har det kun været muligt, at observere en lagdeling af temperaturen i rummet med stigende værdi for rumtemperaturen i rummets højde.

En numerisk analyse af den termiske komfort i et auditorium er foretaget af [Stamou et al., 2008a], hvor geometrien for den anvendte model kan ses på figur 3.5. Auditoriet måler $35 \,\mathrm{m} \times 20 \,\mathrm{m}$ med faldende rumhøjde i rummets længde med en maksimal højde på 6 m.



Figur 3.5: Illustration af den simulerede geometri for auditoriet anvendt af [Stamou et al., 2008a].

Auditoriet ventileres efter opblandingsprincippet, hvor der indblæses frisk luft gennem 24 hvirveldiffusere monteret i loftet, de røde firkanter på figur 3.5, og den opblandede luft

udsuges under sædderne via 133 åbninger. Herudover udsuges der gennem seks riste på væggen, blå firkanter på figur 3.5. Ved at variere beregningsnettets celleantal fra 500.000 – 2.000.000 blev der fundet uafhængighed af beregningsnettets indflydelse på simuleringsresultatet ved anvendelse af et ustruktureret beregningsnet på 1.500.000 celler, hvis udformning kan ses på figur 3.6. Af figuren er det antydet, at tætheden af beregningsnettet øges omkring indblæsningerne og udsugningerne.



Figur 3.6: Illustration af det anvendte beregningsnet på 1.500.000 celler for auditoriet [Stamou et al., 2008a].

I modellen er der regnet med en personbelastning på 800 personer, hvor personerne ikke modelleres geometrisk for at minimere kravet til beregningsnettet. Varmeafgivelsen fra personerne defineres som en todimensionel varmekilde på overfladen af siddepladserne, hvorfor tætheden af beregningsnettet øges omkring stolerækkerne som antydet på figur 3.6. Der regnes udelukkende med en konvektiv varmeafgivelse fra hver person på 70 W. For hver hvirveldiffuser foreskrives en volumenstrøm med en dertilhørende temperatur af indblæsningsluften. Randbetingelsen for udsugningsåbningerne foreskrives af en volumenstrøm samt et tryktab over åbningerne på 0 Pa. De afgrænsende flader for auditoriet betragtes som værende adiabatiske. Som kommerciel CFD kode benyttes CFX med turbulensmodellen Shear Stress Transport, SST.

For studiet udført af [Stamou et al., 2008a] er temperaturen gengivet for fem snit i rummets xz-plan samt farten i afstanden y = 7,5 m ligeledes for rummets xz-plan gengivet figur 3.7, når indblæsningstemperaturen blev sat til 16,5 °C. Der henvises til [Stamou et al., 2008a] for andre snit af temperatur- og fartfeltet, hvor en anden case med en indblæsningstemperatur på 14,5 °C endvidere er omtalt.



Figur 3.7: Temperatur for fem snit i rummets xz-plan og for farten i rummets xz-plan ved y = 7,5 m med en indblæsningstemperatur på 16,5 °C [Stamou et al., 2008a].

I områderne hvor luften recirkulerer og opblandes hersker der tilnærmelsesvis ensartet temperaturfelt uden nogen klar indikation af termisk stratifikation i rummets højde som antydet af figur 3.7a. Det globale strømningsfelt bærer tydelig præg af store zoner, hvor luften recirkulerer, som det kan ses af figur 3.7b. Det komplicerede strømningsmønster, antydet på figur 3.7b blev af [Stamou et al., 2008a] tilskrevet interaktionen mellem indblæsningsluften fra loftdiffuserne og plumen genereret af personerne. Som det endvidere er antydet på figur 3.7, er der korrelation mellem strømningsfeltet og temperaturfeltet. [Stamou et al., 2008a]

3.2 Arenaer

I forbindelse med opbygningen af indendørs arenaer til de olympiske lege afholdt i Grækenland 2004 igangsatte det græske kulturministerium projektet *Evaluation and improvement* of the Indoor Conditions in the Indoor Stadiums and Amphitheatres og the Olympic Games Athens 2004 with the use of Mathematical Models, hvor undersøgelse af den termiske komfort for to arenaer, Galatsi Arena og Nikea Indoor Stadium er optalt i hhv. [Stamou et al., 2008b] og [Stamou et al., 2007] respektivt, hvor auditoriet som blev anvendt til hovedpressecenter er omtalt i [Stamou et al., 2008a], som er beskrevet i afsnit 3.1.

I Galatsi Arena, er der plads til 6000 tilskuer og har en dimension på $122 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ med en maksimal rumhøjde på 30 m, hvor et udsnit af arenaen kan ses på figur 3.8. Arenaen er ventileret efter opblandingsprincippet, hvor der indblæses frisk luft via indblæsningsdyser monteret på luftkanaler i loftet og udsuges under sæderne samt ved gulvniveau.



Figur 3.8: Udsnit af Galatsi Arena hvor montering af indblæsningsdyser og placering af udsugninger fremgår [Stamou et al., 2008b].

Som følge af symmetri er det valgt kun at modellere halvdelen af Galatsi arenaen, hvor den simulerede geometri og det numeriske beregningsnet kan ses på figur 3.9. En netpunktsanalyse fastlagde et beregningsnet på 4 mio. ustrukturerede celler, men betydningen af de forskellige størrelser af beregningsnettene er ikke nærmere omtalt. På figur 3.9b kan beregningsnettet ses, hvor det også fremgår, at tætheden øges omkring varmekilder og områder, hvor der indblæses frisk luft eller den opblandede udsuges.



Figur 3.9: Illustration af den simulerede geometri af Galatis Arena samt det dertilhørende beregningsnet [Stamou et al., 2008b].

I modellen opstillet af [Stamou et al., 2008b] er hver person modelleret som enkeltstående af et kubisk rektangel med et overfladeareal på $1,6 \text{ m}^2$, hvor der kun påføres en konvektiv varmeafgivelse på $43,7 \text{ W/m}^2$. Der er ikke angivet nogen dimensioner såsom højde, bredde eller længde af det kubiske rektangel til modellering af en persons geometri. Randbetingelsen for indblæsningsdyserne blev defineret ud fra en indblæsningstemperatur samt en volumenstrøm, hvor der over udsugningsåbninger blev foreskrevet et tryktab på 0 Pa. De afgrænsende flader blev for modellen betragtet som værende adiabatiske. Som kommerciel CFD kode er *CFX* anvendt sammen med turbulensmodellen Shear Stress Transport, SST. På figur 3.10 er temperaturen og farten gengivet for rummets *yz*-plan i afstanden x = 30 m, hvor der er anvendt en indblæsningstemperatur på $16 \,^{\circ}\text{C}$ og en personbelastning på 3000 personer med en samlet konvektiv varmeafgivelse på 212.382 W. Der henvises til [Stamou et al., 2008b], hvor flere snit for temperaturen og farten kan ses samt en anden case med en indblæsningstemperatur på $14 \,^{\circ}\text{C}$ er omtalt.

Af studiet blev det fundet, at der opstod en termisk stratifikation i rummets højde, som forstyrres lokalt omkring indblæsningsdyserne over indgangene til arenaens gulv, samt at der skabes en varmepude ved loftsniveauet som antydet af figur 3.10a. Det blev endvidere fundet, at den indblæste luft ved loftsniveau strømmede ned og samles med den indblæste loft over indgangene, hvorefter den blev "løftet" op af de termiske kræfter som følge af personernes varmeafgivelse, hvorefter luften strømmede mod udsugningsåbningerne ved gulvniveau og under stolerækkerne som antydet på figur 3.9b. Heraf blev det vurderet, at resultatet indikerede det globale strømningsfelt blev styret af en interaktion mellem den indblæste luft og plumen genereret af personerne. [Stamou et al., 2008b] Herudover viser studiet omtalt i [Stamou et al., 2008b], at der er en korrelation mellem temperaturen og strømningsfeltet i rummet, som det også var tilfældet for studiet omtalt i [Stamou et al., 2008a].



Figur 3.10: Temperatur og farten for rummets yz-plan i afstanden x = 30 m, hvor indblæsningstemperaturen på 16 °C og en personbelastning på 3000 personer med en samlet konvektiv varmeafgivelse på 212.382 W [Stamou et al., 2008b].

I et studie udført af [Stamou et al., 2007] er temperaturerne og luftstrømningen undersøgt i *Nikea Indoor Stadium* vha. en numerisk model. Arenaen har en kapacitet på 5191 tilskuer med et areal på 1200 m^2 , hvor den virkelige geometri og den anvendte til modelleringen kan ses på figur 3.11.

Arenaen er ventileret efter opblandingsprincippet, hvor der indblæses frisk luft fra to niveauer i loftet, på fronten af den øverste tribune samt på bagvæggen bag atleterne og den opblandede luft udsuges ved gulvniveau. De anvendte randbetingelser for den numeriske modellering af *Nikea Indoor Stadium* er identiske med de ovenfor beskrevne for *Galatsi Arena*, hvorfor der henvises dertil. Halvdelen af arenaen er kun modelleret, eftersom den er symmetrisk, hvor der er anvendt et ustruktureret beregningsnet til den numeriske model af arenaen, som kan ses på figur 3.12. Celleantallet blev fastlagt til omtrent 2,1 mio ud fra en netpunktsanalyse men størrelsen samt indflydelsen af de forskellige net, som er indgået i netpunktsanalysen, er ikke omtalt. Omkring varmekilder i form af personer samt indblæsning og udsugning er tætheden af beregningsnettet øget, som antydet på figur 3.12 for at minimere simuleringsfejlen [Stamou et al., 2007]. Endvidere fremgår det, at der er anvendt et relativ groft net for det "frie" strømningsområde.



(a) Virkelig geometri.

(b) Modelleret geometri.

Figur 3.11: Illustration af den virkelige og modellerede geometri af Nikea Indoor Stadium [Stamou et al., 2007].



Figur 3.12: Illustration af det anvendte beregningsnet for den numeriske model [Stamou et al., 2007].

På figur 3.13 er temperaturen og farten gengivet for rummets yz-plan ved x = 5,0 m opnået med den numeriske beregningsmodel af Nikea Indoor Stadium gengivet.


(b) Fart, gengivet i m/s.

Figur 3.13: Temperatur og fart for rummets yz-plan ved x = 5,0 m simuleret med den numeriske model [Stamou et al., 2007].

I området med atleter blev der fundet at herske et tilnærmelsesvist ensartet temperaturfelt, hvor der blev fundet en tendens til termisk stratifikation ved publikum, som det er antydet af figur 3.13a. Af figuren kan det endvidere ses, at der skabes én samlet plumen over personerne i de to niveauer, hvor personerne sidder. For strømningsfeltet blev det fundet, at luften recirkulerer i to zoner, som dækker det meste af arenaen som antydet på figur 3.13b. Strømningens retning bliver påvirket af den termiske opdrift forårsaget af personernes varmeafgivelse, hvormed der opstår en interaktion mellem luftstrålerne fra indblæsningsåbningerne og plumen over personerne som det er antydet af figur 3.13b.

I et studie udført af [Stathopoulou og Assimakopoulos, 2008] er indeklimaet undersøgt for en arena til basketball både eksperimentelt og numerisk. Dette er udført for fire cases, en med luftkonditionering uden opvarmning eller køling, en opvarmnings- og kølingssituation samt for et stævne, hvor hallen bliver påført en termisk belastning i form af personerne. Kølingssituationen var dog en fiktiv opstillet case. Den betragtede basketballhal i studiet har et indendørsareal på 1125 m^2 og en frihøjde på 22 m. Som følge af symmetrigrunde



blev kun en fjerdedel af basketballhallen modelleret med en størrelse på $45 \times m$ $45 \times m$ 22 m, som vist på figur 3.14, hvor placeringen af målepunkter også kan ses.

Figur 3.14: Illustration af den anvendte CFD model [Stathopoulou og Assimakopoulos, 2008].

Randbetingelsen for alle afgrænsende flader defineres ud fra en overfladetemperatur, som er målt med infrarød sensor med undtagelse casen, hvor der køles. Randbetingelsen for indblæsningerne og udsugningerne defineres af en målt temperatur og lufthastighed. For situationen hvor hallen påføres en termisk belastning, i form af personerne defineres disse ikke geometrisk. Varmeafgivelsen fra de 2000 personer opsættes som varmekilder på overfladen af siddepladserne, hvor der fra hver person regnes med en total varmeafgivelse på 115 W. Det er ikke præcist specificeret om dette svarer til summen af den frie og bundne varmeafgivelsen, men ved tabelopslag i f.eks. [Stenn-Thøde et al., 2001] for et aktivitetsniveau omkring 1 – 1,2 met vil en varmeafgivelse på 115 W svarer til summen af den frie og bundne varmetab. Når rummet påføres en termisk belastning fra personer blev et beregningsnet med et celleantal af 91×142×48 anvendt, hvor den mindste cellestørrelse er 0,49 m×0,30 m×0,46 m. Når rummet ikke blev påført en termisk belastning fra personer var celleantallet 71×107×46 med en mindste cellestørrelse på 0,63 m×0,42 m×0,48 m. På figur 3.15 kan det anvendte strukturerede beregningsnet ses.

Af figur 3.15 fremgår det, at tætheden af beregningsnettet øges omkring indblæsnings- og udsugningsåbningerne. Som kommerciel CFD kode er der anvendt *PHOENICS* og som turbulensmodel anvendes $k - \epsilon$ modellen.



Figur 3.15: Illustration af den anvendte CFD model [Stathopoulou og Assimakopoulos, 2008].

3.3 Teatre

I et studie udført af [Kavgic et al., 2008] er det termiske indeklima simuleret ved anvendelsen af CFD for et teater lokaliseret i Belgrade, Serbien. Teateret har en dimensionen $28 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 11 \text{ m}$, hvor teaterets galleri er i den bagerste del af rummet ved gulvniveau samt en balkon, som det kan ses på figur 3.16. I teatret er der anvendt fortrængningsventilation, hvor frisk luft indblæses med hvirveldiffusorer ved gulvniveau samt under sædderne og ved balkonens gulvniveau. Udsugning sker i auditoriets loft over balkonen. Under to forestillinger med 467 gæster blev parametrene CO₂-koncentrationen, lufttemperaturen, relativ fugtighed og lufthastigheder målt i tre punkter hhv. en på balkonen nær en udsugning, MPP1, og to i en siddende persons hovedhøjde, MPP2 – MPP3, ligeledes på balkonen jf. figur 3.16. Endvidere blev væggenes overfladetemperatur målt med en infrarød sensor i begyndelsen af en forestilling.

Til opstilling af randbetingelserne for CFD modellen af teateret er der for de afgrænsende vægflader anvendt den målte overfladetemperatur. Personer er modelleret som kubiske rektangler, men der ikke angivet nogen højde, bredde eller længde heraf. Fra randen af hver person regnes der med en total varmeafgivelse på 115,5 W fordelt med 60,5 W og 55 W til hhv. det frie og bundne varmetab. Den bundne varmetab inkluderes for den numeriske model ved at definere en fordampning svarende til 55 g/h fra hver person. I modellen blev indflydelsen af CO_2 -koncentrationen modelleret ud fra kilde, som afgav 450 ppm CO_2 . Herudover er der også medtaget en varmebelastning på 19.600 W hidrørende fra belysningen på scenen. Indblæsningsluftens randbetingelse er defineret ud fra en temperatur, volumenstrøm, fugtighed samt indholdet af CO_2 . Randbetingelsen for udsugningerne opsættes ud

fra åbningsarealet og tryktabet herover. Den numeriske modellering er foretaget i programmet *PHOENICS* med en $k - \epsilon$ turbulensmodel med et beregningsnet af $140 \times 153 \times 75$ celler.



Figur 3.16: Illustration af den anvendte CFD model [Kavgic et al., 2008].

På figur 3.17 er temperaturen og farten for rummets xz-plan i afstanden y = 10 m som er simuleret med den numeriske model af teateret gengivet.

Simuleringsresultatet indikerede, at den termiske stratifikation og strømningsmønster svarede til det forventelige billede for rum som ventileres efter fortrængningsventilation. For sådanne rum bliver den bliver luften normalt indblæst med undertemperatur, hvorefter den stiger op ad i rummets højde som følge af den bliver opvarmet af varmekilder i det givne rum [Skistad et al., 2002]. Denne tendens kan ses, at indtræffe for de forventede temperaturer og strømning i det pågældende teater med den numeriske model heraf jf. figur 3.17.



(b) Fart, gengivet i m/s.

Figur 3.17: Temperaturen og farten for teaterets xz-plan i afstanden x = 10 m opnået med den ovenfor beskrevne numeriske model [Kavgic et al., 2008].

I tabel 3.1 og 3.2 kan en opsummering over de ovenfor omtalte CFD-cases ses, hvor de primære randbetingelse er listet.

	[Noh et al., 2007]	[Cheong et al., 2003]	[Holmes og Tucker, 2002]	[Stamou et al., 2008a]
Rumtype Ventilationsprincip	Forelæsningslokale Opblanding	Auditorium Opblanding	Forelæsningslokale Opblanding	Auditorium Opblanding
Antal personer	30	100	30	800
Personmodel	Kubisk rektangel	Skinneben, lår, krop og hoved af kubiske rek- tonelor	Kubisk rektangel	Flade
Volumen	$1,62\mathrm{m}^3$	nauguer -	ı	ı
Varmeafgivelse				
Fri	Overflade-	$42 \mathrm{W}$	$100 \mathrm{W}$	70 W
Konvektion	temperatur på $38^{\circ}\mathrm{C}$	I	$50 \mathrm{W}$	70 W
Stråling		1	50 W	1
Bunden		I	1	- 11/00/0
Forurening, CO2				U,UU41/S
Afgrænsende flader	<i>U</i> -værdi og udvendig tem- peratur	Overfladetemperatur	U-værdi, udetemperatur og ind- vendig overfladetemperatur	A dia batiske
Beregningsnet				
Netpunktsanalyse	$_{ m Ja}$	$_{ m Ja}$	Nej	$_{ m Ja}$
Detaljeret omtalt	Nej	Nej	Nej	Nej
Antal celler	450.000	I	1	$1,5\mathrm{mio}.$
Nettype	Struktureret	Ustruktureret	1	Ustruktureret
$\operatorname{Program}$	STAR-CD	Fluent	I	CFX
Turbulensmodel	$k - \epsilon$	I	$k-\epsilon$	SST
Tabel 3.1: Oversigt for	den anvendte personmodel, ran	dbetingelser samt beregnings	met og benyttet CFD kode for casene e	omtalt i [Noh et al.,
ZUU7], [Uneong et al., ZU	U3], [Holmes og Tucker, ZUUZ] og	g [Stamou et al., 2008a].		

	[Stamou et al., 2008b]	[Stamou et al., 2007]	[Stathopoulou og A makopoulos, 2008]	ssi- [Kavgic et al., 2008]
Rumtype	Arena	Arena	Arena	Teater
Ventilationsprincip	Opblanding	Opblanding	Opblanding	Fortrængning
Antal personer	3000	2596	2000	467
Geometri	Kubisk rektangel	Kubisk rektangel	Flade	Kubisk rektangel
Areal	$1.6 \mathrm{m}^2$	$1.6 \mathrm{m}^2$	I	I
Varmeafgivelse				
Fri	$43,7{ m W/m^2}$	$43,7\mathrm{W/m^2}$	I	$60,5\mathrm{W}$
Konvektion	$43,7 { m W/m^2}$	$43.7 { m W/m^2}$	I	I
$\operatorname{Stråling}$	I	I	I	I
Bunden	I	I		$55~\mathrm{W}~/~55~\mathrm{g/h}$
Total			$115 \mathrm{W}$	$115,5 \mathrm{W}$
Forurening, CO_2	I	I		Kilde på 450 ppm
Afgrænsende flader	Adiabatiske	Adiabatiske	Overfladetemperatur	Over fladet emperatur
Beregningsnet				
Netpunktsanalyse	Ja	Ja	Nej	Nej
Detaljeret omtalt	Nej	Nej	Nej	Nej
Antal celler	$4 \operatorname{mio}$.	2,1 mio.	620.000	1,6 mio.
Nettype	Ustruktureret	Ustruktureret	Struktureret	1
Program	CFX	CFX	PHOENICS	PHOENICS
Turbulensmodel	SST	SST	$k-\epsilon$	$k-\epsilon$

Tabel 3.2: Oversigt for den anvendte personmodel, randbetingelser samt beregningsnet og benyttet CFD kode for casene omtalt i [Stamou et al., 2008], [Stamou et al., 2007], [Stathopoulou og Assimakopoulos, 2008] og [Kavgic et al., 2008].

Kapitel 4

Interviews

I forbindelse med litteraturstudiet er der foretaget en undersøgelse af, hvordan CFD anvendes og opstilles i praksis for store rum med mange mennesker ud fra interviews med fire danske rådgivende ingeniørvirksomheder, som i det efterfølgende benævnes hhv. Firma 1 – Firma 4. Formålet med interviewene er, at anskueliggøre om der tages hensyn til en eventuel termisk interaktion mellem personer, hvilken detaljeringsgrad personerne modelleres med og personernes varmeafgivelse. De stillede spørgsmål kan ses i appendiks G.

4.1 Firma 1

For rum med stor personbelastning betragtes personerne som værende enkeltstående, hvor der anvendes to forskellige udgaver til gengivelse af personernes geometri. For den første udgave anvendes en cylinder med en radius på 0,1-0,2m og en højde på 1,3-1,6m i afhængighed om personerne er stående eller siddende til gengivelse af en persons geometri. Som anden udgave til gengivelse af en persons geometri benyttes en forsimplet tredimensionel udgave af en siddende persons silhuet, af typen som den på figur 4.1 viste.

For år tilbage blev der dog anvendt en flade til modellering af mange personers geometri som følge af computerressourcer. For personerne regnes der med en fri varmeafgivelse hidrørende fra konvektion og stråling på 100 W, hvor der anvendes en 50/50 fordeling. Der ses bort fra den bundne varmeafgivelse og CO_2 -afgivelse fra personerne.



Figur 4.1: Illustration af den ene anvendte persongeometri i firma 1. Alle mål i mm

Den termiske randbetingelse for de afgrænsende rande af et rum foreskrives af en ydre temperatur og konstruktionens varmetransmissionstal, hvor den indvendige overgangsisolans ikke medregnes. Såfremt den ydre temperatur er temperaturen i et naborum defineres denne ved erfaringer ud fra lignende cases. Med kendskab til fladernes finish og fordelingen af varmeafgivelsen ved konvektion og stråling håndteres energiudvekslingen som følge af strålingsudvekslingen direkte af det anvendte CFD program. Som kommerciel CFD kode anvendes ANSYS-CFX til simuleringer af luftstrømninger med turbulensmodellen Shear Stress Transport, SST. Casene simuleres altid i fuldskala med et celleantal op til 40 millioner men normalt omkring 10 millioner.

4.2 Firma 2

Personerne betragtes som værende enkeltstående, hvor geometrien heraf gengives af et kubisk rektangel, hvis samlede højde og overfladeareal hhv. er 1.7 m og 1.8 m^2 svarende til omtrentlig en normal person. Den samlede varmeafgivelse fra hver person defineres som en konvektiv varmeflux på 100 W ligeligt fordelt på personens overflade. Der regnes ikke med strålingsudveksling mellem hhv. rummets afgrænsende flader samt personerne og rummets afgrænsende flader. De afgrænsende flader for et rum regnes som værende adiabatiske, hvor indblæsningsluftens randbetingelse defineres af en temperatur og volumenstrøm. Der regnes ikke med den bundne varmeafgivelse samt CO₂-afgivelsen fra personerne.

Casene simuleres altid i fuldskala, hvor der hidtil er benyttet CFD koden *Fire Dynamics Simulator*, FDS, der anvender Large Eddy Simulation, LES, som turbulensmodel, men er ved at overgå til CFD koden OpenFOAM, bl.a. for at kunne benytte andre turbulensmodeller og mere komplicerede beregningsnet.

4.3 Firma 3

Personerne behandles som enkeltstående ud fra en kubisk rektangulær geometri svarende til en siddende person med en dimension på $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$. Der regnes med en samlet varmeafgivelse fra personerne på 100 W, hvor der regnes med en 50/50 fordeling af konvektion og stråling. Fra personernes overflade defineres en varmeflux for hhv. konvektionsog strålingsbidraget ved at opsætte en fordeling mellem stråling og konvektion.

Overfladetemperaturen af de indvendige afgrænsende flader samt rumluften bestemmes for den pågældende case vha. programmet *IESVE* eller *BSim*. I *IESVE/BSim* benyttes nogle gange en simpel strålingsmodel, hvormed strålingen indirekte indgår i fladernes temperatur. Når strålingen er medtaget i randbetingelserne bestemt af IESVE eller BSim opsættes der kun en konvektiv varmeafgivelse fra personerne.

Til at foretage CFD simuleringen anvendes *IESVE* eller *Fluent* og som turbulensmodel benyttes en $k - \varepsilon$ model, hvor beregningsnettet øges omkring områder af "særlig" vigtighed såsom indblæsning, udsugning og personer.

4.4 Firma 4

For rumtyper som teatre, koncertsale etc., modelleres personerne ikke geometrisk, men varmeafgivelse medregnes ud fra kendskab til antallet af personer, som forventes at være i det pågældende rum. Varmeeffekten fra personerne inkluderes ved at definere et volumen, hvor varmen afgives som en kilde til luften. Størrelsen af voluminet er lig den ydre afgrænsning af personerne. Den fra voluminet afgivende varme svarer til den total frie varmeafgivelse fra personerne hidrørende fra konvektion og stråling, hvor der regnes med 80 W pr. person. Der regnes ikke med den bundne varmeafgivelse fra personerne samt CO_2 -afgivelsen.

For mindre rumtyper såsom kontorer modelleres personerne ud fra en tredimensionel silhuet af en person, som den på figur 4.1 viste, dog med en bredde af kroppen på 300 mm i overensstemmelse med den anvendte persongeometri af [Topp et al., 2003b]. Fra overfladen af persongeometrien påføres en varmeflux opdelt i et bidrag fra konvektion og stråling begge på 50 W.

De afgrænsende fladers randbetingelse defineres enten ud fra en varmeflux inkluderende bidraget fra konvektion og stråling eller en overfladetemperatur. Værdierne bestemmes ud fra en BSim simulering af det pågældende rum. Der anvendes dog altid overfladetemperaturer for de afgrænsende flader, når personerne ikke modelleres geometrisk. Der simuleres altid fuldskala, hvor den kommercielle CFD kode Star CCM+ anvendes med en $k - \varepsilon$ turbulensmodel.

I tabel 4.1 er der opstillet en oversigt over den anvendte personmodel, randbetingelser og den benyttede CFD kode, når CFD anvendes for store rum med en stor personbelastning for de fire rådgivende ingeniørvirksomheder, som deltog i interviewene.

		Firr	na	
	1	2	3	4
Personmodel	Cylinder, tredimensionel silhuet af siddende person	Kubisk rektangel	Kubisk rektangel	Modelleres ikke geometrisk
Varmeafgivelse Fri				
Konvektion	$50 \mathrm{W}$	$100 \mathrm{W}$	$50 \mathrm{W}$	80 W pr.
Str åling	$50 \mathrm{W}$		$50 \mathrm{W}$	person
Bunden		ı		
CO _{2-a} fai malsa		1		
Afgrænsende flader	Ydre temperatur samt	Adiabatiske	Overfladetemperatur	Overfladetemperatur
	varmetransmissionstal			
$\operatorname{Program}$	ANSYS-CFX	FDS/OpenFoam	IESVE/Fluent	$Star \ CCM+$
Turbulensmodel	SST	$k - \varepsilon$	$k - \varepsilon$	k-arepsilon

L.	
Ę.	
ĕ	
q.	
Ħ	
S	
ų.	
-E	
5	
ō.	
ē	
е С	
п.	
Ð	
р	
er	
ĕ	
.20	
d	
୍ୟ	
5	
re	
Ĥ	
÷	
le	
Ч	
ŏ	
Å	
\cap	
F.	
E	
\cup	
le	
. OC	
Ť.	
X	
ď	
ě	
<u> </u>	
ŋ	
-H	
~	
e	
č	
ē	
\mathbf{ls}	
e	
ã	
÷Ξ	
ē	
- P	
5	
aı	
r	
J,	
Чe	
ŏ	
Ď	
nı	
Ö	
r_{s}	
)e	
14	
te	
ġ	
n.	
Ϋ́	
n	
g	
n	
le	
or	
Ţ	
£	
·3	
\mathbf{rs}	
Je.	
Ľ	
\cup	
<u></u>	
4	
E	
)e	
зŁ	
Ĩ	
L 1	

Del II

Undersøgelse af personers termiske interaktion

Kapitel 5

Forsøg

Ud fra litteraturstudiet omtalt i kapitel 2 blev der fundet svage indikationer på, at der ikke vil indtræffe nogen termisk vekselvirkning mellem personer for den tæthed som kan forventes i en biograf, koncertsal etc. Den tilgængelig viden blev dog fundet, at være begrænset hvorfor det vælges og opstille et forsøg til anskueliggørelse af, om der sker en ændring i en gruppe personers overfladetemperatur i afhængighed af persontætheden. Derforuden er gruppens termiske opfattelse i afhængighed af persontætheden også undersøgt samt temperaturen af det anvendte rums afgrænsende flader. I det nærværende kapitel beskrives først det anvendte auditorium til forsøget, hvorefter en beskrivelse af selve forsøget følger. Dette efterfølges af de observationer, som er gjort i forbindelse med forsøget og en undersøgelse af persontæthedens indflydelse på den forventede reduktion af en persons samlede vinkelforhold til det pågældende rums afgrænsende flader som følge af de omsluttende personernes afgrænsning.

5.1 Beskrivelse af forsøgsrum

Til forsøget anvendes et auditorium, rum F-108, tilhørende Aalborg Universitet lokaliseret på Sohngårdsholmsvej. Det anvendte rum har en størrelse af $15,90 \text{ m} \times 10,56 \text{ m}$ og en rumhøjde på 6,00 m, som det kan ses på figur 5.1. Af rummets afgrænsende vægge vender to mod ydre omgivelser og de to resterende mod tilstødende rum, som det er antydet af figur 5.1. I rummet er der opsat ni radiatorer til opretholdelse af den ønskede operative temperatur med placeringerne, som kan ses på figur 5.1. Auditoriet har plads til 166 personer fordelt over 9 rækker med forskudt højde, hvor opbygningen af stolerækkerne kan ses på figur 5.1, hvor hvert trappetrin har en højde på 19,5 cm.



Figur 5.1: Skitsering af det anvendte auditorium, hvor nummereringen af indblæsningsdyserne kan ses på snit C-C. Alle mål i mm.

I den ene ydervæg er der placeret et stort vinduesparti med en bredde og højde på $7,00 \text{ m} \times 6,00 \text{ m}$, hvor der er monteret to typer gardiner hhv. en tætvævet og en solafskærmende. På figur 5.2 kan vinduespartiet samt de to gardintyper ses. For at minimere ensidig varmeafgivelse fra personerne til det store vinduesparti er begge gardiner rullet for under hele forsøget.



(a) Vinduespartiet.

(b) Gardintyper.

Figur 5.2: Vinduespartiet og de to typer gardiner.

For at forbedre akustikken i rummet er der i loftet monteret nedhængte akustikbafler, hvor placeringen og mængden kan ses på figur 5.3. På rummets bagvæg er der ligeledes opsat lydabsorberende materiale, der er beklædt af en træramme, som det er antydet af figur 5.3.



Figur 5.3: Illustration af de i loftet monteret nedhængte akustikbafler.

Som belysning er der i loftet monteret 28 lysstofarmatur hver med en effekt på omtrent 30 W, hvor et udsnit kan ses på figur 5.3.

5.1.1 Ventilation

Det betragtede auditorium er en del af et større rum, som tidligere var en stor festsal, men er nu opdelt i tre rum som antydet på figur 5.4. Efter denne ændring af rummet ventileres nu kun rum F-108 og F-109, som er forelæsningslokaler, hvor F-110 er et klimalaboratorium. Til forsøget anvendes som tidligere nævnt rum F-108. Fremførings- og returkanalen til luften, markeret med stiplet linier på figur 5.4, er støbte betonkanaler under gulvet.



Figur 5.4: Plan over det tilkoblede ventilationsanlæg og placering af de tre rum F-108, F-109 og F-110.

Indblæsning

Der indblæses via elleve indblæsningsdyser placeret i den modsatte væg af vinduespartiet, hvor placeringen af indblæsningsdyserne og en detalje kan ses på figur 5.5. Foran indblæsningsdyserne er der monteret 17 lodrette træstolper jf. figur 5.5, hvilket må forventes at få en indflydelse på strømningen i rummet. Indblæsningsdyserne har en en ydre diameter på 135 mm og en længde målt fra væggen på 300 mm.

Udsugning

I auditoriet er udsugningen placeret ved gulvniveau foran vinduespartiet, hvor den opblandede luft udsuges via otte udsugningsrister. På figur 5.6 kan placeringen for syv af de otte udsugningsrister ses, hvor hver udsugningsrist har en en dimension på $10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$.



Figur 5.5: Placering af de elleve indblæsningsdyser og detalje af en indblæsningsdyse.



Figur 5.6: Placering for syv af de otte udsugningsrister og detalje af en udsugningsriste.



På figur 5.7 er en principskitse af ventilationsanlægget, som er tilkoblet rum F-108 og F-109, illustreret.

Figur 5.7: Principskitse af det til rummene F-108 og F-109 tilkoblede ventilationsanlæg.

