## Analyse og evaluering af luftstrømninger og indeklima ved brug af termoaktive konstruktioner

Anne Sofie Palle Lise Mellergaard Jensen

> Byggeri og Anlæg Indeklima og Energi Aalborg Universitet Juni 2013



# AALBORG UNIVERSITET

#### Titel:

Analyse og evaluering af luftstrømninger og indeklima ved brug af termoaktive konstruktioner

#### **Projekt:**

Afgangsprojekt ved Indeklima og Energi

#### **Projektperiode:**

September 2012 - Juni 2013 **Forfattere:** 

Anne Sofie Palle

Lise Mellergaard Jensen

#### Vejledere:

Per K. Heiselberg Rasmus Lund Jensen

#### **Oplagstal:** 5

Sidetal: 291 Asluttet: 7. Juni 2013

#### The School of Civil Engineering

Sohngårdsholmsvej 57 9000 Aalborg Telephone: +45 99 40 85 30 http://www.bsn.aau.dk

#### Synopsis:

Afgangsprojekt omhandler en analyse og evaluering af strømningsmønster og det termiske indeklima ved brugen af termoaktive konstruktioner, hvor projektet tager udgangspunkt i Visionshuset, der er en bygning med termoaktive dækelementer i kombination med et nedhængt loft. Det undersøges, hvilke parameter der er styrende for strømningsmønstret, samt hvordan det termiske indeklima påvirkes af den pågældende strømning. Yderligere undersøges påvirkningen af køleeffekten og andelen af varmeoverførsel ved hhv. stråling og konvektion under variationerne.

Der opbygges et lokale i laboratoriet tilsvarende et mødelokale i Visionshuset. Her udføres målinger, hvor indflydelsen fra placeringen af varmebelastningen, ventilationen samt historikken undersøges. Til sammenligning udføres der målinger i Visionshuset, hvor placeringen af varmebelastningen ligeledes ændres. Endvidere udføres CFDsimuleringer for at betragte flere scenarier, som ikke undersøges via målingerne, for at understøtte de observerede tendenser fra målingerne.

### Forord

Denne rapport er resultatet af et afgangsprojekt udarbejdet af Anne Sofie Palle og Lise Mellergaard Jensen, som er studerende fra Institut for Byggeri og Anlæg med speciale i Indeklima og Energi ved Aalborg Universitet. Afgangsprojektet er udarbejdet fra efteråret 2012 til sommeren 2013, hvor projektet omhandler en analyse og evaluering af luftstrømninger og indeklima ved brug af termoaktive konstruktioner.

I forbindelse med dette afgangsprojekt vil vi gerne takke Per K. Heiselberg og Rasmus Lund Jensen for inspirerende vejledning igennem projekt perioden samt håndteringen af udfordringerne i forbindelse med målingerne udført i Visionshuset og laboratoriet. COWI takkes for at muliggøre måleprojektet på deres kontor i Visionshuset, hvor der gives en speciel tak til Allan Hesselholt for den tid og energi, han har lagt i at hjælpe os. Endvidere vil vi takke Jérôme Le Dréau for hjælpen med drillende udstyr og diverse beregninger. En tak går til Lars Isbach Poulsen for altid at være klar til at give en hjælpende hånd i laboratoriet og for at gøre den lange tid tilbragt der lidt sjovere. Til sidst vil vi give en stor tak til Lasse Brauner Mikkelsen for hans hjælp i laboratoriet og gode humør.

### Læsevejledning

Rapporten er opdelt i en hoved- og appendiksdel med en tilhørende appendiks CD. Hovedrapporten indeholder en indledende del samt tre parts med beskrivelse af undersøgelsesgrundlaget, analyse og evaluering af luftstrømninger og termisk komfort samt køleeffekt og varmeoverførsel. Sidst er der en afsluttende del med konklusion og perspektivering. Bagerste i rapporten er den femte del, som indeholder appendiks som understøtter hovedrapport. Dette indeholder detaljerede beskrivelser og databehandlinger for de udførte målinger i laboratoriet, beskrivelse af måleudstyr, supplerende undersøgelser udført i laboratoriet samt uddybende beskrivelse af beregningsmetoder. Kapitler i hoved- og appendiksrapporten er begge individuelt kronologisk nummereret. Samtlige figurer og tabeller er nummereret iht. kapitlet. Forklarende tekst til figurer og tabeller findes under de givne figurer og tabeller, ligesom kilden er angivet, hvis figuren ikke er egenproduktion. I rapporten er der brugt nummeret henvisning til angivelse af kilder, hvor den samlede litteraturliste kan ses bagerst i rapporten (Vancouver style). Referencer til appendiks-CD'en vil ske således, A.1 - *filnavn*, hvor første del henviser til appendiksnummeret og anden del til en specifik mappe på CD'en. Ydermere er der vedlagt et tegningsbilag, og en oversigt herover findes i rapporten samt forrest i tegningsmappen.

### **English summary**

This master thesis, written at the Master Programme in Indoor Environmental Engineering at Aalborg University, analyses the thermal environment and the airflow in a room with thermo active building constructions in combination with acoustic ceilings. The cooling capacity and the amount of heat transferred by radiation and convection in the system are furthermore briefly investigated.

A short study of thermo active building constructions (TABS) is conducted in order to obtain the latest knowledge of the subject, where especially a project made by COWI, DTU.BYG, Spæncom, Teknologisk Institut - Energi and ELFORSK has been investigated. The project deals with different issues within buildings with TABS in combination with an acoustic ceiling, where measurements have been done in the laboratory at DTU as well as the headquarters of Middelfart Sparekasse.

In this thesis, the analyses are performed on the basis of measurements in a hotbox in the laboratory, CFD-simulations and measurements in Visionshuset, where TABS and acoustic ceilings are used. The report contains investigations of the airflow pattern in general when using TABS and acoustic ceilings, as well as what governs the airflow pattern and the airflow direction, while examining how the thermal environment in the room is affected. Furthermore a short investigation of the cooling capacity and the amount of heat transferred by radiation and convection respectively is preformed.

The investigations of the airflow pattern, performed in the laboratory, shows that the airflow forms a circular pattern, which means that the flow moves upward in one end of the room, then flows above the acoustic ceiling and drops down at the other end of the room again, where it flows along the floor. This circulation is longwise in the room. Only a small or non-existing flow through the openings placed in the middle of the room is observed. Furthermore it is observed that the airflow shifts between being strongest in each corner diagonally, but still with downflow in one end and upflow in the other end of the room. This tendency is consistent through all the measurements and similar results are obtained in the CFD-simulations.

It is demonstrated by the measurements in the laboratory and the CFDsimulations that the placement of the heat sources is a decisive factor for the flow directions, meaning that the flow is upward in the end with the heat sources and downward in the other end. Furthermore it is shown that the placement of the inlet and exhaust and the airflow rate do not affect the general airflow direction.

When the heat load in the room is evenly distributed, it is established that the airflow direction is governed by the previous distribution of the heat load; thus the airflow does not change when transferring from a not evenly distributed heat load to an evenly distributed heat load. This is valid when the load is distributed 45-60 % in each end of the room.

Concerning the measurements in Visionshuset, the observed flow pattern is different with upwards flow in the middle of the room and downwards flow in both ends of the room, however the flow is still longwise in the room.

The thermal environment is investigated through the measurements in the laboratory and Visionshuset. In Visionshuset there are no problems with the thermal comfort, while in the laboratory there are several comfort problems. Problems with the thermal comfort are especially observed in the area of downward flow along the floor and close to the walls.

The cooling capacity is calculated by use of both the measured surface temperature and the measured mean flow temperature for Visionshuset, where the calculated values are 5,2-6,3  $^{W}/_{m^{2} \text{ K}}$  and 2,2-2,4  $^{W}/_{m^{2} \text{ K}}$ , respectively. For the laboratory the cooling capacity is only calculated by use of the measured surface temperature to 5,2-6,3  $^{W}/_{m^{2} \text{ K}}$ .

The amount of heat transferred by radiation and convection is almost equal for the measurements from both the laboratory and Visionshuset.

### Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse			
1	Indl	edning	1
	1.1	Projektvision	4
	1.2	Metode	4
2	Litte	eraturstudie	7
	2.1	Virkemåde for termoaktive konstruktioner	7
	2.2	Erfaring med termoaktive konstruktioner	9
	2.3	Termoaktive konstruktioner i kombination med nedhængt loft .	12
De	elIU	ndersøgelsesgrundlag	15
3	Visi	onshuset	17
	3.1	Bygningsbeskrivelse	17
	3.2	Måleprocedure	22
	3.3	Ændring af strømningsmønstret	26
4	Lab	oratorieopstilling	27
	4.1	Opbygning af laboratoriemodel	27
	4.2	Placering af måleudstyr	31
	4.3	Måleprocedure	34
	4.4	Test af rumforhold	38
5	CFI	)-model	39
	5.1	Beregningsmodel	39
	5.2	Konvergensanalyse	42
	5.3	Griduafhængighed	44
	5.4	Sammenligning med målinger	47

6	Proc	edure for resultatbehandling	51
	6.1	Komfortkrav	51
	6.2	Strømningsmønstret	51
	6.3	Termisk komfort	52
	6.4	Køleeffekt	55
	6.5	Varmestrøm ved konvektion og stråling	57
De		Generelle strømningsmønstre og komfortforhold	59
7	Gen	erelt strømningsmønster og komfortforhold	61
	7.1	Resultater fra laboratorieforsøg for Case 1	62
	7.2	Resultater fra CFD-simuleringerne	66
	7.3	Delkonklusion	70
8	Varmekilders indflydelse på strømningsmønstret		
	8.1	Målinger i laboratoriet	72
	8.2	CFD-simuleringer	77
	8.3	Delkonklusion	78
9	Vent	ilations indflydelse på strømningsmønstret	79
10	Hist	orikkens indflydelse på strømningsmønstret	85
	10.1	Historikkens indflydelse for laboratorieforsøg	86
	10.2	Lastfordeling og historik	91
	10.3	Delkonklusion	94
11	Måli	nger i Visionshuset	95
	11.1	Vejrforhold	95
	11.2	Rumforhold	97
	11.3	Generelt strømningsmønster	100
	11.4	Generelle komfortforhold	100
	11.5	Ændring af placering af varmekilder	101
	11.6	Delkonklusion	104
12	Dyna	amisk CFD	105

De	Del III Køleeffekt og varmeoverførsel 12		
13	Køleeffekt og kølekapacitetskoefficient	113	
14	Varmestrøm ved konvektion og stråling	117	
Del IV Afslutning			
15	Perspektivering	123	
16	Konklusion	127	
Litteratur		131	
Ι	Appendiks	137	
A	Case 1: Basisopstilling	139	
B	Case 2: Placering af varmekilder i ene hjørne	151	
С	Case 3: Jævnt fordelt varmebelastning	161	
D	Case 4: Placering af ventilationsarmatur	171	
E	Case 5: Høj ventilationsmængde	181	
F	Case 6: Undersøgelse af historik del 1	191	
G	Case 7: Undersøgelse af historik del 2	201	
Н	Case 8: Skæv fordeling af varmekilder	213	
I	Måleudstyr	223	
J	Undersøgelse af forsøgslængde	247	
K	Termisk effekt af varmeafgivelse fra anemometre	251	

L Test af rumforholdene i hotboxen	255
M Varmebalance	273
Bilags-CD	
Kalibrering	
Forsøg Laboratoriet	
Forsøg Visionshuset	
Usikkerhedsberegning	
Tegningsbilag	
Tegning T1 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1	
Tegning T2 - Trækrisiko for Case 1	
Tegning T3 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 2	
Tegning T4 - Trækrisiko for Case 2	
Tegning T5 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 3	
Tegning T6 - Trækrisiko for Case 3	
Tegning T7 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 4	
Tegning T8 - Trækrisiko for Case 4	
Tegning T9 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 5	
Tegning T10 - Trækrisiko for Case 5	
Tegning T11 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7	

Tegning T12 - Trækrisiko for Case 6 og 7

Tegning T13 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 8

Tegning T14 - Trækrisiko for Case 8

Tegning T15 - Temperatur- og hastighedsprofiler for Visionshuset

Tegning T16 - Trækrisiko for Visionshuset

### Indledning

Igennem de sidste årtier har der været stort fokus på at nedbringe Danmarks energiforbrug. Energiforbruget til opvarmning og køling af bygninger udgør mellem 30 og 40 % af det samlede energiforbrug i Danmark, hvorfor der er stor fokus på energirenovering og lavenergibyggeri. [1] Fokusset har medført en stramning af energirammen for nybyggeri, hvilket udfordrer byggebranchen til hele tiden at forny den energitekniske viden og udvikle innovative løsningsforslag. I forbindelse med energieffektivt design af en bygning er det samtidigt vigtigt at sikre et acceptabelt indeklima.

Der er forskellige udfordringer, når en energieffektiv bygning designes, afhængig af, hvad bygningen skal bruges til. For et kontorbyggeri vil der oftest være et kølebehov store dele af året, og kun i korte eller slet ingen perioder vil der være brug for opvarmning. Kølebehovet opstår på grund af de stramme krav i bygningensreglementet til isoleringsevnen kombineret med den store interne belasting fra udstyr og personer samt tendensen til store glasfacader i byggeriet. Den store termiske belastning bevirker, at selv efter en optimering af bygningsdesignet med hensyn til minimering af interne belastninger, som minimering af solindfald samt valg af energieffektivt udstyr og lys er der oftest stadig et kølebehov. [2]

For at opfylde kølebehovet bliver bygningerne oftest kølet via ventilationsluften. Kølingen kan enten ske via naturlig ventilation eller ved at køle den mekaniske ventilationsluft ned. Naturlig ventilation er en yderst energieffektiv måde at køle på, da naturlige drivkræfter benyttes, hvilket dog kan medføre træk og diskomfort for brugerne af rummet ved overvejende stillesiddende arbejde. Ved mekanisk ventilation opretholdes derimod et godt indeklima, men det er ikke en energieffektiv måde at køle på. [2] [3]

I stedet for at dække kølebehovet via ventilationsluften kan den overskydende varme lagres eller fjernes gennem bygningskonstruktionerne. Det gøres enten ved at benytte tunge konstruktioner, som kan akkumulere varmen fra personer og udstyr eller ved at bruge et aktivt kølesystem indbygget i konstruktionerne. Desuden kan termoaktive konstruktioner benyttes, hvilket er en kombination af de førnævnte løsninger.

Termoaktive konstruktioner opbygges ved at indstøbe PEX-slanger til køling eller opvarmning i de indvendige betonkonstruktioner. En illustration af et termoaktivt betondæk kan ses på figur 1.1.



Figur 1.1: Præfabrikeret termoaktivt betondækelement, TermoMax fra Spæncom. [4]

Beton er optimal til brug ved termoaktive konstruktioner, da evnen til at optage og lagre overskydende varme kan benyttes sammen med de indstøbe PEXslanger. Termoaktive konstruktioner udformes oftest som dækelementer, hvor slangerne er placeret i den nederste del af dækket, hvilket gør, at termoaktive konstruktioner er bedst til køling. Oftest benyttes et væskebaseret kølesystem, hvor væsketemperaturen er få grader under rumtemperaturen, hvilket muliggør brugen af frikøling. [5] I Danmark er potentialet for at implementere termoaktive konstruktioner i dansk byggeri blevet undersøgt i et samarbejde mellem COWI, DTU.BYG, Spæncom, Teknologisk institut - Energi og ELFORSK. Projektet er opdelt i tre faser, der omhandler teoretiske forundersøgelser, laboratorieforsøg samt målinger på Middelfart Sparekasse, hvor der er brugt termoaktive konstruktioner.

Gennem undersøgelserne er det blevet klarlagt, at der er et stort potential ved brug af termoaktive betonkonstruktioner. Det vurderes, at kølemetoden giver en elbesparelse til køling på 75-80% samt muliggør et mere fleksibelt elforbrug ved udnyttelsen af betonens varmelagringsevne. Samtidig vurderes det i undersøgelserne, at temperaturfordelingen over dagen bliver mindre svingende, hvor der dog kan forekomme en stor samlet temperaturstigning over dagen. [6]

Termoaktive konstruktioner giver en årlig driftsbesparelse på 125.000 kr. samt en reduktion af de samlede driftsomkostninger på ca. 2 millioner vurderet af Spæncom. Yderligere er der potentiale for lavere etagehøjde på grund af mindre rørdimensioner på ventilationsanlæggene. [6]

Brugen af termoaktive konstruktioner kan medføre akustiske problemer, da overfladen af den termiske konstruktion i en hvis grad skal være blotlagt i rummet for at udnyttes strålingsudvekslingen til resten af rummet. Dette er især et problem, når systemet skal bruges i åbne storrumskontorer, hvor loftet oftest er akustikregulerende. Denne type kontorbyggerier er en af de mest anvendte i Danmark, hvorfor det gør problematikken ekstra relevant i forbindelse med brugen af de termoaktive konstruktioner, der ellers er optimal til køling af kontorbyggeri.

For at løse problemet kan der enten opsættes lydlameller eller anvendes et nedhængt loft bestående af akustiske plader og perforerede plader, således luften kan cirkulere frit, se figur 1.2. Det er i et projekt på DTU.BYG undersøgt, hvordan dækningsgrad af loftet kan have indflydelse på køleevnen. Resultatet viste, at det nedhængte akustiske loft vil nedsætte køleeffekten 70% ved en dækningsgrad på 83%, hvilket betragtes som acceptabelt.[7]



Figur 1.2: Princip af rum med termoaktive konstruktioner samt nedhængt akustisk loft. [8]

Hvilken effekt opsætningen af det nedhængte akustiske loft har på indeklimaet er endnu ikke undersøgt i detaljer, ligesom det ikke er undersøgt, hvorledes det akustiske loftssystem påvirker luftstrømmen i rummet.

### 1.1 Projektvision

Visionen for afgangsprojektet er at analysere og vurdere det termiske indeklima i rummet samtidig med at køleeffekten og forholdet mellem konvektion og stråling for varmeoverførslen mellem det kolde loft og rummet betragtes. Delområderne ønskes undersøgt under hensyntagen til de høje krav til både køleeffekten og det termiske indeklima i kontorbyggeri på grund af den høje belastning i kombination med det lave aktivitetsniveau for personerne i kontoret. For at undersøge det termiske indeklima ønskes strømningsmønstret i rummet og omkring det termoaktive dæk klarlagt, således der specielt kan fokuseres på at undersøge for trækrisiko og kuldenedfald.

En anden vision for projektet er at undesøge, hvad der er styrende for luftstrømningerne i rummet, og dermed hvad der er afgørende for den termiske komfort. Undersøgelsen er vigtig for at undgå gener i termisk komfort.

#### 1.2 Metode

Projektvisionen opfyldes ved at undersøge det termiske indeklima, strømningsmønstret og køleeffekten via målinger i laboratoriet, CFD-simuleringer samt målinger på en nyopført kontorbygning med termoaktive loftkonstruktioner i kombination med et akustisk loft.

I laboratoriet opbygges en model, der skal emulere et storrumskontor med termoaktive konstruktioner og et nedhængt akustisk loft. Her udføres målinger, som skal fastlægge strømningsmønstret og det termiske indeklima for et kontorrum, hvor der udføres variationer af luftmængder, placering af ventilation og varmekilder. En oversigt over de forskellige cases, og hvordan de indgår i rapporten, kan ses på figur 1.3.

For at udbygge undersøgelserne foretaget i laboratoriet, udføres strømningsmekaniske beregninger i simuleringsprogrammet FloVENT. Desuden benyttes simuleringerne til at udvide kendskabet til strømningerne observeret under udvalgte laboratoriemålingerne.

Strømningsmønstret, det termiske indeklima og køleeffekten undersøges ligeledes ved målinger på kontorbyggeriet Visionshuset opført med termoaktive konstruktioner. Målingerne foretaget på lokaliteten sammenlignes med målingerne fra laboratoriet og CFD-simulering for at undersøge om de samme tendenser er gældende for en bygning. Hvordan det tiltænkes at brug målingerne på Visionshuset i rapporten ses skitseret på figur 1.3.

Rapporten inddeles i fire parts, efter indledningen og litteraturstudiet, med *Undersøgelsesgrundlag, Strømningsmønstre og Komfortforhold, Køleeffekt og Varmeoverførsel* samt *Afslutning* med perspektivering og konklusion, se figur 1.3. Sidst i rapporten findes *Appendiks*.



AFSLUTNING

Figur 1.3: Opbygning af rapport.

### Litteraturstudie

I dette kapitel beskrives de erfaringer byggebranchen har opnået indenfor brugen af termoaktive konstruktioner.

Ideen bag termoaktive konstruktioner, TABS, bygger på et behov for en væsentlig reduktion af energiforbruget til køling i kontorbyggeri for at kunne imødekomme de kommende stramninger af bygningsreglementet. Endvidere skal reduktionen ikke ske på bekostning af indeklimaet, som har afgørende betydning for brugernes komfort og produktivitet. Derfor har COWI, DTU.BYG, Spæncom, Teknologisk Institut - Energi og ELFORSK lavet en undersøgelse i forhold til implementering af termoaktive konstuktioner i den danske byggebranche.

### 2.1 Virkemåde for termoaktive konstruktioner

Termoaktive konstruktioner udnytter betonens varmeakkumulerende evne til at udjævne rumtemperaturen ved at optage og afgive varme, hvilket fungerer ved at implementere et kølesystem i selve konstruktionen. I betonelementerne er der indstøbt plastrør, hvor kølevandet kan cirkulere, hvor temperaturen på vandet er et par grader fra den ønskede rumtemperatur. Bygningen nedkøles med kølevand uden brug af andet end en cirkulationspumpe, hvor vandet dermed i løbet af en nat kan fjerne den lagrede varme, som betonelementerne har oplagret i løbet af dagen, hvorved der køles dynamisk. Det betyder endvidere, at tilførelse af køle- og varmeenergien kan tidsforskydes i forhold til behovet i rummet, og at energien kan tilføres med mindre effekt over en længere periode. Desuden kan termoaktive konstruktioner benyttes til rumopvarmning, hvor vandtemperaturen ligeledes ligger tæt på rumtemperaturen. [9] [10]

Ved at anvende en høj medietemperatur er kølemetoden optimal i en kombination med alternative energikilder, såsom udeluft til frikøling, grund- og havvand samt varmepumper med evt. lagring i jorden. Princippet for systemet kan ses på figur 2.1. [9] [10]



Figur 2.1: Termoaktive konstruktioners virkemåde samt køleforsyningsalternativer. [10]

Naturlig ventilation kan anvendes til køling om natten, hvor kølemetoden kan bruges som et supplement. Brugen af termoaktive konstruktioner kan endvidere bevirke, at traditionelle mekaniske køleanlæg kører mere effektivt eller helt undlades.

Endvidere har termoaktive konstruktioner indeklimamæssige fordele, da der opnås en stabil rumtemperatur over dagen. Problemer med støj, træk og mikroorganismer, som kan forekomme ved brug af mekanisk ventilationsanlæg, undgås, da varmen fra bruger og udstyr fjernes lydløst gennem de indstøbte PEX-rør i elementerne. [10]

Kølingen ved termoaktive konstruktioner sker ved stråling og naturlig konvektion. Strålingen sker mellem den kolde flade på loftet og de øvrige varmere flader i rummet, og den naturlig konvektion forekommer, da der er en forskel i densiteten mellem den tungere kolde loft og den lettere varme luft i rummet. På figur 2.2 ses princippet for kølingen ved brug af termoaktive konstruktioner. [11]



*Figur 2.2: Princippet for køling ved brug af termoaktive konstruktioner.* [11]

### 2.2 Erfaring med termoaktive konstruktioner

Erfaringerne med brugen af termoaktive i udlandet og Danmark er rigtig gode, hvor PEX-slangerne er in-situstøbt i loftkonstruktionerne. I danske byggetraditioner er dækelementer dog hovedsageligt præfabrikeret, hvorfor det i danske undersøgelser er undersøgt om samme gode resultater kan opnås for præfabrikerede dækelementer. Undersøgelsen blev startet ved et samarbejde mellem COWI, Teknologisk institut - Energi og DTU.BYG finanseret af Energistyrelsens EFP-program, *J.nr.1213/01-0020* i 2001, hvor projektet er inddelt i tre faser. Det blev undersøgt om termoaktive konstruktioner kan bidrage til et acceptabelt indeklima i moderne kontorbyggeri samt bidrage til lastudjævning. Desuden ønskes det undersøgt om nedhængte lofter påvirker køleeffekten fra dækelementet. Her blev potentialet af termoaktive konstruktioner fastlagt i første fase ved teoretiske beregninger, hvorefter der i anden fase blev evalueret på laboratorieforsøg udført på DTU, og til sidst blev der udført feltmålinger på Middelfart Sparekasses nye hovedkvarter. I laboratoriet på DTU blev der opbygget en forsøgsopstilling, hvor der blev udført forskellige undersøgelser i forhold til køleeffekten ved stationære og dynamiske drift, køleeffekten ved brug af nedhængte akustiske lofter, hvor komforten og energiforbrug undersøges. I Middelfart Sparekasses bygning blev der installeret 1100 m<sup>2</sup> præfabrikerede termoaktive betondækelementer, der er anvendt som kølesystem i bygningen. Systemet består af 1-sidet PEX-rørsystem placeret i undersiden, hvor fladen vender mod det underliggende rum. Her undersøges komfortforhold samt køleeffekten. [4] [10]

Igennem projektet blev det vurderet, at ved at indstøbe slangerne i betondækkene udnyttes bygningens termiske masse til fulde, hvilket giver en lastudjævnende virkning i bygningen samtidig med, at det store indvendige overfaldeareal af bygningen udnyttes. På figur 2.3 ses en illustration af, hvordan den lastudjævnende effekt forløber i forhold til udetemperaturen og et system med lav termisk masse, hvilket er i overensstemmelse med de målte observationer i



Figur 2.3: Illustration af den lastudjævnende effekt ved brug af konstruktioner med høj termisk masse. [10]

projektet. Det ses, at der ikke forekommer store temperatursvingninger i løbet af dagen, hvor den maksimale temperatur målt i løbet af dagen forskydes til senere på dagen. Endvidere følger indetemperaturen ikke svingningerne for udetemperaturen. Dette vil have en positiv indflydelse på den termiske komfort.

Yderligere viste projektet, at fremløbstemperaturen i dækkene kan ligge på 18 til 20°C, hvilket er højere end for normale systemer til køling, hvor fremløbstemperaturen ligger på 6-12°C, hvorfor det er muligt at anvende højtemperaturkøling. Hvis systemet bruges til opvarmning virker det som et lavtemperatursystem, hvor fremløbstemperaturen er mellem 23 og 30°C. [9]

Forsøgene udført af DTU viste, at der for de termoaktive dæk kunne opnås en samlet kølekapacitetskoefficient på over 6  $W_{m^2 K}$ , hvilket svarer til en maksimal køleeffekt på omkring 60  $W_{m^2}$  ved en fremløbstemperatur på kølevæsken på 15°C og en rumtemperatur på 25°C, hvilket betyder, at de er anvendelige i kontorbyggerier, hvor køleeffekt ligger maksimalt omkring 30  $W_{m^2}$ . Systemet vil dog ikke være effektivt, hvor den interne varmebelastning varierer hurtigt, da systemet har en langsom reaktionstid på grund af den store termiske masse. Hvilket vil sige, at ved uforudsigelige belastningssituationer vil et kølesystem, som dette ikke være brugbart. [4] [12] [9]

Ifølge analyserne udført i projektet er indeklimaet bedre, hvor termoaktive konstruktioner er anvendt end ved brug af konventionelle kølesystemer. Dog stiger temperaturen i løbet af arbejdsdagen ved brugen af termoaktive konstruktioner, således der er køligt om morgenen, mens der bliver varmere i løbet af dagen.

Ved en vurdering af energiforbruget i projektet viste det, at størstedelen af det samlede energiforbrug bruges til opvarmning og køling. 92% af kølingen foregår gennem de termoaktive dækelementer, mens resten sker via. kølefladen i ventilationsanlægget. [10]

Udover at sikre et energieffektivt kølesystem og et godt indeklima er der også potentiale for en god anlægs- og driftsøkonomi. Ved anlægsøkonomien kan der indsættes et mindre ventilationssystem med mindre kanaldimensioner samt undlade de konventionelle opvarmningssystemer. Besparelserne på anlægsudgifterne til køle- og opvarmningssystemerne har vist sig at være store i forhold til ekstraudgiften ved brugen af de termoaktive konstruktioner i stedet for konventionelle betonelementer. Ses der på driftsøkonomien er det især den lastudjævnende effekt, som gør, at peakbelastninger undgås kombineret med den lave fremløbstemperatur gør systemet økonomisk fordelagtigt. Besparelserne på energiforbruget til køling kan reduceres med op til 85%, mens det på opvarmning kan reduceres op til 30%. [13]

### 2.3 Termoaktive konstruktioner i kombination med nedhængt loft

I kontorbyggerier er akustiskregulering en nødvendighed, hvorfor der oftest anvendes nedhængte akustiske lofter, da gulv- og vægareal kan være svære at udnytte i tilstrækkelig grad. I forbindelse med fase 2 af EFP-projektet blev et nedhængt akustisk lofts påvirkning på køleeffekten undersøgt af DTU. De anvendte en loftopsætning bestående af en hjørneabsorbent langs væggen og to nedhængte flåder placeret i midten af rummet, således at der kan passere luft over det nedhængte loft. [10] [9]

Undersøgelserne viste, at kun  $\frac{1}{3}$  af køleeffekten mistes ved at anvende et nedhængt loft med en dækningsgrad på 67-83%, hvilket kan kompenseres ved at justere kølevandstemperaturen med ca. 2,5°C.

Det betyder, at det er muligt at bruge et nedhængt loft samtidig med en acceptabel køleeffekten bibeholdes, dog skal rumluften frit kunne passere hulrummet over loftet og tilbage i rummet. Endvidere vurderes det, at være bedste at have en høj eksponeringsgrad af dækket for at udnyttes mest muligt af strålingen fra dækket. På figur 2.4 ses kølekapacitetskoefficienten som funktion af dækningsgraden, hvor det ses, at denne ligger mellem 4-5  $W/m^2 K$  ved brug af det nedhængte loft med en dækningsgrad på op til 90%, mens den ved 100% tildækning er faldet til 2,5  $W/m^2 K$ . [10] [9] [7]

Ved undersøgelserne udført på Middelfart Sparekasses hovedkvarter viste det, at dækkene med det nedhængte loft kunne køle 42-48  $W/m^2$  ved en rumtemperatur på 24°C og en væsketemperatur på 18°C. [4] [12] [10]

Endvidere er der taget termografibilleder af det termoaktive dækelement undersøgt af DTU, hvor PEX-slangerne kan ses i form af den mørkere farve, hvilket kan ses på figur 2.5. Det er testet, at forholdene er gældende for forsøgsopstillingen med og uden nedhængte flåder. På figur 2.5 ses et billede af den nedhængte flåde og hjørneabsorbenten, hvor det ses en lille temperaturforskel i forhold til billedet uden lydabsorberende plader.

Der er umiddelbart ingen krav til overfladetemperaturen på loftfladen, men i praksis er overfladetemperaturen begrænset af, at temperaturen ikke må komme under dugpunktstemperaturen, da kondensdannelse kan forekomme. For forsøgene udført af DTU blev overfladetemperaturene målt på vægge, loft og gulv med og uden brug af nedhængte akustiske loft. På figur 2.6 ses de målte overfladetemperaturer, hvor rumtemperaturen er 25°C, og temperaturen på kølevæsken er 16°C. Det ses, at overfladetemperaturen på loftet er ca. 20,5°C, mens gulvtemperaturen er ca. 22°C. Endvidere havde det nedhængte loft ingen indflydelse på overfladetemperaturen på dækelementet.



*Figur 2.4:* Kølekapacitetskoefficient som funktion af dækningsgraden. [7]



Figur 2.5: Termografibilleder af dækelementerflade samt det nedhængte loft og hjørneabsorbent.



Figur 2.6: Målte overfladetemperatur under forsøgene på DTU. [9]

### Del I Undersøgelsesgrundlag

- Visionshuset
- Laboratorieopstillingen
- CFD-model
- Procedure for resultatbehandling





### Visionshuset

I dette kapitel findes en kort beskrivelse af, hvordan Visionshuset bruges i projektet. I den forbindelse er der en kort beskrivelse af bygningen og bygningsautomatikken samt en beskrivelse af målingeproceduren og opsætning af måleudstyr på lokaliteten.

I Visionshuset er der benyttet termoaktive dæk til køling af bygningen. Laboratoriemodellen og CFD-simuleringerne tager udgangspunkt i en simplificeret udgave af bygningsdesignet i Visionshuset.

Der udføres målinger på en udvalgt del af Visionshuset. Formålet med målingerne er at undersøge det termiske indeklima og strømningsmønster i et rum med termoaktive dæk. Målingerne vil blive sammenlignet med tendenserne observeret i CFD-simuleringerne og målingerne i laboratoriet for at se, om der forekommer en overensstemmelse. Yderligere beregnes kølekapacitetskoefficienten som sammenlignes med kølekapacitetskoefficienten beregnede ud fra laboratorieforsøgene og kølekapacitetskoefficienten fra tidligere undersøgelser fra DTU.

Målingerne i Visionshuset omfatter detaljeret undersøgelser af strømningsmønstret og indeklimaforholdene samt undersøgelse af om strømningsmønstret ændres under variation af lastplaceringen.

### 3.1 Bygningsbeskrivelse

Visionshuset er et kontordomicil opført med termoaktive dæk på Eternitgrunden i Aalborg i 2012, se figur 3.1, 3.2 og 3.3.



Figur 3.1: Placering af Visionshuset [14] [15].



Figur 3.2: Rendering af Visionshuset [16].

Figur 3.3: Billede af Visionshuset [17].

Bygningen er tegnet af KPF Arkitekter A/S, bygherren og totalentreprenøren er Søren Enggaard A/S, mens de rådgivende ingeniører på projektet var COWI A/S. Søren Enggaard A/S har efterfølgende solgt bygningen til den nuværende ejer C.W. Obel Ejendomme A/S. [14] [18]

Bygningen lejes ud til COWI A/S, KPF Arkitekter A/S, BDO, Topdanmark A/S, Fitness World og SAXOTECH, hvor COWI A/S er den største lejer med ca 5000 m<sup>2</sup> af de i alt 12.198 m<sup>2</sup>. [17].

Bygningens 12.198 m<sup>2</sup> er i fordelt på fem etager. Der er i forbindelse med projektet givet tilladelse til at måle i COWI's del af bygningen, hvorfor der i det efterfølgende vil blive fokuseret på denne del af bygningen. Der findes i denne del af bygningen primært åbne kontorrum samt aflukkede mødelokaler. For at få nogle målinger, som med acceptable forudsætninger kan genskabes i laboratoriet er det valgt at måle på et mødelokale placeret på 1. sal med vinduer mod øst, se figur 3.4, hvor COWI's del af Visionshuset ses med en rød markering af mødelokalet.



Figur 3.4: Grundplan af Visionshuset, 1. sal. Målingerne foretages i mødelokalet markeret med rødt. [18]



Figur 3.5: Grundplan af mødelokale 1. sal. [18]

Den bærende del af bygningen er opbygget af betonelementer, hvor huldækelementerne også indgår som en del af kølesystemet. Facaden er opbygget af tunge sandwichelementer med 200 mm mineraluld samt Velfac vinduer. Hovedteknikrummet er placeret i kælderen, hvor alle installationer føres via hovedskakte videre rundt i bygningen. På hver enkel etage er installationerne ført over et nedhængt loft i gangarealet i midten af bygningen.

En grundplan for mødelokalet kan ses på figur 3.5. Her kan opbygningen af de forskellige konstruktioner ses. Der er et oplukkeligt vindue mod sydvest samt et ikke oplukkeligt trekantformet vinduesparti mod øst.

Rummet opvarmes i opvarmningssæsonen af en radiator opstillet under det oplukkelige vindue mod sydvest.

Når der er et kølebehov i bygningen kan det dækkes af enten ventilationsluften eller af de termoaktive dæk i bygningen. Valg af kølemetode reguleres efter årstid, vejrforhold, brugstid og rumforhold, således den mest energieffektive løsning der giver et acceptabelt indeklima, benyttes. Dog er der visse opstartsproblemer med styringsstrategierne for kølemetoden.

Da mødelokalet er placeret for enden af bygningen er hele loftet ikke konstrueret med kølelofter, da enkelte af dækelementerne er specialudformet. Køleslangerne kan ses på figur 3.6. Kølevæsken i dækkene er nedkølet ved grundvandskøling. I tabel 3.1 ses hvor stor en del af loft , som er dækket af hhv. ventilationsarmaturer, akustiske plader, lysarmaturer og perforerede plader. Desuden er den samlede dækningsgrad vist.

Loft	100%
Ventilationsarmatur	4,2%
Akustiske plader	63,2%
Lysarmatur	6,3%
Perforerede plader	26,3%
Samlet dækningsgrad	85%

I rummet er der placeret to udsugningsarmaturer og to indblæsningsarmaturer. Alle armaturerne er af typen RS14 med type H trykfordelingsboks.

Tabel 3.1: Loftsopbygning for loftet i mødelokalet.



*Figur 3.6: Plantegninger af mødelokalet med loftsplan og placering af køleslanger.* 

For at skjule installationerne og sikre et godt akustisk indeklima er der opsat et nedhængt loftsystem af typen Rockfon Tropic A24. Loftet er udført med akustikplader, lysarmaturer, ventilationsarmaturer samt perforerede stålplader. De perforerede stålpladerne sikrer, at der opretholdes luftcirkulation til køledækkene. En loftsplan kan ses på figur 3.6.

