

Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring

verifisering og utvikling av grunnlag for
simuleringsmodeller

Silje Johnsrud

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Medveileder: Arnkell Petersen, Erichsen & Horgen A/S

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosessteknikk

EPT-M-2013-60

MASTEROPPGAVE

for

Stud.techn. Silje Johnsrud

Våren 2013

Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring – verifisering og utvikling av grunnlag for
simuleringsmodeller

*Thermal conditions at a facade without active cold downdraft protection - verification and
development of a basis for simulation models*

Bakgrunn

Moderne vinduer har vesentlig lavere U-verdi enn hva som var vanlig for få år siden. Dette har redusert risikoen for kaldras betydelig, men for høye vindusflater og lave utetemperaturer vil det fortsatt kunne oppstå nedadrettede konveksjonsstrømmer. Dessuten vil det oppstå termisk stråling mot store vindusflater, noe som reduserer den operative temperaturen og dermed påvirker energibruken.

Tidligere ble kaldras og kuldestråling kompensert ved at varmeavgivere var plassert under vinduene. I bygg med moderne vinduer er man i ferd med å forlate denne løsningen. Det er derfor behov for å undersøke hvordan termisk inneklima og energibruk påvirkes. Det er også behov for å inkludere modeller i simuleringsprogram slik at både termisk inneklima og energibruk beregnes korrekt.

Oppgaven utføres i samarbeid med Erichsen & Horgen A/S.

Mål

Arbeid påbegynt i prosjektoppgaven videreføres i masteroppgaven. Målet er å verifisere teoretiske/empiriske modeller for termisk drevne luftstrømninger, termisk stråling, termisk komfort og energibruk gjennom målinger samt å utvikle grunnlag for modeller for bruk i simuleringsverktøy.

Oppgaven kan bearbeides ut fra følgende punkter:

1. Litteraturstudie basert på oppdatering av arbeid gjort i prosjektoppgaven
2. Planlegge laboratorie- og feltnålinger av kaldras.
3. Utføre målinger i laboratorium og i bygning.
4. Sammenligne målinger mot eksisterende teoretiske/empiriske modeller.
5. Feltnålinger bør suppleres med intervju/spørreundersøkelse av personer som arbeider i lokalene.

6. Etablere nye modeller for bruk i simuleringsverktøy. Om mulig prøves modellene ut i IDA ICE.
7. Rapportering

” - ”

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sende instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosesseteknikk.

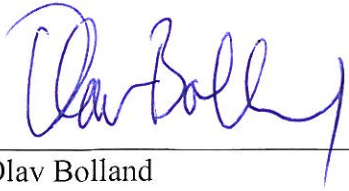
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.


Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsteknisk, varmeteknisk)
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesseteknikk, 14. januar 2013



Olav Bolland
Instituttleder



Hans Martin Mathisen
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder: Arnkell J. Petersen

Forord

Denne masteroppgaven utgjør siste del av sivilingeniørstudiet mitt på Energi og miljø ved Norges teknisk -naturvitenskapelig universitet og er skrevet i samarbeid med bedriften Erichsen & Horgen AS.

En stor takk går til min veileder på NTNU, Hans Martin Mathisen som har svart på alle mine spørsmål og stilt opp når det har vært ønskelig. I tillegg ønsker jeg og takk de ansatte hos Erichsen & Horgen AS og da spesielt Arnkell Petersen, medveileder på denne oppgaven, og Ida Bryn. Takk for tilbakemeldinger og faglig innspill gjennom utarbeidelsen av denne oppgave. Ved gjennomføringen av laboratoriearbeidet vil jeg takke Kim-Remi Andreassen for hjelp til montering av utstyr og Jostein Bakken ved SINTEF for opplæring og assistanse til bruk av måleutstyret. Helt til slutt vil jeg takke NorDan AS for sponning av vindu som ble installert i forbindelse med laboratorieforsøket og for nyttig informasjon om vinduets egenskaper og vindusbransjen generelt.

Familie og venner fortjener også en klapp på skulderen for at de har klart å motivere meg og holde humøret mitt oppe når arbeidet med denne oppgaven har blitt imot.

Trondheim, 10.06.2013



Silje Johnsrud

Sammendrag

Fenomener som trekk fra kaldras og asymmetrisk stråling som følge av strålingsutveksling med andre varmere flater i rommet, skyldes de dårlige isoleringsegenskapene til vinduet. Begge disse tilfellene bidrar negativt i forhold til termisk komfort. Et ønske om å redusere energiforbruk knyttet til varmetap gjennom vindu har ført til en forbedring av isoleringsegenskapene til vinduer gjennom de siste 30 årene. Det har bidratt til å redusere problemer som kaldras og asymmetrisk stråling. Noen hevder at problemene nå er helt borte. I denne oppgaven ble det gjort forsøk i laboratoriet på et vindu med standard total U-verdi på $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ og glasshøyde på 2,66 meter for å undersøke om kaldras- og asymmetrisk strålingsproblematikk elimineres med markedets beste vindu. I tillegg ble målingene brukt til å vurdere egnetheten til dagens formelverk for kaldrasegenskaper på et moderne, svært godt isolert vindu. Simulert utetemperatur var $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ gjennom forsøkene.

I laboratoriet ble det målt lufthastigheter ned mot $0,05 \text{ m/s}$ langs gulvet i oppholdssonen $0,6$ meter fra vinduet. En positiv konsekvens av dette resultatet er at oppholdssonen kan flyttes nærmere vindu uten at det påvirker den termiske komforten. Hastighetsmålinger og observasjoner tyder på lite kaldrasdannelse nedover langs vindusglasset. Det observeres en tilnærmet laminær strømning med en tykkelse på 2-3 centimeter og hastigheter rundt $0,1 \text{ m/s}$ midt på vinduets bredde. I kanten av vinduet måles det noe høyere luftstrømhastighet. Dette skyldes den kalde overflatetemperaturen i området forårsaket av kuldebroer mellom glass og karm i avstandslistene mellom glassene i rutekombinasjonen. En sammenlikning av dagens formelverk for kaldras opp mot målingene i laboratoriet dokumenterer et mulig behov for en utbedring av formelverket tilpasset moderne vinduer. Teorimodellene som finnes i dag er utarbeidet utfra vinduer med vesentlig dårligere standard enn vinduer på dagens marked. Det kan være en av årsakene til at måleresultatene ikke harmonerer med de teoretiske beregningene. På grunn av usikkerhet rundt måleoppsett og måleinstrumenter ved forsøket i denne oppgaven er det nødvendig med nye målinger med annet oppsett og instrumenter som er godt tilpasset lave hastigheter for å danne grunnlaget for forbedringen av formelverket for kaldrasets egenskaper.

Resultatet fra registreringen av asymmetrisk stråling viser lite dannelse av asymmetrisk stråling ved simulert utetemperatur på $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Maksimal asymmetrisk strålingstemperatur ble målt til $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$, noe som er $5,5 \text{ }^\circ\text{C}$ under kravet i den norske standarden NS-EN ISO 7730.

Abstract

Draught and asymmetric radiant temperature is phenomena caused by heat loss through window. Both this occurrences can result in thermal discomfort. It has in a long time been wished to reduce the energy consumption bound to remain thermal comfort near the window. A positive consequence of that wish is that the insulation quality of the window has been improved a lot lately. This development has contributed to reduce the draught and asymmetric radiation problems, and some people means that the problems are totally eliminated when modern windows are installed. In this thesis it has been done experiments to test draught and asymmetric radiation on the best insulated window on the market today. The experiments were accomplished in the laboratory at NTNU in Trondheim on a window with a standard U-value $0.71 \text{ W/m}^2\text{K}$ and glass height 2.66 meters. The simulated outdoor temperature was $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ during the testing. In addition the results were used to evaluate today's calculation models for the draught properties.

In the laboratory the measured velocities on the air stream along the floor in the start of the occupied zone showed values close to $0,05 \text{ m/s}$. A positive consequence of that is that the occupied zone can be enlarged closer to the window without influence the thermal comfort. The velocity measurements and observations alludes that there is a small formation of draught on the window surface. The draught has been observed to be laminar with a thickness on 2-3 centimeters and velocities around 0.1 m/s on the middle of the window with. Measurements in the edge of the window shows higher velocities compared to the measured values on the middle of the window with. The reason for this is the lower surface temperature in the area due to cold bridge between glass and frame and the spacers between the glasses in the pane formation. A comparison of the measured values and today's calculation models for draughts properties documents a need to improve the models so they can fit today's modern windows better. Available calculation models are worked out based on windows with a lot poorer insulation qualities. That can be the reason for the disharmonized result on the comparison between the measured values and theory models. Due to uncertainties in relation to the experiment it is necessary to do new tests with other setups and instruments adjust to low velocities to make the improvement on the calculation models. Results from tests on asymmetric radiation showed low asymmetric radiant temperature. Maximal temperature measured was $4.5 \text{ }^\circ\text{C}$, 5.5°C below the request in the European standard NS-EN 7730.

Innhold

Forkortelser og symboler.....	xiii
Ordforklaringer.....	xvii
1 Innledning.....	1
2 Teori	3
2.1 Generell termisk komfort.....	3
2.2 Trekk.....	3
2.3 Diskomfort som følge av asymmetrisk stråling.....	4
2.4 Varmetap gjennom vinduet	5
2.4.1 Konveksjon	5
2.4.2 Stråling.....	5
2.4.3 Kuldebro	6
2.4.4 Utvendig kondens	6
2.5 Kaldras.....	6
2.6 Asymmetrisk stråling.....	7
3 Dagens formelverk	8
3.1 Termisk komfort.....	8
3.2 Andelen misfornøyde som følge av trekk.....	11
3.3 Diskomfort som følge av asymmetrisk stråling.....	12
3.4 Varmetap gjennom vinduet	14
3.4.1 Overflatetemperatur	16
3.5 Kaldras.....	16
3.5.1 Overgangen fra laminær til turbulent strømning	17
3.5.2 Hastighet	18
3.5.3 Temperatur.....	22
3.5.4 Tykkelse.....	23
3.6 Asymmetrisk stråling.....	24
3.6.1 Formfaktor og vinkelforhold.....	25
4 Gjennomføring av feltmålinger	27
4.1 Lokalisasjon.....	27
4.2 Vinduets egenskaper.....	27
4.3 Klima	28
4.4 Måleutstyr.....	28
4.4.1 VelociCalc.....	28
4.4.2 Termoanemometer	29
4.4.3 Datalogger.....	29
4.5 Målingene	30
4.5.1 Overflatetemperatur	30
4.5.2 Lufthastighet og lufttemperatur langs vinduet.....	31
4.5.3 Lufthastighet i rommet.....	31
4.5.4 Romtemperatur	32
4.5.5 Turbulens	32

5	Gjennomføring av laboratoriemålinger	34
5.1	Lokalisasjon	34
5.2	Vinduet egenskaper	34
5.3	Klima	34
5.4	Måleutstyr	35
5.4.1	Air Velocity Transducer	35
5.4.2	Termoelement	35
5.4.3	Logger	36
5.4.4	Indoor Climate Analyzer	36
5.5	Målingene	37
5.5.1	Overflatetemperatur og romtemperatur	37
5.5.2	Lufthastighet og lufttemperatur	38
5.5.3	Turbulens	40
5.5.4	Asymmetrisk stråling	40
6	Usikkerhet ved målingene	42
6.1	Usikkerhetsmomenter ved målingene	43
6.1.1	Hastighetsfølere	43
6.1.2	Romtemperatur	43
6.1.3	Kalibrering av utstyr	44
6.1.4	Måleoppsettet	44
7	Resultater	46
7.1	Resultatene av feltmålingene	46
7.1.1	Rom- og overflatetemperatur	46
7.1.2	Luftstrøm	47
7.1.3	Turbulens	49
7.1.4	Spørreundersøkelse om trekk fra vindu	49
7.2	Resultatene av laboratoriemålingene	51
7.2.1	Målinger langs vinduets glassflate midt på vinduets bredde	56
7.2.2	Målinger langs vinduets glassflate i kanten av vinduet	60
7.2.3	Målinger ved vinduskarmen og ut i rommet midt foran vinduet	65
7.2.4	Målinger ved vinduskarmen og ut i rommet foran kanten av vinduet	67
7.2.5	Kontrollmålinger av hastighetene nedover vindusglasset med en hastighetsføler midt på vinduets bredde	69
7.2.6	Standardavvik og turbulensintensitet for luftstrømningen ut i rommet	71
7.2.7	Asymmetrisk stråling	73
8	Diskusjon	74
8.1	Overflatetemperatur	74
8.2	Hastighet	74
8.2.1	Luftstrøm nedover langs vindusglasset	74
8.2.2	Luftstrøm over karmkanten og langs gulvet	76
8.3	Luftstrømtemperatur	77
8.4	Overgang fra laminær til turbulent strømning	78
8.5	Asymmetrisk stråling	78

9	Sammenlikning av måleresultater og beregningsmodeller	79
9.1	Begrensninger ved formelverkene	80
9.1.1	Historisk perspektiv	80
9.1.2	Forenkling av virkeligheten	80
9.1.3	Turbulent eller laminært strømningsbildet	81
9.1.4	Skårets formelverk	81
9.1.5	Danvaks formelverk	82
9.1.6	Heiselbergs formelverk	82
9.2	Overflatetemperatur	82
9.3	Luftstrømning langs vinduets glassflate	83
9.3.1	Overgangen fra laminær til turbulent strømning	83
9.3.2	Hastighet	85
9.3.3	Temperatur	87
9.3.4	Tykkelse	88
9.4	Luftstrømning ved karmkanten og langs gulvet ut i rommet	88
9.4.1	Hastighet	89
9.4.2	Termisk komfort	90
10	Vurdering av kaldrassikring.....	92
10.1	Tiltak mot kaldras	92
10.2	Energisparing	93
11	Konklusjon.....	95
12	Referanser.....	97

Figuroversikt

Figur 3.1 Sammenheng mellom PPD og PMV	9
Figur 3.2 Sammenlikning av PMV modellen og UCB modellen ved total termisk komfort... 11	11
Figur 3.3 Prosent misfornøyde som funksjon av strålingstemperatrasymmetrien	13
Figur 3.4 Varmeoverføringen i et enkeltglassvindu	14
Figur 3.5 Varmeoverføringen i et tolagsglassvindu	15
Figur 3.6 Strømningstype som funksjon av temperaturforskjellen mellom vinduet og romlufta samt høyden på vinduet	17
Figur 3.7 Eksempel på når likning (3.17) kan brukes	21
Figur 3.8 Sammenlikning av hastighetsformlene (3.15) (Heiselberg) og (3.17) (Skåret) for et trelagsglassvindu.....	22
Figur 3.9 Et eksempel på figurene til Fanger som brukes til å finne vinkelfaktorer mellom flater og person i rom.....	26
Figur 4.1 Bilde av vinduet feltmålingene ble utført på	28
Figur 4.2 TSI VelociCalc Multi-Function Ventilation Meter	29
Figur 4.3 Ahlborn Thermoelectric Flow Sensor FV A605 TA	29
Figur 4.4 Kimo datalogger KT210	30
Figur 4.5 Markerte målepunkter for måling av overflatetemperatur.....	30
Figur 4.6 Festing av måleproben under hastighetsmålinger langs vinduet	31
Figur 4.7 Måling av romtemperatur	32
Figur 4.8 Turbulensmålinger med røykappuller	33
Figur 5.1 TSI Velocity Transducer Model 8475	35
Figur 5.2 Fluke Hydra 2635A/C logger	36
Figur 5.3 Avlesningsenheten til høyre og måleproben til venstre, brukes til måling av asymmetrisk stråling.....	37
Figur 5.4 Den svarte kula som ble brukt til måling av romtemperatur	38
Figur 5.5 Tilleggsstativet som holdt stativet med hastighetsfølere stabilt	39
Figur 5.6 Plassering av termoelementene på hastighetsfølerne	39
Figur 5.7 Måleoppsettet ved hastighet og temperaturmålinger over karmen og ned til gulvet 40	40
Figur 6.1 Sammenhengen mellom målt spenning og hastighet ved Air Transducer Velocity. 43	43
Figur 7.1 Prosentvis fremstilling av hvor mange som opplever trekk fra vinduet.....	50
Figur 7.2 Tiltak for å minske følelsen av ubehagelig trekk fra vinduet	50
Figur 7.3 Måleoppsett av hastighetsfølere ved vindusglassets overflate	52
Figur 7.4 Måleoppsett for hastighetsfølere ved målingene over karmkanten og ut i rommet . 53	53
Figur 7.5 Strømningsbildet på øvre del av vinduet	54

Figur 7.6 Detaljert visning av kaldrasets strømningsbildet på nedre del av vinduet, over karmkanten, nedover langs veggen og videre utover i rommet.....	55
Figur 7.7 Termografering som viser varmetapet nederst på vinduet	57
Figur 7.8 Resultatet av hastighetsmålingene for kaldraset midt på vinduets bredde med fastsatt stativ og manuell flytting av hastighetssensorene	58
Figur 7.9 Resultatet av hastighetsmålingene for kaldraset midt på vinduets bredde med flytting av hele stativet og alle hastighetsfølerne samtidig.....	59
Figur 7.10 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset midt på vinduets bredde med fastsatt stativ og manuell flytting av følere.	59
Figur 7.11 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset midt på vinduets bredde med flytting av hele stativet og alle termoelementene samtidig	60
Figur 7.12 Termografering av hjørne nederst ved vinduskarmen	62
Figur 7.13 Termografering av øvre del av kanten av vinduet.....	62
Figur 7.14 Resultatet fra hastighetsmålinger på kaldraset i kanten av vinduet med fastsatt stativ og manuell flytting av hastighetssensorene	63
Figur 7.15 Resultatet av hastighetsmålingene til kaldraset i kanten av vinduet med flytting av hele stativet og alle hastighetsfølerne samtidig	63
Figur 7.16 Resultatet av temperaturmålinger på kaldraset i kanten av vinduet med fastsatt stativ og manuell flytting av hastighetssensorene	64
Figur 7.17 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset i kanten av vinduet med flytting av hele stativet og alle termoelementene samtidig.....	65
Figur 7.18 Resultat fra hastighetsmålinger på kaldraset over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet midt foran vinduet	66
Figur 7.19 Resultatet av temperaturmålingene til luftstrømmen over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet midt foran vinduet	67
Figur 7.20 Resultat fra hastighetsmålinger på kaldraset over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet foran kanten av vinduet	68
Figur 7.21 Resultat fra temperaturmålingene på kaldraset over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet foran kanten av vinduet.....	69
Figur 7.22 Resultatet av hastighetsmålingene nedover vindusglassoverflaten ved kontrollmålingene midt på vinduets bredde	70
Figur 7.23 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset ved kontrollmålingene.....	71