Anlægget forsyner de to rum med en konstant volumenstrøm, uanset den på rummet påførte termiske belastning. Som det fremgår af figur 5.7, bliver luften delvis recirkuleret, hvor mængden afhænger af temperaturen i de to rum. Dette skyldes, anlægget er opsat til at indblæse med konstant temperatur, og da den udsugede luft fra rummene delvis blandes med frisk luft samt går til afkast jf. figur 5.7, vil en for lille mængde tilført frisk luft kunne medføre en for høj indblæsningstemperatur. For at kompensere for dette vil anlæggets regulering gribe ind ved at øge friskluftindtaget og regulere på ventilen til varmefladen. Til dette formål måles temperaturen af indblæsningsluften i indblæsningskanalen, som sammenlignes med den ønskede indblæsningstemperatur. Reguleringen af indblæsningstemperaturen foretages i afhængighed af afvigelsen mellem den ønskede indblæsningstemperatur og den målte værdi i indblæsningen. Følerne til måling af rumtemperaturen anvendes til styring af radiatorerne i de to rum.

Under forsøget ønskes luften ikke at blive recirkuleret, hvorfor anlægget opsættes til 100 % "friskluft", hvormed en for høj/lav temperatur i naborummet ikke forventes, at vil få indflydelse på indblæsningstemperaturen. Som senere beskrevet i afsnit 5.2 tilstræbes en operativ temperatur på 22 °C i auditoriet, hvorfor indblæsningstemperaturen sættes til 20 °C.

5.1.2 Luftfordelingsprincip

Ved anvendelse af en røgmaskine og røgpipette er rummets strømningsmønster undersøgt inden forsøget, hvor de gjorte observationerne er opsummeret på figur 5.8.



Figur 5.8: Skitsering af observeret luftstrømning i det anvendte auditorium.

Som antydet på figur 5.8 med den fede hvide linie penetrerer luftstrålen hele rummet, hvorefter den recirkulerer gennem opholdszonen, hvilket indikerer, at der ventileres efter opblandingsprincippet. Dette stemmer også overens med placeringen af indblæsningsog udsugningsåbningerne. Øverst i rummet blev en stagnation af luften observeret markeret med den tynde hvide linie på figuren. For at anskueliggøre om der er en ensartet hastighed for de elleve indblæsningdysers udmunding, er centerhastigheden blevet målt for hver indblæsningsdyse. Resultatet heraf kan ses i tabel 5.1, hvor nummereringen af indblæsningsdyserne fremgår af af snit C-C på figur 5.1.

Indblæsning [nr]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Hastighed [m/s]	$7,\!98$	8,25	$5,\!86$	$5,\!15$	7,43	7,26	6,79	$6,\!67$	1,5	$1,\!95$	$0,\!67$

Tabel 5.1: De målte centerhastigheder i afhængighed af indblæsningsdysens placering. For nummerering henvises der til figur 5.1 snit C-C.

Som det fremgår af tabel 5.1 hersker der ikke ensartede centerhastigheder for indblæsningsdyserne, hvor den største afvigelse er for indblæsningsdyse ni, ti og elleve. Fordelingen af centerhastighederne vurderes at være årsagen til stagnationen af luften i det øvre hjørne af rummet jf. figur 5.8. Endvidere blev der også konstateret et relativt stort kuldenedfald ved det store vinduesparti.

Auditoriets luftskifte er blevet bestemt til $1,68 h^{-1}$ ud fra et afklingningsforsøg, hvilket er mere detaljeret beskrevet i appendiks C. Det fundne luftskifte svarer til en volumenstrøm på $1692 m^3/h$, da rummets totale volumen er $1007 m^3$.

5.2 Forsøgsbeskrivelse

Til anskueliggørelse af om en termisk vekselvirkning mellem personer indtræffer for rumtyper såsom biografer, koncertsale, auditorier etc., opstilles der et forsøg, som opdeles i fire etaper, hvortil der anvendes fire forskellige persondensiteter. For etape 1, 2, 3 og 4 anvendes der en persondensitet på hhv. 50, 24, 10 og 3 personer. Herved er det muligt, at anskueliggøre om der sker en ændring i personernes overfladetemperatur, som følge af kroppens forventede reducerede strålingsudveksling med de omkringliggende flader og en eventuel termisk vekselvirkning mellem personerne.

Til forsøget deltager 50 frivillige studerende fra 3. – 9. semester fra sektoren Byggeri & Anlæg ved Aalborg Universitet. Af de 50 deltagere er ti af dem udvalgt på forhånd for at have en population med tilnærmelsesvis ens højde og vægt for de to sidste etaper. Under forsøget tilstræbes flest mulig at være i en tilstand af termisk komfort, hvorfor setpunktet for den operative temperatur kan findes til 22 ± 1 °C for forventningsklasse I jf. [DS 15251, 2007]. Dette er ud fra antagelsen, at forsøgspersonerne forventes og have et aktivitetsniveau på 1,2 met svarende til stillesiddende kontorarbejde [Fanger, 1972] og en gennemsnitlig beklædning på 0,9 clo. Til forsøget er det af vigtighed, at forsøgspersonerne er akklimatiseret, hvorfor det er valgt først at starte forsøget kl. 13, hvor deltagerne indtil dette tidspunkt har siddet i deres grupperum og lavet projektarbejde fra cirka kl. 8. Grupperummene antages, at have tilnærmelsesvis samme termiske tilstand som auditoriet samt den lette gåtur fra grupperummene til auditoriet ikke påvirker deres akklimatisering nævneværdigt.

Hver af forsøgets fire etape har en varighed af cirka 17 minutter, hvor forsøgspersonerne efter 13 minutters forløb af hver etape bliver bedt om at udfylde et spørgeskema vedrørende opfattelsen af deres komfort samt oplysninger om beklædning, køn, alder, vægt og højde. For udformning af spørgeskemaet henvises der til appendiks D. Under forsøget måles overfladetemperaturen af personerne og de afgrænsende flader, lufttemperaturen, den relative luftfugtighed samt CO_2 -koncentrationen, hvor placeringen og mængden af målepunkter omtales senere i afsnit 5.2.2.

5.2.1 Opstillinger

Som tidligere nævnt er forsøget opdelt i fire etaper, hvor der anvendes følgende tætheder af personer:

- Etape 1 50 personer, tætheden kan ses på figur 5.9
- Etape 2 24 personer, tætheden kan ses på figur 5.10
- Etape 3 10 personer, tætheden kan ses på figur 5.11
- Etape 4 3 personer, tætheden kan ses på figur 5.12



(a) Plantegning af forsøgspersonernes tæthed.



(b) Fotografi af forsøgspersonernes tæthed.





(a) Plantegning af forsøgspersonernes tæthed.



(b) Fotografi af forsøgspersonernes tæthed.

Figur 5.10: Placering af 24 forsøgspersoner for etape 2.

ΡΞ –	
b-	
-	
-	
P=	
62	
P-	
6-	
-	
FE .	
Þ	



(a) Plantegning af forsøgspersonernes tæthed.

(b) Fotografi af forsøgspersonernes tæthed.



Figur 5.11: Placering af 10 forsøgspersoner for etape 3.

(a) Plantegning af forsøgspersonernes tæthed.

(b) Fotografi af forsøgspersonernes tæthed.

Figur 5.12: Placering af 3 forsøgspersoner for etape 4.

I tabel 5.2 kan fordelingen af mænd og kvinder samt middelværdien af deres alder, vægt, overfladeareal, \overline{A}_{Du} , og beklædning, \overline{I}_{cl} for deltagerne ses for de fire etaper. For en mere detaljeret indblik i fordelingen henvises der til appendiks E, hvor alderen, vægten samt overfladearealet er belyst ved histogrammer.

Til bestemmelse af beklædningens isolans for personerne er der anvendt vejledende værdier for beklædningsgenstandenes isolans jf. [DS 9920, 2003], hvor værdierne, som er benyttet, kan ses af tabel E.1 i appendiks E. Som det fremgår af tabel 5.2, har den gennemsnitlig beklædning for personerne antaget en lavere værdi end den forventede på 0,9 clo. For personerne vil dette eventuelt kunne medføre et ønske om en højere værdi af den operative temperatur end den foreskrevne på 22 ± 1 °C, men ud fra [CR 1752, 2001] er det dog fundet, at indflydelsen af den lavere beklædning end den forventede er af mindre betydning for intervallet af den operative temperatur.

Etape	Antal m/k $[stk]$	Alder $[ar]$	Vægt [kg]	$\overline{A}_{Du} \ [\mathrm{m}^2]$	\overline{I}_{cl} [clo]
1	41/9	23	77	1,96	$0,\!66$
2	20/4	23	79	2,00	$0,\!68$
3	10/0	24	83	2,04	$0,\!80$
4	3/0	26	86	$2,\!10$	0,74

Tabel 5.2: Fordelingen af mænd og kvinder samt middelværdien af alder, vægt, overfladeareal, \overline{A}_{Du} , og beklædning, \overline{I}_{cl} , for forsøgspersonerne i de fire etaper. For en mere detaljeret indblik i fordelingen henvises der til appendiks E. I tabellen angiver m og k hhv. mand eller kvinde.

5.2.2 Målepunkter

I auditoriet placeres der en række målepunkter til bestemmelse af temperaturen, hvoraf placeringen har betydning for, hvilken temperatur som måles. Overfladetemperaturen på rummets afgrænsende flader måles vha. termoelementer af typen K, som har en usikkerhed på $\pm 0,1$ °C, såfremt de er kalibreret [Hyldgård, 1997]. Kalibrering af termoelementerne kan findes i appendiks B. Ved måling af de afgrænsende fladers overfladetemperatur er det muligt, at anskueliggøre om der er ensartede temperaturprofiler for fladerne, samt i hvor høj grad en øget belastning påvirker dem.

Menneskets konvektive varmeafgivelse afhænger bl.a. af den omsluttende lufttemperatur jf. [Fanger, 1972], hvorfor det er af interesse at undersøge, hvad der sker med temperaturen af luften i afhængighed af personbelastningen. Lufttemperaturen måles i højderne 0,1 m, 0,6 m og 1,1 m over gulv svarende til hhv. ankelhøjde, tyngdepunkt og hovedhøjde for en siddende person. Derudover måles lufttemperaturen også i en højde af 2,0 m over gulv. Herforuden måles CO_2 -koncentrationen og den relative luftfugtighed i højderne 0,1 m, 1,1 m og 2,0 m over gulv. Lufttemperaturen, CO_2 -koncentrationen og den relative luftfugtighed måles i tre af de fire punkter med trådløse følere af typen GD47 fra producenten Eltek, som kan ses på figur 5.13.



Figur 5.13: Trådløs føler til måling af lufttemperatur, CO_2 -koncentrationen og relativ luftfugtighed af typen GD47.

De trådløsere følere er kalibreret for måling af temperatur og CO_2 -koncentration af Anna Marszal men ikke for den relative luftfugtighed. Af [Eltek Limited, 2009] er det opgivet, at måleusikkerheden for den relative luftfugtighed er 2%. Mængden af CO_2 måles også i indblæsningen og udsugningen gennem forsøget med en Brüel & Kjær Multipoint Sampler og Doser af typen 1303 og en Brüel & Kjær Multi-gas Monitor af typen 1302. Temperaturen af indblæsningsluften og den udsugede rumluft måles med termoelementer.

Målepunkternes endelig betegnelse og placering er angivet i tabel 5.3 og kan ses på figur 5.14.



Figur 5.14: Placering af målepunkterne i det anvendte auditorium. Alle mål i mm.

Element-		
nummer	Placering	Koordinater (x,y,z) mm
1	Overfladetemperatur, væg 1	(4335, 0, 1000)
2	Overfladetemperatur, væg 1	(2765, 0, 3000)
3	Overfladetemperatur, væg 1	(2765, 0, 5000)
4	Overfladetemperatur, væg 2	(0, 5280, 1000)
5	Overfladetemperatur, væg 2	(0, 5280, 3000)
6	Overfladetemperatur, væg 2	(0, 5280, 5000)
7	Overfladetemperatur, væg 3	(7590, 10.560, 2823)
8	Overfladetemperatur, væg 3	(7590, 10.560, 4941)
9	Overfladetemperatur, væg 4	(15.900, 9030, 2823)
10	Overfladetemperatur, væg 4	(15.900, 9030, 4941)
11	Overfladetemperatur, loft	(7590, 2640, 6000)
12	Overfladetemperatur, loft	(7590, 7920, 6000)
13	Overfladetemperatur, gulv	(7590, 5493, 790)
14	Overfladetemperatur, gulv	(7590, 7312, 1180)
15	Overfladetemperatur, gulv	(7590, 9146, 1570)
16	Overfladetemperatur, bord række 4	(5123, 5261, 1550)
17	Overfladetemperatur, bord række 6	(5123, 7061, 1940)
18	Overfladetemperatur, bord række 8	(5123, 8861, 2330)
19	Lufttemperatur og CO_2 , 100 mm over gulv, målesøjle 1	(2711, 7259, 1280)
20	Lufttemperatur, 600 mm over gulv, målesøjle 1	(2711, 7259, 1780)
21	Lufttemperatur og CO_2 , 1100 mm over gulv, målesøjle 1	(2711, 7259, 2280)
22	Lufttemperatur og CO_2 , 2000 mm over gulv, målesøjle 1	(2711, 7259, 3180)
23	Lufttemperatur og CO_2 , 100 mm over gulv, målesøjle 2	(5962, 6339, 1085)
24	Lufttemperatur, 600 mm over gulv, målesøjle 2	(5962, 6339, 1585)
25	Lufttemperatur og CO_2 , 1100 mm over gulv, målesøjle 2	(5962, 6339, 2085)
26	Lufttemperatur og CO_2 , 2000 mm over gulv, målesøjle 2	(5962, 6339, 2985)
27	Lufttemperatur og CO_2 , 100 mm over gulv, målesøjle 3	(8238, 7259, 1280)
28	Lufttemperatur, 600 mm over gulv, målesøjle 3	(8238, 7259, 1780)
29	Lufttemperatur og CO_2 , 1100 mm over gulv, målesøjle 3	(8238, 7259, 2280)
30	Lufttemperatur og CO_2 , 2000 mm over gulv, målesøjle 3	(8238, 7259, 3180)
31	Lufttemperatur og CO_2 , 100 mm over gulv, målesøjle 4	(10.504, 8160, 1475)
32	Lufttemperatur, 600 mm over gulv, målesøjle 4	(10.504, 8160, 1975)
33	Lufttemperatur og CO_2 , 1100 mm over gulv, målesøjle 4	(10.504, 8160, 2475)
34	Lufttemperatur og CO_2 , 2000 mm over gulv, målesøjle 4	(10.504, 8160, 3375)
35	Lufttemperatur og CO_2 , 100 mm over gulv, målesøjle 5	(13.475, 7259, 1280)
36	Lufttemperatur, 600 mm over gulv, målesøjle 5	(13.475, 7259, 1780)
37	Lufttemperatur og CO_2 , 1100 mm over gulv, målesøjle 5	(13.475, 7259, 2280)
38	Lufttemperatur og CO_2 , 2000 mm over gulv, målesøjle 5	(13.475, 7259, 3180)
39	Lufttemperatur og CO_2 ved indblæsning	(300, 6508, 4750)
40	Lufttemperatur og CO_2 ved udsugning	(15.860, 2260, 0)
41	Overfladetemperatur under bord	(7590, 5493, 1550)
42	Overfladetemperatur under bord	(7590, 7312, 1940)
43	Overfladetemperatur under bord	(7590, 9146, 2330)
44	Overfladetemperatur af personer	(15.852, 1500, 2930)

 Tabel 5.3:
 Oversigt over målepunkterne og deres betegnelse.

5.3 Pilotforsøg

Følgende afsnit omhandler en forundersøgelse af en gruppe personers overfladetemperatur ved en normal persontæthed målt vha. et termovisionskamera. Pilotforsøget blev foretaget under en forelæsning d. 1 december 2008 med omtrent 60 personer til stede, hvor der ikke er kendskab til fordelingen af køn, alder, vægt, højde og beklædning. Under forsøget sidder personerne i midten af auditoriet, som det er antydet af figur 5.15.



Figur 5.15: Placering af de omtrent 60 forsøgspersoner under pilotforsøget.

Personernes aktivitetsniveau antages, at være 1,2 met svarende til stillesiddende kontorarbejde [Fanger, 1972] og af figur 5.15 vurderes beklædningen gennemsnitlig at svare til cirka 0,9 clo. På figur 5.16 er personernes overfladetemperatur gengivet efter hhv. 10, 20, 30, og 40 minutters forløb af forelæsningen. Emissionstallet for menneskets hud er tæt på 1,0 og det meste beklædning har et emissionstal på 0,95 jf. [Fanger, 1972]. Til analysen anvendes derfor en middelværdi på 0,97.

Det er ikke entydigt, om personernes overfladetemperatur antager en højere værdi for de personer, som sidder i den indre kerne i forhold til personerne, der sidder i den ydre grænse, som det fremgår af figur 5.16. Af figuren fremgår det også, at personens siddestilling har betydning for den målte overfladetemperatur. For eksempelvis hvis en person sidder sammenbøjet, bliver en del af beklædningen udstrakt og kontakten med hudoverfladen øges, hvormed betingelsen for varmeledning må forventes at øges med en eventuel højere overfladetemperatur til følge. Dette kan ses at indtræffe for nogle af de studerende jf. figur 5.16. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan en film af den kontinuerlige overfladetemperatur målt under pilotforsøget ses. Den er placeret i mappen film/overfladetemperatur_af_personer/pilotforsøeg.wmv, hvor der vises 30 billeder/s.



(c) Efter 30 minutter.

(d) Efter 40 minutter.

Figur 5.16: Overfladet
emperatur af studerende under en forelæsning efter hhv. 10, 20, 30 og 40 m
inutters forløb.

Personernes overfladetemperatur er målt kontinuerligt gennem pilotforsøget ved, at der tages et termovisionsbillede af personerne hvert sekund. Heraf er det muligt, at anskueliggøre om der sker en ændring af personernes overfladetemperatur ved den pågældende persontæthed i løbet af forelæsningen, som antog en varighed af omtrent 45 min. Til at udføre analysen udvælges otte personer, hvor tre er placeret i midten af kernen og fem i den ydre kerne, hvoraf det er muligt, at anskueliggøre om persontætheden har en indflydelse på personernes overfladetemperatur. Placeringen af de otte udvalgte personer fremgår af figur 5.16. På de otte udvalgte personers overfladetemperaturen under forelæsningen. Størrelsen af de opsatte områder, hvor den stedslige middelværdi af personernes overfladetemperatur udregnes, kan ses på figur 5.16. Det dertilhørende temperaturprofil for de definerede områder på de otte personers overflade i afhængighed af tiden fremgår af figur 5.17.



Figur 5.17: Den stedslige middelværdi for overfladetemperatur af de otte udvalgte personer under forelæsningen. For nummerering af personerne henvises der til figur 5.16.

Som det fremgår af figur 5.17, hersker der en relativ stor variation for den stedslige middelværdi af personernes overfladetemperatur gennem pilotforsøget. Variation kan delvis skyldes, at personerne ændrer position under pilotforsøget, samt andre personers hoveder og arme går ind over de betragtede personers overflader under nogle af målingerne. Dette bekræftes af de pludselige udsving af den stedslige middelværdi af overfladetemperaturerne på figur 5.17, da menneskets overfladetemperatur ikke kan ændres flere grader momentant ved stillesiddende aktivitet [Fanger, 1972], [Parsons, 2003]. Det vælges derfor, at opdele forelæsningen i fire etaper af hver 10 min, hvor der bestemmes en tidslig middelværdi af de otte personers overfladetemperatur. Til dette formål anvendes de definerede områder til bestemmelsen af den stedslige middelværdi af de otte personers overfladetemperatur jf.

Etape				Delt	ager			
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	$27,\!5$	$27,\!5$	27,0	$27,\!8$	28,3	$28,\!3$	$28,\!5$	$28,\!8$
2	28,2	$26,\!6$	26,7	27,2	28,2	28,4	27,7	28,7
3	$27,\!8$	26,8	27,0	27,4	28,2	28,0	$27,\!8$	28,0
4	$27,\!8$	26,9	26,2	27,2	28,3	27,7	$28,\!6$	$28,\!0$

figur 5.16. Den tidslige middelværdier af de otte betragtede personers overfladetemperatur kan ses i tabel 5.4 i afhængighed af etapenummer.

Tabel 5.4: Tidslig middelværdi af personernes overfladetemperatur for hver af de fire etaper angivet i °C. For nummerering af personerne henvises der til figur 5.16.

Som det fremgår af tabel 5.4, tyder det på, at persontætheden ikke har den store indflydelse på overfladetemperaturen af personerne eftersom forskellen mellem de fire tidslige middelværdier for hver persons overfladetemperatur er minimal. Den højeste forskel i overfladetemperaturen, ud fra de tidslige middelværdier jf. tabel 5.4, er for person 2 og 3 på omtrent 0,9 °C, hvilket skyldes en ændring i personernes stilling jf. figur 5.16. Figur 5.17 og tabel 5.4 indikerer, at person 2 og 3 antager en lavere overfladetemperatur end den indre kerne, hvilket kan skyldes en randeffekt. Dette skal dog holdes op imod forskellen i beklædningen, da en let beklædning i forhold til en kraftig eventuel kan medføre en højere overfladetemperatur som følge af en lavere isolans jf. [Fanger, 1972] samt personernes stilling.

5.4 Måleresultater fra forsøg

I det følgende afsnit foretages en resultatbehandling af de målte værdier, som er fremkommet ved forsøget og de besvarede spørgeskemaer. Indledningsvis beskrives rummets tilstand under forsøget efterfulgt af undersøgelsen vedrørende personernes overfladetemperatur i afhængighed af personernes tæthed, hvorefter en opsummering af de besvarede spørgeskemaer følger. For de efterfølgende grafer anvendes der primært målepunktsnumre i signaturforklaringen, hvis placering fremgår af tabel 5.3 og figur 5.14.

5.4.1 Rumtilstand

I det anvendte auditorium og naborummet er der monteret en rumtemperaturføler i hvert af de to rum på en af det pågældende rums fire vægflader, som anvendes til styring af rummenes radiatorer. For forsøgsdagen er rumtemperaturen målt i det anvendte auditorium og naborummet, hvor det tidslige temperaturprofil i rummene kan ses på figur 5.18a



og indblæsningstemperaturens kan ses på figur 5.18b.

Figur 5.18: Rumtemperatur i F-108 og F-109 registeret via rummenes temperaturmåler samt det tidslige temperaturprofil for indblæsningsluften. På figur 5.18b angiver E1, E2, E3 og E4 hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

Der har under forsøget hersket ensartet rumtemperatur i rummene F-108 og F-109, hvoraf det følger, at rummene ikke vil have en dominerende indflydelse på hinanden under forsøget jf. figur 5.18a. Som det fremgår af figur 5.18b, har temperaturen af indblæsningsluften tilnærmelsesvist været 20 °C gennem forsøget som ønsket.

Overfladetemperaturen af auditoriets fire afgrænsende vægge kan ses på figur 5.19 i afhængighed af den på rummet påførte personbelastning. På figuren er de fire etaper afgrænset af de lodrette stiplede linier, hvor nummereringen af etaperne kan ses på figur 5.19a.

For etape 1 og 2 stiger væggenes overfladetemperatur svagt, hvor temperaturprofilet individuelt for væggene er ligedannet i dets højde, som det fremgår af figur 5.19. For de to sidste etaper, hvor der hhv. deltager ti og tre personer er overfladetemperaturen for vægfladerne tilnærmelsesvis konstant igennem den pågældende etape og falder når personerne forlader forsøgsrummet. Endvidere fremgår det af figur 5.19, at overfladetemperaturen for væg nummer tre stiger og falder hurtigere end de andre vægflader. Dette vurderes og skyldes fladen, hvorpå termoelementerne er fastgjort, er af træ, hvilket har en lavere varmekapacitet sammenlignet med de andre flader, som er opført af tunge materialer såsom mursten og gipsplader. For væg nummer et, to og fire er overfladetemperaturen faldende i højden, hvor overfladetemperaturen af væg nummer tre stiger i højden, som det fremgår af figur 5.19. Denne tendens tilskrives en lokal påvirkning fra radiatorerne, da varmepåvirkningen af væggenes overflade må forventes højere jo kortere, afstanden er til radiatorerne.



Figur 5.19: Tidslig forløb af de fire vægges overfladetemperatur i rummet. Opdeling af etaper fremgår af figure 5.19a, hvor E1, E2, E3 og E4 hhv. indikerer etape 1, 2, 3 og 4.

Rummets gulvtemperatur er målt i tre punkter mellem forsøgsdeltagerne og loftets overfladetemperatur i to punkter jf. tabel 5.3 og figur 5.14, hvis tidslige temperaturprofiler kan ses på figur 5.20.



Figur 5.20: Tidslig forløb af overfladetemperatur af gulvet og loftet i hhv. tre og to målepunkter, hvor opdelingen af etaper fremgår af figur 5.19a. På figur 5.20b angiver E1, E2, E3 og E4 hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

For målepunkt 13 og 14 indtræffer der et identisk temperaturprofil, hvor målepunkt 15 afviger kraftigt fra for etape 1 og 2 jf. figur 5.20a. Det relativ kraftige udsving i overfladetemperaturen for punkt 15 i etape 1 og 2 tilskrives enten en målefejl eller en lokal varmekilde fra en person i form af en let påklædt fod. Som for vægfladerne stiger overfladetemperaturen af gulvet svagt for de to første etaper og er tilnærmelsesvis konstant for etape 3 og 4 dog med et fald mellem disse etaper, som tilskrives reduktionen af personbelastningen. For de to målepunkter i loftet jf. figur 5.20b hersker ligeledes ligedannede temperaturprofiler, men antager højere værdier i forhold til væg- og gulvfladerne, hvilket indikerer en større varmeudveksling mellem forsøgsdeltagerne og loftet end for de andre flader.

Temperaturen af hhv. bordfladernes over- og underside er målt i tre punkter og det tidslige temperaturprofil fremgår af figur 5.21.

Der indtræffer ikke større afvigelse af den målte overfladetemperatur på bordenes overside i rummet, jf. figur 5.21a. Den generelle tendens er en voksende overfladetemperatur gennem hver etape som falder momentant, når personbelastningen reduceres. For etape 4 er de målte overfladetemperaturer dog tilnærmelsesvis konstante og gennem hele forsøget undergår bordfladerne maksimalt en temperaturstigning på omtrent 0,7 °C i forhold til starttemperaturen. Overfladetemperaturen af bordenes underside øges kraftigt gennem etape 1 og 2 med en maksimal stigning på 3 °C for målepunkt 43. Gennem etape 3 og 4 aftager overfladetemperaturen af bordenes underside lineært med undtagelse af punkt 41, som antager en tilnærmelsesvis konstant temperatur.


Figur 5.21: Tidslig forløb af overfladetemperatur for hhv. bordpladernes over- og underside i rummet. Opdeling af etaper fremgår af figur 5.21a, hvor E1, E2, E3 og E4 hhv. indikerer etape 1, 2, 3 og 4.

De i målesøjlerne monterede termoelementer og trådløse følere er ikke afskærmet fra strålingsudveksling med de omsluttende flader, hvormed der måles en mellemting af en overfladetemperatur og lufttemperatur, som i det efterfølgende kaldes for rumtemperaturen. I forsøgsrummet opstilles der i alt fem målesøjler, hvor rumtemperaturen for hver målesøjle måles i fire punkter, hvis tidslige temperaturforløb er gengivet på figur 5.22.

Når rummet tilføres en varmebelastning, i form af personer, er rumtemperaturen fundet at stige, som det fremgår af figur 5.22, hvor det for målesøjle 1 og 5 kun er tilfældet for etape 1. De enkelte temperaturprofilers gradient er størst fra den tilnærmelsesvise stationære begyndelsestilstand og starten af etape 1. Mellem overgangen fra en etape til ny, hvor varmebelastningen på rummet reduceres, falder rumtemperaturen i personens tyngdepunkt momentant, målepunkt 24, 28 og 32 jf. figur 5.22. For den efterfølgende etape stiger den hurtigt til niveauet fra før, hvis målepunktet er omgivet af personer, som det er tilfældet for målesøjle 2 og 4 jf. figur 5.22b og 5.22d. For målesøjle 3 er personerne ikke placeret tæt på efter etape 1, hvorfor rumtemperaturen ikke antager værdien fra foregående etape, som det fremgår af figur 5.22c, men stiger dog omtrent 1 °C. I de andre målepunkter er rumtemperaturen fundet at stige gennem etape 1 og tilnærmelsesvis konstant gennem etape 2, dog faldende for målesøjle 3. Efter etape 2 er varmebelastningen på rumluften reduceret i sådan en grad, at rumtemperaturen falder gennem etape 3 og 4 for alle målepunkterne i målesøjlerne.

Under forsøget er CO_2 -koncentrationen målt i 15 punkter fordelt ligeligt i de fem målesøjler. Herudover er CO_2 -koncentrationen også målt i indblæsningsluften og i udsugningen, hvor det tidslige profil for CO_2 -koncentrationen af indblæsningsluften og i udsugningen er gengivet på figur 5.23.



 $\begin{array}{c} 23, z = 1.09 \text{ m} \\ 24, z = 1.59 \text{ m} \\ -24, z = 1.59 \text{ m} \\ -24, z = 1.59 \text{ m} \\ -24, z = 1.59 \text{ m} \\ -25, z = 2.28 \text{ m} \\ -25, z = 2.99 \text{ m} \end{array}$

(a) Målesøjle 1, x = 2,71 m og y = 7,26 m. På figuren angiver E1, E2, E3 og E4 hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

(b) Målesøjle 2, x = 5,96 m og y = 6,34 m.



Figur 5.22: Tidslig forløb af temperaturprofilet målt i fire punkter for hver målesøjle, hvor opdelingen af etaper fremgår af figur 5.22a



Figur 5.23: Tidslig profil for CO_2 -koncentrationen af indblæsningsluften og udsugningen, hvor E1, E2, E3 og E4 hhv. angiver etape 1, 2, 3 og 4

Gennem forsøget har CO_2 -koncentrationen af indblæsningsluften været konstant, hvoraf det kan tolkes, at utætheder i anlæggets kanaler er minimal samt 100 % frisk luft er tilført rummet gennem hele forsøget som tilsigtet. For etape 1 stiger CO_2 -koncentrationen lineært i udsugningen og aftager lineært gennem etape 2 – 4 jf. figur 5.23. Det tidslige profil for CO_2 -koncentrationen i målesøjlernes 15 målepunkter er gengivet på figur 5.24.

Igennem etape 1 stiger CO₂-koncentrationen i alle målepunkterne jf. figur 5.24, hvor starttidspunktet for afkligningen afhænger af målepunktets placering i rummet. Forureningen af luften er dog så lav efter etape 2, at CO₂-koncentrationen er faldende i alle målepunkterne grundet luftskiftets størrelse. Endvidere indikerer målingen af CO₂-koncentrationen, at luften ikke har været 100 % opblandet under forsøget. Med kendskab til koncentrationen af CO₂ i udsugningen samt i de 15 målepunkter er det muligt, at bestemme middelventilationseffektiviteten, $\bar{\varepsilon}$, og det lokale ventilationsindeks, ε_p , som begge er et mål for, hvor hurtigt luften i rummet udskiftes og kan bestemmes af [Stampe et al., 1997]:

$$\overline{\varepsilon} = \frac{c_R}{\overline{c}} \tag{5.1}$$

og

$$\varepsilon_p = \frac{c_R}{c_p} \tag{5.2}$$

hvor

$$\overline{\varepsilon} = Middelventilationseffektiviteten [-] \\ \varepsilon_p = Lokal ventilationsindeks [-] \\ c_R = Koncentrationen i udsugningen [ppm] \\ \overline{c} = Middelkoncentration i hele lokalet [ppm] \\ c_p = Forureningskoncentrationen i punktet P [ppm]$$





(a) Målesøjle 1, x = 2,71 m og y = 7,26 m. På figuren angiver E1, E2, E3 og E4 hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

(b) Målesøjle 2, x = 5,96 m og y = 6,34 m.



Figur 5.24: Tidslig forløb af CO₂-koncentrationen målt i fire punkter for hver målesøjle, hvor opdelingen af etaper fremgår af figur 5.24a

Til bestemmelse af middelventilationseffektiviteten anvendes der kun målingerne af CO_2 -koncentrationen i opholdszonen. Det vil sige, at målingerne af CO_2 -koncentrationen i en højde på 2,0 m over gulv ikke medtages, hvilket er målepunkterne 22, 26, 30, 34 og 38 jf. tabel 5.3. På figur 5.25 kan middelventilationseffektiviteten i afhængighed af tiden ses, hvor det lokale ventilationsindeks i afhængighed af punktets placering og tiden kan ses på figur F.1 i appendiks F.



Figur 5.25: Middelventilationseffektiviteten i auditoriets opholdszone, hvor E1, E2, E3 og E4 på figuren hhv. angiver etape 1, 2, 3 og 4.

Middelventilationseffektiviteten på figur 5.25 indikerer, at der ikke hersker en ensartet luftkvalitet i auditoriets opholdszone, men skal nødvendigvis ikke tolkes som en indikator for, at luftkvaliteten er uacceptabel, da koncentrationen ikke overskrider det vejledende krav jf. [DS 15251, 2007] for forventningsklasse I. Ud fra de lokale ventilationsindekser præsenteret i appendiks F fremgår det endvidere, at de lokale koncentrationer målt i rummet ikke er ensartet, og at der dannes lagdelinger af CO₂-koncentrationen i rummets højde, som er særlig dominerende i de tre målesøjler mellem personerne. Heraf tyder det på, at rumtyper som det undersøgte ikke kan betragtes som én enkelt zone for forureningen.