I forsøgsperioden udføres der samtidig forsøg til et andet afgangsprojekt omhandlende styringsstrategier i bygninger med termoaktive dæk. Derfor er styringsstrategien i forsøgsperioden ikke som normalt. Dækkene er i måleperioden kun aktiveret mellem kl. 6.00 - 19.00, og når rumtemperaturen er over 23°C. Under de udførte forsøg kørte ventilationssystemet med en konstant luftmængde samt en konstant indblæsningstemperatur på 22°C. En mere uddybende forklaring af styringsstrategien kan læses i projektet Analyse af styringsstrategier ved anvendelse af termoaktive dækelementer [19].

### 3.2 Måleprocedure

For at undersøge de generelle forhold i rummet under måleperioden laves der temperaturmålinger samt målinger af solstrålingen, tilført effekt fra lys, ventilation og køledækket. Opstillingen af måleudstyret kan ses på figur 3.7 og 3.8. For en mere detaljeret beskrivelse af måleudstyr og nøjagtighed af målingerne henvises til appendiks I - *Termoelementer*.

For generelt at fastlægge temperaturen i forskellige højder i rummet opsættes en søjle til måling af temperaturgradienten med forsølvede termoelementer placeret i forsølvede rør i højderne 0,1, 0,6, 1,1, 1,7, 2,0, 2,3, 2,6 og 2,88, se figur 3.7 (a). De målte temperaturer benyttes til at bestemme den vertikale temperaturforskel ved at måle lufttemperaturen i hoved-, hofte- og ankelhøjde for henholdsvis stående og siddende personer ud fra kravene i *DS 474* og *DS/EN ISO 7726*. [20] [21]

Den operative temperatur måles som beskrevet i appendiks I.2 - *Termoelementer* og kan ses på figur 3.7 (b). Føleren er placeret på den faste målesøjle i højden 1,15 m.

Overfladetemperaturen måles på betondækket, ydervæg, intern væg, gulve, samt overside og underside af det nedhængte loft med termoelementer. Placeringen kan ses på figur 3.7 og 3.8. Yderligere indsættes der generelle målepunker af temperaturen mellem det nedhængte akustiske loft og betondækket samt i rummet. Her benyttes Eltek måleudstyr og et enkelt termoelement placeret mellem det nedhængte loft og betondækket.

Ventilationsmængden og temperaturen for indblæsningen og udsugningen måles med henholdsvis trykdifferens måler fra Eltek og termoelementer. Den målte trykdifferens omregnes til en ventilationsmængde ud fra det tilhørende datablad til armaturerne. Endvidere måles solindfaldet med et pyranometer placeret udenfor det sydvest-vendt vindue samt et pyranometer placeret på taget af universitet omkring 1,5 km væk. Der er monteret en energimåler på lysarmaturet og en energimåler på køledækket. Billeder og placering af måleudstyret kan ses på figur 3.7 og 3.8.


Figur 3.7: Placering af måleudstyr i mødelokalet, gulvplan.

23



*Figur 3.8: Placering af måleudstyr over det nedhængte loft i møde-lokalet.* 

For at få et komplet overblik over udeforholdene monteres der yderligere en Eltek temperatur og fugtighedssensor på altanen på anden sal i bygningen. For at kortlægge strømningsmønstret i rummet udføres der først røgforsøg i lokalet. Røgforsøget udføres med røgampuller, hvorved røgen tilføres steder, hvor strømningen ønskes undersøgt. Røgen tilføres primært ved de perforerede plader for at se retningen af strømningen her.

#### 3.2.1 Målinger af strømningsmønster og komfortforhold

Målingerne udføres for at vurdere den termiske komfort i rummet og kortlægge strømningsmønstret ved normal brug af lokalet. Målingerne udførtes tirsdag d. 21/5-2013, hvor der betragtes på en situation med seks personer til møde i lokalet. Da forsøgene forstyrrer den normale arbejdsgang erstattes personerne i mødelokalet med mini-manikiner, der afgiver samme effekt som en person.

Strømningsmønstret undersøges ud fra røgforsøg, som er beskevet ovenfor.



*Figur 3.9: Placering af flytbare søjler til måling af hastighed og temperaturfordeling i mødelokalet.* 

For at undersøge den termiske komfort udføres en detaljerede hastighedsog temperaturmålinger. Målinger udføres med tre flytbare søjler, hvorpå der er placeret hastigheds- og temperaturmåleudstyr. Lufthastigheden måles ved hjælp af anemometre, hvorved der er placeret termoelementer til måling af temperatur. De målte lufthastigheder og temperaturer vil blive benyttet til at bestemme hastigheds- og temperaturfordelingen gennem rummet, hvorved det kan vurderes om der er problemer med træk. Der udvælges 15 steder til måling af temperatur og hastighedsprofiler i rummet. De 15 steder er fordelt i den primære opholdszonen og i eventuelle problematiske områder observeret ved røgforsøgene. De 13 placeringer undersøges ved fire forsøg med en varighed på 10 minutter, beregnet ud fra en stabiliserende middelværdi undersøgt i afsnit J - *Undersøgelse af forsøgslængde*. De sidste tre placeringer bliver undersøgt over en periode på 30 minutter for samtidig at undersøge variationen over tid. Placeringen kan ses på figur 3.9.

# 3.3 Ændring af strømningsmønstret

Til at vurdere om strømningsmønstret ændres under ændring af forholdene i rummet udføres fire forsøg med variation af varmebelastningen og placering af varmebelastningen d. 24/5. For at fremprovokere en ændring flyttes minimanikinerne til forskellige placeringer i rummet samtidig med at solindfaldet varierer i løbet af dagen. Placeringen af varmekilderne og det dominerende solindfald kan ses på figur 3.10.



*Figur 3.10: Placering af varmekilder under forsøgene d. 24/5 i Visionshuset.* 

Målingen udføres med samme setup som ovenfor beskrevet ovenfor. De flytbare søjler placeres i hver sit hjørne under de perforerede stålplader som vist på figur 3.7 med søjlerne markeret med A, B, og C.

# Laboratorieopstilling

I dette kapitel beskrives forsøgsopstillingen til forsøgene udført i laboratoriet. Herunder beskrives opbygningen af hotboxen, hvor forsøgene udføres, opstillingen af måleudstyr samt måleproceduren.

I laboratoriet opbygges en model der skal emulere et typisk kontormiljø. Der tages udgangspunkt i COWI's mødelokale i det nyopførte Visionshus beskrevet i afsnit 3 - *Visionshuset*. Formålet med modellen er, under kontrollerede forhold, at undersøge luftstrømningerne, det termiske indeklima og kølekapacitetskoefficienten i rummet. Endvidere undersøges, hvilke parametre der har indvirkning på luftstrømningerne og det termiske indeklima. Forsøgene udføres under stationære forhold.

# 4.1 Opbygning af laboratoriemodel

Modellen i laboratoriet er opbygget, som en boks inddelt i 4 zoner, hvor den midterste zone repræsenterer kontoret. Rummet i midten af boksen har en bredde på 3,6 m, en længde på 5,2 m og en samlede højde på 3 m. Laboratoriemodellen opbygges, således at varmetransporten sker gennem loftet, mens der ikke sker en varmetransport gennem gulvet, hvilket er tilfældet ved brug af termoaktive dæk som etageadskillelser. På figur 4.1 ses et tværsnit af boksen med dimensioner og opdelingen af zoner. Desuden kan placeringen af ventilationsanlæggene og deres tilslutning til hver zone ses.



Figur 4.1: Opdeling af zoner i hotboxen.

Zone 1 kaldes også udezonen, hvor det er muligt at simulere udeklimaet. Denne zone er designet med hjul, så den kan flyttes frem og tilbage, hvilket gør det muligt at åbne og lukke ind til zone 2 og 3. I zone 1 er der placeret to ventilationsanlæg, hvor det ene tilfører varme og cirkulation i selve zone 1. Det andet er tilsluttet zone 3, hver det fungerer som ordinært ventilationsanlæg. På figur 4.1 ses det desuden, at kølefladen er placeret separat fra ventilationsanlægget tilhørende zone 1. Ventilationsanlægget hørende til zone 1 er tilsluttet en selvstændig kølekompresser, som tilfører kølevand til anlægget. Ventilationsanlæggene hørende til zone 2, 3 og 4 er tilsluttet en anden kølekompresser.

Zone 2 emulerer et termoaktivt loft, hvor et kammer er opbygget med en højde på 0,6 m. Kammeret emulerer et termoaktivt betondæk ved sikre en overfladetemperatur på undersiden af det kolde loft, som kan tilføre den nødvendige køling til rummet. Denne opstilling gør det muligt at regulere overfladetemperaturen hurtigere end ved brug af termoaktive dæk. En jævn rumtemperatur i kammeret opnås ved at skabe høj cirkulation i kamret via et ventilationsanlæg, mens en konstant køleeffekt leveres af to separate køleflader. I ventilationsanlægget er der desuden placeret en varmeflade, hvor lufttemperaturen i zonen reguleres.

Zone 3 består af selve kontoret, hvor et nedhængt akustisk loftsystem er opbygget i en højde på 2,5 m, således der er en højde på 0,5 m mellem det nedhængte loft og det kolde loft. Loftsystemet består af et standard skinnesystem med akustiske plader i dimensionerne  $600 \times 600 \times 15$  mm med synlige skinner fra ROCKFON med produktnavnet Tropic [22]. Nogle af de akustiske plader er udskiftet med perforerede plader, som luften frit kan passere gennem. De perforerede plader er lavet af 6 mm opskummet PVC plader med huller af en diameter på 50 mm placeret med en center-til-center afstand på 60 mm. Pladerne er fra producenten VINK A/S med produktnavnet VIKUPOR L hvid 6 mm [23]. På den ene side af pladerne er der påklistret alufilm for at undgå, at pladerne absorberer stråling fra det kolde loft. På figur 4.2 ses begge sider af de anvendte perforerede plader. Antallet af perforerede plader og placeringen af dem er bestem ud fra loftsopbygningen i mødelokalet ved COWI, hvor der er en dækningsgrad på 85%. Den valgte loftsopbygning i hotboxen kan ses på figur 4.3.



*Figur 4.2:* De opsatte perforerede plader set fra begge sider. Højre: overside. Venstre: underside

Som en del af loftsystemet er endvidere indsat ét indblæsningsarmatur og ét udsugningsarmatur af typen Visio RS14 fra Lindab, hvilket er samme type armatur som anvendt i mødelokalet hos COWI. Armaturerne er tilsluttet ventilationsanlægget placeret i zone 1.

Zone 4 kaldes også guarded zone, og har til formål at minimere påvirkninger fra temperatursvingninger i laboratoriet. Zonen dækker tre vægge og gulvet i zone 3 samt tre sider og den øverste del af kammeret i zone 2. Luften i zone 4 tilføres gennem et specielt designet kammer med en højde på 350 mm og en bredde på 600 mm, hvorfra luften føres gennem zonen og ud gennem et tilsvarende kammer placeret på toppen af boksen. [24]

Zone 2 og 3 er adskilt fra zone 4 med 25 mm ekspanderet polystyren for at minimere risikoen for ukontrollerede varmetab eller varmetilførsel. Zone 2 og 3 er adskilt fra zone 1 med 100 mm ekspanderet polystyren. Zone 4 er endvidere isoleret i forhold til det omkringliggende laboratorium med 150 mm ekspanderet polystyren. Ventilationsrørene ud til selv laboratoriet er isoleret med 50 mm stenuld. Det er ligeledes sikret, at alle zoner er lufttætte, så der ikke forekommer ukontrollerede luftudveksling mellem zonerne. [24]

Til at kontrollere temperaturen i hver zone benyttes et specialdesignet Lab-VIEW program, som samarbejder med Compact RIO system fra National Instruments [24]. Temperaturen styres via køle- og varmefladerne i forbindelsen med ventilationsanlæggene i zonerne. Hvert ventilationsanlæg styres efter to PT-100 føler, som hver måler en temperatur, hvorefter et gennemsnit af de to målte temperaturer bruges til at regulere varmefladerne i anlæggene. PT-100 følerne er placeret forskelligt i zonerne, så anlæggene styres efter forskellige temperaturer. For ventilationsanlæggene hørende til zone 1 og 2 er følerne placeret midt i zonerne, så der styres efter den gennemsnitlige temperatur i zonen. For zone 4 er de to sensorer placeret i henholdsvis indblæsningskamret og udsugningskamret, således der reguleres efter en middelværdi af disse. For ventilationsanlægget hørende til zone 3 er følerne placeret i indblæsningskanalen lige inden røret føres ind i zone 1, så anlægget styres efter den ønskede indblæsningstemperatur. I programmet bestemmes et temperaturprofil for hver zone, som det ønskes, at ventilationsanlæggene styres efter. Ventilationsanlæggene styres efter en PI-controller, som justerer energien brugt til varmefladen i hver zone. Således holdes den tilførte kølemængde konstant ved at justere åbningsgraden af ventilerne. Endvidere kan ventilationsmængden styres i programmet.

# 4.2 Placering af måleudstyr

I det opbyggede mødelokale måles overfladetemperaturer, lufttemperaturer og operativ temperatur, hvilket benyttes til at evaluere det termiske indeklima og rumforholdene. Temperaturmålingerne logges på en Helios datalogger med et interval på 10 sec. Nærmere beskrivelse af det brugte måleudstyr kan ses i appendiks I - *Måleudstyr* 



*Figur 4.3:* Placering af tynde termoelementer til måling af overfladetemperatur. Alle mål er i mm.

Overfladetemperaturerne måles 12 steder på undersiden af køleloftet mellem zone 3 og 2 for at undersøge temperaturfordeling på undersiden af det kolde loft. Endvidere måles overfladetemperaturen på gulvet, væggene og seks steder på det nedhængte akustiske loft på hhv. over- og undersiden af pladerne eller de perforerede plader i zone 3. Placeringen af termoelementerne til måling af overfladetemperaturer kan ses på figur 4.3. Overfladetemperaturen måles med tynde type K termoelementer, hvor kontakten mellem overfladen og termoelementet sikres ved brug af termopasta.

Lufttemperaturen måles midt i zone 3 i ni forskellige højder for at undersøge temperaturgradienten i rummet. Lufttemperaturmålingerne udføres med type K termoelementer. Det er valgt at måle i højderne 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m, 1,7 m jvf. *DS/EN ISO 7726* samt 2,0 m, 2,1 m, 2,2 m, 2,3 m, 2,4 m og 2,5 m, da det ønskes at undersøge temperaturgradienten lige under det nedhængte loft [21]. På søjlen til måling af temperaturgradienten måles den operativ temperatur i en højde på 1,1 m. På figur 4.4 (d) ses søjlen til måling af temperaturgradienten.

For at kende rumtemperaturen i de omgivende zoner måles lufttemperaturen ét sted i zone 1 og fire steder i zone 2, mens temperaturen for zone 4 måles i kammeret til indblæsning og udsugning. Indblæsnings- og udsugningstemperaturen måles for zone 3 både i kanalen ved indgangen til zone 3 og i selve armaturet. Endvidere måles lufttemperaturen i laboratoriet.

Ventilationsmængden, som tilføres rummet, måles ved hjælp af et Debro micromanometer, som er tilsluttet en måleblænde af typen EHBA 010-1-A placeret i forbindelse med indblæsningskanalen se figur 4.4 (b).

Typen af varmebelastningen i rummet varieres for de enkelte forsøg. Der benyttes enten varmekabler ligeligt fordelt på gulvet eller punktvarmekilder i form af mini-manikiner. Punktvarmekilderne kan ses på figur 4.4 (a), og de røde varmekabler på gulvet kan ses på flere af billederne på figur 4.4. Varmekilderne styres ved brugen af en variotransformer og et digitalt voltmeter, så det er muligt at regulere den ønskede belastning i rummet. For at undersøge luftstrømningerne og evaluere indeklimaet i rummet opstilles tre flytbare søjler, hvor der monteres anemometre til måling af lufthastigheden samt termoelementer til måling af temperaturen i samme punkt. Som det ses på figur 4.4 (e) er termoelementerne placeret i en afstand af 6 cm fra anemometret, hvor varmeafgivelsen fra anemometrene er negligibeal. Afstanden er fundet ud fra målinger af effekten af varmeafgivelsen fra anemometre, som kan ses i appendiks K - Termisk effekt af varmeafgivelse fra anemometre. Anemometerne måler i højderne 0,1 m, 1,1 m, 1,7 m, 2,1 m og 2,4 m. Mens temperaturen måles i højderne 0,1 m, 0,6 m, 1,1 m, 1,7 m, 2,1 m og 2,4 m. Hastigheden måles hver sekund, og for hver 30 sekund beregnes en middelværdi som logges.



Figur 4.4: Billeder af forsøgsopstilling.

Da målingerne med anemometerne måler farten og ikke retningen af luftstrømningen udføres der også forsøg med et laser doppler anemometer for at tjekket om den observerede strømningsretning stemmeroverens med observationerne fundet ved røgforsøgene. Laser doppler anemometret placeres 3 cm under den perforerede plade på samme position som søjle C under alle forsøgene. Ved måling med laser doppler anemometret er det nødvendigt at tilføre røg til rummet, da laser doppler anemometret måler hastigheden af de forbipasserende partikler i skæring mellem to laserstråler. Røgen tilføres med røgkanonen, der også benyttes under målingerne af strømningsmønstrene.

## 4.3 Måleprocedure

For at undersøge luftstrømningerne, det termiske indeklima og køleeffekten ved brug af et termoaktivt loft i kombination med et nedhængt akustisk loft udføres tre forskellige typer forsøg for hver måleopstilling. Der udføres røg-forsøg, fem korte målinger samt en langtidsmåling.

Alle målingerne udføres under stationære forhold. Der udføres målinger på otte cases, hvor effekten af placering af ventilation, ventilationsmængden samt placering og type af varmekilder undersøges. Case 1 er en basiscase, som de andre forsøg tager udgangspunkt i, hvor der hovedsageligt ændres en ting i hver case i forhold til Case 1. Placering af varmekilder og ventilation samt ventilationsmængder for hver case kan ses på figur 4.6, mens datoerne og rækkefølgen af forsøgene kan ses indtegnet på figur 4.5.



Figur 4.5: Datoer for forsøgsudførelsen.



*Figur 4.6:* Placering, effekt of type varmekilde samt ventilationsretning og -mængde for hver case.

Varmetilførslen er sat til 930 W eller 49,7  $^{W}/_{m^{2}}$ , hvilket svarer til den maksimale køleeffekt af et termoaktivt loft benyttes i et kontorbyggeri [4].

Endvidere er forsøgene udført med ventilation i rummet med en ventilationsmængde fastsat til 12,5  $\frac{1}{s}$  ud fra *DS/EN 15251* for et åbent kontorlandskab med en personbelastning på  $\frac{1}{15}$  <sup>pers</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>, hvor hver person medfører en ventilationsmængde på 10  $\frac{1}{s}$ . For Case 5 med høj ventilationsmængde er personbelastningen valgt for et mødelokale. [25]

#### 4.3.1 Røgforsøg

Ved røgforsøgene tilføres røgen udvalgte steder for at undersøge luftstrømningen ved det pågældende sted. Stederne, der ønskes undersøgt, er forskellige fra case til case, hvorfor beskrivelsen af placeringen er at finde under hver enkelt forsøgsbeskrivelse i appendiks. Det er vigtigt, at røgen tilføres med en så lav hastighed, at det ikke påvirker den naturlig strømningen i rummet. Dette gøres ved at placere røgkanonen i en kasse med et tilslutningsrør i hver ende, se figur 4.4 (f). Den ene ende påsættes et flexrør, der føres hen til det udvalgte sted, mens den anden ende af kassen tilsluttes et trykluftsudtag med en trykudligningsventil, således de små luftmænger, der tilføres, kan kontrolleres.

For at kunne kortlægge strømningen er det yderligere nødvendigt med stærk lys, hvorfor der er placeret to 12 W LED spot til belysning, hvor strømningen ønskes undersøgt. Desuden opsættes et sort lærred på væggen for bedre at kunne se røgen, se figur 4.4 (c).

Ud over røgforsøget med røgkanonen udføres supplerende forsøg med røgampuller. Med røgampullerne er det let at tilføre en lille mængde røg til udvalgte steder, hvorfor de bruges til at understøtte observationerne lavet ved forsøgene med røgkanonen samt undersøge områder udenfor det primære strømningmønster.

Under røgforsøgene måles rumforholdene, hvor de flytbare søjler er placeret som under langtidsmålingerne, se afsnit 4.3.3 - *Langtidsmålinger*, og figur 4.7 hvor søjlerne er markeret med AL, BL og CL.

Ved udførelsen af røgforsøgene er varmebelastningen nedjusteret, da to personer opholder sig i rummet til observation af røgfordelingen. Det forudsættes, at hver person har en varmeafgivelse fra fri varme på 120 W fastsat ud fra en middel aktivitet på 2 met [26]. Der ses bort fra den bundne varme.

Ved målinger er det fastlagt, at røgkanonen i perioder på 1 minut hver 25 minut har en effekt på 1500 W. Disse er ikke medregnet i varmebelastningen og forudsættes ikke at have signifikant betydning for forsøget.

#### 4.3.2 Korte målinger

For at undersøge luftstrømningerne og evaluere indeklimaet i rummet udføres fem korte målinger, hvor de flytbare søjler flyttes mellem hvert forsøg, således der måles 15 forskellige steder i rummet. De tre flytbare søjler flyttes mellem hver forsøg til placeringerne vist på figur 4.7. Fordelingen er lavet ved at inddele rummet i fem og foretage tilfældig udtrækning indenfor hver enkelt inddeling, hvorved målepunkterne vil få en tilfældig placering i hotboxen. Denne fordeling er lavet da strømningsmønstret ikke kendes, og dermed vides det ikke, hvor det kunne være særlig interessant at måle temperaturen og lufthastigheden. Målingerne har en varighed af 10 minutter evalueret efter stabiliserede middelværdier, se appendiks J - *Undersøgelse af forsøgslængde*. Mellem hver måling er der en stabiliseringsperiode på 20 minutter, hvor det sikres, at rummet har opnået "normale" luftstrømninger uden forstyrrelser udefra.



Figur 4.7: Placering af flytbare søjler.

#### 4.3.3 Langtidsmålinger

For at se om der forekommer ustabile luftstrømninger i rummet foretages en længere måling på 30 minutter. Her opstilles de flytbare søjler i hver sit hjørne af rummet under hver sin perforerede plade, som det ses på figur 4.7 markeret med AL, BA og CL.

# 4.4 Test af rumforhold

Inden laboratorieforsøgene udføres, laves en indledende undersøgelse af rumforholdene og systemerne i hotboxen i forhold til temperaturfordelingen i de fire zoner, hvor det undersøges om, det er muligt at opretholde en konstant og jævnt fordelt luft- og overfladetemperatur i zonerne, så målingerne udføres under de ønskede stationære forhold. Undersøgelsen bygger på forsøgene: Forundersøgelse 1, Forundersøgelse 2 og Case 1, hvor loftopbygningen og varmebelastningen er ændret. En grundig gennemgang af undersøgelsen kan ses i appendiks L - *Test af rumforholdene i hotboxen*.

Det er i undersøgelsen eftervist, at det er muligt at opretholde stationære forhold over tid i de fire zoner. Dog er der en temperaturvariation over zone 4. Dette findes acceptabelt, da det har en lille effekt på de målte overfladetemperaturer. Under undersøgelsen er der konsekvent observeret højere temperaturer af det kolde loftet mellem zone 2 og 3 i det ene hjørne end for resten af loftet. Ventilationsanlægget i zone 2 er placeret umiddelbart over den varme plet og er sammen med en nødvendig forstærkning af loftet netop her skyld i den forhøjede temperatur. Der er forsøgt at finde en løsning på problemet uden held.

# **CFD-model**

I dette kapitel beskrives opbygningen af grundmodellen brugt til CFD-simuleringer. Derudover laves en griduafhængighedsanalyse og resultaterne for modellen sammenlignes med måleresultater, hvor det kontrolleres om resultatet fra CFD-modellen stemmer overens med målingerne.

I Computational Fluid Dynamics, CFD, bruges numeriske metoder til at løse strømningsmekaniske problematikker. I dette projekt udføres CFD-simuleringerne i programmet *FloVENT 9.3*. Resultaterne fra simuleringerne bruges til at undersøge tendenserne observeret i laboratoriet og til at udføre flere cases med anderledes variation end ved målingerne.

### 5.1 Beregningsmodel

Modellen opbygges i tre dimensioner, hvor stråling, luft- og varmestrøm modelleres. Rummet inddeles i et antal celler, der beskrives i afsnit 5.3 - *Griduafhængighed*, og Navier-Stokes ligninger anvendes på hver celle.

Som turbulensmodel benyttes *LVEL K-Epsilon*, der vurderes at være den bedste turbulensmodel i de fleste rum af en vis størrelse [27]. I turbulensmodellen modelleres de turbulente luftstrømninger ved to ekstra differentialligninger, hvor variablerne kinetisk energi af turbulens, k, og dissipation,  $\varepsilon$ , indgår. Variablerne beregnes i hver enkelt celle.

#### 5.1.1 Opbygning af rummet

Modellen er opbygget ud fra opstillingen i hotboxen beskrevet i afsnit 4 -*Laboratorieopstilling*, hvor der benyttes samme dimensioner, materialeegenskaber, ventilationsarmaturer og randbetingelser. Opbygningen af modellen kan ses på figur 5.1 og 5.2.

Væggene i rummet opbygges af et *enclosure*, der tilføres materialeegenskaberne for krydsfiner og en fastsat temperatur på 22°C. Denne temperatur justeres efter de målte overfladetemperaturer for hver case.

Loft til zone 2 modelleres ved en *collapsed cuboid* placeret på loftet i encolsuren. Der sættes en fast varmestrøm på -1860 W, hvor cirka halvdelen overføres til rummet. Den resterende varmestrøm optages i loftet i enclosuren, der har en fast temperatur på 22°C.

Det nedhængte loft modelleres ved en *collapsed cuboid* med materialeegenskaberne for en Rockfonplade. For at simulere de perforerede plader laves der seks åbninger i det nedhængte loft, se figur 5.1, der tilsammen giver den samme åbningsgrad som i laboratorieopstillingen. Åbningerne placeres i samme mønster som de perforerede plader i laboratorieopstillingen.

Der indsættes balanceret ventilation i form af ét indblæsningsarmatur og ét udsugningsarmatur med en ventilationsmængde på 14  $\frac{1}{s}$  som for Case 2. Ventilationsarmaturerne modellers ved en *fan* med materialedataene som for et RS14 armatur for Lindab. Armaturene opsættes mellem loftet og det nedhængte loft, hvor der laves huller i det nedhængte loft og loftet.

Varmekilderne opbygges af seks *sources*, der hver tilfører 155 W til rummet. Varmekilderne placeres i hjørnet, som ved Case 2, da det vurderes, at denne placering vil give den mest stabile løsning, på grund af den klart definerede strømningsretning for denne opstilling i modsætning til en jævnt fordelt belastning.

#### 5.1.2 Randbetingelser

Alle grænsefladerne sættes som åbne, hvorefter adiabatiske grænseflader defineres ved at påsætte omgivelsestemperaturerne til 22°C med en transmissionskoefficient på 0  $^{W}/_{m^{2} K}$  samtidig sikrer væggene, at der ikke er luftstrømning til omgivelserne. Omgivelsernes temperatur bruges ligeledes til at fastsætte indblæsningstemperaturen.



Figur 5.1: Rendering af modellen opbygget i FloVENT.



Figur 5.2: Opbygning af modellen opbygget i FloVENT.

### 5.2 Konvergensanalyse

Der er generelle problemer med at få CFD-simuleringen til at konvergere og give en stabil løsning, som det ses på første del af figur 5.3 a). Derfor udføres en analyse af, hvad der kan gøres for at forbedre residualerne og give en stabil løsning. Analysen udføres med et grid på 100.659 celler. Som udgangspunkt stopper FloVENT simuleringen ved et maksimalt antal iterationer, eller når de beregnede residualer er mindre end en fastsat grænse. Residualerne er defineret, som den summerede fejl af hver enkelt af Navier-Stokes ligninger og er således et udtryk for, om der er balance i Navier-Stokes ligninger. Grænserne, for hvornår beregningen skal stoppes, beregnes automatisk i programmet, men kan overskrives, hvis det ønskes. [28].

Afhængig af om løsningen divergere, er stabil, oscillerende og har en lav eller høj residual findes der forskellige metoder til at opnå konvergens eller på anden måde sikrer, at resultatet er brugbart. Metoderne er fundet i hjælpefilen til *FloVENT* [28]. Først og fremmest skal det undersøges om de beregnede værdier ændrer sig i en række nøglepunkter. Derfor er der i modellen indsat otte monitor points. Der er indsat et monitor point under hver af de fire perforerede plader i hjørnerne i højden 1,7 m, et under indblæsningsarmaturet i højden 2,2 m og tre mellem det nedhængte loft og det kolde loft. Monitor points kan ses indtegnet på figur 5.2, hvor de er markeret med små rød prikker. De observerede temperaturer og hastigheder er indtegnet på figur 5.3 b) og c), hvor det ses, at der er store fluktuationer af både temperatur og hastighed, som betyder, at løsningen er ustabil.

I forsøget på at få en stabil løsning, der konvergerer, laves forskellige tiltag, for hvilke resultaterne er indtegnet på figur 5.3. Først forsøges det at implementere dæmpning ved falsk tidsskridt. Dette gøres ved at fastsætte et falsk tidskridt på hastighederne i x, y og z retningerne på 0,03 s beregnet ud fra størrelsen af den mindste celle og den forventede maksimale hastighed. Som det ses, har dette en positiv effekt på residualerne især for temperatur og tryk. Yderligere ser det ud til at begrænse fluktuationerne af temperatur og hastighed. Dog kan ændringen skyldes, at frekvensen af svingningerne blot er blevet længere.



Figur 5.3: Undersøgelse af konvergens, antal celler = 100.659. a) Risidual. b) Temperatur i monitor points c) Hastighed i monitor points.

Efterfølgende forsøges det at opnå et mere stabilt resultat ved at indføre multigrid dæmpning, øge antallet af indre iterationer for hastighederne og turbulenskonstanterne fra 1 til 10 samt at bruge dobbelt præcisions solver, hvor ingen af dem havde nogen effekt på løsningen.

Analysen viste, at det primært var justeringen af det falske tidsinterval, der var udslagsgivende. Derfor forsøges det at justere på tidsintervallet for de to turbulensvariablerne. Som det ses på figur 5.3, har det ikke nogen effekt på hastigheden og temperaturen i monitor points, mens det har en negativ effekt på residualen. Det forsøges også at sænke det falske tidsskridt på hastighederne yderligere. Ændringen ser ud til at have en udglattende effekt på hastighederne og temperaturerne i monitor points og en lavere residual for turbulensvariablerne. Som et sidste forsøg på at få modellen til at konvergere indføres mindre dæmpning på hastighederne, som til tider kan være nyttigt [28]. Som det ses af figur 5.3 får dette både residualen og de målte temperaturer og hastigheder til at fluktuere kraftigt.

Yderligere er det undersøgt om ændringen af initial værdierne for temperatur og hastigheder kan få modellen til at konvergere. Derfor forsøges der med kombinationer af initalværdier for hastighed og temperaturer på 0 <sup>m</sup>/<sub>s</sub>, 1 <sup>m</sup>/<sub>s</sub>, 0°C, 20°C og 40°C. Undersøgelsen viser, at residualerne ikke ændrer sig nævneværdigt ved ændringen af residualerne.

Ud fra konvergensanalysen konkluderes det, at der muligvis ikke er en stabil løsning på problemet og at det højest sandsynligt er grunden til, at modellen ikke konvergerer eller giver stabile resultater. Det bemærkes, at de største svingninger findes i monitor pointet med nedadgående strømning og over det nedhængte loft. For simuleringerne i rapporten er de præsenterede værktøjer brugt til at opnå den bedst mulige løsning.

# 5.3 Griduafhængighed

I en CFD-simulering skal løsningsdomænet inddeles i det antal celler, som gør, at løsningen er uafhængig af gridstørrelsen. Der vælges til sidst den løsning, som er uafhængig af gridstørrelsen, men samtidig kan løses indenfor et realistisk tidsinterval. Dette undersøges ved en griduafhængighedsanalyse, hvor modellen køres med forskellige grid, hvorefter det undersøges, hvor meget løsningen ændrer sig fra gang til gang. Da det er urealistisk at undersøge, hvor meget alle punkter og alle variable ændrer sig for hver undersøgelse ses der på middel-, maksimum- og minimumværdien for henholdsvis opholdszonen og området med nedadgående strømning.

Der undersøges seks forskellige grids med forskellige antal celler fordelt over løsningsdomænet. For grid 4 er der anvendt lokale grids med ekstra fin inddeling placeret mellem det nedhængte loft og det kolde loft, i området med nedadgående strømning samt omkring indblæsningen. Antallet af celler for hver grid kan ses i tabel 5.1. For hver af de valgte grid undersøges det om løsningen kan konvergere ved at bruge metoderne beskrevet i afsnit 5.2 - *Konvergensanalyse*.

		Antal celler					
	Х	У	Z	Total			
Grid 1	23	17	26	10.166			
Grid 2	34	23	31	24.242			
Grid 3	72	36	40	103.680			
Grid 4	85	30	30	126.483			
Grid 5	77	70	74	398.860			
Grid 6	120	65	84	655.200			

Tabel 5.1: Grid til griduafhængighedsanalyse.

Resultaterne for griduafhængighedsanalysen kan ses på figur 5.4. Det ses, at der er stor variation af temperaturen ved de tre groveste grid, mens der er minimal ændring af gridene for de tre fineste grid. Det skal bemærkes, at der næsten ingen forskel er på antallet af celler for grid 3 og 4, men at det gør en stor forskel at benytte de lokale grid, hvor grid fininddeles på steder, hvor det vurderes at være nyttigt. På baggrund af den udførte griduafhængighedsanalyse vælges det at benytte grid 4. Det valgte grid er kun lokalinddelt, hvor det findes nyttigt for netop denne opstilling, således skal gridet laves om, hvis strømningen f.eks. vender. Størrelsen af gridene er genereret ud fra standard værdier i *FloVent*, hvor minimumsstørrelsen er justeret højere.





#### Område med nedadgående strømning



Figur 5.4: Temperatur og fart ved analyse af griduafhængighed.

# 5.4 Sammenligning med målinger

For at kontrolle om CFD-modellen giver et sandsynligt resultat sammenlignes resultaterne med resultaterne fra målingerne udført i hotboxen. Måleresultaterne kan ses i appendiks B - *Case 2: Placering af varmekilder i ene hjørne*.

Først betragtes strømningsmønstret fra målinger og CFD. Det ses på hhv. figur B.3 og 5.5, at strømningen forløber i samme retning og observationerne fra forsøget stemmer overens med hastighedsvektorerne, som ses i kontourplottet fra CFD-simuleringen.



*Figur 5.5: Kountourplot af temperaturfordelingen i rummet og hastighedsvektorer, z=0,9.* 

For at kunne sammenligne de målte og beregnede temperaturer fastsættes overfladetemperaturen i CFD-simuleringen til 21,8°C som den målte overfladetemperatur til zone 4 i forsøget. Til sammenligningen udvælges målingerne fra langtidsmålingen søjle C og A samt den korte måling 3, søjle B. Fordelingerne er fundet som gennemsnitsværdier for cellerne under den pågældende åbning.

Ses der på hastighedsfordelingen på figur 5.6, ses det, at målingerne og beregningerne for hastighedsprofilet med nedadgående strømning og midt i rummet stemmer overens. Dog er der simuleret højere hastigheder ved gulvet i CFD-modellen, især midt i rummet. For hastighedsprofilet med opadgående



Figur 5.6: Målt og beregnet hastighedsfordelingen i rummet.



Figur 5.7: Målt og beregnet temperaturfordelingen i rummet.

strømning ses en større forskel, men formen for det målte og det simulerede hastighedsprofil er tilsvarende.

Den målte og simulerende temperaturfordellig kan ses på figur 5.7. Det ses, at formen på temperaturprofilerne for det de målte og simulerede værdier stemmer overens. Det skal dog bemærkes, at temperaturen ikke er målt mellem målepunkterne i 2,1 m og 2,4 m, hvorfor temperaturerne her ikke kendes. Yderligere ses det, at der generelt er målt lavere temperaturer end simulerede.

De målte temperaturer mellem det nedhængte loft og det kolde loft er 20,7 og 20,0°C, hvilket stemmer godt med de simulerede værdier.

# Procedure for resultatbehandling

I dette kapitel beskrives proceduren for resultatbehandlingen af forsøgene udført i laboratoriet og i Visionshuset. Herunder beskrives korrektioner, beregningsgange og generelle forudsætninger for beregningerne.

Resultatbehandlingen er udført delvist i MATLAB og delvist i Excel. De brugte regneark og scripts, hvor rådataene fra forsøgene også findes, er vedlagt på bilags-CD - *"Forsøg Laboratoriet"* og bilags-CD - *"Forsøg Laboratorie"*.

# 6.1 Komfortkrav

Komfortkravene er fastsat ud fra brugen af rummet. Kontoret bruges til stillesiddende arbejde, hvor aktivitetsniveauet vurderes til 1,2 met. Der betragtes en kølesituation, hvorfor det forudsættes, at beklædningens varmemodstand er 0,5 clo. Komfortkravene fastsættes ud fra *DS 474*, *DS 7730* og *BR10* [20] [29] [30]. Under hver enkelt afsnit er komfortkravene angivet.

# 6.2 Strømningsmønstret

Strømningsmønstret undersøges ved røgforsøg. Resultaterne er skitser af observationerne af det primære strømningsmønster fra forsøgene. Det skal understreges, at der ved røgforsøgene ikke er dannet et komplet overblik over det detaljerede strømningsmønstret, og at der kun gives en indikation af hastighederne af strømningerne. Det observerede strømningsmønster sammenholdes med de resterende resultater for at opnå større sikkerhed for resultatet.

# 6.3 Termisk komfort

For dette projekt vurderes de relevante krav til termiske komfort i rummet at omfatte generelle temperaturforhold i rummet, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri, lufthastigheder samt beregning af trækrisiko.