Tabelloversikt

Tabell 7.1 Resultat av målingen av overflatetemperatur på vinduet.....	46
Tabell 7.2 Resultat av luftmålingen langs vinduet.....	48
Tabell 7.3 Oversikt over målepunkter.....	52
Tabell 7.4 Overflatetemperaturer målt midt på vinduets bredde.....	56
Tabell 7.5 Overflatetemperaturer målt i kanten av vinduet.....	61
Tabell 7.6 Gjennomsnittshastigheter, standardavvik og relativt standardavvik for en måleserie for en luftstrøm langs gulvet ut i rommet.....	72
Tabell 7.7 Plan strålingstemperatur for målinger 0,6 meter over gulvet.....	73
Tabell 7.8 Plan strålingstemperatur for målinger 1,1 meter over gulvet.....	73
Tabell 9.1 Sammenlikning av teoretiske hastighetsberegninger og målte hastigheter.....	86
Tabell 9.2 Tykkelsen på kaldraset langs vinduets glassflate.....	88
Tabell 9.3 Sammenlikning av Skårets formelverk for hastighet til kaldrasluftstrøm ut i rommet og målte hastigheter.....	89

Vedleggsoversikt

Vedlegg 1: Oversikt over målepunkter på vinduet ved feltmålingene

Vedlegg 2: Oversikt over målepunktene ved laboratorieforsøkene

Vedlegg 3: Resultattabeller fra laboratorieforsøkene

Vedlegg 4: Utdrag fra risikovurderingsrapporten i forbindelse med laboratorieforsøkene

Forkortelser og symboler

<i>Symbol</i>	<i>Forklaring</i>	<i>Brukes i:</i>
A_f/A_g	Areal til karm/areal til ruta [m ²]	(3.7)
C_p	Varmekapasitet [kJ/kgK]	(3.20)
DR	Andelen misfornøyde som følge av trekk (Draught Rate) [%]	(3.4)
F_{p-i}	Vinkelforholdet fra det lille plane elementet til flaten i	(3.26)
g	Tyngdekraften [m/s ²]	(3.11) og (3.12)
h	Høyden på vinduet [m]	(3.14), (3.15) og (3.16)
h_i	Konveksjonsvarmeoverføringskoeffisient fra rom til vindu [W/m ² K]	Figur 3.4 og Figur 3.5
h_o	Konveksjonsvarmeoverføringskoeffisient fra vindu til uteomgivelsene [W/m ² K]	Figur 3.4 og Figur 3.5
h_{space}	Varmeoverføringen i rommet mellom glassene i et tolagsglassvindu [W/m ² K]	Figur 3.5
I_g	Summen av den synlige omkretsen til glassene i vinduet [m]	(3.7)
k	Termisk konduktivitet [W/mK]	Figur 3.4
L	Tykkelsen på glasset [m]	Figur 3.4
M	Metabolsk rate [W/m ²]	(3.1)
n	Antall målinger	(6.1)
PD	Percent Dissatisfied [%]	(3.5)
PMV	Predicted Mean Vote	(3.1) og (3.2)
PPD	Predicted Percent Dissatisfied [%]	(3.2)
Q	Varmeeffekt [W]	(3.20)
q_v	Volumstrøm [m ³ /s]	(3.20) og (3.21)

R_i	Innside termisk motstand [$m^2 K/W$]	(3.8)
R_t	Termisk motstand [$m^2 K/W$]	(3.6)
S_d	Standardavvik	(3.3) og (6.1)
$t_{a,f}$	Minimum lufttemperatur [$^{\circ}C$]	(3.4) og (3.19)
t_i	Temperatur på flate i [$^{\circ}C$]	(3.26)
t_{pr}	Plan strålingstemperatur [$^{\circ}C$]	(3.26)
t_r	Temperatur i rommet [$^{\circ}C$]	(3.8) og (3.19)
t_u	Utetemperatur [$^{\circ}C$]	(3.8)
T_u	Turbulensintensitet [%]	(3.3) og (3.4)
t_g	Overflatetemperatur på innside av glassruta [$^{\circ}C$]	(3.8)
U_c	Maksimal hastighet på luftstrømmen i kaldraset før den bøyer av [m/s]	(3.17) og (3.18)
U_f	U-verdi karm/ramme [$W/m^2 K$]	(3.7)
U_g	U-verdi glassruta [$W/m^2 K$]	(3.7)
U_{maks}	Maksimal hastighet [m/s]	(3.11), (3.13), (3.14), (3.15) og (3.16)
U_R	Resulterende usikkerhet ved målinger	(6.3)
U_T	Tilfeldig feil ved målinger	(6.2) og (6.3)
U_w	Total U-verdi vindu [$W/m^2 K$]	(3.7) og (3.8)
x	Avstanden fra vinduet [m]	(3.14), (3.15), (3.16), (3.17), (3.18) og (3.19)
x	Enkelte målverdier	(6.1)
\bar{x}	Middelverdi på målingene	(6.1)
y	Koordinat til punktet på vinduet der hastigheten ønskes målt ($y=0$ øverst på vinduet) [m]	(3.12) og (3.13)

y_t	Lengden på delen av vinduet der hastigheten ønskes målt som har turbulent strømning [m]	(3.11) og (3.12)
β	Volumetrisk termisk ekspansjonskoeffisient [1/K]	(3.11) og (3.12)
δ	Tykkelse på kaldraset [m]	(3.17) og (3.18)
ΔT	Temperaturforskjellen mellom romluftstemperatur og temperatur på luftstrømmen langs vinduet [K]	(3.20)
ΔT_f	Temperaturdifferansen mellom overflatetemperaturen på vinduet og lufta i rommet [°C]	(3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) og (3.16)
Δt_{pr}	Strålingstemperatursymmetri [°C]	(3.5)
ρ	Tettheten til luft [kg/m ³]	(3.20)
$\bar{u}_{a,l}$	Lokal gjennomsnittslufthastighet, [m/s]	(3.3) og (3.4)
ψ_g	Lineære varmegjennomgangskoeffisienten som følger den kombinerte varmelikningen i rute, avstandslist og karm/ramme (kuldebroverdi)	(3.7)

Ordforklaringer

Grashof tall (Gr)	Dimensjonsløst tall som angir forholdet mellom oppdriftskrefter og seighetskrefter i væsker/gasser hvor det finnes temperaturdifferanser.
Kuldebro	Et begrenset parti av en bygningsdel som har vesentlig høyere U-verdi (dårligere varmeisolasjonsevne) enn konstruksjonen omkring.
Operativ temperatur	Ensartede temperaturen av luft og omgivende flater, som vil medføre samme varmeavgivelse fra mennesket som de faktiske (uensartet) omgivelsene.
Oppholdssone	Termiske komfortkrav begrenses til en oppholdssone i rommet. Oppholdssonen begrenses horisontalt av et plan 0,1 meter over gulvet og et plan 1,9 meter over gulvet. Vertikal begrenses sonen av loddrette plan parallelt med rommets vegger, i en avstand 0,6 meter fra veggen.
Passivhus	Hus med spesiell konstruksjon som gir et vesentlig lavere energibehov enn vanlig standardhus.
Plan strålingstemperatur	Ensartede temperaturer på omgivende flater, som medfører samme bestråling av den ene siden av en plan flate som de faktiske overflatetemperaturene.
Seebeck- effekten	En temperaturgradient setter opp et elektrisk felt i et elektrisk ledende stoff. Termoelektrisiteten oppstår fra relasjonen mellom elektronene, varmestrømmer og elektriske strømmer.
Strålingstemperatur- asymmetrien	Forskjellen mellom plan strålingstemperatur på to motstående sider av en liten plan flate.
Termisk komfort	En subjektiv følelse eller sinnstilstand der vi er tilfreds med de termiske omgivelsene.
Trekk	Uønsket lokal kjøling av hud på grunn av luftbevegelse.

U – verdi Varmegjennomgangskoeffisient [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$].

Uniformt miljø Like forhold over alt.

1 Innledning

I snitt tilbringer europeiske borgere 90 prosent av tiden innendørs (Klima- og forurensningsdirektoratet, 2010). Termisk komfort innendørs er følgelig en viktig faktor for at folk skal trives. På grunn av sine dårlige isoleringsegenskaper har vinduet i lengere tid vært bygningens svakeste punkt når det gjelder varmetap. Dette varmetapet fører til at det kan oppstå lokal termisk diskomfort nær vinduet. For å unngå ubehagelig termisk følelse nær vinduet brukes det betydelige mengder energi. Dette energiforbruket bidrar til at byggesektoren i dag står for cirka 40 prosent av Norges samlede energiforbruk (Miljødepartementet, 2012). Fra myndighetens side er det ønskelig å redusere dette forbruket. I 2009 satte Olje- og energidepartementet ned et utvalg som utredet mulighetene for å effektivisere energibruken i Norge. Utvalget foreslår en halvering av energiforbruket i bygg innen år 2040 (Lavenergiutvalget, 2009). I følge utvalget skal halveringen av energibruk i bygg gjennomføres ved *”strengere krav til nybygg, betydelig satsing på energieffektivisering ved større rehabiliteringer og enøk-tiltak i øvrig bygningsmasse”*. Utvalget presenterer en rekke virkemidler som anbefales for å redusere energibruken i byggesektoren. Blant virkemidlene er *”storstilt kompetanseplan for byggebransjen, forhåndsannonsert trinnvis skjerpelse av byggforskriftene, strengere energikrav ved rehabilitering og revidert energimerkeordning”* (Lavenergiutvalget, 2009). I følge NorDan AS (2013) vil en kunne oppnå en årlig energibesparelse på 10 kWh per kvadratmeter vindusareal for hver tiendel U-verdien på vinduet reduseres. Strengere krav til vinduets U-verdi og dermed en tvungen forbedring av vinduets isoleringsegenskaper vil bidra til å redusere energiforbruket i bygninger. Vindusbransjen har allerede startet utviklingen av vinduets egenskaper for å møte fremtidige skjerpede krav i byggeforskrifter. Det finnes i dag store vinduer med en total standard U-verdi ned mot 0,7 W/m²K. Dette er langt under standardkravet i dagens byggeforskrift som er 1,2 W/m²K og også under U-verdikravet i passivhusstandarden som er 0,8 W/m²K.

Mange mener at de gode isoleringsegenskapene til de moderne vinduene har redusert problemer som påvirker den termiske komforten betraktelig. Noen mener at problemene er helt borte med de beste vinduene på markedet i dag. Typiske termiske komfortproblemer forårsaket av varmetap gjennom vindu er trekk og asymmetrisk stråling. Som følge av varmetapet vil den innvendige overflatetemperaturen på vinduet bli noe lavere enn resten av rommet. Det fører til dannelse av kaldras, som kan gi trekkfølelse. I tillegg vil

strålingsutvekslingen mellom kroppen og vinduet være ulik de andre flatene rommet. Denne asymmetriske strålingsutvekslingen kan skape lokal termisk diskomfort. I denne oppgaven skal det gjøres forsøk for å sjekke dannelsen av kaldras og asymmetrisk stråling fra et relativt høyt vindu med den beste U-verdien som finnes på markedet. Forsøket foregår i laboratoriet og resultatet vurderes opp mot de termiske komfortkravene i norsk standard. I tillegg suppleres det med feltmålinger på et vindu med U-verdi tilpasset dagens byggeforskriftstandard.

Kaldras som følge av dårlig isolerte vinduer har lenge vært et kjent problem og det er gjort flere forsøk for å danne beregningsmodeller som kan brukes til å regne ut kaldrasets egenskaper. En sammenlikning av dagens formelverk kan leses prosjektoppgaven ”*Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring*” fra NTNU (Johnsrud, 2012). Sammenlikningen viser at det er store sprik mellom de ulike formelverkene når parameterne U-verdi, vindushøyde og utetemperatur varierer. På grunn av de store sprikene mellom de ulike formelverkene i dag og utviklingen av vinduer i den senere tid, er det ønskelig å analysere formelverket. Dette gjøres utfra feltmålinger og laboratoriearbeid på nyere vinduer.

2 Teori

I dette kapittelet presenteres de ulike teoriene til sentrale temaer i oppgaven. Aktuelle formelverk for det som presenteres i dette kapittelet kan leses i kapittel 3.

2.1 Generell termisk komfort

”Termisk komfort (evt. varmekomfort) er en subjektiv følelse eller sinnstilstand der vi er tilfreds med de termiske omgivelsene. Vi ønsker det verken kaldere eller varmere, verken for kroppen som helhet eller for de enkelte kroppsdelene som føtter, nakke e.l.” (Blom, 1999).

Det er flere faktorer som er avgjørende for den termiske komforten. Av klimaparametere er det lufttemperatur, midlere strålingstemperatur, relativ luftbevegelse og luftas vanddampinnhold som har en sentral betydning. Vesentlige personparametere er aktivitetsnivå, bekledding og oppholdstid. (Hanssen, 2007a)

Termisk balanse oppnås når den interne varmereproduksjonen er lik tapet av varme til omgivelsene. Kroppens termoregulerende system vil automatisk prøve å modifisere hudtemperaturen og svetteraten for å opprettholde termisk balanse. Det er derfor de fysiske kriteriene hudtemperatur, kjernetemperatur og svettesekresjon som er bestemmende faktor for termisk komfort, de øvrige nevnte parameterne er bare påvirkende faktorer. (Hanssen, 2007a)

2.2 Trekk

Trekk defineres som uønsket lokal kjøling av hud på grunn av luftbevegelse (Toftum, 2004). Følelsen av trekk avhenger av middellufthastighet, lufttemperatur og turbulensintensitet. En høyturbulent luftstrøm kan virke mer ubehagelig enn lavturbulent luftstrøm fordi det da oppstår mer svingninger i hudtemperaturen (Fanger, et al., 1988).

For å tilfredsstille flest mulig bør luftbevegelse designes slik at det er lave lufthastigheter i oppholdssonen (Toftum, 2004). De som foretrekker høyere hastighet på luftbevegelsene kan lett regulere dette med eget tilleggsutstyr, som for eksempel en bordvifte. Middelhastighet på lufta bør i følge Stampe (2000) være mindre enn 0,25 m/s i sommerhalvåret og mindre enn 0,15 m/s i vinterhalvåret for at luftbevegelsene ikke skal ha en negativ innvirkning på den termiske komforten.

Parameterne for hvordan den generelle termiske komforten oppleves vil også ha betydning for hvordan trekk føles. Toftum og Nielsen (1996a) gjorde et forsøk for å finne ut hvordan

metabolsk rate (aktivitetsnivå) innvirker på opplevelsen av luftbevegelser om man arbeider i kjølige omgivelser. Forsøket viste at menneskets sensitivitet for trekk minket betraktelig da aktivitetsnivået steg. Aktivitet fører til at kroppstemperaturen øker og kroppen må kvitte seg med overskuddsvarmen for å føle termisk komfort (jf. kap.2.1). Trekk kan dermed føles komfortabelt fordi luftstrømmen da blir et hjelpemiddel for å kjøle ned kroppen fremfor å bli en kald luftstrøm som føles ubehagelig. Dersom kroppen oppleves nøytral varm ved aktivitet vil ikke aktiviteten påvirke opplevelsen av trekk, og luftstrømmen kan føles kjølig og føre til termisk diskomfort (Toftum & Nielsen, 1996a). Toftum og Nielsen (1996b) har også tatt for seg sammenhengen mellom generell opplevelse av termiske forhold og sensitiviteten for trekk. Studiet viste at det var flere som følte ubehag på grunn av trekk ved generell kald termisk følelse enn ved varm termisk følelse. Årsaken til dette kan være at de som allerede føler seg litt kald er mer sensitive for trekk enn de som føler seg termiske nøytrale eller varme. Når en person blir utsatt for lokal kjøling av huden samtidig som en føler seg generell kald fra før vil det påvirke de perifere impulssignalene og den subjektive oppfatningen av de termiske omgivelsene. Signalene vil bli intensivert og føre til en økt følelse av lokal termisk diskomfort. I tillegg til personparameterne nevnt i kapittel 2.1 kan andre parametere som kjønn, alder og tretthet påvirke opplevelsen av trekk (Toftum, 2004).

2.3 Diskomfort som følge av asymmetrisk stråling

En kald eller varm flate skaper strålingsasymmetri fordi flaten har en annen temperatur enn flatene rundt. En kald flate som vindu eller glassfasade kan dermed føre til at personer i nærheten av vindu føler en annen temperatur på den siden av kroppen som står mot det kalde vinduet, og det kan oppleves lokal termisk diskomfort. Avgjørende faktorer for hvor mye den asymmetriske strålingen påvirker den termiske komforten er vinkelforhold mellom flatene og temperaturene på de ulike flatene.

Forskning utført av Gan (2001) viser at dersom det er mulig er det bedre for den termiske komforten å ha to små vinduer med noe avstand mellom enn et stort vindu med samme glassareal fordi dette vil minske vinkelforholdet, jf. kapittel 3.6.1.

Undersøkelser gjort av Fanger et al. (1985) viste at asymmetrisk stråling ikke har noen innvirkning på foretrukket operativ temperatur i rommet. Gjennom forsøket ble det heller ikke observert noe markant forskjell på oppfattelsen av asymmetrisk stråling blant kvinner og menn.

2.4 Varmetap gjennom vinduet

Vinduets totale U-verdi indikerer hvor mye varme som transporteres gjennom vinduet. Mye varmetap gir kald overflatetemperatur på innsiden av vinduet. Det har betydning for dannelsen av kaldras og asymmetrisk stråling, som igjen vil påvirke den termiske komforten.

Varmetapet gjennom vinduet skjer i form av konduksjon gjennom de faste materialene og konveksjon og stråling i overgangen mellom omgivelse og glass og i gasslagene mellom glassene.

2.4.1 Konveksjon

Ulike overflatetemperatureer på glassflatene i rutekombinasjonen resulterer i at deler av gassen mellom glassene blir varm og noe av gassen blir kald. Varmgass vil stige mens kaldgass vil synke. Denne massebevegelsen skaper varmetransport i form av naturlig konveksjon. Å erstatte luft med tyngre gasser som argon og krypton som har dårligere termisk ledningsevne vil minke varmetapet gjennom rutekombinasjonen. Kaldere vær i form av mye vind eller lav utetemperatur fører til lavere U-verdi og dermed mer varmetap. Dette fordi det da skapes mer bevegelse av gassen i mellom glassene og varmeoverføringen i form av konveksjon øker (Hall, 2009). I overgangen mellom glass og omgivelse skjer det også varmeoverføring via konveksjon. Luftbevegelsen som bidrar til konveksjon oppstår på grunn av temperaturforskjeller mellom vindusflate og omkringliggende luft.