Igennem forsøget er den relative luftfugtighed ligeledes målt i 15 punkter ligeligt fordelt i de fem målesøjler, hvor det tidslige profil for den relative luftfugtighed i målepunkterne kan ses af figur F.2 i appendiks F. Den relative luftfugtighed stiger gennem første etape til 31 % og falder herefter gennem de tre resterende etaper til udgangspunktet på omtrent 28 %. Heraf følger det, at personerne fugtafgivelse har været af begrænset betydning for rumluften, samt at det bundne varmetab fra personerne ikke er øget i afhængighed af persontætheden. Målingerne viser endvidere, at det tidslige forløb før den relative luftfugtighed er faldet til udgangspunktet er længst for de lavest placerede målepunkter og kortest for de højest placerede.

5.4.2 Overfladetemperatur af personer

Igennem forsøget er forsøgspersonernes overfladetemperatur målt kontinuerligt ved, at der er taget et termovisionsbillede af personerne hvert sekund. Heraf vil det være muligt, at anskueliggøre hvilken indflydelse en ændring af persontætheden vil have for personernes overfladetemperatur. Til analysen udvælges der otte personer, sådan at de repræsenterer personer siddende i den ydre afgrænsning til den indre kerne. Det har også haft indvirkning på udvælgelsen af de otte personer, at finde dem som har været mindst tildækket af andre personers hoveder, arme etc., da dette giver en forkert billede af personens faktiske overfladetemperatur. Herudover har det også haft stor betydning at få flest mulige med af de personer, som deltager i hhv. tre eller fire etaper samt de, der har siddet mest stille. Placeringen af de otte personer er anskueliggjort på figur 5.26.



Figur 5.26: Placering af de otte udvalgte personer til analysen af persontæthedens indflydelse på en gruppe personers overfladetemperatur.

Til den senere analyse opsættes et område på hver af de otte udvalgte personers overflade, hvor der udregnes hhv. en stedslig og tidslig middelværdi af personernes overfladetemperatur. Det dertil knyttede områdenummer for de otte deltager kan ses i tabel 5.5.

Deltager	20	29	47	36	27	23	16	41
Områdenummer	1	2	3	4	5	6	7	8

Tabel 5.5: De udvalgte deltager med placeringen som vist på figur 5.26 hvis overfladetemperatur undersøges med det dertil knyttede områdenummer, hvis placeringen på personernes overflade fremgår af figur 5.27.

På figur 5.27 er forsøgspersonernes overfladetemperatur afbildet efter et forløb af 10 minutter inde i hhv. etape 1, 2, 3 og 4. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan en film af den kontinuerlige overfladetemperatur målt under forsøget ses. Den er placeret i mappen *film/overfladetemperatur_af_personer/hovedforsoeq.wmv*, hvor der vises 30 billeder/s.



Figur 5.27: Overfladetemperaturen af forsøgspersonerne efter 10 minutters forløb inde i etape 1, 2, 3 og 4. Områdenummer 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 og 8 er for hhv. deltager 20, 29, 47, 36, 27, 23, 16 og 41 jf. tabel 5.5.

Under alle etaperne indtræffer en lettere udpræget strålingsudveksling mellem personerne og bordfladerne jf. figur 5.27, hvilket også kan skyldes en refleksion i termovisionskameraets objektiv. Som det kan ses af figur 5.27, indtræffer der også en varmeledning mellem personernes ryg og stolene de sidder på, hvilket kan ses af den temperatur overfladen af en stoleryg antager, efter en person har forladt den pågældende stol. Af figur 5.27 fremgår det også, at personernes overflade bliver mere mørkegrøn jo længere i forsøget termovisionsbilledet er fra, hvilket tyder på, at personernes overfladetemperatur antager en højere værdi ved "høj" persontæthed. For at anskueliggøre om dette er tilfældet og i så fald hvilken størrelsesorden, er de otte personernes stedslige middeloverfladetemperatur afbildet kontinuerligt på figur 5.28. Den stedslige middelværdi af personernes overfladetemperatur er bestemt for den på figur 5.27 viste område på hver af de otte udvalgte persons overflade. Deltager 27 er placeret i den indre kerne af personerne og deltager i alle fire etaper, hvorfor personens stedslige middeloverfladetemperatur bruges til sammenligning med de andre personers.



Figur 5.28: Den kontinuerlige stedslige middeloverfladetemperatur af de otte udvalgte forsøgspersoner. På figuren angiver de lodrette stiplede linier et etapeskifte. Placeringen af den enkelte deltager fremgår af figur 5.26 og for deltager 20, 29, 47, 36, 27, 23, 16 og 41 er det dertilhørende områdenummer hhv. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 og 8 jf. tabel 5.5 for hvilken den stedslige middeloverfladetemperatur er bestemt kontinuerligt for.

Deltager 20 og 29 sidder i den ydre grænse, hvor deltager 27 sidder i den indre kerne under forsøget, hvis temperaturprofiler gennem forsøget er tilnærmelsesvis identiske jf. figur 5.28a. Afvigelsen mellem deltager 20 og 29 i forhold til deltager 27 skyldes dels, at deltager 29 er lettere bevægelig og deltager 20 flytter sig en smule. For deltager 23, 27 og 47 er

temperaturprofilerne overordnet sammenfaldende igennem etaperne jf. figur 5.28c, hvor udsvingene antages ikke at være et udtryk for en ændring af overfladetemperaturen men en ændring af personernes siddestilling. For deltager 27 og 36 er temperaturprofilerne ikke sammenfaldende, hvor der er en relativ stor forskel igennem etaperne, når deltager 36 er til stede, som det fremgår af figur 5.28b. Dette kan dels skyldes, at det er to forskellig køn, hvor deltager 36 er en kvinde, som ofte har en lettere beklædning end mænd med højere overfladetemperatur til følge jf. [Fanger, 1972] eller en ændret siddestilling. For deltager 16 og 27 er der tilnærmelsesvis sammenfaldende temperaturprofiler for de to første etaper, hvor de store udsving af deltager 16 stedslige middeloverfladetemperatur må forventes, at skyldes en ændret kropsholdning. Temperaturprofilet for deltager 27 og 41 som hhv. sidder midt i kernen og den ydre grænse af personer er tilnærmelsesvist identiske med en relativ lille afvigelse gennem etape 1 og 2 jf. figur 5.28d. De relative store udsving, som fremtræder i temperaturprofilerne på figur 5.28 skyldes dels, at personerne bevæger sig samt hoved og arme fra andre personer bevæger sig ind foran de betragtede personer. Stigningen af personernes stedslige middeloverfladetemperatur ved "høj" persontæthed er relativ lav og falder svagt når persontætheden reduceres, som det fremgår af figur 5.28. Observationen er dog usikker idet de betragtede personer bevæger sig, samt at arme og hoveder fra andre personer flytter sig ind over de betragtede personer under målingerne, hvilket komplicerer analysen af måledataene. Dette vurderes også at være årsagen, som forårsager de momentane ændringer i temperaturprofilerne for personernes stedslige middeloverfladetemperatur.

For at udglatte variationen af den stedslige middeloverfladetemperatur bestemmes der én tidslig middelværdi af de otte personers overfladetemperatur for hver af de fire etaper. Til dette formål anvendes de definerede områder til bestemmelsen af den stedslige middelværdi af de otte personers overfladetemperatur jf. figur 5.27. Den tidslige middelværdi af de otte personers overfladetemperatur kan ses i tabel 5.6 i afhængighed af etapenummer.

Etape	Deltager							
	16	20	23	27	29	36	41	47
1	26,1	27,0	26,9	26,9	27,7	28,3	26,7	26,4
2	27,1	27,1	26,8	27,0	27,3	27,7	$26,\!5$	26,5
3	-	27,2	-	26,4	-	-	$26,\!6$	26,1
4	-	-	-	26,0	-	-	26,2	-

Tabel 5.6: Tidslig middeloverfladet emperatur af de otte udvalgte forsøgspersoner for hver etape. Angivet i °C.

Det tyder på, at persontætheden ikke har den store indflydelse på personernes overfladetemperatur, da forskellen for den tidslige middeloverfladetemperatur mellem de enkelte etaper er relativ lille, som det fremgår af tabel 5.6. Den største afvigelse er at finde for to af personerne i den indre kerne hhv. deltager 16 og 27, hvis tidslige middeloverfladetemperatur undergår en ændring på 1 °C gennem forsøget. Den tidslige middeloverfladetemperatur for deltager 16 stiger, hvor den er tilnærmelsesvis konstant gennem etape 1 og 2 for deltager 27, hvorefter den falder jf. tabel 5.6. Samme usikkerheder som omtalt under diskussion af den stedslige middeloverfladetemperatur af personerne vil også være gældende for den tidslige middelværdi af personernes overfladetemperatur, da den samme måledata er anvendt. Hertil skal det også nævnes, at etapernes længde af omtrent 17 min kan have været for kort til at se en eventuel ændring af personernes overfladetemperatur.

5.4.3 Opfattelse af temperatur

Ud over undersøgelsen af personernes overfladetemperatur i afhængighed af persontætheden er det ud fra en spørgeskemaundersøgelse også undersøgt, om persontætheden vil have en indflydelse på, hvordan personerne befinder sig i termisk henseende. Dette er af interesse, da selvom varmebalancen er opretholdt af kroppens reguleringsmekanisme, kan der stadig opstå termisk diskomfort [Fanger, 1972]. På figur 5.29 er det gengivet, hvordan personerne befinder sig i termisk henseende i afhængighed af persontætheden.

Gennemsnittet af personernes udsagn om hvordan de føler sig temperaturmæssigt, kan af figur 5.29 findes til at være neutral for etape 1, 2 og 3, hvor det for etape 4 er mellem neutral og lidt varm. Heraf følger det, at forsøgspersonerne uafhængigt af persontætheden har følt sig i en tilstand af termisk neutralitet. Dette svarer til, at den forventede middelbedømmelse, PMV, er 0. PMV er et termisk indeks opstillet af [Fanger, 1972], som knytter den besvarede psykofysiske 7 punktsskala sammen med komfortligningen. Heraf følger det, at personerne har følt sig i en tilstand af optimal termisk komfort uafhængigt af persontætheden.

For at se om der sker en ændring af, hvordan personerne føler sig temperaturmæssigt i afhængighed af persontætheden, er de syv og tre forsøgsdeltageres, som hhv. deltager i tre og fire etaper, svar vist på figur 5.30. På figuren er den midlet besvarelse for, hvordan de ti personer befinder sig i termisk henseende i afhængighed af persontætheden også gengivet. På figur 5.30 angiver endvidere cirkel, diamant, firkant og trekant besvarelsen for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

Gennem forsøget har de ti forsøgspersoner ændret deres svar for, hvordan de temperaturmæssigt føler sig for etaperne, men der er dog ikke noget entydigt billede af, hvordan svarene ændres, som det fremgår af figur 5.30. Deltager 1 føler sig f.eks. varme jo færre personer der er omkring ham, hvor deltager 21 føler sig køligere jo færre personer, der er omkring ham. Deltager 20 føler sig temperaturmæssigt lidt varm, når der er mange personer og mere neutral ved få personer, hvor deltager 40 føler sig lidt kølig ved mange personer og mere varm jo færre personer, der er omkring ham. Fælles for de fire omtalte deltager er, at de er placeret i den ydre afgrænsning af personerne. Deltager 27 som sidder omtrent i midten føler sig temperaturmæssigt lidt varm, ved mange personer om sig og



Figur 5.29: Besvarelse af Hvordan føler du dig temperaturmæssigt lige nu? i afhængighed af persontætheden.

mere neutral ved få personer om ham. Deltager 34 føler sig ligeledes temperaturmæssigt varmere ved mange personer om sig og neutral ved få. Endvidere viser den midlet besvarelse af, hvordan de ti personer befinder sig i termisk henseende at være neutral for etape 1-3, hvor det for etape 4 er en mellemting af termisk neutralitet og lidt varm.

Fordelingen af hvordan forsøgspersonerne opfatter temperaturen i afhængighed af etape kan ses på figur F.3 i appendiks F. Heraf fremgår det, at for etape 1, 2, 3 og 4 finder hhv. 84%, 75\%, 70\% og 67\% temperaturen acceptabel. I afhængighed af personernes tæthed er de syv og tre forsøgsdeltageres, som hhv. deltager i tre og fire etaper, opfattelse af temperaturen i afhængighed af etape gengivet på figur 5.31. På figuren angiver endvidere cirkel, diamant, firkant og trekant besvarelsen for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

Som det fremgår af figur 5.31, har størstedelen af de ti forsøgspersoner opfattet temperaturen som værende acceptabel uafhængigt af persontætheden. Deltager 20 har for de to første etaper opfattet temperaturen som uacceptabel, hvilket er i overensstemmelse med, hvordan personen føler sig temperaturmæssigt. Deltager 21 opfatter temperaturen som



Figur 5.30: Ændring af besvarelse for *Hvordan føler du dig temperaturmæssigt lige nu?* i afhængighed af etapenummer og forsøgsperson. På figuren angiver cirklerne, diamanterne, firkanterne og trekanterne besvarelsen fra de ti deltagere for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.



Figur 5.31: Ændring af besvarelse for *Hvor acceptabelt opfatter du temperaturen lige nu?* i afhængighed af etapenummer og forsøgsperson. På figuren angiver cirklerne, diamanterne, firkanterne og trekanterne besvarelsen fra de ti deltagere for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

uacceptabel for etape 2 og 3, som ligeledes er sammenfaldende med, hvordan personen føler sig temperaturmæssigt.

5.4.4 Accept af luftkvalitet

Forsøgspersonerne blev efter 13 minutter inde i hver etape ligeledes bedt om at vurdere, hvor acceptabelt de opfattede luftkvaliteten. På figur F.4 i appendiks F er fordelingen af besvarelserne i afhængighed af, om luftkvaliteten blev vurderet indenfor kategorien klart/netop acceptabel eller netop/klart uacceptabel samt tætheden af personerne gengivet. Heraf fremgår det, at for etape 1, 2, 3 og 4 finder hhv. 88%, 92%, 90% og 100% luftkvaliteten indenfor området klart/netop acceptabel. For de syv og tre forsøgsdeltagere, som hhv. deltager i tre og fire etaper, er ændringen af deres opfattelse af luftkvaliteten i afhængighed af persontætheden vist på figur 5.32. På figuren angiver endvidere cirkel, diamant, firkant og trekant besvarelsen for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.



Figur 5.32: Ændring af besvarelse for *Hvor acceptabelt opfatter du luftkvaliteten lige nu?* i afhængighed af etapenummer og forsøgsperson. På figuren angiver cirklerne, diamanterne, firkanterne og trekanterne besvarelsen fra de ti deltagere for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

Hovedparten af de ti udvalgte forsøgsdeltagere har uafhængigt af persontætheden opfattet luftkvaliteten som værende klart/netop acceptabel. Fire ud af de ti forsøgsdeltagere har vurderet luftkvaliteten som værende netop uacceptabel, men udgør kun fire af de 33 besvarelser. Heraf følger det, at luftkvaliteten ikke har haft negativ indflydelse på personerne, som vurderes at skyldes luftskiftets størrelse på 1,68 h⁻¹. Som nævnt i afsnit 5.1.2 tilføres der en volumenstrøm på 1692 m³/h og ved en personbelastning på 50, 24, 10 og 3 personer, svarer dette til hhv. 9,41/(s · pers), 19,61/(s · pers), 47,01/(s · pers) og 156,71/(s · pers).

5.4.5 Opfattelse af luftbevægelser

For at anskueliggøre om persontætheden har en indflydelse på personernes opfattelse af luftens bevægelse omkring dem, blev forsøgspersonerne ligeledes bedt om at vurdere dette i hver etape. Resultatet fremgår på figur F.5 i appendiks F, hvor fordelingen af besvarelserne i afhængighed af persontætheden og om luftbevægelserne omkring personen blev vurderet indenfor kategorien klart/netop acceptabel eller netop/klart uacceptabel kan ses. Heraf fremgår det, at for etape 1, 2, 3 og 4 finder hhv. 84 %, 58 %, 90 % og 67 % luftbevægelserne omkring dem indenfor området klart/netop acceptabel, hvoraf det fremgår, at fra etape 1 til 2 sker en relativ høj ændring i personernes opfattelse af luftbevægelserne omkring dem, som kan skyldes ændringen af persontætheden. For etape 1, 3 og 4 opfatter personerne luftbevægelserne ens. De ti udvalgte forsøgspersoner opfattelse af luftbevægelserne omkring dem i afhængighed af persontætheden kan ses på figur 5.33. Heraf fremgår det ligeledes, at der er flest, som finder luftbevægelserne omkring dem uacceptabel for etape 2 og primært acceptabel for de andre tre etaper.



Figur 5.33: Ændring af besvarelse for *Hvor acceptabelt opfatter du luftbevægelserne omkring dig lige nu?* i afhængighed af etapenummer og forsøgsperson. På figuren angiver cirklerne, diamanterne, firkanterne og trekanterne besvarelsen fra de ti deltagere for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

I sammenhæng med hvor acceptabelt forsøgspersonerne opfattede luftbevægelserne omkring dem, besvarede de også, om de ønskede mere eller mindre luftbevægelse, hvor resultatet heraf fremgår af figur F.6 i appendiks F. For etape 1, hvor persontætheden er højest, ønsker flertallet af personer mere luftbevægelse. Når mængden af personer ændres fra 50 til 24 er ønsket om mindre luftbevægelse størst, hvor luftbevægelserne for etape 3 og 4 opfattes som tilpas. For de syv og tre forsøgsdeltagere, som hhv. deltager i tre og fire etaper, er ændringen af deres ønske om mere eller mindre luftbevægelse i afhængighed af persontætheden vist på figur 5.34.



Figur 5.34: De ti forsøgspersoners svar for om de ønsker mere eller mindre luftbevægelse i afhængighed af etape. På figuren angiver cirklerne, diamanterne, firkanterne og trekanterne besvarelsen fra de ti deltagere for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

For de ti udvalgte forsøgspersoner ønskes der primært mere luftbevægelse ved en høj persontæthed, hvor der modsat ønskes en lavere ved faldende persontæthed jf. figur 5.34, som er i overensstemmelse med resultaterne for de andre forsøgspersoner jf. figur F.6 i appendiks F. Det er svært at vurdere, hvad der kan være årsagen til, at forsøgspersonerne ønsker mindre luftbevægelse kun i etape 2, da det ikke har været muligt, at se nogen ændring af personernes overfladetemperatur eller deres besvarelse af hvordan de befinder sig i termisk henseende mellem etaperne

Såfremt personerne ønskede mindre luftbevægelse, blev de bedt om at afkrydse, hvor på kroppen de ønskede mindre luftbevægelser, hvilket kan ses på figur 5.35 i afhængighed af etape. På figuren fremgår kun resultater fra de tre første etaper, da de tre personer som deltog i den sidste etape ikke følte sig generet af luftbevægelser i etape 4.

Forsøgspersonerne har primært følt sig generet i ansigtet og på armene af luftbevægelser gennem forsøget. Endvidere har en lille andel følt sig generet i nakken, bryst og ankler. For de ti på forhåndsudvalgte forsøgspersoner er det undersøgt, om de ændrer svar for, hvor på kroppen de er generet af luftbevægelser. Resultatet fremgår af figur F.7 i appendiks F, hvoraf det er antydet, at de primært føler sig generet i ansigtet og på armene uafhængigt af persontætheden.



Figur 5.35: Opsummering af hvor på kroppen forsøgsdeltagerne følte sig generet af luftbevægelser.

Studier har vist, at der er korrelation mellem en bygnings indeklima og forekomsten af symptomer som hovedpine, træthed etc. [Toftum og Clausen, 2001]. Af denne grund har forsøgspersonerne besvaret spørgsmål vedrørende opfattelse af deres sundhedstilstand, hvor svarene fremgår af figur F.8 - F.13 i appendiks F. Af figurerne fremgår det, at personerne ikke ændrer svar for, hvordan de opfatter deres sundhedstilstand i afhængighed af persontætheden. Ud fra forsøgspersonernes besvarelse af deres sundhedsmæssige tilstand er der ikke observeret udfald, der indikerer, at nogle af dem har været syge. Derfor vurderes det, at deres sundhedsmæssige tilstand ikke har haft indflydelse på deres besvarelse af, hvordan de opfatter indeklimaet i auditoriet under forsøget. Det skal dog nævnes, at en del har følt sig tør i munden, næsen eller på læberne, hvilket kan skyldes en lav luftfugtighed. Som fysiologisk nedre værdi for luftfugtigheden anbefales et vandindhold svarende til 30%relativ luftfugtighed jf. [Stenn-Thøde et al., 2001], hvor der for størstedelen af forsøget er målt lavere værdier. Herudover er fundet, at persontætheden ikke har nævneværdig indflydelse på forsøgsdeltagernes opfattelse af, hvor meget de kan arbejde jf. figur F.14 i appendiks F, hvor middelvoteringen er hhv. 78%, 76%, 72% og 66% for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

5.5 Undersøgelse af indflydelse på vinkelforhold

I det følgende afsnit præsenteres en undersøgelse af indflydelsen på vinkelforholdet for en person, der omsluttes af andre ved den givne persontæthed under forsøgets etape 1.

Som belyst i afsnit 5.4 antog forsøgsdeltagerne ensartet overfladetemperatur gennem forsøgets fire etaper uafhængigt af persontætheden. Eftersom nettostrålingsudvekslingen mellem to flader med samme overfladetemperatur vil være nul [Stenn-Thøde et al., 2001], eftersom temperaturforskellen herimellem er nul, anskueliggøres det i det følgende afsnit, hvor stor reduktion af vinkelforholdet der kan forventes, når en person er omsluttet af andre. Til dette formål er der taget udgangspunkt i ni personer, som placeres i det anvendte auditorium til forsøget med placeringen som angivet på figur 5.36, hvor indflydelsen af vinkelforholdet for person fem undersøges. Denne person er valgt, eftersom personen er omsluttet af personer på alle sidder.



Figur 5.36: Placering af de ni personer til vinkelforholdsberegningen. På figuren angiver nummereringen personernes tildelte nummer i forbindelse med vinkelforholdsberegningen og kan ikke sammenlignes med de tidligere nummereringer.

Vinkelforholdet mellem en person og en overflade kan defineres som forholdet mellem den strålingsenergi, en person modtager fra fladen, og hele den strålingsenergi fladen udsender til omgivelserne [Stenn-Thøde et al., 2001]. Vinkelforholdet fastlægges ud fra en geometrisk betragtning, hvor størrelsen afhænger af fladens aktuelle størrelse samt placering ift. den betragtede person. Fladens placering i forhold til personen bestemmes ud fra personens fladenormal projekteret ind på den pågældende flade samt afstanden herimellem.

For at kunne bestemme den forventede reduktion af person fems vinkelforhold til de omsluttende flader, som følge af de otte personernes afgrænsning, skal der tages stilling til detaljeringsgraden af den anvendte persongeometri samt det omsluttende miljø. En optimal analyse ville være at anvende en korrekt anatomisk model af hver person samt geometrien af det omgivne miljø, hvilket f.eks ville kræve anvendelse af et program som benytter af ray tracing. Da der ønskes et indblik i en omtrent størrelsesorden af den forventede reduktion af person fems vinkelforhold til de omgivende flader, som de omsluttende personers afgrænsning forventes at give anledning til, vurderes en tredimensionel rektangulær geometri af en siddende persons silhuet som værende acceptabel. Ud over den geometriske udformning af persongeometrien skal størrelsen heraf være i overensstemmelse med en gennemsnitlig "normal" persons. Til dette formål anvendes der den på figur 5.37a viste opstillet af [Topp et al., 2003b], som har et samlet overfladeareal på $1,61 \text{ m}^2$.







(b) Persongeometri 2, PG2.

Figur 5.37: Illustration af de to anvendte persongeometrier til bestemmelse af vinkelforholdet mellem person fem og de otte omsluttende personer. Alle mål i mm.

Kropsdel	PG1	PG2
Overkrop	$0,140 \times 0,605 \times 0,300$	$0,188 \times 1,145 \times 0,300$
Lår	$0,400 \times 0,140 \times 0,105$	
Skinneben	$0,140 \times 0,490 \times 0,105$	
Hoved	$0,140 \times 0,200 \times 0,150$	

Tabel 5.7: Dimensionen af persongeometri 1 og 2 betegnet hhv. PG1 og PG2, som er illustreret på figur 5.37.

Til bestemmelse af den reduktion person fire og seks forventes, at give anledning til for person fems vinkelforhold til de omsluttende flader simplificeres den på figur 5.37a viste til et kubisk rektangel, hvis størrelse kan ses på figur 5.37b. Denne forsimpling vurderes, at være acceptabel eftersom den på figur 5.37b viste repræsenterer den samme samlede afgrænsning som den på figur 5.37a vidste. Der anvendes den på figur 5.37a viste geometri til bestemmelse af den forventede reduktion af person fems vinkelforhold til de omsluttende flader, når afgrænsning forårsaget af person et – tre og syv – ni betragtes, da det kun er deres øvre del af kroppen, som kan give anledning til en reduktion af person fems vinkelforhold til de omsluttende flader.

Ud fra kendskab til størrelsen af personernes overflade jf. figur 5.37 samt kendskab til

afstanden mellem personer, som kan ses på figur H.1 i appendiks H, kan vinkelforholdene mellem person fem og de omsluttende personer bestemmes ud fra diagrammer i f.eks. [Stampe et al., 1997] og [Stenn-Thøde et al., 2001]. I projektet er der anvendt to forskellige typer diagrammer, hvor den ene er baseret på vinkelforholdet mellem en siddende person og en flade. Hertil anvendes størrelsen af den afgrænsende flade fra en af de omsluttende personer og afstanden hertil fra person fem som "input". For det anden anvendte diagram betragtes alle personernes overflade som en afgrænsende rektangulær flade, hvor størrelsen heraf og den vinkelrette afstande mellem fladerne anvendes til bestemmelse af vinkelforholdene. Værdierne som er benyttet til bestemmelse af vinkelforholdet mellem person fem og de omsluttende personer er gengivet i appendiks H, hvor de anvendte diagrammer ligeledes er gengivet.

I tabel 5.8 og 5.9 er vinkelforholdet mellem person fem og hver af de otte omsluttende personer gengivet i afhængighed af hvilken metode, som er benyttet.

Vinkelforhold, F	[-]
$F_{5-1} = 0,01$	$F_{5-6} = 0,12$
$F_{5-2} = 0.02$	$F_{5-7} = 0.01$
$F_{5-3} = 0.01$	$F_{5-8} = 0.01$
$F_{5-4} = 0,12$	$F_{5-9} = 0.01$

Tabel 5.8: Vinkelforholdet, F, mellem person fem og de otte omsluttende personer når disse kun betragtes som flader. Det samlede vinkelforhold til de otte omsluttende personer er 0,31

Vinkelforhold, F	[-]
$F_{5-1} = 0.05$	$F_{5-6} = 0,34$
$F_{5-2} = 0.06$	$F_{5-7} = 0.03$
$F_{5-3} = 0.05$	$F_{5-8} = 0.04$
$F_{5-4} = 0,34$	$F_{5-9} = 0.03$

Tabel 5.9: Vinkelforholdet, F, mellem person fem og de otte omsluttende personer når alle personer betragtes som flader. Det samlede vinkelforhold til de otte omsluttende personer er 0,94

Summen af de bestemte vinkelfaktorer listet i tabel 5.8 og 5.9 kan hhv. findes til 0,31 og 0,98. Eftersom vekselvirkningssætningen skal være opfyldt, gælder det, at det samlede vinkelforhold mellem en person og de omgivende flader i et givet rum skal være lig 1 [Stenn-Thøde et al., 2001]. Heraf følger det, at strålingsudveksling mellem person fem og de omgivende flader reduceres med 31 % eller 94 %, som følge af de afgrænsende personers overflader afhængigt af hvilken metode, som er anvendt. Person fire og seks udgør hhv. 82 % eller 73 % af reduktionen for person fems vinkelforhold i afhængighed af hvilken metode vinkelforhold til de omsluttende flader i intervallet 2 - 8 % afhængig af placering og valg af metode anvendt til bestemmelsen.

Af ovenstående analyse tyder det på, at der må forventes en reduktion af person fems betingelse for strålingsudvekslingen med de omsluttende flader som følge af de omsluttende personernes afgrænsning. Der indtræffer dog en relativ stor forskel i reduktionens størrelse alt efter om alle ni personer betragtes som værende en flade, eller om det kun er de otte omsluttende personerne omkring person fem, der betragtes som flader. Det vurderes, at resultaterne kun kan give en indikation af, at en reduktion for den betragtede persons samlede vinkelforhold til de afgrænsende flader indtræffer men, at der ikke kan konkluderes i hvilket omfang grundet den relative store forskel, de to metoder giver. Endvidere burde en så kraftig reduktion af vinkelforholdet på 98 % også have afspejlet sig i personernes overfladetemperatur for persontætheden i etape 1. Men som det blev vist i afsnit 5.4.2, antog overfladetemperaturen af personerne tilnærmelsesvist den samme værdi uafhængigt af persontætheden. Dette må delvis også indikere, at for en person der er placeret i et auditorium som det anvendte, vil de ovenfor anvendte metoder til bestemmelse af vinkelforholdene mellem den betragtede person og det omgivende miljø ikke være hensigtsmæssige at anvende til formålet.

Del III

Numerisk modellering af personer

Kapitel 6

Indledende betragtninger

I det følgende kapitel introduceres de parametre, som har indflydelse på en bygnings varmebalance, hvorefter en simpel rummodel opstilles. Dette efterfølges af hvilket værktøjvalg, der kan gøres i forbindelse med simulering af det termiske indeklima herunder anvendelsen af CFD til simulering af luftstrømningen i et givet rum. Afslutningsvis præsenteres fem forskellige detaljeringsgrader af en persons geometri til modellering af mange personer. Formålet med nærværende kapitlet er at anskueliggøre, hvordan simuleringen af luftstrømninger i store rum med mange mennesker kan opstilles samt nedbrydes til en mere overkommelig opgave.

6.1 Indledning

Det primære formål ved at foretage en indeklimaanalyse er, at dokumentere den betragtede bygning medfører termisk og atmosfærisk komfort i overensstemmelse med det danske normsystem som nævnt i kapitel 1. For at opnå en valid indeklimaanalyse er det nødvendigt, at den opstillede model til besvarelse af problemstillingen vil repræsentere virkeligheden. Endvidere bør det også overvejes, hvad modellen forventes og skulle besvare på for at vide hvilke input, som vil være nødvendige til den opstillede model, samt om det rette værktøj er valgt.

Designet af en bygnings indeklima er et kompliceret sammenspil af konstruktionernes egenskaber, den termiske belastning, klimatiseringsanlæg samt vejret. En bygnings transmissionstab drives af temperaturforskellen mellem ude- og indetemperaturen samt varmetransmissionstallet for bygningskonstruktionerne. Endvidere varierer udetemperaturen over døgnet samt over året, hvor den indre temperatur vil afhænge af den termiske belastning fra personer, belysning, elektrisk udstyr og varmetilskuddet fra solstråling, som alle også varierer over tiden. Idet det tidsmæssige aspekt for varmeoverføring til rumluften er relativ kortere end til overfladerne med forskellig temperaturforløb til følge grundet varmekapacitetsforskellen, er det af vigtighed, om den termiske belastning bevirker en varmeoverføring til eller fra rumluften, til overfladerne eller begge dele. Ved vekslende belastninger i en givet bygning vil temperatursvingene påvirkes af den mængde energi, som kan oplagres i bygningskonstruktionerne bestemt ud fra varmekapaciteten. Herudover vil der fjernes energi fra bygningen ved ventileringen heraf, hvilken også vil have en indflydelse på rumtemperaturen. Derforuden vil vindtrykket på bygningens facade også influere på bygningens varmetab, da dette kan påvirke infiltrationen.

Heraf følger det, at den tidslige variation af de termiske belastninger og vejret samt bygningens varmeakkumuleringsevne bør indgå i en bygnings indeklimaanalyse for, at den vil repræsentere virkeligheden, hvorfor en dynamisk model ligeledes er at foretrække.

6.2 Varmebalance under ikke stationære forhold

For at anskueliggørelse hvordan rumtemperaturen er koblet sammen med indelufttemperaturen, t_i , og de indvendige overfladetemperaturer, t_o , samt den på rummet påførte belastning, opstilles der i det følgende en simpel beregningsmodel. For at tage højde for de termiske belastningers variations indflydelse på t_i og t_o må de bestemmes til forskellig tidspunkter ud fra opstilling af varmebalanceligninger for rumluften, overfladetemperaturerne og for de varmeakkumulerende lag ud fra beregningsmodellen vist på figur 6.1.



Figur 6.1: Forsimplet skitsering af et rums varmebalance, hvor den stiplede linie angiver placering af det fiktive varmeakkumulerende lag.

Beregningsmodellen på figur 6.1 er opstillet ud fra den størst forsvarlige forenkling, hvor de afgrænsende fladers varmekapacitet tænkes placeret i en uendelig tyndt varmeakkumulerende lag med den ensartede temperatur, t_a , samt de indvendige overflader antages at have den samme temperatur, t_o . Det vil derfor være muligt at anskueliggøre rummets varmebalance ud fra opstilling af tre varmebalanceligninger indeholdende de tre ukendte temperaturer, t_i , t_o og t_a .