#### 6.3.1 Korrektion af temperaurer

Under laboratoriemålingerne er det svært at kontrollere den præcise rumtemperatur i zone 3 med de tilgængelige kontrolsystemer. Derfor er det nødvendigt, for at kunne sammenligne de målte temperature med indeklimanormer og -krav samt målingerne i mellem, at foretage en korrektion af de målte temperaturer. Alle de målte temperaturer korrigeres derfor efter en referencetemperatur, således temperaturforskellen mellem den målte referencetemperatur og den ønskede komforttemperatur adderes den enkelte målte temperatur. Det vælges at benytte referencetemperaturen målt i højden 1,1 m på den faste målesøjle til måling af temperaturgradienten. Som komforttemperatur benyttes 24,5°C fra *DS 474* gældende for en kølesituation med en beklædningsmodstand på 0,5 clo og et aktivitetsniveau på 1,2 met [20]. Temperaturmålingerne i Visionshuset bliver ikke korrigeret.

#### 6.3.2 Temperaturforhold

Temperaturforholdene vurderes normalt ud fra den operative temperatur. Den operative temperatur beregnes som en middeværdi af den målte lufttemperatur og middelstrålingstemperaturen [20]. Under forsøgene er der en meget lille forskel på overfladetemperaturene og middellufttemperaturen fra den faste målesøjle, se tabel 6.1 med værdier for Case 1. Ved beregning for Case 1 af et punkt placeret midt i rummet er det vist, at der er en forskel på 0,08°C på den målte lufttemperatur og den beregnede operative temperatur. For målingerne foretaget i Visionshuset er der målt en temperaturforskel mellem den

operative temperatur og lufttemperaturen på 0,02-0,03°C, mens der for Case 1 i laboratorieforsøgene er målt en forskel på 0,05°C. Derfor vurderes det, at temperaturforholdene i rummet kan vurderes ud fra de målte lufttemperaturer. Samtidig vurderes det at være acceptabel at sammenligne lufttemperaturerne med grænserne for operativ temperatur angivet i *DS/EN ISO 7730* [29]. Den målte lufttemperaturer har en måleusikkerhed beregnet til  $\pm 0,08$ °C.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,øst</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>	<i>t</i> <sub>rum</sub>
24,4	24,4	24,4	25,2	23,8	23,6	24,2

**Tabel 6.1:** Korrigerede middeltemperaturer for overflader- og middeltemperatur målt på den faste målesøjle for Case 1 til beregning af operativ temperatur.

I *DS/EN ISO 7730* angivnes tre kategorier for den operative temperatur, se tabel 6.2 [29]. Kategorierne angives i forhold til en komforttemperatur,  $t_{komf}$ , der vælges for et aktivitetsniveau på 1,2 met og en beklædningsmodstand på 0,5 clo, til 24,5°C. Temperaturen vurderes at være acceptabel, hvis kategori B overholdes, hvilket svarer til 10% utilfredse. Temperaturerne for kategori B i *DS/EN ISO 7730* svarer til værdierne angivet i *DS474* [20].

	А	В	С
Operativ temperatur [°C]	24,5±1	24,5±1,5	24,5±2,5

Tabel 6.2: Grænser for operativ temperatur fra DS/EN 7730 [29].

#### 6.3.3 Temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde

Høje temperaturforskelle mellem hoved- og ankelhøjde kan forårsage diskomfort for brugerne af lokalet. Derfor undersøges dette via lufttemperaturmålingerne fra de flytbare søjler og den faste målesøjle forskellige steder i rummet. For denne beregning er der en måleusikkerhed på  $\pm 0, 12^{\circ}$ C. Den vertikale temperaturforskel mellem hovedhøjde, 1,1 m, og ankelhøjde, 0,1 m, må maksimalt være 3°C følge *DS 474*. For stående personer er hovedhøjden 1,7 m. [20]

#### 6.3.4 Strålingsasymmetri

På grund af det termoaktive betonloft i bygningen vurderes der at kunne forekomme risiko for diskomfort på grund af strålingsasymmetri. På grund af loftopbygningen med det nedhængte akustiske loft antages personerne, der opholder sig i rummet, ikke at være påvirket af stråling direkte fra køleloftet, men primært at være påvirket af stråling til det nedhængte loft. Overfladetemperaturen på undersiden af det nedhængte loft måles, og det undersøges om den giver anledning til strålingsasymmetri. Den tilladelige grænse for strålingsasymmetri til et koldt loft er for kategori B ifølge *DS 7730* 14°C [29].

#### 6.3.5 Trækrisiko

En måde at vurdere om der er problemer med træk, hvor der både tages hensyn til lufthastigheden, turbulensintensiteten og lufttemperaturen, er ved at beregne trækrisiko, DR, for hver enkelt måling. Trækrisiko beregnes fra ligning (6.1), som gælder for stillesiddende arbejde med et aktivitetsniveau på 1,2 met. Yderligere gælder formlen kun ved lufthastigheder mindre end 0,5 m/sog for temperaturer mellem 20 og 26°C. Da turbulensintensiteten ikke måles under forsøgene bruges værdien 40%. [29]

$$DR = (34 - t_a) (v_a - 0.05)^{0.62} (0.37 v_a Tu + 3.14)$$
(6.1)

DRTrækrisiko [%] $t_a$ Lokal lufttemperatur [°C] $v_a$ Lokal middel lufthastighed [ $^{m}/_{s}$ ]TuTurbulensintensitet [%]

Der er beregnet en måleusikkerhed på  $\pm 5,75\%$  for trækrisikoen. Beregningen kan findes på bilags-CD - *Usikkerhedsberegninger*.

Fra *DS/EN 7730* gælder det for kategori A, B og C, at trækrisiko skal være mindre end hhv. 10%, 20% og 30% [29].

# 6.4 Køleeffekt

Køleeffekten vurderes ud fra kølekapacitetskoefficient, der angives som forholdet mellem varmestrømmen gennem det kolde loft og temperaturforskellen mellem den kolde overflade og rummet pr. areal.

Køleeffekten for laboratorieforsøgene opstilles på baggrund af den stationære varmebalance opstillet for rummet, der ses i ligning (6.2). I varmebalancen regnes temperaturen i rummet at være ens i hele rummet. Dette er ikke tilfældet for forsøget, hvorfor det er valgt at bruge temperaturen på den faste målesøjle i højden 1,1 m. Yderligere er varmebalancen kun opstillet for de frie varmemængder, hvilket vil sige, at der ingen fordampning er fra våde overflader eller direkte forstøvning i rummet, og der ses bort fra vanddampdiffusion gennem indvendige begrænsningsfalder. [26]

$$\Phi_H = \Phi_V + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_4 \tag{6.2}$$

 $\Phi_H$ Varmetilførsel fra varmekilder [W] $\Phi_V$ Varmetab ved ventilation [W] $\Phi_i$ Varmetab til hhv. zone 1, 2 og 4 [W]

Køleeffekten for Visionshuset er beregnet, som effekten fra dækkene i brugstiden, da dækkene kun kører i brugstiden. Den beregnes ud fra den målte vandstrøm samt de målte frem- og returløbstemperaturer.

Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra hhv. overfladtemperaturen på det kolde loft og middelvæsketemperaturen, hvor forsøgene fra laboratoriet kun beregnes ud fra overfladetemperaturen og forsøgene i Visionshuset beregnes ud fra både overfladetemperaturen og middelvæsketemperaturen. Dette gøres for at kunne sammenligne forsøgene fra laboratoriet og Visionhuset samt sammenligne forsøgene fra Visionshuset med målingerne udført på DTU.

Varmetabet til den kolde overflade opstilles som funktion af overfladetemperaturen og rumtemperaturen, se ligning (6.3).

$$\Phi_2 = U_{CC} A_2 (t_{rum} - t_{s,2}) \tag{6.3}$$

 $U_{CC}$ Kølekapacitetskoefficient  $[^{W}/_{m^{2}K}]$  $A_{2}$ Areal af overflade til zone 2  $[m^{2}]$  $t_{rum}$ Rumtemperatur [°C] $t_{s,2}$ Overfladetemperatur, zone 2 [°C]

Kombineres ligning (6.2) og (6.3) fås udtrykket for kølekapacitetskoefficienten, beregnet ud fra overfladetemperaturen, der ses i ligning (6.4).

$$U_{CC} = \frac{\Phi_H - \Phi_V - \Phi_1 - \Phi_4}{A_2 (t_{rum} - t_{s,2})}$$
(6.4)

På tilsvarende vis fås et udtryk for kølekapacitetskoefficienten beregnet ud fra middelvæsketemperaturen, se ligning (6.5).

$$U_{CC} = \frac{\Phi_K}{A\left(t_{rum} - t_{middel}\right)} \tag{6.5}$$

$$\Phi_{K}$$
 Effekt fra dæk [W]  
*A* Areal af dæk [m<sup>2</sup>]  
 $t_{middel}$  Middelvæsketemperatur [°C]

ī.

Der er beregnet en måleusikkerhed på  $\pm 0.08^{W}/_{m^{2}K}$  for kølekapacitetskoefficienten i laboratoriet,  $\pm 1.30^{W}/_{m^{2}K}$  for kølekapacitetskoefficienten i forhold til overfladetemperaturen fra Visionshuset og  $\pm 0.66^{W}/_{m^{2}K}$  for kølekapacitetskoefficienten i forhold til middevæsketemperaturen i Visionshuset. I beregningen er der ikke taget højde for nøjagtigheden af forudsætningerne i beregningen. Beregningen kan findes på bilags-CD - *Usikkerhedsberegninger*.

#### 6.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Det beregnes, hvor stor en del af varmestrømmen gennem loftet der overføres via stråling, mens resten af den overførte effekt regnes overført via konvektion, se ligning (6.6). Varmetransporten ved transmission gennem luften er negligibeal, når luften er i bevægelse.

$$\Phi_{Total} = \Phi_S + \Phi_K \tag{6.6}$$

 $\Phi_{Total}$ Total varmestrøm fra overflade til rum [W] $\Phi_S$ Varmestrøm fra stråling [W] $\Phi_K$ Varmestrøm fra konvektion [W]

Varmestrømmen fra stråling beregnes ved *Radiosity-metoden* beskrevet i *Fundamentals of Heat Transfer* [31]. For metoden forudsættes det, at overfladerne danner et lukket system, at der er flere end en overflade og at alle overflader er diffuse, strålerer og emitterer. Yderligere forudsættes det, at emissionen, strålings- og indstrålingsintensiteten er ensartede over hver enkel overflade, og at der ingen forandring sker over tid.



Figur 6.1: Forsøgsrum. Område hvor strålingsbidrag beregnes er markeret med blå.

Ud fra ligning (6.7) bestemmes strålingsintensiteten for hver overflade. Emissionsforholdet er en materialekonstant, der bestemmes til 0,91 for træ og 0,9 for Rockfon plader. Emissionsforholdet for Rockfon pladerne er fundet ved brug af et termografikamera. Matricen med formfaktorer bestemmes ud fra dimensionerne af rummet og om fladerne er parallelle eller vinkelrette.

$$E_{bi} = \sum \frac{\delta_{ij} - (1 - \varepsilon_i)F_{i-j}}{\varepsilon_i} J_j \quad , \text{ hvor } E_{bi} = \sigma_s T_i^4 \qquad (6.7)$$

$$\begin{array}{l} E_{bi} & \text{Emission fra overflade } i \text{ & kvivalent} \\ & \text{med et absolut sort legeme } [^W/_{m^2}] \\ \delta_{ij} & \text{Kronecker delta, for } i = j \ \delta_{ij} = 1, \text{ for } i \neq j \ \delta_{ij} = 0 \ [-] \\ \varepsilon_i & \text{Emissionsforholdet for overflade } i \ [-] \\ F_{ij} & \text{Formfaktor for stråling fra flade } i \ \text{til flade } j \ [-] \\ J_j & \text{Strålingsintensitet for overflade } j \ [^W/_{m^2}] \\ \sigma_s & \text{Stefan Boltzmanns konstant } [^W/_{m^2K^4}] \\ T_i & \text{Overfladetemperatur for overflade } i \ [K] \\ \end{array}$$

Efter strålingsintensiteten er fundet, bestemmes varmestrømsintensiteten fra stråling ud fra ligning (6.8), hvorefter varmestrømmen kan bestemmes ved at multiplicere med overfladearealet.

$$q_{rad i} = \frac{\varepsilon_i}{1 - \varepsilon_i} \left( E_{bi} - J_i \right) \tag{6.8}$$

$$q_{rad i}$$
 | Varmestrømsintensitet fra stråling [<sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>]

Beregningen foretages for rummet der dannes mellem det nedhængte loft og det kolde loft, se figur 6.1. Således er gulvet i beregningen oversiden af det nedhængte loft, mens loftet er undersiden af det kolde loft. For det nedhængte loft ses der bort fra hullerne og fladen betragtes som en sammenhængende flade med materialeegenskaber som en Rockfon plade.
# Del II Strømningsmønstre og komfortforhold

- Generelt strømningsmønster og komfortforhold
- Varmekilders indflydelse på strømningsmønstret
- Ventilations indflydelse på strømningsmønstret
- Historikkens indflydelse på strømningsmønstret
- Målinger i Visionshuset
- Dynamisk CFD





# Generelt strømningsmønster og komfortforhold

Dette kapitel indeholder en undersøgelse af det generelle strømningsmønster og komfortforhold ved brug af termoaktive konstruktioner i kombination med nedhængte lofter. Undersøgelsen laves ud fra laboratoriemålinger og CFDsimuleringer med jævnt fordelt punktlast.



Figur 7.1: Oversigt over forsøgsopstilling til Case 1.

Undersøgelserne er lavet på baggrund af målingerne for Case 1, hvor punktlasterne er placeret seks forskellige steder, så varmebelastningen er jævnt fordelt. En oversigt over forsøgsopstillingen kan ses på figur 7.1, mens en detaljeret forsøgsbeskrivelse og beskrivelse af opbygning af hotboxen kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Proceduren for resultatbehandlingen kan ses i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*, mens en gennemgang af resultaterne kan findes i appendiks A - *Case 1: Basisopstilling*.

Opbygningen af CFD-modellen er beskrevet i afsnit 5 - *CFD-model*. I CFDsimuleringerne, til at understøtte Case 1, er placeringen af varmekilderne og ventilationsmængderne som vist på figur 7.1.

#### 7.1 Resultater fra laboratorieforsøg for Case 1

Under forsøget blev den gennemsnitslige overfladetemperatur for overfladerne mod zone 1 og 4 målt til 22,7°C med en temperaturforskel på 1,4°C fra koldeste til varmeste temperaturmåling. Temperaturfordelingen på loftet kan ses på figur 7.2, hvor der i et kontourplot er interpoleret mellem de 12 målte værdier. Det ses, at der observeres højere temperaturer i den ene ende end den anden. Det skal bemærkes, at det varmeste punkt ikke er et resultat af strømningen, men et resultat af opbygningen af hotboxen og er gennemgående for alle forsøgene.

På figur 7.3 er observationer for røgforsøgene skitseret. Under forsøget blev det observeret, at den primære strømningsretningen foregår gennem de to rækker perforerede plader placeret tættest på væggen med opadgående strømning i den ene ende og nedadgående strømning i den anden ende. Således genereres der en stærk strømning over det akustiske loft og en stærk strømning ved gulvet, se snit A-A figur 7.3. Strømningen foregår på den lange led af rummet. Det bemærkes, at strømningen gennem de midterste rækker plader er begrænset.

Hvis temperaturfordelingen af loftet betragtes, ses det, at de varmeste temperaturer observeres, hvor der er opadgående strømning, mens de koldeste temperaturer observeres, hvor der er nedadgående strømning.



Figur 7.2: Overfladetemperaturer loftet for Case 1.

Observeres strømning på den korte led, se snit C-C figur 7.3, ses det, at den nedadgående strømning trækker indad mod midten af rummet, hvilket kunne skyldes placeringen af udsugningsarmaturet.

Endvidere betragtes de målte middeltemperaturer, der er indtegnet på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*. Hvor der observeres nedadgående strømning, er der målt lavere temperatur ved de øverst placerede termoelementer. I området med opadgående strømning ses ingen nævneværdige temperaturgradienter. Det ses også på tegningen, at der er flere steder midt i rummet observeres lavere temperaturer i gulvhøjde, hvilket stemmer overens med den observerede strømning langs gulvet, se måling 2 søjle A, B og C samt søjle T for den lange måling.

De målte temperaturer er indenfor det acceptable område for kategori B i 97% af de målte punkter. Temperaturene, målt udenfor kategori B, er alle udenfor opholdszonen, hvorfor temperaturfordelingen i rummet anses for acceptabelt.



Figur 7.3: Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøg.

Under forsøget er der målt høje lufthastigheder enkelte steder i rummet, hvilket kan give problemer i forhold til træk, hvorfor trækrisiko, DR, beregnes for alle målepunkterne, se tegning T2 - *Trækrisiko for Case 1*. På figur 7.4 ses områderne, hvor den beregnede trækrisiko er over den tilladte værdi på 20%.



*Figur 7.4:* Skitsering af målepunkter for DR i opholdszonen for Case 1. Rød markering angiver DR>20%. Grøn markering angiver DR<20%.

Betragtes temperatursmålingerne nærmere i nedfaldsområdet ses det på figur 7.5, at temperaturen varierer periodevis, hvilket indikerer en pulserende strømning. Det ses, at effekten er målbare på temperaturen helt ned til højden 0,6 m. Det samme blev observeret under røgforsøgene, hvor strømningen til tider når højden 1,7 m og på andre tidspunkter når gulvet. Det ses ligeledes, at frekvens af svingningen for termoelementet i højden 2,1 m er omkring 3 minutter. Den pulserende strømning kan ses på bilags-CD - *"Forsøg Laboratorie"*. På figur 7.6 ses den relative temperatur for termoelementer placeret øverste på hhv. søjle A, B og C, hvor det ses, at den relative temperatur varierer periodisk for alle tre søjler. Det ses ligeledes, at når der opnås høje temperatur på søjle A, forekommer der lave temperatur på søjle B. Den relative temperatur er temperaturen målt for det pågældende tidspunkt fratrukket middeltemperaturen for termoelementet i måleperioden.

Analysen af strålingsasymmetri, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde samt lufttemperaturerne inddelt i forhold til de tre kategorier for operativ temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29] viste, at der ikke forekommer problemer.



Figur 7.5: Temperaturmåling over tid, måling 1 søjle B



Figur 7.6: Temperaturforskel mellem de øverste termoelementer på søjle, A, B og C.

### 7.2 Resultater fra CFD-simuleringerne

Der udføres fire CFD-simuleringer, hvor startgættet på temperatur og hastigheder varieres. Yderligere udføres der to gentagelser af den først simulering for at undersøge om der skulle forekomme ændringer af resultatet, se tabel 7.1.

Simulering nr.	1	2	3	4	5	6
Temperatur [°C]	20	20	20	20	20	25
Hastighed [ <sup>m</sup> / <sub>s</sub> ]	0	0	0	1	-1	0

Tabel 7.1: Startværdier til seks variationer af CFD-simuleringen.

Billedet af den pulserende strømning i hver hjørne ses også ved CFD-simuleringerne. Den opbyggede model konvergerer ikke, men overvåges udvalgte punkter fås samme indtryk af strømningen, se figur 7.7. På figur 7.7 og figur 7.6 ses det ved at betragte hastigheden i hjørne 1 og 2, at når hastigheden er høj i det ene hjørne er den lav i den andet hjørne dog altid negativ. På denne baggrund anses hjørnet med mest nedadgående strømning at skifte fra side til side. Dog foregår strømningen altid på den lange led af rummet.

Fra de seks CFD-simuleringer fås temperaturfordelingerne, der ses på figur 7.8 med det primære strømningsmønster skitseret. Det ses, at der er lavere temperaturfordelinger, hvor der er nedadgående luftstrømninger, mens temperaturen er højere, hvor der er opadgående luftstrømning. Yderligere ses, at der er store forskelle på, hvordan strømningsmønstret ser ud for de fire simuleringer med forskellige startværdier. Dette tyder på, at der er flere muligheder for, hvorledes strømningsmønstret kan se ud, og hvordan de primære strømnings-retninger er. Dog foregår strømningen altid på den lange led af rummet.



Figur 7.7: Temperatur- og hastighedsvariation i udvalgte punkter ved CFD-simulering 5.



*Figur 7.8:* Kontourplots af temperaturfordelingen ved de 6 CFDsimuleringer med strømningsmønstret påtegnet.

### 7.3 Delkonklusion

Strømningsretningen i laboratoriet vurderes at være domineret af enten ventilationen eller overfladetemperaturen på det kolde loft. Det ses af figur A.2, at temperaturene på det kolde loft er varmest, hvor luften stiger op, og koldest, hvor luften falder ned. Hvis strømningsretningen derimod er domineret af ventilationen vil indblæsningen skabe et mindre overtryk, som forårsager en opadrettet strømning til det termoaktive loft, mens der ved udsugningen skabes et mindre undertryk, som forårsager en nedadgående luftstrømning ved de perforerede plader omkring udsugningen.

Fra CFD-simuleringen ses det, at der tilsyneladende er en tilfældig strømningsretning, og at det afhænger af, hvilke startværdier der vælges. Dette betyder, at der er flere løsninger på problemet, og at retningen af luftstrømningen i laboratoriet afhænger af temperaturen på loftet, placering af ventilation, eller hvad der er foregået i rummet forinden.

Nærmere undersøgelser af hvad der driver strømningen vil blive undersøgt i de efterfølgende kapitler, hvor effekten af placeringen af varmekilderne, placering af ventilation, ventilationsmængde samt hvad der er foregået forinden i rummet vil blive undersøgt.

# Varmekilders indflydelse på strømningsmønstret

I dette kapitel beskrives, hvilken indflydelse varmekildernes placering har på strømningsmønstret og komfortforholdene i rummet. Undersøgelsen er lavet på baggrund af laboratorieforsøg og CFD-simuleringer.

Med udgangspunkt i Case 1 ønskes det at undersøge, hvilken betydning placeringen af varmekilderne har for luftstrømningen i rummet. Det undersøges, om det er muligt at ændre på retningen af luftstrømmen, som blev observeret for Case 1, ved at placere varmekilderne anderledes og undersøge, hvad der er styrende for strømningsretningen. Forsøget udføres under samme forudsætninger som for Case 1, hvor det kun er placeringen af varmekilderne, der ændres. Dermed bibeholdes varmebelastningen, ventilationsmængden, temperaturen i zonerne og loftopbygningen. Konklusionerne i dette kapitel er fundet ud fra laboratorieforsøgene udført for Case 1, Case 2, Case 3, Case 6 og Case 8 samt CFD-simuleringerne for Case 9 og Case 10. Hele beskrivelsen og gennemgang af resultaterne for forsøgene kan ses i appendiks A - *Case 1: Basisopstilling*, appendiks B - *Case 2: Placering af varmekilder i ene hjørne*, appendiks C - *Case 3: Jævnt fordelt varmebelastning*, appendiks F - *Case 6: Undersøgelse af historik del 1* og appendiks H - *Skæv fordeling af varmekilde*.

#### 8.1 Målinger i laboratoriet

Der undersøges fem cases i laboratoriet. På figur 8.1 ses skitser af de udførte cases, hvor placeringen af varmekilderne kan ses. For Case 1, 2, 6 og 8 er der anvendt punktvarmekilder, mens for Case 3 er anvendt varmekabler, som det ses på figur 8.1. Endvidere skal det bemærkes at ventilationsarmaturerne er byttet om i Case 6.



Figur 8.1: Princip for forsøgsopstillingerne til Case 1, 2, 3, 6 og 8.

Forsøgene er evalueret ud fra fem korte målinger, én lang måling og røgforsøg, som er beskrevet i afsnit 4.3 - *Måleprocedure*.

Observationerne gjort under røgforsøgene viste, at strømningsretningen er ændret for Case 2 og Case 6 i forhold til strømningsmønstret for Case 1. Case 3 og Case 8 har samme strømningsretning som Case 1.



*Figur 8.2:* Observationer af strømningsmønstret for Case 1, 2, 3, 6 og 8 fundet ud fra røgforsøg.

Ud fra røgforsøgene bemærkes det, at der forekommer opadgående strømning, hvor varmekilderne er koncenteret et sted, hvilket ses i Case 2, 6 og 8. Luften strømmer herfra over det nedhængte loft til den anden ende af rummet, hvor der er nedadgående strømning gennem den sidste række perforerede plader. Strømningerne indikerer, at varmekildernes placering har en betydning for strømningsretningen. Det bemærkes endvidere, at den primære strømning forekommer ved de yderste perforerede plader på langs af rummet, mens der kun forekommer en lille vertikal strømning gennem de miderste perforerede plader. Endvidere betragtes overfladetemperaturen på loftet op til zone 2, da der også her ses en forskel mellem de forskellige cases. På figur 8.3 ses kontourplot for hver af de fem cases, hvor der er interpoleret mellem de 12 målte overfladetemperaturer for hver case.



Figur 8.3: De målte korrigerede overfladetemperatur på loftet mellem zone 2 og 3 for Case 1, 2, 3, 6 og 8.

Det ses, at temperaturfordelingen over loftet er ligne for Case 1 og 3, hvor varmekilderne var jævnfordelt i rummet med hhv. punktlaster og varmekabler. Overfladetemperaturerne målt for Case 8 viser ligeledes lignende temperaturfordeling som for Case 1 og 3, men det ses også, at loftet er varmere over de 10 varmekilder og lidt varmere over de to varmekilder. For Case 2 og 6 ses, at der forekommer en anderledes temperaturfordelingen på loftet, hvor der er et varmt område over de 12 varmekilder. Generelt ses det, at der er opadgående strømning, hvor overfladetemperaturen er varmest og nedadgående strømning, hvor overfladetemperaturen er koldest. Ud fra observationerne gjort under røgforsøgene og sammenligningen af overfladetemperaturerne kan det konkluderes, at der er en sammenhæng mellem placeringen af varmekilderne, strømningsretningen og overfladetemperaturen.

Endvidere betragtes de målte middeltemperaturer, som er indtegnet på temperaturprofiler vist på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*, tegning T3 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 2*, tegning T5 -*Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 3*, tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7* og tegning T13 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 8*. Det ses at der er få steder, hvor temperaturen ikke ligger indenfor det acceptable interval mellem 23°C og 26°C. Nogle steder er der målt en højere temperatur end de 26°C i gulvhøjden 0,1 m, men som det ses ud fra plantegningerne er der placeret en varmekilde umiddelbart op af målepunktet. Der er ikke målt temperaturer under de 23°C i opholdszonen.

På tegningerne ses desuden de målte middelhastigheder. Generelt observeres der høje hastigheder i gulvhøjde for alle casene. Enkelte steder er der ligeledes observeret høje hastigheder i nedfaldsområdet og ved væggene.

For at undersøge om de målte temperaturer og hastigheder kan give anledning til trækproblemer beregnes trækrisikoen for hver case, som beskrevet i afsnit 6.3.5 - *Trækrisiko*. Alle værdierne fundet for trækrisikoen kan ses indtegnet på tegning T2 - *Trækrisiko for Case 1*, tegning T4 - *Trækrisiko for Case* 2, tegning T6 - *Trækrisiko for Case 3*, tegning T12 - *Trækrisiko for Case 6 og* 7 og tegning T14 - *Trækrisiko for Case 8*. Trækrisikoen vurderes at være acceptabel, når den ligger under 20%. På figur 8.4 ses en skitse med markering af, hvor trækrisikoen ligger over de 20% samt angivet højden på det pågældende målepunkt. På figur 8.4 ses, at der kan forekomme trækgener især i gulvhøjde i området med nedadgående strømning. For Case 8 bemærkes det, at der er observeret træk i området med de to varmekilder, hvilket betyder at en person, som opholder sig i dette område, vil føle træk i gulvhøjde.



*Figur 8.4:* Skitsering af målepunkter for DR i opholdzonen for Case 1, 2, 3, 6 og 8. Rød markering angiver DR>20%. Grøn markering angiver DR<20%.

Analysen af strålingsasymmetri, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde samt lufttemperaturerne inddelt i forhold til de tre kategorier for operativ temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29] viste, at der ikke forekommer problemer.

#### 8.2 CFD-simuleringer

Som ekstra undersøgelser af indflydelsen af varmekildernes placering udføres to CFD-simuleringer af Case 9 og 10. CFD-modellerne opbygges som beskrevet i afsnit 5 - *CFD-model*, men varmekilderne placeres som vist på figur 8.5 og 8.6, hvor et billede af CFD-modellerne ses.



For Case 9 er varmekilderne fordelt under de to miderste rækker med perforerede plader of for Case 10 er varmekilderne placeret under de to yderste rækker med perforerede plader. Varmebelastningen er 930 W, hvor hver varmekilde tilføjer 155 W til rummet. Ventilationsmængden er fastsat til 14  $\frac{1}{s}$ . Løsningsdomænet er inddelt i 240.000 grid celler. Simuleringerne er udført med 200.000 iterationer, hvor der ikke opnås en konvergerede løsning.

På figur 8.7 ses kontourplots af temperaturfordelingen for Case 9 og 10. Ved at betragte strømningsmønstret fra CFD-simulering for Case 9 og 10 kan det ses, at der opnås samme strømningsretning som for Case 2 og 6 udført i laboratoriet. Det bemærkes ligeledes, at den primære strømning for Case 9 foregår igennem de yderste perforerede plader, mens der næsten ikke forekommer strømning gennem de midterste perforerede plader. For Case 10 foregår en større del af strømningen gennem de midterste perforerede plader. men den primære strømning foregår stadig gennem de yderste perforerede plader.



Figur 8.7: Kontourplots af temperaturfordeling for Case 9 og Case 10.

### 8.3 Delkonklusion

Det bemærkes både i laboratoriemålingerne og CFD-simuleringerne, at den primære strømning foregår gennem de yderste rækker perforerede plader, hvorimod der er mindre strømning gennem de midterste perforerede plader. Ud fra de udførte forsøg i laboratoriet og de to udførte CFD-simuleringer ses det, at placeringen af varmekilderne har en afgørende betydning for strømningsretningen. Det ses ud fra forsøgene, at der er muligt at ændre strømningsretningen alt efter, hvori rummet den størst varmebelastning er placeret. Det ses også, at overfladetemperaturen på loftet mellem zone 2 og 3 ændres i forhold til placeringen af varmekilderne.

## Ventilations indflydelse på strømningsmønstret

I dette kapitel beskrives, hvilken indflydelse placering af ventilationsarmaturer og ændring af ventilationsmængden har på strømningsmønstret og komfortforhold i rummet. Undersøgelsen er lavet ud fra laboratorieforsøg.

Ved forsøgene udført under Case 1 viste det, at ventilationens placering kunne have indflydelse på strømningsretningen. Dette begrundes med, at der er en opadgående strømning ved indblæsningsarmaturet, som kunne skyldes et mindre overtryk i dette område, og en nedadgående strømning ved udsugningsarmaturet, som kunne skyldes et mindre undertryk i dette området. Det ønskes derfor at undersøge om der er belæg for denne antagelse ved at bytte om på de to armaturer. Endvidere ønskes det at undersøge om luftmængden har en indflydelse på strømningsretningen, da det kunne være muligt at gøre de førnævnte over- og undertryk større.

Konklusionerne i dette afsnit bygger på forsøgene udført for Case 1, Case 4 og Case 5. Case 4 udføres som Case 1 men med ombyttet ventilationsarmatur. Case 5 udføres som Case 4 men med en ventilationsmængde på 92  $\frac{1}{s}$  i stedet for 14  $\frac{1}{s}$ . Skitser af de tre cases kan ses på figur 9.1. Hele beskrivelsen og gennemgangen af resultaterne af forsøgene kan ses i appendiks A - *Case 1: Basisopstilling*, appendiks D - *Case 4: Placering af ventilationsarmatur* og appendiks E - *Case 5: Høj ventilationsmængde*.



*Figur 9.1:* Princip for forsøgsopstilling til Case 1, Case 4 og Case 5 og målte korrigerede overfladetemperaturer.

Forsøgene er evalueret ud fra fem korte målinger, én lang måling og røgforsøg. Observationerne gjort under røgforsøgene viste, at strømningsretningen over loftet er uændret både for Case 4 og 5 i forhold til observationerne gjort under røgforsøgene for Case 1, se figur 9.2. Ligeledes ses det, at området med den primære nedadgående strømning og området med den primære opadgående strømning mod det kolde loft er uændret.

For alle tre cases blev der observeret en luftstrøm under det akustiske loft. Retningen af denne luftstrøm virker til at være styret af placeringen af ventilationsarmaturerne, da denne ændres fra Case 1 til Case 4 og 5.

De resterende strømninger i opholdszonen blev ikke ændret nævneværdigt mellem Case 1 og Case 4, mens der for Case 5 blev observeres markante ændringer. Disse ændringer vurderes at være uafhængig af kølemetoden med det kolde loft i kombination med et nedhængt akustisk loft og i stedet være et resultat af høje ventilationsmængder, valget af armatur og det lille rum. Overfladetemperaturene på loftet op til zone 2 kan ses på figur 9.1. Det ses at temperaturfordelingen er tilsvarende temperaturfordelingen fundet ved Case 1. De øvrige rumforhold er ligeledes i overensstemmelse med rumforholdene i Case 1.



Figur 9.2: Illustration af det primære strømningsmønster for Case 1, Case 4 og Case 5.

Endvidere betragtes de målte middeltemperaturer indtegnet på temperaturprofiler vist på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*, tegning T7 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 4* og tegning T9 -*Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 5*. Det ses, at der i opholdszonen ikke er nogen temperaturer udenfor det acceptable interval på 23-26°C. Yderligere ses det at der ikke er nogle markante temperaturgradienter i opholdszonen under de udførte forsøg.

Ydermere ses på de målte middelhastigheder på tegningerne. For Case 4 er der generelt målt høje hastigheder ved gulvet og væggene i nedfaldsområdet. For Case 5 måles der meget høje hastigheder i den halvdel af rummet, hvor indblæsningsarmaturet er placeret.

For at undersøge nærmere om de målte hastigheder og temperaturer skaber trækproblemer i opholdszonen beregnes trækrisiko, DR, for hver case. På figur 9.3 ses en skitse hvor der er markeret for hver enkelt case, hvor der er beregnet trækrisiko over den acceptable værdi på 20%. Alle værdierne for trækrisiko kan ses indtegnet på tegning T2 - *Trækrisiko for Case 1*, tegning T8 - *Trækrisiko for Case 4* og tegning T10 - *Trækrisiko for Case 5*.



*Figur 9.3:* Skitsering af målepunkter for DR i opholdszonen for Case 1, Case 4 og Case 5. Rød markering angiver DR>20%, Grøn markering angiver DR<20%.

Som det ses på figur 9.3 er der flere problemer med træk i Case 4 end i Case 1. Dette kan skyldes, at luften fra indblæsningen øger hastigheden af den allerede nedadgående strømning i Case 4. Desuden ses det, at der for Case 5 er markant flere områder med træk, som førnævnt tillægges dette ikke luftstrømninger forårsaget af naturlig konvektion til det kolde loft.

Ud fra forsøgene udført for Case 4 og 5 vurderes det at ventilationens placering og den tilførte luftmængde ingen eller i ringe grad influerer den primære strømningsretningen over det nedhængte loft. Hvis der er en lille effekt er den ikke stærk nok i forhold til de andre parametre, der undersøges gennem rapporten til at ændre strømningsretningen. Dog kan det konkluderes, at forsøget med udsugningen placeret i området med nedadgående strømning, Case 1, giver de mindste trækproblemer.

# Historikkens indflydelse på strømningsmønstret

I dette kapitel undersøges det, hvor stor indflydelse historikken har på strømningsretningen og komfortforholdene i rummet. Historik defineres i denne sammenhæng, som hvad der går forud for forsøget, hvor fokus er på belastningen og strømningsmønstret.

I de forrige kapitler er det vist, at ventilationens placering og ventilationsmængden ikke har indflydelse på strømningsmønstret, men at placeringen af varmekilderne har en signifikant betydning for strømningsretningen. Ligeledes er det vist, at når varmekilderne er jævnt fordelt i rummet kan strømningsretningen være forskellig. Derfor ønskes det i dette afsnit at undersøge, hvad der er afgørende for at bestemme strømningsretningen ved en jævn belastning i rummet.

Teorien, der undersøges i dette afsnit, er, at den tidligere strømningsretning og placering af varmelasten vil varme det kolde loft mere op i den ene ende end den anden. Således vil der være en forudbestemt strømningsretning, når der skiftet til jævn belastning, hvor luften vil sige op, hvor loftet er varmest og falde ned, hvor loftet er koldest, som ved det foregående forsøg. Herefter bliver effekten selvforstærkende, da luften igen vil varme loftet mere op, hvor der er opadgående strømning og strømningsmønstret vil ikke ændre sig nævneværdigt.

Undersøgelsen laves ved at betragtet resultaterne for laboratorieforsøg for Case 1, Case 3 og Case 7, der alle er udført med jævnt fordelt varmelast i form af punktvarmekilder eller varmekabler samt forsøgene udført før casene, Case 0, Case 8 og Case 6.

Et andet aspekt, der undersøges i dette kapitel, er, hvor jævn varmelasten skal være før historikken har en indflydelse. Dette undersøges udelukkende på baggrund af CFD-simuleringer.

#### 10.1 Historikkens indflydelse for laboratorieforsøg

På figur 10.1 ses en skitse af forsøgsopstillingerne for de tre cases med jævn belastning samt opstillingen udført før de pågældende forsøg. For Case 1 blev der før forsøget udført adskillige tests for at kortlægge det generelle strømningsmønster og afprøve hotboxen. Der blev således før Case 1 udført tre forsøg med jævn varmebelastning, og før det blev der udført et forsøg med punktlasterne fordelt i den ene ende af rummet. Under dette forsøge var loftspladerne fordelt anderledes, som det også ses på figur 10.1.