2.4.2 Stråling

Temperaturforskjeller på overflater er årsaken til at det skjer varmetap gjennom vinduet via stråling. Hvor mye varme som transporteres avhenger av overflatetemperaturene i fjerde potens og emissiviteten til overflatene. Strålingseffekten kan derfor begrenses ved å legge et lavemitterende belegg på glasset. Det er vanlig å legge belegget på glasset innside mot gassen mellom rutene for å beskytte belegget. For en rutekombinasjon bestående av flere glass har det ingen betydning for U-verdien eller dagslystransmisjonen hvor det belagte glasset plasseres, men direkte solvarmetransmisjon vil kunne bli noe redusert hvis energispareglasset med belegg settes ytterst. Derfor er det vanlig å sette energispareglasset med belegg innerst i rutekombinasjonen for å utnytte solenergien (Pilkington, 2012). Dersom rutekombinasjonen består av trelagsglass kan to av de tre glassene ha belegg på innsiden mot gassen for å minske strålingseffekten enda mer. Med lavemitterendebelegg kan emisjonsfaktoren senkes fra 0,837 til 0,03. Dersom emisjonsfaktoren er under 0,20 vil glasset betegnes som lavemisjonsglass (Pilkington, 2012).

2.4.3 Kuldebro

I overgangen mellom karm og glass oppstår det en kuldebro fordi avstandslistene mellom glassene har dårligere varmeisolasjonsevne enn gasslagene mellom glasset. Kuldebroen bidrar til dårligere totale U-verdien på vinduet (se likning (3.7)). Før bestod disse avstandslistene typisk av aluminium. Men i den senere tid er det vanlig å erstatte aluminiumen med annet materialet for å få til bedre isolerende egenskaper i overgangen mellom glass og karm. Isolerende avstandslistene av for eksempel glassfiber eller rustfritt stål med polypropylenplast vil gi mindre kuldebrovirkning i randsonen på glasset enn ordinære aluminiumsspacere (Thue, et al., 2007).

2.4.4 Utvendig kondens

Det har lenge vært fokus på å senke U-verdien til vinduskonstruksjoner. Reduksjonen har ført til store fordeler i form av mindre varmetap og mindre kondens på innsiden av vinduet. Men i kjølevannet av denne positive utviklingen har det oppstått en ny utfordring i form av økt forekomst av kondens på vinduets utside. Med mindre varmetap vil den utvendige temperaturen på glasset bli lavere og kan ved bestemte klimatiske forhold komme under duggpunktstemperaturen. Dette fører til kondens på utsiden av glasset. Denne kondensen vil ikke skade vinduet, men det vil kunne hindre utsyn (Thyholt & Gjeving, 1998). I glass- og vindusbransjen arbeides det med løsninger der den gode U-verdien ivaretas samtidig som kondensproblemet reduseres. I følge glassteknikker Svein Jarle Haukland i NorDan AS jobbes det med løsninger på problemet. Et løsningsalternativ som testes og utvikles er å belegge pyrolytisk film på vindusglassets utside. Dette belegget vil kunne forhindre dannelsen av utvendig kondens da overflatetemperaturen på vinduet med belegg vil holdes høyere enn duggpunktstemperaturen. Det arbeides også med løsninger der plasseringen av vinduet er sentral. Det er mulig at kondensproblemet kan reduseres hvis vinduet trekkes inn i veggen (Haukland, 2013).

2.5 Kaldras

Kaldras er uønsket luftstrøm som oppstår ved kalde loddrette flater som følge av temperaturforskjell mellom overflaten og lufta i rommet. Typisk vil kaldras oppstå på vinduer eller glassfasader. På kalde dager vil overflatetemperaturen til glasset føre til at lufta nær vinduet blir avkjølt og raser nedover med økende hastighet som følge av tyngden. Det vil på vinduets glassoverflate oppstå en naturlig konveksjonsstrøm nedover langs flaten. Når luftstrømmen når gulvet vil den bre seg utover og kan grunnet høy hastighet og lav temperatur

føles som trekk. Kaldraset kan også forårsake dannelse av en kald luftpute nede nær gulvet som kan føles ubehagelig på grunn av høy vertikal temperaturdifferanse (Skåret, 2000).

2.6 Asymmetrisk stråling

Strålingsasymmetri oppstår på grunn av ulik strålingsutveksling mellom flater. Store temperaturforskjeller mellom flatene og betydelig vinkelforhold mellom flatene med ulik temperaturforskjell vil skape mye asymmetrisk stråling.

3 Dagens formelverk

Flere av temaene beskrevet i kapittel 2 er komplekse og utfordrende å lage beregningsmodeller for. I dette kapittelet skal eksisterende modeller og formelverk for teorien beskrevet i kapittel 2 presenteres.

3.1 Termisk komfort

P.O. Fanger (1970) utviklet på 1970-tallet et verktøy for å måle termisk komfort. I dag er denne modellen fortsatt anerkjent og inkludert i den europeiske standarden *NS-EN ISO 7730 Ergonomi i termisk miljø Analytiske bestemmelser og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD- indeks og lokal termisk komfort* (heretter kalt NS-EN ISO 7730) og den amerikanske standarden *Ashrae Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy* (heretter kalt Ashrae standard 55).

PMV står for *Predicted Mean Vote* og PPD er forkortelse for *Predicted Percentage of Dissatisfied*. PMV er en indeks som forutsier en midlere verdi av stemmer fra en stor gruppe av personer som bruker en 7 punktsskala for å fortelle om sine termiske opplevelser. Skalaen regnes som psykofysisk og har følgende punkter:

- +3 Hett
- +2 Varmt
- +1 Lett varm
- 0 Nøytral
- 1 Lett kjølig
- 2 Kjølig
- 3 Kaldt

Modellen er bygd opp ut fra varmebalanselikninger mellom kroppen og dens omgivelser i et uniformt miljø og følgende formel brukes for beregning av PMV:

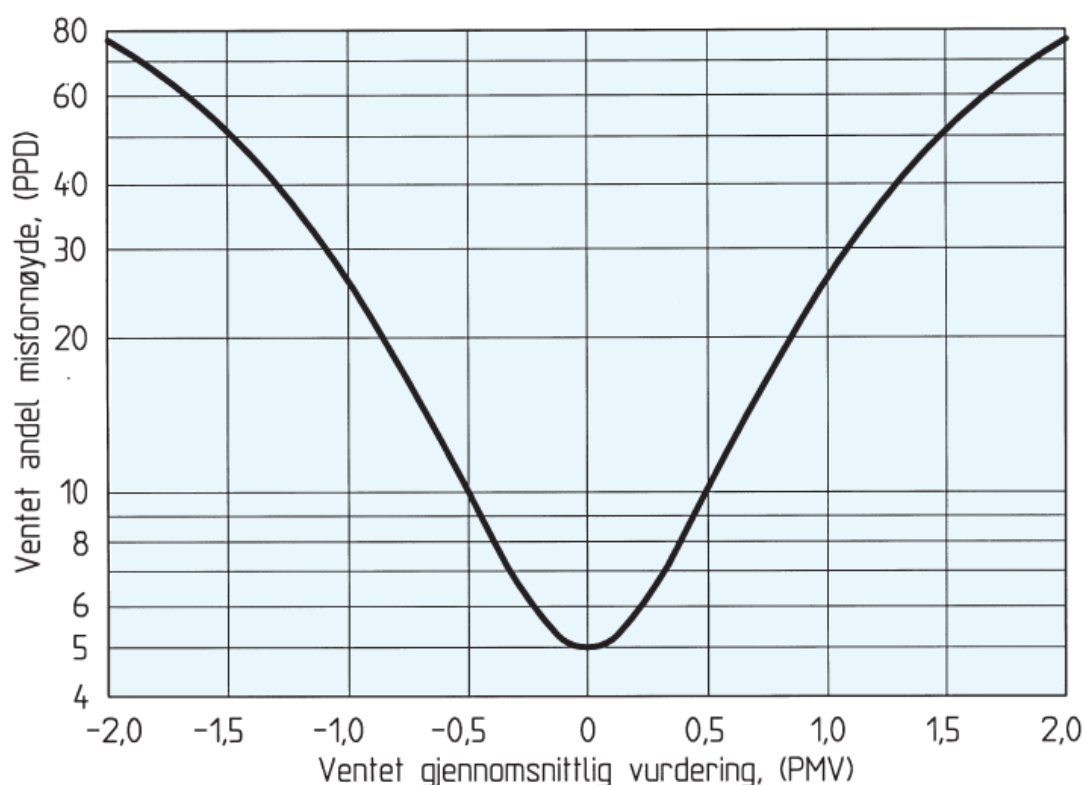
$$PMV = [0,303^{-0,036M} + 0,028] \cdot L \quad (3.1)$$

L er den termiske belastningen på kroppen. Den er definert som forskjellen mellom intern varmereproduksjon og varmetapet til omgivelsene for en person som hypotetisk holder en komfortabel hudtemperatur og svetterate. L beregnes ut fra lufttemperatur, midlere

strålingstemperatur, lufthastighet, påkledning og metabolsk varmereproduksjon (Huizenga, et al., 2006). En utledning av hvordan L regnes ut kan leses i den norske standarden NS-EN ISO 7730 (2006).

PPD gir en indikasjon på hvor mange prosent i en større gruppe som opplever utilfredshet med de termiske omgivelsene. Sammenhengen mellom PPD og PMV er gitt ved følgende likning:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (3.2)$$



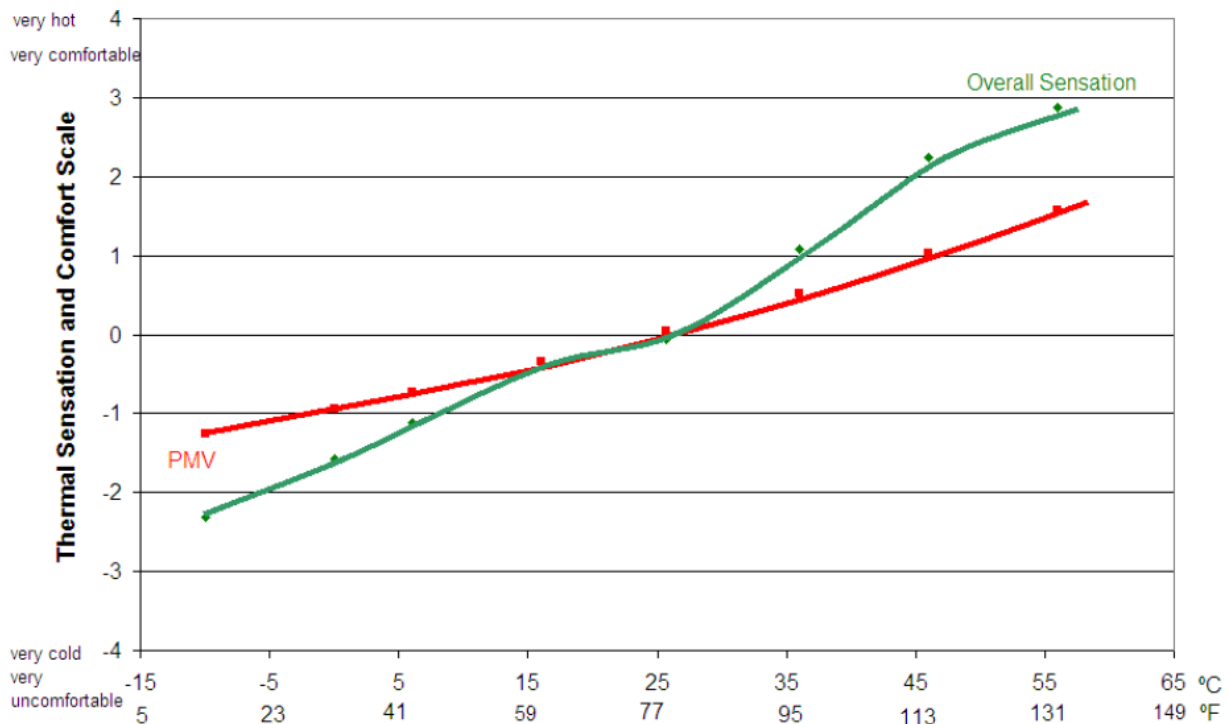
Figur 3.1 Sammenheng mellom PPD og PMV (Blom, 1999)

Figur 3.1 viser sammenhengen mellom PPD og PMV. Det er verdt å merke seg at selv om den ventede gjennomsnittlige vurderingen (PMV) er på 0 (nøytral) vil det ikke oppnås en misfornøydandel på 0 prosent. PPD kommer aldri under 5 prosent og dette skyldes at mennesker er individer som har subjektive meninger om hvilke forhold som må gjelde for å oppnå termisk nøytralitet.

Modellen til Fanger presentert her er utviklet på bakgrunn av forsøk i laboratorium med uniforme og stabile forhold, noe som ikke alltid stemmer med virkeligheten. En annen svakhet som er påpekt med Fangers modell er at den bare ser på den helhetlige termiske

komforten og kan ikke skille ut lokal termisk diskomfort som årsak til termisk diskomfort. Dersom den ene siden av kroppen er varm og den andre siden er kald vil personen ha null i varmebelastning etter Fanger sin modell og PMV vil bli registrert som nøytral. Dette er begrensninger som har ført til at flere har sett på muligheten for å lage en modell som tar hensyn til lokal termisk diskomfort og kan brukes for ikke-uniforme og transiente forhold (Huizenga, et al., 2006). The University of California Berkeley har utviklet en ny termisk komfortmodell (UCB Comfort Model) som forutser lokal komfort for ulike kroppsdelar og integrer lokal komfort inn i beregningen av den helhetlige termiske komforten. Modellene deler kroppen opp i 16 kroppsdelar som igjen deles inn i kjerne-, muskel-, fett- og hudlag. Lokal diskomfort kalkuleres ut fra hudtemperaturen på kroppsdelar og den gjennomsnittlige hudtemperaturen, der den gjennomsnittlige hudtemperaturen representerer kroppens helhetlige termiske tilstand. Ved å dele inn kroppens overflate inn i flere tusen mangekanter kan varmeutvekslingen mellom hudoverflaten og miljøet rundt beregnes svært detaljert. Fordelen med denne modellen er at den kan simulere varmeutvekslingen mellom hver del av kroppen og dens mikroklima for å beregne følelse av lokal komfort for hver enkel kroppsdel. Dette gjør UCB Comfort modellen velegnet for bruk der det termiske miljøet er komplekst med termisk asymmetri og transiente forhold (Huizenga, et al., 2006).

Huizenga, et al. (2006) har gjort en sammenlikning av modellen til Fanger og UCB Comfort Model i forhold til hvordan et vindu påvirker den totale termiske komforten. En illustrasjon av resultatet fra forsøket kan ses i Figur 3.2.



Figur 3.2 Sammenlikning av PMV modellen og UCB modellen ved total termisk komfort

Sammenlikningen viser at dersom overflatetemperaturen på vinduet er mellom 15 °C og 35 °C er det liten forskjell på de to modellene. Forskjellene blir derimot tydeligere dersom overflatetemperaturen på vinduet økes eller senkes utenfor disse temperaturgrensene. Store forskjeller mellom romtemperatur og overflatetemperatur fører til mer asymmetrisk stråling (og trekk ved kald vindusoverflate) noe som kan gi lokal termisk diskomfort. UCB modellen kalkulerer inn denne lokale påvirkningen mens PMV modellen ikke gjør det i samme grad og kurvene blir følgelig forskjellige.

3.2 Andelen misfornøyde som følge av trekk

Dagens formel for andelen misfornøyde som følge av trekk finnes både i standarden NS- EN ISO 7730 og Ashrae standard 55. Denne formelen er utviklet av Fanger et al. (1988) og det er tatt hensyn til betydningen av turbulensintensitet i beregningsmodellen. Turbulensintensiteten beskriver forholdet mellom standardavviket av lufthastigheten og lokal gjennomsnittliglufthastighet, begge variablene normalt målt over en måleperiode på 3 minutter (Blom, 1999).

$$T_u = \frac{100 \cdot S_d}{\bar{v}_{a,l}} \quad (3.3)$$

Formel for andel misfornøyde på grunn av trekk er som følger:

$$DR = (34 - t_{a,l}) \cdot (\bar{v}_{a,l} - 0,05)^{0,62} \cdot \left((0,37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot T_u) + 3,14 \right) \quad (3.4)$$

Likningen gjelder for en lufttemperatur mellom 20 °C og 26 °C og turbulensintensitet mellom 10 og 60 prosent. Dersom turbulensintensiteten er ukjent kan 40 prosent velges. Hvis gjennomsnittslufthastighet er under 0,05 m/s brukes 0,05 m/s i beregningene.

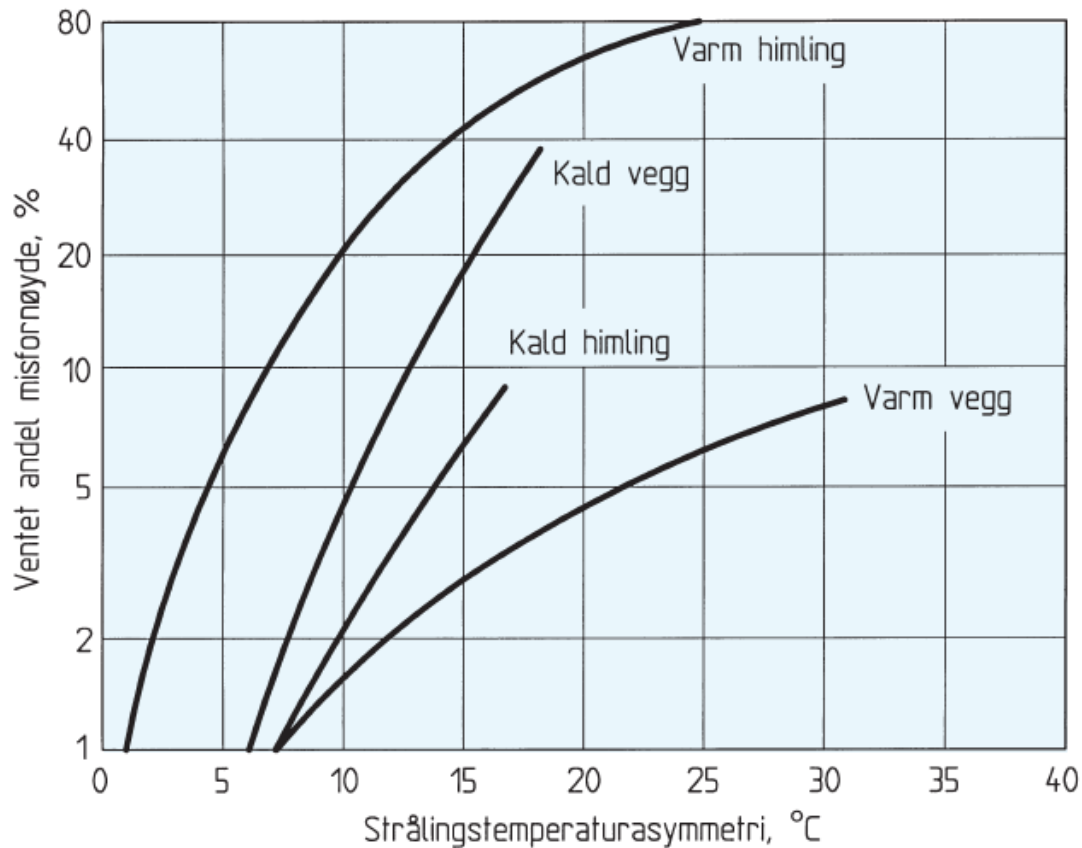
Ifølge NS-EN ISO 7730 (2006) bør DR ligge under 20 prosent i kategori B (middels) og under 10 prosent i kategori A (god).