6.2.1 Rumluftens varmebalance

Fra den på rummet påførte belastning vil den samlede konvektive andel, Φ_k , modtages af rumluften, samt der overføres energi ved konvektion mellem rummets afgrænsende flader og det strømmende luftmedium. Der skal ligeledes tages højde for den energiændring ventilationsluften med temperaturen, t_I , giver anledning til. Varmebalancen for rumluften kan da udtrykkes ved [Stenn-Thøde et al., 2001]:

$$\Phi_k + B_o(t_o - t_i) = B_l(t_i - t_I) \tag{6.1}$$

hvor

Φ_k	=	Konvektive belastning på rumluften	[W]
B_o	=	Konvektive varmeoverføring ved afgrænsende falder pr.	$[W/^{\circ}C]$
		grads temperaturforskel, $= \sum \alpha_k A$	
α_k	=	Konvektivt varmeovergangstal	$[W/m^{2}\circ C]$
A	=	Overfladearealet	$[m^2]$
B_l	=	Varmeoverføring ved ventilationsluften, $= m_l c_p$	$[W/^{\circ}C]$
m_l	=	Ventilationsmængden	[kg/s]
c_p	=	Luftens specifikke varmefylde	$[kJ/kg^{\circ}C]$
t_o	=	De indvendige overfladers temperatur	[°C]
t_i	=	Rumluftens temperatur	[°C]
t_I	=	Temperatur af indblæsningsluften	[°C]

Størrelsen af konvektionen mellem de afgrænsende flader og rumluften afhænger af temperaturforskellen herimellem. Ligning (6.1) kan dog give indtrykket af, at bidraget er proportional med temperaturforskellen, hvilket ikke er tilfældet, da det konvektive varmeovergangstal er afhængig af strømningstypen, fri eller tvungen konvektion samt laminar eller turbulent strømning [Stenn-Thøde et al., 2001].

6.2.2 Overfladernes varmebalance

For den opstillede beregningsmodel forudsætes det, at den samlede tilførte strålingsvarme fordeles ligeligt på alle de indvendige overflader, hvormed der kan antages én ensartet overfladetemperatur, t_o , på de indvendige overflader. Den på rummet samlede tilførte strålingsvarme fra personer, belysning, solindfald etc., benævnes i det følgende Φ_s . Gennem de afgrænsende flader indtræffer en varmetransmission til det fri og tilstødende rum styret af temperaturforskellen samt fladernes varmetransmissionstal. Varmebalancen for overfladerne kan da opstilles som [Stenn-Thøde et al., 2001]:

$$\Phi_s = B_u(t_o - t_u) + B_r(t_o - t_r) + B_o(t_o - t_i) + B_a(t_o - t_a)$$
(6.2)

hvor

Φ_s	=	Samlede tilførte strålingsvarme	[W]
B_u	=	Varmeoverføring pr. grads temperaturforskel mellem over-	$[W/^{\circ}C]$
		flader og det fri, $= \sum UA$	
U	=	Varmetransmissionstallet	$[W/m^{2\circ}C]$
A	=	Areal	$[m^2]$
B_r	=	Varmeoverføring pr. grads temperaturforskel mellem over-	$[W/^{\circ}C]$
		flader og til omgivende rum, $= \sum UA$	
B_a	=	Varmeoverføring fra overfladerne til de varmeakkumulerende	$[W/^{\circ}C]$
		lag pr. grads temperaturforskel, $= \sum U'_a A$	
U'_a	=	Transmissionstallet fra overfladen til det varmeakkumuleren-	$[W/^{\circ}C]$
		de lag	
t_u	=	Udetemperatur	[°C]
t_r	=	Temperatur i naborum	[°C]
t_a	=	Temperatur af de varmeakkumulerende lag	[°C]

6.2.3 Varmebalance for de varmeakkumulerende lag

I afhængighed af om rumtemperaturen er stigende eller faldende, vil fladerne akkumulere eller afgive varme, hvor mængden afhænger af materialernes varmekapacitet og tykkelse. Det varmeakkumulerende lags temperaturændring over tid kan udtrykkes af [Stenn-Thøde et al., 2001]:

$$B_a(t_o - t_a) = S \frac{dt_a}{d\tau} = \sum c\rho A e \frac{dt_a}{d\tau}$$
(6.3)

 hvor

S	=	Rummets varmekapacitet	$[kJ/kg^{\circ}C]$
c	=	Varmefylden	$[kJ/kg^{\circ}C]$
ρ	=	Massefylden	$[\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3]$
e	=	Tykkelsen af det medregnede akkumulerende lag	[m]

Ud fra de tre opstillede varmebalanceligninger er der udarbejdet EDB programmer til beregning heraf, hvor der her blot nævnes *BSim*. I programmet kan en given bygnings indeklima og energiforbrug bestemmes i afhængighed af vejrdata fra f.eks. det danske design reference år samt den på bygningen påførte termiske belastning. I *BSim* placeres der ikke et fiktivt varmeakkumulerende lag i konstruktionen, men opdeles derimod i dellag, hvor der under hensyntagende til lagenes termiske egenskaber beregnes varmetransport. Endvidere udregnes der også én overfladetemperatur for hver flade i afhængighed af energiudveksling mellem de afgrænsende flader, som afhænger bl.a. af vinkelforholdet herimellem. Herudover inkluderes konvektionen mellem rumluften og den pågældende flade ligeledes i dets overfladetemperatur. [Grau et al., 2008]

Som det er antydet af ovenstående, bør dynamikken indgå for på den måde, at inkludere den tidslige variation af den pågældende bygnings temperaturer. I det efterfølgende følger en beskrivelse af det værktøjvalg, der kan gøres for, at inkludere dynamikken samt to situationer hvor den ikke indgår og forventet betydning heraf.

6.3 Valg af "værktøj"

Ved projektering af en bygnings indeklima bør hele bygningen samt dynamikken heraf betragtes for, at kunne forvente en valid løsning som antydet af afsnit 6.2. Til at foretage værktøjvalget betragtes en fiktiv bygning, som vist på figur 6.2, hvor det er af interesse at undersøge luftstrømningen i et større rum omsluttet af andre.



Figur 6.2: Skitsering af den fiktive bygning og belastninger herpå. Rummet hvori luftstrømningen tænkes undersøgt er afgrænset af den stiplede firkant.

Problemstilling antydet på figur 6.2 er relativ kompliceret, da der kræves randbetingelser for rummets rande såsom væg-, loft og gulvflader, som vil afhænge af de termiske belastninger i form af personer, belysning, udstyr etc. for at kunne simulere luftstrømningen i rummet. Endvidere vil de tilstødende rum også have en indflydelse på det betragtede rums varmebalance og dermed overfladetemperaturerne som følge af f.eks. varmetransmission. Hertil vil bygningens varmeakkumuleringen samt vejrets og den termiske belastnings variation også have en indflydelse som nævnt i afsnit 6.2.

Til simulering af luftstrømningen i det betragtede rum, overvejes tre mulige veje til "målet", som det er antydet på figur 6.3.



Figur 6.3: Oversigt for de tre overvejede muligheder til simulering af luftstrømning for et givet rum ved anvendelse af CFD. For personmodeller henvises der til afsnit 6.4.

Den første mulige vej til "målet" er at modellere hele bygningens faktiske geometri med dets termiske egenskaber samt de termiske belastninger og klimatekniske anlæg med dertilhørende variation og brugsmønster direkte i CFD. Ved at inkludere vejrets variation vil CFD modellen hermed kunne simulere den forventede dynamik af hele bygningen, og indflydelsen heraf vil da afspejles for det simulerede strømningsfelt i rummet af interesse. Detaljeringsgraden af personerne, som inkluderes i modellen vil svare til anatomisk korrekt udgave af en person ved valg af den første vej til "målet". I modsætning til et program såsom *BSim* må simuleringstiden af en hel bygning med en CFD kode, hvor den termiske dynamiks indflydelse på energilagringen medtages, forventes at være betydelig længere. Forklaringen hertil findes i antallet af celler beregningsdomænet inddeles i, hvor hvert rum består af en celle i *BSim* [Grau et al., 2008] og op til flere millioner i et CFD program for at opnå en numerisk løsning, som konvergerer. Med dette i betragtning vil det ud fra et teoretisk synspunkt være muligt at benytte CFD til simulering af en hel bygning, men med den computerkraft der er til rådighed i dag, vil det ikke være realistisk men indenfor den nærmeste årrække mere sandsynligt. Der ses derfor bort fra muligheden om at simulere en hel bygning ved anvendelse af CFD i det efterfølgende.

Dette kan være grundlaget for den forenkling, som har vist sig for nogle af casene, omtalt i litteraturstudiet jf. kapitel 3, hvor randbetingelsen for nogle af casene blev foreskrevet ud fra endimensional varmetransport ud fra en ydre temperatur og et dertilhørende varmetransmissionstal for konstruktionen. For andre cases blev randene foreskrevet som værende adiabatiske. For begge situationer gælder det, at der ikke tages hensyn til indflydelse af bygningens dynamik, hvor betydningen heraf måske kan være ubetydelig for strømningsfeltet men betydelig for rummets temperaturer. En anden problemstilling er, hvordan de omsluttende temperatur fastlægges f.eks. om det er erfaringsmæssige værdier, der anvendes fra tidligere lignende cases eller ingeniørmæssige skøn. Til trods for at der ikke vil tages hensyn til dynamikken ved at foreskrive randene som værende adiabatiske eller ved at anvende temperaturer og varmetransmissionstal, opstilles det som en anden mulig vej til "målet". Vejen ned til "målet" kan da opstilles som vist på figur 6.4. Denne løsning kan kombineres med en passende detaljeringsgrad for en personmodel, som det blev gjort for de omtalte cases i litteraturstudiet jf. kapitel 3.



Figur 6.4: Diagram for vej til "mål" for forsimplet betragtning af et rum, hvor luftstrømningen ønskes bestemt med CFD uden hensyntagende til dynamikken. a) rande adiabatiske, b) temperatur og transmissionstal for rande.

Selvom de afgrænsende flader betragtes som værende adiabatiske eller endimensionel varmetransport anvendes som randbetingelse for de afgrænsende flader, vil der stadig ske en energiudveksling mellem fladerne samt mellem personerne og fladerne fra langbølget strålingsudveksling, som der bør tages hensyn til, da dette vil have en indflydelse på simuleringen af temperaturen af rummets overflader. Heraf følger det, at det også må forventes og få en betydning for konvektionen mellem rummets afgrænsende rande og rumluften om energiudvekslingen ved stråling medtages. Såfremt CFD modellen skal kunne tage hensyn til varmeafgivelsen ved hhv. konvektion og stråling, er det nødvendigt, at den anvendte CFD kode kan håndtere en opdeling heraf samt har en strålingsmodel. Anvendelse af en strålingsmodel i en CFD kode sætter dog høje krav til computerresourcer [ANSYS, 2006a], hvorfor det kan være fordelagtigt og genere randbetingelser til en CFD simulering, hvor strålingen er inkluderet som omtalt nedenfor.

Som tredje mulige vej til "målet" jf. figur 6.3 kan det overvejes at opstille bygningens faktiske geometri, termiske egenskaber samt de termiske belastninger og klimatekniske anlæg med dertilhørende brugsmønster i BSim. I BSim defineres en zone for hvert rum, hvor varmeafgivelsen fra personer og udstyr defineres som én samlet zonelast uden hensyntagende til geometrien af personer og udstyr. Varmeafgivelsen fra personerne opdeles i fri og bunden varmeafgivelse, hvor den frie varmeafgivelse yderlig opdeles i et konvektions- og strålingsbidrag [Grau et al., 2008]. Eftersom personerne og udstyret ikke modelleres geometrisk følger det, at beregningsmodellen kun tager hensyn til strålingsudvekslingen mellem rummets afgrænsende flader. Herudover medregnes den konvektive belastning på rumluften og konvektionen mellem rummets afgrænsende flader og det omsluttende luftmedium. Endvidere er det muligt at tage hensyn til strålingsudveksling med bygningens omkringliggende miljø samt eventuelle skyggedannelse fra nabobygninger [Grau et al., 2008]. Heraf følger det, at ved anvendelse af BSim opnås en rimelig repræsentation af virkeligheden, eftersom der tages hensyn til den varierende termiske belastning samt vejret og konstruktionens varmeakkumulering, hvormed en dynamisk betragtning opnås samt det omkringliggende miljø tages i regning.

Ved at benytte simuleringsresultaterne fra *BSim* er det muligt, at "pille" et rum ud, som vist på figur 6.5, hvor det ønskes at analysere luftstrømningen i. Eftersom den termiske afhængighed med hele bygningen er medregnet vil det forventelige temperatursving derfor afspejles i det betragtede rums overfladetemperaturer og lufttemperatur.



Figur 6.5: Temperaturprofil for det betragtede rums overflader, rumluften og udetemperaturen for en sommerdag i den fiktive bygning.

Eftersom den termiske afhængighed for hele bygningen og dynamikken indgår i det betragtede rums overfladetemperaturer og lufttemperatur, kan der udvælges et antal tidspunkter for forskellige dage om året med dertilhørende værdier af det betragtede rums overfladetemperaturer og lufttemperaturen jf. figur 6.5, som randbetingelse for en CFD simulering. I afhængighed af det konvektive varmeovergangstal, α_k , er det endvidere muligt at eksportere den dertilhørende konvektive varmeflux for hver flade. Dette kan være ønskeligt, eftersom det stiller højere krav til beregningsnettet når overfladetemperaturerne på randene benyttes som randbetingelse ift., hvis en konvektiv varmeflux specificeres for randene [Brohus, 1997]. Hvis strålingsmodellen er "aktiveret" i *BSim* vil stråling indgå som randbetingelse i både overfladetemperaturen og den konvektive varmeflux. På figur 6.6 er en principskitse af det betragtede rum gengivet med hhv. overfladetemperaturer eller en konvektiv varmeflux fra fladerne som randbetingelse.



(a) Overfladetemperatur som randbetingelse for randene. (b) Konvektiv varmeflux som randbetingelse for randende.

Figur 6.6: Skitsering af overfladetemperatur eller konvektiv varmeflux som randbetingelse for randene.

Af figur 6.6 fremgår det, at der ikke er skitseret nogen opsætning af personer, lys, udstyr etc. som randbetingelse. Dette skyldes, at det ikke er muligt og definere en person samt udstyr geometrisk i *BSim* [Grau et al., 2008], hvorfor der efter bestemmelsen af de afgrænsende fladers randbetingelse må gøres overvejelser omkring, hvordan personer kan behandles. Randbetingelsen for personernes rande kan defineres ud fra en overfladetemperatur eller en varmeflux. Varmefluxen konvektions- og strålingsbidrag kan bestemmes ud fra tabelopslag i f.eks. [Fanger, 1972] og [Stenn-Thøde et al., 2001] med kendskab til aktivitetsniveauet. Overfladetemperaturen kan bestemmes som funktion af aktivitetsniveauet og personens overfladeareal ud fra et semiempirisk udtryk opstillet af [Fanger, 1972]. For geometrien af personerne henvises der til afsnit 6.4, hvor forskellige personmodeller præsenteres.

Endeligt skal det specificeres, at ved anvendelse af en strålingsmodel i BSim vil det ikke være korrekt og benytte en strålingsmodel for den senere CFD simulering, da stråling så inkluderes to gange. Strålingsmodellen i BSim er dog relativ grov i forhold til de implementerede i diverse CFD programmer, hvor personernes geometri kan tages i betragtning og ikke kun de afgrænsende flader, som det er tilfældet med BSim.

I projektet ønskes det primært, at anskueliggøre hvilken indflydelsen valget af de senere omtalte personmodeller i afsnit 6.4 har på strømningsfeltet ved anvendelse af CFD, hvorfor det vælges at betragte fladerne af et rum som værende adiabatiske. Dette kombineres sammen med de nedenfor omtalte personmodeller, hvor opstilling af casene der undersøges er omtalt i kapitel 7.

6.4 Personmodeller

Fra forsøget omtalt i kapitel 5, hvor den termiske interaktion mellem personer blev undersøgt ved forskellige persontæthed samt litteraturstudiet omtalt i kapitel 2, tyder det på, at der ikke indtræffer nogen termiske vekselvirkning mellem personer ved den tæthed, som der kan forventes i en biograf, koncertsal etc. Denne indikation giver relativ frie hænder ved modellering af mange personer dog under den forudsætning, at personmodellens varmeafgivelse er identisk med den faktiske.

Da personer afgiver varme fra deres overflade ved konvektion, stråling og fordampning, hvor den konvektive andel overføres til rumluften jf. [Stenn-Thøde et al., 2001], må det forventes at have betydning for strømningsfeltet, hvordan geometrien af personerne opstilles. Endvidere vil en høj detaljeringsgrad af personerne medfører et større antal celler i beregningsnettet i forhold til en lav detaljeringsgrad af personerne og dermed et større krav til computerressourcer [Nielsen et al., 2007].

For en enkeltstående person er indflydelsen af detaljeringsgraden for personmodellens geometri på luftstrømningen undersøgt i bl.a. [Topp et al., 2003b], [Topp et al., 2003a] og [Deevy og Gobeau, 2006]. Her blev det fundet, at når det globale strømningsbillede skal bestemmes via CFD, kan en simpel personmodel anvendes, hvorimod der kræves en højere detaljeringsgrad af personmodellen, når det lokale termiske miljø skal undersøges. Endvidere blev det også fundet i [Topp et al., 2003a], at indflydelsen af adskilte ben har stor indflydelse på den lokale lufthastighed.

Til at anskueliggøre persongeometriens indflydelse på strømningsfeltet, når mange personers geometri skal gengives, opstilles der i det følgende fem detaljeringsgrader af en computer simuleret person, CSP. For at reducere kravet til beregningsnettet opstilles der en personmodel, hvor personernes ikke defineres geometrisk, men hvor deres varmeafgivelse påføres en flade. Hertil overvejes ligeledes en anden variant, hvor personerne heller ikke defineres geometrisk, men hvor deres varmeafgivelse påføres et volumen som antager en størrelse lig personernes ydre periferi. Herudover gengives der tre forskellige detaljeringsgrader af en stående persons geometri efter [Brohus, 1997]. På figur 6.7 er de fem opstillede personmodeller gengivet ved et personantal på 25 personer.

Det samlede forventede eksponerede overfladeareal af CSP model 3-5 er fastlagt af [Brohus, 1997] ud fra overfladearealet af en nøgen termisk manikindukke på $1,47 \text{ m}^2$. Isolansen af beklædningen som manikindukken var iført svarede til 0,8 clo og som følge af beklædningen var stramtsiddende, blev det vurderet, at overfladearealet skulle øges med 10% [Brohus, 1997]. Størrelsen af CSP model 3-5 er gengivet i tabel 6.1

Del	CSP 3	CSP 4	CSP 5
Krop Ben Hoved	1,7 × 0,3 × 0,16216	$0.9 \times 0.3 \times 0.13803$ $0.8 \times 0.105 \times 0.13803$	$\begin{array}{c} 0,67 \times 0,3 \times 0,14429 \\ 0,8 \times 0,105 \times 0,14429 \\ 0,23 \times 0,13 \times 0,18 \end{array}$

Tabel 6.1: Geometri af CSP 3 – CSP 5 angivet som længde \times bredde \times dybde i meter [Brohus, 1997].



Figur 6.7: Illustration af de fem præsenterede personmodeller ved et personantal på 25 personer. CSP model 3 – 5 gengivet efter [Brohus, 1997].

Kapitel

Cases med fortrængningsventilation

Til at undersøge indflydelsen af de præsenterede personmodeller i afsnit 6.4 på strømningsfeltet opstilles der i det følgende en række cases for et stort rum ventileret efter fortrængningsprincippet. Til dette formål benyttes geometrien af et forsøgsrum, som blev anvendt til at undersøge en eksperimentel personmodel af [Møller, 2008], hvor en beskrivelse af forsøget og observationer kan findes under litteraturstudiet i kapitel 2. Indledningsvis introduceres det anvendte rum, hvorefter opstilling af en række cases med fortrængningsventilation følger. Herefter følger en netpunktsanalyse med anvendelse af personmodellen CSP2. Der præsenteres endvidere en række cases med anvendelse af en personbelastning på 25 personer. Til at udføre CFD simuleringerne anvendes det kommercielle CFD program ANSYS-CFX version 11.0.

7.1 Rumgeometri og randbetingelser

Der tages udgangspunkt i det anvendte rum, som forfatteren [Møller, 2008] benyttede til udførelse af forsøg med en eksperimentel personmodel. Dette gøres med henblik på, at kunne foretage en sammenligning med de senere opstillede simuleringer og målingerne udført af [Møller, 2008]. En plantegning af det dertilhørende anvendte rum er illustreret på figur 7.1 og har dimensionen $4,2 \,\mathrm{m} \times 3,6 \,\mathrm{m} \times 2,2 \,\mathrm{m}$. I forsøgene udført af [Møller, 2008] blev en persons geometri og varmeafgivelse forsimplet af en elpære omsluttet af en matsort malet dåse. I forsøget blev en skaleringsfaktor på 4,9 anvendt bestemt ud fra dåsens højde på 245 mm i forhold til en siddende person med en højde af 1200 mm. Afstanden mellem dåserne blev herefter fastlagt i forhold til afstanden mellem personer i en virkelig biograf og herefter nedskaleret med skaleringsfaktoren på 4,9. Placeringen for 150 enheder af den eksperimentelle personmodel, i det anvendte forsøgsrum, er gengivet på figur 7.1.


Figur 7.1: Plantegning ved anvendelse af 150 enheder af den eksperimentelle personmodel og detalje af placeringen heraf [Møller, 2008]. Alle mål i mm.

Det er af interesse at undersøge luftstrømningen i et stort rum med mange mennesker, hvorfor forsøgsrummet anvendt af [Møller, 2008] opskaleres til fuldskala ved anvendelse af skaleringsfaktoren på 4,9. Heraf følger det, at rummets dimension antager en størrelse på $20,58 \text{ m} \times 17,64 \text{ m} \times 10,78 \text{ m}$, hvor en model af det anvendte rum til CFD simuleringerne kan ses på figur 7.2. Heraf fremgår placering af indblæsning og udsugning ligeledes.



Figur 7.2: Størrelse af det anvendte rum til de senere opstillede CFD modeller med placering af indblæsning og udsugning. Alle mål i mm.

Ved placering af personmodellerne CSP3 – CSP5 skal centerlinien heraf være sammenfaldende med den eksperimentelle personmodel anvendt i forsøget udført af [Møller, 2008] for, at der vil være overensstemmelse med "virkeligheden" og CFD modellerne. Afstanden mellem to dåser for den eksperimentelle personmodel er for hhv. x- og y-retningen 156 mm og 136 mm, som det kan ses af figur 7.1b. Heraf følger det, at for placering af CSP3 – CSP5 skal afstanden mellem centerlinien i hhv. x- og y-retningen være 766 mm og 666 mm ved anvendelse af skaleringsfaktoren på 4,9.

Når rummet ventileres efter fortrængningsprincippet, kan det f.eks. vælges, at placere indblæsningsarmaturer langs væggene og indblæse med en lav hastighed eller indblæse luften lokalt omkring personer med lav hastighed f.eks. gennem hvirveldiffusorer/stoleindblæsning, hvor der for begge situationer indblæses med en undertemperatur samt udsuges ved loftsniveau. I studiet udført af [Møller, 2008] blev forskellige udformninger til at simplificere stoleindblæsninger med overvejet med henblik på at skabe en model, hvor opdriften var i orden. Det blev valgt, at indblæse luften gennem en permeabel indblæsningspose under varmekilderne for at sikre en lav indblæsningshastighed så strømningen ville være styret af den termiske opdrift og for at undgå en situation med for høj inerti, hvilket kunne medføre en fuld opblanding af luften i rummet. For at kunne foretage en sammenligning mellem de senere simulerede strømningsmønster og de fra forsøgene målte, vælges det derfor, at anvende den simplificerede udgave af stoleindblæsningen i form af indblæsningsposen. Dimensionen af indblæsningsarealet er 7,66 m×9,98 m og diameteren for udsugning 0,98 m ved anvendelse af skaleringsfaktoren på 4,9. Udformningen af rummet med placering af indblæsning og udsugning kan ses på figur 7.2.

Ud over geometrien af selve rummet samt indblæsning og udsugning skal luftskiftet og rumtemperaturen fastlægges, da disse er en del af begyndelses- og randbetingelserne for en CFD simulering. I praksis vil det være nødvendigt, at have kendskab til rummets funktion og brug for at kunne skønne det forventede aktivitetsniveau af personerne, som opholder sig i rummet. Aktivitetsniveauet vil have indflydelse på personens afgivelse af varme og CO_2 og dermed også på hhv. temperaturen i rummet og det nødvendige luftskifte. Herudover vil antallet af personer i rummet også få indflydelse samt valget af komfortklasse. Hvis der haves forsøgsdata til rådighed, kan dette endvidere bruges som begyndelses- og randbetingelserne til en CFD simulering, såfremt de passer til casen, der ønskes undersøgt.

I projektet bestemmes den nødvendige luftmængde ud fra, at det atmosfæriske indeklima opfylder komfortklasse II jf. [DS 15251, 2007], hvor den højeste luftmængde bestemt ud fra indholdet af CO_2 i indeluften eller den oplevede luftkvalitet benyttes. For at det atmosfæriske indeklima kan kategoriseres som værende i komfortklasse II, må CO_2 koncentrationen ikke overskride 850 ppm og den oplevede luftkvalitet ikke overskride en forurening svarende til 1,4 dp jf. [DS 15251, 2007], [CR 1752, 2001]. Bestemmelsen af den nødvendige luftmængde kan findes i appendiks I, hvor det er fundet, at den oplevede luftkvalitet stiller det højeste krav med en nødvendig luftmængde på 1,69 m³/s for opretholdelse af det atmosfæriske indeklima i komfortklasse II. Luftmængden er bestemt ud fra et anslået aktivitetsniveau på 1 met svarende til stillesiddende afslappende aktivitet [Fanger, 1972] og en personbelastning på 150 personer.

Den operative temperatur kan ligeledes fastlægges ud fra valg af komfortklasse, hvor den øvre og nedre værdi afhænger af, om det er en vinter- eller sommercase, der betragtes samt den forventede beklædning af personerne og aktivitetsniveauet. Herefter kan indblæsningstemperaturen bestemmes eftersom mængden af luft, som fjernes fra rummet, er bestemt under designet af det atmosfæriske indeklima. I projektet er det valgt, at fast-låse indblæsningstemperaturen til 20 °C da dette svarer omtrent til den temperatur, som normalt indblæses med ved fortrængningsventilation [Skistad et al., 2002]. Rummets temperatur kan da fastlægges ud fra den opstillede varmebalance givet ved ligning (7.1), som endvidere er illustreret på figur 7.3.



Figur 7.3: Skitse af indgående parametre for den stationære varmebalance.

Det antages, at luften i rummet er fuldt opblandet, hvormed den stationære varmebalance gengivet på figur 7.3 kan udtrykkes som følgende:

$$\Phi_T = \rho_{luft} \cdot c_p \cdot q_v (t_{rum} - t_{ind}) \tag{7.1}$$

hvor

Φ_T	=	Den på rummet total tilførte frie varmebelastning,	[W]
		$\Phi_T = \Phi_K + \Phi_S$	
Φ_K	=	Den konvektive belastning på rummet	[W]
Φ_S	=	Strålingsandelens belastning på rummet	[W]
ρ_{luft}	=	Luftens densitet	$[\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3]$
c_p	=	Luftens specifikke varmekapacitet	$[J/kg^{\circ}C]$
q_v	=	Volumenstrømmen af luften	$[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$

Det karakteristiske ved fortrængningsventilation er, at der hersker en temperaturgradient i rummet, som ikke er tilfældet for opblandingsventilation, hvor ensartet temperatur er herskende ideelt set [Skistad et al., 2002]. For at simplificere bestemmelsen af den udsugede lufts temperatur antages det, at der er ensartet temperatur i rummet. Indblæsningstemperaturen sættes til 20 °C, hvorfor der anvendes stofværdier for luften svarende til denne

temperatur. Luftens densitet og specifikke varmekapacitet kan findes ved tabelopslag i [Stenn-Thøde et al., 2001] til hhv. $1,205\,\rm kg/m^3$ og $1005\,\rm J/kg^\circ C.$

Ud fra pilotsimuleringerne omtalt i appendiks J er det fundet, at det ikke er muligt at få simuleringerne til og konvergere, når strålingen medtages via den implementerede strålingsmodel i ANSYS-CFX grundet computerressourcer. Derfor betragtes der kun en konvektiv varmeafgivelse på 25 W/m^2 pr. person svarende til stillesiddende afslappende aktivitet [Fanger, 1972]. Der regnes med et overfladeareal af en person på $1,62 \text{ m}^2$ jf. afsnit 6.4. Som senere omtalt i afsnit 7.2 har det heller ikke været muligt, at få simuleringerne til og konvergere med en acceptabel simuleringsfejl, når der anvendes 150 enheder af en personmodel med en detaljeringsgrad som CSP3 eller højere grundet computerressourcer, hvorfor det også vælges at foretage simuleringer med kun 25 personer for personmodellerne CSP1 – CSP3 og CSP5. Rummets temperatur bestemmes derfor ud fra en belastning fra både 150 og 25 personer, hvor den konvektive belastning hhv. antager størrelsen 6075 W og 1013 W respektivt. Ud fra den højeste luftmængde på $1,69 \text{ m}^3/\text{s}$ bestemt af den oplevede luftkvalitet, kan den udsugede lufts temperatur findes til hhv. 23,0 °C og 20,5 °C når rummet belastes af 150 personer eller 25 personer. Denne temperatur er svarende til rummets lufttemperatur, eftersom fuld opblanding af luften er antaget.

Når rummet belastes af 25 personer, anvendes der dog stadig luftmængden, der er bestemt ud fra, at 150 personer vil være i atmosfærisk komfort. Dette er valgt for at være sikker på at have en strømning i rummet grundet størrelsen heraf. For en "virkelig" situation vil styringen af ventilationsanlægget regulere luftmængden efter den påførte belastning på rummet. Den til rummet tilførte luftmængde vil derfor være lavere for situationen med 25 personer end 150 personer for en "virkelig" case, hvormed det må forventes, at lufttemperaturen for en "virkelig" case vil antage en højere værdi end den beregnede for casen med 25 personer, da mindre energi fjernes fra rummet med ventilationsluften.

For simularingerne betragtes luften som en ideal gas, da dette medfører en bedre simularing af den termiske opdrift [ANSYS, 2006a]. Hertil skal densiteten af rumluften anvendes, som kan findes til hhv. $1,192 \text{ kg/m}^3$ og $1,202 \text{ kg/m}^3$ når lufttemperaturen er $23,0 \degree \text{C}$ og $20,5 \degree \text{C}$ ved tabelopslag i f.eks. [Stenn-Thøde et al., 2001].

Det ønskes primært at anskueliggøre, hvilken indflydelse valget af personmodel vil få for strømningsfeltet i rummet. Derfor tages der ikke hensyn til varmeakkumulering i konstruktionen, og de afgrænsende flader af rummet betragtes endvidere som værende adiabatiske. Eftersom de afgrænsende flader betragtes som værende adiabatiske, indtræffer der ikke noget varmetab, og det vil derfor få en betydning for simuleringerne, at strålingen ikke medtages. Såfremt strålingen medtages, øges den tilførte varmeeffekt til rummet til det dobbelte eftersom varmeafgivelsen fra hver person er 50 W/m². Ud fra en forudsætning om at ventilationsmængden er den samme, følger det, at rumtemperaturen også vil stige til det dobbelte, eftersom varmetabet fra rummet er forskrevet at være nul. Dette må forventes, at have en betydning for konvektionen mellem rummets faste rande og det omsluttende

luftmedium og heraf en evt. indirekte indflydelse på luftstrømningen. Men som tidligere nævnt har det grundet computerressourcer ikke været muligt, at gennemføre simuleringer med den implementerede strålingsmodel i ANSYS-CFX jf. appendiks J grundet computerressourcer, hvorfor det vælges at se bort fra strålingen for de efterfølgende simuleringer. Det ville dog være en mulighed at anvende BSim til generering af randbetingelser, hvor stråling er inkluderet. Grundet det tidsmæssige aspekt for opsætning af en BSim model vælges det også at se bort fra denne mulighed.

De generelle randbetingelser, som anvendes til simuleringerne er listet i tabel 7.1 i afhængighed af, om rummet belastes af 150 eller 25 personer.

Ventilation						
Massestrøm Indblæsningstemperatur	$\begin{array}{c} 2,04\mathrm{kg/s}\\ 20^{\circ}\mathrm{C} \end{array}$					
Rum						
Afgrænsende flader Rumtemperatur	Adiabatiske					
Ved 150 personer Ved 25 personer	23,0 °C 20,5 °C					
Densitet af luft Ved 150 personer Ved 25 personer	$1,\!192{ m kg/m^3}\ 1,\!202{ m kg/m^3}$					

Tabel 7.1: Oversigt over de anvendte randbetingelser for rummet til simuleringerne i afhængighed af omdet belastes af 150 eller 25 personer.

7.2 Simularinger med 150 personer

I det følgende afsnit præsenteres modellerne, som er anvendt til simuleringerne med en personbelastning på 150 personer efterfulgt af en netpunktsanalyse ved anvendelse af personmodellen CSP2. Herefter følger en præsentation af de fundne simuleringsresultater og en sammenligning med måledata indsamlet af [Møller, 2008].