For Case 8, der blev udført før Case 3, blev der på daværende tidspunkt kun lavet røgforsøg for at kortlægge strømningen i rummet. Derfor er alle de målte data fra gentagelsen af Case 8 udført d. 15/5-2013. Ved røgforsøget udført d. 5/4 og d. 15/5 blev der lavet samme observationer af strømningsmønstret hvorfor det anses for værende acceptabelt at benytte de målte data fra d. 15/5.

Resultaterne i dette kapitel bygger på fem korte målinger, én lang måling og røgforsøg for hver case. Endvidere er der mellem Case 6 og 7 udført én lang måling, hvor der skiftes fra varmekilderne til varmekablerne. En detaljeret gennemgang af de resultaterne fra de forskellige cases kan ses i appendiks A -*Case 1: Basisopstilling*, appendiks H - *Case 8: Skæv fordeling af varmekilder*, appendiks C - *Case 3: Jævnt fordelt varmebelastning*, appendiks F - *Case 6: Undersøgelse af historik del 1* og appendiks G - *Case 7: Undersøgelse af historik del 2*. Der er ikke lavet en gennemgående resultatbehandling for Case 0 på grund af manglende forsøgsdata, da forsøget blev lavet i den indledende fase af måleprojektet.

På figur 10.1 ses de korrigerede overflade temperaturene målt under den lange måling for hvert forsøg. Temperaturen er målt 12 steder for, hvert forsøg hvorefter temperaturen mellem målepunkterne er interpoleret.



*Figur 10.1:* Skitse af forsøgsopstillinger og målte korrigerede overfladetemperaturer for loftet mellem zone 2 og 3 for Case 0, 1, 8, 3, 6 og 7.

Ud fra overfladetemperaturene ses det, at temperaturfordelingen for casene med jævnt fordelt varmebelastning ligner overfladetemperaturne for de foregående forsøg. Ligeledes ses det, at temperaturfordelingen over loftet bliver mere jævn, når der er jævnt fordelt last, men at de varmeste temperaturer stadig observeres i samme ende af rummet som ved det foregående forsøg. Det ses også at der ved Case 6 og 7 er en temperaturforskel på omkring 2,5°C på loftet mellem zone 2 og 3, mens der ved de resterende forsøg observeres betydeligt højere temperaturforskelle på op til 5,5°C for den enkelte case.

På figur 10.2 ses det generelle strømningsmønster for Case 1, 8, 3, 6 og 7. Der er ikke lavet røgforsøg til observation af strømningsmønstret for Case 0.



Figur 10.2: Observationer af strømningsmønstret for Case 1, 8, 3, 6 og 7.

Det ses, at strømningsmønstret for casene med jævnt fordelt varmebelastning ligner strømningsmønstret for den foregående case. Der er dog små forskelle i observationerne, men de primære strømningsretninger over det nedhængte akustiske loft og i rummet er ens.

Temperatur og hastighedsfordelingen i rummet for hver enkelt case er indtegnet på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*, tegning T5 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 3*, tegning T11 - *Temperaturog hastighedsprofiler for Case 6 og 7*, tegning T13 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 8*. Mens trækrisikoen for hvert målepunkt for hver enkelt case er indtegnet på tegning T2 - *Trækrisiko for Case 1*, tegning T6 - *Trækrisiko for Case 3*, tegning T12 - *Trækrisiko for Case 6 og 7*, tegning T14 -*Trækrisiko for Case 8*. Der er ikke lavet nogle målinger for Case 0.

Hvis temperaturforholdene for de forskellige cases betragtes, ses det, at der ikke er nogle nævneværdige problemer med temperaturen i opholdszonen, hvis der ses bort fra målepunkterne umiddelbart i nærheden af varmekilderne. Der er dog en tendens til varmere temperaturer i den del af rummet, hvor der er opadgående strømning, end hvor der er nedadgående strømning. Forskellen er mellem 0,7-1°C.

Betragtes hastighederne ved de forskellige forsøg ses det, at der flere steder er målt uhensigtsmæssige høje hastigheder. For at undersøge om de giver anledning til træk betragtes den beregnede trækrisiko for hver målepunkt i opholdszonen for hver case. På figur 10.3 ses områderne med trækrisiko over 20% skitseret. Det ses, at der observeres træk i nedfaldsområdet for alle fem cases. Ligeledes ses det, at der for casene med jævnt fordelt varmebelastning observeres problemer med trækrisikoen færre steder. Yderligere ses det, at de fleste af målingerne med trækrisiko over 20% er observeret i gulvhøjde.

Konklusionen på laboratoriemålingerne i dette afsnit er at historikken har en betydning. Det ses tydeligt fra figur 10.1 og figur 10.2, at strømningen og overfladetemperaturen har en sammenhæng og er gensidig afhængige af hinanden. Således er loftet varmest, hvor luftstrømningen er opadgående, mens loftet er koldest, hvor luften er nedadgående. Det vides dog ikke med sikkerhed om loftet er varmest i den ende, fordi luften stiger op eller om luften siger op, fordi loftet er varmest. Dog indikeres det, at strømningen er mest dominerende, da det varme hjørne observeret under samtlige målinger ikke er nok til at påvirke strømningsretningen ved Case 7.



*Figur 10.3:* Skitsering af målepunkter for DR i opholdszonen for Case 1, 8, 3, 6 og 7. Rød markering angiver DR>20%. Grøn markering angiver DR<20%.

#### **10.2** Lastfordeling og historik

For at undersøge, hvor jævn varmebelastningen skal være for, at historikken har en betydning, opbygges en CFD-model. CFD-modellen opbygges, som beskrevet i afsnit 5 - *CFD-model*, men med lasten jævnt fordelt langs gulvet. Den jævne last deles i to, så det er muligt at variere forholdet mellem belastningen for hver ende af rummet. Den samlede belastning holdes altid på 930 W. Opbygningen kan ses på figur 10.4. På figuren ses yderligere placeringen af de brugte monitor points i de fire hjørner, der bruges til at evaluere strømningsretningen. Monitor pointsene i hjørnerne er placeret i samme højde som det nedhængte loft.



*Figur 10.4:* Opbygning af CFD til undersøgelse af historik med indtegnet placering af monitor points.

Undersøgelsen laves ved at lave en række simuleringer, hvor startværdierne for den enkelte simulering sættes lig resultatet for den forrige simulering. Ved første simulering yder Last 1 100% af den samlede varmebelastning. Ved den næste simulering bruges den forrige simulering som startværdier, hvorefter Last 1 nedjusteres til 75%, mens Last 2 bidrager med 25% af den samlede last. Herefter nedjusteres Last 1 gradvist indtil 0% tilføres ved Last 1. Herefter udføres samme forsøg, men hvor Last 1 starter med at bidrage med 0 % af lasten, hvorefter den opjusteres, mens Last 2 nedjusteres fra en startværdi på 100%.

Ved simuleringerne opnås, som førnævnt ikke en stabil løsning. På figur 10.5 ses hastighederne i monitor points i hver hjørne, se figur 10.4, for simuleringen, hvor Last 1 yder 100% af den samlede varmebelastning. Det ses, at der altid for denne simulering er opadgående strømning i Hjørne 1 og 2, mens der altid er nedadgående strømning i Hjørne 3 og 4. Der er en stor variation i hastigheden, hvor det ses, at når der er høj hastighed i Hjørne 1, er der lav hastighed i Hjørne 2. Det samme er gældende for Hjørne 3 og 4. Dette mønster er ses for alle simuleringerne.

For at sammenligne simuleringerne beregnes en middelværdi af hastigheden i monitor points i Hjørne 1 og 2 over et antal iterationer, hvor variationen i hastigheden er periodisk, som det ses på figur 10.5. Ligeledes beregnes en middelværdi for Hjørne 3 og 4. Middelværdierne kan også ses på figuren.



*Figur 10.5:* Hastighedsvariation og middelværdi i de 4 hjørner for simuleringen med belastningsandel for Last 1 på 100 %.

Ud fra simuleringerne fås resultatet på figur 10.6 for middelværdien beregnet for Hjørne 1 og 2. Det samme billede opnås ved afbildning af middelværdien for Hjørne 3 og 4, dog spejlet omkring x-aksen. Det ses af simuleringerne, at den primære vertikale strømning ved alle simuleringerne foregår gennem de yderste perforerede plader. Ligeledes ses det, at strømningsmønstret vender brat ved et givent punkt. Ved at udføre simuleringerne med startpunkt med hhv. en Lastandel på 0 og 100%, ses det at historikken har en betydning. I dette tilfælde vises det, at historikken har en betydning ved en lastandel på 45% til 60 %. Det skal dog pointeres, at der under undersøgelsen er en konstant overfladetemperatur på loftet. Effekten fra overfladestemperaturen på loftet kan meget vel give historikken betydning i et større interval end vist ved denne undersøgelse.



*Figur 10.6:* Vertikal middelhastighed af Hjørne 1 og 2 som funktion af andelen af belastning fra Last 1 med start ved hhv. 0% og 100%.



*Figur 10.7:* Vertikal middel-, min og makshastighed af Hjørne 1 og 2 som funktion af andelen af belastning fra Last 1 med start ved hhv. 0% og 100%.

De målte minimum- og maksimumværdier for den vertikale lufthastighed for Hjørne 1 og 2 ved hver simulering kan ses på figur 10.7. Det ses, at for hver simulering ligger enten minimum- eller maksimalværdien for den vertikale hastighed omkring 0  $^{\rm m}$ /s. Det ses også, at der i området, hvor der er fundet forskellige strømningsretninger, observeres en større forskel mellem minimumog maksimumværdierne.

### 10.3 Delkonklusion

Ud fra analyserne af laboratorieforsøgene foretaget i dette kapitel er det konstateret, at historikken har en betydning for strømningsretningen i rummet, når varmebelastningen er jævnt fordelt i rummet.

Det er også vist, at strømningsretningen og overfladetemperaturen er gensidige afhængige. Således findes der ved opadgående strømninger højere temperaturer på loftet, mens der ved nedadgående strømninger er lavere temperaturer på loftet. Dette er ligeledes observeret i 8.

Yderligere er det vist ved CFD-simuleringer, at historik har en effekt, når lasten er fordelt ved en 45/60% fordeling i rummet. Ved denne undersøgelse er effekten af overfladetemperaturen ikke medtaget. Effekten af overfladetemperaturen skønnes at udvide området, hvor historikken har betydning yderligere.
### Målinger i Visionshuset

I dette kapitel sammenlignes resultaterne fra målingerne i Visionshuset med tendenserne observeret ved laboratorieforsøgene og CFD-simuleringerne.

Der udføres målinger på et mødelokale i Visionshuset. Målingerne, der blev udført d. 21/5 og d. 24/5, er beskrevet i kapitel 3 - *Visionshuset*, og metoden til resultatbehandlingen kan ses i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*. I dette afsnit benyttes ikke korrigerede temperaturer i beregningerne. Resultatbehandlingen er udført til dels i Excel og MATLAB og kan findes på bilags-CD - "*Forsøg Visionshuset*" og bilags-CD - "*Forsøg Visionshuset*".

### 11.1 Vejrforhold

Under måledagene og i perioden op til måledagene kan temperaturforhold og solstråling ses på figur 11.1 og 11.2.

Det ses på figur 11.1, at der er stor forskel på den målte solstråling for måledagene. På den første måledag, d. 21/5, var der gråvejr, hvorfor det også ses, at den målte totale solstråling er lig den diffuse stråling for den dag. På den anden måledag, d. 24/5, var der solskin hele dagen med enkelte skyer, hvorfor det ses, at der måles højere værdier for total solstråling for denne dag.

Betragtes udetemperaturen ses det, at udetemperaturen på de to måledage er i samme størrelsesorden, og at der før målingen d. 21/5 har været en periode med høje temperaturer.



Figur 11.1: Solstråling for perioden hvor der blev udført målinger på Visionshuset.



Figur 11.2: Udetemperaturer for perioden hvor der blev udført målinger på Visionshuset.

### 11.2 Rumforhold

Under forsøgene måles overfladetemperaturen på ydervæggen og på én af de interne vægge mod kontoret i rummet. De målte temperaturer stiger med omkring 0,1°C og 0,2°C over hver forsøgsdag med en middelværdi på hhv. 23,4°C og 22,8°C for d. 21/5 og d. 24/5 for den indvendige væg og en middelværdi på hhv. 23,3°C og 22,4°C for den udvendige væg.

De målte overfladetemperaturer på loftet for hver forsøgsdag kan ses på figur 11.3. Der er en variation på op til 2,7°C mellem de målte overfladetemperaturer på loftet. Variationen skyldes, at der kun er køleslanger i den ene halvdel af loftet, som det ses på figur 3.6. Det ses også, at overfladetemperaturerne på den kolde side af dækket falder omkring 0,2°C over dagen. Temperaturfaldet sker på grund af styringsstrategien, hvor køledækket kun kører i brugstiden.



*Figur 11.3:* Målte middeltemperaturer i målepunkterne på loftet for d. 21/5 og d. 24/5 samt variation af overfladetemperatur over tid for forsøget udført d. 21/5-2013.

På figur 11.4 ses den primære varmebelastning under forsøgene. Varmebelastningen på belysning er ikke indtegnet på figuren, da den samlede belastning fra belysning er i omegnen af 27 W, hvilket er meget lav i forhold til de resterende varmebelastninger. Omregningen af diffus og total solstråling til solindfald gennem vinduet mod øst er udført i BSim, hvor der tages højde for solens placering for det aktuelle tidspunkt på dagen samt orienteringen af vinduet. For forsøget udført d. 21/5 er belastningen fra solen ensartet for hele dagen,



da vejret var overskyet. Derfor er der kun lavet én skitse for forsøgene udført den dag.

*Figur 11.4:* Primære varmebelastninger for de udførte forsøg i Visionshuset.

Under forsøget tilføres der køling via det termoaktive betondæk, men der fjernes også en del varme via ventilationen. Nærmere detaljer om varmeoverførslen bliver beskrevet i kapitel 13 - *Køleeffekt og kølekapacitetskoefficient* og kapitel 14 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling*.



Figur 11.5: Observationer fra røgforsøg fra d. 21/5-2013.

#### 11.3 Generelt strømningsmønster

På figur 11.5 ses observationerne fra røgforsøgene d. 21/5 skitseret. Det ses på snit A-A og snit B-B, at strømningen stiger op i midten og strømmer over det nedhængte loft til hver ende af rummet, hvor det falder ned. I denne side af rummet sker den opadgående strømning i området, hvor varmekilderne er placeret. Strømningsmønstret er markant anderledes, end hvad der er observerede ved laboratorieforsøgene, dog med strømningen på den lange led af rummet. Den største del af strømningen over det nedhængte loft sker i området skitseret på snit A-A, som dækker den del af loftet med termoaktive dæk.

Ud fra strømningsmønstret skitseret på snit C-C ses det, at der i området ved indblæsningen ikke er observeret nogen nævneværdig vertikal strømning gennem de perforerede plader. Dette betyder ikke, at der ikke foregår nogen strømning, men at den dominerende strømning fra ventilationsarmaturet medfører, at denne ikke kan ses ved røgforsøg.

#### **11.4 Generelle komfortforhold**

På den først måledag laves der målinger af de generelle komfortforhold. Profiler med de beregnede middeltemperaturer og -hastigheder kan ses på tegning T15 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Visionshuset*. Det ses at alle temperaturerne ligger i området mellem 23 og 26°C, hvorfor der er et acceptabelt temperaturniveau i rummet. Ligeledes ses det, at der i opholdszonen kun er målt en høj hastighed på 0,17 m/s ved måling C4 i højden 1,7 m.

For at undersøge nærmere for træk beregnes trækrisikoen for hver målepunkt. De beregnede trækrisikoer er indtegnet på tegning T16 - *Trækrisiko for Visionshuset*, hvor det ses, at den høje hastighed ikke giver anledning til træk. Der er ikke beregnet trækrisikoer over de acceptable 20% i opholdszonen. Dog er der under loftet omkring indblæsningsarmaturet mange steder beregnet trækrisikoer på op til 29%. Da det ikke er i opholdszonen anses det ikke for problematisk.

På figur 11.6 ses temperaturvariationen for søjle B for langtidsmålingen d. 21/5, hvor der ses en lille temperatursvingning for de to øverste termoelementer, hvilket dog ikke forplantes videre ned i rummet.



*Figur 11.6:* Variationen af temperaturene målt for søjle B for langtidsmålingen.

### 11.5 Ændring af placering af varmekilder

På figur 11.7 og 11.8 ses strømningsmønstret observeret under ændringen af placeringen og størrelsen af varmebelastningen i rummet.

Under forsøg 1 ses det, at strømningsmønstret ligner strømningsmønstret observeret d. 21/5 bortset fra en opadgående strømning ved vinduet mod øst, der forårsager en opadgående strømning i hele den ende af rummet. Denne strømning gør at en meget stor del af nedfaldet sker gennem de perforerede plader over vinduet mod sydvest.

Fra forsøg 2 ses det igen, at der primært er opadgående strømning, hvor varmekilderne er placeret og hvor solindfaldet er stærkest. På grund af varmekildernes placering i den samme side, som den primære solbelastning, er der nedadgående strømning på langs af rummet. Det ses ligeledes, at der stadig er nedadgående strømning ved de perforerede plader over det sydvest vendte vindue.

Ved forsøg 3 er der kun en forskel på 116 W i solbelastningen med den stærkeste belastning gennem det sydvest-vendte vindue. Det ses på figur 11.8, at den stærkeste belastning forårsager meget stærk nedadgående strømning midt i rummet, hvor der ikke er placeret varmekilder og en stærk opadgående strømning over varmekilderne og det sydvest-vendte vindue.



Figur 11.7: Observationer fra røgforsøg for Forsøg 1 og 2 fra d. 24/5-2013.



Figur 11.8: Observationer fra røgforsøg for Forsøg 3 og 4 fra d. 24/5-2013.

For forsøg 4, hvor varmekilderne igen er fordelt hele vejen rundt om bordet med stærk solbelastning på det sydvest-vendte vindue, ses det, at strømningsmønstret igen ligner strømningsmønstret observeret d. 21/5. Dog er der er meget stærk nedadgående strømning ved de perforerede plader ved døren. Under forsøg 4 blev der ved det sydvest vendte vindue observeret et lille område med opadgående strømning som efter opstigningen blev presset ned af luftstrømmen kommende fra over det nedhængte loft, se snit A-A for forsøg 4 på figur 11.8.

For de udførte forsøg er middelhastighederne, temperaturene og trækrisikoen også beregnet for målepunkterne i hver hjørne af mødelokalet. Der ses dog ingen nævneværdig ændring af hverken hastighedsprofiler eller temperaturforhold under ændringen af varmebelastningen, ligesom der ingen steder blev beregnet trækrisiko over den tilladelige grænse.

#### 11.6 Delkonklusion

Under forsøgene udført i Visionshuset er det blevet bekræftet at strømningen foregår på den lange led af rummet, dog med opstigning i midten af rummet, som er markant anderledes end tendenserne observeret under laboratoriemålingerne og CFD-simuleringerne. Det ses, at placeringen af varmekilderne er meget vigtigt for strømningsretningen, og at solens påvirkning er nok til at forårsage en ændring i strømningsmønstret. Undersøgelserne lavet ved Visionhuset viste også, at der ingen problemer er med træk under forholdene, hvor forsøget blev udført.

### **Dynamisk CFD**

I dette kapitel vises resultaterne af en dynamisk simulering af CFD-modellen for Case 1.

Gennem målingerne i rapporten ses det, at der er muligheder for, at systemet bestående af et termoaktivt betondæk og et nedhængt akustisk loft med perforerede plader til luftgennemstrømning ikke er et stabilt system. Dette ses ud fra de fluktuerende målinger af temperaturen, som det ses på figur 7.5. Yderligere har der ved de statiske CFD-simuleringer også været en tendens til fluktuerende hastigheder og temperaturer.

Det vurderes at være, fordi der er flere løsninger til problemet, og at simuleringen skifter mellem forskellige løsninger. For at undersøge disse løsninger nærmere laves en dynamisk CFD-simulering.

Til simuleringen benyttes modellen for Case 1 med jævnt fordelt punktlaster som er beskrevet i afsnit 7.2 - *Resultater fra CFD-simuleringerne*. Simuleringen køres over en periode på 30 minut, hvor de første 10 minutter er kørt med tidsskridt på 10 sekunder, mens de sidste 20 minutter er kørt med tidsskridt på 20 sekunder. For hver tidsskridt stopper simuleringen, hvis løsningen konvergerer eller har nået 3000 iterationer.

Ved simuleringen fremkom forskellige løsninger. De første 7 minutter ændres strømningsmønstret markant flere gange, hvorefter løsningen stabiliseres, hvor den skifter mellem to lignende løsninger. Resultaterne under simuleringen kan ses på figur 12.1, 12.2 og 12.3, hvor hastighedsmålingerne i monitor points også ses som funktion af tid.



*Figur 12.1: Resultater fra dynamisk CFD-simulering under stabilisering.* 



Figur 12.2: Resultater fra dynamisk CFD-simulering under stabilisering.



Figur 12.3: Resultater fra dynamisk CFD-simulering.

Under simuleringen starter luften med at stige kraftigt op ved de seks varmekilder og fortsætter op over det nedhængte loft, hvor den bliver kølet ned og falder ned gennem de perforerede plader, hvor der ikke er placeret varmekilder under, se figur 12.1 for tiden 20 sekunder.

Herefter skifter luftstrømningen til opstigning ved de yderste perforerede plader og nedfald i den midterste, som det ses på figur 12.1 ved tiden 70 sekunder.

Ved tiden 150 sekunder er strømningen igen ændret, se figur 12.2. Denne gang er luftstrømningen skiftet, således der er strømning på den korte led af rummet.

Derefter ændres strømningen til at strømme på den lange led af rummet. Et stadie af overgangsfasen kan ses på figur 12.2 ved tiden 230 sekunder.

På figur 12.3 ses en mulig løsning af modellen. Denne løsning har i simuleringen ikke ændret sig i 25 minutter, hvorfor den vurderes ikke at ændre sig uden påvirkning udefra. Dog vurderes det, at der ved et andet startgæt kunne være opnået en anderledes løsning, som det er påvist i appendiks 10 - *Historikkens indflydelse på strømningsmønstret*.

Det ses, at strømningen er ændret til samme strømningsmønster, som er observeret ved målingerne og er fremkommet ved de statiske CFD-simuleringer. Det ses, at løsningen fluktuerer lidt. Tre forskellige resultater er optegnet for den endelige løsning, hvor det ses, at der er en lille variation i temperaturene og hastighederne, men at det primære strømningsmønster er ens for de tre modeller.

Sammenlignes frekvensen for fluktureringen af den dynamiske CFD-simulering med målingerne lavet i laboratoriet observeres lignende frekvenser, hvor frekvensen for CFD-simuleringen er ca. 3 minutter, se figur 12.3, mens den for målingen i laboratoriet er ca. 3,5 minutter, se figur 7.5.

# Del III Køleeffekt og varmeoverførsel

- Køleeffekt og kølekapacitetskoefficient

- Varmestrøm ved konvektion og stråling



## Køleeffekt og kølekapacitetskoefficient

I dette kapitel sammenlignes den beregnede køleeffekt og kølekapacitetskoefficient for hver af de udførte forsøg i både laboratoriet og Visionshuset.

Den beregnede køleeffekt for hvert forsøg udført i laboratoriet og i Visionshuset kan ses i tabel 13.1. Det ses at køleeffekten for visionshuset er markant mindre end for forsøgene udført i laboratoriet.

Laboratorieforsøg								Visions-	
Case	Case	Case	Case	Case	Case	Case	Case	huset	
1	2	3	4	5	6	7	8	21/5	24/5
49,3	50,8	49,0	48,8	47,7	50,3	49,2	51,7	10,4	10,6

**Tabel 13.1:** Køleeffekt for forsøgene udført i laboratoriet og Visionshuset. Værdier i <sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>.

Ved beregningsmetoden beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt* beregnes kølekapacitetskoefficienten for laboratorieforsøgene ud fra varmestrømmen genne loftet vist i tabel 13.1, middelværdi af overfladetemperaturen på loftet og rumtemperaturen i højden 1,1 m. Varmestrømmen gennem loftet mellem zone 2 og 3 er fundet ud fra den opstillede varmebalance for hotboxen, som er beskrevet i appendiks M - *Varmebalance*.



*Figur 13.1:* De beregnede værdier for kølekapacitetskoefficienten for forsøgene udført i laboratoriet.

På figur 13.1 ses en graf over de beregnede kølekapaciteter for de otte cases udført i laboratoriet for langtidsmålingerne. Det ses, at der forekommer en forskel mellem de beregnede værdier af kølekapaciteten med en variation på  $1,2 \text{ W/}_{\text{m}^2 \text{ K}}$ .

Endvidere beregnes kølekapacitetskoefficienten for forsøgene udført i Visionshuset, hvor de beregnede værdier kan ses på figur 13.2. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra effekten tilført køledækket over brugstiden i forhold til to forskellige referencetemperaturer. For at sammenligne med de fundne værdier fra laboratorieforsøgene bruges overfladetemperaturen som referencetemperatur. For at sammenligne med de fundne værdier fra forsøgene udført på DTU i forbindelse med undersøgelsen af termoaktive dækelementer, beskrevet i afsnit 2.2 - *Erfaring med termoaktive konstruktioner* bruges middeltemperaturen som referencetemperatur. De anvendte temperaturer er ligeledes en middel over brugstiden. På figur 13.2 indikerer de blå krydser værdier beregnet ud fra en middelværdi af overfladetemperaturen på køledækket, og



Figur 13.2: De beregnede værdier for kølekapacitetskoefficienten for forsøgene udført i Visionshuset. De blå krydser er beregnet ud fra overfladetemperaturen, mens de røde krydser er beregnet ud fra middelvæsketemperaturen.

de røde krydser indikerer værdier beregnet ud fra middeltemperaturen på kølevandet.

Ved at sammenligne den beregnede kølekapacitetskoefficienten ved brug af overfladetemperaturen ses, at værdierne for laboratoriet og Visionshuset er i samme størrelsesorden, dog er der målt en lavere værdi i Visionshuset på den sidste måledage. Ved at betragte den beregnede kølekapacitetskoefficient ved brug af fremløbstemperaturen, ses det, at der er målt betydelig lavere værdier end for forsøgene fra DTU. Det skal dog bemærkes, at DTU har udført forsøgene under kontrollerede forhold, hvilket er vanskeligt for målingerne udført i Visionshuset.

## Varmestrøm ved konvektion og stråling

I dette kapitel undersøges det, hvor stort en del af varmestrømmen, som foregår ved hhv. stråling og konvektion.

I hotboxen er det beregnet at der overføres 96,9-99,7% af varmen gennem loftet mellem zone 2 og 3 ved at opstille en varmebalance for rummet som beskrevet i appendiks M - *Varmestrøm ved konvektion og stråling*. I mødelokalet overføres 356 W og 362 W af den samlede varme gennem køledækket for den første og anden måledag, mens 135 W overføres gennem ventilationen for den første måledage og 145 W for den anden måledage.

Det er undersøgt, hvor stor en del af varmestrømmen fra rummet til overfladen på loftet, der sker gennem hhv. konvektion og stråling. Beregningsmetoden og forudsætningerne er beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling*, hvor andelen overført ved stråling beregnes ved brug af *Radiositymetoden*[31] og resten af varmestrømmen gennem loftet regnes overføres ved konvektion. Beregning kan ses i bilags-CD - *"Forsøg Laboratorie"* under fanebladet *Radiosity method*.

På figur 14.1 ses et diagram over fordelingen af hhv. stråling og konvektion for de udførte forsøg i laboratoriet, hvor den blå del af diagrammet viser andelen overført ved stråling og den grønne del viser andelen overført ved konvektion.



*Figur 14.1:* Fordelingen af hhv. stråling og konvektion for laboratorieforsøgene. Blå viser strålingsdelen og grøn viser konvektionsde-118 len.

Det ses ud fra figur 14.1, at fordelingen mellem stråling og konvektion er næsten ens, men hvor størstedelen varmestrømmen overføres ved stråling. Det bemærkes dog for Case 2 og 8, at den største del af varmestrømmen overføres ved konvektion. Ved disse forsøg blev der generelt observeret højere luftmængder end ved forsøgene med jævnt fordelt varmebelastning.



*Figur 14.2:* Fordelingen af hhv. stråling og konvektion for forsøgene udført i Visionshuset.

På figur 14.2 ses fordeling mellem stråling og konvektion for forsøgene udført i mødelokalet i Visionshuset. Den blå del af diagrammet viser andelen af varmestrømmen overført ved stråling, og den grønne del viser andelen overført ved konvektion. Det ses, at fordelingen mellem stråling og konvektion er lidt anderledes i forhold til forsøgene fra laboratoriet, hvor størstedelen af varmestrømmen i mødelokalet foregår via. konvektion.

# Del IV Afslutning

- Perspektivering
- Konklusion





### Perspektivering

I denne perspektivering udarbejdes nogle retningslinjer for brugen og dimensioneringen af rum med termoaktive konstruktioner ud fra de observationer og målinger, som er blevet foretaget i laboratoriet og i Visionshuset.

I forbindelse med de udførte målinger og observationer fra laboratoriet og Visionshuset udformes nogle retningslinjer for brugen af termoaktive konstruktioner i kombination med nedhængte akustiske lofter i forhold til at opnå et acceptabelt termiske indeklima. Målingerne i laboratoriet viste, at der kan forekomme trækrisiko enkelt steder i opholdszonen, især i området med nedadgående strømning. Det er især i ankelhøjden 0,1 m, der observeres trækrisiko. Målingerne udført i Visionshuset viste til gengæld, at der ikke forekommer problemer i opholdszonen. Der er dog en forskel mellem overfladetemperaturen på det kolde loft i laboratoriet og køledækket i Visionshuset samt rumtemperaturen målt de to steder. Forskellen på overfladetemperaturen og rumtemperaturen i Visionshuset er 2-4°C, mens temperaturforskellen i hotboxen er omkring 9°C. Det vurderes, at træk kunne være et problem i tilfælde, hvor mere køling via de termoaktive konstruktioner er nødvendig. I målingerne i Visionshuset blev der målt en køleeffekt på omkring  $10 \text{ W}/_{\text{m}^2}$  mens der under forsøgene i laboratoriet var en køleeffekt på omkring 50 <sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>. Dog vurderes, at der skal udføres flere komfortmålinger på virkelige forhold for kunne danne et mere klart billede af det termiske indeklima i situationer, hvor en større del af kølingen foregår via det termoaktive dæk.

Ud fra undersøgelserne af strømningsmønstret i laboratoriet og Visionshuset viste det, at den primære strømning foregår på langs af rummet, hvor der er op- og nedadgående strømning gennem de yderste perforerede plader. Ydermere viste undersøgelserne, at den opadgående strømning vil forekomme i det område af rummet, hvor varmebelastningen er størst, og den nedadgående strømning vil forekomme i den modsatte del af rummet. For at undgå trækgener bør der, derfor foretages en evaluering af, hvor i rummet der kan forekomme solindfald fra vinduer, hvor udstyr placeres, samt hvor personerne primært opholder sig i rummet for at kunne kortlægge området med op- og nedadgående strømning. Derudover bør det vurderes, hvor personerne i rummet skal placeres for at undgå træk, da personerne bør opholde sig udenfor området med nedadgående strømning pga. trækrisiko. Det anbefales, at personerne undgår at opholde sig under de yderste perforerede plader i rummet, og at de herudover er jævnt fordelt i rummet. På figur 15.1 ses nogle skitser af forskellige scenarier med forskellige lastpåvirkninger, hvor de kritiske opholdszoner er markeret. Dog skal det bemærkes, at hvis en person placerer sig i nedfaldsområdet vil personen afgive varme, der muligvis kan ændre strømningsmønstret afhængig af de resterende laster i rummet.

Ud fra undersøgelserne for strømningsmønstret viste det, at den primære strømning foregår gennem de yderste perforerede plader, og at der forekommer lidt strømning igennem de midterste perforerede plader, hvilket kan tyde på, at de midterste plader er unødvendige for systemet. Dette kan sammenholdes med resultaterne fra forsøgene omhandlende dækningsgradens indflydelse på køleeffekten udført af DTU, som viste, at der kan opnås en høj dækningsgraden af loftet uden køleeffekten og kølekapacitetskoefficienten påvirkes, se afsnit 2.3 - *Termoaktive konstruktioner i kombination med nedhængt loft*. Det er dog ikke undersøgt, om det er muligt at tildække den midterste del af loftet uden, at det påvirker strømningsmønstret.

Endvidere er placeringen af ventilationsarmaturerne undersøgt, hvilket viste, at det er underordnet, hvor i rummet indblæsnings- og udsugningsarmaturet er placeret, da dette ikke har en påvirkning på områderne med op- og nedadgående strømning i rummet. Dog blev der i Visionshuset observeret stærke horisontale strømninger fra indblæsningsarmaturet, som kan have en effekt på strømningen gennem de perforerede plader i nærheden.



*Figur 15.1:* Skitserede scenarier med forskellige lastpåvirkninger og områder med vurderet risiko for træk.

### Konklusion

I dette kapitel præsenteres en samlet konklusion for undersøgelsen af komfort og strømningsforhold i et rum med termoaktive konstruktioner i kombination med nedhængte akustiske lofter.

Undersøgelserne i projektet er lavet på baggrund af laboratorieforsøg, CFDsimuleringer samt målinger i et mødelokale i Visionshuset, hvor der er brugt termoaktive betonkonstruktioner og et nedhængt akustisk loft, hvor nogle af loftspladerne er erstattet med perforerede plader til luftcirkulation.

Gennem projektet er det vist, at strømningsmønstret er let omskifteligt og i høj grad afhænger af, hvad der foregår i rummet.

Generelt er det observeret, at den primære strømning foregår på den lange led af rummet gennem perforerede plader placeret yderst. Således sker den primære opadgående strømning i den ene ende af rummet og den primære nedadgående strømning i den anden ende. Der er kun observeret en lille strømning gennem de midterste perforerede plader. Strømningen er dog ikke stabil, men varierer, således der skiftevis er primært nedfald i hver sit hjørne af rækken med perforerede plader. Dette er også tilfældet for de perforerede plader med opadgående strømning, således den primære strømning hele tiden foregår diagonalt i rummet.

Det blev vist, at strømningsretningen var stærkt påvirket af placeringen af varmekilderne, hvor der altid vil forekomme opadgående strømning i den ende med den største varmebelastning og nedadgående strømning i den anden ende. Strømningen foregår stadig primært gennem de yderste perforerede plader. Det blev ligeledes vist at, hvis alle varmekilderne var placeret i midten er den primære op- og nedadgående strømningen stadig gennem de yderste perforerede plader på den lange led af rummet.

Ved målingerne i Visionshuset blev der observeret en anderledes strømningsretning, da der her primært var opadgående strømning gennem de midterst perforerede plader i rummet og primært nedadgående strømning gennem de yderste plader i hver side, men stadig på den lange led. Den anderledes strømning kan skyldes den radikalt anderledes lastplacering med stor påvirkning fra solindfald eller den lille forskel mellem overfaldetemperaturen på køleloftet og rumtemperaturen på 2-4°Cifht. 9°Ci laboratorieforsøgene.

I projektet blev det ligeledes konstateret, at strømningen bliver påvirket af, hvad der tidligere er foregået i rummet, når lastfordelingen er jævn eller fordelt jævnt med ca. 45-60% af lasten i hver ende.

Undersøgelsen af placeringen af ventilationsarmaturerne og ventilationsmængden viste at det ikke har nogen effekt på den primære strømningsretning. Dog blev det observeret ved målingerne i Visionshuset, at den stærke horisontale luftstrømning influere luftstrømningen gennem de perforerede plader i nærheden af armaturet.

Med hensyn til den termisk komfort er der observeret problemer med trækrisiko enkelte steder ved forsøgene i laboratoriet, men ingen steder ved målingen i Visionshuset. Det vurderes, at der kan opstå problemer med træk i den virkelige bygning, hvis en større del af varmelasten blev fjernet gennem køleloftet. For forsøget i Visionshuset fjernes omkring  $10 \text{ W}_{m^2}$  gennem loftet mens der fjernes omkring  $50 \text{ W}_{m^2}$  ved laboratorieforsøgene. I laboratoriet blev der især observeret høje trækrisikoer langs gulvet. Yderligere kan der være problemer i nedfaldsområdet, som dog sjældent når opholdszonen.

I projektet blev det yderligere påvist, at der er større problemer med diskomfort, når belastningen er koncentreret i den ene ende af rummet, end når den er jævnt fordelt.

Ydermere er kølekapaciteten beregnet for alle forsøgene for at undersøge om, der forekommer en sammenhæng mellem forsøgene både i laboratoriet og i Visionshuset. Ved at sammenligne den beregnede kølekapacitetskoefficient ved brug af overfladetemperaturen ses, at værdierne for Visionshuset er højere end værdierne for laboratoriet, hvor der er beregnede værdier på hhv. 7,5-9,8  $W/m^2 K$  og 5,2-6,3  $W/m^2 K$ . Ved at betragte den beregnede kølekapacitetskoefficient ved brug af fremløbstemperaturen ses det, at der er målt betydelig lavere værdier end for forsøgene fra DTU, hvor de beregnede værdier for Visionshuset er omkring 2,2-2,4  $W/_{m^2 K}$ . Det skal dog bemærkes, at DTU har udført forsøgene under kontrollerede forhold, hvilket er vanskeligt for målingerne udført i Visionshuset.