Beregningsformelen for trekkvurdering beskrevet over er utarbeidet ut fra forsøkspersoner som utfører lett, stillesittende aktivitet med en tilnærmet nøytral kroppstemperatur og trekk registrert i nakken. For trekk på armer og bein er det mulig at modellen overestimerer ventet andel misfornøyde. Forsøkene til Toftum og Nielsen (1996a) (1996b) beskrevet i kapittel 2.2 indikerer at dagens beregningsmodell for andel misfornøyde på grunn av trekk med fordel kan modifiseres og det bør tas med flere betydningsfulle parametere som aktivitetsnivå, bekledding, tidsaspekt i forhold til utsettelse for trekk og fartsretningen.

3.3 Diskomfort som følge av asymmetrisk stråling

I dag finnes det beregningsmodell for diskomfort på grunn av asymmetrisk stråling i NS- EN ISO 7730 (2006).

Som illustrert på Figur 3.3 er personer mest sensitive for asymmetrisk stråling forårsaket av varme tak eller kalde vegger.



Figur 3.3 Prosent misfornøye som funksjon av strålingstemperatursymmetrien (Blom, 1999)

Andel misfornøye på grunn av kalde vegger/glassfasader kan kalkuleres ut i fra følgende formel i NS- EN ISO 7730 (2006):

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 \cdot \Delta t_{pr})} \quad (3.5)$$

Likningen gjelder for $\Delta t_{pr} < 15$ °C.

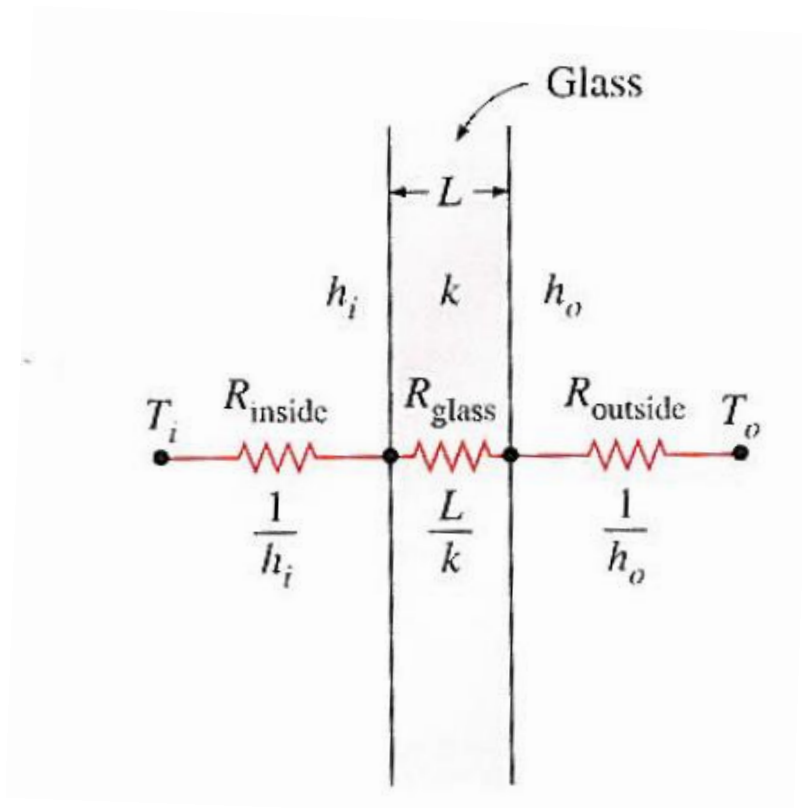
Kravet i NS-EN ISO 7730 (2006) er maksimalt 5 prosent misfornøye på grunn av asymmetrisk stråling. For asymmetrisk stråling forårsaket av kalde vegger/glassfasader betyr det at det tillates en strålingstemperatursymmetri på 10 °C.

3.4 Varmetap gjennom vinduet

U-verdien til vinduet indikerer hvor mye varme som transporteres gjennom vinduet. Generelt kan U-verdien for glasskombinasjonen beskrives som en rekke varmemotstander.

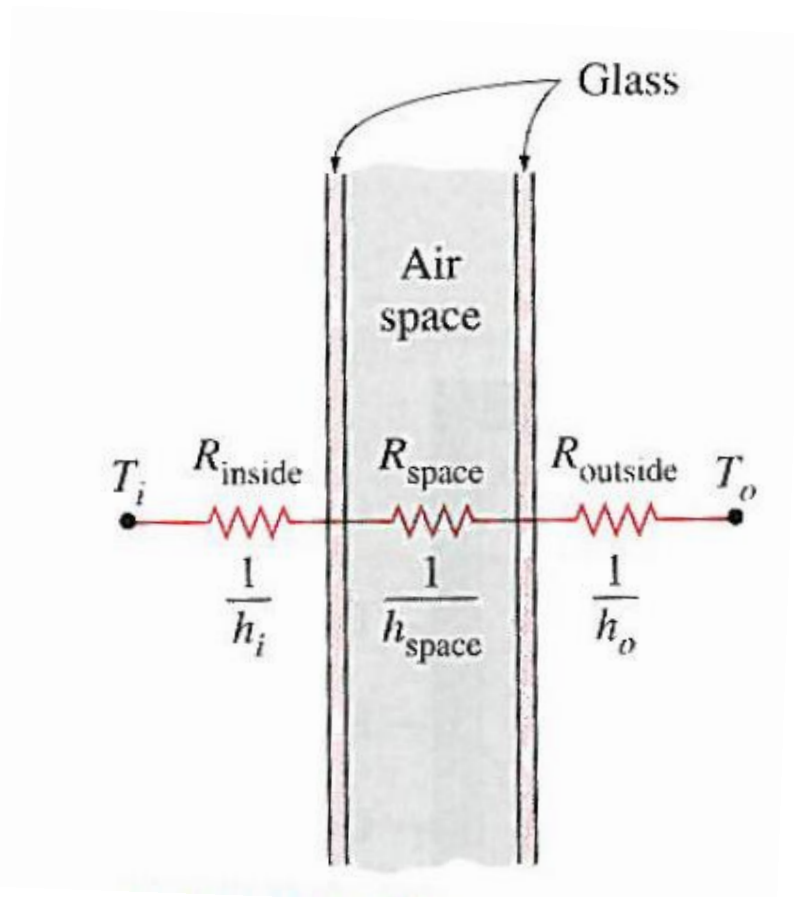
$$U_g = \frac{1}{\sum R_t} \quad (3.6)$$

Enkeltglassvindu vil kun ha varmeoverføring gjennom glasskonstruksjonen i form av konveksjon i overgangen fra glasset og romomgivelsene, konduksjon gjennom selve glasset og konveksjon i overgangen fra glasset og uteomgivelsene. En illustrasjon av motstandsterminologien for et enkeltglass kan sees i Figur 3.4.



Figur 3.4 Varmeoverføringen i et enkeltglassvindu (Çengel, 2006)

For en rutekombinasjon med flere glass vil det også foregå varmetransport i gasslommene mellom glassene (se Figur 3.5).



Figur 3.5 Varmeoverføringen i et tolagsglassvindu (Çengel, 2006)

Det er verdt å merke seg at varmeoverføringen gjennom selve glasset ikke er med i Figur 3.5. Disse motstandene kommer i tillegg til de som er med i figuren. Motstanden for mellomrommene mellom glassene består både av varmeoverføring i form av stråling og konveksjon.

Standard U-verdi for vindusglass regnes ut ved hjelp av standarden *NS-EN 673 Bygningsglass Bestemmelse av varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi) Beregningsmetode* (2011). Utregningen av U-verdien i standarden er for bestemte forhold slik at ulike glasskonstruksjoner kan bli sammenliknbare i forhold til varmetap. I standarden er det følgende forhold som skal brukes i beregningen av U-verdi: Innetemperatur 20 °C, utetemperatur 0 °C, vindhastighet 4 m/s og helningsgrad på vinduet skal være 90 grader. I virkeligheten vil U-verdien variere med disse parameterne. Kaldere klima og mer vind gir dårligere U-verdi (jf. kap. 2.4). Energy Saving International AS (ENSI AS) har utviklet et program for Glass og Fasadeforeningen der standard U-verdien for midten av glasset kan korrigeres for vindhastighet, helningsvinkel og temperaturene ute og inne. I beregningsprogrammet legges det inn glassdata som tykkelse på glass, gasstype i lagene

mellom glassene og emissivitet. Ut fra disse dataene blir en standard U-verdi regnet ut etter standarden NS-EN 673. Deretter bestemmes ute- og innetemperatur, vindhastighet og helningen på glasset og programmet regner ut en korrigert U-verdi som er justert etter klimadataene og helningen på vinduet.

For å finne den totale standard U-verdien for hele vinduskonstruksjonen inkludert karmen/rammer brukes del 1 og 2 av standarden *NS-EN ISO 10077 Termiske egenskaper til vinduer, dører og skodder Beregning av varmegjennomgangskoeffisient* (2006). Der del 1 er en oversikt over den generelle beregningen av den totale U-verdien for vinduet, mens del 2 inneholder numeriske metoder for beregning av karmene. Den totale U-verdien avhenger av alle delene av vinduet og delenes areal. Bidragene fra hver del av vinduet vektet i den totale U-verdien med hensyn til arealet. I del 1 av NS-EN ISO 10077 (2006) finner man følgende generelle formel for den totale U-verdien til vinduet:

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g \cdot + \sum A_f U_f \cdot + \sum I_g \Psi_g}{\sum A_g + \sum A_f} \quad (3.7)$$

3.4.1 Overflatetemperatur

Motstandsterminologien beskrevet i avsnittet over kan brukes til å finne overflatetemperaturen på innsiden av vinduet. Varmefluksen som går gjennom motstanden i overgangen mellom glass og rom med temperaturdifferansen mellom overflaten på glasset og rommet må være den samme varmekraften som går gjennom hele glasskombinasjonen med varmeoverføringskoeffisient U og temperaturforskjell mellom ute og rommet.

$$\frac{(t_r - t_g)}{R_i} = (t_r - t_u) \cdot U_g \quad (3.8)$$

En sortering av likning (3.8) gir et uttrykk for overflatetemperaturen til glasset, t_g , mot rommet. Overflatetemperaturen er avgjørende for beregningen av hastigheten til kaldraset (se kap. 3.5.2).

3.5 Kaldras

Kaldras er komplisert og det er laget flere beregningsformler for egenskapene til kaldras. Blant annet har hastighet, temperatur, tykkelse og luftmengde blitt undersøkt. For den termiske komforten er det i hovedsak hastighet og temperatur på luftstrømmen forårsaket av

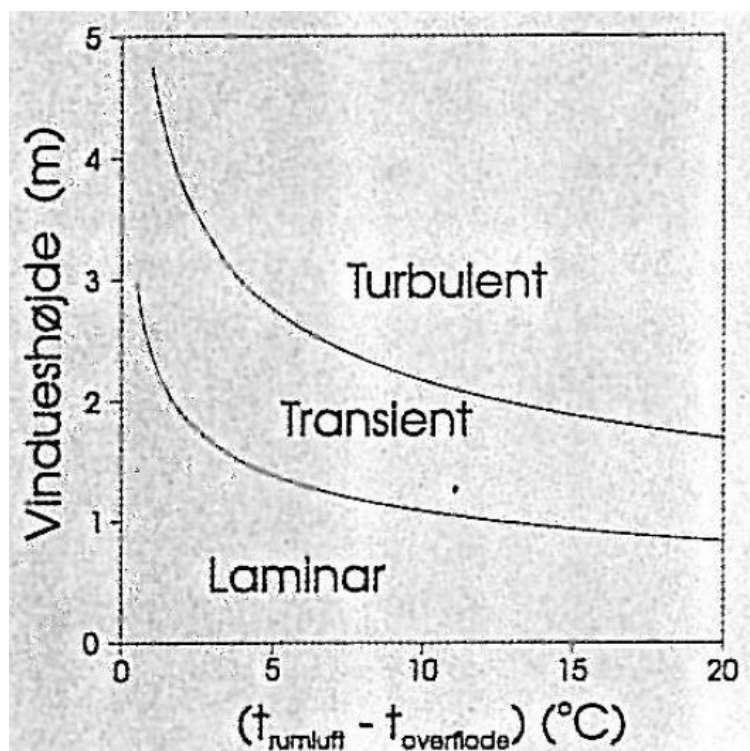
kaldras som er interessant. Disse parameterne får derfor en sentral rolle i denne oppgaven. I tillegg skal formelen for tykkelse evalueres. Formelverk og sammenlikninger for andre egenskaper som bevegelsesmengde og luftmengde kan leses i prosjektoppgaven ”Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring” fra NTNU. (Johnsrud, 2012). Et litteratursøk ga ingen resultater på formelverk for kaldrasets egenskaper tilpasset dagens passivhusstandard.

3.5.1 Overgangen fra laminær til turbulent strømning

En naturlig konveksjonsstrømning vil alltid starte laminær og etter hvert gå over til fullstendig turbulent via en overgangsfase der strømmingen både er laminær og turbulent. Grashofstallet (Gr) bestemmer overgangen mellom laminær og turbulent strømning. I følge Skåret (2000) begynner strømmingen og opptre turbulent ved $Gr \approx 10^9$. Heiselberg beskriver strømmingen som laminær dersom $Gr < 2 \cdot 10^9$ og fullt utviklet turbulent ved et Grashofstall større enn $1-1,6 \cdot 10^{10}$. Med et Grashofstall mellom disse verdiene vil strømmingen i følge Heiselberg (1994b) være i en overgangsfase mellom laminær og turbulent. Formelen for Grashofstall er som følger:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T_f y^3}{\nu^2} \quad (3.9)$$

En illustrasjon av strømmingstype som funksjon av temperaturforskjellen mellom vinduets overflate og romlufta og vinduets høyde laget av Heiselberg (1994b) kan leses i Figur 3.6.



Figur 3.6 Strømmingstype som funksjon av temperaturforskjellen mellom vinduet og romlufta samt høyden på vinduet (Heiselberg, 1994b)

3.5.2 Hastighet

Hastighet er en avgjørende faktor for termisk diskomfort forårsaket av trekk. Skåret, Heiselberg og Nielsen har presentert formelverk for hastigheter på luftstrømmer fra kaldras. Enkelte av hastighetsmodellene har ulike formler for laminær og turbulent strømning.

Skåret har utviklet hastighetsformler ut fra de elementære likningene om bevegelse, energi og varmebalanse. Utledningen av likningene kan leses i litteraturen til Skåret (2000). Formlene til Skåret har en del forutsetninger for beregningene.

- Friksjon skjer mellom kontaktflaten og den lufta som oppdriftskreftene setter i bevegelse.
- I formelverket er det satt inn verdier for viskositeten ν ved cirka 20 °C til $15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Flaten forutsettes å ha ensartet temperatur.
- Det antas konstant temperatur i lufta utenfor grensesjiktet.

For en laminær luftstrøm gjelder følgende hastighetsformel for maksimal hastighet presentert av Skåret (2000):

$$U_{maks} = 0,59 \cdot (g\beta\Delta T_f y)^{0,5} \quad (3.10)$$

For maksimal hastighet for en turbulent luftstrøm langs vinduet presenterer Skåret (2000) følgende formel:

$$U_{maks} = 0,53 \cdot (g\beta\Delta T_f y_t)^{0,5} \quad (3.11)$$

Selv om det forutsettes ensartet temperatur på vindusglasset vil det i følge Skåret (2000) gi tilfredsstillende resultat og bruke middelveiditemperaturen på vinduet.

Koordinaten til der hastigheten ønskes vurdert skal beregnes ut fra omslaget fra laminær til turbulent når turbulent strømning skal beregnes. Delen av vinduet der det er turbulent strømning, y_t , kan finnes ved hjelp av følgende formel presentert av Skåret (2000):

$$y_t = y - y_{pt} = y - y_l \cdot \left(1 - \frac{0,144}{(g\beta\Delta T_f)^{0,21} y_l^{0,64}}\right) \quad (3.12)$$

Betegnelsen y_{pt} er det punktet der den turbulente strømningen starter, mens y_l er lengden på den laminære delen av grensesjiktet som regnes ut ved hjelp av Grashofstall. Skåret har tatt

hensyn til at det vil være en overgangsfase mellom turbulent og laminær og derfor er ikke y_l direkte lik y_{pt} .

I Danvak, det danske faglige nettverket for inneklimateknikk, komfort og energi, sin grunnbok om varme- og klimateknikk presenterer Nielsen (1997) følgende formel for hastighet til turbulente luftstrøm langs vinduet:

$$U_{maks} = 0,07 \cdot (\Delta T_f y)^{0,5} \quad (3.13)$$

Dersom det ikke settes inn tiltak for å begrense eller fjerne kaldras vil luftstrømmen langs vinduet trekkes ut i rommets oppholdssone. Både Skåret (2000) og Heiselberg (1994a) presenterer formelverk for denne luftstrømmen.