Der er foretaget pilotsimuleringer med tre forskellige detaljeringsgrader af et beregningsnet ved anvendelse af personmodellen CSP3, hvor opstilling af modellen og de dertilhørende resultater kan ses i appendiks J. Pilotsimuleringerne indikerede, at det ikke er muligt og opnå en tilpas lav simuleringsfejl, når 150 personer modelleres med en personmodel af en detaljeringsgrad som CSP3 eller højere med de tilgængelige computerressourcer. Resultatet fra den mest detaljerede model ved anvendelse af personmodellen CSP3 sammenlignes dog med de fundne resultater med anvendelsen af CSP1 og CSP2.

7.2.1 Opstilling af modeller

Til modellering af 150 personer anvendes der i det følgende de to personmodeller CSP1 og CSP2, som er de to simpleste personmodeller af de fem opstillede i afsnit 6.4. Personmodellen CSP1 består af en flade uden tykkelse, hvorfra der afgives en varmemængde lig den generede fra 150 personer. Fladens størrelse skal svare til periferien af de 150 enheder af den eksperimentelle personmodel, som herefter opskaleres. Dette område fremgår af figur 7.1b at måle 1501 mm×1997 mm. Dette areal opskaleres til fuldskala med skaleringsfaktoren på 4,9, hvormed fladens størrelse kan findes til 7356 mm×9783 mm, hvor placering af fladen i det anvendte rum til CFD simuleringen fremgår af figur 7.4. På figuren fremgår det, at varmekilden, i form af personmodellen CSP1, ikke dækker hele området af indblæsningsarealet. Dette skyldes, at det heller ikke er tilfældet for den ydre periferi af de 150 enheder af den eksperimentelle personmodel, hvormed der er overensstemmelse med "virkeligheden" og den opstillede CFD model.



Figur 7.4: Placering af CSP1 og CSP2 for CFD modellen ved modellering af 150 personer. Alle mål i mm.

Personmodellen CSP2 bygger på, at alle personerne modelleres som et stort samlet volumen, som omslutter den ydre afgrænsning af de 150 personer. Dermed vil periferien for CSP2 være identisk med CSP1 modellen, og højden af voluminet er 1,7 m, eftersom der regnes med stående personer af denne højde jf. personmodellerne omtalt i afsnit 6.4. For placering af voluminet henvises der til figur 7.4, hvor placering af personmodellen CSP1 kan ses, da placeringen af CSP2 er identisk. Det vil endvidere have en betydning for luftstrømningen, hvilken gennemstrømmelighed voluminet har, som det er antydet på figur 7.5.



Figur 7.5: Skitsering af strømningens retning i afhængighed af om voluminet betragtes som værende gennemstrømmeligt eller massivt.

Som antydet på figur 7.5b vil et massivt volumen hindre den frie strømning gennem voluminet og "tvinges" ud til siderne med et forventeligt forkert billede af strømningen til følge. Det samme vil være gældende for fladen, hvis den betragtes massiv, hvorfor det i det følgende vælges at definere både fladen og voluminet som helt gennemstrømmeligt, 100 % porøst jf. figur 7.5a. Hvis situationen havde været med placering af indblæsninger langs væggene, ville det være mere oplagt, at overveje indflydelsen af forskellige gennemstrømmeligheder for voluminet eller fladen, som repræsenterer personerne.

Som nævnt i afsnit 7.1 vil de 150 personer afgive en ren konvektiv varmemængde på 6075 W. Med et areal af CSP1 modellen på $72,0 \text{ m}^2$ svarer dette til en varmelast på $84,4 \text{ W/m}^2$ og for voluminet $49,6 \text{ W/m}^3$, da voluminet antager en størrelse på $122,4 \text{ m}^3$.

7.2.2 Netpunktsanalyse

Til udarbejdelse af netpunktsanalysen anvendes personmodellen CSP2 med et samlet volumen svarende til 150 personer med placeringen som vist på figur 7.4. Til anskueliggørelsen af temperatur- og strømningsfeltets afhængighed af beregningsnettets kvalitet er der opstillet 14 cases med stigende netkvalitet. Der er forsøgt at opstille hhv. et så ringe net samt det bedst mulige i forhold til den tilgængelige computerressource.

Der foreskrives en maksimal cellestørrelse på rummets afgrænsende flader, som reduceres gradvist mellem hver case, hvilket ligeledes gøres for rummets volumen kaldet det "frie" rum i det efterfølgende. I tabel 7.2 er der givet en oversigt over den maksimale cellestørrelse for hver af de 14 opstillede cases. Uafhængig af case er den mindste cellestørrelse på rummets afgrænsende flader sat til 50 mm. For rummets vægge, gulv, loft samt indblæsning og udsugning er der endvidere opsat et detaljeret grænselag af 10 lag som følge af, at der anvendes turbulensmodellen Shear Stress Transport. Denne kræver, at grænselaget ved faste rande består af mindst 10 lag for at kunne "virke" [ANSYS, 2006b] og [ANSYS,

ľ

M8

M9

M10

M11

M12

M13

M14

Model	Afgrænsende flader [mm]	"Frie" rum [mm]	Antal celler $[stk]$
M1	1500	1500	62.418
M2	1250	1250	71.586
M3	1000	1000	92.796
M4	750	750	152.309
M5	625	625	239.278
M6	500	500	399.653
M7	450	450	524.859

400

350

200

275

250

235

220

2000a

Case [-]

CSP2FT150.1 CSP2FT150.2 CSP2FT150.3 CSP2FT150.4 CSP2FT150.5 CSP2FT150.6 CSP2FT150.6

CSP2FT150.8

CSP2FT150.9

CSP2FT150.10

CSP2FT150.11

CSP2FT150.12

CSP2FT150.13

CSP2FT150.14

Tabel 7.2: Oversigt for antallet af celler samt den definerede maksimale cellestørrelse på fladerne og rummets volumen for de 14 opstillede cases til netpunktsanalysen. Casenavn indikerer, at personmodellen CSP2 anvendes, rummet ventileres efter fortrængningsprincippet og personbelastningen er 150 personer samt casenummeret.

400

350

300

275

250

235

220

Det har grundet den tilgængelige computerressource ikke været muligt at opstille modeller med et større celleantal end omtrent fire millioner, som det fremgår af tabel 7.2. Det tildelte casenavn i tabel 7.2 indeholder hvilken personmodel, ventilationsprincip og personbelastning, som er anvendt samt det pågældende casenummer. Heraf fremgår det, at personmodellen CSP2 anvendes, rummet ventileres efter fortrængningsprincippet og personbelastningen er 150 personer.

Til anskueliggørelsen af temperatur- og strømningsfeltets afhængighed af celleantallet kontrolleres temperaturen og farten i 16 punkter for de 14 opstillede cases. Heraf vil det endvidere følge, om der opnås netpunktsuafhængighed for temperatur- og strømningsfeltet. Placeringen af de 16 punkter kan ses på figur 7.6 og koordinaterne er listet i tabel 7.3. Som det fremgår af figur 7.6 placeres fem af punkter fordelt over varmekilden i en højde af 2,00 m, hvilket er gjort for at få et indblik i temperatur- og strømningsfeltets afhængighed af beregningsnettes kvalitet umiddelbart over varmekilden. Hertil er det også valgt at placere yderlig 3 punkter i tre forskellige højder over varmekilden i rummets centrum for at få et indblik i plumens udvikling midt over varmekilden i afhængighed af beregningsnettets kvalitet. Der placeres yderlig otte punkter i rummet jf. figur 7.6, hvoraf fire er placeret i opholdszonen og fire ovenfor opholdszonen. Hermed fås der også et indblik i beregningsnettets indflydelse på strømningsfeltet udenom varmekilden. Endvidere anses en simuleringsfejl af den numeriske løsning på en tusindedel jf. vejledningen i [ANSYS, 2006a] som værende acceptabel.

729.389

1.069.455

1.593.671

2.058.532

2.699.086

3.209.941

3.840.406



Figur 7.6: Illustration af de 16 punkter hvor temperaturen og farten undersøges i forbindelse med netpunktsanalysen.

Punkt [-]	Koordinat (x, y, z) $[m]$	$\mathrm{Punkt}\;[-]$	Koordinat (x, y, z) $[m]$
1	(3,23, 8,82, 0,80)	9	(8,38, 5,08, 2,00)
2	(3,23, 8,82, 5,39)	10	(12, 20, 5, 08, 2, 00)
3	(10,29,1,91,0,80)	11	(8, 38, 12, 56, 2, 00)
4	(10,29,1,91,5,39)	12	(12, 20, 12, 56, 2, 00)
5	(17, 35, 8, 82, 0, 80)	13	(10,29,8,82,2,00)
6	(17, 35, 8, 82, 5, 39)	14	(10,29,8,82,3,70)
7	(10,29,15,73,0,80)	15	(10,29,8,82,5,39)
8	(10,29,15,73,5,39)	16	(10,29,8,82,8,78)

Tabel 7.3: Koordinater til de 16 punkter, som anvendes til undersøgelse af temperatur- og strømningsfeltets afhængighed af beregningsnettets kvalitet.

Beregningsnettets indflydelse på temperatur- og strømningsfeltet

I det følgende afsnit belyses indflydelsen af beregningsnettets kvalitet på simuleringen af temperatur- og strømningsfeltet for det præsenterede rum med en påført personbelastning af 150 personer, som er modelleret med personmodellen CSP2. Først præsenteres ændringen af temperaturen og farten i de 16 omtalte punkter jf. tabel 7.3 og figur 7.6. Dette efterfølges af temperatur- og strømningsfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for seks af de 14 opstillede cases. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan temperatur- og strømningsfeltet for alle de 14 opstillede cases ses for hele rummets xz- og xy-plan i mappen film/CFD/netpunktsanalyse.

På figur 7.7 og 7.8 er ændringen af temperaturen i hhv. punkterne 1-8 og 9-16 i afhængighed af celleantallet vist. Endvidere er den midlet normaliseret simuleringsfejl for energiligningen over hele domænet skitseret af miniaturegraferne på x-aksen, for hver gang en betydelig ændring af simuleringsfejlens størrelse indtræffer. Ændringen af farten i punkterne 1-8 og 9-16 kan ses på hhv. figur 7.9 og 7.10 i afhængighed af beregningsnettets celleantallet. På figurerne er den midlet normaliseret simuleringsfejl for bevægelsesligningens tre hastighedskomposanter u, v og w endvidere gengivet, for hver gang der indtræffer en betydelig ændring heraf i afhængighed af celleantallet.



under den store graf viser den midlet normaliseret simuleringsfejl af energiligningen over hele domænet for hver gang en betydelig ændring indtræffer. På miniaturegraferne angiver y-aksen fejlens størrelse og x-aksen iterationsnummeret. På den store figur angiver eksempelvis M1 model nummer 1 jf. tabel 7.2. Figur 7.7: Celleantallets indflydelse på temperaturen i punkterne 1 – 8 med koordinaterne som angivet i tabel 7.3. De tre miniaturegrafer



under den store graf viser den midlet normaliseret simuleringsfejl af energiligningen over hele domænet for hver gang en betydelig ændring indtræffer. På miniaturegraferne angiver y-aksen fejlens størrelse og x-aksen iterationsnummeret. På den store figur angiver eksempelvis M1 model nummer 1 jf. tabel 7.2. Figur 7.8: Celleantallets indflydelse på temperaturen i punkterne 9 – 16 med koordinaterne som angivet i tabel 7.3. De tre miniaturegrafer



graf viser den midlet normaliseret simuleringsfejl af bevægelsesligningens tre komposanterne u, v og w over hele domænet for hver gang en eksempelvis M1 model nummer 1 jf. tabel 7.2. betydelig ændring indtræffer. På miniaturegraferne angiver y-aksen fejlens størrelse og x-aksen iterationsnummeret. På den store figur angiver Figur 7.9: Celleantallets indflydelse på farten i punkterne 1 – 8 med koordinaterne som angivet i tabel 7.3. Miniturgraferne under den store



store graf viser den midlet normaliseret simuleringsfejl af bevægelsesligningens tre komposanterne u, v og w over hele domænet for hver gang en betydelig ændring indtræffer. På miniaturegraferne angiver y-aksen fejlens størrelse og x-aksen iterationsnummeret. På den store figur angiver eksempelvis M1 model nummer 1 jf. tabel 7.2.

For punkterne 2, 4, 6, 8 og 15 som alle er placeret i højden $z = 5.39 \,\mathrm{m}$, tyder det på, at celleantallet ikke har nævneværdig indflydelse på temperaturen over opholdszonen, da temperaturen i disse punkter er tilnærmelsesvis uændret for de 14 undersøgte cases, som det kan ses af figur 7.7 og 7.8. For punkterne 9-16 som alle er lokaliseret over varmekilden dog udenfor opholdszonen, tyder det heller ikke på, at celleantallet har indflydelse på den simulerede temperatur, da den maksimalt undergår en ændring ± 0.2 °C i afhængighed af celleantallet. Dette kan indikere en fuld opblanding af luften over opholdszonen. For punkterne 1, 3, 5 og 7 som er lokaliseret i opholdszonen udenfor varmekilden, kan det ses, at den simulerede temperatur falder kontinuerligt indtil et celleantal på omtrent 1 mio, hvorefter den skiftevis stiger og falder. Dette indikerer, at temperaturfeltet simuleres relativt ustabilt for et celleantal over 1 mio. Dette bekræftes også af simuleringsfejlen, der er opnået for de opstillede cases, eftersom den laveste simuleringsfejl opnås ved omtrent 1 mio celler. Herefter stiger den til et relativt højt niveau, hvor den oscillerer jf. miniaturegraferne på figur 7.7 og 7.8. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan den midlet normaliseret simuleringsfejl for hele domænet ved løsning af energiligningen for de 14 undersøgte cases findes i mappen billeder/CFD/netpunktsanalyse/simuleringsfejl.

Som det fremgår af figur 7.9, tyder det ikke på, at celleantallet har den store indflydelse på den simulerede fart i punkterne 1-8, da de tilnærmelsesvist er uændret uafhængigt af celleantallet. Derimod ses celleantallet, at have relativ større betydning for punkterne 9-16 jf. figur 7.10, som alle er lokaliseret over varmekilden. Endvidere kan det også ses af figur 7.10, at den simulerede fart stiger i rummets højde over personerne samt antager højere værdier over varmekilden, hvilket kan tyde på en øget termisk opdrift over varmekilden. Som for temperaturfeltet simuleres strømningsfeltet også relativt ustabilt for et celleantal over 1 mio jf. miniaturegraferne på figur 7.9 og 7.10, hvor det er antydet, at simuleringsfejlen stiger til relativt højt niveau, hvor den oscillerer. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan den normaliseret midlet simuleringsfejl for hele domænet ved løsning af bevægelsesligningen for de 14 undersøgte cases findes i mappen *billeder/CFD/netpunktsanalyse/simuleringsfejl*.

For at anskueliggøre den simulerede temperaturs afhængighed af celleantallet, er temperaturfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for seks af de i alt 14 opstillede cases gengivet på figur 7.11. På figuren er voluminet svarende til de 150 personers afgrænsning indikeret af den hvide klods, som er gennemstrømmeligt, 100 % porøs. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan temperaturfeltet for alle de 14 opstillede cases ses for hele rummets xz- og xy-plan i mappen film/CFD/netpunktsanalyse.



Figur 7.11: Temperaturfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m. Voluminet svarende til de 150 personers afgrænsning er indikeret af den hvide klods, som er 100 % gennemstrømmeligt.

På figur 7.11 kan det ses, at der indtræffer en lagdeling af temperaturen uafhængigt af celleantallet, hvor detaljeringsgraden heraf stiger med celleantallet. Lagdelingen bliver dog mere ustabil ved stigende celleantal, som det kan ses af figur 7.11. Endvidere kan det ses, at plumen over personerne bliver mere fremherskende ved stigende celleantal. Herudover kan det også ses, at der umiddelbart over opholdszonen antydes at være en fuld opblanding af luften, idet temperaturfeltet er tilnærmelsesvist ensartet.

For at anskueliggøre den simulerede farts afhængighed af celleantallet, er fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for seks af de i alt 14 opstillede cases gengivet på figur 7.12. På figuren er voluminet svarende til de 150 personers afgrænsning indikeret af den hvide klods, som er gennemstrømmeligt, 100% porøs. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan fartfeltet for alle de 14 opstillede cases ses for hele rummets xz- og xy-plan i mappen



film/CFD/netpunktsanalyse.

(e) Model 12, 2.699.086 celler.



Figur 7.12: Fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m. Voluminet svarende til de 150 personers afgrænsning er indikeret af den hvide klods, som er 100 % gennemstrømmeligt.

Som det kan ses af figur 7.12, skabes en højere fart midt over personerne på nær modellerne med et celleantal på omtrent 0.5 mio - 1 mio, hvor der skabes to stråler med en vinkel på tilnærmelsesvis 45° , som omslutter et felt over varmekilden med en fart tilnærmelsesvis lig nul, som det også fremgår af figuren. Dette indikerer, at den termiske opdrift som varmekilden må forventes at skabe ikke simuleres, når celleantallet er 0.5 mio - 1 mio, som det også er antydet på figur 7.11. For et celleantal over 1 mio indtræffer endvidere et meget "urolig" tendens af farten. For at tydeliggøre hastighedsfeltets udformning i afhængighed af det anvendte celleantal, er hastigheden gengivet på figur 7.13 for seks af de 14 opstillede modeller til netpunktsanalysen.



(e) Model 12, 2.699.086 celler.

(f) Model 14, 3.840.406 celler.

Figur 7.13: Hastighedsfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m. Voluminet svarende til de 150 personers afgrænsning er indikeret af den hvide klods, som er 100 % gennemstrømmeligt.

Som anskueliggjort af ovenstående netpunktsanalyse er der ikke opnået netpunktsuafhængighed for temperaturen eller farten, samt der er stor forskel på, hvordan temperaturog strømningsfeltet simuleres i afhængighed af celleantallet. Det vælges derfor i det følgende, at anvende det største antal celler computerressourcerne tillader for de efterfølgende simuleringer. I tabel 7.4 er de størst mulig opstillede beregningsnet ved anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3 gengivet samt de anvendte størrelser af celler på rummets afgrænsende flader, det "frie" rum samt på geometrien af personmodellen CSP3.

Case		Fla	de [mm]		'Frie" rum [mm]	Celler [stk]
	Indblæs-	Udsug-	Person-	Afgrænsende		
	ning	ning	model			
CSP1FT150.1	50/100	50/100	-	50/225	225	3.989.877
CSP2FT150.14	-	-	-	50/220	220	3.840.406
CSP3FT150.3	50/100	50/100	25/75	50/400	400	3.245.057

Tabel 7.4: Anvendt minimum og maksimum cellestørrelse for flader og det fri rum for opstilling af beregningsnettet med det højest antal celler computerressourcerne tillader for anvendelse af CSP1, CSP2 og CSP3. I rækken "Flade" angiver tallet før / den mindst tilladelige cellestørrelse og tallet efter det størst tilladelige cellestørrelse, som er anvendt til generering af beregningsnettet.

Det tildelte casenavn i tabel 7.4 indeholder hvilken personmodel, ventilationsprincip og personbelastning, som er anvendt samt det pågældende casenummer. Eksempelvis for casen CSP3FT150.3 fremgår det, at personmodellen CSP3 anvendes, rummet ventileres efter fortrængningsprincippet og personbelastningen er 150 personer.

7.2.3 Simuleringsresultater

I det følgende afsnit præsenteres de opnåede simuleringsresultater for temperatur- og strømningsfeltet ved anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3 når rummet belastes af 150 personer, hvor det bedst mulige beregningsnet ud fra den tilgængelige computerressource anvendes samt casene betragtes stationært. Dette efterfølges af en kort præsentation af en case, der simuleres transient for fem forskellige tidsskridt ved anvendelse af modellen CSP2FT150.7, hvis beregningsnet består af cirka 0,5 mio celler. Der præsenteres generelt kun resultater for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i det følgende. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan temperatur- og fartfeltet for rummets xz- og xy-plan for de tre cases CSP1FT150.1, CSP2FT150.14 og CSP3FT150.3 findes i mappen film/CFD.

Temperatur

På figur 7.14 er temperaturfeltet gengivet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m ved hhv. anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3, når rummet påføres en personbelastning på 150 personer.



(c) CSP3FT150.3, Antal celler 3.245.057.

Figur 7.14: Temperaturfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m ved en personbelastning på 150 personer med anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3 med det bedst mulige beregningsnet ud fra den tilgængelige computerressource.

For alle tre personmodeller opnås der ved simuleringerne en lagdeling af temperaturen samt generering af en plumen over varmekilden, som det fremgår af figur 7.14. For casen hvor personmodellen CSP1 anvendes opnås et tilnærmelsesvis symmetrisk temperaturfelt, hvilket ikke er tilfældet når personmodellen CSP2 og CSP3 anvendes. For anvendelsen af CSP2 og CSP3 er udbredelsen af lagdeling af temperaturen også mere fremtræden i rummets højde end ved anvendelse af personmodellen CSP1, som det også fremgår af figuren. Herudover indikerer simuleringerne med de to personmodeller CSP2 og CSP3, at der over opholdszonen indtræffer en fuld opblanding af luften idet temperaturfeltet her er tilnærmelsesvist identisk. Den tilnærmelsesvise ensartede temperaturfelt indtræffer dog i en lavere højde med anvendelse af personmodellen CSP1. Ovenstående observationer kan ligeledes gøres for rummets xy-plan, som det kan ses af filmklippene på den vedlagte bilags DVD, DVDI.

${\bf Str} {\it \emptyset} {\bf mnings felt}$

For rummets xz-plan ved y = 8,82 m er farten gengivet på figur 7.15 for casene med anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3, når rummet påføres en personbelastning på 150 personer.

For casen CSP1FT150.1 simuleres et symmetrisk fartfelt jf. figur 7.15a, hvor der for de to andre cases med anvendelse af personmodellerne CSP2 og CSP3 ikke indtræffer et symmetrisk fartfelt. For de tre personmodeller bliver farten midt over dem simuleret højere end i den resterende del af rummet, hvilket må forventes, at skyldes den termiske opdrift genereret af personerne. Ovenstående observationer kan ligeledes gøres for rummets xyplan, som det kan ses af filmklippene på den vedlagte bilags DVD, DVDI. Hastighedsfeltet for de tre cases hvor 150 personer er simuleret med personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3 er gengivet på figur 7.16 for at anskueliggøre strømningen i rummet. Hastighedsfeltet er gengivet for xz-planet ved y = 8,82 m.



Figur 7.15: Farten for rummets xz-plan ved y = 8,82 m ved en personbelastning på 150 personer med anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3 med det bedst mulige beregningsnet ud fra den

tilgængelige computerressource.



(c) CSP3FT150.3, Antal celler 3.245.057.

Figur 7.16: Hastigheden for rummets xz-plan ved y = 8,82 m ved en personbelastning på 150 personer med anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2 og CSP3 med det bedst mulige beregningsnet ud fra den tilgængelige computerressource.

Transient betragtning

Når celleantallet overskrider 0,5 mio begynder den midlet simuleringsfejl at stige for bevægelsesligningens tre komposanter for til sidst at ende i et niveau, hvor den oscillerer som tidligere nævnt. Til at undersøge om en transient løsning vil medføre en mere stabil løsning til det ønskede niveau, tages der udgangspunkt i casen CSP2FT150.7 med et celleantal på 0,5 mio. Det vælges at udføre simuleringen over en virkelig tid svarende til 1800 s, som opdeles i x antal tidsskridt som anskueliggjort på figur 7.17.



Figur 7.17: Illustration for opdeling af den "virkelige" tid luftstrømningen simuleres over.

For at undersøge den numeriske løsnings følsomhed over for fjerde dimension i form af tiden undersøges casen CSP2FT150.7 for fem forskellige størrelser af Δt på hhv. 10 s, 5 s, 2,5 s, 1,25 s og 0,50 s. Hermed fås også et indblik i, hvilken betydning tidsskridtets størrelse har for udviklingen af strømningen for den pågældende model. På figur 7.18, 7.19 og 7.20 er fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m gengivet efter et tidslig forløb på 300 s, 600 s, 900 s, 1200 s, 1500 s og 1800 s for hhv. et tidsskridt på 10 s, 5 s og 0,5 s. Der er ikke gengivet resultater for det simulerede fartfelt for $\Delta t = 2,5$ s og 1,25 s, da resultatet heraf er identisk med det opnåede ved et tidsskridt på 0,5 s. Resultatet kan dog findes på den vedlagte bilags DVD, DVDI.

Som det fremgår af figur 7.18, 7.19 og 7.20 vil størrelsen af tidsskridtet for en transient løsning have en relativ stor indflydelse på det simulerede fartfelt ud over selvfølgelig beregningsnettets kvalitet. Når tidsskridtet er 10s eller større, antager det simulerede fartfelt en form, som ikke er sammenligneligt med den tilsvarende stationære på figur 7.12c. Ved at sænke tidsskridtet størrelse til 5s begynder det simulerede fartfelt at ligne det stationære, hvor det for et tidsskridt $\leq 2,5$ s antager samme struktur som det stationære, men med mindre simuleringsfejl til følge. De opnåede simuleringsfejl for de transiente simuleringer kan findes på den vedlagte bilags DVD, DVDI, i mappen *billeder/CFD/transient*.

Temperaturfeltet for den transiente simulering af casen CSP2FT150.7 i afhængighed af tidsskridtet størrelse kan findes på den vedlagte bilags DVD, DVDI, i mappen *bille-der/CFD/transient*. De er ikke medtaget i rapporten, eftersom de er identiske med den stationære løsning af case CSP2FT150.7 på nær, når tidsskridtet antager en størrelse på 10 s. Dette tyder på, at en transient betragtning må forventes og være mere fordelagtig til simulering af farten, men har mindre betydning for temperaturfeltet.



Figur 7.18: Fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m til tiden 300 s, 600 s, 900 s, 1200 s, 1500 s og 1800 s når $\Delta t = 10 \text{ s}$ ved anvendelse af casen CSP2FT150.7.



Figur 7.19: Fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m til tiden 300 s, 600 s, 900 s, 1200 s, 1500 s og 1800 s når $\Delta t = 5$ s ved anvendelse af casen CSP2FT150.7.



Figur 7.20: Fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m til tiden 300 s, 600 s, 900 s, 1200 s, 1500 s og 1800 s når $\Delta t = 0,25$ s ved anvendelse af casen CSP2FT150.7.

Sammenligning med måledata

Til anskueliggørelse af om der simuleres et strømningsbillede som det observerede af [Møller, 2008], er der foretaget en sammenligning hermed. I studiet udført af [Møller, 2008] er et andet Arkimedes tal dog herskende, eftersom den termiske belastning i modelforsøget ikke er identisk med den anvendte for CFD modellerne. Arkimedes tal beskriver forholdet mellem de termiske kræfter og de inertikræfter, som påvirker indblæsningsluften og kan bestemmes af [Nielsen, 1993]:

$$\operatorname{Ar} = \frac{\beta g D(t_r - t_i)}{v_0^2} \tag{7.2}$$

hvor

β	=	Fluidets udvidelseskoefficient	$[^{\circ}\mathrm{C}^{-1}]$
g	=	Tyngdeaccelerationen, $9,81 \mathrm{m/s^2}$	$[\mathrm{m/s^2}]$
D	=	Den karakteristiske længde	[m]
t_r	=	Rumtemperatur	$[^{\circ}C]$
t_i	=	Indblæsningstemperatur	$[^{\circ}C]$
v_0	=	Indblæsningshastighed	[m/s]

Luftens udvidelseskoefficient bestemmes for en lufttemperatur på 20 °C, hvormed den kan findes til $3,43 \cdot 10^{-3}$ °C⁻¹ [Stenn-Thøde et al., 2001]. Da personerne udgør varmekilden sættes den karakteristiske længde, D, til kvadratroden af arealet over personerne. Personernes ydre afgrænsning måler 7,36 m×9,78 m jf. figur 7.4, hvormed D kan findes til:

$$D = \sqrt{71,96\,\mathrm{m}^2} = 8,48\,\mathrm{m} \tag{7.3}$$

Temperaturforskellen $\Delta t = t_r - t_i$, som indgår i ligning (7.2), kan bestemmes af følgende udtryk, eftersom den tilførte varmeeffekt til rummet er kendt [Skistad et al., 2002]:

$$\Phi = \rho_{luft} \cdot c_p \cdot q_v \cdot \Delta t \tag{7.4}$$

hvor

Φ	=	Varmeeffekt fra personerne	[W]
ρ_{luft}	=	Luftens densitet	$[\mathrm{kg}/\mathrm{m}^3]$
c_p	=	Luftens specifikke varmekapacitet	$[J/kg^{\circ}C]$
q_v	=	Volumenstrømmen af luften	$[\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$

Ud fra en indblæsningstemperatur på 20 °C og en volumenstrøm på $1,69 \text{ m}^3/\text{s}$ kan Δt findes til 3,0 °C ved en tilført konvektiv varmeeffekt på 6075 W fra de 150 personer. Heraf kan Arkimedes tal for CFD modellerne bestemmes til 2176 ved anvendelse af ligning (7.2). For modelforsøget udført af [Møller, 2008] med 150 enheder af den eksperimentelle personmodel

er Arkimedes tal fundet til 4275. Heraf følger det, at for CFD modellerne er de termiske drivkræfter mindre dominerende end for modelforsøget, som det ønskes at sammenligne med og mere styret af inertikræfterne. Til bestemmelse af Arkimedes tal er der anvendt tilnærmelsesvis samme volumenstrøm for CFD-modellerne, som anvendt til modelforsøget med 150 enheder af den eksperimentelle personmodel i studiet udført af [Møller, 2008].

Der er taget udgangspunkt i én måling af luftens fart for yz-planet ved x = 2,00 m og i højden z = 1,1 m for modelforsøget udført af [Møller, 2008], som svarer til x = 9,80 m og højden z = 5,39 m for CFD-modellerne. På figur 7.21 kan profilet for den simulerede fart for casene CSP1FT150.1, CSP2FT150.14 og CSP3FT150.1 og det målte af [Møller, 2008] ses. Alle er med en personbelastning svarende til 150 personer.



Figur 7.21: Sammenligning af luftens fart for yz-plan i højden z = 5,39 m ved x = 9,98 m for casene CSP1FT150.1, CSP2FT150.14 og CSP3FT150.1 og det målte foretaget af [Møller, 2008]. For casene CSP1FT150.1, CSP2FT150.14 og CSP3FT150.1 er Arkimedes tal 2176 og for det målte 4275 jf. [Møller, 2008]. Alle er med en personbelastning på 150 personer.

Af figur 7.21 kan det ses, at luftens fart øges ind mod midten af personerne og antager den højeste værdi midt over personerne ved anvendelse af de tre personmodeller CSP1 – CSP3 med en personbelastning på 150 personer. Den samme tendens er tilnærmelsesvis ligeledes herskende for modelforsøget udført [Møller, 2008], som det ligeledes fremgår af figuren. Endvidere fremgår det, at personmodellerne CSP2 og CSP3 medfører højere værdier af luftens fart end ved anvendelsen af personmodellen CSP1.

Ud fra ovenstående vurderes det, at de tre personmodeller kan simulere et sammenligneligt temperatur- og strømningsfelt som det målte af [Møller, 2008]. Endvidere fremgår det også, at det simulerede temperatur- og strømningsfelt med personmodellen CSP2 er tilnærmelsesvis identisk med det, som simuleres med personmodellen CSP3. Forskellen der er imellem det simulerede temperatur- og strømningsfelt ved anvendelse af personmodellen CSP1 i forhold til personmodellen CSP2 og CSP3 vurderes delvis og skyldes måden, hvorpå varmen afgives fra personmodellen til rummet.

7.3 Simularinger med 25 personer

I det følgende afsnit præsenteres opstilling af modellerne, hvor rummet omtalt i afsnit 7.1 påføres en personbelastning af 25 personer, som modelleres med fire forskellige personmodeller hhv. CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5, der er omtalt i afsnit 6.4. Herefter følger de simulerede temperatur- og strømningsfelter, som er opnået med de fire personmodeller.

7.3.1 Modeller og randbetingelser

Til anskueliggørelse af personmodellens indflydelse på strømningsfeltet vælges fire forskellige detaljeringsgrader af personerne i form af en samlet flade, et samlet volumen eller som enkeltstående i form af et kubisk rektangel eller af flere kubiske rektangler til repræsentation af en persons silhuet inkluderende adskilte ben, krop og hoved. De fire modeller er omtalt i afsnit 6.4 og er benævnt hhv. CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5.

Til placering af de 25 personer tages der igen udgangspunkt i placeringen af 150 enheder af den eksperimentelle personmodel opstillet af [Møller, 2008], som kan ses på figur 7.1. Det vælges, at placere de 25 personer i fem rækker af hver fem personer, hvormed den midterste person vil være omsluttet af personer på alle dets sider.

Den ydre periferi for 25 enheder af den eksperimentelle personmodel kan findes at måle $0.72 \text{ m} \times 0.64 \text{ m}$ på figur 7.22. Ved anvendelse af skaleringsfaktoren på 4,9 kan den ydre periferi for personmodellen CSP1 og CSP2 findes til $3.53 \text{ m} \times 3.13 \text{ m}$ for den opskalerede CFD model. Placering af personmodellen CSP1 og CSP2 når der regnes med en personbelastning på 25 personer kan ses på figur 7.23. Som omtalt i afsnit 7.2 regnes der med perfekt gennemstrømmelighed af personmodellen CSP1 og CSP2.