For forsøgene udført i laboratoriet og i Visionshuset undersøges, hvordan varmestrømmen fra rummet til den kolde overflade på loftet er fordelt mellem stråling og konvektion. Fordelingen mellem stråling og konvektion for forsøgene fra laboratoriet og Visionshuset viste en næsten ligelig fordeling.
# Litteratur

- [1] Energi Styrelsen . Byggeriets energiforbrug. URL: http: //www.ens.dk/da-DK/ForbrugOgBesparelser/IndsatsIBygninger/ Sider/Forside.aspx. Downloaded: 17-12-2012.
- [2] Heiselberg P. *Integrated Building Design*. Number ISSN: 1901-7286. Aalborg University - Department of Civil Engineering, 2007.
- [3] Heiselberg P. *Natural and Hybrid ventilation, Lecture Notes*. Technical report, 2006.
- [4] Hansen J. O, Jacobsen T. D, og Weitzmann P. *Det skjulte indeklima* -*Termoaktive konstruktioner*. VVS, 13, 2002.
- [5] Weitzmann P. *Køling og opvarmning med termoaktive konstruktioner*. Arkitekten, 11:38–41, 2006.
- [6] ELFORSK . Projekt 338-041 + 343-011 Fuldskala demonstration af termoaktive konstruktioner. 2012.
- [7] Weitzmann P, Pittarello E, og Olesen B. W. *The cooling capacity of the Thermo Active Building System combined with acoustic ceiling.* 2008.
- [8] Arnason B. O. *Energy design of the suspended ceiling in an office building*. Technical report, 2001.
- [9] Hummelshøj R. M og et al. . *Komfortforhold og lastudjævning ved energieffektiv køling med termoaktive konstruktioner - Fase 2: Analyse og praktiske forsøg.* Technical report, 2005.
- [10] Hummelshøj R. M, Olsen P. K, Olsen B. W, Passov F, og Nissen E. H. Fuldskala demonstration af termoaktive konstruktioner - Hovedrapport. Number Projektnr. P-63292. COWI, 10-02-2012.

- [11] Saint-Gobain E. *Knowledge Guide Thermally Activated Building Systems*. Technical report, 2010.
- [12] Hummelshøj R. M og Jensen J. B. Komfortforhold og lastudjævning ved energieffektiv køling med termoaktive konstruktioner - PSO 2003-Forskning og Udvikling i Effektiv Energianvendelse. Technical report, 2003.
- [13] COWI . Opvarmning og køling med termoaktive betonelementer. URL: http://www.cowi.dk/SiteCollectionDocuments/cowi/da/ menu/03/%20Projekter/06.%20Forsyning/3.%20Energiplanlaegning% 20og%20systemer/Andre%20filtyper/0233-1982-080d-05a\_high.pdf. Downloaded: 11-12-2012.
- [14] Abildgaard A. Visionshuset skifter ejer. NORDJYSKE Stiftstidende, 9-11-2012:6–7, 2012.
- [15] Krak. Krak. URL: http://www.krak.dk. Downloaded: 10-02-2013.
- [16] Nielsen H. H. Arkitektonisk eksperimentarium i industriens spor. Byggeri+Arkitektur, 42:46–49, 2012.
- [17] Søren Enggard A/S . Eternitgrunden nyheder. URL: http://www.eternitgrunden.dk/eternitgrunden/Kontakt-\_salg\_ og\_udlejning/Nyheder.aspx, 10-10-2012. Downloaded: 10-02-2013.
- [18] Søren Enggaard A/S, Svend Pape, KPF Arkitekter A/S, og COWI A/S . *Tekniske tegninger*. Technical report, 2010.
- [19] Hansen C. H og Strømkjær TØ. Analyse af styringsstrategier ved anvendelse af termoaktive dækelementer. Technical report, 2013.
- [20] Dansk Standard . DS474 Code for Thermal Indoor Climate. 1. udgave. Dansk Standard, 1993.
- [21] Dansk Standard . DS/EN ISO 7726:2001 Ergonomi i termisk miljø -Instrumenter til måling af fysiske størrelser. 1. udgave. Dansk Standard, 2001.

- [22] Rockwool Rockfon . Tropic. URL: http://produkter.rockfon.dk/ dk/products/modular-ceilings/basic-white/tropic.aspx. Downloaded: 22-02-2013.
- [23] VINK A/S. PVC & PVC/PMMA (Vikupor®, Kömacel® samt Kydex®) plader, rundstænger, rør og svejsetråd. URL: http://vink.dk/da-DK/ Produkter/Industri/PVC.aspx. Downloaded: 22-02-2013.
- [24] Pomianowski M. Full-scale investigation of the dynamic heat storage of concrete decks with PCM and enhanced heat transfer surface area. 2012.
- [25] Dansk Standard . DS/EN ISO 15251 Input-parametre til indeklimaet ved design og bestemmelse af bygningers energimæssige ydeevne vedrørende indendørs luftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustik. 1. udgave. Dansk Standard, 2007.
- [26] Steen-Thde M, Hyldgrd C. E, og Funch E. Grundlggende klimateknik og bygningsfysik. Number ISSN 1395-8232 U9714 in 3. edition. Aalborg Universitet, 2001.
- [27] Nielsen P. V, Allard F, Awbi H. B, Davidson L, og Schälin A. Computational Fluid Dynamics in Ventilation Design. Number ISBN 2-9600468-9-7. Rehva, 2007.
- [28] FloVENT . *FloVENT User Guide Software Version 9.3*. Technical report.
- [29] Dansk Standard . D5/EN ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. 2. udgave. Dansk Standard, 2006.
- [30] BR10. *Bygningsreglement 2010.* Erhvervs- og Byggestyrelsen, 2010. Downloaddato: 2013.05.01.
- [31] Chapman A. J. Fundamentals of Heat Transfer. 4. udgave. Mcmillan, 1984.

- [32] Artmann N, Vonbank R, og Jensen R. L. Temperature measurements using type K thermocouples and the Fluke Helios Plus 2287A data logger. Number ISSN 1901-726X. Aalborg University, 2008.
- [33] Tinsley ASL . F200 Precision Thermometer. Technical report, 2003.
- [34] Hyldgård C. E. Måleteknik ved måling af indeklima og energiforbrug i bygninger. Number ISSN 1395-8232 U9704. Aalborg Universitet Instituttet for Bygningsteknik, 1997.
- [35] Kalyanova O, Zanghirella F, Heiselberg P, Perino M, og Jensen R. L. *Measuring air temperature in glazed ventilated facades in the presence of direct solar radiation.* 2007.
- [36] Simone A, Babiak J, Bullo M, Landkilde G, og Olesen B. W. *Operative temperature control of radiant surface heating and cooling systems*. 2007.
- [37] Pomianowski M. Z. Energy Optimized Configuration of Concrete Element with PCM. Number ID: 58c0bb11-6366-48b1-9676-8e1c925e286c. Aalborg Universitet, 2012.
- [38] Artmann N og Jensen R. L. Night-time ventilation experiments Setup, data evaluation and uncertianty assessment. Number ISSN 1901-76X. Aalborg Universitet, 2008.
- [39] Kipp & Zonen . *Instruction manual CM21 Precision Pyranometer*. Technical report, 2004.
- [40] Den Danske Akkrediterings- og Metrologifond . *Typegodkendelsesattest* - *Varmeenergimåler*. Technical report, 1994.
- [41] Brunata A/S . Brunata Technical Manual for HGQ and HGS-series -Volume, Flow nd Energy Meters. Technical report, 2006.
- [42] Dansk Standard . *DS418 Beregning af bygningers varmetab*. 6. edition. Dansk Standard, 2002.

- [43] Causone F, Corgnati S. P, Filippi M, og Olesen B. W. Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room. Energy and Buildings, 41:622–628, 2009.
- [44] ASHRAE . *ASHRAE Handbook Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Incorporated, 2009.

# Appendiks

- Case 1- Case 8
- Måleudstyr
- Undersøgelse af forsøgslængde
- Termisk effekt af varmeafgivelse fra anemometre
- Test af rumforhold i hotboks
- Varmebalance



# **Case 1: Basisopstilling**

I dette kapitel beskrives målingerne udført på Case 1. Målingerne og observationerne af strømningsmønstret i rummet samt målingerne af komfortforholdene vil blive beskrevet. Endvidere beregnes kølekapacitetskoefficienten, samt hvor stor en del af varmestrømmen, der overføres mellem rummet og det kolde loft via konvektion og stråling.

Ved udførelsen af målingerne i laboratoriet, er det valgt at have en opstilling, der refereres til som basisopstilling. Den vil danne grundlag for de videre målingerne, hvor forskellige parametre i basisopstillingen vil blive ændret for at undersøge forskellige senarier. En skitse af basisopstillingen kan ses på figur A.1. I basisopstillingen er der taget udgangspunkt i opbygning i mødelokalet hos Visionshuset kapitel 3 - *Visionshuset*. Forsøgene med basisopstillingen er udført i hotboxen, som er beskrevet i kapitel 4 - *Procedure for resultatbehandling* med de perforerede plader placeret tilsvarende placeringen i mødelokalet hos Visionshuset, hvor loftet har en dækningsgrad på 85%.

Varmetilførslen sker ved 12 punktlaster jævnt fordelt seks steder i rummet med en samlet varmebelastning på 930 W eller 49,7  $^{W}/_{m^{2}}$ , hvilket svarer til den maksimale køleeffekt af et termoaktivt loft benyttede i et kontorbyggeri [4].

Endvidere er forsøgene udført med ventilation i rummet med en ventilationsmængde fastsat til 12,5  $\frac{1}{s}$  ud fra *DS/EN 15251* for et åbent kontorlandskab med en personbelastning på  $\frac{1}{15}$  pers/m<sup>2</sup>, hvor hver person medfører en ventilationsmængde på 10  $\frac{1}{s}$ . [25]



*Figur A.1:* Plantegning af loftsplan over forsøgsopstillingen samt markering af placering af flytbart måleudstyr, varmekilder og udførelse af røgforsøg.

# A.1 Rumforhold

Under forsøget var de korrigerede temperaturer i de forskellige zoner, som det ses i tabel A.1. Temperaturen i zone 3 er temperaturen målt i højden 1,1 m på den faste målesøjle. Da denne temperatur bliver brugt som referencetemperatur, og alle andre temperaturer korrigeres efter den, er den altid 24,5°Csom komforttemperaturen fra *DS 474* [20]. Som det ses, varierer temperaturerne meget lidt fra måling til måling.

Forsøg	Temperatur i zoner					Indblæs-	Udsug-
	1	2	$3_{Rum}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	23,5	5,1	24,5	22,1	24,0	23,3	23,5
Kort 1	23,5	5,0	24,5	22,1	23,9	23,2	23,4
Kort 2	23,5	5,0	24,5	22,0	23,9	23,3	23,5
Kort 3	23,5	5,2	24,5	21,9	24,0	23,2	23,5
Kort 4	23,5	5,2	24,5	21,8	24,0	23,2	23,5
Kort 5	23,5	5,3	24,5	21,9	23,9	23,2	23,4

Appendiks A - Case 1: Basisopstilling

 

 Tabel A.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3.



*Figur A.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

Under forsøgene forudsættes det, at varmetransporten gennem andet end loftkonstruktionen kan negligeres. Det forudsættes, at dette er opfyldt, når varmetransporten gennem loftskonstruktionen udgør minimum 95% af den samlede varmetransport. Beregning udføres som beskrevet i appendiks M - *Varmebalance*. Med temperaturerne angivet i tabel A.1 for den lange måling udgør varmetransporten gennem loftet 99,2%.

Under den lange måling blev overfladetemperaturen på det kolde loft målt til værdierne plottet på figur A.2. Overfladetemperaturen er målt 12 steder og mellem disse temperaturer er overfladetemperaturen interpoleret. Ved de resterende forsøg var overfladetemperaturerne tilsvarende.

## A.2 Strømningsmønster

Strømningsmønster i hotboxen kortlægges ved udførelse af røgforsøg, hvor der samtidig udføres hastigheds- og temperaturmålinger. Røgforsøget udføres som beskrevet i afsnit 4.3.1 - *Røgforsøg*.

#### A.2.1 Målemetodik

Der udføres fire røgforsøg med forskellige placeringer af røgtilførslen og fokusområde for undersøgelsen. Placeringerne kan ses på figur A.1. Under alle forsøgene laves der observationer både over og under det nedhængte akustiske loft.

**Forsøg 1:** Røg tilføres i gulvhøjde i hjørne og midt af rum for at få en general forståelse af luftstrømningerne i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres mellem det kolde loft og det nedhængte loft i hjørnet for at kortlægge strømningerne i området omkring den nærmeste rist. Yderligere understøttes observationerne om den generelle luftstrømning i rummet.

**Forsøg 3:** Røg tilføres mellem det kolde loft og det nedhængte loft midt på rummets langside. Området omkring nedfaldspladerne undersøges samt de generelle luftstrømninger i nedfaldsområdet.

**Forsøg 4:** Røg tilføres som i forsøg 3 men med fokus på luftstrømningen i rummet. Nedfaldsfrekvensen og -dybden observeres.

Det forudsættes, at personerne i rummet, som observerer røgforsøgene, ikke forstyrrer og påvirker strømningerne i rummet. For at validere denne forudsætning udføres der supplerende hastigheds- og temperaturmålinger uden personer i rummet i form af kort- og langtidsmålinger. Målemetodikken til målingerne beskrives i afsnit 4.3.3 - *Langtidsmålinger* og afsnit 4.3.2 - *Korte målinger*.

#### A.2.2 Resultater

Under røgforsøget blev strømningsmønstret observeret i rummet. Observationerne kan ses illustreret på figur A.3.

Som det ses på snit A-A er strømningen opadgående i to af de tre rækker, mens den er nedadgående i en række. Ved den sidste rist ses der ingen nævneværdig luftstrøm. Den stærkeste opadgående strømning sker gennem den første rist. Som det ses strømmer luften op over det nedhængte loft og føres langs køleloftet til den sidste række, hvor den falder ned. Der er ligeledes en luftstrøm under det nedhængte loft, som fører til udsugningen.

Under forsøg 2 blev området omkring de perforerede plader, hvor luften stiger op, undersøgt, resultaterne ses på snit B-B og udsnittet af plantegningen på figur A.3. Observationerne viser, at der er en stærk strømning parallelt med loftet over det nedhængte loft. Yderligere er der primært observeret opadgående strømning gennem de perforerede plader. Dog observeres, der undertiden små luftstrømme der afbøjes fra den parallelle luftstrøm og tvinges under det nedhængte loft.

Ved forsøg 3 og 4 blev den nedadrettede strømning kortlagt. Resultaterne kan ses skitseret på snit C-C på figur A.3 og kan ses på videoen for basisopstillingen på bilags-CD - *"Forsøg Laboratorie"*. Den observerede strømningen er pulserende, således at strømningen til tider når ned i rummet ved en højde på 1,7 m og på andre tidspunkter når gulvet i højden 0,1 m. Denne nedadgående strømning med kold luft kan forårsage trækgener for personer, der opholder sig i denne del af rummet.

Appendiks A - Case 1: Basisopstilling



*Figur A.3:* Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøg.

Sammenholdes strømningsmønstrene observeret ved røgforsøgene med resultaterne fra de korte og lange målinger ses det af tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1* at de samme resultater opnås. Hvor der er observeret nedadgående strømning ses der således en lavere temperatur ved de øverst placerede termoelementer. Ligeledes er temperaturprofilerne for søjlerne, der er placeret, hvor der er opadgående strømning, næsten vertikale.

# A.3 Måling af termiske komfort

Analysen af den termiske komfort udføres som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*, hvor den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger, se afsnit 4.3.2 - *Korte målinger* og afsnit 4.3.3 - *Langtidsmålinger*. Der sammenlignes med kravene fra *DS 474* og *DS 7730* [20] [29].

## A.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, tempereraturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere laves der en mere dybdegående undersøgelse af området med nedadgående strømning fra det kolde loft.

#### A.3.1.1 Temperaturforhold

Til vurdering af temperaturforholdene anvendes de korrigerede målte lufttemperaturer. Temperaturen sammenlignes med kravene til operativ temperatur fra *DS 7730* [29]. Dette vurderes efter beregningen i afsnit 6.3.2 - *Temperaturforhold* at være acceptabelt, da forskellen på den beregnede operative temperatur og lufttemperaturen er lille.

I DS/EN ISO 7730 angivnes tre kategorier for den operative temperatur [29]. Kategorierne angives i forhold til en komforttemperatur,  $t_{komf}$ , der vælges for et aktivitetsniveau på 1,2 met og en beklædningsmodstand på 0,5 clo, til 24,5°C. De korrigerede middeltemperaturer målt på de flytbare søjler under de fem korte målinger, samt de korrigerede middeltemperaturer målt på de flytbare søjler, og den faste målesøjle under det lange forsøg kan ses inddelt i kategorierne på figur A.4. Det ses, at temperaturen i 88% af tiden ligger

indenfor kategori A. Det anses at være acceptabelt, når temperaturen ligger indenfor kategori B, hvilket den gør i 97% af alle målepunkterne.



*Figur A.4:* Korrigeret målt lufttemperatur inddelt i kategorier jf. DS/EN ISO 7730. Minus indikerer den nedre del af kategorien, mens plus indikerer øvre del af kategorien.

For at se nærmere på de målte temperaturer i rummet betragtes temperaturprofilerne for hver søjle, ses på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*. Her ses det, at de af de tre målte middeltemperaturer, der ligger under det nedre komfortkravet på 23°C for kategori B, er målt i højderne 2,1 m og 2,4 m på søjle A og B for både den første kortidsmåling og langtidsmålingen i området med nedadgående luftstrømning. Dette er udenfor den normale opholdszone i rummet, hvorfor det ikke anses for værende kritisk. Senere i afsnittet undersøges det nærmere om den nedadgående strømning periodevis forårsager træk i lavere højder end målt her.

Yderligere ses det på temperaturprofilerne vist på tegning T1 - *Temperatur*og hastighedsprofiler for Case 1, at der i områder med opadgående strømning ingen temperaturgradient er, mens hvor der er nedadgående strømning er temperaturprofilet afbøjet med de laveste temperaturer højest. Det ses også, at målingerne lavet under ristene midt i rummet, hvor der ifølge afsnit A.2 -*Strømningmønster* ikke foregik nogen nævneværdig strømning, stadig måles en lavere temperatur i højde 2,4 m. Den lavere temperatur kan skyldes påvirkningen fra stråling fra det kolde loft. Temperaturgradienten for måling 3 med søjle B viser yderligere, at der er varmere ved gulvet, hvilket skyldes, at søjlen står op ad en varmekilde.

#### A.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde

Fra tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1* ses det også, at forskellen mellem hoved- og ankelhøjde er acceptabel for alle målingerne både for siddende og stående personer. Den gennemsnitlige forskel er 0,3°C. Den største forskel findes til 0,8°C ved målingen af temperaturgradienten, hvor det ses, at der er koldere ved gulvet. Den målte temperaturforskel er stadig langt under den tilladte forskel på 3 °C mellem ankel og nakke[20].

#### A.3.1.3 Strålingsasymmetri

Til trods for at der i forsøget er et koldt loft med en gennemsnitlig korrigeret temperatur på 15,6°C, er der i opholdszonen ikke problemer med strålingsasymmetri, da rummet er adskilt herfra af et nedhængt akustisk loft og det kolde loft, derfor ikke stråles direkte til opholdszonen. Undersiden af det akustiske loft har temperaturen 23,6°C, derfor giver en strålingsasymmetri langt under det tilladte for kolde lofter på 14°C.

#### A.3.1.4 Lufthastigheder

Høje lufthastigheder kan forårsage træk. Betragtes de målte middellufthastigheder ses det på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*, at der generelt måles højere hastigheder i den ende, hvor luften falder ned end i den anden ende. Der måles især høje hastigheder i højde 0,1 m ved den lange måling på søjle B og ved måling 5 på søjle A. De to målinger er tæt på hinanden og indikerer at der kan være problemer med træk i dette område.

Da det ikke alene er lufthastigheden der giver anledning til træk beregnes trækrisiko, DR, hvor der samtidig tages hensyn til turbulensintensiteten og lufttemperaturen for hver enkelt måling. På tegning T2 - *Trækrisiko for Case 1* ses de beregnede DR. Graferne viser DR beregnet på grundlag af middellufttemperaturen og middellufthastigheden for hele målingen i det pågældende punkt. Fra *DS/EN 7730* er gælder det for kategori A, B og C, at DR skal være mindre end hhv. 10%, 20% og 30% [29]. Som det ses, er der flere punkter i området med nedadgående strømning, hvor DR er over de 20% angivet for kategori B. Her betragtes søjle C for kort måling nr. 2 og søjle B for langtidsmålingen i højden 0,1 m, hvor det ses at DR er høj. Endvidere skal det bemærkes, at DR for søjle B i højden 2,4 m og søjle C i højderne 1,1 m og 1,7 m for kort måling nr. 1 ligger på grænse af de 20%.

# A.3.1.5 Temperatur- og hastighedsvariation i område med nedadgående strømning

I dette afsnit betragtes de tre målingerne med søjler placeret under ristene samt målingen fra forsøg 3 med søjle C, der benyttes til sammenligning. Grafer med temperatur og hastighed over tid kan ses på figur A.5 - A.12.



Figur A.5: Temperatur over tid, måling 1 søjle B.

Figur A.6: Hastighed over tid, måling 1 søjle B.



Figur A.7: Temperatur over tid, lang måling søjle A.



Figur A.8: Hastighed over tid, lang måling søjle A.



Figur A.9: Temperatur over tid, lang måling søjle B.

Figur A.10: Hastighed over tid, lang måling søjle B.



*Figur A.11: Temperatur over tid, måling 3 søjle C.* 

Figur A.12: Hastighed over tid, måling 3 søjle C.

Det ses, at temperaturerne på alle søjlerne placeret under ristene varierer periodevis på grund af det kolde luft, der strømmer ned. Betragtes figur A.5 ses det, at temperaturen i højden 2,4 m har en variation på 1°C, mens der i højden 0,1 m er en variation på omkring 0,2°C. Således falder indflydelsen på temperaturen af den nedadgående luft med højden, da den kolde luft bliver blandet op med den varme luft i rummet. Dog ses det, at der kan observeres svingninger helt ned til gulvet for denne målesøjle. Tilsvarende variationer kan observeres på figur A.5 og A.7. Her kan der dog ikke ses nogen nævneværdig svingning i temperaturen i højden 0,1 m, hvorfor strømningen kun vurderes at have indflydelse til og med højden 0,6 m. Sammenlignes denne svingning med figur A.11 ses det, at der her ingen nævneværdig temperaturvariationer er. Det kan også ses på figur A.5, og A.7, at der er større temperaturforskelle mellem de målte temperaturer i forskellige højder, end der observeres på figur A.9 jf. observationerne foretaget ud fra tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 1*.

Betragtes hastighederne vist på figur A.6, A.8, A.10 og A.12 ses det, at der ikke er samme sammenhæng som ved temperaturen. Dog kan det observeres, at hastigheden generelt fluktuerer mere ved søjlerne placeret under ristene end ved søjle 3C.

## A.4 Kølekapacitetskoefficient

Varmetilførslen fra varmekilder måles under forsøget. Varmetabet fra ventilation og transmission til zone 1 og 4 beregnes, som beskrevet i afsnit M -*Varmebalance*. Beregningerne laves ud fra målingerne foretaget under den lange måling beskrevet i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling* med ukorrigerede temperaturer.

Fra ligning (6.4) beregnes kølekapacitetskoefficienten fra det kolde luft til rummet således til 5,5  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

# A.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 493 W ved stråling og 437 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 53% og 47% af den samlede varmestrøm.

# Case 2: Placering af varmekilder i ene hjørne

I dette kapitel undersøges effekten af placeringen af varmekilderne ved at udføre forsøg med en markant anderledes placering af varmekilderne end ved basisopstillingen.



*Figur B.1: Plantegning der viser loftsplan, forsøgsopstillingen til røgforsøg samt markering af placering af varmekilder.* 

Til undersøgelsen udføres et forsøg i hotboxen under samme forudsætninger, som basisopstillingen beskrevet i afsnit A - *Case 1: Basisopstilling*, men med varmekilderne samlet i det ene hjørne, se figur B.1. Der udføres røgforsøg, fem korte målinger samt én langtidsmåling for at kortlægge strømningsmønstret i rummet samt at vurdere den termiske komfort og køleeffekten. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

#### **B.1 Rumforhold**

I tabel B.1 ses temperaturerne målt i de fire zoner samt indblæsningen og udsugningen. Det ses, at temperaturerne under forsøget kun varierer meget lidt, dog er der lidt forskel på temperaturerne fra langtidsmålingen til temperaturerne målt i de fem korttidsmålinger. Dette kan skyldes, at forsøgene blev udført over to måledage samt en lille forskel i varmebelastningen på 30 W. Sammenlignes med temperaturene målt ved Case 1 ses det fra tabel A.1 og B.1, at der generelt er målt højere temperaturer med undtagelse af rumtemperaturen i zone 3, som de resterende temperaturer er korrigeret efter.

Forsøg		Т	emperat	Indblæs-	Udsug-		
	1	2	$3_{\text{Rum}}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	24,2	5,8	24,5	22,8	24,8	24,3	24,2
Kort 1	24,6	6,3	24,5	22,8	25,1	24,0	24,6
Kort 2	24,6	6,3	24,5	22,7	25,1	24,0	24,6
Kort 3	24,6	6,3	24,5	22,8	25,1	24,1	24,6
Kort 4	24,5	6,2	24,5	22,7	25,0	24,1	24,6
Kort 5	24,5	6,3	24,5	22,7	25,0	24,1	24,5

 

 Tabel B.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3.

På figur B.2 ses et kontourplot over de 12 målte overfladetemperaturer, hvor der er interpoleret mellem temperaturerne målt i de 12 punkter. Det bemærkes, at de varmeste overfladetemperaturer for denne opstilling findes over varmekilderne, hvorimod det var modsat for basisopstillingen. Hvis maksimum, minimum og middel temperaturen sammenlignes fås en forskel på hhv.  $0,5^{\circ}$ C,  $0^{\circ}$ C og  $0,4^{\circ}$ C, hvilket betyder, der er opnåede stationære forhold.

Det bemærkes ligeledes, at der stadig er et varmere område i det nordvestlige hjørne af loftet til trods for, at der ingen varmekilder er placeret i dette område. Det varmeområde skyldes, som beskrevet i afsnit L.5 - *Overfladetemperaturer*, at placeringen af ventilationsanlægget i zone 2 besværliggør luftcirkulationen i dette område, samt at det har været nødvendigt at forstærke loftet med en ekstra krydsfinerplade under ventilationsanlægget.



*Figur B.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

Under forsøgene er det forudsat, at varmetransporten kun sker gennem det kolde loft. For forsøget regnes dette for at være opfyldt, da varmeafgivelsen til zone 2 udgør 98,4 % til 99,7 % af den samlede varmetransport. Størstedelen af den resterende varmetransport foregår gennem ventilationen.

# **B.2** Strømningsmønstre

Forsøgene udføres som beskrevet i afsnit 4.3.1 - *Røgforsøg*, dog tilføres røgen som vist på figur B.1 og beskrevet nedenfor.

**Forsøg 1:** Røg tilføres i gulvhøjde i hjørnet for at få en generel forståelse af luftstrømningerne i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres i gulvhøjde i midten af rummet for at få en generel forståelse af luftstrømningerne i rummet, især hvor varmen stiger op omkring varmekilderne.

**Forsøg 3:** Røg tilføres med røgampuller for at undersøge sekundære strømningsmønstre og bekræfte observationerne lavet i forsøg 1-2.

**Forsøg 4:** Røg tilføres mellem det kolde loft og det nedhængte loft. Strømningen over loftet og gennem de to midterste rækker perforerede plader undersøges samt de generelle luftstrømninger i nedfaldsområdet.

**Forsøg 5:** Røg tilføres mellem det kolde loft og det nedhængte loft. I forsøget er der fokus på den nedadgående luftstrømningen i rummet. Nedfaldsfrekvensen og -dybden observeres.

#### **B.2.1** Resultater

Ud fra de udførte forsøg er de observerede strømningsmønstre indtegnet på figur B.3 og B.4. Det ses, at der er opadgående strømning på snit D-D, se figur B.4, og nedadgående strømning på snit C-C, se figur B.3. Det ses der er begrænset strømning gennem de to midterste rækker perforerede plader.

På snit C-C ses den nedadgående strømning, hvor det ses, der er en meget lodret nedadgående strømning.

På snit D-D ses det også, at den primære opadgående luftstrøm foregår over varmekilderne. En del af strømningen afbøjer dog og strømmer op gennem de perforerede plade placeret ved siden af.



Figur B.3: Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøg se også figur B.4.



Figur B.4: Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøg se også figur B.3.

Ses der på plantegningen på figur B.4 ses strømningen over det nedhængte loft. Luft stiger som før nævnt primært op over varmekilderne. Herefter strømmer den over det nedhængte loft til den anden ende af rummet som vist på plantegningen.

Under røgforsøgene blev det yderligere observeret, at der under det nedhængte loft var en stærkere strømning i siden som vist på snit B-B, end der var i siden vist på snit A-A.

# **B.3** Måling af termiske komfort

Den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger beskrevet i afsnit 4.3.2 - *Korte målinger* og afsnit 4.3.3 - *Langtidsmålinger*. Der sammenlignes med kravene fra *DS 474* og *DS 7730* [20] [29].

#### **B.3.1** Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømninger.

#### **B.3.1.1** Lufttemperatur

Som beskrevet i afsnit A.3.1.1 - *Temperaturforhold* er det vist ved beregninger, at strålingsbidraget til den operative temperatur er så lille, at de målte lufttemperaturer kan sammenlignes med grænserne fastsat for operativ temperatur.

Kategoriseres de målte middellufttemperaturer målt under de korte målinger og langtidsmålingen i forhold til kategorierne i *DS7730* fås fordelingen, der ses på figur B.5. Det ses, at temperaturen i 98% af alle målepunkterne er i kategori B eller A, hvilket anses for værende acceptabelt. For basisopstillingen er der også 97% af målingerne, der ligger indenfor kategori A eller B. For basisopstillingen er der dog 88% af målingerne i kategori A mens det for denne opstilling er 92%. Yderligere bemærkes det, at for basisopstillingen er de 3% målte temperaturer udenfor kategori A og B for lave, mens de for denne opstilling primært er for høje.



Figur B.5: Korrigeret målt lufttemperatur inddelt i kategorier jf. DE/EN ISO 7730.

De målte middeltemperaturer er tegnet ind på temperaturprofilerne vist på tegning T3 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 2*. Der er målt en temperatur under den acceptable grænse på 23°C, for den lange måling i højden 2,4 m på søjle A. På grund af højden, der er udenfor den normale opholdszone, vurderes dette at være acceptabelt. Temperaturerne højere end det tilladte er målt i højden 0,1 m på søjle B under måling 2 og den lange måling. Søjle B for den lange målinger er placeret mellem varmekilderne. Der observeres en høj temperatur ved gulvet målt nær varmekilderne er de ikke sammenlignelige med virkelige forhold, hvorfor det ikke anses som et problem.

Det ses, at formen af de målte temperaturprofiler er anderledes end temperaturprofilerne vist på tegning T1 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case*  1. For forsøget med varmekilderne placeret i hjørnet ses det på tegning T3 -*Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 2*, at de eneste temperaturprofiler, hvor temperaturen falder med højden, er ved den lange måling på søjle A og C samt et mindre temperaturfald ved måling 5 søjle A. Dog skal det bemærkes, at der under dette forsøg kun er foretaget en måling i det observerede nedfaldsområde.

Yderligere kan det ses på tegning T3 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 2*, at der er mange af profilerne, der har højere temperaturer ved det øverste termoelement. Det vurderes at være forårsaget af plumen fra varmekilderne, der stiger op og strømmer under det nedhængte loft. Denne antagelse er konsistent med høje hastigheder målt ved de øverste termoelementer.

#### B.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde

Den høje temperatur målt ved ankelhøjde under langtidsmålingen på søjle B forårsager diskomfort ved en temperaturforskel på 3,02°C for en stående person, hvilket er lige over grænsen på 3°C. Hvis denne måling antages ikke at være repræsentable for en virkelig situation, er der ingen nævneværdige problemer med temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde. Den næststørste forskel findes ved søjle B for måling 2 med en temperaturforskel på 1,23°C for siddende og 1,61°C for stående personer.

#### B.3.1.3 Strålingsasymmetri

Ud fra de målte overfladetemperaturer vist i tabel B.2 vurderes der ikke at være problemer med strålingsasymmetri i rummet.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,øst</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>
24,2	24,1	24,5	23,9	25,0	24,1

Tabel B.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader

#### **B.3.1.4** Lufthastigheder

De målte middellufthastigheder kan ses indtegnet på hastighedsprofilerne på tegning T3 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 2*. Her ses det, at der

som førnævnt observeres høje hastigheder øverst på flere målesøjler. Yderligere observeres der høje lufthastigheder ved måling 5 søjle A, B og C samt måling 4 søjle A i højden 0,1 m. Disse målinger kan forårsage træk, hvilket undersøges nærmere ved at beregne trækrisiko, som beskrevet i afsnit A.3.1.4 - *Lufthastigheder*.

På tegning T4 - *Trækrisiko for Case 2* ses det, at der generelt er problemer med trækrisiko ved de højeste målinger. Fordi de ligger udenfor opholdszonen vurderes det ikke at være et problem. Derudover overstiger den målte middelværdi for trækrisiko kun den acceptable grænse på 20% ved måling 4 på søjle A i højden 0,1 m. Det ses også, at den er udenfor kategori B i 60% af tiden. Der ses ingen andre målinger, der ligger udenfor kategori B i opholdszonen.

#### B.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i område med nedadgående strømning

Analyseres de målte temperaturer og hastigheder som funktion af tid i området med nedadgående strømning ses det fra figur B.6, at der observeres en variation i den øverste temperatur, men at det ikke ser ud til at forplante sig nedad. Dermed vurderes det, at den nedadgående strømning ikke har effekt nedad i rummet. På figur B.7 ses det, at der ikke rigtigt er nogen sammenhæng mellem fluktueringerne af hastighedsmålingerne.



*Figur B.6: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle C.* 



Figur B.7: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle C.

# B.4 Kølekapacitetskoefficient

Kølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen til 5,7  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

# B.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling*. Det beregnes, at der overføres 458 W ved stråling og 492 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 48 % og 52 % af den samlede varmestrøm.

# Case 3: Jævnt fordelt varmebelastning

I dette kapitel vil strømningsmønstret, den termiske komfort og kølekapacitetskoefficienten for Case 3 blive præsenteret. I Case 3 ændres varmekilden til jævnfordelt ved brug af varmekabler for at undersøge om, der forekommer ændringer i forhold til Case 1.



*Figur C.1: Plantegning som viser loftsplan, forsøgsopstillingen til røgforsøg samt markering af placering af varmekablerne.* 

For at undersøge hvad der har indflydelse på luftstrømningen yderligere udføres et forsøg, kaldt Case 3, med jævnfordelt varmebelastning ved brug af varmekabler fordelt over gulvet i hotboxen. På figur C.1 ses forsøgsopstillingen for Case 3, hvor varmekablerne er markeret med rød.

For Case 3 udføres en kortlægning af strømningsmønstret i rummet og en vurdering af den termiske komfort samt køleeffekten fra det kolde loft til rummet ved at udføre røgforsøg, fem korte målinger samt en lang måling. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

## C.1 Rumforhold

Indledningsvis betragtes rumforholdene i hotboxen for de fem korte målinger og langtidsmålingen. I tabel C.1 ses de korrigerede middeltemperaturer målt i de fire zoner samt indblæsning og udsugning. Det ses, at temperaturvariationen i zoner er omkring 0,1°C,hvorfor der vurderes stationære forholde under de udførte målinger.

Forsøg	Temperatur i zoner					Indblæs-	Udsug-
	1	2	$3_{Rum}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	23,6	5,2	24,5	22,3	24,2	23,1	23,6
Kort 1	24,1	5,7	24,5	22,0	24,6	23,2	24,0
Kort 2	24,2	5,8	24,5	22,1	24,8	23,2	24,2
Kort 3	24,2	5,9	24,5	22,1	24,8	23,3	24,2
Kort 4	24,1	5,8	24,5	22,0	24,7	23,2	24,1
Kort 5	24,1	5,7	24,5	22,1	24,6	23,2	24,0

 

 Tabel C.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3.

Under forsøgene forudsættes det, at minimum 95% af den samlede varmetransport sker gennem loftet op til zone 2 for at kunne negligere varmetransport til de øvrige zoner. Ved en opstilling af varmebalancen for hotboxen fås at 98% til 99% af varmetransporten sker gennem loftet, hvorfor antagelsen er opfyldt.



*Figur C.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

På figur C.2 ses et Kontourplot over de målte overfladetemperaturer på loftet op til zone 2 for langtidsmålingen. På plottet ses et omrids af hotboxen samt de 12 målepunkter for overfladetemperaturen. Det ses at der er en temperaturforskel på 3,3°C over loftet, hvor den højeste temperatur er målt i det øverste hjørne, hvilket skyldes placeringen af ventilationsanlægget hørende til zone 2, se afsnit L.5 - *Overfladetemperaturer*. Sammenlignes Case 3 med Case 1 ses, at samme temperaturfordeling på loftet forekommer, hvor forskellen på maksimum-, minimum- og middeltemperaturer er hhv. 0,4°C, 0°C og 0,3°C.

# C.2 Strømningsmønstre

For Case 3 er der udført røgforsøg for at kortlægge strømningsmønstret for denne opstilling. Forsøgene er udført, som beskrevet i afsnit 4.3.1 - *Røgforsøg* og afsnit A.2 - *Strømningsmønster*, men røgen er tilført rummet ved placeringerne vist på figur C.1 og beskrevet nedenfor.

**Forsøg 1:** Røg tilføres i gulvhøjde i hjørnet af hotboxen for at få en generel forståelse af luftstrømningerne i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres i gulvhøjde i midten af hotboxen for at få en generel forståelse af luftstrømning i rummet.

**Forsøg 3:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen ved området med nedadgående strømning.

**Forsøg 4:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen over loftet samt området med opadgående strømning.

**Forsøg 5:** Røg tilføres med røgampuller for at undersøge sekundære strømningsmønstre og bekræfte observationerne fundet i røgforsøg 1-4.