Heiselberg har på bakgrunn av forsøk i laboratorium kommet fram til empiriske formler for luftstrømmen til kaldraset i oppholdssonen med avstanden fra vinduet som en av variablene. Forsøket til Heiselberg ble gjort med glassflater helt ned til gulvet og tomt rom. Formelverket som presenteres her gjelder derfor i utgangspunktet kun for tilfeller der rommet er umøblert og glassflaten går helt ned til gulvet. Undersøkelser gjort av Rueegg et al. (2001) viser at Heiselbergs formelverk allikevel kan tilnærmes i tilfeller der det er en karm som går helt ned til gulvet under vinduet og målepunktet for luftstrømhastigheten gjøres 1 meter fra vinduet. Målinger gjort av Rueegg et al. (2001) viser god overenstemmelse med hastighetsformelen til Heiselberg dersom den relevante høyden som puttes inn i formelen er vindushøyden pluss karmhøyden. Sammenlikningen gjelder kun for et testet tilfelle og det er usikkert om det kan videreføres til andre oppsetninger med annen form. Hastighetsformlene til Heiselberg (1994a) der avstanden fra vinduet er en av variablene er som følger:

$$U_{maks}(x) = 0,055 \cdot (h\Delta T_f)^{0,5} \cdot x \quad (3.14)$$

Likning (3.14) gjelder for $x < 0,4$ m

$$U_{maks}(x) = 0,095 \cdot \frac{(h\Delta T_f)^{0,5}}{x + 1,32} \quad (3.15)$$

Likning (3.15) gjelder for $0,4 \leq x \leq 2$ m

$$U_{maks} = 0,028 \cdot (h\Delta T_f)^{0,5} \quad (3.16)$$

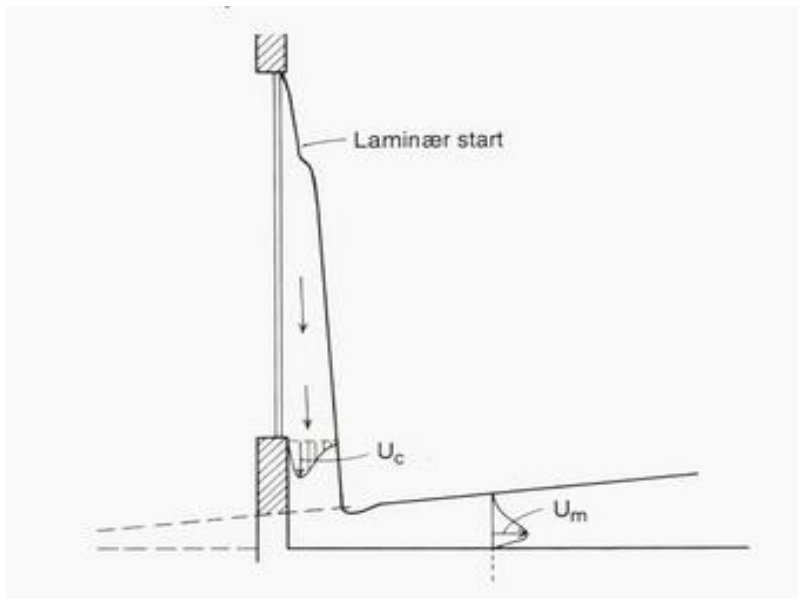
Likning (3.16) gjelder for $x > 2$ m

H. Manz og T. Frank (2003) har gjort en evaluering av formelverket til Heiselberg med en CFD (Computational Fluid Dynamics) simulering. Det ble simulert forsøk med k- ϵ modellen for ulike varmebelastninger, med og uten møblering og tre ulike overflatetemperaturer på vinduet. Forsøket viser at møblering og varmebelastning gir høyere simulerte hastigheter enn ved Heiselbergs formelverk. På bakgrunn av funnene i de simulerte forsøkene mener Manz og Frank (2003) at Heiselbergs formelverk bør justeres med å gange formlene med en faktor på 1,5 dersom rommet er møblert eller har betydningsfull varmebelastning. Selv om det er påvist svakheter i Heiselbergs modell for luftstrømhastighet til kaldras i oppholdssonen er det fortsatt et anerkjent formelverk som blir referert til i flere andre publikasjoner som omhandler samme tema.

Basert på arbeidet til Lilja (1966) og Shillinglaw (1977) presenterer Skåret (2000) likninger der avstanden fra den kalde flaten er tatt med i luftstrømhastighetsberegningene til kaldraset ut i oppholdssonen. Dersom det ikke er noen hindring som bøyer av luftstrømmen vil luftstrømmen først bøyes nede nær gulvet uavhengig om vinduet går helt ned til gulvet eller ikke. Ved en slik avbøying vil luftstrålen bli en planstråle og hastigheten til den horisontale luftstrømmen blir som følger:

$$U_{maks} = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{x}{\delta} + 6,7}} \cdot U_c \quad (3.17)$$

For et vindu som ikke går helt ned til gulvet vil hastigheten ved avbøyningen, U_c , likevel være den maksimale hastigheten nederst på vinduet fordi luftstrålen ikke akselerer etter å ha sluppet den kalde flaten (se Figur 3.7).

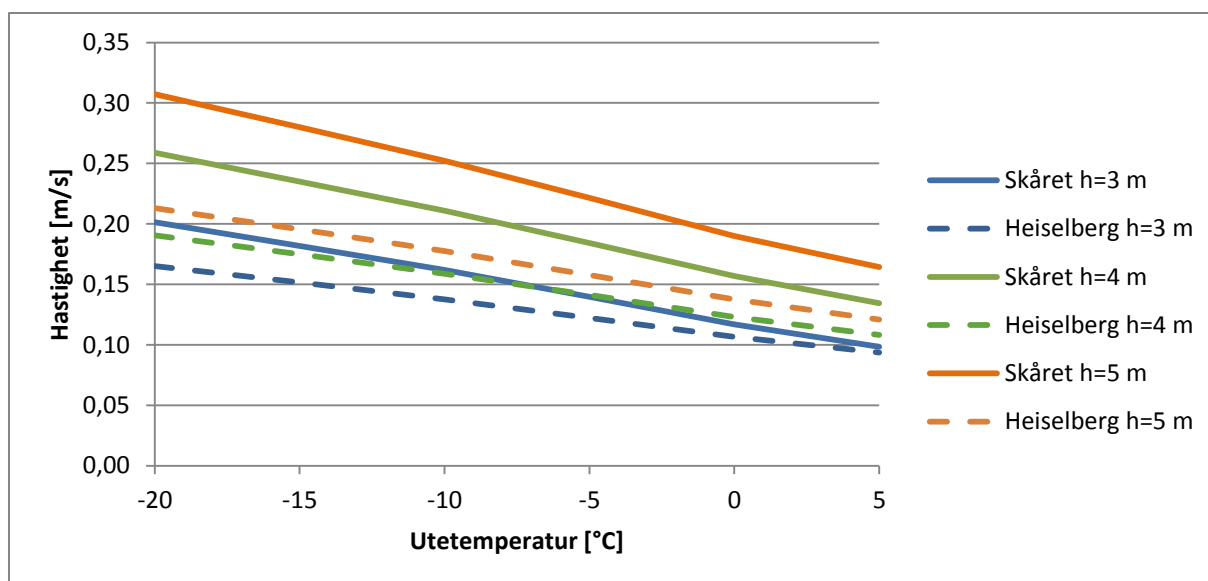


Figur 3.7 Eksempel på når likning (3.17) kan brukes (Skåret, 2000)

Dersom det er en vinduskarm eller annen hindring tilknytning til vinduet vil kaldraset bli bøyd av her og hastighetsformelen blir noe annerledes.

$$U_{maks} = 2,1 \cdot \sqrt{\frac{1}{\frac{x}{\delta} + 6,7}} \cdot U_c \quad (3.18)$$

I prosjektoppgaven *”Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring”* (Johnsrud, 2012) ble det gjort en sammenlikning av hastighetsformlene for luftstrømmen fra kaldraset som entret oppholdssonen. I Figur 3.8 illustreres en sammenlikning av formel (3.15) og (3.17) for et godt isolert trelagsglassvindu med standard U-verdi midt på glasset på $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ og en avstand fra vindu på 0,6 meter. Sammenlikningen illustrerer forskjellene ved formelverkene for ulike utetemperaturer og vindushøyder. Flere sammenlikner kan leses i prosjektoppgaven *”Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring”* fra NTNU (Johnsrud, 2012).



Figur 3.8 Sammenlikning av hastighetsformlene (3.15) (Heiselberg) og (3.17) (Skåret) for et trelagsglassvindu

Det er verdt å merke seg at formlene spriker mer fra hverandre etter hvert som vindushøyden øker og utetemperaturen synker.

3.5.3 Temperatur

Beregninger av overflatetemperatur er presentert i kapittel 3.4. I dette kapittelet skal formelverk for temperaturen på luftstrømmen presenteres. Temperaturen på luftstrømmen er som kjent en avgjørende faktor for opplevelsen av trekk (jf. kap. 3.2).

Heiselberg (1994a) presenterer følgende formel for å beregne temperaturen til luftstrømmen fra kaldraset som går ut i rommet:

$$t_{a,l} = t_r - (0,3 - 0,034x) \cdot \Delta T_f \quad (3.19)$$

Denne formelen ble utviklet i samme forsøk som hastighetsformlene beskrevet i kapittel 3.5.2 og følger de samme betingelsene.

Skåret bruker varmeeffekten overført i form av konveksjon fra luftstrømmen og beregninger av volumstrømmen for å finne omtrentlig temperatur på luftstrømmen langs vinduet.

$$Q = C_p \rho q_v \Delta T \quad (3.20)$$

I denne likningen er ΔT forskjellen i temperatur på luftstrømmen og romlufttemperaturen. Volumstrømmen regnes ut fra Skårets formelverk med de samme forutsetningene som er nevnt tidligere i kapittelet. For en laminær strømning er formelen som følger:

$$q_v = 0,007 \cdot (g\beta\Delta T_f y^3)^{1/4} \quad (3.21)$$

Volumstrømmen for en turbulent strømning beregnes i følge Skåret (2000) ut fra denne formelen:

$$q_v = 0,0116 \cdot (g\beta\Delta T_f)^{0,4} y_t^{1,2} \quad (3.22)$$

Ved overslagsberegninger kan det konvektive varmeovergangstallet i følge Skåret (2000) settes til 2,5 W/m²K. I den norske standarden NS 673 omtalt i kapittel 3.4 er den konvektive delen av indre varmeovergangstallet 3,6 W/m²K for et vindu med standard emissivitet på 0,837. De forskjellige verdiene vil kunne gi utslag i beregningen av temperaturen. Fremgangsmåten er uavhengig av valg av verdien på den konvektive andelen av det indre varmeovergangstallet. Temperaturforskjellen mellom rom- og overflatetemperaturen og arealet på vinduet kan brukes til å beregne varmeeffekten overført gjennom konveksjon. Videre er det mulig å slå opp verdier for konstantene varmekapasiteten C_p , og tettheten ρ til luft i litteratur. Ved 20 °C er tettheten til luft 1,204 kg/m³, mens C_p er 1,005 kJ/kgK (Incropera, et al., 2007). Utfra dette kan temperaturen på luftstrømmen i kaldraset løses ut i likning (3.20). Luftstrømtemperaturen vil være den eneste ukjente parameteren i likning (3.20) som da kan skrives som:

$$t_{a,l} = t_r - \frac{Q}{C_p \rho q_v}$$

3.5.4 Tykkelse

Kaldraset har tykkelse null på toppen av vinduet og vil vokse i tykkelse lengre ned på vindusflaten på grunn av omblendingen med romluft (Stampe, 2000).

Skåret (2000) har utviklet følgende formler for tykkelsen til strømningen i grensesjiktet:

Laminær strømning:

$$\delta = \frac{0,0209}{(g\beta\Delta T_f)^{1/4}} y^{1/4} \quad (3.23)$$

Turbulent strømning:

$$\delta = 0,081 \cdot (g\beta\Delta T_f)^{-0,1} y_t^{0,7} \quad (3.24)$$

I Danvaks bok om ventilasjonsteknikk presenterer Stampe (2000) følgende formel for tykkelse til turbulent kaldrasstrømning:

$$\delta = 0,1 \cdot |\Delta T_f|^{0,1} y^{0,7} \quad (3.25)$$

Enheten for tykkelsen δ , er meter.

3.6 Asymmetrisk stråling

For å forklare strålingsasymmetri må strålingstemperatur forstås. Byggforskbladet 421.501 *Temperaturforhold og lufthastighet- Betingelser for termisk komfort* definerer plan strålingstemperatur på følgende måte: ”Plan strålingstemperatur t_{pr} er den ensartede temperaturen på omgivende flater, som medfører samme bestråling av den ene siden av en plan flate som de faktiske overflatetemperaturene” (Blom, 1999). Strålingstemperaturasymmetrien har betegnelsen Δt_{pr} og omtales av Hanssen (2007a) som ”forskjellen mellom plan strålingstemperatur på to motstående sider av en liten plan flate”. Middelstrålingstemperaturen kan beskrive strålingsutvekslingen mellom en person og et roms overflater og regnes ut på samme måte som den plane strålingstemperaturen.

De fleste bygningsmaterialer har høyt emisjonstall på flater inn mot rommet. Derfor kan man gjøre en forenkling og se bort fra refleksjon. Følgelig kan den plane strålingstemperaturen regnes ut fra formelen beskrevet av Olesen (1997):

$$t_{pr} = t_1 F_{p-1} + t_2 F_{p-2} + \dots + t_n F_{p-n} \quad (3.26)$$

Strålingsasymmetrien er strålingstemperaturasymmetrien gitt ved formelen:

$$\Delta t_{pr} = t_{pr1} - t_{pr2} \quad (3.27)$$

Strålingsasymmetrien i rom kan måles i stede for å regnes ut. Det kan skje på to ulike måter. Den ene metoden er utviklet av McIntyre og kalles vektorstrålingstemperatur. Vektorstrålingstemperaturen er lik den maksimale strålingstemperaturasymmetrien som oppstår når orienteringen av et plateelement varierer (Fanger, et al., 1985).

Den andre metoden er utviklet av Fanger og er bakgrunn for de krav som i dag finnes i NS-EN ISO 7730. Strålingstemperatrasymmetrien måles med denne metoden ved at det plasseres en føler omtrent der sentrum av personen ville vært dersom personen sitter eller står. For en sittende person regnes 0,6 meter over gulvet, mens for en stående 1,1 meter over gulvet. I tillegg plasseres sensoren loddrett eller vannrett og parallelt med kilden til asymmetrien, for eksempel et kaldt vindu. Sensoren vil måle strålingstemperaturen på begge sider av føleren. Differansen mellom de målte temperaturene er strålingstemperatrasymmetrien. (Gunnarsen, 2003) (Fanger, 1997) (Blom, 1999)

3.6.1 Formfaktor og vinkelforhold

Den plane strålingstemperaturen avhenger av vinkelforholdet mellom det plane elementet og omgivende flater (Olesen, 1997). Vinkelforholdet kan leses av figur dersom formfaktorene mellom flatene er kjente. Formfaktorene er forholdet mellom flatens sider og avstanden til punktet man ønsker å se på. Summen av vinkelforholdene er alltid lik 1. Vinkelforholdet mellom flater og en person i rommet vil avhenge av flatenes og rommets geometri samt hvor i rommet personen befinner seg. Dersom figurer ikke er tilgjengelig for det tilfelle som ønskes undersøkt kan vinkelforholdet regnes ut med den generelle likningen for strålingsintensitet.

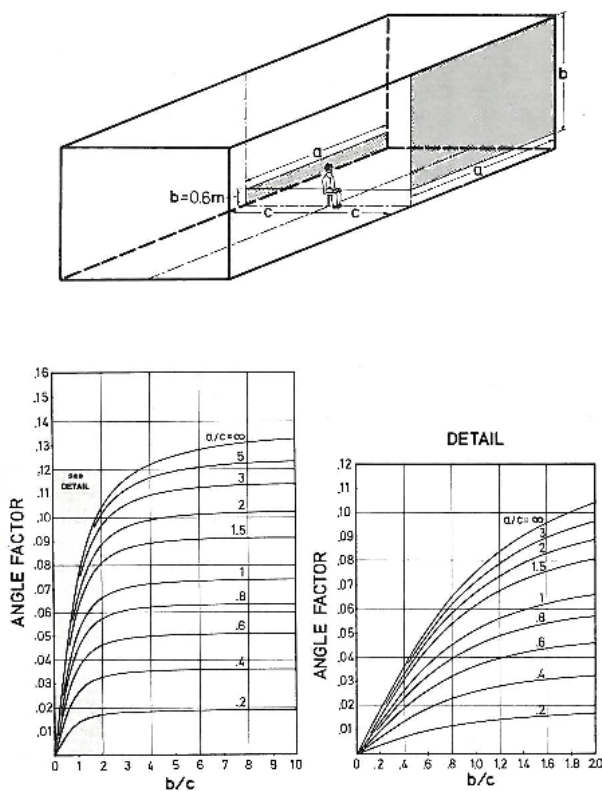
$$dq_{i \rightarrow j} = I_{e+r,i} \cos \theta_i dA_i d\omega_{j-i} \quad (3.28)$$

Her er $I_{e+r,i}$ strålingsintensiteten som forlater flate i i form av stråling og refleksjon, $d\omega_{j-i}$ er vinkelen fra sentrumspunktet i dA_i mot flaten dA_j sett fra dA_j og θ_i er vinkelen mellom normalen fra flate i og retningen fra midt punktet i flate i mot midtpunktet i flate j . Med videre utledning, som kan leses i litteraturen til Incropera et al. (2007), kommer man frem til følgende likning for vinkelforholdet:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (3.29)$$

P.O. Fanger utviklet i sin doktorgrad grafer som kan brukes til å finne vinkelforholdet mellom personer og rektangulære flater ut fra kjente formfaktorer (Fanger, 1970). Figurene i litteraturen hans er basert på eksperimentelle forsøk. Testingen ble gjort på begge kjønn og med ulik påkledning, men disse faktorene ga lite utslag på resultatet slik at figurene fra eksperimentet kan brukes uavhengig av kjønn og påkledning. Figurene utviklet av Fanger gjelder for rektangulære flater der normalen fra et av hjørnene går gjennom personens sentrum. Ønsker man en annen lokalitet kan det ønskede vinkelforholdet finnes med

algebraeregninger. Det finnes figurer for situasjoner der personer sitter eller står i rommet. Hvis retningen på personen er ukjent eller personen roterer mye finnes det egne figurer for dette der gjennomsnittverdi for vinkelforholdet brukes. Arealet på flaten og dens orientering i forhold til persons retning i rommet er avgjørende for vinkelforholdet. Det er fordi vinkelforholdet bygger på kroppens areal i forhold til mottakelse av stråling. Et eksempel på hvordan figurene og grafene til Fanger ser ut og kan anvendes kan sees i Figur 3.9. For de andre tilfellene nevnt over brukes andre liknende figurer.



Figur 3.9 Et eksempel på figurene til Fanger som brukes til å finne vinkelfaktorer mellom flater og person i rom

4 Gjennomføring av feltmålinger

Gjennom en feltmåling er det ofte varierende og ukontrollerte forhold som vil påvirker målingene. Feltemålingene kan vise hvordan det er ved akkurat de forholdene som testene blir gjennomført ved. I forbindelse analyse a ble det gjort feltemålinger på et vindu i et kontorbygg i Oslo. Resultatet av målingene kan leses i kapittel 7.1.

4.1 Lokalisasjon

Vinduet målingene ble gjennomført på befinner seg på nordsiden i 16. etasje på et kontorbygg i Bjørvika i Oslo Bygningen er en del av *Barcoderekka* og ble ferdigstilt i 2010. Lokalet hadde ingen leietakere da målingene ble gjennomført og lokalet var derfor helt umøblert. Termostaten ble skrudd ned slik at radiatorene var av under målingene. Andre tekniske systemer ble kjørt som normalt.

4.2 Vinduets egenskaper

Målingene ble gjennomført på et vindusglass med bredde på 1,1 meter og høyde på 2,36 meter. Det er ingen vinduskarm under vinduet. Standard U-verdien på vinduet er $1,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ og konstruksjonen består av tolags energiglass med solavskjermingsglass type S1 fra Pilkington med lystransmisjon på 70 prosent og direkte solvarmetransmisjon på 40 prosent. I tillegg gir glasskombinasjonen beskyttelse mot vandalisme og er sikkerhetsglass av klasse P2A. Kammer, rammer, rister og glasslister er i aluminium, ferdig overflatebehandlet fra fabrikk.