Den samlede konvektive varmeeffekt, som afgives fra fladen(CSP1) eller voluminet(CSP2), skal svare til den samlede konvektive afgivne fra de 25 personer. Den samlede konvektive varmeafgivelse fra de 25 personer kan findes til 1012,5 W, eftersom de afgiver 25 W/m^2 pr. person og overfladearealet af en person er $1,62 \text{ m}^2$. Med et fladeareal på $10,1 \text{ m}^2$ kan varmeafgivelsen, som skal påføres fladen findes til $91,7 \text{ W/m}^2$. Ud fra en samlet konvektiv varmeafgivelse på 1012,5 W fra de 25 personer og et volumen på 16 m^3 af kassen kan den konvektive varmeafgivelsen findes til $54,0 \text{ W/m}^3$ for voluminet.



Figur 7.22: Placering for de 25 enheder af den eksperimentelle personmodel som der tages udgangspunkt i. Alle mål i mm.



Figur 7.23: Placering af personmodellen CSP1 hvis område svarer til afgrænsningen af 25 personer. Placering af personmodellen CSP2 er identisk. Alle mål i mm.

Ved placering af 25 enheder af personmodellen CSP3 og CSP5 skal centerlinien for den eksperimentelle personmodel være sammenfaldende med de opstillede personmodellers, når de placeres i rummet, som tidligere omtalt. Hermed bliver placeringen af de 25 enheder af CSP3 og CSP5 som illustreret på figur 7.24.



(a) Placering af 25 CSP3.

(b) Placering af 25 CSP5.

Figur 7.24: Skitsering af hvordan 25 enheder af hhv. CSP3 og CSP5 placeres i det anvendte rum. Alle mål i mm.

Som det fremgår af figur 7.24 er det den ønskede afstand mellem personernes centerlinie på hhv. 766 mm og 666 mm for x- og y-retning opfyldt, hvormed der er overensstemmelse med placering af personmodellerne og for modelforsøget udført af [Møller, 2008], når det her anvendte forsøgsrum er opskaleret med faktoren 4,9. Endvidere kan det ses, at der ikke er den samme afstand mellem fronten og bagsiden mellem to enheder af CSP3 og CSP5, hvilket skyldes at de ikke har den samme tykkelse af kroppen jf. afsnit 6.4. For de opstillede cases med CSP3 og CSP5 regnes der kun med en konvektiv varmeafgivelse på 25 W/m^2 pr. person.

I tabel 7.5 er en oversigt for de opstillede simuleringer ved placering af 25 personer ved anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5 og i tabel 7.6 kan celleantallet og minimum og maksimum størrelse af cellerne på fladerne og i det "frie" rum gengivet.

Det tildelte casenavn i tabel 7.5 og 7.6 indeholder hvilken personmodel, ventilationsprincip og personbelastning, som er anvendt samt det pågældende casenummer. Eksempelvis for casen CSP3FT25.1 fremgår det, at personmodellen CSP3 anvendes, rummet ventileres efter fortrængningsprincippet og personbelastningen er 25 personer.

Case	Personmodel	Beskrivelse			
CSP1FT25.1	CSP1	Fladen regnes 100 % porøst hvor der afgives en konvektiv varmestrøm på 91,7 $\rm W/m^2.$			
CSP2FT25.1	CSP2	Voluminet regnes 100% porøst hvor der afgives en konvektiv varmestrøm på $54.0 \mathrm{W/m^3}$.			
CSP3FT25.1	CSP3	Der regnes med en konvektiv varmeafgivelse på $25 \mathrm{W/m^2}.$			
CSP5FT25.1	CSP5	Der regnes med en konvektiv varmeafgivelse på $25\mathrm{W/m^2}.$			

Tabel 7.5: Simuleringsmatrix for situationen hvor fortrængningsprincippet anvendes og rummet påføres en personbelastning på 25 personer.

Case		Fla	de [mm]		'Frie" rum [mm]	Celler [stk]
	Indblæs-	Udsug-	Person-	Afgrænsende		
	ning	ning	model			
CSP1FT25.1	50/10	50/100	-	50/230	230	3.812.917
CSP2FT25.1	50/10	50/100	-	50/225	225	4.009.695
CSP3FT25.1	50/10	50/100	5/50	50/250	250	3.901.575
CSP5FT25.1	50/10	50/100	5/50	50/250	250	4.058.703

Tabel 7.6: Anvendt minimum og maksimum cellestørrelse for flader og det fri rum for opstilling af beregningsnettet med det højest antal celler computerressourcerne tillader for anvendelse af CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5. I rækken "Flade" angiver tallet før / den mindst tilladelige cellestørrelse og tallet efter det størst tilladelige cellestørrelse, som er anvendt til generering af beregningsnettet.

7.3.2 Simuleringsresultater

I det følgende afsnit præsenteres de opnåede simuleringsresultater for temperatur- og strømningsfeltet ved anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5 når rummet belastes af 25 personer, hvor der for de fire cases betragtes en stationær tilstand. Der præsenteres generelt kun resultater for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i det følgende. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan temperatur- og fartfeltet for rummets xz-og xy-plan for de fire senere opstillede cases CSP1FT25.1, CSP2FT25.1, CSP3FT25.1 og CSP5FT25.1 findes i mappen film/CFD.

Temperatur

På figur 7.25 er temperaturen gengivet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i afhængighed af hvilken personmodel, der er anvendt.



Figur 7.25: Temperaturfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for casene CSP1FT25.1, CSP2FT25.1, CSP3FT25.1 og CSP5FT25.1, hvor rummet påføres en personbelastning på 25 personer.

Som det kan ses af figur 7.25 starter udviklingen af plumen lavere for CSP1 og CSP2 end for CSP3 og CSP5, samt temperaturen simuleres højere lokalt omkring varmekilden når denne simuleres ved anvendelse af CSP1 og CSP2 i forhold til CSP3 og CSP5.

Fart

For rummets xz-plan ved y = 8,82 m kan det simulerede fartfelt af luften ses på figur 7.26 i afhængighed af hvilken personmodel, som er anvendt.

Luftens fart simuleres generelt højere i opholdszonen ved anvendelse af personmodellerne CSP1 og CSP2 i forhold til CSP3 og CSP5, som det er antydet af figur 7.26. Til at tydeliggøre denne tendens er profilet af luftens fart gengivet for rummets yz-plan ved x = 9,80 m på figur 7.27, når rummet belastes af 25 personer ved anvendelse af personmodellerne CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5.

Figur 7.27 bekræfter, at der især over midten af personerne simuleres en højere værdi af luftens fart ved anvendelse af CSP1 og CSP2 i forhold til CSP3 og CSP5.



(c) CSP3FT25.1, Antal celler 3.901.575.

(d) CSP5FT25.1, Antal celler 4.058.703.

Figur 7.26: Fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for casene CSP1FT25.1, CSP2FT25.1, CSP3FT25.1 og CSP5FT25.1, hvor rummet påføres en personbelastning på 25 personer.



Figur 7.27: Sammenligning af luftens fart for yz-plan i højden z = 5,39 m ved x = 9,98 m for personmodellerne CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5. Rummet er påført en personbelastning på 25 personer.

Hastighed

Hastighedsfeltet for anvendelse af de fire personmodeller CSP1, CSP2, CSP3 og CSP5 er gengivet på figur 7.28 for rummets xz-plan ved y = 8,82 m.





Af figur 7.28 kan det ses, at de største lufthastigheder indtræffer over personerne, hvor det tyder på, at de laveste lufthastigheder forekommer udenfor plumen over personerne.
Del IV

Konklusion og perspektivering

Kapitel 8

Generel diskussion og konklusion

I det følgende kapitel foretages en generel diskussion og konklusion af de i rapporten præsenterede resultater om termisk interaktion mellem personer, der underkastes den tæthed, som kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc. Herefter følger diskussion af de fundne resultater ved anvendelse af de opstillede personmodeller, som er benyttet til at modellere mange personer ved simulering af luftstrømningen i et stort rum med stor personbelastning. Afslutningsvis følger en perspektivering, hvor anbefalinger til fremtidige undersøgelser præsenteres

Formål

I kapitel 1 blev det anskueliggjort, at for persontætheden som der kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc. kan give anledning til en forringelse af den enkelte persons betingelser for varmeafgivelse. I det nærværende projekt er det derfor undersøgt, om der indtræffer en termisk vekselvirkning mellem personer i sådanne rumtyper, samt hvordan mennesket kan behandles som randbetingelse til simuleringer af luftstrømninger i store rum med mange mennesker.

Termisk vekselvirkning mellem personer

I kapitel 2 blev der fundet svage indikationer på, at for en persontæthed højere end den, som der kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc. kan medføre et ønske om lavere rumtemperatur for, at en gruppe personer vil føle sig i termisk komfort. Hertil viser et andet studie udført af [Kang et al., 2001], at for en gruppe personer udsat for høj tæthed

antager personerne en tilnærmelsesvist konstant overflade-, oral og armhuletemperatur, såfremt rummet de opholder sig i ventileres.

De ovenstående omtalte resultater er alle udført for en persontæthed, som er højere end den, som der kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc., hvorfor der i kapitel 5 er opstillet et forsøg med det formål, at anskueliggøre om der indtræffer en termisk vekselvirkning mellem personer, som underkastes den tæthed, der kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc. Forsøget antog en varighed på omtrent en time opdelt i fire etaper, hvor der deltog hhv. 50, 24, 10 og 3 personer i etape 1, 2, 3 og 4, hvor overfladetemperaturen af personerne blev målt kontinuerligt gennem forsøget med termovisionskamera. Forsøget viser, at det ikke tyder på, at persontætheden vil have en indflydelse på personernes overfladetemperatur, eftersom den blev fundet at være tilnærmelsesvist konstant uafhængigt af persontætheden.

I forsøget er personernes termiske opfattelse også undersøgt i afhængighed af persontætheden, hvor det ligeledes er fundet, at persontætheden ikke tyder på, at vil have nogen betydning for evalueringen heraf.

Inden det egentlig forsøg blev der foretaget et pilotforsøg, hvor overfladetemperaturen af 60 elever blev målt kontinuerligt over omtrent 45 minutter uden ændring af persontætheden. Pilotforsøget viste samme indikation som hovedforsøget, hvorfor det tyder på, at persontætheden ikke vil medfører nogen termisk vekselvirkning mellem personer, der underkastes den tæthed, som kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc.

Ud fra litteraturstudiet samt det udførte forsøg er der fundet indikationer på, at for rum med stor personbelastning kan mennesket betragtes som enkeltstående, eftersom det tyder på, at der ikke indtræffer nogen termisk vekselvirkning imellem dem.

"Værktøjer" til simulering af luftstrømninger i store rum med mange mennesker

I projektet er der foreslået tre overordnede metoder til simulering af luftstrømningen i et stort rum med mange mennesker som omtalt i kapitel 6:

- 1. Hele bygningen og dermed rummet indeholdende mange personer opstilles i en CFD kode under hensyntagende til bygningens termiske egenskaber og variationen af den termiske belastning og vejret etc.
- 2. Det betragtede rums afgrænsende flader anses som værende adiabatiske og luftstrømningen simuleres i en CFD kode uden hensyntagende til de omsluttende rum i bygningen.

3. Bygningens randbetingelser genereres ved hjælp af programmet *BSim*, hvorefter det betragtede rum modelleres i en CFD kode

For metode 1 og 3 gælder det, at bygningens dynamik vil indgå i det simulerede temperaturog strømningsfelt ved anvendelse af CFD, hvilket ikke er tilfældet ved valg af metode 2. Grundet nutidens computerressourcer blev metode 1 fravalgt i projektet, men må anses som en mulighed inden for den nærmeste årrække i takt med computerkraftens udvikling. Som følge af projektets formål og tidshorisont blev metode 2 valgt i nærværende projekt.

Ud fra litteraturen og det udførte forsøg er der fundet indikationer på, at der ikke indtræffer nogen termisk vekselvirkning mellem personer ved den tæthed, som der kan forventes i en biograf, koncertsal, auditorium etc. Heraf følger det, at ved simulering af luftstrømninger i store rum med mange personer kan hver person betragtes som en enkeltstående "varmekilde". I kapitel 6 er der derfor præsenteret fem forslag til, hvordan mange personer kan modelleres. For to af de fem opstillede personmodeller bliver personerne ikke modelleret geometrisk, hvor personernes varmeafgivelse afgives som en kilde fra en flade eller volumen i afhængighed af, om den simpleste eller næst simpleste personmodel anvendes. For de tre andre personmodeller betragtes personerne som enkeltstående, hvor geometrien gengives af en forsimplet tredimensionel silhuet af en stående person med stigende detaljeringsgrad i afhængighed af den valgte personmodel.

Cases med fortrængningsventilation

Grundet computerressourcer har det ikke være muligt at opstille cases med en personbelastning på 150 personer ved anvendelse af de to mest detaljerede personmodeller. Dette belyser endvidere problemstillingen ved at anvende detaljerede personmodeller, når mange personer skal modelleres. Det skal ikke tolkes som, at personmodellerne er dårlige, men at jo mere detaljerede personmodeller der anvendes, jo større krav stilles der til computerkraften.

Der er blevet opstillet en række cases for et stort rum, der ventileres efter fortrængningsprincippet, som påføres en personbelastning på 150 personer. Til at modellere de 150 personer er de tre simpleste af de fem opstillede personmodeller anvendt. Ud fra de simulerede temperaturfelter er det fundet, at temperaturgradienten ikke er konstant i rummets højde. Den generelle tendens er, at temperaturgradienten er fundet at være konstant over opholdszonen, hvor den i opholdszonen tilnærmelsesvis kan betragtes som en lineær funktion af opholdszonens højde. Dette indikerer, at 50 % reglen, som foreskriver, at temperaturgradienten er en lineær funktion af rummets højde [Skistad et al., 2002] ikke er repræsentativ for rumtyper som det simulerede. Der er dog tale om få simulerede cases, hvorfor der er behov for yderligere simuleringer af store rum med mange personer for, at kunne anskueliggøre om dette er en generel tendens. Herudover er det fundet, at der sker en kraftig opblanding af luften over opholdszonen indikeret af et ensartet temperaturfelt.

Som følge af computerressourcer er der opstillet fire cases med en personbelastning på kun 25 personer, hvor personerne modelleres med hhv. de tre simpleste personmodeller og den mest detaljerede personmodel. Samme tendenser som casene med en personbelastning på 150 personer kan gøres dog med mindre opblanding af luften over opholdszonen. Dette vurderes, at skyldtes, der er anvendt et luftskifte svarende til, at 150 personer vil være i atmosfærisk komfort.

Når rummet påføres en personbelastning på 150 personer, simuleres luftens fart højere, når personerne modelleres med personmodellen CSP3 i forhold til CSP1 og CSP2. Herudover tyder det også på, at mere af den omkringliggende luft bliver medrevet, som det er anskueliggjort af de simulerede hastighedsfelter. Dette kan indikere, at N varmekilder medriver en større andel luft end en stor varmekilde, som påføres en effekt lig den samlede af N varmekilders. Dette tyder på, at hvis der anvendes en personmodel af typen CSP1 eller CSP2, skal der eventuel foretages en korrektion af de simulerede fart- og hastighedsfelter for, at de kan forventes at svare til den skabte af N identiske varmekilder. Det er dog ikke entydigt, da det modsatte indtræffer, når rummet bliver påført en belastning på 25 personer. Dette vurderes at skyldtes, der er anvendt et luftskifte svarende til, at 150 personer vil være i atmosfærisk komfort for casene med 25 personer.

Endvidere er det fundet af simuleringerne, at for alle personmodellerne vil de største hastigheder af luften indtræffer over personerne grundet deres termiske opdrift, hvilket er i overensstemmelse med målinger foretaget af [Møller, 2008]. Dette indtræffer både ved en personbelastning på 150 og 25 personer. Herudover viser simuleringerne, at der er korrelation mellem temperatur- og strømningsfeltet, idet den termiske opdrift f.eks. medfører en højere fart af luften over personerne.

Konklusion

Undersøgelsen af persontæthedens indflydelse har givet indikationer på, at der ikke indtræffer nogen termisk vekselvirkning imellem personer for den persontæthed, som kan forventes i rum som auditorier, biografer, koncertsale etc., hvorfor de kan behandles som værende enkeltstående. Herudover har persontætheden heller ikke givet indikation af, at ville have nogen indvirkning på komfortopfattelsen.

Ud fra de simulerede temperaturfelter tyder det på, at temperaturgradienten ikke er konstant i rummets højde, samt at der indtræffer en fuld opblanding af luften over opholdszonen. Endvidere er det fundet, at de største hastigheder fremkommer midt over personerne grundet deres termisk opdrift.

Perspektivering

Ud fra de erfaringer der er gjort i projektet, vil forfatteren anbefale følgende fremtidige undersøgelser, som kan være med til at forbedre simuleringen af luftstrømninger i store rum med mange mennesker, samt hvordan mennesket kan behandles som randbetingelse.

Det anbefales, at der udføres flere forsøg til at anskueliggøre en eventuel termisk vekselvirkning mellem personer. Med udgangspunkt i det udførte forsøg omtalt i nærværende rapport anbefales det, at udføre et tilsvarende forsøg som det opstillede, men over længere tid for at skabe en situation, som minder mere om den, der kan forventes i f.eks. en biograf.

Det anbefales af forfatteren, at der opstilles en mere nøjagtig og kvalificeret beregning af vinkelforholdet for en person omsluttet af andre, da de to anvendte metoder i rapporten har været for usikre til evalueringen heraf. Dette kunne for eksempel være ved anvendelse af et program, som tillader en undersøgelse ved hjælp af ray tracing.

Der anbefales at opstille en række cases, hvor rummet som er benyttet i nærværende projekt ventileres efter opblandingsprincippet for at se, hvilken indflydelse valget af personmodel vil få på temperatur- og strømningsfeltet. Herudover vil det være oplagt, at undersøge indflydelsen af en anden placering af indblæsningsarmaturerne ved anvendelse af fortrængningsventilation for eksempel langs væggene. For begge situationer kan det ligeledes overvejes at undersøge indflydelsen af porøsiteten for personmodellerne CSP1 og CSP2.

Det anbefales, at øge antallet af netpunkter for de opstillede modeller for at opnå bedre simuleringsresultater. Herudover anbefales det også, at overveje en transient løsning af casene i stedet for de stationære betragtninger.

For de opstillede CFD modeller er det udelukkende personer, der er betragtet som varmekilder. Det anbefales derfor, at opstille en række cases, hvor der inkluderes belastninger fra teknisk udstyr, som der f.eks er i en teater- eller koncertsal, da dette kan give anledning til dannelse af varmepuder, hvilket kan få en indflydelse på strømningen.

Litteratur

- ANSYS (2006a). ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, ANSYS CFX Release 11.0.
- ANSYS (2006b). ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS CFX Release 11.0.
- ASHRAE (2005). ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 8 Thermal Comfort. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN 1-931862-71-0.
- Asmussen, E., Astrup, P., Bojsen-Møller, F., Christoffersen, G., Jørgensen, C. B., Larsen, L. O., Nielsen, B., Rosenkilde, P., Saltin, B. og Skadhauge, E. (1984). Grundbog i fysiologi. Nucleus. ISBN 87-87661-52-7.
- Asmussen, E. og Nielsen, M. (1982). Lærebog i menneskets fysiologi. Akademisk forlag. ISBN 87-500-1856-6.
- Awbi, H. B. (2007). Ventilation Systems: Design and Performance. Taylor and Francis, London. ISBN 0-419-21700-2.
- Brohus, H. (1997). Personal Exposure to Contaminant Sources in Ventilated Rooms. Aalborg Universitet. ISSN 0902-7953 R9741.
- Cheong, K. W. D., Djunaedy, E., Chua, Y. L., Tham, K. W., Sekhar, S. C., Wong, N. H. og Ullah, M. B. (2003). Thermal comfort study of an air-conditioned lecture theatre in the tropics. *Building and Environment*, 38:63-73.
- Copenhagen X (2009). http://www.cphx.dk/#/166113/ set d. 25.05.09.
- CR 1752 (2001). Ventilation i bygninger Projekteringskriterier for indeklimaet. Dansk Standard.
- Deevy, M. og Gobeau, N. (2006). CFD modelling of Benchmark Test Cases for Flow Around a Computer Simulated Person. Health & Safety Laboratory.

- DS 15251 (2007). Inputparametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik. Dansk Standard, 1. udgave udgave.
- DS 9920 (2003). Ergonomi Termisk miljø Vurdering af det termiske isolation og fordampningsmodstand i et sæt tøj. 1. udgave. Dansk Standard.
- Dubois, D. og Dubois, E. F. (1916). A formula to estimate surface area if height and weight are known. Archives of Internal Medicine, 17: 863-871.
- Eltek Limited (2009). Produktblad for gd47 transmitter. http://www.eltekdataloggers.co.uk/pdf/GD47_product_preview.pdf.
- EU (2006). Health and Food Special Eurobarometer 246 / Wave 64.3 TNS Opinion & Social. European Commission.
- Fanger, P. O. (1972). Thermal Comfort Analysis and Applications in Indoor Environmental engineering. McGraw-Hill Book Company. ISBN 0-07-019915-9.
- Grau, K., Wittchen, K. B., Johnsen, K. og Rose, J. (2008). BSim brugervejledning, version 6.8.4.30. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Grieve, P. W. (1989). Measuring ventilation using tracer-gases. Brüel & Kjær.
- Haug, E., Sand, O. og Sjaastad, Ø. V. (2000). Menneskets fysiologi. G.E.C Gad. ISBN 87-12-02229-2.
- Holmes, S. A. og Tucker, P. G. (2002). A CFD Study of Classroom Air Qaulity Comparing the Effectivenes of a Fresh Air Fan Convector, Trickle Vent and Open Window.
- Hyldgård, C. E. (1997). Måleteknik ved måling af indeklima og energiforbrug i bygninger. Aalborg Universitet. ISSN 1395-8232 U9704.
- Kang, Z. J., Xue, H. og Bong, T. Y. (2001). Modelling of thermal environment and human response in a crowded space for tropical climate. *Building and Environment*, 36:511-525.
- Kavgic, M., Mumovic, D., Stevanovic, Z. og Young, A. (2008). Analysis of thermal comfort and indoor air quality in a mechanically ventilated theatre. *Energy and Buildings*, 40:1334-1343.
- Kunugiyama, N. (2002). Private Communication. Earth Simulator Program, Japan.
- McCullough, E. og Jones, B. (1985). A comprehensive data base for estimating clothing insulation. ASHRAE Transactions, Vol. 91, Part 2, s.29-47.

- Møller, L. (2008). Luftstrømninger i store rum med mange mennesker. Specialeafhandling, Aalborg Universitet.
- Müller, D., Gores, I. og Zielinski, R. (2004). Impact of the thermal load on the room airflow pattern. Proceedings of the 9th International Conference on Air Distribution in Rooms 2004, Coimbra.
- Nielsen, P. V. (1993). Displacement Ventilation theory and design. Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University. ISSN 0902-8002 U9306.
- Nielsen, P. V., Allard, F., Awbi, H. B., Dividson, L. og Schälin, A. (2007). Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design. Rehva. ISBN 2-9600468-9-7.
- Noh, K.-C., Jang, J.-S. og Oh, M.-D. (2007). Thermal comfort and indoor air quality in the lecture room with 4-way cassette air-conditioner and mixing ventilation system. *Building and Environment*, 42:689-698.
- Parsons, K. (2003). Human thermal environments The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance. Taylor & Francis. ISBN 0-415-23792-0.
- Rohles Jr., F. H., Nevins, R. G., McNall Jr., P. E. og Springer, W. E. (1967). Human Physiological Responses to Shelter Environment. Rapport 2, Institute for Environmental Research, Kansas University.
- Skistad, H., Mundt, E., Nielsen, P. V., Hagström, K. og Railo, J. (2002). Displacement Ventilation in Non-industrial Premises. Rehva. ISBN 82-594-2369-3.
- Stamou, A. I., Katsiris, I., Politis, M. og Schaelin, A. (2008a). Applying a CFD model to evaluate thermal comfort in the MPC amphitheatre of the Olympic Games "Athens 2004". Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2:41-50.
- Stamou, A. I., Katsiris, I. og Schaelin, A. (2007). Evaluation of Thermal Comfort in Indoor Stadiums of the Athens 2004 Olympic Games with CFD Models: Case of Nikea Indoor Stadium. *Journal of Architectural Engineering*, side 130-135.
- Stamou, A. I., Katsiris, I. og Schaelin, A. (2008b). Evaluation of thermal comfort in Galatsi Arena of the Olympics "Athens 2004" using a CFD model. Applied Thermal Engineering, 28:1206-1215.
- Stampe, O. B., Hansen, H. E. og Kjerluf-Jensen, P. (1997). Varme- og klimateknik, Grundbog. Danvak, 2. udgave udgave. ISBN 87-982652-8-8.
- Stathopoulou, O. I. og Assimakopoulos, V. D. (2008). Numerical Study of the Indoor Environmental Conditions of a Large Athletic Hall Using the CFD Code PHOENICS. Environmental Modeling & Assessment, 13:449-458.

- Stenn-Thøde, M., Funch, E. J. og Hyldgård, C. E. (2001). Grundlæggende klimateknik og bygningsfysik. Aalborg Universitet.
- Toftum, J. og Clausen, G. (2001). Indeklimaforskning med mennesket i centrum. Aktuel naturvidenskab, 4:7-10.
- Topp, C., Hesselholt, P., R., T. M. og Nielsen, P. V. (2003a). Influence of geometry of thermal manikins on concentration distribution and personal exposure. *Proceedings of* the 7th International Conference on Healthy Buildings 2003, Singapore, 2:357-362.
- Topp, C., Hesselholt, P., Trier, M. R. og Nielsen, P. V. (2003b). Influence of geometry of thermal manikins on room airflow. *Proceedings of the 7th International Conference on Healthy Buildings 2003, Singapore*, 2:339-344.
- Versteeg, H. og Malalasekera, W. (1995). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method Approach. Prentice Hall. ISBN 0-582-21884-5.
- Wargocki, P., Seppänen, O., Andersson, J., Boerstra, A., Clements-Croome, D., Fitzner, K. og Hanssen, S. O. (2006). Indoor Cliamte and Productivity in Offices - How to integrate productivity in life-cycle cost analysis of building services. Rehva. ISBN 2-9600468-5-4.
- Yaglou, C. P. og Drinker, P. (1928). The summer comfort zone: Climate and clothing. The journal of industrial hygiene and toxicology, 10:350-363.
- Zhong, C.-B. og Leonardelli, G. J. (2008). Cold and Lonely: Does Social Exclusion Literally Feel Cold? *Psychological Science*.

Appendiks A

Menneskets varmebalance

I det følgende appendiks beskrives menneskets varmebalance, hvor der indledningsvis introduceres, hvorledes organismen producerer varme, samt hvilke mekanismer den har til rådighed for dets varmeafgivelse. Efterfølgende opstilles menneskets varmebalance i afhængighed af legemets varmeproduktion og varmeafgivelsen. Herefter følger en beskrivelse af, hvordan organismen regulerer dets temperatur for at opretholde varmebalancen med omgivelserne.

A.1 Varmebalancen

Et menneske tilhører de varmblodede dyr, hvilke har en høj legemstemperatur, der kan holdes konstant selv ved store ændringer af den omgivende temperatur. Her vil organismens indre kerne antage en tilnærmelsesvis konstant temperatur på 37 °C for et menneske som er afslappet og i ro, hvorimod den ydre skal i form af huden har store temperaturvariationer [Haug et al., 2000]. Organismens legemstemperatur opretholdes via en balance mellem dets producerede varmemængde samt den evt. udefra tilførte i forhold til den afgivede til omgivelserne jf. figur A.1

Såfremt legemstemperaturen skal holdes konstant, er det en betingelse, at varmeafgivelsen er af samme samlede størrelse som organismens varmeproduktion og varmetilførelsen fra omgivelserne, som det fremgår af figur A.1. For at opnå dette kan kroppen f.eks. gennem fysiologiske mekanismer regulere hhv. dets varmeproduktion og varmeafgivelse til omgivelserne [Asmussen et al., 1984].



Figur A.1: Diagram for legemets varmetab til omgivelserne [Haug et al., 2000].

A.1.1 Varmeproduktion

Menneskets krop kan betragtes som en motor, der frigør en vis mængde energi ved omsætningsprocesser af ilt og mad. Energien frigøres delvist til ydre mekanisk arbejde men primært til intern varme. Varmen som produceres i kroppen afhænger af legemets stofskifte, hvor et lavt aktivitetsniveau medfører en lav forbrænding og dermed en lav varmeudvikling i kroppens indre. Som følge af den lavere varmeproduktion sammentrækkes blodkarene i kroppens ydrepunkter for at minimere varmeafgivelsen til omgivelserne for at opretholde en stabil kernetemperatur af organismen på ca. 37 °C [Asmussen og Nielsen, 1982]. For et højt aktivitetsniveau øges varmeudviklingen i kroppens indre, hvormed der vil være et stigende behov for kroppen i at komme af med varmen, hvorfor blodkarene udvider sig for at øge kredsløbet i huden [Asmussen et al., 1984].

A.1.2 Varmeafgivelse

Organismens indre varme transporteres via blodet til legemets overflade, hvor den afgives til omgivelserne. For legemets varmeudveksling med omgivelserne er de fysiske love for varmetransport gældende, hvor varmen altid transporteres fra et varmere område til et koldere ved stråling, ledning og konvektion. For fordampningen er lidt andre principper dog gældende [Haug et al., 2000]. Som antydet på figur A.1 kan organismen afgive varme ved fire følgende fysiske processer:

- stråling
- ledning
- konvenktion
- fordampning

hvilke beskrives i det følgende. På figur A.2 er kroppens mekanismer, som den anvender ved den fysiske varmeregulering illustreret.



Figur A.2: Mekanismerne ved varmetab og varmetilførsel. a) Varmestråling, b) Varmeledning, c) Konvektion og d) Fordampning [Haug et al., 2000].

Stråling er den proces, hvor legemets overflade, den nøgne og beklædte, strålingsudveksler med de omkringliggende overflader. Hvorvidt organismen afgiver eller modtager varme fra strålingsudvekslingen afhænger af legemets overfladetemperatur i forhold til de omgivende fladers, som det fremgår af figur A.2a. Heraf fremgår det, at varmestråling vil gå fra den kolde til den varme flade i overensstemmelse med de fysiske love for varmetransport.

Varmeledning indtræffer når to genstande med forskellig temperatur fastholdes mod hinanden, hvormed den varmeste mister en andel af dets varmeenergi til den koldere genstand jf. figur A.2b. Konvektion er processen, hvor luftbevægelser omkring personen påvirker legemets varmeudveksling med den omgivende luft. Hvis den omgivende luft har lavere temperatur end legemets overflade opvarmes den og stiger opad, som det kan ses på figur A.2c. Den opvarmede luft erstattes af køligere luft og processen gentages. Dette princip udnyttes f.eks. aktivt ved fortrængningsventilation, hvor der indblæses med en undertemperatur omkring personerne [Skistad et al., 2002].

Fordampning er den process, hvor kroppen afgiver varme ved fordampning af vand fra huden og lungerne. Ved fordampning af vand overgår det fra væske- til gasform, hvilket kræver en stor energimængde¹ i form af varme, som tages fra organismen, hvormed den afkøles jf. figur A.2d. Fordampning får vital betydning for kroppens varmebalance i det tilfælde, hvor den omgivende temperatur er højere end legemets, da kroppen her vil modtage varme fra konvektion og stråling jf. de fysiske love for varmetransport, hvorfor varmebalancen udelukkende opretholdes ved fordampning. Herudover har kroppen et obligatorisk væsketab, da der hele tiden sker en diffusion af vandmolekyler gennem huden, hvor de fordamper og den udåndede luft er vandmættet. Denne process kan dog ikke varieres for at opretholde en stabil legemstemperatur [Haug et al., 2000].

For et menneske i hvile udgør varmeafgivelsen ved konvektion og stråling, det frie varmetab, 70 - 80% og fordampning, det bundne varmetab, 20 - 30% af menneskets samlede varmetab [Asmussen og Nielsen, 1982].

Ud over de ovenfor beskrevne mekanismer, kroppen anvender til dets fysiske varmeregulering, vil den pågældende beklædning af personen få direkte betydning for legemets temperaturregulering. Som følge af luft er en dårlig varmeleder og har en relativ lav varmekapacitet vil luftstrømninger omkring et nøgent legeme kunne medfører et betydeligt varmetab, hvilket kan være ønskelig for varme omgivelser men ikke for kolde. Dette kan dog minimeres ved beklædning af det nøgne legeme, hvormed luftudskuftningen i nærheden af legemet reduceres med et lavere varmetab til følge.[Haug et al., 2000]

Som senere omtalt i afsnit A.2 er formålet med kroppens termoreguleringssystem at opretholde en kontinuerlig konstant temperatur af legemets indre kerne. Derfor vil der efter en given tid i et moderat termisk miljø ved konstant metabolisme indtræffe en varmebalance mellem kroppen og omgivelserne, hvor varmeproduktion og tilskud vil være lig varmeafgivelsen. Varmebalancen for denne tilstand er detaljeret forklaret i [Fanger, 1972] og her gengivet efter [ASHRAE, 2005]:

$$M - W = q_{sk} + q_{res} + S_{body} \tag{A.1}$$

hvor

¹Til at fordampe 1 liter vand kræves 2400 joule, hvilket svarer til en tredjedel af den totale varmeproduktion pr. døgn for en voksen person på 70 kg, som er i ro [Haug et al., 2000]

M	=	Varmeproduktion fra stofskiftet, metabolisme	$[W/m^2]$
W	=	Udført mekanisk arbejde	$[W/m^2]$
q_{sk}	=	Total varmetab fra huden	$[W/m^2]$
q_{res}	=	Total varmetab ved respiration	$[W/m^2]$
S_{body}	=	Mængden af varme oplagret i kroppen	$[W/m^2]$

I ligning (A.1) vil ledet M - W altid være positivt, hvor ledene q_{res} og q_{res} beskriver kroppens varmeudveksling, hvor positive værdier er svarende til varmetab og negative til varmetilskud. Når varmebalancen er opfyldt vil kroppen være i en tilstand af termisk ligevægt, hvorfor der ikke vil oplagres energi i kroppen, $S_{body} = 0$. I det nærværende projekt vil menneskets varmebalance kun blive behandlet for den situation, hvor kroppen er i termisk ligevægt. Hertil skal det dog præciseres, at varmebalancen som så aldrig vil antage en stationær balance, da kroppens mekanismer undergår en dynamisk regulering for at opretholde en konstant temperatur [Parsons, 2003].