#### C.2.1 Resultater

På figur C.3 ses en skitse af observationerne for udførelsen af de førnævnte røgforsøg. Ved at betragte det generelle strømningsmønstre på snit A-A ses det, at strømningen har samme retning, som observeret i Case 1, se figur A.3. Det ses at størstedelen af strømningen sker gennem de yderste perforerede plader, men at der også forekommer en smule strømning op og ned i de midterste perforerede plader. I nedfaldsområdet ses ligeledes, at der forekommer en strømning mod væggen, hvilket kan ses påsnit B-B. På snit C-C ses strømningen i nedfaldsområdet, hvor det ses, at der forekommer strømning mod væggen, som også afbøjes ind i rummet. I midten af nedfaldsområdet er strømningen mere lodret.



*Figur C.3:* Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøgene.

## C.3 Måling af termiske komfort

Analysen af den termiske komfort udføres som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*. Den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger. Der sammenlignes med kravene fra *DS* 474 og *DS* 7730 [20] [29].

#### C.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømninger.

#### C.3.1.1 Temperaturforhold

Temperaturforholdene vurderes ud fra de korrigerede målte lufttemperaturer, hvor temperaturerne sammenlignes med kravene til den operative temperatur fra *DS 7730* [29]. Dette vurderes efter beregningen i afsnit 6.3.2 - *Temperaturforhold* at være acceptabelt, da forskellen på den beregnede operative temperatur og lufttemperaturen er lille.

På figur C.4 ses de korrigerede middeltemperaturer målt under de fem korte målinger og langtidsmålingen inddelt i de tre kategorier for den operative temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29]. På figur C.4 ses at temperaturen i 92% af målepunkterne ligger i kategori A og at temperaturen i 96% af målepunkterne ligger i kategori B, hvilket anses for at være acceptabelt. Ved sammenligning med Case 1 ses det, at 97% af alle målepunkterne ligger i kategori B, hvilket er lidt højere end for Case 3, mens temperaturer som ligger indenfor kategori A er højere for Case 3.



Figur C.4: Korrigeret målt luft temperatur inddelt i kategorier jf DE/EN ISO 7730.
De målte middeltemperaturer er indtegnet på temperaturprofiler vist på tegning T5 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 3*. På temperaturprofilerne ses der er målt temperaturer, som ligger under den acceptable grænse på 23°C, på søjle B i højden 2,4 m for den korte måling 1 og på søjle A og B i højden 2,4 m for langtidsmålingen. Endvidere ses det, at der målte temperaturer over grænsen på 26°C på søjle B og C i højden 0,1 m for kortidsmåling 5 og på søjle C i højden 0,1 m for korttidsmåling 4. Det kan give problemer med diskomfort i opholdszonen. Generelt ses det af temperaturprofilerne, at der ikke forekommer store temperaturgradienter de målte steder.

#### C.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde

Der er ingen problemer med temperaturforskelle mellem ankel- og hovedhøjde for dette forsøg, da der ud fra temperaturprofilerne kan ses, at der ikke forekommer store temperaturgradienter på de målte steder.

#### C.3.1.3 Strålingsasymmetri

Endvidere vurderes det om der forekommer problemer med strålingsasymmetri i rummet ud fra de målte overfladetemperaturer i zone 3. I tabel C.2 ses de målte overfladetemperaturer, hvor det ses, at der er en lille temperaturforskel mellem væggene og undersiden på det nedhængte nedhængte loft. Overfladetemperaturen på gulvet er højere, hvilket kan skyldes, at termoelementet er placeret tæt på varmekablerne. Det vurderes dog, at der ikke forekommer problemer med strålingsasymmetri i rummet, da der er temperaturforskel på 2°C.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,øst</sub>	t <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>
24,9	24,8	24,3	24,8	27,7	24,2

Tabel C.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader

#### C.3.1.4 Lufthastigheder

De målte middelhastigheder er indtegnet på hastighedsprofiler vist på tegning T5 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 3*. Det ses, at der generelt er målt de højeste hastigheder i området med nedadgående strømning. Hastighederne målt i området er opadgående strømning ligger omkring 0,15 m/s. De høje hastigheder er målt i højderne 0,1 m og 2,2-2,4 m, hvilket kan give problemer i forholde til træk ved ankelhøjde.

For at undersøge om de høje hastigheder giver anledning til trækgener beregnes trækrisikoen for målepunkterne. Resultaterne er indtegnet på tegning T6 - *Trækrisiko for Case 3*. Det ses, at der kun forekommer problemer på søjle C i højden 0,1 m for korttidsmåling 2, hvilket ligger over grænseværdien på 20%. Søjle A i højden 0,1 m ligger tæt på grænseværdien.

#### C.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i området med nedadgående strømning

På figur C.5 og C.6 ses de målte temperaturer og hastigheder som funktion af tid for de første 10 minutter af langtidsmålingen. Det se af figur C.5 at temperaturen i højderne 2,4 m og 2,1 m fluktuerer med ca. 1-2°C, hvilket ser ud til at fortsætte ned gennem rummet, hvor temperaturerne i højderne i 0,1-1,7 m fluktuerer ca. 1°C. Dermed vurderes det, at den nedadgående strømning påvirker temperaturen i ned gennem rummet. På figur C.6 ses, at der er en stor variation på hastigheden, som er størst i højderne 2,1 m og 1,7 m, som gradvis bliver mindre med højden.



Figur C.5: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle B.



Figur C.6: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle B.

# C.4 Kølekapacitetskoefficient

Kølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen til 5,7  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

# C.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 505 W ved stråling og 425 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 55% og 45% af den samlede varmestrøm.

# Case 4: Placering af ventilationsarmatur

I dette kaptiel vil strømningsmønstret, den termiske komfort og kølekapacitetskoefficienten for Case 4 blive præsenteret. Ved Case 4 byttes ventilationsarmaturerne om, således effekten af placeringen af armaturerne undersøges.



*Figur D.1:* Forsøgsopstilling for Case 4, hvor ventilationsarmaturerne er byttet.

Ved undersøgelse af strømningsmønstrene i Case 1 blev det vurderet, at ventilationen kunne have en indflydelse på strømningsretningen, se afsnit A.2 - *Strømningsmønster*, hvorfor dette undersøges. Der udføres et forsøg under samme forudsætninger som Case 1, men der ændres på placeringen af indblæsnings- og udsugningsarmaturet. På figur D.1 ses forsøgsopstillingen for forsøget, hvor ventilationsarmaturerne byttes om.

For forsøget udføres en kortlægning af strømningsmønstret i rummet og en vurdering af den termiske komfort samt køleeffekten fra det kolde loft til rummet ved at udføre røgforsøg, fem korte målinger samt en lang måling. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

### **D.1 Rumforhold**

Indledningsvis betragtes rumforholdene for de fem korte målinger og langtidsmålingen. I tabel D.1 ses de korrigerede middeltemperaturer målt i de fire zoner samt indblæsning og udsugning.

Forsda		Т	emperat	Indblæs-	Udsug-		
roisøg	1	2	$3_{\text{Rum}}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	23,6	5,2	24,5	22,2	24,2	23,8	22,8
Kort 1	23,6	5,1	24,5	22,1	24,2	23,7	22,8
Kort 2	23,6	5,2	24,5	22,1	24,2	23,8	22,8
Kort 3	23,6	5,2	24,5	22,1	24,1	23,8	22,8
Kort 4	23,7	5,3	24,5	22,2	24,3	23,8	22,8
Kort 5	23,6	5,2	24,5	22,0	24,2	23,8	22,8

 

 Tabel D.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3.

Ud fra tabellen ses, at temperaturerne varierer med omkring 0,1°C mellem forsøgene i hver enkelt zone, hvilket det kan konkluderes, at der er stationære forhold under de udførte målinger. Ved at sammenligne med temperaturerne målt i Case 1, se tabel A.1, ses det, at forskellen mellem de to forsøg er lille.

Under forsøgene forudsættes det, at minimum 95 % af den samlede varmetransport skal ske igennem loftet op til zone 2 for at kunne negligere varmetransporten til de øvrige zoner. For temperaturerne angivet i tabel D.1 udgør varmetransporten gennem loftet 98 %, hvorfor antagelsen anses for at være opfyldt.



*Figur D.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

På figur D.2 ses et kontourplot, som viser de målte overfladetemperatur på loftet op til zone 2 for den lange måling, hvor et omrids af hotboxen samt de 12 punkter temperaturen er målt i ses. Det ses at der er en temperaturforskel på  $4,5^{\circ}$ C over loftet, hvor den højeste temperatur måles i det øverste hjørne, hvilket er det sammen sted ventilationsanlægget hørende til zone 2 er placeret, som beskrevet i afsnit L.5 - *Overfladetemperaturer*. Ved at sammenligne med de målte overfladetemperatur i Case 1 ses, at samme temperaturfordeling over loftet forekommer, hvor forskellen på maksimum, minimum og middel temperaturen er hhv.  $0,3^{\circ}$ C,  $0,2^{\circ}$ C og  $0,1^{\circ}$ C.

# D.2 Strømningsmønstre

For dette forsøg er ligeledes udført røgforsøg for at kunne karakterisere strømningsmønstret ved denne opstilling. Forsøgene er udført, som beskrevet i afsnit 4.3.1 - *Røgforsøg* og afsnit A.2 - *Strømningsmønster*, men røgen er tilført rummet ved placeringerne vist på figur D.1 og beskrevet nedenfor.

**Forsøg 1:** Røg tilføres i gulvhøjde i hjørnet for at få en generel forståelse af luftstrømningerne i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen over loftet samt området ved den opadgående strømning.

**Forsøg 3:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge luftstrømningen ved de miderste perforerede plader i forhold til om der forekommer nedadgående strømning.

**Forsøg 4:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge nedfaldområdet samt hvor langt strømningen kommer ned i rummet.

**Forsøg 5:** Røg tilføres med røgampuller for at undersøge sekundære strømningsmønstre og bekræfte observationerne lavet i forsøg 1-4.

#### D.2.1 Resultater

På figur D.3 ses observationerne fra af de førnævnte røgforsøg skitseret. Ved at betragte det generelle strømningsmønster på snit A-A ses, strømningsmønstret ligner det, som blev observeret under Case 1. Det ses, at størstedelen af strømningen sker gennem de to yderste rækker med perforerede plader, men at der også forekommer små strømninger ved de midterste perforerede plader. På snit B-B og C-C ses strømningsmønstrene for de midterste perforerede plader, hvor det ses, at der er en opadgående strømning på snit B-B og en nedadgående strømning på snit C-C. Det bemærkes, at der i den ene side af rummet er en større opstrøm, se snit B-B, mens der er et større nedfald i den modstand side af rummet, se C-C.



Figur D.3: Illustrationer af den observerede strømningsmønstre fra røgforsøgene.

0,0 ⊐ [m]

175

# D.3 Måling af termiske komfort

Analysen af den termiske komfort udføres som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*. Den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger. Der sammenlignes med kravene fra *DS* 474 og *DS* 7730 [20] [29].

#### D.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømninger.

#### **D.3.1.1** Temperaturforhold

Til vurdering af temperaturforholdene anvendes de korrigerede målte lufttemperaturer. Temperaturen sammenlignes med kravene til operativ temperatur fra *DS 7730* [29]. Dette vurderes efter beregningen i afsnit 6.3.2 - *Temperaturforhold* at være acceptabelt, da forskellen på den beregnede operative temperatur og lufttemperaturen er lille.

På figur D.4 ses de korrigerede middeltemperaturer målt under de fem korte målinger og langtidsmålingen inddelt i de tre kategorier for den operative temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29]. Det ses, at temperaturen i 90% af målepunkterne ligger indenfor kategori A. Endvidere ses det at temperaturen i 97% af målepunkterne ligger indefor kategori B, hvilket anses for at være acceptabelt. Ved sammenligning med Case 1 ses at temperatur, som ligger indenfor kategori B, ligeledes er 97%, mens temperatur som ligger indenfor kategori A er lidt højere for Case 4.



Figur D.4: Korrigeret målt luft temperatur inddelt i kategorier jf. DE/EN ISO 7730.

De målte middeltemperaturer er indtegnet på temperaturprofiler vist på tegning T7 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 4*. De temperaturer, som ligger under den acceptable grænse på 23°C, er målt på den lange måling på søjle A og B i højden 2,4 m samt korttidsmåling 1 i samme højde. Da dette område er uden for opholdzonen anses det ikke for at være problematisk. Der er målt en temperatur over den acceptable grænse på 26°C, som er fundet ved korttidsmåling 3 på søjle B i en højde på 0,1 m, men som det ses er den placeret tæt på en varmekilde, hvilket ikke anses at være sammenligneligt med virkelige forhold.

Ved at betragte alle temperaturprofilerne ses det, at der ikke er nogle markante temperaturgradienter i rummet under de udførte forsøg.

#### D.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved og ankel

Der er der ingen nævneværdige problemer med temperaturforskelle på ankel og hovedhøjde for dette forsøg. Der er kun et sted hvor forskellen er målt til 3 °C, hvilket er grænsen for hvad der er acceptabelt. Målingen er lavet ved kortidsmåling 3 på søjle B for en stående person. Som førnævnt er denne måling udført tæt på en varmekilde, så det anses ikke at være repræsentativ for virkelige forhold.

#### D.3.1.3 Strålingsasymmetri

Det belyses om der forekommer problemer med strålingsasymmetri i rummet ud fra de målte overfladetemperaturer. I tabel D.2 ses det målte overfladetemperaturer, hvor det ses at der er en lille temperaturforskellen, så det vurderes ikke at være problemer med strålingsasymmetri i rummet.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,øst</sub>	t <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>
24,6	24,5	24,4	24,1	24,0	23,7

 Tabel D.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader.

#### D.3.1.4 Lufthastigheder

De målte middellufthastigheder er indtegnet på hastighedsprofiler vist på tegning T7 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 4*. Det ses, at der generelt er målt høje hastigheder ved området med nedadgående strømning. Ved bagvæggen er der målt høje hastigheder i højden 1,1-1,7 m på søjle A og C ved måling 1. Hastigheder op til 0,32 <sup>m</sup>/<sub>s</sub>, er målt under de perforerede plader med nedadgående strømning og lidt længere inde i rummet langs gulvet. De høje hastigheder er målt på søjle A og B ved måling 2, søjle B ved måling 1 samt søjle A og B ved den lange måling.

Dette kan give problemer med træk, hvorfor tegning T8 - *Trækrisiko for Case 4* betragtes. Her ses det ligeledes at der kan forekommer problemer med træk ved nedfaldsområdet. For den korte måling 2 ses det at søjle A og C ligger over grænsen på 20% i højden 0,1 m og for søjle C også i 2,4 m. Endvidere ses at søjle A og B for den lange måling ligger lige over de 20% i højden 0,1 m, hvilket også er tilfældet for søjle B for korttidsmåling 1. Yderligere ses det at søjle C for måling 1 er over 20% i højde 1,1 og 1,7m.

# D.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i området med nedadgående strømning

På figur D.5 og D.6 ses de målte temperaturer og hastigheder som funktion af tid. Det kan ses af figur D.5, at temperaturen i højden 2,1 m fluktuerer med ca. 1,1°C hvilket ser ud til at fortsætte ned gennem rummet, hvor temperaturen i højderne 0,6-1,7 m fluktuerer med 0,6°C. Dermed kunne det se ud til at den nedadgående strømning påvirker temperaturen i opholdszonen. Ligeledes kan det ses på figur D.6 at der er en stor variation på hastigheden, som er høj ved gulvet i højden 0,1 m.



Figur D.5: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle B.

Figur D.6: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle B.

# D.4 Kølekapacitetskoefficient

Kølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen til 5,6  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

# D.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 486 W ved stråling og 449 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 53 % og 47 % af den samlede varmestrøm.

# Case 5: Høj ventilationsmængde

I dette kaptiel vil strømningsmønstret, den termiske komfort og kølekapacitetskoefficienten for Case 5 blive præsenteret. I forhold til Case 1 byttes ventilationsarmaturerne og luftmængden øges for Case 5.



*Figur E.1:* Forsøgsopstillingen for Case 5, hvor ventilationsarmaturerne er ombyttet og en forhøjet ventilationsmængde er anvendt.

Ved undersøgelse af strømningsmønstret for Case 4 viste det, at det ikke ændre på strømningsretning ved at bytte om på indblæsning og udsugning og lignende forhold som for basisopstilling var opnået. Derfor udføres et forsøg under samme forudsætninger som Case 1 og Case 4, men der ændres på ventilationsmængden, som sættes op til 91,5  $\frac{1}{s}$  fra en luftmængde på 14  $\frac{1}{s}$ . Ventilationsmængden er fastsat for et mødelokale med en to personer, hvilket giver en højere ventilationsmængde. På figur E.1 ses forsøgsopstillingen for dette forsøg.

For forsøget udføres en kortlægning af strømningsmønstret i rummet og en vurdering af den termiske komfort samt køleeffekten fra det kolde loft til rummet ved at udføre røgforsøg, fem korte målinger samt en lang måling. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

### E.1 Rumforhold

Rumforholdene for Case 5 betragtes ud fra tabel E.1, hvor de korrigerede middeltemperaturerne målt i de fire zoner samt indblæsning og udsugning kan ses. Temperaturerne varierer med omkring 0,2°C mellem forsøgene for hver zone, så det kan konkluderes, at der er opnået stationære forhold under målingerne. Ved sammenligne med de målte temperatur for zonerne under Case 1 ses det, at temperaturerne i zoner og udsugningen generelt ligger 0,5°C højere.

Under forsøgene forudsættes det, at minimum 95% af den samlede varmetransport skal ske igennem loftet op til zone 2, så ved beregning af varmebalancen for temperaturerne angivet i tabel E.1 udgør varmetransporten gennem loftet 96,9% til 98,2%. Dermed anses kravet til varmetransporten at være opfyldt for at kunne negligere varmetransport til de øvrige zoner. Endvidere sker 1,7% til 2,8% af den samlede varmetransport gennem ventilationen.

For at undersøge de målte overfladetemperaturerne på loftet op til zone 2 betragtes et kontourplot, som viser et omrids af hotboxen samt de 12 målepunkter, som der er interpoleret i mellem. Plottet kan ses på figur E.2, som viser overfladetemperaturerne for den lange måling. Temperaturfordelingen over loftet ligner kontourplottet for Case 1, hvor her er en forskel på 5°C over loftet med den højeste temperatur er målt i det øverste hjørne, hvor ventilationsanlægget hørende til zone 2 er placeret. Ved sammenligning med

Forsøg		Т	emperat	Indblæs-	Udsug-		
Poisog	1	2	$3_{Rum}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	23,8	5,2	24,5	22,3	24,1	23,8	24,0
Kort 1	23,9	5,3	24,5	22,5	24,3	23,9	24,0
Kort 2	24,0	5,4	24,5	22,6	24,4	24,0	24,1
Kort 3	23,9	5,4	24,5	22,4	24,3	23,9	24,0
Kort 4	23,8	5,3	24,5	22,3	24,2	23,8	24,0
Kort 5	23,8	5,2	24,5	22,3	24,2	23,8	23,9

maksimum-, minimum- og middeltemperaturen for Case 1 og dette forsøg er forskellen hhv.  $0,7^{\circ}C$ ,  $0,1^{\circ}C$  og  $0,3^{\circ}C$ .

 

 Tabel E.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3.



*Figur E.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

# E.2 Strømningsmønstre

For dette forsøg er der ligeledes udført røgforsøg for at kunne karakterisere strømningsmønstret. Forsøgene er udført, som beskrevet i afsnit 4.3.1 - Røg-forsøg, men røgen er tilført rummet ved placeringerne vist på figur D.1 og beskrevet nedenfor.

**Forsøg 1:** Røg tilføres ved gulvet i hjørnet af hotboxen for at få en generel overblik over, hvordan luftstrømmen fordeler sig i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen over loftet og nedfaldsområdet.

**Forsøg 3:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge, hvordan luftstrømningen forekommer omkring de midterste perforerede plader.

**Forsøg 4:** Røg tilføres igen over det nedhængte loft for at undersøge om der er en strømning over loft hentil nedfaldsområdet samt undersøge området ved den opadgående strømning.

**Forsøg 5:** Røg tilføres med røgampuller for at undersøge og bekræfte den observerede strømningsmønster.

**Forsøg 6:** Røg tilføres i en højde på 1,5 m ved udsugningsarmaturet for at undersøge, hvor strømningen fordeles rummet mod indblæsningen.

**Forsøg 7:** Røg tilføres i højden 1,5 m, men denne gang ved indblæsningsameraturet for at undersøge fordelingen rummet ved udsugningen.

#### E.2.1 Resultater

På figur E.3 ses illustrationerne af observationerne, som blev gjort under de førnævnte røgforsøg. Generelt viste forsøgene, at strømningsretningen over det nedhængte loft og området med nedadgående og opadgående luftstrømning fra området mellem det nedhængte loft og køleloftet er uændret i forhold til observationerne fra både Case 1 og Case 4. Dog er der store ændringer i strømningsmønstret i selve rummet. I rummet blev der observeret kraftigere



Figur E.3: Illustrationer af den observerede strømningsmønstre fra røgforsøgene.

luftstrømme, især ved indblæsningsarmaturet, hvor luften blev kastet ud til siderne af rummet hvor det hurtigt falder ned. Det kan ligeledes ses på snit A-A, at nedfaldsområdet er i samme område som indblæsningsarmaturet, hvor luften bliver afbøjet til siderne, og dermed løber langs væggen. Endvidere ses det, at luften løber langs gulvet, hvorefter det bliver suget op i området om-kring udsugningsarmaturet. Der forekommer mindre luftstrømning over det nedhængte loft end ved Case 1 og Case 4. På snit B-B ses strømningen under indblæsningsarmaturet, hvor det ses at strømningen cirkulerer under de perforerede plader med nedadgående strømning. På plantegningen nederst på figur E.3 ses, hvordan strømningen forløber gennem rummet under det nedhængte loft, hvor luften ved indblæsningen bliver afbøjet mod væggen og løber videre til udsugningen.

De markante ændringer i strømningsmønstret i rummet vurderes at være uafhængig af kølemetoden med køleloft med et nedhængt akustisk loft, men i stedet et resultat af den store luftmængde i kombination med det lille rum og det valgte armatur.

# E.3 Måling af termiske komfort

Analysen af den termiske komfort udføres som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*, hvor den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger. Der sammenlignes med kravene fra *DS* 474 og *DS* 7730 [20] [29].

#### E.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømninger.

#### E.3.1.1 Temperaturforhold

Det blev vist i afsnit A.3.1.1 - *Temperaturforhold*, at strålingsbidraget til den operative temperatur er så lille, at det er valgt at sammenligne de målte luft-temperaturer med kravene for operativ temperatur.

De korrigere middeltemperaturer målt under de korte målinger og den lange måling betragtes, hvor temperaturerne inddeles i de tre kategorier for den operative temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29]. Det ses at 94% af de målte temperaturer ligger indenfor kategori A og 97% ligger indenfor kategori B, hvilket anses for værende acceptabelt. Sammenlignes dette med Case 1 ses det, at temperatur indenfor kategori B ligeledes er 97%, mens temperaturer som ligger indenfor kategori A er højere for dette forsøg.



Figur E.4: Korrigeret målt luft temperatur inddelt i kategorier jf DE/EN ISO 7730.

De målte middeltemperaturer er indtegnet på temperaturprofiler vist på tegning T9 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 5*. Af temperaturprofilerne kan det ses, at der ingen temperaturgradient er i de fleste målepunkter. Dog er der enkelt målinger over og under den acceptable grænse. For den korte måling 3 er der målt en temperatur på 26,5°C i gulvhøjden 0,1 m på søjle B, men som det ses på plantegning er denne måling foretaget tæt på en varmekilde. Endvidere er der målt en temperatur på 22,2°C på søjle A i højden 2,4 m for den lange målingen. Denne måling er foretaget under en rist ved nedfaldsområdet, da det ikke forplantes videre ned i opholdszonen, anses det ikke for at være problematisk.

#### E.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved og ankel

Endvidere undersøges om der forekommer temperaturforskelle mellem hoved og ankel, hvilket kan give anledning til diskomfort. Ud fra tegning T9 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 5*kan det ses, at der ikke forekommer nogle nævneværdige temperaturgradienter i rummet, dog er der målt en høj temperatur i gulvhøjde på søjle B for korttidsmåling 3. Der vil være en temperaturforskel på 1,9°C mellem ankel og hoved for en stående person, hvilket er under den acceptable grænse på 3°C. Dermed er der ingen nævneværdige problemer med for store temperaturforskellige for dette forsøg.

#### E.3.1.3 Strålingsasymmetri

For at vurdere om der forekommer strålingsasymmetri i rummet, betragtes tabel E.2. Det ses, at temperaturerne på de forskellige flader varierer med 0,7°C, hvorfor det vurderes, at der ikke er problemer med strålingsasymmetri i rummet.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	t <sub>s,væg,øst</sub>	t <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>
24,8	24,7	24,5	24,5	24,2	24,1

Tabel E.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader

#### E.3.1.4 Lufthastigheder

De målte middellufthastigheder er indtegnet på hastighedsprofilerne vist på tegning T9 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 5*. Det kan ses ud fra profilerne at der er målt høj hastigheder i den halvdel af rummet med indblæsningsarmaturet. Dette område er også området med nedadgående strømning fra det kolde loft, hvilket også kan give anledning til de høje hastigheder. Ved at betragte den lange måling ses det, at der er målt for høje hastigheder på søjle A og B som er placeret i samme halvdel af rummet.

Ud fra hastighedsmålingerne kan det indikere, at der er problemer med træk i denne halvdel af rummet, hvorfor der er lavet en beregning af trækrisiko, hvilket kan ses på tegning T10 - *Trækrisiko for Case 5*. Det ses at der generelt er problemer med træk ved indblæsningsarmaturet og nedfaldsområdet, hvilket kan ses på langtidsmålingen og kortidsmåling 1 og 2. For korttidsmåling 2 i højden 2,4 m er der målt en hastighed på 0,6 <sup>m</sup>/<sub>s</sub>, hvilket er for høj til at være gældende ved beregning af DR, se ligning (6.1), da formlen kun er gældende for hastigheder mindre end 0,5 <sup>m</sup>/<sub>s</sub>. I beregningen er hastigheden derfor sat til 0,5 <sup>m</sup>/<sub>s</sub>, hvilket giver DR på 60% som er langt over det tilladelige. Målingerne i halvdelen af rummet med udsugning og opadgående strømning indikerer ingen problemer med træk.

# E.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i område med nedadgående strømning

På figur E.5 ses de målte temperaturer under langtidsmålingen for søjle A som funktion af tiden. Der ses ingen nævneværdige sammenhænge mellem fluktuationerne i målingerne af hverken temperatur eller hastighed, hvorfor det kan konkluderes, at et eventuelt kuldenedfald ikke forplanter sig ned i rummet.



Figur E.5: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle A.

Figur E.6: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle A.

# E.4 Kølekapacitetskoefficient

Kølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen til 5,5  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

# E.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 514,6 W ved stråling og 410 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 58 % og 42 % af den samlede varmestrøm.

# Case 6: Undersøgelse af historik del 1

I dette kapitel vil strømningsmønstret, den termiske komfort og kølekapacitetskoefficienten for Case 6 blive præsenteret. Ved Case 6 er varmekilderne placeret i den ene ende. Case 6 bruges sammen med Case 7 til at undersøge indflydelsen af den forhenværende varmebelastning og strømningsmønster i rummet.



*Figur F.1:* Forsøgsopstilling for Case 6 med punktlaster placeret i den ene ende af rummet.

I de foregående kapitler er det blevet vist at placeringen af varmekilder har en meget stor effekt på, hvorledes strømningsforholdet i rummet er. Det er også vist, at når der er tale om jævn belastning i rummet kan strømningsmønstret tage flere forskellige former. Derfor undersøges det om, hvad der er foregået forud for forsøget har en effekt på strømningsmønstret og komfortforholdene. Undersøgelsen laves ved først at placere punktlasterne i den ene ende, Case 6, hvorefter der skiftes til jævnt fordelte varmekabler, Case 7. Herved undersøges det om retningen på luftstrømningen bibeholdes og om det dermed er historikken, der er afgørende for, hvilken retning luftstrømningen har ved en jævnt fordelt varmebelastning.

For forsøget udføres en kortlægning af strømningsmønstret i rummet og en vurdering af den termiske komfort samt køleeffekten fra det kolde loft til rummet ved at udføre røgforsøg, fem korte målinger samt én lang måling. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

#### F.1 Rumforhold

Rumforholdene for de fem korte målinger og langtidsmålingen betragtes ud fra tabel F.1, hvor middeltemperaturerne målt i de fire zoner samt indblæsning og udsugning ses.

Ud fra de målte temperaturer i tabel F.1 laves en varmebalance for at undersøge den samlede varmetransport gennem loftet op til zone, da det er forudsat, at minimum 95% af den samlede varmetransport sker herigennem. Varmetransporten gennem loftet udgør 97,2% til 97,8% for Case 6, hvorfor betydningen af varmetransporten til zone 1 og 4 samt gennem ventilationen kan negligeres.

Endvidere undersøges overfladetemperaturerne på loftet op til zone 2. På figur F.2 ses et kontourplot for langtidsmålingen. Det ses, at der er en markant forskel på dette kontourplot og det for Case 1, se figur A.2.

Forsøg	Temperatur i zoner g 1 2 3Pum 3Over AK left 4					Indblæs-	Udsug-
	-	-	Kuili	Sover AK-Ion	•	mig	mig
Lang	23,5	5,0	24,5	22,2	23,9	22,4	23,4
Kort 1	23,8	5,3	24,5	22,2	24,1	22,3	23,6
Kort 2	23,8	5,4	24,5	22,2	24,1	22,4	23,6
Kort 3	23,6	5,0	24,5	22,2	23,9	22,3	23,4
Kort 4	24,0	5,5	24,5	22,2	24,3	22,5	23,8
Kort 5	23,9	5,3	24,5	22,1	24,2	22,2	23,7

Appendiks F - Case 6: Undersøgelse af historik del 1

 

 Tabel F.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3 for Case 6.



*Figur F.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

# F.2 Strømningsmønstre

For at kunne kortlægge strømningsmønstret for de to forsøg, er der udført røgforsøg. Forsøgene er udført, som beskrevet i afsnit 4.3.1 - *Røgforsøg*. Røgen er tilført rummet ved placeringerne vist på figur F.1.

**Forsøg 1:** Røg tilføres ved gulvet i hjørnet af hotboxen for at få en generel overblik over, hvordan luftstrømmen fordeler sig i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres over det nedhængt akustiske loft for at undersøge strømningen over loftet og nedfaldsområdet.

**Forsøg 3:** Røg tilføres med røgampuller for at bekræfte de observerede luftstrømninger.

### F.2.1 Resultater

På figur F.3 ses illustrationerne af de observationerne fra de førnævnte røgforsøg. På figur F.3 snit A-A ses, at luften stiger op ved varmekilderne, hvorefter der sker en strømning over og under det nedhængte loft mod den anden ende af rummet, hvor luften falder ned i rummet igen. På snit B-B ses observationerne omkring de perforerede plader ved nedfaldsområdet, hvor det ses, at strømningen trækkes ind langs væggen. På snit C-C ses, at der sker lige meget strømning ned i rummet fra alle de perforerende plader i rækken med nedfaldsområdet. Der er observeret røg ned til en meter fra gulvet.



Figur F.3: Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøg.

# F.3 Måling af termiske komfort

Analysen af den termiske komfort udføres som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*. Den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger. Der sammenlignes med kravene fra *DS 474* og *DS 7730* [20] [29].

#### F.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømning.

#### F.3.1.1 Temperaturforhold

Til vurdering af temperaturforholdene anvendes de korrigerede målte lufttemperaturer. Temperaturen sammenlignes med kravene til operativ temperatur fra *DS 7730*. Dette vurderes efter beregningen i afsnit 6.3.2 - *Temperaturforhold* at være acceptabelt da forskellen på den beregnede operative temperatur og lufttemperaturen er så lille.

På figur D.4 ses de korrigerede middeltemperaturer målt under de fem korte målinger og langtidsmålingen inddelt i de tre kategorier for den operative temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29]. Det ses, at temperaturen i 82% af målepunkterne ligger indenfor kategori A. Endvidere ses det at temperaturen i 95% af målepunkterne ligger indenfor kategori B, hvilket anses for at være acceptabelt.



*Figur F.4:* Korrigeret målt lufttemperatur for forsøget med punktlaster i den ene ende af rummet inddelt i kategorier jf. DE/EN ISO 7730.

På tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7* er middeltemperaturer indtegnet på temperaturprofilerne for Case 6 og 7. Ved at betragte Case 6 ses at der forekommer temperaturer over den acceptable grænse på 26°C for den korte måling 3 for søjle B i gulvhøjde. Målingen er dog foretaget tæt på varmekilderne, hvorfor det ikke anses som et problem.

Der er også målt temperaturer under den acceptable grænse på 23°C på søjle C for korttidsmåling 1, 2 og 3 samt langtidsmålingen i højden 2,4 m. Da disse målte temperaturer er udenfor opholdszonen anses det ikke for at være problematisk i forhold det termiske indeklima.

#### F.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved og ankel

For at undersøge yderligere om der forekommer diskomfort i rummet, betragtes temperaturforskellen mellem hoved og ankel for en stående person. Det ses dog ud fra tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og* 7,at der ikke forekommer nogle temperaturforskelle på over den acceptable grænse på 3°C. Den størst forekommende temperaturforskel er 0,81°C målt på den lange måling på den faste målesøjle.

#### F.3.1.3 Strålingsasymmetri

For at vurdere om der forekommer strålingsasymmetri i rummet, betragtes tabel F.2. Det ses, at temperaturerne på de forskellige flader varierer med  $1,6^{\circ}$ C, hvorfor det vurderes, at der ikke er problemer med strålingsasymmetri i rummet.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	t <sub>s,væg,nord</sub>	t <sub>s,væg,øst</sub>	t <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK</sub> -underside
23,9	24,1	24,3	25,2	23,6	23,9

Tabel F.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader

#### F.3.1.4 Lufthastigheder

På tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7* er de målte middelhastigheder er indtegnet på hastighedsprofiler. Der ses, at der er målt høje hastigheder mange steder i rummet. De høje målinger er foretaget

i gulvhøjde fra den perforerede plade med nedadgående strømning og til den perforerede plade før stedet med primært opadgående strømning, hvorfor der vurderes at være stor risiko for træk i gulvhøjde. Yderligere er der målt høje lufthastigheder enkelte steder i området med opadgående strømning og på søjle C ved måling 5 der er placeret opad bagvæggen hvor der er nedadgående strømning.

For at undersøge nærmere om de høje lufthastigheder giver anledning til træk beregnes trækrisikoen (DR) for hver målepunkt. De beregnede værdier kan ses indtegnet på tegning T12 - *Trækrisiko for Case 6 og 7*. Det ses, at værdierne målt langs gulvet generelt ligger højt, men at det kun er på søjle B måling 4, søjle B måling 3 samt søjle C for den lange måling, at værdierne er over den tilladte grænse på 20%. Yderligere er der målt en værdier højere end det tilladte på søjle C måling 5 i højden 1,1 m, på søjle A måling 1 i højderne 1,1 og 1,7 m samt på søjle C måling 2 i højden 2,4 m.

# F.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i området med nedadgående strømning

På figur F.5 og F.6 ses de målte temperaturer og hastigheder som funktion af tid. Det kan ses af figur F.5, at temperaturen i højden 2,4 m fluktuerer med ca. 2°C. Det lader til, at påvirkningen af temperaturen falder med højden, således der i højden 0,1 m ikke ses nogen påvirkning. Dermed kunne det se ud til, at den nedadgående strømning påvirker temperaturen i opholdszonen. Ligeledes kan det ses på figur F.6, at der er en stor variation på hastigheden. Hastighederne er højest ved gulvet i højden 0,1 m.



Figur F.5: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle C.

Figur F.6: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle C.

# F.4 Kølekapacitetskoefficient

Kølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen til 5,5  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

### F.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 509,2 W ved stråling og 421 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 54% og 46% af den samlede varmestrøm.

# Case 7: Undersøgelse af historik del 2

I dette kapitel vil strømningsmønstret, den termiske komfort og kølekapacitetskoefficienten for Case 7 blive præsenteret. I Case 7 er varmebelastningen jævnt fordelt på gulvet. Case 7 bruges sammen med Case 6 til at undersøge indflydelsen af den forhenværende varmebelastning og det forhenværende strømningsmønster i rummet.



*Figur G.1:* Forsøgsopstilling for Case 7 med varmekabler placeret *jævnt over gulvet.* 

Undersøgelsen af historik laves ved først at placere punktlasterne i den ene ende, Case 6, hvorefter der skiftes til jævnt fordelte varmekabler, Case 7. Herved undersøges det om retningen på luftstrømningen bibeholdes, og om det dermed er historikken, der er afgørende for, hvilken retning luftstrømningen har ved en jævnt fordelt varmebelastning, se figur G.1.

For forsøget udføres en kortlægning af strømningsmønstret i rummet og en vurdering af den termiske komfort samt køleeffekten fra det kolde loft til rummet ved at udføre røgforsøg, fem korte målinger samt én lang måling. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

### G.1 Rumforhold

Rumforholdene for de fem korte målinger og langtidsmålingen betragtes ud fra tabel G.1, hvor middeltemperaturerne målt i de fire zoner samt indblæsning og udsugning ses. Sammenlignes der med temperaturerne målt under Case 6 vist i tabel F.1, ses, at temperaturerne ikke varierer meget, men at der er en lille forskel på temperaturerne i mellem de to cases, hvilket vurderes, at skyldes en forskellen i varmebelastning på 20 W mellem forsøgene.