Figur 4.1 Bilde av vinduet feltmålingene ble utført på

4.3 Klima

På målingsdagen den 28.01.13 var utetemperaturen cirka 3 °C, lite vind og overskyet med noe solgløtt på ettermiddagen.

4.4 Måleutstyr

I dette kapitlet følger en beskrivelse av måleinstrumentene som ble brukt ved de ulike målingene.

4.4.1 VelociCalc

I denne målingsprosessen ble det benyttet en TSI VelociCalc Multi-Function Ventilation Meter Modell 9565, se Figur 4.2. Denne kan måle flere aspekter ved en luftstrøm med ulike prober. For feltmålingene ble instrumentet benyttet til å måle retningsbestemt hastighet og temperatur på luftstrømmen langs vinduet og langs gulvet ut i rommet. I følge manualen til instrumentet har måleinstrumentet en nøyaktighet på $\pm 0,015$ m/s ved hastigheter målt mellom 0,15 m/s og 50 m/s og $\pm 0,3$ °C ved temperaturmåling (TSI, 2013).



Figur 4.2 TSI VelociCalc Multi-Function Ventilation Meter (TSI, 2013)

4.4.2 Termoanemometer

I gjennomføringen av feltmålingene ble det benyttet et termoanemometer fra Ahlborn med modellnavnet FV A605 TA, se Figur 4.3. Et termoanemometer er velegnet til å måle små lufthastigheter uavhengig av retning på luftstrømmen. Den er derfor hensiktsmessig å bruke for måling av trekk. Dette instrumentet ble i feltmålingen brukt til å måle luftbevegelse i rommet i nær vinduet. Instrumentet har i følge databladet en feilmargin på $\pm 0,5$ prosent (Direct industry, 2013).



Figur 4.3 Ahlborn Thermoelectric Flow Sensor FV A605 TA (Direct industry, 2013)

4.4.3 Datalogger

For å registrere overflatetemperatur kobles temperaturfølerne til en datalogger. I denne feltmålingen ble det benyttet dataloggere fra KIMO instruments med modellnummer Kistoch KT210, se Figur 4.4. Loggeren konfigureres via et dataprogram hvor man kan velge hvordan og hvilke parametere som skal logges. Loggeren har fire innganger og kan dermed logge fire

ulike målepunkter samtidig. I følge databladet har dataloggeren en nøyaktighet på $\pm 0,5$ °C ved temperaturlogging.



Figur 4.4 Kimo datalogger KT210 (Kimo Instruments)

4.5 Målingene

I dette delkapittelet følger forklaringer på hvordan de ulike målingene ble gjennomført.

4.5.1 Overflatetemperatur

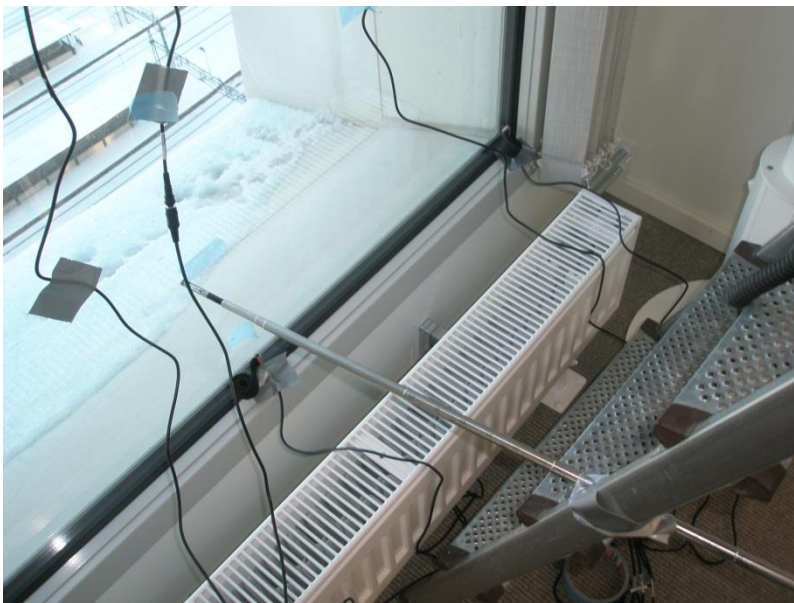
Det ble festet 8 temperaturfølere for å måle overflatetemperaturen på vinduet, to stykker langt opp på vinduet, tre i midten og tre nederst (se Figur 4.5 og Vedlegg 1). Overflatetemperaturene ble logget store deler av måledagen med loggeutstyr beskrevet i kapittel 4.4.3.



Figur 4.5 Markerte målepunkter for måling av overflatetemperatur

4.5.2 Lufthastighet og lufttemperatur langs vinduet

Lufthastighetsmålingene langs vindusglasset hadde langt flere målepunkter enn overflatetemperaturmålingene. Det er mange målepunkter på midten av vinduet for kunne se om hastighetene varierer med hensyn på hvor høyt man måler på vinduet. Ved enkelte høyder er det flere målepunkter i vinduets bredde for å se om det er hastighetsvariasjoner i luftstrømmen avhengig av plassering på vinduets bredde. En illustrasjon av målepunktene kan ses i Vedlegg 1. Temperaturen til luftstrømmen ble samtidig registrert av det samme instrumentet. For å stabilisere måleinstrumentet under målingene ble måleproben festet i en gardintrapp (se Figur 4.6). Hastigheten og temperaturen til luftstrømmen ble i hvert målepunkt logget hvert sekund i 3 minutter. Testmålinger viste at dersom sensoren ble justert litt ut fra glassflaten sank hastigheten. Derfor ble det ikke logget hastigheter i andre posisjoner enn helt inn til glasset.



Figur 4.6 Festing av måleproben under hastighetsmålinger langs vinduet

4.5.3 Lufthastighet i rommet

For å finne luftstrømmen fra kaldraset inn i rommet ble det festet en retningsavhengig hastighetsføler til et notestativ. Det ble benyttet samme instrument som for hastighetsregistreringen langs vinduet. Det ble gjennomført målinger 0,3 meter fra vinduet og 0,1 meter over bakken. Å plassere føleren 0,3 meter fra er utenfor den definerte oppholdssonen, men å måle dette punktet vil gi en indikasjon på om det er kritisk å sitte nærmere vinduet enn den definerte oppholdssoneavstanden på 0,6 meter. Å ha sensoren 0,1

meter over bakken samsvarer med den definerte oppholdssonen. På grunn av resultatene som kan lese i kapittel 7.1.2 ble det ikke gjort videre målinger lengre unna vinduet.

En generell måling av luftbevegelse ble også foretatt med et måleinstrument som måler lufthastighet uavhengig av retning (se kapittel 4.4.2). Den ble plassert på samme målepunkt som ved den retningsbestemte hastighetsmålingene. Små luftbevegelser gjorde at det ikke ble testet flere målepunkter.

4.5.4 Romtemperatur

En temperatursensor ble koblet til en datalogger og plassert i rommet et stykke unna vinduet. Temperaturen ble logget over en tid på 20 minutter på ettermiddagen.



Figur 4.7 Måling av romtemperatur

4.5.5 Turbulens

Det ble under feltmålingene gjort forsøk for å se på turbulens i luftstrømmen lang vinduet. Til dette ble det brukt røykampuller. Gjennom røykgasstilsetning var det ønskelig å finne ut når luftstrømmen skiftet fra laminær til turbulent langs vinduet. Luft ble blåst ut like nær vinduets glassoverflate og ble observert (se Figur 4.8). Tolkningen av røykskyene kan leses i kapittel 7.1.3.



Figur 4.8 Turbulensmålinger med røykammer

5 Gjennomføring av laboratoriemålinger

I dette kapitlet skal det forklares hvordan målingene i laboratoriet ble gjennomført. Det er flere parametere som lettere kan styres og kontrolleres i et laboratorieforsøk. Fordelen med dette er at det da kan være enklere å peke på de avgjørende faktorene for dannelse av kaldras. Resultatene fra målingene kan leses i kapittel 7.2. I forbindelse med laboratorieforsøket ble det utarbeidet en risikoanalyse med fokus på helse, miljø og sikkerhet. Utdrag fra rapporten kan leses i Vedlegg 4.

5.1 Lokalisasjon

Målingen ble gjennomført på inneklimalaboratoriet på NTNU i Trondheim. Rommet er lite med en bredde på 2,3 meter og en dybde på 4 meter. Det er ingen møbler eller kaldrassikring i rommet. Dagslys kommer ikke inn i rommet, da rommets vindu er ut mot det avgrensede klimarommet der utetemperaturer kan simuleres.

5.2 Vinduet egenskaper

Et nytt vindu produsert av NorDan AS monteres i laboratoriet i forbindelse med forsøket. vindusglasset har bredde 0,97 meter og høyde 2,66 meter. Rutekombinasjonen består av trelagsglass der to av glassene har energibelegg på innsiden av glassene mot gassfyllingen. Lommene mellom glassene er fylt med argongass. Vinduet har en gjennomsnittlig total standard U-verdi på $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$. Lystransmisjonen er på 56 prosent og direkte solvarmetransmisjon på 36 prosent. De sidene av glasskonstruksjonen som har energibelegg har emissivitet på 0,01, de øvrige glassflatene uten belegg har emissivitet på 0,837. Med disse vindusegenskapene kan glassrutas standard U-verdi beregnes til $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Karmene er overflatebehandlet med hvit maling både utvendig og innvendig. Dybden på karmen nederst på vinduet er 4,5 centimeter. For å minske kuldebroen i overgangen mellom glass og karm er vinduet konstruert med en TGI-spacer bestående av rustfritt stål kombinert med polypropylenplast som gir gode isoleringsegenskaper. Kuldebroverdien til overgangen mellom karm og glass er i følge produsenten NorDan AS lik 0,038. En ekstra karmlist i overgangen mellom vegg og vinduskarm ble montert i testrommet.

5.3 Klima

På baksiden av vegg der vinduet er montert finnes et klimarom. I dette rommet kan temperaturen justeres ned til $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Ulike uteklimaer kan dermed simuleres og det kan testes

hvordan dette påvirker kaldras. Forsøkene i denne oppgaven ble gjennomført ved simulert utetemperatur på 19-20 minusgrader.

5.4 Måleutstyr

I dette kapittelet presenteres måleutstyret brukt i laboratorieforsøkene.

5.4.1 Air Velocity Transducer

Hastigheten til luftstrømmen måles med en Air Velocity Transducer fra TSI. Denne hastighetsmåler har ingen leserdisplay og for å følge med på målingene blir transduceren koblet videre inn på loggeren omtalt i kapittel 5.4.3. Ønskede innstillinger kan stilles inn ved å skru opp lokket og bruke knappene inne i transduceren. Til målingene i denne oppgaven ble spenningen satt til en variasjonsbredde på 0-5 V og hastigheten ble stilt inn til en variasjonsbredde på 0-0,5 m/s. Måleinstrumentet har en nøyaktighet på ± 3 prosent ved avlesning og en feilprosent på ± 1 prosent ved innstilling av fullskala variasjonsbredde. Måleinstrumentet registrerer hastigheten uavhengig av luftstrømmens inngangsretning på hastighetssensoren (TSI, 2013).



Figur 5.1 TSI Velocity Transducer Model 8475 (TSI, 2013)

5.4.2 Termoelement

Et termoelement består av to ulike metaller som loddet sammen i endene. Det skapes da et spenningspotensial, basert på Seebeck-effekten, som kan lage spenning dersom det er temperaturforskjell i de to endene. I loggeren er det en temperaturstabil referansespenning som gjør at spenningen målt i målepunktet kan omgjøres til temperatur. Det finnes flere type termoelementer avhengig av hvilke temperaturområde man ønsker å måle. I dette forsøket ble det benyttet termoelementer av type T som har en temperaturrekkevidde på $-200\text{ °C} - +350\text{ °C}$ og en feilmargin på 0,75 prosent.

5.4.3 Logger

I forsøket ble det benyttet to loggere av type Fluke Hydra 2635A/C. Denne kan konfigureres og det logges etter ønsket tidsintervall. Loggerne har en nøyaktighet på $\pm 0,39$ °C ved logging av temperaturer og en nøyaktighet på $\pm 0,018$ prosent ved hastighetslogging (Fluke Calibration, 2013).



Figur 5.2 Fluke Hydra 2635A/C logger (Fluke Calibration, 2013)

5.4.4 Indoor Climate Analyzer

Til måling av asymmetrisk stråling ble det brukt et Indoor Climate Analyzer instrument fra Brüel & Kjær med modellnummeret 1213 (se Figur 5.3). Måleproben har to identiske sider hvor strålingstemperaturen blir målt på hver av sidene. Hver av de to sidene på proben består av et reflekterende gullbelegget element og et svartmalt element av samme størrelse. Begge elementene er koblet til senter midt i proben via termosøyler. Når den blir enten avkjølt eller varmet opp av miljøet rundt vil gullbelegget ta i mot eller tape varme i form av konveksjon, mens den svarte overflaten vil ta i mot eller tape varme både i form av konveksjon og stråling. Fordi begge elementoverflatene har omtrentlig samme temperatur blir den resulterende spenningsforskjellen produsert over termosøylen en funksjon av varmen transportert via stråling. Den plane strålingstemperaturen beregnes ut fra den målte spenningen og temperaturen inne i senteret av proben. Strålingsasymmetrien er således differansen mellom de to målte plane strålingstemperaturene. Instrumentet settes slik at flaten til proben står parallelt med flaten som det ønskes å undersøke strålingspåvirkningen fra. Strålingstemperaturmålinger er mulig med dette instrumentet dersom det er ± 50 °C i rommet. Ved en differanse mellom plane strålingstemperatur og romtemperatur på ± 15 °C har instrumentet en målenøyaktighet på omtrent $\pm 0,5$ °C. Hvis denne temperaturdifferansen øker utover ± 15 °C vil unøyaktigheten på målingene stige lineært med differansen mellom den plane strålingstemperaturen og romtemperaturen. I tillegg kan instrumentet måle andre

faktorer som lufttemperatur og hastighet, overflatetemperatur og fuktighet hvis det tilkobles andre prober. (Brüel & Kjær, 1980)



Figur 5.3 Avlesningsenheten til høyre og måleproben til venstre, brukes til måling av asymmetrisk stråling (National University of Singapore, u.d.), (LumaSense Technologies, 2013)

5.5 Målingene

Flere målinger ved samme klimatiske forhold ble gjort i laboratorieforsøket for å få god informasjon om kaldraset nedover vindusflaten og ut i rommet samt asymmetrisk stråling. I dette kapittelet presenteres hvordan måleutstyret monteres og plasseres ved målingene. Målingene bestod av 30 registreringer i hver måling. Det ble logget hvert tiende sekund i fem minutter.

5.5.1 Overflatetemperatur og romtemperatur

Overflatetemperaturen på vinduet ble målt ved å teipe termoelementer direkte på vinduet. Det ble testet overflatetemperaturer midt på vinduet og i kanten ved ulike høyder. En illustrasjon av målepunktene kan leses i Vedlegg 2. Det ble også gjennomført billedtaking av vinduet med et termograferingskamera for å illustrere hvor på vinduet varmetapet er størst og dernest lavest overflatetemperatur. Bildene ble også brukt til å verifisere målingene med overflatetemperaturmålingene med termoelement. Den operative romtemperaturen ble målt i en svart kule midt i rommet (Figur 5.4). For å holde romtemperaturen over 20 °C ble det brukt en radiator som tidvis stod på. Ovnene var avslått da loggingene foregikk så den har ikke hatt noen direkte innvirkning på kaldraset.



Figur 5.4 Den svarte kula som ble brukt til måling av romtemperatur

5.5.2 Lufthastighet og lufttemperatur

Hastighetsmålere ble plassert fast på et stativ da lufthastighet langs vinduet ble målt. Det ble plassert flest hastighetsfølere nederst på vinduet da hastigheten her er mest betydningsfull for luftstrømmen som går videre ut i oppholdssonen. En nærmere beskrivelse av plassering av hastighetsfølere kan leses i Vedlegg 2. Det ble målt hastighet langs vinduet midt på og i kanten på vinduet. Målingene ble gjennomført på to ulike måter. Ved den ene metoden ble sensorene plassert så nærme vinduet som mulig deretter ble hele stativet med hastighetsmåleren flyttet unna vinduet for finne makshastigheten til luftstrømmen. Stativet med hastighetsfølere ble så festet fast i veggen (se Figur 5.5). Sensorene ble plassert helt inn til glasset og så justert like mye ut fra glassflaten manuelt ut fra avlesning av målebånd. I tillegg til det ordinære måleoppesettet ble det gjennomført et sett med kontrollmålinger. Det ble da målt hastighet og temperatur i hvert av de fem nederste målepunktene midt på vinduets bredde med bare en hastighetsføler som ble flyttet til de ulike punktene.



Figur 5.5 Tilleggsstativet som holdt stativet med hastighetsfølere stabilt

Termoelementene som målte temperaturen på luftstrømmen ble teipet fast på hastighetsmålerne så nærme hastighetsføleren som mulig uten at den kom borti. Den generelle plasseringen av termoelementene på hastighetsfølerne kan ses i Figur 5.6.



Figur 5.6 Plassering av termoelementene på hastighetsfølerne

For å måle hastigheten og temperaturen på kaldrasstrømningen over vinduskarmen, ned langs veggen og ut langs gulvet inn i rommet ble de samme seks hastighetsfølerne med tilhørende termoelement flyttet nedover på stativet. Sensorene ble plassert med ulik avstand fra hverandre for å kunne registrere luftstrømmen akkurat over karmkanten og videre nedover (se Figur 5.7). Stativet med følerne ble så flyttet lengre og lengre ut fra veggen og det ble gjort målinger i flere punkt utover for å finne makshastigheten i strømningen over karmkanten, og få et bilde av hvordan strømningen oppfører seg langs gulvet ut i rommet. En illustrasjon og ytterligere forklaring av måleoppsettet til målinger over karmkanten og ut i rommet kan leses i Vedlegg 2.



Figur 5.7 Måleoppsettet ved hastighet og temperaturmålinger over karmen og ned til gulvet

Festemetodene til hastighetsfølerne begrenser hvor nærme hverandre følerne kan komme. Den nederste følerne måtte vinkles en del for å nå helt ned til gulvet og de andre følerne måtte følgelig innrettes etter denne. På Figur 5.7 kan det observeres at de fire nederste følerne er festet så nærme hverandre som mulig, mens de to øverste er festet litt høyere opp for å kunne måle hastigheten over karmkanten til vinduet. Den øverste hastighetsføleren målte hastigheten til luftstrømmen i det den går over vinduets karmkant. Hastighetsføleren nest øverst målte hastigheten til luftstrømmen når den går over den ekstra karmlista

5.5.3 Turbulens

Det ble tilsatt røyk i luftstrømmen langs vinduet både på midten av vindusglassets bredde og i kanten av glassoverflaten. Bevegelsesmønsteret til luftstrømmen ble observert og overgangen fra laminær til turbulent strømming ble vurdert ut fra synet av den røykgasstilsatte luftstrømningen. Røyktilsetning ga også et anslag på hvor fort luftstrømmen beveget seg nedover langs glassflaten ved å ta tiden på røykskyens ferd nedover vindusflaten.