Det totale varmetab fra hudoverfladen kan udtrykkes af følgende [ASHRAE, 2005]:

$$q_{sk} = C + R + K + E_{sk} \tag{A.2}$$

hvor

C	=	Konvektiv varmeafgivelse fra huden	$[W/m^2]$
R	=	Varmeudveksling fra huden ved stråling	$[W/m^2]$
K	=	Varmeafgivelse fra huden ved ledning	$[W/m^2]$
E_{sk}	=	Det totale varmetab fra huden ved fordampning	$[W/m^2]$

For normale forhold ses der ofte bort fra varmeudvekslingen ved ledning, da størrelsesorden heraf er negligeabel [Parsons, 2003].

Det totale varmetab ved respirationen kan udtrykkes af [ASHRAE, 2005]:

$$q_{res} = C_{res} + E_{res} \tag{A.3}$$

hvor

$$C_{res}$$
 = Det konvektive varmetab ved respiration [W/m²]
 E_{res} = Varmetabet ved evaporation ved respiration [W/m²]

Ledene i varmebalancen givet ved ligning (A.1) er af enheden W/m², hvilket refererer til overfladearealet af en nøgen person. Det nøgne legemes overfladeareal, A_{Du} , kan beskrives som en funktion af højden og vægten af en person som [Dubois og Dubois, 1916]:

$$A_{Du} = 0.20236 \cdot W_e^{0.425} \cdot H_e^{0.725} \tag{A.4}$$

hvor

 A_{Du} = DuBois overfladeareal [m²] W_e = Personens vægt [kg] H_e = Personens højde [m]

Da de fleste personer er beklædte i de termiske miljøer, hvor de opholder sig i, indføres der en korrektionsfaktor, $f_{cl} = A_{cl}/A_{Du}$, til varmeafgivelsen fra hudoverfladen ved konvektion, stråling og evaporation for at tage højde for det beklædte areal af kroppen. Korrektionsfaktoren kan bestemmes ud fra kendskab til den samlede isolans af den pågældende beklædning som eksempelvis angivet i [DS 9920, 2003], [Stampe et al., 1997] eller ligning (A.8).

Ud fra menneskets varmebalance jf. ligning (A.1), beskrives de enkelte komponenter kort i det efterfølgende. For en mere detaljeret gennemgang henvises der bl.a. til [Fanger, 1972] og [ASHRAE, 2005].

A.1.3 Konvektion

Varmeafgivelsen ved konvektion fra kroppens ydre overfladeareal kan bestemmes af [AS-HRAE, 2005]:

$$C = h_c(t_{sk} - t_a) \tag{A.5}$$

hvor

C	=	Varmeafgivelse ved konvektion	$[W/m^2]$
h_c	=	Det konvektive varmeovergangstal	$[W/m^{2}\circ C]$
t_{sk}	=	Temperatur af huden eller overfladetemperatur	[°C]
		af beklædningen	
t_a	=	Temperatur af den omgivende luft	[°C]

Udtrykket givet ved ligning (A.5) kunne give indtrykket af, at der er proportionalitet mellem den konvektive varmeafgivelse og temperaturforskellen. Dette er dog ikke tilfældet, da koefficienten, h_c , også er afhængig af temperaturen. Herudover er, h_c , også afhængig af strømningstypen, fri eller tvungen konvektion.

A.1.4 Stråling

Varmeafgivelsen ved stråling mellem kroppens overflade og omgivelserne kan bestemmes af Stefan-Boltzmanns lov [Fanger, 1972]:

$$R = A_{eff} \epsilon \sigma [T_s^4 - \overline{T}_{rmt}^4] \tag{A.6}$$

hvor

R	=	Varmeafgivelse ved stråling	[W]
A_{eff}	=	Det effektive strålingsareal	$[m^2]$
ε	=	Emissionstallet for beklædning og kroppen	[—]
σ	=	Stefan-Boltzmanns konstanten, $5,67 \cdot 10^{-8}$	$[W/m^2K^4]$
T_s	=	Absolutte temperatur af huden	[K]
\overline{T}_{rmt}	=	Absolutte middelstrålingstemperatur	[K]

Emissionstallet for menneskets hud er tæt på 1,0 og det meste beklædning har et emissionstal på 0,95. Heraf anbefales det af [Fanger, 1972] at anvende en middelværdi på 0,97. Til bestemmelse af det effektive strålingsareal, A_{eff} , kan følgende udtryk anvendes [Fanger, 1972]:

$$A_{eff} = f_{eff} f_{cl} A_{Du} \tag{A.7}$$

hvor

f_{eff}	=	Effektiv strålingsarealfaktor	[-]
f_{cl}	=	Beklædningens arealfaktor	[-]

Til bestemmelse af beklædningens arealfaktor kan følgende udtryk anvendes [McCullough og Jones, 1985]:

$$f_{cl} = 1,0 + 0,3I_{cl} \tag{A.8}$$

 hvor

 I_{cl} = Varmemodstand af beklædning [clo]²

Middelstrålingstemperaturen i forhold til en person i en givet kropsholdning og beklædning i en givet punkt i et rum kan defineres som den ensartede temperatur af absolut sorte omgivelser som vil give den samme strålingsudveklsing fra personen, som i de aktuelle betragtede omgivelser. Til bestemmelse af den absolutte middelstrålingstemperatur kan følgende udtryk anvendes [ASHRAE, 2005]:

$$\overline{T}_{r}^{4} = T_{1}^{4} F_{p-1} + T_{2}^{4} F_{p-2} + \ldots + T_{N}^{4} F_{p-N}$$
(A.9)

hvor

$$\overline{T}_{r}^{4} = \text{Absolutte middelstrålingstemperatur} [K]$$

 $\overline{T}_{N} = \text{Absolutte overfladetemperatur af flade } N$ [K]
 $\overline{T}_{r}^{4} = \text{Vinkelfatoren mellem personen og overflade } N$ [-]

Vinkelfaktoren kan findes i tabelopslag i afhængighed af personens placering og orientering, eksempelvis i [Fanger, 1972].

 $^{^{2}\}mathrm{Da}\;f_{cl}$ er en faktor regnes I_{cl} enhedsløs i ligning (A.8)

A.1.5 Fordampning

Af den samlede legemsvægt udgør vand omkring 55-60 %, som er det medium, hvor de kemiske processer i organismen foregår. Som tidligere omtalt er fordampning en vigtig del af kroppens termoreguleringssystem, som er med til at opretholde varmebalancen med omgivelserne. Selve fordampningen sker fra lungerne og huden, heraf ca. 1/3 fra lungerne og 2/3 fra huden [Asmussen og Nielsen, 1982].

Det totale varmetab ved evaporation er en kombination af fordampning af udskilt sved og den naturlige diffusion af vand gennem huden [ASHRAE, 2005]:

$$E_{sk} = E_{sw} + E_d \tag{A.10}$$

hvor

E_{sk}	=	Totale varmetab fra huden ved evaporation	$[W/m^2]$
E_{sw}	=	Varmetab ved evaporation af sved fra overfladen af huden	$[\mathrm{W/m^2}]$
E_d	=	Varmetab ved diffusion af vanddamp gennem huden	$[\mathrm{W/m^2}]$

Sammenhænget mellem E_{sw} og metabolismen, M kan udtrykkes af [Fanger, 1972]:

$$E_{sw} = 0.42(M - 58.15) \tag{A.11}$$

hvor

$$M = \text{Varmeproduction fra stofskiftet} [W/m^2]$$

Heraf fremgår det, at varmeafgivelsen fra legemet ved evaporation vil stige ved stigende aktivitet. I [Fanger, 1972] blev der ved regressionsanalyse fundet en sammenhæng mellem hudens temperatur og aktivitetsniveauet. Ved anvendelse af dette kan varmetabet ved diffusion af vanddamp gennem huden udtrykkes af [Fanger, 1972]:

$$E_d = 3,09 \cdot 10^{-3} (5766 - 7,04M - p_a) \tag{A.12}$$

hvor

 $M = \text{Varmeproduction fra stofskiftet} [W/m^2]$

A.1.6 Respiration

Ved respiration vil kroppen afgive både sensibelt og latent varme ved konvektion og evaporation. Det konvektive varmetab skyldes, at den indåndede luft er koldere end legemstemperaturen og den opvarmes i lungerne. Ved udånding transporteres der hermed varme til omgivelsen. Foruden vil den indåndede luft blive befugtet i lungerne og ved massetransport føres der ligeledes varme til omgivelserne når luften udåndes.

Det konvektive varmetab ved respiration, C_{res} , og varmetabet ved fordampning vand ved respiration, E_{res} , kan udtrykkes af følgende:

$$C_{res} = 1.4 \cdot 10^{-3} M (34 - t_a) \tag{A.13}$$

$$E_{res} = 1.7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_a) \tag{A.14}$$

Varmetabet ved respiration vil under normale forhold være negligibelt, men kan blive af betydning ved stor fysisk aktivitet [Fanger, 1972]. Med den generelle introduktion til menneskets varmebalance beskrives dets termoreguleringssystem i det efterfølgende.

A.2 Regulering af legemstemperatur

Med et kendskab til hvilke redskaber kroppen har til rådighed for at ændre dets varmeproduktion og varmeafgivelse beskrives det i det følgende, hvorledes legemets temperatur reguleres af kroppens termostat, temperaturcenteret i hypothalamus.

Ved en forandring af omgivelsernes temperatur eller en ændring af legemets varmeproduktion vil legemets temperatur reguleres reflektorisk jf. figur A.3 for at sikre varmebalance mellem legemet og omgivelserne.

Som eksempel på legemets reflektoriske temperaturregulering kan et individ tænkes at befinde sig i et lokale, hvor den omgivende temperatur pludselig stiger, hvormed temperaturforskellen mellem legemets overflade og omgivelserne vil falde. Dette medfører en forringelse af legemets betingelser for varmeafgivelse med en højere legemstemperatur til følge. Den forhøjede legemstemperatur registreres af kroppens termoreceptor og modtages i tempereturcenteret, hvorfra målcellerne aktiveres for at øge legemets varmetab. Dette være sig en reduktion af modstanden i hudens arterioler, hvormed blodmængden gennem blodkarene i huden forøges. Temperaturforskellen mellem legemets overflade og omgivelserne øges hermed, da blod transportere varme, hvorfor legemets overfladetemperatur vil stige. Hermed kan varmetabet fra kroppen antage samme værdi som før temperaturstigningen og kroppen vil være i varmebalance med omgivelserne. Såfremt dette ikke er tilstrækkelig sætter temperaturcenteret gang i øget svedproduktion for at øge legemets varmeafgivelse.



Figur A.3: Hierarkisering af legemstemperaturens regulering [Haug et al., 2000].

Hvis individet derimod tænkes at befinde sig i et rum, hvor den omgivende temperatur pludselig falder, vil temperaturforskellen mellem legemets overflade og omgivelserne øges med et forhøjet varmetab til omgivelserne. Kroppen kompenserer for dette ved at øge modstanden i hudens arterioler, hvormed blodmængden gennem blodkarene i huden reduceres. Som følge af mindre varmetransport i hudens kredsløb falder dets overfladetemperatur, hvormed legemets varmetab reduceres som følge af lavere temperaturforskel mellem hudens overflade og omgivelserne. Når kroppen afkøles tilstrækkelig vil den kemiske varmeregulering aktiveres fra temperaturcenteret, hvor der sendes nerveimpulssignaler til de tværstribede muskler med øget muskelspænding til følge. Dette udløser uvilkårlige muskelrystelser med forøget varmeproduktion op til det dobbelte for at opretholde kroppen i varmebalance med omgivelserne [Asmussen og Nielsen, 1982].

De ovenstående beskrevende mekanismer, som kroppen benytter for at opretholde ligevægt mellem varmeproduktionen og varmetabet kan opretholdes af organismens reguleringsmekanismer til en hvis grænse. I [Asmussen og Nielsen, 1982] er hhv. nøgne og påklædte forsøgspersoners varmeafgivelse ved forskellige ydertemperatur, som kan ses på figur A.4, omtalt.



Figur A.4: Menneskets varmeafgivelse ved forskellig ydertemperatur. I) Varmeafgivelse ved stråling og konvektion, II) Varmeafgivelse ved fordampning [Asmussen og Nielsen, 1982].

Som tidligere nævnt vil temperaturforskellen mellem hudens overflade og omgivelserne stige for et individ, som befinder sig i kolde omgivelser og dermed også varmeafgivelsen fra kroppen ved stråling og konvektion. Organismens regulering af varmeafgivelsen er imidlertid mindre effektiv, da det frie varmetab ved stråling og konvektion er jævnt stigende for faldende omgivelsestemperatur jf. figur A.4. Heraf fremgår det også, at stigningen vil være lavere for påklædte personer, som følge af beklædningen forøger kroppens samlede isolans. For kolde omgivelser vil varmeafgivelsen kun afhænge af stråling- og konvektionsbidraget, da varmeafgivelsen fra fordampning er uforandret ved faldende omgivelsestemperatur, som det fremgår af figuren.

I varme omgivelser reduceres temperaturforskellen mellem legemets overflade og omgivelserne selvom kroppens regulering øger blodgennemstrømningen. Heraf følger det, at kroppens varmeafgivelse ved konvektion og stråling reduceres samt er stærkt aftagende ved stigende omgivelsestemperatur, som det kan ses på figur A.4. Heraf fremgår det også, at ved en omgivelsestemperatur på ca. 34,5 °C og hvor den gennemsnitlige overfladetemperatur af legemet antager samme værdi er den frie varmeafgivelse lig nul, og der afgives udelukkende varme fra organismen ved fordampning. I omgivelser hvor temperaturen er højere end legemets gennemsnitlige overfladetemperatur, vil varmeudvekslingen ved stråling og konvektion være negativ, hvormed legemet modtager varme fra omgivelserne. Den negative varmeudveksling er dog lavest for de påklædte personer, da beklædning i hvis grad beskytter imod opvarmning af legemet. Svedudskillensen øges ved stigende omgivelsestemperatur, hvormed varmeafgivelsen ved fordampning kompenserer for formindskelsen af varmeafgivelsen ved stråling og konvektion, så legemets varmebalance med omgivelserne kan opretholdes. Det er dog af vital betydning, at luften er tør eller hvis fugtighedsgraden er stor skal luften være i bevægelse. Såfremt dette ikke er tilfældet, vil sveden løbe af kroppen uden at fordampe og gå tabt i varmereguleringen [Asmussen og Nielsen, 1982].

Appendiks **B**

Kalibrering af termoelementer

I det følgende appendiks beskrives kalibreringen af de anvendte termoelementer af typen K, Krom - Aluminum.

Til måling af de forskellige overfladers temperatur, rumluften, indblæsnings- og udsugningstemperaturen er der benyttet termoelementer, som er kalibreret ved hjælp af et præcisionstermometer. Selve kalibreringen er foretaget i en målebrønd, hvilket er et redskab til at fastholde en stabil temperatur. Hermed måles den sande temperatur med præcisionstermometeret og en tilhørende temperatur med termoelementerne, som er tilkoblet en datalogger. Til kalibreringen af termoelementerne er følgende forsøgsopstilling vist på figur B.1 anvendt.



Figur B.1: Skitse af den anvendte forsøgsopstilling til kalibrering af termoelementerne.

I forbindelse med kalibreringen af termoelementerne er det undersøgt, hvor lang tid der skal måles over for, at den målte temperatur kan forventes at være stabil. På figur B.2 er variationen for temperaturen målt med termoelement nr. 1 over 140 s vist ved en temperatur på 15 °C i målebrønden.



Figur B.2: Forløb af temperaturen målt med termoelement nr. 1 ved en indstillet temperatur i målebrønden på 15 °C.

Som det fremgår af figur B.2, opnås en tilnærmelsesvis konstant temperatur efter 100 s. Det vælges derfor, at måle over en periode på 140 s ved kalibrering af termoelementerne for at være sikker på den målte temperatur kan anses som værende tilnærmelsesvis stabil.

Selve kalibreringen foretages i temperaturintervallet $15 \,^{\circ}$ C til $25 \,^{\circ}$ C idet målingerne i auditoriet forventes og være i dette interval. Ved at afbilde den *sande* temperatur som funktion af den målte temperatur som vist på figur B.3 for termoelement nr. 1, fås den lineære sammenhæng mellem den *sande* og målte temperatur.



Figur B.3: Kalibreringskurve for termoelement nr. 1.

Der foretages lineær regression for den den sande og målte temperatur for målebrøndens tre setpunkter $15 \,^{\circ}$ C, $20 \,^{\circ}$ C og $25 \,^{\circ}$ C for alle termoelementerne, hvor de fundne *a*- og *b*-

værdier til beskrivelse af den lineære sammenhæng mellem den sande og målte temperatur for hvert termoelement kan findes på bilags DVD i excelarket kalibrering.xls. Heraf fremgår det også, at der proportionalitet mellem den aflæste og den sande temperatur udtrykt af at korrelationskoefficienten, R^2 , er lig 1.

Appendiks C

Bestemmelse af auditoriets luftskifte

I det følgende appendiks kan en bestemmelse af det anvendte auditoriums luftskifte fundet ud fra et afkligningsforsøg findes.

Til afkligningsforsøget er *concentration decay* metoden anvendt, hvor en mængde sporgas i form af lattergas opblandes grundigt med rumluften. Til dette formål er der anvendt en ventilator, hvor gassen tilføres på dets forside, som er orienteret skråt op mod rummet. Når en konstant koncentration af lattergas er opnået slukkes der for gassen og afklingningen måles over en tidsperiode. For at opnå ensartet koncentration af gassen i rummet er ventilatoren tændt under hele forløbet.

Til måling af gaskoncentrationen i rummet er hhv. en Brüel & Kjær Multipoint Sampler og Doser af typen 1303 og en Brüel & Kjær Multi-gas Monitor af typen 1302 anvendt, hvor dataopsamlingen foregår via en tilsluttet en computer. Forløbet af gaskoncentrationen i auditoriet for afkligningsforsøget, kan ses på figur C.1.

Når der ikke tilføres lattergas til rummet vil koncentrationen aftage eksponentiel, som det fremgår af figur C.1. Ved at plotte den naturlige logaritme af lattergaskoncentrationen i forhold til tiden opnås en tilnærmelsesvis ret linie jf. figur C.2.

Gradienten af den tilnærmelsesvise rette linie giver luftskiftet i det anvendte auditorium og kan bestemmes af [Grieve, 1989]:

$$n = \frac{\ln C_1 - \ln C_2}{\Delta \tau} \tag{C.1}$$

hvor



Figur C.1: Tidslig forløb af latterga
skoncentrationen i det anvendte auditorium.



Figur C.2: Afkligningskurve for lattergaskoncentrationen, hvor den naturlig logaritme af gaskoncentrationen er plottet ift. tiden.

n	=	er luftskiftet	$[{\rm h}^{-1}]$
$\ln C_1$	=	er koncentrationen til tidspunkt 1	[ppm]
$\ln C_2$	=	er koncentrationen til tidspunkt 2	[ppm]
$\Delta \tau$	=	er tidsforskellen mellem koncentrationerne C_1 og C_2	[h]

På figur C.2 vælges to punkter på den rette linie, hvor koncentrationen er hhv. 18,57 ppm og 0,90 ppm og $\Delta \tau$ er 1,28 h. Ved anvendelse af ligning (C.1) kan luftskiftet, n, bestemmes til 1,68 h⁻¹.

Appendiks

Spørgeskema til indeklimaanalyse

I det følgende appendiks kan det anvendte spørgeskema til evalueringen af en persons opfattelse af indeklimaet i forbindelse med det udførte fuldskalaforsøg omtalt i hovedrapportens afsnit 5 findes.

Spørgeskema til termisk analyse i F-108

Personoplysninger

Alder	
Mand	
Kvinde	
Vægt	
Højde	

Beklædning I tabellen afkrydses så mange tøjgenstande som du har på.

Underbukser	
BH	
Undertrøje/top	
T-shirt	
Skjorte	
Langærmet trøje	
Langbukser	
Nederdel	
Strømper	
Strømpebukser	
Sko	
Jakke	
Vest	
Hue/kasket	

Hvis andre tøjgenstande haves på end de nævnte i tabellen bedes du angive det her:



Nedenfor bedes du besvare spørgsmål vedrørende hvordan du vurderer det termiske og atmosfæriske indeklima i auditoriet. Besvarelsen sker ved at anføre en **vandret** streg.

Jeg vil vurdere følgende indeklimafaktorer:

 Hvor acceptabelt opfatter du luftkvaliteten
 Hvor acceptabelt opfatter du luftbevægelserne

 lige nu?
 omkring dig lige nu?



Nedenstående spørgsmål besvares ved anførsel af lodret streg



169
Appendiks

Statistik på forsøgspersoner

I det følgende appendiks kan en mere detaljeret statistik af forsøgsdeltagerne findes. Det være sig fordelingen af alder, vægt, højde, overfladeareal og beklædning for de fire etaper, som forsøget omtalt i hovedrapportens kapitel 5 strækker sig over.

I afhængighed af etapenummer i forsøget er hyppigheden af forsøgsdeltagernes alder gengivet på figur E.1. Heraf fremgår det, at deltagerne i forsøget primært er i starten og midten af tyverne.

Fordelingen af forsøgspersonernes vægt kan ses på figur E.2 ligeledes i afhængighed af etapenummer. I [EU, 2006] er gennemsnitsvægten for en dansker angivet til 75,9 kg, hvor den for etape 1 og 2 er 77,0 kg og 79,0 kg, som det fremgår af figur E.2a og E.2b. For etape 3 og 4 afviger gennemsnitsvægten af deltagerne mere fra en danskerens gennemsnitsvægt i forhold til de to første etaper, mens forsøgsdeltagernes vægt ikke varierer meget fra hinanden jf. figur E.2c og E.2d.

Forsøgspersonernes højde kan ses på figur E.3 i afhængighed af etape, hvoraf det fremgår, at gennemsnitshøjden for alle fire etaper har antaget en værdi mellem 180 - 185 cm, hvor normalhøjden for en gennemsnitsdansker er er omtrent 173 cm jf. [EU, 2006].

Det nøgne legemes overfladeareal, A_{Du} , kan beskrives som en funktion af højden og vægten af en person som [Dubois og Dubois, 1916]:

$$A_{Du} = 0,20236 \cdot W_e^{0,425} \cdot H_e^{0,725} \tag{E.1}$$

hvor

A_{Du}	=	DuBois overfladeareal	$[m^2]$
W_e	=	Personens vægt	[kg]
H_e	=	Personens højde	[m]

For en gennemsnitsdansker kan det nøgne legemes overfladeareal bestemmes til $1,90 \text{ m}^2$ af ligning (E.1), hvor hyppigheden af forsøgspersonernes nøgne overfladeareal er gengivet på figur E.4 i afhængighed af etapen. Af figuren fremgår det, at A_{Du} har været 3-5% højere for forsøgspersonerne end værdien for en gennemsnitsdansker. Afvigelsen er dog så relativ lav, at forsøgspersonernes gennemsnitlige nøgne overfladeareal tilnærmelsesvis svarer til en gennemsnitlig danskers.

Til bestemmelse af forsøgspersonernes samlede beklædningsisolans er der anvendt de vejlende værdier som listet i tabel E.1 jf. [DS 9920, 2003].

Beklædningsgenstand	Isolans $[clo]$
Underbukser	0,03
BH	0,01
Undertrøje/top	0,04
T-shirt	0,09
Langærmet trøje	0,29
Langbukser	0,28
Strikketrøje	0,35
Strømper	0,02
Sko	0,03
Støvler	0,10

Tabel E.1: Anvendte isolanser for beklædning jf. [DS 9920, 2003].

I afhængighed af etapen er fordelingen af forsøgspersonernes beklædningsisolans gengivet på figur E.5. Heraf fremgår det, at beklædningsisolansen tilnærmelsesvis har været identisk gennem de fire etaper dog lidt højere for de to sidste etaper. Dette skyldes, at i de to første etaper var en større andel af forsøgspersoner ikke iført langærmet trøje.

Som det fremgår af figur E.5, har den gennemsnitlig beklædning for personerne antaget en lavere værdi end den i hovedrapportens afsnit 5.2 omtalte forventede værdi på 0,9 clo. Det er dog det fundet, at indflydelsen af den lavere beklædning end den forventede er af mindre betydning for intervallet af den operative temperatur jf. [CR 1752, 2001].



Figur E.1: Hyppigheden af alderen for forsøgsdeltagerne i afhængighed af etape.



Figur E.2: Fordeling af forsøgspersonernes vægt i afhængighed af etape.



Figur E.3: Hyppigheden af forsøgsdeltagerne højde i afhængighed af etape.



Figur E.4: Fordeling af forsøgspersonernes nøgne overfladeareal i afhængighed af etape.



 ${\bf Figur \ E.5:}\ {\rm Fordeling \ af \ forsøgs personernes \ samlede \ beklædnings isolans \ i \ afhængighed \ af \ etape.$



Måleresultater

I det følgende appendiks kan måleresultaterne af lokale ventilationsindeks, relativ luftfugtighed samt besvarelser af de stillede spørgsmål til indeklimaanalysen i auditoriet i afhængighed af etapen findes.

F.1 Målinger

På figur F.1 er den lokale ventilationsindeks, ε_p , gengivet for hver af de fem målesøjler udregnet efter ligning (5.2) i hovedrapportens afsnit 5.4. Af figuren fremgår det, at der ikke har været ensartet luftkvalitet omkring målesøjle 2, 3 og 5, som det er tilfældet for målesøjle 1 og tilnærmelsesvist målesøjle 4. Endvidere kan det ses, at den laveste CO₂koncentration indtræffer i ankelhøjde og den højeste i personernes hovedhøjde eller over, da det lokale ventilationsindeks her er hhv. højest og lavest jf. figur F.1.

Det tidslige profil for den relative luftfugtighed kan ses på figur F.2 i afhængighed af etape. Heraf fremgår det, at personernes fugtbelastning på rumluften har været af begrænset størrelsesorden, eftersom der ikke indtræder en større ændring af den relative luftfugtighed i afhængighed af personbelastningen jf. figur F.2. Som fysiologisk nedre værdi for for luftfugtigheden anbefales et vandindhold svarende til 30% relativ fugtighed jf. [Stenn-Thøde et al., 2001], hvor der for størstedelen af forsøget er målt lavere værdier jf. figur F.2.



Figur F.1: Tidslig forløb af lokale ventilations
indekser, ε_p , i afhængighed af målepunktets placering. Opdeling af et
aper fremgår af figur F.1a, hvor E1, E2, E3 og E4 hhv. indikerer et
ape 1, 2, 3 og 4.



Figur F.2: Tidslig forløb af den relative luftfugtighed i afhængighed af målepunktets placering. Opdeling af etaper fremgår af figur F.2a, hvor E1, E2, E3 og E4 hhv. indikerer etape 1, 2, 3 og 4.

F.2 Evaluering af indeklima

I det følgende afsnit kan fordelingen af forsøgspersonernes besvarelse for vurderingen af indeklimaet i forbindelse med det udførte forsøg i afhængighed af etape ses. Det være sig opfattelse af temperaturen, accept af luftkvaliteten og opfattelsen af luftbevægelser omkring dem.

På figur F.3 kan forsøgspersonernes besvarelse af, hvordan de opfatter temperaturen i afhængighed af etape ses. Heraf fremgår det, at størstedelen af personerne har opfattet temperaturen som værende acceptabel, hvorfor det tyder på, at persontætheden ikke har en indflydelse på personernes opfattelse af temperaturen.

Forsøgspersonernes vurdering af luftkvaliteten er gengivet på figur F.4 i afhængighed af etape. For alle etaperne har hovedparten af forsøgspersonerne vurderet luftkvaliteten som værende acceptabel, hvor 12%, 8% og 10% for hhv. etape 1, 2 og 3 har vurderet den som netop uacceptabel.

I afhængighed af etape er forsøgspersonernes besvarelse for deres accept af luftbevægelserne omkring dem vist på figur F.5. Af figuren fremgår det, at der sker en ændring i personernes opfattelse af luftbevægelserne omkring dem, når persontætheden reduceres fra etape 1 til 2, hvor hhv. 84 % og 58 % finder luftbevægelserne omkring dem indenfor området klart/netop acceptabelt. For etape 3 og 4 finder hhv. 90 % og 67 % luftbevægelserne omkring dem indenfor området klart/netop acceptabel.

På figur F.6 kan forsøgspersonernes besvarelse for, om de ønsker mere eller mindre luftbevægelse i afhængighed af etape ses. For etape 1 hvor persontætheden er højest, ønsker hovedparten mere luftbevægelse omkring dem, men når mængden af personer ændres fra 50 til 25 ønsker flest personer mindre luftbevægelse omkring dem. For etape 3 og 4 er luftbevægelserne omkring dem vurderet som værende tilpas.

De ti forhåndsudvalgte forsøgspersoners besvarelse for hvor på kroppen de er generet af luftbevægelser kan ses på figur F.7. Heraf fremgår det, at ved faldende persontæthed er der flere, som føler sig påvirket af trækgener. De ti forhåndsudvalgte forsøgspersoner har primært følt sig generet af luftbevægelser på ankler, lår, arme og ansigt.



Figur F.3: Besvarelse af Hvor acceptabelt opfatter du temperaturen lige nu? i afhængighed af etapenummer.



Figur F.4: Besvarelse af Hvor acceptabelt opfatter du luftkvaliteten lige nu? i afhængighed af etapenummer.



Figur F.5: Besvarelse af *Hvor acceptabelt opfatter du luftbevægelserne omkring dig lige nu?* i afhængighed af etapenummer.



Figur F.6: Besvarelse af Kunne du tænke dig mere eller mindre luftbevægelse i afhængighed af etapenummer.



Figur F.7: Hvor på kroppen de ti særlige forsøgspersoner føler sig generet af luftbevægelser i afhængighed af etape. På figuren angiver cirklerne, diamanterne, firkanterne og trekanterne besvarelsen fra de ti deltagere for hhv. etape 1, 2, 3 og 4.

F.3 Helbredstilstand

I det følgende afsnit kan fordelingen for forsøgspersonernes opfattelse af deres sundhedsmæssige tilstand i afhængighed af forsøgets etape findes.

Igennem forsøget har hovedparten af forsøgspersonerne ikke følt sig generet i øjnene, som det fremgår af figur F.8. En større andel af forsøgspersonerne har følt sig tør i munden/næsen/på læberne for etape 1 - 3, hvor de tre forsøgspersoner i etape 4 ikke udpræget har følt symptomet. For de tre første etaper har forsøgspersonerne følt sig halvtrætte til frisk, som det fremgår af figur F.10. Endvidere fremgår det af figur F.11, at der ikke har været en større hyppighed af forsøgspersoner med hovedpine gennem forsøget. Overordnet har personer ikke følt sig i tilstand af stresset jf. figur F.13 og heller ikke fundet det svært og koncentrere sig, som det fremgår af figur F.12. I afhængighed af etape er forsøgspersonernes opfattelse af, hvor meget de kan arbejde gengivet på figur F.14, hvoraf en middelvoteringen er hhv. 78 %, 76 %, 72 % og 66 % for etape 1, 2, 3 og 4.

Ud fra forsøgspersonernes besvarelse af deres sundhedsmæssige tilstand er der ikke observeret udfald, der indikerer, at nogle af dem har været syge. Derfor vurderes det, at deres sundhedsmæssige tilstand ikke vil have en indflydelse på deres besvarelse af, hvordan de opfatter indeklimaet i auditoriet under forsøget.



Figur F.8: Besvarelse af generet øjne i afhængighed af etapenummer.



Figur F.9: Besvarelse af tør i munden/næsen/på læberne i afhængighed af etapenummer.



Figur F.10: Besvarelse af "tr at" i afhængighed af etapenummer.



Figur F.11: Besvarelse af "hovedpine" i afhængighed af etapenummer.



Figur F.12: Besvarelse af *koncentration* i afhængighed af etapenummer.



Figur F.13: Besvarelse af "stresset" i afhængighed af etapenummer.



Figur F.14: Besvarelse af "Jeg kan netop nu arbejde" i afhængighed af etapenummer.

Appendiks G

Spørgsmål til interviews

I hovedrapportens afsnit 4 er det omtalt, hvordan fire af de førende danske ingeniørvirksomheder anvender CFD til simulering af luftstrømninger i store rum med mange mennesker. Denne viden blev indsamlet ud fra interviews med personerne, som står for simuleringerne i de respektive firmaer, hvor de stillede spørgsmål et listet nedenfor.