Foreda		Т	emperat	Indblæs-	Udsug-		
rorsøg	1	2	$3_{\text{Rum}}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	23,4	4,8	24,5	21,9	23,7	22,3	23,4
Kort 1	23,5	4,9	24,5	21,9	23,8	22,2	23,4
Kort 2	23,5	4,9	24,5	21,9	23,8	22,2	23,5
Kort 3	23,5	4,9	24,5	22,0	23,8	22,2	23,5
Kort 4	23,5	5,0	24,5	22,0	23,8	22,2	23,5
Kort 5	23,5	4,9	24,5	21,9	23,8	22,1	23,4

 

 Tabel G.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3 for Case 7.
Ud fra de målte temperaturer i tabel G.1 laves en varmebalance for at undersøge den samlede varmetransport gennem loftet op til zone, da det er forudsat, at minimum 95% af den samlede varmetransport sker herigennem. Varmetransporten gennem loftet udgør 97,1% til 97,4% for Case 6, hvorfor betydningen af varmetransporten til zone 1 og 4 samt gennem ventilationen kan negligeres.

Endvidere undersøges overfladetemperaturerne på loftet op til zone 2. På figur G.2 ses kontourplottet for forsøget med jævnfordelt varmebelastning. Det ses at overfladetemperaturen er lignende overfladetemperaturerne for Case 6, se figur F.2



*Figur G.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

## G.2 Strømningsmønstre

For at kunne kortlægge strømningsmønstret for de to forsøg, er der udført røgforsøg. Forsøgene er udført, som beskrevet i afsnit 4.3.1 - *Røgforsøg*. Røgen er tilført rummet ved placeringerne vist på figur G.1.

**Forsøg 1:** Røg tilføres ved gulvet i hjørnet af hotboxen for at få en generel overblik over, hvordan luftstrømmen fordeler sig i rummet.



Figur G.3: Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøg.

204

**Forsøg 2:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen over loftet og nedfaldsområdet.

**Forsøg 3:** Røg tilføres ved gulvet midt i rummet for at få et generelt overblik over, hvordan luftstrømmen fordeler sig i rummet.

**Forsøg 4:** Røg tilføres med røgampuller for at bekræfte de observerede luftstrømninger.

## G.2.1 Resultater

På figur G.3 ses illustrationerne af observationerne for de førnævnte røgforsøg. Der er blevet gjort de sammen observationer for strømningsretningen for både Case 6 og 7, hvilket betyder, at det er muligt at bevare strømningsretningen på trods af ændringen af placeringen af belastningen. På figur G.3 snit A-A ses, at luften stiger op i den ene ende, hvorefter der sker en strømning over og under det nedhængte loft mod den modsatte ende af rummet, hvor luften falder ned i rummet igen. Yderligere ses det, at luften danner en lille cirkulation ved den opadgående strøm på hver sin side af indblæsningsarmaturet. På snit B-B ses observationerne omkring de perforerede plader ved nedfaldsområdet, hvor det ses, at luften falder ned med en svag strøm mod væggen. På snit C-C ses, at der sker lige meget strømning ned i rummet fra alle de perforerende plader i nedfaldsområdet. Der er observeret røg ned til omkring en meter fra gulvet.

## G.3 Måling af termiske komfort

Den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger. Der sammenlignes med kravene fra *DS 474* og *DS 7730* [20] [29].

#### G.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømninger.

#### G.3.1.1 Temperaturforhold

Til vurdering af temperaturforholdene anvendes de korrigerede målte lufttemperaturer. Temperaturen sammenlignes med kravene til operativ temperatur fra *DS 7730* [29]. Dette vurderes efter beregningen i afsnit 6.3.2 - *Temperaturforhold* at være acceptabelt, da forskellen på den beregnede operative temperatur og lufttemperaturen er så lille.

På figur G.4 ses de korrigerede middeltemperaturer målt under de fem korte målinger og langtidsmålingen inddelt i de tre kategorier for den operative temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29]. På figur G.4 ses de korrigerede middeltemperatur. Det ses, at 93% af de målte temperaturer ligger indenfor kategori A, mens 98% af temperaturerne ligger indenfor kategori B.



*Figur G.4:* Korrigeret målt operativ temperatur for forsøget med jævnt fordelte varmekabler inddelt i kategorier jf. DE/EN ISO 7730.

På tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7* er middeltemperaturer indtegnet på temperaturprofilerne for Case 6 og 7. Ved at betragte Case 7 ses, at der ikke forekommer temperaturer over den acceptable grænse på 26°C. Desuden ses det at der for Case 7 er fundet en temperatur under den acceptable grænse, hvilket er målt for langtidsmålingen på søjle C i højden 2,4 m. Da temperaturen måles udenfor opholdszonen anses det ikke for at være problematisk i forhold det termiske indeklima.

#### G.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde

For at undersøge yderligere om der forekommer diskomfort i rummet, betragtes temperaturforskellen mellem hoved og ankel for en stående person. Det ses dog ud fra tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7*,at der ikke forekommer nogle temperaturforskelle over den acceptable grænse på 3°C. Den størst forekommende temperaturforskel er 1,34°C for Case 7 for den lange måling på søjle B.

#### G.3.1.3 Strålingsasymmetri

For at vurdere om der forekommer strålingsasymmetri i rummet, betragtes tabel G.2. Det ses at temperaturerne på de forskellige flader varierer med 2,5°C for Case 7, hvorfor det vurderes at der ikke er problemer med strålingsasymmetri i rummet.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,øst</sub>	t <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>
24,2	24,5	24,6	24,8	26,5	24,0

Tabel G.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader

#### G.3.1.4 Lufthastigheder

På tegning T11 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 6 og 7* er de målte middelhastigheder er indtegnet på hastighedsprofiler. Der ses at der er målt høje hastigheder mange steder i rummet. Der er for alle målepunkterne i gulvhøjde fra den perforerede plade med nedadgående strømning og til den perforerede plade før stedet med primært opadgående strømning, hvorfor der vurderes at være stor risiko for træk i gulvhøjde. Derudover er der ved bagvæggen med hhv. opadgående og nedadgående strømning målt høje luft-hastigheder, se søjle C ved måling 5 og søjle A måling 1. Yderligere er der målt høje lufthastigheder fleres steder i højden 2,4 m.

For at undersøge nærmere om de høje lufthastigheder giver anledning for træk beregnes trækrisikoen (DR) for hver målepunkt. De beregnede værdier kan ses indtegnet på tegning T12 - *Trækrisiko for Case 6 og 7*. Det ses at værdierne målt langs gulvet generelt ligger højt,og at der på søjle A og B måling 4, søjle B måling 3 samt søjle C for den lange måling, at værdierne er over den tilladte grænse på 20%.

# G.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i område med nedadgående strømning

På figur G.5 og G.6 ses de målte temperaturer og hastigheder som funktion af tid. Det kan ses af figur G.5, at temperaturen i højden 2,1 m fluktuerer med ca. 1,6°C. Det lader til, at påvirkningen af temperaturen falder med højden, således der i højden 0,1 m næsten ikke ses nogen påvirkning. Dermed kunne det se ud til at den nedadgående strømning påvirker temperaturen i opholdszonen. Ligeledes kan det ses på figur G.6, at der er en stor variation af hastigheden.



Figur G.5: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle C.

Figur G.6: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle C.

## G.4 Kølekapacitetskoefficient

Kølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. Kølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen 5,3  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

## G.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 521,3 W ved stråling og 389 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 57% og 43% af den samlede varmestrøm.

## G.6 Overgang mellem Case 6 og 7

For at undersøge nærmere hvad der sker ved overgangen mellem Case 6 med varmekilderne placeret i den ene ende af rummet og Case 7 med jævn fordelt varmebelastning, udføres der en måling ved overgangen mellem de to cases. Således slukkes punktvarmekilderne og gulvvarmen tændes uden tilstedeværelse i rummet. Målingen foretages med de flytbare søjler placeret som ved langtidsmålingen. Der optegnes temperatur- og hastighedsprofiler for hver af de flytbare søjler. Profilerne optegnes af gennemsnitsværdier over 40 minutter, hvor profiler optegnes over 10 timer, således der fremkommer 15 profiler for hhv. hastighed og temperatur. Ligeledes benyttes gennemsnitsværdier over 4 minutter, hvor profilerne optegnes over en periode på 1 time. Temperaturprofilerne kan ses indtegnet på figur G.7, mens hastighedsprofilerne kan ses indtegnet på figur G.8. Placeringen af søjlerne kan ses figur 4.7.

På profilerne optegnet over perioden på 10 timer ses det, at de største ændringer sker i løbet af den første time. Derfor ses der nærmere på den første time, hvor det ses at ændringerne i både temperatur og hastighed ser ud til at ske gradvist. Der observeres de største ændringer på søjle C, der er placeret i området med nedadgående strømning.

Generelt ses det, at der sker et temperaturfald på omkring 1°C, hvilket er konsistent med faldet i belastning fra 930 til 910 W. For hastighedsprofilerne ses det, at hastighederne ændrer sig meget lidt for søjle A og B, mens der sker en større ændring for søjle C.

Det ses, at hastighedsprofilet retter sig mere ud ved overgangen, således der bliver mere ensartet hastigheder over hele profilet under skiftet til jævnt fordelt varmebelastning.



*Figur G.7: Temperaturprofiler for hver af de flytbare søjler ved overgang mellem Case 6 og 7. Tid i sekunder.* 



*Figur G.8:* Hastighedsprofiler for hver af de flytbare søjler ved overgang mellem Case 6 og 7. Tid i sekunder.

# Case 8: Skæv fordeling af varmekilder

I dette kapitel vil strømningsmønstret, den termiske komfort og kølekapacitetskoefficienten for Case 8 blive præsenteret. I Case 8 ændres placeringen af varmekilder i forhold til Case 1 for at undersøge varmekildernes indflydelse på strømningsmønstret.



*Figur H.1: Plantegning med loftsplan, forsøgsopstillingen for røgforsøg samt markering af placering af varmekilder.* 

For yderligere at undersøge varmekildernes indflydelse på strømningsmønstret, som blev gjort i Case 2 og 3 yderligere, udføres et forsøg, kaldt Case 8, med varmekilderne fordelt, som vist på figur H.1. Det undersøges om der ved skæv varmelast i den ene ende kan forekomme træk for den person placeret i den anden ende. Varmekilderne er placeret lidt skævt, hvor 10 af minimakinerne er placeret under de to perforerede plader i det øverste hjørne og to mini-makiner er placeret under de to modsatte perforerede plader.

For Case 8 udføres en kortlægning af strømningsmønstret i rummet og en vurdering af den termiske komfort samt køleeffekten fra det kolde loft til rummet ved at udføre røgforsøg, fem korte målinger samt én lang måling. Beskrivelser af de udførte forsøg og målemetodikker kan findes i kapitel 4 - *Laboratorieopstilling*. Databehandlingen for forsøgene er udført som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*.

# H.1 Rumforhold

Rumforholdene for Case 8 betragtes ud fra tabel H.1, hvor de korrigerede middeltemperaturer målt i de fire zoner samt indblæsning og udsugning kan ses. Det ses, at temperaturene varierer med 0,2-0,3°C for zonerne, hvorfor det kan konkluderes at der er opnået stationære forhold under målingerne.

Forsda	Temperatur i zoner				Indblæs-	Udsug-	
roisøg	1	2	$3_{Rum}$	3 <sub>Over AK-loft</sub>	4	ning	ning
Lang	24,0	5,7	24,5	22,5	24,4	23,8	23,8
Kort 1	24,0	5,6	24,5	22,5	24,4	23,7	23,8
Kort 2	24,1	5,8	24,5	22,6	24,6	23,7	23,9
Kort 3	24,2	5,9	24,5	22,6	24,7	23,7	24,0
Kort 4	24,2	5,8	24,5	22,5	24,7	23,7	24,0
Kort 5	24,0	5,6	24,5	22,5	24,5	23,7	23,8

 

 Tabel H.1: Korrigerede temperaturer i zoner samt indblæsning og udsugning i zone 3.

Under forsøgene forudsættes det, at minimum 95% af samlede varmetransport skal ske gennem loftet op til zone 2 for at kunne negligere varmetransport til



de øvrige zoner. Ved opstilling af varmebalancen for hotboxen fås at 99% af varmetransporten sker gennem loftet, hvorfor antagelsen er opfyldt.

*Figur H.2:* Kontourplot med korrigerede overfladetemperaturerne på det kolde loft. Temperaturer er i °C.

På figur H.2 ses et kontourplot over de målte overfladetemperaturer på loftet op zone 2 for langtidsmålingen. På plottet ses et omrids af hotboxen samt de 12 målepunkter for overfladetemperaturen. Det ses, at der er en temperaturforskel på 3,2°C over loftet med den højeste temperatur målt i øverste hjørne, hvilket skyldes placeringen af ventilationsanlægget hørende til zone 2, se afsnit L.5 - *Overfladetemperaturer*. Ved sammenligning med kontourplottet for Case 1, ses det at samme temperaturfordeling over loftet forekommer, men der forekommer højere temperaturer over de 12 mini-manikiner. Forskellen på maksimum-, minimum- og middeltemperaturer er hhv. 0,5°C, 0,7°C og 0,7°C for Case 1 og 8.

## H.2 Strømningsmønstre

Strømningsmønstrene i hotboxen for Case 8 kortlægges ved udførelse af røgforsøg, som beskrevet i afsnit 4.3.1 - Røgforsøg, men røgen er tilført rummet ved placeringerne vist på figur H.1 og beskrevet nedenfor.

**Forsøg 1:** Røg tilføres i gulvhøjde i hjørnet af hotboxen for at få en generel forståelse af luftstrømningerne i rummet.

**Forsøg 2:** Røg tilføres i gulvhøjde i midten af hotboxen for at få en generel forståelse af luftstrømning i rummet.

**Forsøg 3:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen ved området med nedadgående strømning.

**Forsøg 4:** Røg tilføres over det nedhængte loft for at undersøge strømningen over loftet samt området med opadgående strømning.

**Forsøg 5:** Røg tilføres med røgampuller for at undersøge sekundære strømningsmønstre og bekræfte observationerne fundet i røgforsøg 1-4.

## H.2.1 Resultater

På figur H.3 ses en skitse af observationerne for udførelsen af de førnævnte røgforsøg. Betragtes snit A-A ses, at strømningsretningen har samme retning som observeret i Case 1 og 3, se figur A.3 og C.3. Det ses, at størstedelen af strømningen foregår gennem de yderste perforerede plader, og der ikke forekommer meget strømning igennem de midterste perforerede plader. På snit B-B ses det at strømningen er påvirket af de to minimanikiner, som er placeret under de perforerede plader, se figur H.1. Omkring varmekilderne forekommer en lille opadgående strømning, men samtidig er der en nedadgående strømning omkring varmekilderne. Luften fra de perforerede plader over varmekilderne drejer af og falder ned sammen med luften fra de to andre perforerede plader, hvor der ikke er placeret varmekilder under. På snit C-C ses at der forekommer en kraftig opadgående strømning over de 10 varmekilder, som er



Figur H.3: Illustration af observationer af strømningsmønstret under røgforsøgene.

placeret under to perforerede plader, se figur H.1. Der er en mindre opadgående strømning ved de to andre perforerede plader, hvor noget af luften under disse perforerede plader søger mod varmekilderne og stiger op.

# H.3 Måling af termiske komfort

Analysen af den termiske komfort udføres som beskrevet i kapitel 6 - *Procedure for resultatbehandling*. Den termiske komfort analyseres ud fra de korte og lange målinger. Der sammenlignes med kravene fra *DS* 474 og *DS* 7730 [20] [29].

## H.3.1 Resultater

Der ses på lufttemperatur, temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde, strålingsasymmetri og lufthastigheder. Yderligere betragtes temperatur- og hastighedsvariationerne i området med nedadgående strømninger.

### H.3.1.1 Temperaturforhold

Temperaturforholdene vurderes ud fra de korrigerede målte lufttemperaturer, hvor temperaturerne sammenlignes med kravene til den operative temperatur fra *DS 7730* [29]. Dette vurderes efter beregningen i afsnit 6.3.2 - *Temperaturforhold* at være acceptabelt, da forskellen på den beregnede operative temperatur og lufttemperaturen er lille.

På figur H.4 ses de korrigerede middeltemperaturer målt for de fem korte målinger og langtidsmålingen inddelt i de tre kategorier for operativ temperatur fra *DS/EN ISO 7730* [29]. Det ses, at temperaturen i 86% af målepunkterne ligger i kategori A, og 95% af målepunkterne ligger i kategori B, hvilket anses for at være acceptabelt. Ved sammenligning med Case 1 og 3 ses, at der er 92% af målepunkterne som ligger indenfor kategori A for Case 3 og 88% for Case 1. Endvidere ligger 96% af målepunkterne indenfor kategori B for Case 3 og 97% for Case 1.



*Figur H.4:* Korrigeret målt luft temperatur inddelt i kategorier jf DE/EN ISO 7730.

De målte middeltemperaturer er indtegnet på temperaturprofiler vist på tegning T13 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 8*. De temperaturer, som ligger under den acceptable grænse på 23°C, er målt for den lange måling på søjle A i højderne 2,1 m og 2,4 m samt for den korte måling 1 på søjle B i højden 2,4 m. Da disse målte temperaturer ligger uden for opholdzonen anses det ikke for at være problematisk. Det bemærkes, at de koldeste temperaturer er målt ved de perforerede plader ved nedfaldsområdet. Endvidere er der målt temperaturer højere end grænsen på 26°C for den lange måling på søjle C i højden 0,1 m og 0,6 m samt for den korte måling 5 på søjle C i højden 0,6 m. De høje målte temperaturer skyldes, at de 10 varmekilder er placeret tæt på dem, hvorfor det ikke anses for være sammenligneligt med virkelige forhold. Udover de førnævnte temperaturer forekommer der ingen markante temperaturgradienter.

#### H.3.1.2 Temperaturforskel mellem hoved- og ankelhøjde

Der er ingen problemer med temperaturforskelle mellem ankel- og hovedhøjde for dette forsøg. For den lange måling på søjle C er der en forskel på 2,8°C for en stående person, men denne måling anses ikke at være repræsentativ for hele målingen, da den er fundet, hvor de 10 varmekilder er placeret, som har givet en høj temperatur i højderne 0,1 og 0,6 m.

#### H.3.1.3 Strålingsasymmetri

Endvidere vurderes det om der forekommer problemer med strålingsasymmetri ud fra de målte overfladetemperaturer i zone 3. I tabel H.2 ses de målte overfaldetemperaturer, hvor det ses, at der er en lille temperaturforskel, så det vurderes ikke at være problemer med strålingsasymmetri i rummet.

<i>t</i> <sub>s,væg,vest</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,nord</sub>	t <sub>s,væg,øst</sub>	<i>t</i> <sub>s,væg,syd</sub>	t <sub>s,gulv</sub>	t <sub>s,AK-underside</sub>
24,9	24,6	24,3	24,7	23,9	24,2

Tabel H.2: Korrigerede middeltemperaturer for overflader.

#### H.3.1.4 Lufthastigheder

De målte middellufthastigheder er indtegnet på hastighedsprofiler vist på tegning T13 - *Temperatur- og hastighedsprofiler for Case 8*. Det ses ud fra profilerne at der er målt høje hastigheder i højderne 0,1 m og 2,4 m på næsten alle målingerne, hvorfor der kan tyde på, at der forekommer en kraftig strømning ved gulvet og under det nedhængte loft. Det er særligt i området med nedadgående strømning, der er målt høje hastigheder ved gulvet og ved området med opadgående strømning er der målt høje hastigheder under det nedhængte loft.

I nedfaldsområdet kan der forekomme træk, hvorfor tegning T14 - *Trækrisiko for Case 8* betragtes. Her ses det ligeledes, at der er risiko for trækproblemer ved ankelhøjde, da trækrisikoværdien ligger over den acceptable grænse på 20%, hvilket kan ses på kort måling 1 og 2 samt langtidsmålingen.

#### H.3.1.5 Temperatur og hastighedsvariationer i område med nedadgående strømning

På figur H.5 og H.6 ses de målte temperaturer og hastigheder som funktion af tid for de første 10 minutter for langtidsmålingen. Det ses af figur H.5, at der ikke forekommer store temperatursvingninger, hvor den største forekommer i højden 2,1 m, som svinger ca. 1°C. På figur H.6 ses, at der forekommer større hastighedssvingninger især i højderne 1,7 m, 2,1 m og 2,4 m.



Figur H.5: Temperatur over tid, langtidsmåling søjle A.

Figur H.6: Hastighed over tid, langtidsmåling søjle A.

## H.4 KøleKølekapacitetskoefficient

KøleKølekapacitetskoefficienten beregnes som beskrevet i afsnit 6.4 - *Køleeffekt*. KøleKølekapacitetskoefficienten beregnes ud fra langtidsmålingen til 6,3  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

## H.5 Varmestrøm ved konvektion og stråling

Varmestrømmen overført via konvektion og stråling beregnes som beskrevet i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling* for langtidsmålingen. Det beregnes, at der overføres 469 W ved stråling og 501 W ved konvektion, hvilket udgør hhv. 49 % og 52 % af den samlede varmestrøm.

# Måleudstyr

I dette kapitel præsenteres det benyttede måleudstyr brugt til feltmålinger på COWI og laboratoriemålinger. Præcision, dataopsamling og kalibreringsudtryk er beskrevet for hver enkelt måleudstyr. Yderligere er metoden til kalibreringen beskrevet, såfremt kalibreringen er udført i forbindelse med målingerne til dette projekt.

## I.1 Helios datalogger

Til opsamling af data benyttes Helios Plus 2287A data logger, som er en modulopbygget data opsamlingssystem til at måle spænding, strøm, modstand, temperatur mm. Dataloggeren er opbygget af et High Accuracy A/D Converter og fem thermocouple/DVS Scannes, hvor hver af de fem DVS Scannes er tilsluttet de 20 kanaler i A/D Converteren. Der er dermed muligt at tilslutte måleudstyr på 100 kanaler. Dataloggeren har en usikkerhed på 0,488  $\mu$  V [32]. Der er en usikkerhed mellem hver kanal, som ligger mellem 1,7 og 7,9  $\mu$  V, hvilket svarer til en makismal fejl på  $\pm$  0,075 K ved brug af type K termoelementer [32]. Dataloggeren har en minimum loggertid på 10 sekunder, hvis der benyttes alle 100 kanaler, da den skal bruge tid på at skrive og gemme målingerne i datafilen, og kan dermed ikke nå at danne en fil, hvis loggertiden skal være mindre. Således bemærkes det, at loggeren gemmer sekventielt, så værdien ved 120 sekunder på kanel 95 i virkeligheden tilhører tiden 129 sekunder. På figur I.1 ses et billede af Helios Plus 2287A data loggeren med tilhørende computer.



Figur I.1: Helios datalogger med tilhørende computer som viser det anvendet LabView program.

For målingerne udført i laboratoriet og Visionshuset er dataloggeren tilsluttet en kompensationsboks, hvor termoelementerne tilsluttes. Dermed måles en temperaturforskel mellem kompensationsboksen og målepunktet i rummet. Det er nødvendigt at kende temperaturen i kompensationsboksen for at kunne bestemme den aktuelle temperatur i hver målepunkt. For målingerne udført i laboratoriet er der anvendt et præcisionstermometer, hvor sensoren er placeret inde i kompensationsboksen. Præcisionstermometeret har en usikkerhed på  $\pm$  0,01°C i måleområdet -200 til 800°C [33]. På figur I.2 ses et billede af præcisionstermometeret.



Figur I.2: Præsicionstermometeret med tilhørende computer som viser det anvendte LabView program.

For målingerne udført i Visionshuset er der anvendt en ispunktreference, KAYE K170-6, med seks kanaler. I ispunktreference er temperaturen holdt på 0°C. Ispunktreferencen er tilsluttet Helios dataloggeren og seks termoelementer er tilsluttet ispunktreferencen, hvor termoelementerne er placeret indeni kompenstionsboksen, således måles forskellen mellem ispunktreferencen og kompensationsboksen. Denne temperatur anvendes til at bestemme temperaturen for målepunktet. Måleusikkerheden på ispunkreferencen er  $\pm$  0,02 K jf. [32]. På figur I.3 ses et billede af ispunktreferencen.



Figur I.3: Ispunktreferencen.

Endvidere er der en måleusikkerhed mellem de målte temperaturer i kanalerne i kompensationsboksen på  $\pm$  0,005 K. Kompensationsboksen er isoleret i en flamingokasse for at holde en konstant temperatur og minimere påvirkninger

fra omgivelserne. Termoelementerne måler en spænding, hvilket logges ved hjælp af Helios datalogger tilsluttet en computer med programmet LabView. I programmet LabView omdannes den målte spændingsforskel til en temperaturforskel via et kalibreringsudtryk som beskrevet i afsnit I.2.1 - *Kalibrering af termoelementer*.

# I.2 Termoelementer

I forbindelse med udførelsen af temperaturmålinger i de forskellige forsøg er tynde og tykke type K termoelementer anvendt, se figur I.4. De tynde termoelementer benyttes til at måle overflade temperatur i rummet, mens de tykke termoelementer benyttes til at måle lufttemperatur samt operativ temperatur. Type K termoelementer består af to forskellige nikkel blandinger, hvilket er chromel og alumel. Følsomheden for type K termoelementer er cirka 41  $\mu$ V/K. Måleusikkerheden for de tykke termoelementer er ± 0,028 K og for de tynde termoelementer er måleusikkerheden ± 0,023 K. [32]



Figur I.4: Tynde og tykke type K termoelementer.

Termoelementer har en lille termisk masse, hvilket gør, at de kan måle temperatursvingningerne i rummet. De tykke og tynde termoelementer har en tidskonstant er hhv. omkring 33 sek og 4,4 sek, hvorfor de tynde har en hurtigere reaktionstid. [34]

En aluminiums tip er påsat i den ene ende af de tykke termoelementer, som er forsølvede. Det er eftervist i artiklen *Measuring air temperature in glazed ventilated facades in the presence of direct solar radiation*, se [35], at ved en forsølvning af aluminiums tippen og ved placering af termoelementerne i forsølvede rør kan effekten fra direkte solstråling minimeres ved måling af lufttemperatur. [35] Derfor måles lufttemperaturen i Visionshuset med forsølvede termoelementer placeret i sølvrør som ses på figur 3.7 (a). I laboratoriet måles lufttemperaturen med forsølvede termoelementer.

Til måling af operativ temperatur placeres termoelementet i en gråmalet mat bordtennisbold med en diameter på 40 mm, se figur I.6. Det er valgt at måle den operative temperaturer ud fra metoden beskrevet i *Operative temperature control of radiant surface heating and cooling systems* [36]. Her undersøge hvor repræsentativ den målte temperatur er i forhold til en persons operative temperatur i midten af et rum ved at anvende forskellige størrelse, form, farve og position af målesensoren. Det kunne konkluderes at den bedst anvendelige sensor, som blev påvirke af stråling og konvektion som en person, skulle være en kugle med en diameter på mellem 30 og 50 mm med en mat gråfarve ved en placering midt i rummet. [36]

De tynde termoelementer benyttes til at måle overfladetemperaturer i rummet. For at sikre kontakten mellem overfladen og termoelementet anvendes termopasta på loddepunktet, som påklæbes overfladen med et stykke tyndt tape, se figur I.5(b).



Figur I.5: Opstilling til måling af a) lufttemperatur, b) overfladetemperatur



Figur I.6: Opstilling til måling af operativ temperatur.

## I.2.1 Kalibrering af termoelementer

En kalibrering af termoelementerne udføres for at sikre at den korrekte temperatur opnås ved målingerne. Kalibreringen udføres for fem forskellige målepunkter hhv.  $10^{\circ}$ C,  $20^{\circ}$ C,  $25^{\circ}$ C,  $30^{\circ}$ C og  $40^{\circ}$ C. Disse temperatur er valgt i forhold til de forventede temperatur i forbindelse med forsøgene udført i laboratoriet og Visionshuset.

Kalibreringen udføres med det førnævnte udstyr samt en målebrønd, ISO-CAL 6 VENUS 2140B plus. Målebrønden anvendes ved at placere termoelementerne og præcisionstermometer i målebrønden, hvor en ønskede temperatur kan fastholdes, mens temperaturen logges. På de tykke og tynde termoelementernes spids er endvidere påsat malertape for at undgå kontakt mellem termoelementerne og målebrønden, som kan forårsage støj i målingen. På figur I.7 ses kalibreringskurven og -udtrykket for termoelement nr. 9, som under forsøgene udført i hotboxen er placeret på den fast målesøjle i højden 1,1 m. Det ses at tendenslinjen passer på de målte værdier.



◆ Chan9 (Tyk termoelement) [V] — Lineær (Chan9 (Tyk termoelement) [V])

*Figur I.7:* Kalibreringsudtrykket for termoelement nr. 9 brugt under laboratorieforsøgene.

Alle kalibreringskurverne og -udtrykkene kan ses på bilag-CD - "Kalibrering" og bilag-CD - "Kalibrering".

#### I.2.2 Usikkerhed ved måling med termoelementer

Usikkerheden i forbindelse med måling af temperaturen beregnes for systemerne for anvendt i Visionshsuet og i laboratoriet, som beskrevet i *Temperature measurements using type K thermocouples and the Fluke Helios Plus* 2287A data logger [32]. Usikkerheden på Helios dataloggeren, ispunktreferencen, kompensationsboksen og termoelementerne medregnes for systemet anvendt i Visionshuset ved ligning (I.1), hvor der fås en total usikkerhed på 0,09 K. Endvidere beregnes usikkerheden for den målte temperatur i laboratoriet, se ligning (I.2). Der er som sagt ikke tilsluttet en ispunktreference, men anvendt et præcisionstermometer med en usikkerhed på 0,01°C.

$$\begin{split} \delta T_{COWI} &= \sqrt{(\delta T_a)^2 + (\delta T_b)^2 + (\delta T_c)^2 + (\delta T_d)^2 + (\delta T_e)^2} \quad (I.1) \\ \delta T_{COWI,tyk} &= \sqrt{(0,075)^2 + (0,02)^2 + (0,028)^2 + (0,005)^2 + (0,028)^2} \\ &= 0,087K \\ \delta T_{COWI,tynd} &= \sqrt{(0,075)^2 + (0,02)^2 + (0,028)^2 + (0,005)^2 + (0,023)^2} \\ &= 0,09K \end{split}$$

$$\begin{split} \delta T_{LAB} &= \sqrt{(\delta T_a)^2 + (\delta T_c)^2 + (\delta T_d)^2 + (\delta T_e)^2 + (\delta T_f)^2} \quad (I.2) \\ \delta T_{LAB,tyk} &= \sqrt{(0,075)^2 + (0,028)^2 + (0,005)^2 + (0,028)^2 + (0,01)^2} \\ &= 0,086K \\ \delta T_{LAB,tynd} &= \sqrt{(0,075)^2 + (0,028)^2 + (0,005)^2 + (0,023)^2 + (0,01)^2} \\ &= 0,08K \end{split}$$

- $\delta T$  Total usikkerhed ved brug af termoelement [K]
- $\delta T_a$  | Usikkerhed fra Helios datalogger [K]
- $\delta T_b$  Usikkerhed fra ispunktreference [K]
- $\delta T_c$  Usikkerhed fra forbindelse mellem ispunktreference og kompensationsboks [K]
- $\delta T_d$  | Usikkerhed fra kompensationsboks [K]
- $\delta T_e$  | Usikkerhed fra termoelementer [K]
- $\delta T_f$  | Usikkerhed fra præcisionstermometer [K]

## I.3 Anemometre

Anemometer anvendes til at måle farten af luften både i laboratoriet og Visionshuset, hvor der er anvendt 13 anemometre. De anvendte anemometre kaldes lavhastighedsanemometre. Det er et termisk anemometer, som måler den forøgede konvektive varmeafgivelse, der opstår når et opvarmet legeme udsættes for en luftbevægelse. Anemometret består af to føler, som er hhv. opvarmet og uopvarmet, hvor effekten hørende til den opvarmede føler styres så der opnås den samme temperaturdifferens mellem de to følere. Dermed bliver den tilførte effekt et mål for lufthastigheden uafhængigt af forekommende ændringer i lufttemperaturen [34]. På figur I.8 ses et billede af et anemometer med et termoelement placeret 6 cm fra målepunktet jf. undersøgelsen i K - *Termisk effekt af varmeafgivelse fra anemometre*.



Figur I.8: Anemometer med termoelement.

Kalibreringen af anemometrene er udført i forbindelse med målingerne i Michal Pomianowskis Ph.D projekt *Energy Optimized Configuration of Concrete Element with PCM*, se [37], så det er vurderet at anemometrene er opdateret. Sammenhængen mellem lufthastigheden og visningen er ikke lineær, hvorfor kalibreringsudtrykket er inddelt i tre intervaller, hvorved en acceptabel målenøjagtighed i størrelsesorden 0,05 <sup>m</sup>/<sub>s</sub> opnås. Kalibreringskurver og -udtryk kan findes på bilag-CD- *Kalibrering*.

Dataopsamlingen foregår via. en datalogger, som er tilsluttet et LabView program, hvor det er muligt at måle lufthastigheden og lufttemperaturen. Hastigheden måles hver sekund og midles over hver 30 sekund. Middelværdierne ligger i LabView programmet. På figur I.9 ses et billede af dataloggeren.



Figur 1.9: Anemometer datalogger med tilhørende computer.

# I.4 Laser-Doppler anemometer

Under forsøgene udført i laboratoriet er laser-doppler anemometret brugt, hvor det er muligt at måle lufthastigheden i 1D. Anemometret fungerer ved at en laserstråle sendes igennem en linse, hvorefter denne stråle deles i to således at de to stråler skærer hinanden i en vis afstand afhængig af den valgte linse. Skæringspunktet mellem de to stråler kaldes sensorområdet, hvor informationer om lufthastigheden registreres. Hastigheden måles ved at sende partikler igennem sensorområdet, hvilket er gjort ved at sende røg ind i rummet vha. røgmaskinen. Dermed måles hastigheden og retningen i 1D af røgpartiklerne som sendes forbi sensorområdet. På figur I.10 ses laser-doppler anemometret og den tilhørende datalogger.



*Figur I.10:* Laser-doppler anemometer og den tilhørende datalogger.

# I.5 Røgudstyr

Til at undersøge luftstrømmene i rummet bruges en røgmaskine, se figur I.11 og små røgampuller ligesom den vist på figur I.12.



Figur I.11: Røgmaskine.



Figur I.12: Røgampuller.

Under røgforsøgene i laboratoriet er ligeledes benyttet flex-rør og en røgfordelingskasse, som er fordelt over det akustiske loft for at undersøge luftstrømninger på bestemt steder over loftet.

# I.6 Micromanometer og måleblænde

Til fastsættes af den anvendte luftmængde tilført i hotboxen i laboratoriet er der anvendt et Debro micromanometer og en måleblænde af typen EHBA 010-1-A. Måleblænden er placeret i forbindelse med indblæsningskanalen, hvor placeringen kan ses på figur 4.4. På figur I.13 ses et billede af Debro micromanometret.



Figur I.13: Debro micromanometer.

På micromanometret kan trykfaldet over måleblænden aflæses, hvorefter dette kan omregnes til en volumenstrøm vha. ligning (I.3). Måleusikkerheden på måleblænden og Debro mircomanometeret er  $\pm$  5% [38].

$$q_v = 12,325 \,\Delta p^{0,490256} \tag{I.3}$$

 $q_{\nu}$  Volumenstrømme [<sup>m3</sup>/<sub>h</sub>]  $\Delta p$  Trykfald over måleblænde [Pa]

# I.7 Pyranometre

Pyranometerne benyttes til at måle solindfald. Der er benyttet to pyranometre under målingerne på COWI, et KIPP & ZONEN CM 11 samt et KIPP & ZO-

NEN CM 21, se figur I.14 og I.15. Endvidere er pyranometret BF3 ligeledes anvendt, da den både kan måle total og diffuse solstråling. BF3 er dog ikke kalibreret.



Figur I.14: Pyranometer KIPP & ZONEN CM 11.



Figur 1.15: Pyranometer KIPP & ZONEN CM 21.

Ved brug af pyranometerne måles en spændingsforskel som ved hjælp af et kalibreringsudtryk kan omregnes til solindfald pr. kvadratmeter. Spændingsforskellen logges med Helios dataloggeren. Følsomheden, det spektral område og de beregnede kalibreringsudtryk beskrevet i afsnit I.7.1 - *Kalibrering af pyranometer* kan ses i tabel I.1 for de to pyranometre samt reference pyranometeret, som kalibreringen er udført i fohold til. BF3 har en usikkerhed for total solstråling på  $\pm$  12% og for diffus solstråling er usikkerheden  $\pm$  15%. BF3 kan måle 400-700 nm i sprektral området.

	CM 11	CM 21	CMP 22 (Ref.)
Følsomhed	4,5 - 6 $^{\mu V}\!/_{Wm^{-2}}$	7 - 17 $^{\mu V}\!/_{Wm^{-2}}$	7 - 14 $^{\mu V}\!/_{Wm^{-2}}$
Spektral område	305-2800 nm	305-2800 nm	200-3600 nm
Kalibreringsudtryk	y = 180323 x + 2,61	y = 97087 x + 2,14	

**Tabel I.1:** Følsomheden, det spektral område for 50% transmissionpoints og kalibreringsudtryk for pyranometerne.



Figur I.16: Spektral respons for solstråling ved hav niveau. [39]

I tabel I.1 ses at spektral området er forskelligt for de to pyranometre og reference pyranometret. Det kan dog konkluderes ud fra figur I.16, at pyranometrene CM 11 og CM 21 måler i størstedelen af spektral området for solen ved hav niveau, hvorfor der ikke tages højde for de to forskellige spektral områder.