5.5.4 Asymmetrisk stråling

Asymmetrisk stråling ble registrert ved å måle plan strålingstemperatur med måleinstrumentet beskrevet i kapittel 5.4.4. Det ble testet for høyden 0,6 meter og 1,1 meter over gulvet som i følge Fanger (se kapittel 3.6) simulerer henholdsvis en sittende og stående person. Sensoren var plassert på et stativ med tre bein, når sensoren er innstilt på riktig høyde vil de tre beinas utspredning begrense hvor nærme vinduets glassflate det er mulig å plassere målesensoren. 0,6 meter over gulvet ble det gjort målinger der måleproben var plassert 0,25 meter, 0,4

meter, 0,6 meter og 1 meter fra vinduet. Proben ble plassert 0,4 meter, 0,6 meter og 1 meter fra vinduets glassflate ved målingene 1,1 meter over gulvet. Sensorene ble plassert midt foran vinduet da dette gir størst vinkelforhold til flaten og følgelig kan føre til mest mulig termisk diskomfort (jf. kap. 2.6 og 3.6.1). Det ble ikke testet med mer avstand til vinduet da resultatene av de nevnte målingene viste lite asymmetrisk stråling.

6 Usikkerhet ved målingene

Det følger alltid en viss usikkerhet rundt måleresultater. Målefeilene kan ofte deles inn i tre kategorier:

- *Grove feil* som ofte skyldes uoppmerksomhet, det kan for eksempel være avlesningsfeil, ombytting av tall eller kommafeil. Disse feilene må for all del unngås.
- *Systematiske feil* kan både være instrumentfeil eller metodefeil. Instrumentfeil kan være feil som ukalibrerte instrumenter eller friksjon i måleinstrumentet. Metodefeil skyldes operatøren og kan oppstå dersom målingene utføres ukorrekt eller ved feil bruk av instrumentet. Sjekk av kalibrering og gode forberedelser kan redusere disse typer feil.
- *Tilfeldigfeil* kan omfatte eksterne usystematiske påvirkninger eller at måledynamikken ikke er tilfredsstillende. Slike feil som dette kan ikke elimineres og det bør gjøres beregninger på hvor mye tilfeldige feil påvirker måleresultatene fra forsøkene.

Den resulterende usikkerheten ved målingene finnes ut fra instrumentnøyaktigheten og beregninger av den tilfeldige feilen. For å finne påvirkningen fra den tilfeldige feilen brukes gjennomsnittsverdi og standardavvik.

Standardavviket kan beskrives med følgende likning:

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6.1)$$

Den tilfeldige feilen kan regnes ut på følgende måte:

$$U_T = \pm \frac{S_d}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1) \cdot n}} \quad (6.2)$$

Den totale usikkerheten, U_R består av den tilfeldige feilen og instrumentnøyaktigheten. Instrumentnøyaktigheten finnes i databladet som følger med instrumentet. Uttrykket for den totale usikkerheten til målingene blir da som følger:

$$U_R = \pm \sqrt{U_T^2 + U_S^2} \quad (6.3)$$

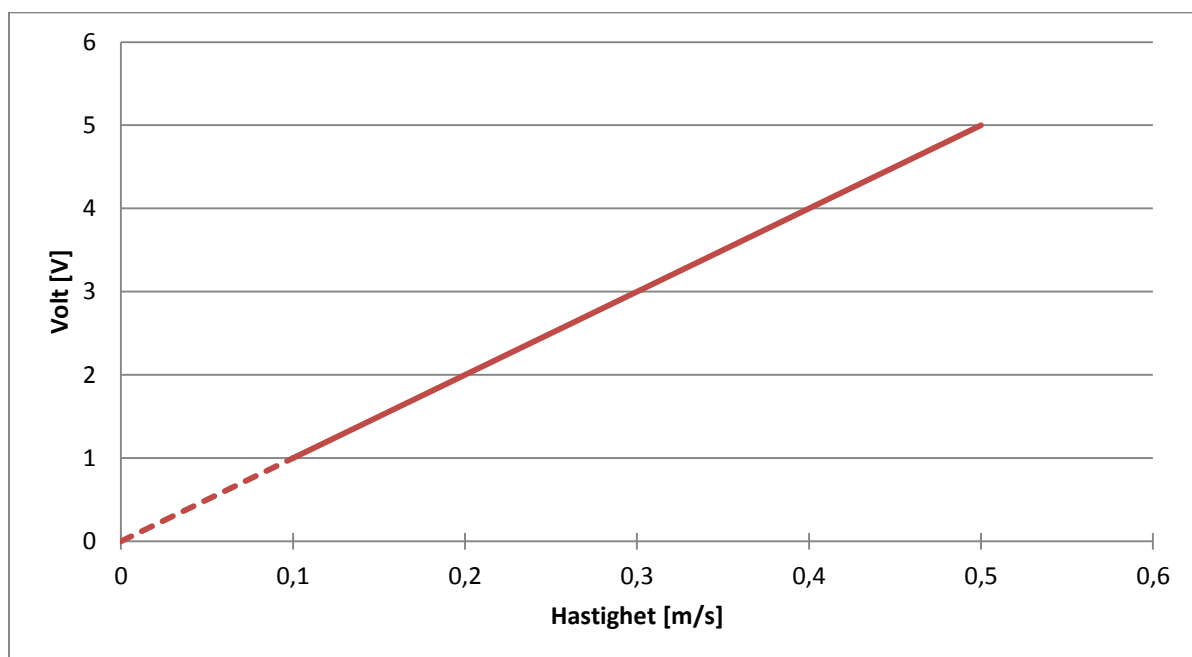
(Hanssen, 2007b)

6.1 Usikkerhetsmomenter ved målingene

I tillegg til de instrumentale usikkerhetene som er oppgitt i databladet til instrumentene kan det være andre forhold som må tas hensyn til ved tolkingen av måleresultatene.

6.1.1 Hastighetsfølere

Et av usikkerhetsmomentene ved målingene tilknyttet denne oppgaven er egenskapen til hastighetsmåleren brukt i laboratoriemålingene. Hastighetsfølerkula ytterst på proben vil generere noe varme rundt seg selv. Dette har ingen stor innvirkning dersom hastigheten på den luftstrømmen rundt har en viss hastighet, men blir hastigheten for lav vil denne varmen kunne påvirke luftstrømmen i nærheten av kula. Denne påvirkningen kan føre til at hastighetsføleren viser en verdi som ikke er korrekt i forhold til den virkelige hastigheten til kaldraset. Hvor grensen for at dette kan skje er noe uvisst, men det er antatt at den ligger rundt 0,1 m/s (Mathisen, 2013). Dette må tas til etterretning når måleresultatene skal tolkes og vurderes. Det er en lineær sammenheng mellom målt spenning og hastighet som illustreres i Figur 6.1.



Figur 6.1 Sammenhengen mellom målt spenning og hastighet ved Air Transducer Velocity

6.1.2 Romtemperatur

I tilknytning til rommet der laboratoriemålingene ble gjennomført befinner det seg et rom med svært dårlig isoleringsevne i vegg og vinduer mot klimarommet. Den dårlige isoleringsevnen til dette rommet er med på å prege romtemperaturen i testrommet. For å få romtemperaturen i testrommet over 20 °C blir det i perioder mellom målingene satt på en

radiator. Denne var avslått da målingene foregikk så det har ikke hatt direkte påvirkning på målingene av kaldraset. Men varmetapet til det tilhørende rommet og avslått radiator gjør at det ikke er mulig å holde helt konstant romtemperatur gjennom en hel måleserie. Det er allikevel små variasjoner det er snakk om da den største gjennomsnittstemperaturendringen som er registrert i løpet av en måleserie er 1,58 °C. Det er usikkert denne temperaturendringen har noen betydelig påvirkning på resultatet.

6.1.3 Kalibrering av utstyr

For å begrense forekomsten av systematiske feil og for å forsikre seg om at utstyret viser riktige verdier innenfor det målingsområde som er ønskelig bør utstyret testes før forsøkene begynner. Det bør også sjekkes opp når instrumentet sist ble kalibrert. Normen for de fleste instrumenter er at de skal kalibreres hver 12. måned, men dette er ikke et absolutt krav.

Termoelementene benyttet i laboratoriemålingene ble testet ved at alle ble puttet ned i en termos med varmt vann. Bearbeiding av testmåleresultatene viser at det på det meste var en variasjon mellom termoelementene på 0,2 °C. Dette er et resultat som er forventet og å få til noe bedre enn dette er vanskelig. Når det gjelder hastighetsfølerne i det samme forsøket var disse allerede koblet opp til logger fordi det var brukt i et tidligere forsøk. Det ble imidlertid gjort en undersøkelse av disse følerne etter gjennomføring av forsøket. Resultatet viste ingen store avvik fra virkeligheten.

Det er usikkert når instrumentene brukt i feltmålingene sist ble kalibrert. Temperaturloggerne er innkjøpt like før målingene ble gjort så det er rimelig og anta at disse er kalibrert til å vise riktig verdi. Når det gjelder TSI VelociCalc'en som ble brukt til å måle hastighet og temperatur på luftstrømmen ved feltmålingene ble dette instrumentet kjøpt inn nytt våren 2012. Den ble fabrikkkalibrert i november 2011, noe som er omtrent et år før feltmålingene ble gjennomført. På bakgrunn av disse opplysningene antas det at instrumentet ikke viser noen ytterligere feilverdi enn det som er nevnt som nøyaktighet i databladet (se kapittel 4.4.1).

6.1.4 Måleoppsettet

Hvordan måleinstrumentene blir satt opp og justert under målingene vil kunne innvirke på et måleresultat. Det er nødvendig å gjøre en grundig vurdering av måleoppsettet før det blir montert og det er viktig å være nøyaktig når justeringer og flyttinger skal gjennomføres.

Ved oppsettet av laboratorieforsøket ble det gjort en vurdering og det ble bestemt å ha flest målepunkter nederst på vinduet da det er der de kritiske hastighetene er fordi luftstrømmen

derfra går videre ut i rommet. De fire nederste hastighetssensorene ble plassert 10 centimeter fra hverandre. En vurdering av dette måleoppsettet ble gjort og det ble antatt at denne avstanden var tilstrekkelig til at strømmingen ved en hastighetsføler ikke har blitt påvirket av føleren over. Resultatene av målingene kan tyde på det motsatte (les om resultatene i kapittel 7.2). Det er derfor knyttet usikkerhet til om måleoppsettet med de tette hastighetsfølerne nederst på vinduet har påvirket resultatet av målingene. Det ble droppet å ha målepunkter veldig høyt oppe på vinduet da det erfaringsvis er lave hastigheter der og hastigheten langt opp er uinteressante i forhold til termisk komfort. Det høyeste hastighetspunktet ble plassert 2,08 meter opp på vinduet. Dette målepunktet ble bestemt ut fra høyden til stativet som hastighetsfølerne skulle festes på og gardintrappas høyde fordi målepunktet måtte kunne justeres.

For luftstrømmålinger nedover langs vinduets glassflate ble målepunktene justert på to ulike måter i laboratoriet (jf. kap. 5.5.2) Forsøket med flytting av hele stativet fører til noen utfordringer som kan ha innvirket på måleresultatet. Stativet var høyt og ustabil og da hastighetsfølerne er skjøre var det vanskelig å stille hastighetsfølerne helt inn til glasset uten at disse ble slått mot glasset da stativet ble flyttet på. I frykt for å ødelegge følerne er det usikkert om alle følerne faktisk er helt inn til glassflaten når forsøket begynner. Et annet usikkerhetsmoment tilknyttet denne metoden er flyttingen av stativet. Utgangsposisjonen ble tegnet på gulvet og stativet ble justert ut fra denne posisjonen. Med runde bein på stativet er det mer utfordrende og flytte og lese av avstanden. Siden stativet ble flyttet små avstander av gangen vil det være noe usikkerhet i bruk av målebåndet og den faktiske flyttingen av stativet. Da stativet ble festet fast i veggen ble det lettere å justere hastighetsfølerne helt inn til vinduet.

Feltemålingene ble utført med håndholdt instrument som ble flyttet og festet før registreringene ble gjennomført. Da det ikke var store utfordringer knyttet til monteringen og innstilling av måleinstrumentene er det trolig ingen usikkerhetsmomenter rundt måleoppsettet til feltemålingene.

7 Resultater

I dette kapittelet presenteres resultatet av feltmålingene og laboratorieforsøkene. I forbindelse med feltmålingene ble det sendt ut en spørreundersøkelse til ansatte som arbeider i nærheten av samme type vindu som målingene ble gjort på. Resultatet av denne undersøkelsen presenteres i dette kapittelet. En fullstendig vurdering av resultatene kan leses i diskusjonskapittelet.

7.1 Resultatene av feltmålingene

7.1.1 Rom- og overflatetemperatur

I løpet av målingene av romtemperatur varierer temperaturen mellom 19,3 °C og 20,3 °C. Gjennomsnittstemperaturen er regnet ut til 19,5 °C. Den målte gjennomsnittstemperaturen er innenfor den anbefalte temperaturgrensen for arbeidsplasser, fastsatt av Arbeidstilsynet (2006), på 19-26 °C. Dog er det i nærheten av den nedre grensen og dersom det hadde vært arbeidstakere i rommet ved denne romtemperaturen er det mulig at noen ville oppleve at romtemperaturen er for lav til å føle termisk komfort.

Resultatet av overflatetemperaturene på vinduet kan leses i Tabell 7.1. Det er logget like mange målinger i alle punktene på vinduet. Men for det ene målepunktet er det noen færre målinger som er benyttet i gjennomsnittsberegningene. Dette fordi deler av måledataen i dette punktet hadde verdi -40 °C, noe som åpenbart ikke kan stemme. Disse målingene er derfor utelatt i beregningen av minimum-, maksimal- og gjennomsnittstemperatur for målepunktet.






Tabell 7.1 Resultat av målingen av overflatetemperatur på vinduet

Målepunkter	Overflatetemperatur [°C]			Antall målinger
	Minimum	Maksimal	Gjennomsnitt	
Øverst venstre	16,0	17,3	17,0	169
Øverst høyre	16,6	17,2	16,9	228
Midten venstre	16,2	16,9	16,6	228
Midten midt	17,2	17,8	17,5	228
Midt høyre	16,1	16,7	16,5	228
Nederst venstre	13,6	14,2	15,1	228
Nederst midt	14,8	16,0	15,1	228
Nederst høyre	13,8	17,6	14,0	228

Resultatene i Tabell 7.1 viser at det ikke er uniform temperatur på vinduets glassoverflate. De laveste temperaturene finnes nederst på vinduet.

7.1.2 Luftstrøm

Det ble målt hastigheter og temperatur på luftstrømmen både langs vinduet og langs gulvet ut i rommet. Resultatet fra målingene langs vinduet kan leses i Tabell 7.2. Fargekodene illustrerer hvor på vinduets bredde målingene ble gjort. Målepunktene med tall 1 er øverst på vinduet mens 12 er nederst, de øvrige punktene er i økende rekkefølge plassert mellom disse punktene. En detaljert oversikt over plassering av målepunktene kan sees i Vedlegg 1.

<u>Fargekode</u>	<u>Plassering av målepunkt</u>
	Helt i kanten venstre side
	27,5 cm fra vinduskarmen venstre side
	Midten av glasset bredde
	27,5 cm fra kanten høyre side
	Helt i kanten høyre side

Tabell 7.2 Resultat av luftmålingen langs vinduet

Målepunkt	Hastighet [m/s]			Temperatur [°C]			Antall målinger
	Min	Maks	Gjennomsnitt	Min	Maks	Gjennomsnitt	
1a	0,02	0,14	0,08	18	18,1	18,1	181
1b	0	0,09	0,01	18,5	18,5	18,5	180
1c	0	0,05	0,01	18,6	18,6	18,6	180
1d	0	0,05	0,01	18,9	19,5	18,9	180
1e	0	0,04	0,01	18,3	18,8	18,5	184
2c	0	0,09	0,03	18,7	18,8	18,7	180
3c	0	0,15	0,06	18,9	19,1	19	181
4c	0	0,13	0,05	19,2	19,2	19,2	180
5a	0,09	0,22	0,15	19	19,3	19,1	180
5b	0	0,14	0,05	18,9	19	18,9	180
5c	0	0,14	0,03	18,9	19	18,9	180
5d	0	0,1	0,03	18,9	19,1	19	180
5e	0,13	0,26	0,21	18,5	18,8	18,7	180
6c	0	0,13	0,06	18,6	18,6	18,6	180
7c	0	0,09	0,03	18,7	18,8	18,8	180
8c	0	0,16	0,06	18,8	18,8	18,7	180
9a	0,12	0,27	0,22	18,5	18,8	18,8	180
9b	0	0,13	0,06	18,4	18,6	18,5	180
9c	0,01	0,11	0,05	18,8	18,7	18,7	180
9d	0,01	0,1	0,04	18,8	18,7	18,7	180
9e	0,08	0,26	0,22	18,7	18,8	18,7	180
10c	0	0,08	0,02	18,7	18,8	18,8	181
11c	0	0,06	0,02	18,9	18,9	18,9	180
12a	0,14	0,2	0,18	18,4	18,4	18,4	180
12b	0	0,03	0,01	18,7	18,8	18,7	180
12c	0	0,01	0	18,6	18,7	18,6	182
12d	0	0,05	0,01	18,6	18,7	18,6	180
12e	0,03	0,18	0,14	18,4	18,7	18,5	180

Tabellen viser at det er få steder langs vinduet luftstrømmen oppnår høye hastigheter. Med fargekodene i tabellen kan det sees at de høyeste hastighetene oppstår langs de to kantene på

vinduet. Selv med mange målepunkter midt på vinduets bredde er det vanskelig å se en klar akselerasjon på luftstrømmen nedover vinduet her. I kantene kan det observeres litt akselerasjon nedover fram til det nederste punktet. Gjennomsnittstemperaturen på luftstrømmen nedover langs vindusglassflaten varierer fra 18,1 °C til 19,2 °C i de ulike målepunktene på vinduets glassflate. Den laveste verdien er 1,4 °C lavere enn den målte gjennomsnittstemperaturen i rommet. Den høyeste målte temperaturen på luftstrømmen er kun 0,3 °C fra gjennomsnittlig målt romtemperatur.