- 1. I hvilke opgaver har I anvendt CFD, hvor modellering af personer direkte eller indirekte har været inde i billedet?
 - (a) Mindre/større opgaver, håndtering af enkelt person vs. flere personer
- 2. Hvordan genereres de randbetingelser, som I anvender til jeres simuleringer?
 - (a) Eksempelvis overfladetemperatur eller varmeflux fra en flade?
- 3. Hvordan håndteres bunden og fri varmeafgivelse?
 - (a) Konvektion, stråling og ledning vs. fordampning og vandindhold i udåndingsluft mv.
- 4. Hvilken fordeling benyttes for varmeafgivelsen ved konvektion og stråling?
 - (a) Betragtes vinkelforhold i denne forbindelse
- 5. Hvordan opsættes varmeafgivelse ved konvektion og stråling fra personer?
- 6. Tages der højde for varmeafgivelse ved fordampning og vandindhold i udåndingsluft fra personer? I givet fald hvordan?
- 7. Tages der hensyn til andre forureningskilder fra personer?

- 8. Hvor høj detaljeringsgrad anvendes der for personer?
 - (a) Eksempelvis rektangulær eller anatomisk korrekt model.
- 9. Hvilke kriterier opstiller I til generering af nettet i CFD simuleringerne?
- 10. Størrelse af model
 - (a) Antal af celler
 - (b) Fysisk størrelse
- 11. Hvilket krav opstiller I til den forventede usikkerhed, og hvad anses for at være acceptabelt?
- 12. Anvendes der kvalitetssikring af simuleringerne?
- 13. Er der opgaver, hvor der har været en opfølgning f.eks. i form af målinger eller skalaforsøg?
- 14. Hvad er det typiske ressourceforbrug i mandtimer for en case?
- 15. Hvilken viden savner I til opstilling af forbedrede randbetingelser?
- 16. Har I fundet litteratur indenfor området?

Appendiks

Beregning af indflydelse på vinkelforhold

I forbindelse med undersøgelsen af personers interaktion, omtalt i hovedrapportens kapitel 5, er der foretaget en undersøgelse af persontæthedens indflydelse for vinkelforholdet for en person omsluttet af otte andre, hvor bestemmelsen heraf følger i dette appendiks.

Som nævnt i hovedrapportens kapitel 5 betragtes en situation med ni personer, hvor reduktionen af person nummer fems vinkelforhold til de omkringliggende flader som følge af de omsluttende personers afgrænsning undersøges. På figur H.1 kan en skitsering af de ni personer placering ift. hinanden set ovenfra ses. Som følge af symmetri er afstandene fra person fem til tre, seks og ni den samme som fra person fem til et, fire og syv. Positionen af en persons overflade ift. person nummer fem fås ved projektering af dennes fladenormal ind på person fems overflade. For person et, tre, syv og ni, som ikke sidder vinkelret for person fem, kan størrelsen af disse personers afgrænsende flade ses på figur H.1 af den stiplede linie ved person et og syv. For de andre personer fremgår længden og bredden af tabel 5.7 i hovedrapportens afsnit 5.5.

Ud over længden og bredden af den afgrænsende flade vil højden heraf også have en indflydelse ved bestemmelsen af vinkelforholdet mellem person fem og de otte omsluttende personer. For person fire og seks er højden af overfladen 1,3 m, eftersom de er siddende på samme række som person fem. For person et – tre og syv – ni, som er siddende på hhv. rækken bagved og foran, kan højden af den afgrænsende overflade ses på figur H.2.

For casen hvor de omsluttende personer betragtes som en flade bestemmes vinkelforholdene mellem person fem og de otte afgrænsende personer ud fra diagrammet gengivet på figur H.3.



(a) Anvendte afstande når omsluttende personer kun betragtes som afgrænsende flader.

(b) Anvendte afstande når alle personer betragtes som flader.

Figur H.1: Anvendte afstande til bestemmelse af vinkelforholdene mellem person fem og de otte omsluttende personer. På figuren angiver 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 og 9 det tildelte nummer af personen. Alle mål i mm.



Figur H.2: Skitsering af den højde person fem kan "se" af personens overflade siddende hhv. foran og bagved person fem. Alle mål i mm.



Figur H.3: Middelværdi af vinkelforholdet, F, mellem en siddende person og vertikal flade når personen roteres omkring en lodret akse [Fanger, 1972].

De fundne vinkelforhold mellem person fem og de otte afgrænsende personer er listet i tabel H.1, hvor de indgående parametre til bestemmelsen heraf vha. figur H.3 også er listet. I tabellen angiver indeksene "n" og " ϕ " hhv. nedre og øvre del af kroppen for person fire og seks.

Person	a $[mm]$	b [mm]	c $[mm]$	a/c [–]	b/c [-]	Vinkelforhold, $F[-]$
1	340	545	999	$0,\!34$	$0,\!55$	$F_{5-1} = 0,009$
2	300	545	742	$0,\!40$	0,73	$F_{5-2} = 0,015$
3	340	545	999	$0,\!34$	$0,\!55$	$F_{5-3} = 0,009$
4	287	600	268	$1,\!07$	2,24	$F_{5-4,n} = 0,059$
	287	700	268	$1,\!07$	$2,\!61$	$F_{5-4,\phi} = 0.062$
6	287	600	268	$1,\!07$	$2,\!24$	$F_{5-6,n} = 0.059$
	287	700	268	1,07	$2,\!61$	$F_{5-6,\phi} = 0,062$
7	340	345	1011	$0,\!34$	0,34	$F_{5-7} = 0,005$
8	300	345	757	$0,\!40$	0,46	$F_{5-8} = 0,010$
9	340	345	1011	0,34	$0,\!34$	$F_{5-9} = 0,005$
						0,295

Tabel H.1: Indgående parameter til bestemmelse af vinkelforholdet, F, mellem person fem og de otte omsluttende personer. Indeksene "ø" og "n" hhv. øvre og nedre del af kroppen af person fire og seks.

Den ovenfor anvendte diagram på figur H.3, til bestemmelse af vinkelforholdet mellem person 5 og de omsluttende, er fastlagt ud fra at den betragtede person har "frit" udsyn til de afgrænsende flade [Fanger, 1972], hvilket ikke er tilfældet for person fem. Der opstilles derfor endnu en beregning, hvor vinkelforholdene mellem person fem og de otte omsluttende bestemmes ud fra en antagelse om at alle personerne betragtes som værende en flade.

Overfladen af person et – tre som sidder bagved person fem antager en større værdi. Vinkelforholdet mellem person fem til hhv. et, to og tre bestemmes af diagrammet på figur H.4, som angiver vinkelforholdet mellem en lille og stor flade. Person 4 og 6 er placeret på samme række som person fem, hvor det forudsættes, at person fire og seks overflade, som står vinkelret på person fems, antager samme størrelse. Vinkelforholdet mellem hhv. person fem til fire og fem til seks bestemmes vha. diagrammet på figur H.5, som angiver vinkelforholdet mellem to på hinanden vinkelrette flader med samme størrelse. For de tre personer som er siddende foran person fem hhv. person syv, otte og ni, antager deres overflade en mindre værdi end person fems. Vinkelforholdene mellem fem og de tre foransiddende personer bestemmes af diagrammet på figur H.6, som angiver vinkelforholdet mellem en stor og lille flade.

De anvendte størrelse til bestemmelse af vinkelforholdene mellem person fem og de otte omsluttende personer er angivet i tabel H.2, hvor de fundne vinkelforhold også fremgår.



Figur H.4: Vinkelforholdet, F, imellem en lille og stor flade som på hinanden står vinkelret [Stampe et al., 1997].



Figur H.5: Vinkelforholdet, F, imellem to på hinanden vinkelrette flader med samme størrelse [Stampe et al., 1997].



Figur H.6: Vinkelforholdet, F, imellem en stor og lille flade som på hinanden står vinkelret[Stenn-Thøde et al., 2001].

0,981												
$F_{5-9} = 0,035$	$0,\!64$	0,50	0,32	1,00			0	195	1079	345	340	Person 9
$F_{5-8} = 0,040$	$0,\!64$	0,71	0,40	1,00	ī	I	0	195	757	345	300	Person 8
$F_{5-7} = 0,035$	$0,\!64$	0,50	0,32	1,00	ı	I	0	195	1079	345	340	Person 7
$F_{5-6} = 0,350$	ı	ı	ı	ı	1,07	$4,\!85$	ı	I	287	1300	268	Person 6
$F_{5-4} = 0,350$	ı	ı	ı	ı	1,07	$4,\!85$	ı	I	287	1300	268	Person 4
$F_{5-3} = 0,048$	ı	ı	ı	ı	0,51	0,32	ı	I	540	340	1066	Person 3
$F_{5-2} = 0,075$	ı	ı	ı	ı	0,73	0,40	ı	I	540	300	742	Person 2
$F_{5-1} = 0,048$	I	I	I	I	0,51	0,32	I	ı	540	340	1066	Person 1
Vinkelforhold, F	b/b+v	b+v/c	a+w/a	a/a+w	c/a	b/a	w [mm]	v [mm]	c [mm]	b [mm]	a [mm]	

betragtes som værende en flade. Tabel H.2: Indgående parameter til bestemmelse af vinkelforholdet, F, mellem person fem og de otte omsluttende personer når alle personer

Appendiks .

Beregning af luftmængder

Den nødvendige luftmængde bestemmes i det følgende for den oplevet luftkvalitet og indholdet af CO_2 . Til bestemmelse af det nødvendige luftmængde betragtes en stationær forureningsbalance som den på figur I.1 viste.



Figur I.1: Illustration af den anvendte stationære forureningsbalance.

I.0.1 Luftmængde efter den oplevet luftkvalitet

Til at bestemme den nødvendige luftmængde ud fra den oplevede luftkvalitet anvendes følgende stationære forureningsbalance [Stenn-Thøde et al., 2001]:

$$c = 10 \cdot \frac{q}{V_l} + c_i \tag{I.1}$$

hvor

c	=	den opledeve luftkvalitet i rummet	[dp]
c_i	=	den opledeve luftkvalitet i udeluften	[dp]
q	=	forureningskildestyrken i rum og ventilationssystem	[olf]
V_l	=	den nødvendige luftmængde	[l/s]

Det forudsættes, at personernes aktivitetsniveau er 1 met svarende til stillesiddende afslappende aktivitet, hvormed de afgiver 1 olf pr. person [CR 1752, 2001]. Endvidere forudsættes det, at bygningen opføres som en kategori II, hvormed maksimalt 20% af personerne må være utilfredse med den oplevede luftkvalitet, hvormed koncentrationen i rummet ikke tillades at overskride 1,4 dp jf. [DS 15251, 2007]. Bygningen forudsættes at opføres i et område med lav forurening med en koncentration på 0,3 dp i udeluften og den opføres af lavt forurenende materialer, som afgiver 0,1 olf/m². Ud fra et gulvareal på 363 m² og et personantal på 150 kan forurenignsstyrken findes som:

$$q = 1.0 \text{ olf/person} \cdot 150 \text{ personer} + 363 \text{ m}^2 \cdot 0.3 \text{ olf/m}^2 = 186.3 \text{ olf}$$
 (I.2)

Den nødvendige luftmængde for at der maksimalt vil være $20\,\%$ utilfredse kan da findes:

$$V_l = \frac{186,3 \text{ olf} \cdot 10 \text{ dp} \cdot 1/\text{s/olf}}{1,4 \text{ dp} - 0,3 \text{ dp}} = 1693,3 \text{ l/s}$$
(I.3)

hvilket svarer til $11,3 \text{ l/s} \cdot \text{person.}$

I.0.2 Luftmængde efter indholdet af CO₂

Til fastlæggelsen af den nødvendige luftmængde som følge af CO_2 afgivelsen fra de 150 personer er følgende stationære forureningsbalance anvendt [Stenn-Thøde et al., 2001]:

$$V_l = \frac{q_{CO_2}}{c - c_i} \tag{I.4}$$

hvor

c	=	den øvre grænse for ligevægtskoncentrationen af CO_2	[—]
c_i	=	koncentrationen af CO_2 i indblæsningsluften	[-]
q_{CO_2}	=	CO ₂ -afgivelsen fra en voksende person	[l/s]

Til bestemmelse af CO_2 -afgivelsen fra en voksende person anvendes følgende udtryk [Stampe et al., 1997]:

$$q_{CO_2} = 17 \cdot M \tag{I.5}$$

hvor

$$M = \text{Aktivitetsniveau } z$$
 [met]
17 = CO₂-afgivelsen for en person [l/met · h]

Ud fra [DS 15251, 2007] anbefales det, at indholdet af CO_2 i indeluften, c, ikke bør overskride 850 ppm, hvilket svarer til utilfredshedsprocenten PD = 20% jf. [DS 15251, 2007]. Der antages en CO₂-koncentration i udeluften på 350 ppm. Ud fra en rumbelastning på 150 personer og en anslået aktivitetsniveua på 1 met svarende til stillesidende afslappende aktivitet, kan den nødvendige luftmængde findes til:

$$V_{l,CO_2} = \frac{150 \text{ personer} \cdot 171/\text{h} \cdot \text{person} \cdot \frac{1}{3600} \text{ h/s}}{(1000 \text{ ppm} - 350 \text{ ppm}) \cdot 10^{-6} 1/\text{l}} = 1416,71/\text{s}$$
(I.6)

hvilket svarer til $9,41/s \cdot person$.

Appendiks

Pilotsimuleringer med CFD

I det følgende appendiks omtales en pilotundersøgelse for CFD simuleringer med anvendelse af 150 enheder af personmodellen CSP3 placeret i et stort rum, hvor det nødvendige celleantal for at opnå en acceptabel simuleringsfejl undersøges. Hertil opstilles der tre cases med stigende celleantal af beregningsnettet. Herudover omtales også en pilotundersøgelse, hvor der tages hensyn til energiudvekslingen som følge af stråling ved anvendelse af den implementerede strålingsmodel i ANSYS-CFX. Afslutningsvis belyses indflydelsen af det "falske" tidsskridts størrelse.

J.1 Geometri og randbetingelser for 150 personer

Til at foretage undersøgelse af det nødvendige celleantal for at opnå en acceptabel simuleringsfejl tages der udgangspunkt i et forsøgsrum anvendt af [Møller, 2008], som blev anvendt til at undersøge luftstrømning i et stort rum med 150 enheder af en eksperimentel personmodel. Forsøgsrummet med 150 enheder af den eksperimentelle personmodel er gengivet på figur J.1.

Til pilotsimuleringen skaleres det på figur J.1 viste forsøgsrum op ved anvendelse af en skaleringsfaktor på 4,9 som omtalt i hovedrapportens afsnit 7.1, hvor der henvises til for yderlig forklaring til opskaleringen af rummet. Her er den nødvendige afstand mellem varmekilderne centerlinie ved anvendelse af personmodellerne CSP3 – CSP5, placering også omtalt for, at simuleringen vil repræsentere virkeligheden. Placering af 150 enheder af personmodellen CSP3 i det opskalerede forsøgsrum kan ses på figur J.2.



Figur J.1: Plantegning ved anvendelse af 150 enheder af den eksperimentelle personmodel [Møller, 2008]. Alle mål i mm.



Figur J.2: Placering for 150 enheder af personmodellen CSP3 i det anvendte rum til CFD simuleringen. Alle mål i mm.

Det opsættes som mål at opnå en midlet simuleringsfejl af ligningerne på $1 \cdot 10^{-4}$, da dette svarer til en normaliseret fejl af de styrende ligninger på en tusindedel [ANSYS, 2006b], hvilket må anses som acceptabelt. Til anskueliggørelse af det nødvendige celleantal for at opnå dette betragtes der kun den konvektive varmeafgivelse fra personerne, hvor der regnes med 25 W/m^2 . Dette er svarende til et aktivitetsniveau på 1 met, stillesiddende afslappende aktivitet [Stampe et al., 1997]. Herudover betragtes rummets afgrænsende flader som værende adiabatiske. Den nødvendige luftmængde er bestemt i appendiks I til 1,69 m³/s ud fra de beskrevne forudsætninger i hovedrapportens afsnit 7.1. I tabel J.1 kan en oversigt for de anvendte randbetingelser ses.

Ventilation	
Massestrøm Indblæsningstemperatur	$\begin{array}{c} 2,04\mathrm{kg/s}\\ 20^{\circ}\mathrm{C} \end{array}$
Rum	
Afgrænsende flader Rumtemperatur Densitet af luft	Adiabatiske $23,0$ °C $1,192$ kg/m ³

Tabel J.1: Oversigt over de anvendte randbetingelser for rummet til undersøgelse af nødvendig celleantal, når rummet belastes af 150 personer.

Til anskueliggørelse af cellestørrelsen indflydelse på den numeriske løsning er der opstillet tre cases med de i tabel J.2 anvendte mindst og størst tilladelige størrelse af beregningsnettes celler.

Case			Flade		'Frie" rum	Celler
	Indblæs-	Udsug-	Person-	Afgrænsende		
	ning	ning	model			
CSP3FT150.1	50/100	50/100	100/150	50/1000	1000	1.161.705
CSP3FT150.2	50/100	50/100	60/100	50/500	500	1.498.110
CSP3FT150.3	50/100	50/100	25/75	50/400	400	3.245.057

Tabel J.2: Anvendt tilladelig minimum og maksimum cellestørrelse for flader og det "frie" rum for opstilling af de tre beregningsnet for anvendelse af CSP3 samt de dertilhørende antal celler og ligninger. I rækken "Flade" angiver tallet før / den mindst tilladelige cellestørrelse og tallet efter det størst tilladelige cellestørrelse.

Det tildelte casenavn i tabel J.2 indeholder hvilken personmodel, ventilationsprincip og personbelastning, som er anvendt samt det pågældende casenummer. Heraf fremgår det, at personmodellen CSP3 anvendes, rummet ventileres efter fortrængningsprincippet og personbelastningen er 150 personer.
J.1.1 Simuleringsresultater for 150 personer

I det følgende afsnit præsenteres først den normaliseret midlet simuleringsfejl af hele domænet for den numeriske løsning af energiligningen i afhængighed af celleantallet samt det simulerede temperaturfelt for rummets xz-plan ved y = 8,82 m. Dette efterfølges af den normaliseret midlet simuleringsfejl for bevægelsesligningens tre komposanter u, v og w og det simulerede fart- og hastighedsfelt for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i afhængighed af celleantallet. På den vedlagte bilags DVD, DVDI, kan temperatur- og fartfeltet for rummets xz- og xy-plan for de tre opstillede cases CSP3FT150.1, CSP3FT150.2, og CSP3FT150.3 findes i mappen: film/CFD.

Temperatur

I afhængighed af beregningsnettets celleantal kan den numeriske fejl af energiligningen for de tre undersøgte cases ses på figur J.3.

Som det fremgår af figur J.3, antager den numeriske løsning den laveste fejl for beregningsnettet indeholdende de største celler, hvorimod fejlen øges markant for et finere beregningsnet. Den højere simuleringsfejl, der opnås ved stigende celleantal, fremgår også i at temperaturen simuleres mere "uroligt", som det kan ses på figur J.4. Dette må forventes, at kunne skyldes den relative høje simuleringsfejl for energiligningen til hvilken simuleringen er "konvergeret" samt problemstillingen eventuelt heller ikke kan betragtes som værende stationært. Af figurerne fremgår det også, at for højere celleantal fremkommer et mere detaljeret indsigt i plumens udformning over personerne.



Figur J.3: Den midlet normaliseret simuleringsfejl for energiligningen i afhængighed af celleantallet.



(c) CSP3FT150.3, Antal celler 3.245.057.

Figur J.4: Temperaturen for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i afhængighed af beregningsnettets celleantal.

Fart- og hastighedsfelt

Den normaliseret midlet simuleringsfejl over hele domænet for den numeriske løsning af bevægelsesligningens tre komposanter u, v og w er gengivet på figur J.5 i afhængighed af beregningsnettets celleantal.



Figur J.5: Den midlet normaliseret simuleringsfejl for bevægelsesligningens tre komposanter u, v og w i afhængighed af celleantallet.

Som for energiligningen ses det jf. figur J.5, at for stigende celleantal i beregningsnettet øges den numeriske fejl ved løsningen af bevægelsesligningen. Endvidere fremgår det også af figuren, at den højeste simuleringsfejl er for bevægelsesligningens w komposant, som beskriver den vertikale bevægelse i rummet. I afhængighed af celleantallet er farten for



rummets xz-plan ved y = 8,82 m gengivet på figur J.6.

(c) CSP3FT150.3, Antal celler 3.245.057.

Figur J.6: Farten for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i afhængighed af beregningsnettets celleantal.

For rummets yz-plan er fartprofilet gengivet på figur J.7 ved $x = 8,82 \,\mathrm{m}$ i afhængighed af



beregningsnettes celleantal samt rummets bredde.

Figur J.7: Farten for rummets yz-plan ved x = 10,29 m i afhængighed af beregningsnettes celleantal.

Som det fremgår af figur J.7, simuleres der en højere værdi af farten over personerne ved stigende celleantal, som det også fremgår af figuren med fartfeltet for rummets xz-plan jf. figur J.6. Den samme tendens kan ses ud fra figur J.8, hvor hastigheden for rummets xz-plan ved y = 8,82 m er gengivet i afhængighed af beregningsnettets celleantal.



(c) CSP3FT150.3, Antal celler 3.245.057.

Figur J.8: Hastigheden for rummets xz-plan ved y = 8,82 m i afhængighed af beregningsnettets celleantal.

J.2 Geometri og randbetingelser for 25 personer

Som anskueliggjort i afsnit J.1.1 er det ikke muligt med den tilgængelige computerkraft at diskretisere problemstillingen med et tilstrækkeligt højt celleantal for at opnå en acceptabel simuleringsfejl for den numeriske løsning. Det vælges derfor at reducere personantallet til 25 personer som kort omtalt i hovedrapportens afsnit 7.2. I det følgende afsnit præsenteres de anvendte randbetingelser for en case, hvor 25 personers geometri modelleres med personmodellen CSP3, hvor der regnes med en total fri varmeafgivelse på 50 W/m^2 hidrørende fra konvektion og stråling. Dette svarer til en persons fri varmeafgivelse for et aktivitetsniveau på 1 met svarende til stillesiddende afslappende aktivitet [Stampe et al., 1997]. Til simuleringen anvendes den på figur 7.24 i hovedrapportens afsnit 7.3 viste placering for 25 enheder af personmodellen CSP3.

For den numeriske løsning skal emissionstallet for de afgrænsende flader og personernes defineres, da dette vil have en indflydelse for simuleringen af energifordelingen, der sker som følge af strålingen mellem fladerne og personernes overflade. For menneskets hud er emissionstallet tæt på 1,0 og for almindelig beklædning 0,97, hvorfor der anvendes en middelværdi på 0,97 for personernes overflade jf. [Fanger, 1972]. Emissionstallet for rummets afgrænsende flader vil afhænge af fladernes finish, hvor det antages at overfladerne er malet, og emissionstallet kan da findes til at være omtrent 0,94 [Stampe et al., 1997]. Herudover foreskrives alle rummets afgrænsende flader som værende adiabatiske.

Som nævnt i hovedrapportens afsnit betragtes luften som en ideal gas, da dette medfører en bedre numerisk løsning af den termiske opdrift [ANSYS, 2006b], hvortil densiteten af rumluften skal anvendes som begyndelsesbetingelse for simuleringen. Den på rummet totale påførte belastning bestemmes ud fra en fri varmeafgivelse pr. person på 50 W/m², hvor der regnes med et overfladeareal af en person på 1,62 m². Ud fra en personbelastning på 25 personer kan den på rummet totale påførte belastning findes til 2025 W. Indblæsningstemperaturen er 20 °C og med en volumenstrøm på 1,69 m³/s, kan rumtemperaturen findes til 21,0 °C af ligning (7.1) givet i hovedrapportens afsnit 7.1. Densiteten af rumluften kan da findes til 1,1200 kg/m³fra tabelopslag i [Stenn-Thøde et al., 2001].

Den frie varmeafgivelse hidrørende fra konvektion og stråling opsættes hver for sig i det anvendte program. Den konvektive varmeafgivelse defineres som en varmeflux på $25 \,\mathrm{W/m^2}$ fra personernes overflade og strålingsbidraget defineres som en kilde ligeledes på $25 \,\mathrm{W/m^2}$ fra personernes overflade.

I tabel J.3 kan en samlet oversigt for de anvendte randbetingelser ses for casen CSP3FT25S.1, hvor der betragtes bidraget fra konvektion og stråling.

Opsætning af cellestørrelsen for beregningsnettet til casen CSP3FT25S.1 er listet i tabel J.4.

Ventilation			
Massestrøm Indblæsningstemperatur	$\begin{array}{c} 2.04\mathrm{kg/s}\\ 20^{\circ}\mathrm{C}\end{array}$		
Rum			
Afgrænsende flader Emissitivitet Rumtemperatur Densitet af luft	Adiabatiske 0,94 21,0 °C $1,1200 \text{ kg/m}^3$		
Personer			
Emissitivitet Fri varmeafgivelse Φ_k	0,97 $25 \mathrm{W/m^2}$		
Φ_s	$25\mathrm{W/m^2}$		

Tabel J.3: Oversigt over de anvendte randbetingelser for rummet når det belastes af 150 personer og den frie varmeafgivelse hidrørende fra konvektion og stråling betragtes.

Case	Flade			'Frie" rum	Celler	
	Indblæs-	Udsug-	Person-	Afgrænsende		
	ning	ning	model			
CSP3FT25S.1	50/10	50/100	5/50	50/300	300	2.832.757

Tabel J.4: Anvendt tilladelig minimum og maksimum cellestørrelse for flader og det "frie" rum for opstilling af de tre beregningsnet for anvendelse af CSP3 samt de dertilhørende antal celler og ligninger. I rækken "Flade" angiver tallet før / den mindst tilladelige cellestørrelse og tallet efter det størst tilladelige cellestørrelse.

Det tildelte casenavn i tabel J.4 indeholder hvilken personmodel, ventilationsprincip og personbelastning, som er anvendt samt det pågældende casenummer. Heraf fremgår det, at personmodellen CSP3 anvendes, rummet ventileres efter fortrængningsprincippet og personbelastningen er 25 personer. Endvidere angiver 'S' at stråling medtages.

J.2.1 Simularingsresultater for 25 personer

I det følgende afsnit præsenteres de resultater, der er fremkommet for casen CSP3FT25S.1, hvor 25 personernes frie varmeafgivelse er modelleret under hensyntagende til konvektionsog strålingsbidraget. Først præsenteres de simulerede temperaturer, hvorefter resultatet for farten og hastighedsfeltet følger. Resultaterne præsenteres dog kun for rummets xz-plan i afstanden y = 8,82 m. Der henvises til den vedlagte bilags DVD, DVDI, hvor resultaterne for rummets yz-plan i afstanden x = 10,29 m kan ses i mappen billeder/CFD/CSP3FT25S.1.

Temperatur

Temperaturen for rummets xz-plan ved y = 8,82 m er gengivet på figur J.9 med en nedre og øvre grænse på hhv. 20 °C og 21 °C af luft- og overfladetemperaturen.



Figur J.9: Temperaturen for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for casen CSP3FT25S.1, hvor der regnes med varmeafgivelsen fra hhv. konvektion og stråling. Celleantallet er 2.832.757.

Af figur J.9 kan det ses, at der indtræffer fire markante lagdelinger i rummets højde samt en relativ kraftig plumen over personerne. Temperaturen på to af rummets afgrænsende flader er gengivet på figur J.10.



Figur J.10: Overfladetemperaturen for rummets xz- og yz-plan ved hhv. y = 0 m og x = 0 m for casen CSP3FT25S.1, hvor der regnes med varmeafgivelsen fra hhv. konvektion og stråling. Celleantallet er 2.832.757.

Af figur J.10 fremgår det, at den simulerede temperatur af rummets overflader ikke er brugbar til tolkning. Det vurderes at skyldes en ustabilitet, som introduceres når strålingen medtages. Grundet computerressourcer har det ikke være muligt at generere et beregningsnet af en sådan kvalitet, som har kunnet medføre et mere "forventeligt" billede af overfladetemperaturen. Derfor er det valgt at se bort fra varmeafgivelsen hidrørende fra stråling for alle simuleringerne.

Fart og hastighed

For rummets xz-plan kan farten og hastighedsfeltet ved y = 8,82 m ses på hhv. figur J.11 og J.12.



Figur J.11: Farten for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for casen CSP3FT25S.1, hvor der regnes med varmeafgivelsen fra hhv. konvektion og stråling. Celleantallet er 2.832.757.



Figur J.12: Hastigheden for rummets xz-plan ved y = 8,82 m for casen CSP3FT25S.1, hvor der regnes med varmeafgivelsen fra hhv. konvektion og stråling. Celleantallet er 2.832.757.

Undersøgelse af falsk tidsskridt

For alle rapportens præsenterede simuleringer er der anvendt et maksimalt falskt tidsskridt på 4s, som det pågældende ANSYS-CFX benytter til at dæmpe ligninger under den numeriske løsning. Der er derfor opstillet yderlig to simuleringer for casen CSP3FT25.1 med et falskt tidsskridt på hhv. 0,4s og 0,2s for at se hvilken indflydelse dette vil have for den numeriske løsning. Den midlet simuleringsfejl for hele domænet, der er opnået med de to tidsskridt, kan ses på den vedlagte bilags DVD, DVDI, under mappen *billeder/CFD/undersøgelse af det falske tidsskridts størrelse*, hvor simuleringsfejlen ved anvendelse af et falsk tidsskridt på 4s også kan findes. For de præsenterede cases er der kun betragtet den konvektive varmeafgivelse fra personerne.

På figur J.13 kan temperaturen for xz-planet ved y = 8,82 m ses i afhængighed om der anvendes et falsk tidsskridt på 0,4 s eller 0,2 s.



Figur J.13: Temperaturfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 for casen CSP3FT25.1 når det falske tidsskridt, Δt , sættes til 0,4 s eller 0,2 s. Celleantallet er 3.812.917.

Det kan ses, at ved en sænkelse af det falske tidsskridts størrelse simuleres der en mere markant lagdeling jf. figur J.13. På figur J.14 kan farten for xz-planet ved y = 8,82 m ses i afhængighed om der anvendes et falsk tidsskridt på 0,4 s eller 0,2 s.

På figur J.15 kan profilet for den simulerede fart ses i rummets bredde og i højden z = 5,39 m ved x = 9,80 m ved anvendelse af CSP3 i afhængighed af det falske tidsskridts størrelse. Heraf fremgår det, at i området udenfor varmekilderne hersker tilnærmelsesvist ens fartfelt uafhængigt af det falske tidsskridts størrelse, men at farten over personerne ændres. Dette vurderes, at skyldes den ændrede udformning af plumen over personerne jf. figur J.13.

På figur J.16 kan hastighedsfeltet for xz-planet ved y = 8,82 m ses i afhængighed om der anvendes et falsk tidsskridt på 0,4 s eller 0,2 s.



(a) CSP3FT25.1 $\Delta t = 0.4 \, \text{s}.$

(b) CSP3FT25.1 $\Delta t = 0.2 \text{ s.}$

Figur J.14: Fartfeltet for rummets xz-plan ved y = 8,82 for casen CSP3FT25.1 når det falske tidsskridt, $\Delta t,$ sættes til 0,4 s eller 0,2 s. Celleantallet er 3.812.917.



Figur J.15: Sammenligning af fart for yz-plan i højden $z = 5,39 \,\mathrm{m}$ ved $x = 9,80 \,\mathrm{m}$ for personmodellen $\operatorname{CSP3}$ i afhængighed af det falske tidsskr
dit størrelse.



Figur J.16: Hastighedsfeltet for xz-planet ved y = 8,82 for casen CSP3FT25.1 når det falske tidsskridt, $\Delta t,$ sættes til 0,4 s eller 0,2 s. Celleantallet er 3.812.917.

Ved at sammenholde det viste profil for farten herpå, med det viste fartfelt på figur J.14, fremgår det, at der ikke er en direkte indikation på at ved og sænke det falske tidsskridts størrelse simuleres lavere værdier af farten. Derimod er der opnået mere "stabilitet' af simuleringsfejlen for løsningen af både energi- og bevægelsesligningen ved at sænke størrelsen af det falske tidsskridt, som det fremgår af figurerne på den vedlagte bilags DVD, DVDI, i mappen billeder/CFD/undersøgelse af det falske tidsskridts størrelse.

Lokalt hastighedsfelt

For casene CSP3FT25.1 og CSP5FT25.1 jf. tabel 7.5 i hovedrapportens afsnit 7.3 kan det lokale hastighedsfelt omkring personmodellen CSP3 og CSP5 ses på figur J.17 for rummets xz-plan ved y = 8,82 m.

Det kan tænkes, at en personmodel af typen som CSP3 vil kunne give anledning til en højere hastighed eftersom varmen herfra kan afgives "lettere" til luften i forhold til en personmodel af typen som CSP5. Dette vil eventuel kunne øge den naturlige konvektion, hvormed densiteten af luften ændres hurtigere og luftens hastighed øges. Det er ikke umiddelbart til at observere ud fra figur J.17 om personmodellen CSP3 vil medføre en højere simuleret lokal hastighed i forhold til personmodellen CSP5 eller omvendt. Det vurderes delvis, at skyldes et for dårlig opløsning af beregningsnettet samt løsningerne ikke er konvergeret.



Figur J.17: Det lokale hastighedsfelt omkring personmodellerne CSP3 og CSP5.