## I.7.1 Kalibrering af pyranometer

Kalibreringen af pyranometrene blev udført for 4 pyranometre hvoraf de to skal bruges til målinger på COWI. De fire pyranometre og et reference pyranometer blev placeret i en sortmalet trækonstruktion konstrueret, således at pyranometrene ikke kan påvirke hinanden men samtidig er placeret så tæt at de vil måle det samme solindfald, se figur I.17. Pyranometrene sættes op på taget på laboratoriet hvor der logges både en skyfri dag og overskyet nat.



Figur I.17: Forsøgsopstilling til kalibrering af pyranometrene

Kalibreringen er udført d. 6-12-2012 hvor det var en næsten skyfri dag. Ligeledes blev der målt om natten d. 28-12-2012. På begge måledage var jorden snedækket. Under optimale forhold havde den først måling være foretaget en skyfri sommerdag, hvor solen står højere på himlen end i december, og hvor der ingen sne er. De loggede data kan ses på figur I.18 og I.19. På figur I.18 ses tre udvalgte måleperioder hvor der er tilnærmelsesvis konstante værdier for solindfaldet som bruges til kalibreringen. Ligeledes udvælges en periode af nulpunktsmålingen ses på figur I.19. Kalibrering af pyranometrene kan ses på bilag-CD- *Kalibrering*.



*Figur I.18:* Loggede data fra d. 6-12-2012 med de anvendte måleområder.



*Figur I.19:* Loggede data fra d. 28-12-2012 med det anvendte måleområde.

## I.8 Eltek måleudstyr

Foruden temperaturmålingerne med termoelementer er der under forsøgene i Visionshuset opsat eltek-udstyr af typen GD-47EE, som kan måle temperatur, relativ luftfugtighed og CO<sub>2</sub>-niveau. Disse bruges til at måle temperaturen flere steder i rummet. Eltek-føleren kan måle i intervallet -20°C til 65°C, hvor
der er en usikkerhed på  $\pm 0,4^{\circ}$ C i intervallet -5°C til 40°C. Udenfor dette interval er usikkerheden  $\pm 1,0^{\circ}$ C.

Endvidere er der anvendt eltek-udstyr til måling af trykfaldet over ventilationsarmaturerne i Visionshuset. Trykdifference-målerne er af typen GD-84, som har et måleinterval på 0 til 250 Pa med en usikkerhed på  $\pm$  3 Pa. Trykdifference-målerne er kalibreret ved brug af et micromanometer, slanger samt en pumpe til at skabe et tryk gennem systemet. På figur I.20 ses et billede af kalibreringen.



Figur I.20: Opsætning af kalibrering af trykdifference-måler.

På figur I.21 ses kalibreringskurven og -udtrykket for trykdifferencemåleren placeret ved indblæsningsarmaturet i mødelokalet. Alle kalibreringsudtrykkene kan ses på bilag-CD- *Kalibrering*.



Figur I.21: Kalibreringskurve- og -udtryk for trykdifferencemåleren placeret ved indblæsningsarmaturet.

### I.9 Vandstrømsmåler

For at få informationer om vandmængden og temperaturen på vandet fra det termoaktive dæk i Visionshuset, påsættes en vandstrøms- og temperaturmåler. Vandmængden og temperaturen logges gennem programmet Energy Net, hvor vandmængden måles gennem impulser, hvor én implus svarer til 0,1 l og temperaturen måles ved en PT100 føler placeret i vandstrømmen med én til at måle fremløbstemperaturen og én til at måle returløbstemperaturen. På figur I.22 ses flowmåleren.



Figur I.22: Flow- og temperaturmåler påsat det termoaktive dæk.

Differenstemperatur	Energi
$\Delta \theta < 10 \text{ K}$	$\pm 6\%$
$10 \text{ K} \le \Delta \theta < 20 \text{ K}$	$\pm 5\%$
$20 \text{ K} \leq \Delta \theta$	$\pm 4\%$

Verifkationstolerancen for vandstrømsmåleren kan ses i tabel I.2.

Tabel I.2: Verifikationstolerance for vandstrømsmåleren.

I Visionshuset er temperaturforskellen mindre en 10 K, hvilket betyder at usikkerheden på Brunataenergimåleren er  $\pm$  6%. [40] Pt100-føleren har et måleområde fra -10°C til 120°C, og vandstrømsmåleren måler maksimal værdi 1,2 <sup>m3</sup>/<sub>h</sub>, hvor minimumsværdien er 0,4% af maks.-værdien. [41]

### I.9.1 Kalibrering af vandstrømsmåler

Vandstrømsmåleren er kalibreret ved brug af en vandvægt, fire lodder, en stain indikator og en vandpumpe. På figur I.24 ses kalibreringsopstillingen for vandstrømsmålerne, og på figur I.23 ses stain indikatoren.



Figur I.23: Billed af stain indikatoren.



Figur I.24: Forsøgsopstillingen til kalibrering af vandstrømsmåleren.

Alle vandstrømsmålere er sammenkoblet i en kreds, hvor den ene ende af kredsen er tilkoblet en vandpumpe, som er nedsænket i et vandreservoir der ligger under laboratoriet. Den anden ende er tilkoblet en slange, som placeres i vandvægten. Vandvægten er tilsluttet en stain indikator. Under vandvægten placeres de fire lodder og en værdi aflæse på stain indikatoren. Derefter vælges et flow som aflæses på vandstrømsmålerne ved at regulere på vandpumpen og lodderne på vandvægten løftes. Der foretages en tidtagning af hvor langt tid, der bruges til at stain indikatoren viser samme værdi, som inden forsøgets start. Ud fra denne tid og vægten af lodderne kan en vandmængde udregnes, og et kalibreringsudtryk kan opstilles for den målte vandmængde på Brunata måleren og den beregnede vandmængde. Kalibreringsudtrykket for BTR måler nr. 4, som er anvendt i mødelokalet i Visionshuset, ses på figur I.25. Databehandling for kalibreringen kan ses på bilag-CD- *Kalibrering*.



Figur I.25: Kalibreringsudtryk for vandstrømsmåleren.

#### I.9.2 Kalibrering af temperaturføler

Temperaturfølerne tilhørende Brunata måleren kalibreres ved brug af en brønd og præcisionstermometret, som er beskrevet under afsnit I.2 - *Termoelementer*. I brønden tilføres vand for at få en mere præcis kalibrering. På figur I.26 ses forsøgsopstillingen til kalibreringen og på figur I.27 ses temperaturfølerne med den tilhørende Brunata måler.



Figur I.26: Opstilling af kalibrering af temperaturføler.



FigurI.27:Temperaturfølermedtilhørende Brunata måler.

Kalibreringen udføres for tre temperaturer hhv. 10, 20 og 30°C. På figur I.28 ses kalibreringsudtrykket for fremløbstemperaturen og på figur I.29 ses kalibreringsudtrykket for returløbstemperaturen. Databehandling for kalibreringen kan ses på bilag-CD- *Kalibrering*.



Figur 1.28: Kalibreringsudtryk for fremløbstemperaturføleren.



Figur 1.29: Kalibreringsudtryk for returløbstemperaturføleren.

### I.10 Effektmåler til lysarmaturer

For at kende energiforbruget brugt til lysarmaturerne er der påsat en energimåler på det ene lysarmatur, da det forudsættes at de fire armaturer i mødelokalet har samme effekt. På figur I.30 ses energimåleren til lysarmaturet i møde lokalet.



Figur I.30: BTR-måler til lysamraturet.

### I.11 Termografikamera

Termografikameraet er anvendt til undersøgelse af overfladetemperaturen på det termoaktive dæk i Visionshuset samt det kolde loft mellem zone 2 og 3 i laboratoriet. Endvidere er det brugt til at bestemme emissiviteten af Rockfonpladerne i det akustiske loft. På figur I.31 ses et billede af termografikameraet.



Figur I.31: Termografikamera.

# Undersøgelse af forsøgslængde

I dette kapitel undersøges den nødvendige længde af forsøgene udført i laboratoriet, således der opnås en repræsentativ middelværdi for forsøgene.

Måletiden er beregnet ud fra, hvor længe det tager at opnå en stabil middelværdi af de målte temperaturer, således den beregnede middelværdi er repræsentativ. Den nødvendige tid beregnes for både hastighedsmålingerne med anemometrene og for temperaturmålingen med de tynde og tykke termoelementer. Til beregningen tages der udgangspunkt i den lange måling for Case 1.

Undersøgelsen laves ved at beregne en løbende middelværdi for hvert termoelement, der med tiden vil blive mere stabil som det ses på figur J.1, hvor ændringen af den løbende middelværdi og de målte temperaturer for termoelementerne på søjle B er indtegnet.



*Figur J.1:* Ændring i løbende middelværdi og målte temperaturer for søjle B. Det acceptable område er markeret med sorte streger.

Når middelværdien har opnået en ønsket nøjagtighed anses en minimal målelængde at være fundet. Den ønskede nøjagtighed sættes lig usikkerheden for målingen der for termoelementer er fundet til maksimalt 0,09 K og for anemometrene til 0,05  $^{\rm m}/_{\rm s}$ . På figur J.2 og J.3 ses den løbende middelværdi for temperatur og hastighedsmålingerne. Det ses at det tager omkring 6 min at opnå en middelværdi der ligger indenfor det ønskede interval for temperaturerne, mens det tager 3 min for hastighederne. For at være på den sikre side vælges det at måle i 10 min for hver korttidsmåling. Yderligere indsættes der en kode i matlabprogrammet der giver en advarsel hvis ændringen af den beregnede middelværdi ligger udenfor det ønskede interval.



*Figur J.2:* Ændring i løbende middelværdi for alle temperaturmålinger.



*Figur J.3:* Ændring i løbende middelværdi for alle hastighedsmålinger.

# Termisk effekt af varmeafgivelse fra anemometre

I dette kapitel undersøges det, hvorledes sammenhørende værdier af temperaturmålinger målt med termoelementer og lufthastighedsmålinger målt med anemometre bedst muligt kan måles uden termoelementet bliver påvirket af varmeafgivelsen fra anemometret.

Hidtil er temperaturmålingen oftest blevet foretaget med et termoelement placeret så tæt som muligt på anemometret for at måle temperaturen på samme sted som lufthastigheden. Dog er der mistanke om at varmeafgivelsen fra anemometret kan påvirke denne måling. Derfor vil det i dette afsnit blive undersøgt, hvorledes temperaturen varierer afhængig af afstanden mellem termoelementet og anemometret.

Undersøgelsen blev lavet med en laboratorieopstilling bestående af en hotbox på 4,65 x 6,00 x 4,40 m (W x L x H) med diffus loftsindblæsning. Rummet havde et luftskifte på 430  $^{m^3}/_{h}$  med en indblæsningstemperatur på 8°C under forsøget. I rummet var der placeret to radiatorer med en samlet effekt på 150 W. Til måling af temperaturen i rummet var en fast målesøjle placeret midt i rummet. En plantegning over forsøgsopstillingen samt to billeder af opstillingen kan ses på figur K.1(a), K.1(b) og K.1(c)



Figur K.1: Forsøgsopstilling. (a) Plantegning, (b) Billede med den faste målesøjle, søjle E og radiatorer, (c) Søjle D.

(a)

(b)

(c)

Undersøgelsen af varmeafgivelsen fra anemometret blev udført ved brugen af to målesøjler, som hver havde et anemometer og et termoelemet placeret i højden 1,1 m. Anemometrene blev placeret med forskellige orientering på de to målesøjler, således at anomometret på Sølje E blev placeret med ledningen lodret pegende opad, mens anemometret på Søjle E blev placeret med ledningen vandret pegende mod termoelementet. Udgangspositionen for placeringen af termoelemetet kan ses på figur K.2(a). Termoelementet blev gradvist placeret længere væk fra anemometret i vandret retning, og temperaturen blev observeret. Ved en afstand af 2 cm blev termoelementet flyttet over på en træstang, som ses på figur K.2(b)



(a) (b) *Figur K.2: Princip for flytning af termoelement.* 

For at undersøge om anemometret påvirker temperaturmålingen sættes termoelementet i udgangspositionen, se figur K.2(a). Herefter tændes anemometret, hvorved temperaturen stiger som forventet, se figur K.3. Det ses også på figuren, at Søje E virker til at give en større temperaturstigning end Søjle D.



Figur K.3: Temperaturændring ved at tænde anemometer.

Da det er påvist, at anemometret påvirker temperaturmålingen undersøges det dernæst, hvor stor en afstand mellem termoelementet og anemometret som er nødvendig for at temperaturmålingen ikke påvirkes af anemometret. Forsøget blev lavet over en periode af 7 timer, hvor temperaturen i hotboxen steg ca. 0,3°C. For at kompensere for dette udregnes temperaturforskellen mellem temperaturen på den faste målesøjle i højden 1,1 m, og temperaturen målt ved anemometret. Herved fremkommer figur K.4, hvor det ses, at temperaturen er påvirket til en afstand af 3 cm ved Søjle D, mens temperaturen er påvirket i en afstand af 6 cm ved Søjle E.

De forskellige påvirkninger kan enten være et resultat af forskellig varmeafgivelse fra det enkelte anemometer, et resultat af den vandrette og lodrette placering af anemometret på hhv. søjle D og E eller et resultat af en eventuel vandret strømning forbi anemometret til termoelementet. For at undersøge dette nærmere kræves en mere dybdegående undersøgelse af flere anemometre samt viden om, hvilken strømningsretning der er omkring anemometret. Dog vurderes det at der i rummet primært er nedadgående strømning fra det diffuse loft til udsugningen ved gulvet. Derfor vurderes det at hovedparten af varmeafgivelsen, der registrers ved temperaturmålingerne, er overført ved stråling.



*Figur K.4: Temperaturforskel som funktion af afstanden fra anemometer.* 

Ved udføreslse af de videre temperaturmålinger og hastighedsmålinger i denne rapport anvendes en afstand på 6 cm mellem termoelement og anemometer.

### Test af rumforholdene i hotboxen

I dette kapitel laves en indledende undersøgelse af forsøgsopstillingen i hotboxen. Formålet med undersøgelsen er at undersøge temperaturfordelingen i de fire zoner i forhold til muligheden for at opnå stationære forhold over tid.

Inden laboratorieforsøgene udføres, laves en indledende undersøgelse af rumforholdene og systemerne i hotboxen i forhold til temperaturfordelingen i de fire zoner, hvor det ønskes at undersøge om det er muligt at opretholde en konstant og jævnt fordelt luft- og overfladetemperatur i zonerne, så målingerne udføres under stationær forhold. Til denne undersøgelse er udvalgt tre forsøg, som er udført i starten af måleperioden.

Under udførelsen af forsøgene ønskes det at holde en konstant rumtemperatur på omkring 21-22°C. Derfor sættes zone 1, 3 og 4 til at regulere efter temperaturen 22°C. Endvidere ønskes det at have en samlet varmebelastning på 50 <sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub>, da de termoaktive dæk er testet til at kunne fjerne denne varmebelastning. [10] For at kunne opretholde de ønskede lufttemperatur i zone 3 er det nødvendigt i følge varmebalancen for hotboxen at opretholde en lufttemperatur på omkring 2°C i zone 2, se afsnit M - *Varmebalance*. Endvidere ønskes en ventilationsmængde på 12,5 <sup>1</sup>/<sub>s</sub> i zone 3, hvilket er bestemt ud fra DS/EN 15251 svarende til én person i klasse I [25].

Målemetodikken for de tre forsøg er forskellig, da de to første forsøg er udført som en korttidsmåling, hvilket er beskrevet i afsnit 4.3.2 - *Korte målinger*, og det trejde forsøg er udført som en langtidsmåling, hvilket er beskrevet i afsnit 4.3.3 - *Langtidsmålinger*. Det undersøges, om der forekommer store temperatursving under forsøgene i de forskellige zoner samt i det omkringliggende laboratorie, således vurderes rumforholdene ud fra variationen af luftog overfladetemperaturene over tid.

### L.1 Undersøgelse af temperaturvariation i zonerne

Undersøgelsen af temperaturerne for de fire zoner og laboratoriet vurderes ud fra det første forsøg. Det første forsøg er udført med loftopsætningen, som er vist på figur L.1, hvor loftet har 23 hulplader, hvilket giver en samlet dækningsgrad på 81%. Desuden kan det ses på figur L.1 markeret med rødt, at varmebelastning under dette forsøg består af jævnt fordelte varmekabler, som er fastmonteret på gulvet. Varmebelastningen under forsøget er sat på 30  $W/m^2$ , hvilket er mindre en det ønskede. Dette skyldes, at det ikke er muligt at nedkøle zone 2 tilstrækkeligt med den anvendte køleflade og kølevæske jvf. varmebalancen, se appendiks M - *Varmebalance*. Til de senere forsøg monteres en ekstra køleflade for at opnå den ønskede køleeffekt på 50  $W/m^2$ . I det anvendte kølefladen på omkring -8°C og en returløbstemperatur på omkring 2°C. Under det første forsøg er ventilationanlægget hørende til zone 3 ikke tændt.



Figur L.1: Forsøgsopstilling for det første forsøg.

Ved resultatbehandlingen for det første forsøg undersøges det først om lufttemperaturen i zonerne ændrer sig under de fem målinger. Graferne, som betragtes, er en middeltemperatur i hver zone for hver af de fem målinger. På figur L.2 ses middeltemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 for de fem korttidsmålinger. Det kan ses, at der er en lille temperaturforskel fra den første til den sidste af de fem målinger, hvilket anses for at være acceptabelt.



*Figur L.2: Middeltemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 for de fem korttidsmålinger.* 

Endvidere betragtes den faste målesøjle i zone 3 for de fem målinger, som kan ses på figur L.3. Her ses det ligeledes, at temperaturen i zone 3 stiger en smule under måleperioden, hvor temperaturforskellen mellem de fem målinger er 0,05°C. Det kan ligeledes se, at temperaturen falder med højden på målepunktet, hvilket er i overensstemmelse med den faste målesøjle en er placeret under en rist. Dog er der mistænkes om at termoelementet i højden 2,1 m er beskadigt, da denne målinger ikke følger den faste målesøjle. Det betyder, at for de øvrige forsøg er dette termoelement skiftet ud med et andet termoelement.



Figur L.3: Temperaturgradienten for de fem forsøg.



*Figur L.4: Middellufttemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 som funktion over tid.* 

På figur L.4 ses et plot af de målte lufttemperaturer for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 for den første af korttidsmålingerne. Målinger er repræsentativ for de resterende fire målinger. Det kan ses, at temperaturen over målingen er tæt på at være konstant, og det skal endvidere bemærkes, at zone 1, 3 og 4 ligger på den ønskede temperatur mellem 21 og 22°C. Den største temperaturvariation er i zone 3, hvorfor der kigges nærmere på lufttemperaturen i zone



3, hvor temperaturgradienten for zone 3 over tid for den første af kortidsmålingerne ses på figur L.5.

Figur L.5: Målinger af temperaturgradienten i zone 3 over tid.

Det ses, at der forekommer temperatursvingninger på omkring 0,2°C, og at svingningerne bliver større jo tættere målingerne kommer på det akustiske loft. Dette kan skyldes støj på fire øverste termoelementer, hvilket er undersøgt før påbegyndelsen af de øvrige udført målinger.

#### L.2 Undersøgelse af placering af loftplader

Det er valgt at lave to forsøg med den samme dækningsgrad men med forskellige loftopsætning for at undersøge om brugen af riste fremfor ingen plader ændrer temperaturforholdene i zone 3. Det andet forsøg er udført med loftopsætningen vist på figur L.6, hvor der er fjernet 10 akustiske plader. Denne loftopstilling har den sammen dækningsgrad, som det første forsøg hvilket vil sige en dækningsgrad på 81%. Ligesom ved det første forsøg er varmebelastning sat til 30 <sup>W</sup>/<sub>m<sup>2</sup></sub> og ventilationanlægget for zone 3 er ikke tændt.



Figur L.6: Forsøgsopstilling for det første forsøg.

Ligesom ved det første forsøg betragtes forskellen på de fem korttidsmålinger i forhold til hinanden for at undersøge om der er en temperaturforskel igennem hele måleperioden for de korte målinger. På figur L.7 ses middeltemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 for de fem korttidsmålinger. Det kan ses, at lufttemperaturen i zone 1 falder med 0,4°C over måleperioden, mens lufttemperaturen i zone 2, 3 og 4 samt i laboratoriet er stabile.



*Figur L.7: Middeltemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 for de fem korttidsmålinger.* 

Ved at kigge nærmere på zone 3, ses på figur L.8 temperaturgradienten, hvor det kan ses at temperaturforskellen mellem de fem målinger er ca.  $0,1^{\circ}$ C.



Figur L.8: Temperaturgradienten for de fem forsøg.

På figur L.8 kan det ses, at temperaturen stigerer med højden af målepunktet, hvilket er forskelligt fra temperaturgradienten for det første forsøg, se figur L.3. For dette forsøg er den faste målesøjle placeret under en akustisk plade, således at der ikke forekommer den samme overførelse af kold luft som ved det første forsøg.



*Figur L.9:* Lufttemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 som funktion af tid.

Derefter undersøges lufttemperaturen for de fire zoner og laboratoriet i zone 3 over tid for den første måling af de fem kortidsmålinger, hvilket kan ses på figur L.9. Det ses, at lufttemperaturen i laboratoriet er stabil under målingen. Endvidere ligger rumtemperaturen i zonerne på de ønskede temperatur.

Ved at kigge nærmere på de målte lufttemperaturer på den faste målesøjle i zone 3, se figur L.10, kan det ses, at der ikke forekommer samme temperaturfald med højden, som ved det første forsøg, hvilket kan skyldes de to forskellige placeringer under henholdvis en riste og en akustisk plade. Temperaturvariationen ligger under denne måling på omkring 0,3°C. Da denne variation igen vurderes, at skyldes luftstrømningen i rummet fremfor regulering af zonerne, findes variationen acceptabel.



Figur L.10: Temperaturgradient i zone 3 som funktion af tid.

Temperaturforskellen mellem zone 2 og 3 vurderes for det første og andet forsøg. For det første forsøg med 23 riste er temperaturforskellen 11°C, og for det andet forsøg med 10 fjernet plader er temperaturforskellen 11°C, så derfor vurderes det, at der ingen nævneværdig forskel er på at bruge riste fremfor at undlade plader, så længe dækningsgraden er den samme.

# L.3 Temperaturvariationer under høj varmebelastning

Ved det tredje forsøg er det muligt at opretholde en varmebelastning på 49,7  $^{W}/_{m^2}$ , da der er anvendt to køleflader i zone 2, som har samme frem- og returløbstemperatur som de to tidligere forsøg på henholdvis -8°C og 2°C. Endvidere er ventilationsanlægget i zone 3 tændt, hvor der ventileres med en luftmængde på 13,7  $^{1}/_{s}$  jvf. DS/EN 15251 [25]. Det trejde forsøg er udført med loftopsætningen vist på figur L.11, hvilket er tilsvarende loftopsætningen ved COWI med den dækningsgrad på 85%. På figur L.11 kan det ses at varmebelastningen er en jævnfordelt punktlast.



Figur L.11: Forsøgsopstilling for det tredje forsøg.

For dette forsøg er det valgt at undersøge temperaturforholdene for en langtidsmåling, hvorfor de målte lufttemperaturer betragtes over tid. På figur L.12 ses lufttemperaturen for de fire zoner, laboratoriet samt indblæsningen i zone 3 over tid, hvor det kan ses, at temperaturen i zonerne er stabile, og ligesom de to tidligere målinger ligger på den ønskede rumtemperatur. Variationen er størst i zone 3.



*Figur L.12: Middellufttemperaturen for de fire zoner og laboratoriet samt ved indblæsningen i zone 3 som funktion af tid.* 



Figur L.13: Temperaturgradient i zone 3 over tid.

Temperaturgradienten i zone 3 kan ses på figur L.13, hvor der kan ses at den største temperaturvariation ligger på 0,6°C. Det kan ligeledes ses, at temperaturfordelingen ser anderledes ud sammenlignet med de to tidligere måling, hvor temperaturen ved gulvet er koldest, mens den to næste målepunkter er højere, hvorefter temperatur falder med højden. Temperaturvariationen vur-

deres igen at være resultat af luftstrømningen i rummet fremfor ustabilitet i reguleringen af zonerne i klimakamret.

### L.4 Øvrige temperaturforhold

Foruden de målte lufttemperaturer i zonerne ses også på temperaturen målt med PT-100 følerne, som styrer varmefladerne i ventilationsanlæggene. Desuden ses på temperaturen i laboratoriet over en periode på fire dage for at undersøge, hvordan temperaturvariation er omkring hotbox'en. På figur L.14 ses fire grafer for lufttemperaturen over tid i de fire zoner målt med PT-100 følerne, som er de føler ventilationsanlæggene i zonerne regulerer varmefladerne efter. Placeringen af PT-100 følerne ses i afsnit 4.1 - *OPbygning af laboratoriemodel*. Grafen viser lufttemperaturen over en tidsperiode på en time, hvor det kan ses, at den mindste temperatursvingning findes i zone 1 på 0,03°C og den største temperatursvingning findes i indblæsningen til zone 3 på 0,14°C , hvilket anses for at være en acceptabel svingning.









Figur L.14: De målte lufttemperaturer i zone 1, 2, 3 og 4 over tid.

Endvidere er der kørt en måling over fire dage for at undersøge, hvordan temperaturvariationen foreløber over flere dage, hvilket kan ses på figur L.15.



Figur L.15: Temperaturvariationen i laboratoriet over tid.

Ud fra grafen ses at der forekommer en svingning i løbet af dagene på 2°C bag ved hotboxen, hvilket er tættest på vinduerne, hvor der kan forekomme solindfald. Ved måleudstyret forekommer en temperatursving på 1,5°C. Under forsøgene er vinduerne bag ved hotboxen dækket med solafskræmning for at undgå for meget solindstråling på hotboxen, hvilket kan påvirke den gaurded zone. På figur L.16 ses et billed af den anvendte solafskærmning. Det ses at det ikke er hele vinduet, som er dækket, hvorfor hotboxen er til tider udsat for solstråling.



Figur L.16: Billed af solafskræmningen uden på laboratorie bygningen, som skal afskærme for evt. solindstråling.

### L.5 Overfladetemperaturer

Endvidere betragtes overfladetemperaturen på loftet mellem zone 2 og 3 for at undersøge om det er en jævnfordelt temperaturforskel over loftet. På figur L.17 ses et kontourplot som viser de 12 målt overfladetemperaturer på loftet op til zone 2. Her ses at der er en temperaturforskel over loftet på 5°C, hvor det særligt er det ene hjørne som varmt. I hjørnet er den maksimale temperatur målt til 18,8°C, mens den koldeste temperatur på loftet er målt i den modsatte ende af loft til 13,8°C. Middeltemperaturen er 15,6°C. Dette varmeområde vurderes at skyldes at placeringen af ventilationsanlægget hørende til zone 2 besværliggør luftcirkulationen i dette område. Ventilationsanlægget er desuden placeret på en ekstra krydsfinerplade, da det er nødvendigt at forstærke loftet i forhold til anlæggets vægt. For at forøge luftcirkulationen i området er der placeret to bordventilator, som er vendt i retningen af anlægget, så der tvinges kold luft fra kølefladen hentil området.



Figur L.17: Kontourplot af overfladetemperaturene målt på loftet op til zone 2.

Endvidere er der taget termografibilleder af loftet op til zone 2 for at bekræfte at de opsatte termoelementerne måler korrekt. På figur L.18 ses billeder taget af det varmeområde, hvor det ses at der ligeledes observeres en højere temperatur end resten af loftet.

Under termografereingen viste det sig yderligere at der ved siden af den varme plet var et område med meget lave temperatuere. Området dækker en aftagelig plade hvorigennem der er adgang til zone 2. Det kolde område kan ses på figur L.19. Der er ingen termoelementer monteret på pladen hvorfor dette område ikke vises på målingerne.



På trods af de forskellige løsninger for at få en bedre luftfordeling over loftet er det er det bedst fundne resultat, som vist på figur L.17, hvorfor det accepteres at temperaturfordelingen over loftet ikke er jævnfordelt.

### Varmebalance

I dette kapitel beskrives den opstillede stationære varmebalance for laboratorieopstillingen.

Varmebalancen i dette kapital er opstillet for Basis opstillingen beskrevet i afsnit A - *Case 1: Basisopstilling*. Der er lavet varmebalance for alle udførte forsøg, som kan findes på bilags-CD - "*Forsøg Laboratorie*" for hver enkelt forsøg.

Varmebalancen laves for forsøget udført i klimakamret beskrevet i afsnit 4 - *Laboratorieopstilling*. En skitse af forsøgsopstillingen kan ses på figur M.1, hvor inddelingen af zoner og de anvendte parametre til beregningen kan ses.



*Figur M.1:* Skitse af zoner med de anvendte parametre til beregning af varmebalance.

Ligning (M.1) gælder for en stationær varmebalance, hvilket vil sige, at der ingen ændring sker over tid. Ligeledes antages det at temperaturen i rummet er ens i hele rummet. Dette er ikke tilfældet for forsøget, hvorfor det vælges at bruge temperaturen i højden 1,1 m fra den faste målesøjle. Yderligere er varmebalancen kun opstillet for de frie varmemængder, hvilket vil sige, at der ingen fordampning er fra våde overflader eller direkte forstøvning i rummet, og der ses bort fra vanddampdiffusion gennem indvendige begrænsningsfalder. [26]

$$\Phi_{H} = \Phi_{V} + \Phi_{TR}$$

$$\Phi_{H} = q_{l} \rho_{l} c_{p,L} (t_{ud} - t_{ind}) + \Sigma UA (t_{i} - t_{r})$$
(M.1)

$\Phi_H$	Varmetilførsel fra varmekilder [W]
$\Phi_V$	Varmetab ved ventilation [W]
$\Phi_{TR}$	Varmetab ved transmission [W]
$q_L$	Luftmængde $[^{m^3}/_{s}]$
$\rho_l$	Densitet, luft [ <sup>kg</sup> / <sub>m<sup>3</sup></sub> ]
$c_{p,L}$	Specifik varmekapacitet, luft $[J_{kgK}]$
U	Transmissionskoefficient $[W/_{m^2K}]$
A	Areal af overflade [m <sup>2</sup> ]
$t_{ud}$	Udsugningstemperatur [°C]
t <sub>ind</sub>	Indblæsningstemperatur [°C]
$t_i$	Rumtemperatur [°C]
$t_r$	Rumtemperatur i tilstødende zoner [°C]

Et eksempel på en beregnet varmebalance laves for Case 1 for den lange måling. I forsøget måles varmetilførslen fra varmekilder til 930 W. Indblæsningsog udsugningstemperaturen måles ved indgangen til boksen til hhv. 22,5 °C og 21,7 °C, mens luftmængden måles til 49,3 <sup>m3</sup>/<sub>s</sub>. Densiteten og den specifikke varmekapacitet er tabelværdier valgt ved en temperatur på 20 °C til hhv. 1,29 <sup>kg</sup>/<sub>m<sup>3</sup></sub> og 1005 <sup>J</sup>/<sub>kgK</sub> [26, tabel 3.6]. Rumtemperaturen er fundet som et gennemsnit af temperaturgradienten til 22,4 °C.
Transmissionskoefficienterne beregnes fra opbygningen af klimakamret samt de indvendige og udvendige overgangstal. De indvendige overgangstal til gulv og vægge er valgt ud fra DS418 for pågældende varmestrømsretning se tabel M.1 [42]. Der laves en antagelse om, at de udvendige overgangstal sættes lig de indvendige overgangstal fra DS418. Hvad de udvendige og indvendige overgangstal for zone 1 og 4 bestemmes til, har kun en lille betydning på grund af den høje isoleringsevne for konstruktionerne der indeholder mellem 10 og 25 mm polystyren. Ved beregning ses det f.eks. at varmetabet fra zone 3 til zone 1 ændre sig 0,2 W ved en ændring af det udvendige og indvendig varmeovergangstal fra 0,04  $m^{2}K/W$  til 0,17  $m^{2}K/W$ .

Det indvendige overgangstal for loftet er beregnet i afsnit M.2 - *Beregning af det indvendig konvektive varmeovergangstal for loftet* ud fra de beregnede varmestrømme fra stråling og konvektion. Det udvendige overgangstal fastsættes ud fra DS418 til 0,1  ${}^{m^{2}K}/_{W}$ .

	$lpha_i$ $[^{m^2K}/_W]$	$\alpha_u$ $[^{m^2K}/_W]$	$U$ $[^{W}/_{m^{2}K}]$
Væg <sub>3-1</sub>	0,13	0,13	0,298
Væg <sub>3-4</sub>	0,13	0,13	0,129
Gulv <sub>3-4</sub>	0,17	0,17	0,127
Loft <sub>3-2</sub>	0,17	0,10	2,867

De indvendige og udvendige overgangstal samt transmissionskoefficienterne for hver overfladerne kan ses i tabel M.1.

 
 Tabel M.1: Varmeovergangstal og transmissionskoefficienter for overfladerne for zone 3.

Ved disse forudsætninger beregnes et samlet varmetab på 1032 W mod den målte varmetilførsel på 930 W. Dette er en overdimentionering af varmeafgivelsen på 11%.

Varmebalancen bruges til at eftervise at størstedelen af varmetabet sker gennem det kolde loft. For basisopstillinen sker 99,2 % af varmetabet gennem det kolde loft, mens 0,4 % sker gennem ventilationen og 0,4 % af varmetabet sker til de andre zoner.

## M.1 Beregning af det indvendige strålingsovergangstal for loftet

Beregningsmetoden til beregning af det indvendige strålingsovergangstal er beskrevet i *Experimental evaluation of heat transfer coefficients between radiant ceiling and room* [43]. Varmeovergangstallet beregnes efter ligning (M.2). Varmestrømmen ved stråling beregnes i afsnit 6.5 - *Varmestrøm ved konvektion og stråling*, og overfladetemperaturen måles under forsøget.

$$\alpha_{\rm S} = \frac{\Phi_{\rm S}}{\left(T_{\rm AUST} - T_{\rm s}\right)A} \tag{M.2}$$

 $\begin{array}{c|c} \alpha_{s} & \text{Varmeovergangstal for stråling } [\text{W}/_{\text{m}^{2}} \ \text{K}] \\ \Phi_{S} & \text{Varmestrøm fra stråling } [\text{W}] \\ T_{\text{AUST}} & \text{Reference temperatur, AUST } [\text{K}] \\ T_{s} & \text{Overfladetemperatur } [\text{K}] \\ A & \text{Areal af overflade } [\text{m}^{2}] \end{array}$ 

Average Unheated Surface Temperature, AUST, beregnes ved ligning (M.3) med de målte overfladetemperaturer og de beregnede formfaktorer.

$$T_{AUST} = \sqrt[4]{\sum_{j=1}^{n} (F_{s-j} T_j^4)}$$
(M.3)

 $\begin{array}{c|c} F_{s-j} & \text{Formfaktor mellem overflade s og j [-]} \\ T_j & \text{Overfladetemperatur af overflade j [K]} \end{array}$ 

Herved beregnes det indvendige overgangstal for stråling til 4,54  $^{W}/_{m^{2}K}$  ud fra målingerne af basisopstillingen. Formfaktorerne beregnes, hvor geometrien vist på figur M.2.



Figur M.2: Skitse af overflader til beregning af formfaktorerne.

$F_{6,6} =$	0	0,801	0,060	0,060	0,040	0,040
	0,801	0	0,060	0,060	0,040	0,040
	0,429	0,429	0	0,042	0,050	0,050
	0,429	0,429	0,042	0	0,050	0,050
	0.418	0.418	0,073	0,073	0	0,018
	0.418	0.418	0,073	0,073	0,018	0

## M.2 Beregning af det indvendig konvektive varmeovergangstal for loftet

Det konvektive varmeovergangstal for loftet findes ud fra metoden beskrevet i *ASHRAE Fundamentals Handbook* [44]. Metoden bygger på empiri, hvor varmeovergangstallet bestemmes fra Nusselt-nummer og den karakteristiske længde, se ligning (M.4).

$$\alpha_c = \frac{\lambda}{L} N u \tag{M.4}$$

 $\begin{array}{l} \alpha_c & \text{Varmeovergangstal} [^W\!/_{m^2K}] \\ \lambda & \text{Varmeledningsevne} [^W\!/_{mK}] \\ L & \text{Karakteristisk længde [m]} \end{array}$ 

Den karakteristiske længde vælges som gennemsnittet af længden og bredden af loftet. Nusselts-nummer bestemmes fra Rayleighs tal og typen af luftstrøm, som det ses i ligning (M.5). Formlen gælder for horisontale overflader med luftstrøm væk fra overfladen som f.eks. varme gulve eller kolde lofter.

$$Nu = 0.14(Ra)^{1/3}$$
 for  $3 \cdot 10^{10} > Ra > 2 \cdot 10^7$  (M.5)

$$Ra = 10^8 \Delta T L^3 \qquad \text{for } 20^\circ \text{C} \tag{M.6}$$

RaRayleigh tal [-] $\Delta T$ Temperaturforskel på overfladetemperatur og<br/>luftemperaturen over det akustiske loft [°C]

Til beregningerne benyttes langtidsmålingen beskrevet i afsnit 4.3.3 - *Lang-tidsmåling*. Det konvektive varmeovergangstal for den indvendige overflade beregnes til 1,27  $^{W}/_{m^{2}K}$ .

## M.3 Temperatur i zone 2 som funktion af varmebelastningen

Varmebalancen bruges også til at bestemme en sammenhæng mellem temperaturen i det kolde loft og varmebelastningen. Sammenhængen bruges til startgæt, når temperaturen i den kolde zone skal fastsættes. Sammenhængen er fundet via iteration, hvor den nødvendige temperatur i zone 2 er justeret indtil varmebalancen stemmer ved den pågældende varmebelastning. Temperaturen i indblæsningen, udsugningen, zone 1, 3 og 4 er alle sat til 22 °C, således der kun sker varmestrøm gennem det kolde loft. Sammenhængen mellem temperaturen i zone 2 og varmebelastningen tilført zone 3 kan ses på figur M.3.



Figur M.3: Temperatur i zone 2 som funktion af varmebelastningen.