Det ble målt svært lav lufthastighet i målepunktet 0,3 meter fra vinduet og 0,1 meter over gulvet. I løpet av en måleperiode på litt over 3 minutter ble det registrert en maks hastighet på 0,01 m/s og en gjennomsnittshastighet på 0 m/s. Det er vanlig at kaldrasets lufthastighet minker etter hvert som den kommer lengre unna vinduet. Med en så lav hastighet 0,3 meter fra vinduet var det ikke nødvendig med ytterlige målinger andre steder i rommet. Den lave hastigheten i rommet indikerer at det ikke skapes noe negativ trekkfølelse på grunn av kaldras som vil påvirke den termiske komforten. Personen som gjennomførte målingene merket heller ikke noe til trekk fra vinduet da målingene ble gjennomført.

7.1.3 Turbulens

Bruk av røykampunguller for å se overgangen fra laminær til turbulent strømning viste seg å være vanskelig ved feltmålingene. Det ble observert at den røyktilsatte luftstrømmen nær vinduets glassoverflate ikke oppførte seg som et typisk kaldras med tydelig nedadgående luftstrømmer langs vinduet. Luftstrømmen tilsatt røyk beveget seg med mye turbulens opp og mot venstredel av vinduet ved omtrent alle forsøkene som ble gjort. Det kan tyde på at det var andre sterkere luftstrømmer i rommet som påvirket luftstrømmen i nærheten av vinduet. Det ble undersøkt om luftpåvirkningen skyldtes luft fra ventilasjonsanlegget. Det kom lite luft ut av tilluftsventilen og undersøkelsene ga ikke noe klart svar på om luft fra ventilasjonsanlegget var årsaken til luftbevegelsene i rommet. Overgangen fra laminær til turbulent strømning var vanskelig å se utfra røyktilsetning i luftstrømmen.

7.1.4 Spørreundersøkelse om trekk fra vindu

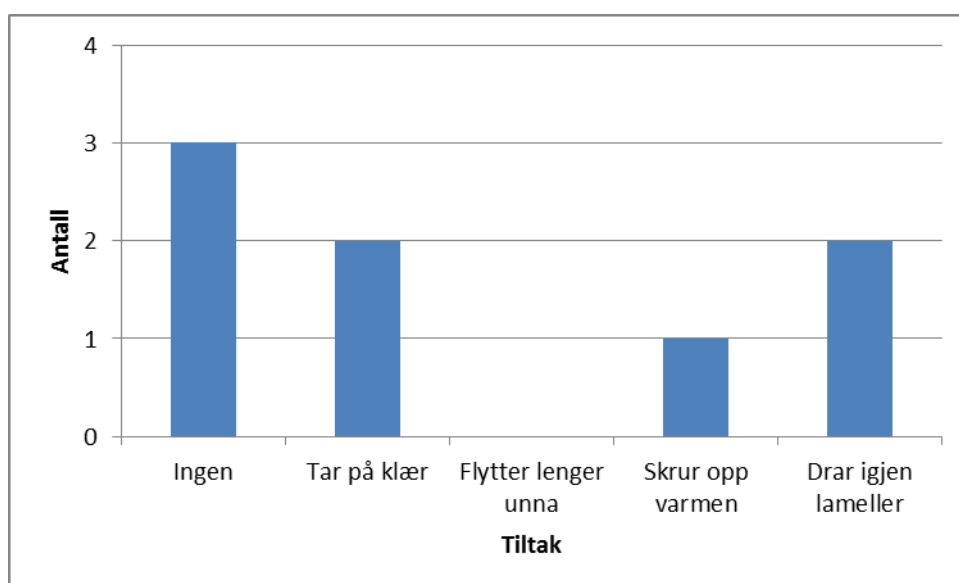
Spørreundersøkelsen ble gjennomført på ansatte som sitter nær samme type vindu som feltmålingene ble utført på. De spurte har arbeidsplasser plassert med en avstand fra 0,9 til 2,5 meter unna vinduet. Undersøkelsen ble gjort elektronisk og ble besvart av 10 personer, 8 menn og 2 kvinner. Alderen på de svarende varierer fra 31-60 år, hvorav 4 personer er i

aldersgruppen 31-40 år, 3 personer i aldersgruppen 41-50 år og 3 personer i aldersgruppen 51-60 år.



Figur 7.1 Prosentvis fremstilling av hvor mange som opplever trekk fra vinduet

Sektordiagrammet i Figur 7.1 viser at det kun er 1 av 10 som opplever trekk fra vinduet. Denne personen opplever denne trekken som ubehagelig ganske ofte. Halvparten av de som svarte på undersøkelsen mente det måtte være kaldere enn $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ eller kaldere enn $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ for at det skal oppstå ubehagelig trekk fra vinduet. På spørsmålet om tiltak for å minske følelsen av ubehagelig trekk fra vinduet er det flere av forslagene i undersøkelsen som får respons. En fordeling av svarene kan leses i Figur 7.2.



Figur 7.2 Tiltak for å minske følelsen av ubehagelig trekk fra vinduet

Av de spurte er det få som opplever ubehagelig trekk fra vinduet til tross for at vinduet er relativt stort og at enkelte sitter ganske nærme. I lokalet hvor denne undersøkelsen er gjennomført er det installert kaldrassikring i form av tuberadiatorer nederst foran vinduet. Dette kan være en av årsakene til at få personer opplever ubehagelig trekk fra vinduet. I undersøkelsen er det kun ti personer som har avgitt svar. Dette er lite datagrunnlag til å gi resultater som kan tolkes som et helhetlig bilde. Ti personer er kun et lite representativt utvalg av de som jobber der så denne undersøkelsen bør derfor ikke vektlegges altfor mye i forhold til å finne trender hos arbeidstakerne på stedet.

7.2 Resultatene av laboratoriemålingene

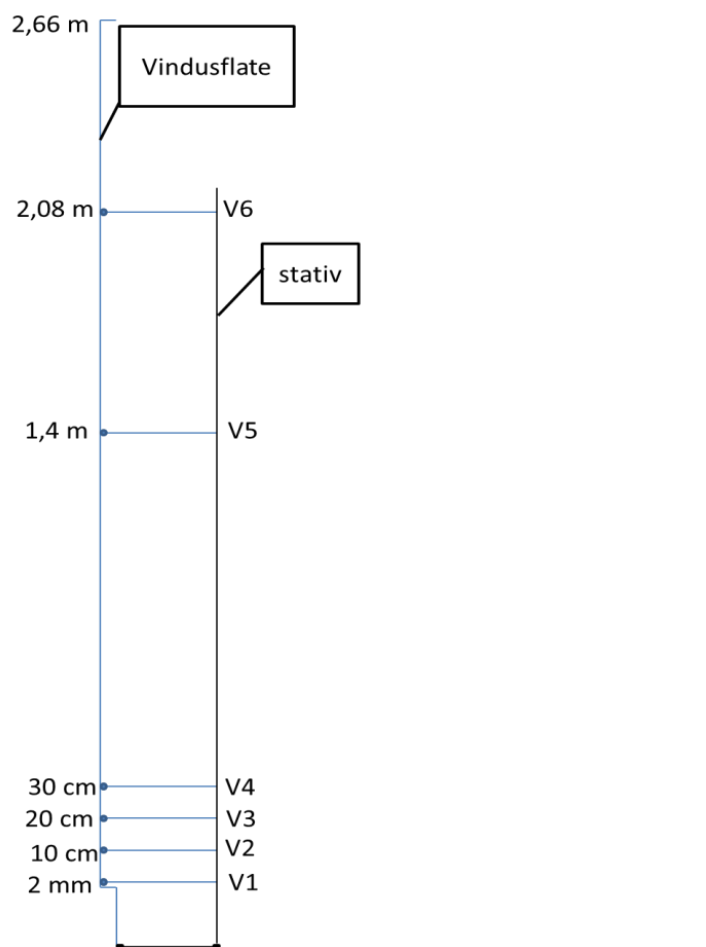
Resultatene av målingene i laboratoriet presenteres som serier der hver serie består av målepunkter plassert ulike avstander fra vinduets glassflate og karm. Det er gjennomsnittsverdien til de 30 loggingene i hver måling som presenteres i tabeller og figurer i dette kapittelet og som blir brukt videre i vurdering av resultatene. Figurene som illustrerer resultatene fra hastighet- og temperaturmålingene til kaldraset nedover langs vindusglasset er fra de to ulike målemetodene.

For alle målingene gjelder samme betegnelsen for målepunkter. Punkter merket *tg* er overflatetemperaturer på vindusglasset, *V1-V6* er målepunkter for hastighet, mens *t på V1- t på V6* er temperaturmålinger der termoelementet er festet på hastighetsmåleren for å måle temperaturen på luftstrømmen ved den tilhørende hastighetsmåleren.

En oppsummering av måleoppsettet for målinger gjort for luftstrømmer nedover langs vinduets glassflate både midt på vinduets bredde og langs kanten kan leses i Tabell 7.3 og Figur 7.3.

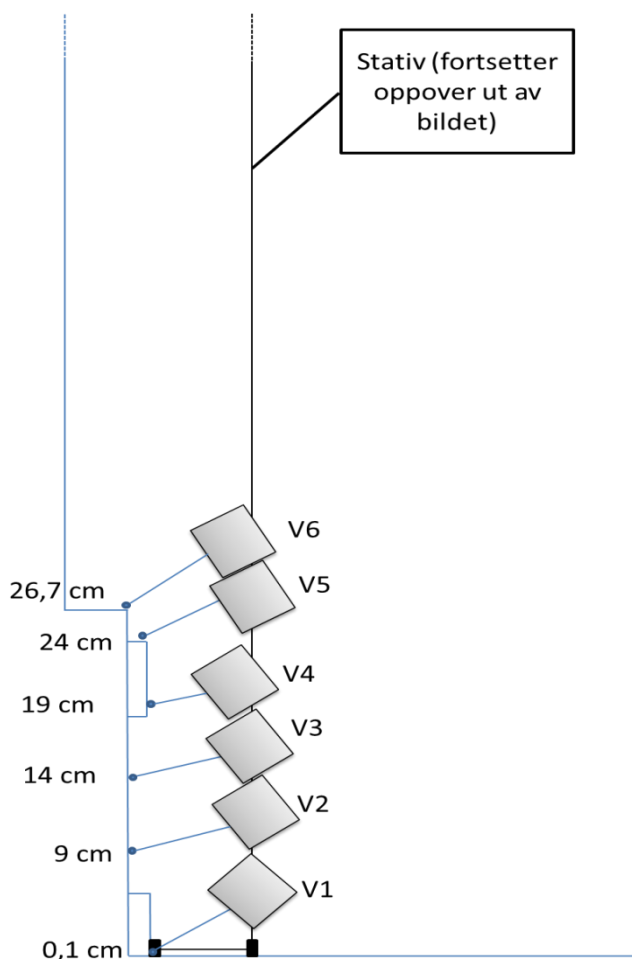
Tabell 7.3 Oversikt over målepunkter

Målepunkt	Plassering over karmkanten
tg1, V1, t på V1	2 mm
tg2, V2, t på V2	10 cm
tg3, V3, t på V3	20 cm
tg4, V4, t på V4	30 cm
tg5	60 cm
tg6	1 m
tg7, V5, t på V5	1,4 m
tg8	1,8 m
tg9, V6, t på V6	2,08 m
tg10	2,66 m



Figur 7.3 Måleoppsett av hastighetsfølere ved vindusglassets overflate

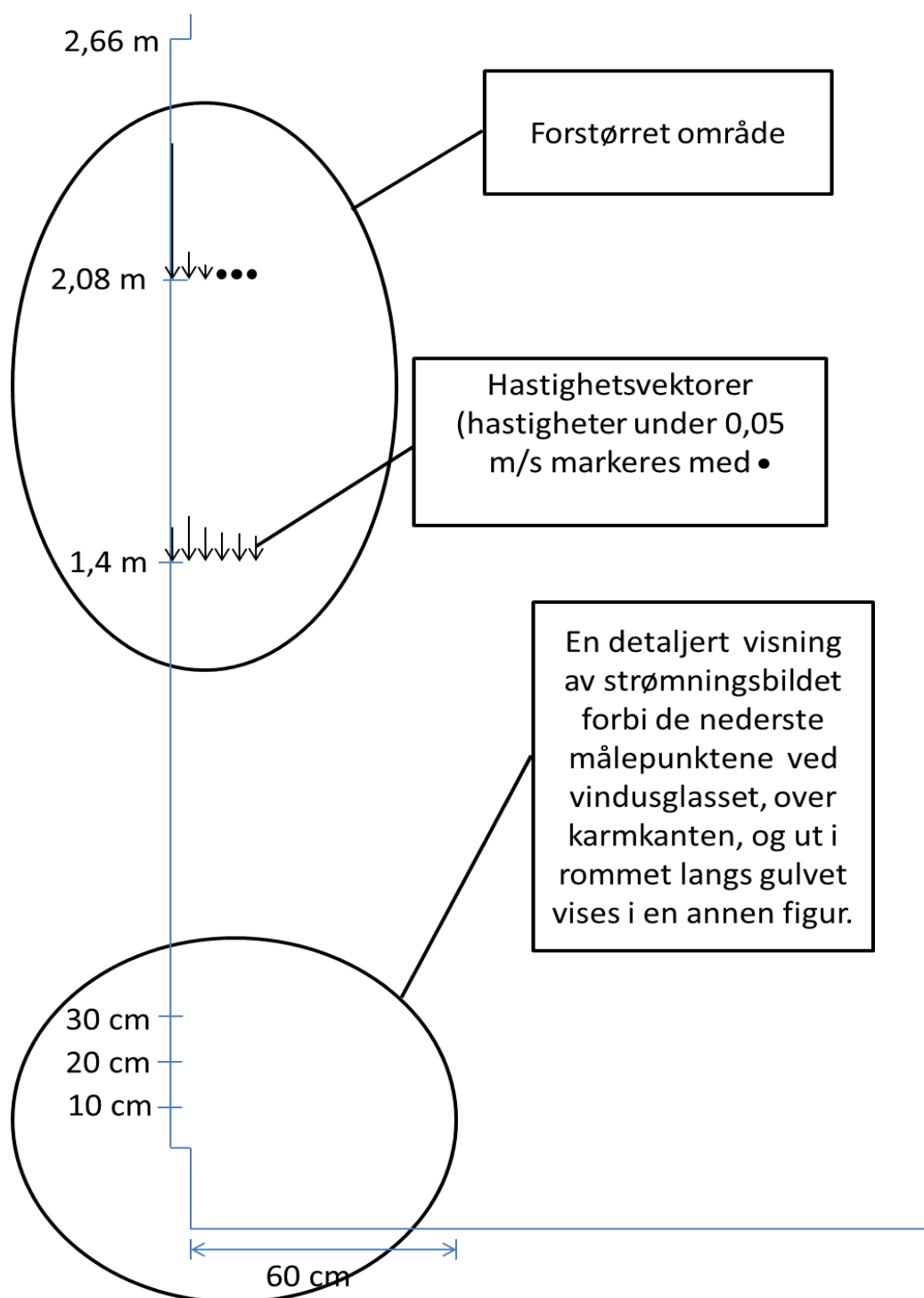
Oppsettet for målinger over karmkanten og langs gulvet i rommet er illustrert med bildet i kapittel 5.5.2 og i Figur 7.4. Dette oppsettet gjelder både for målinger midt på vinduets bredde og i kanten av vinduet.



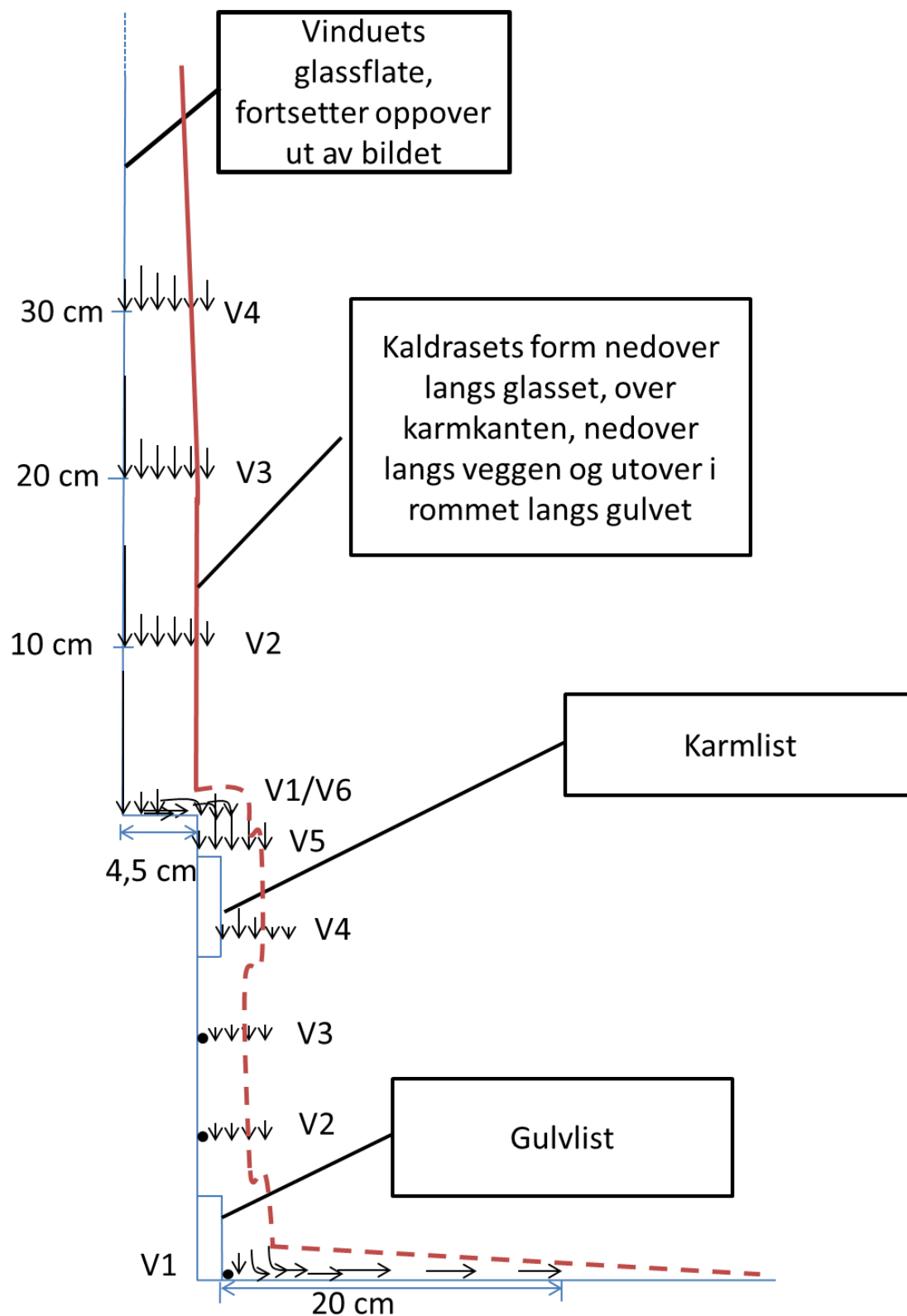
Figur 7.4 Måleoppsett for hastighetsfølere ved målingene over karmkanten og ut i rommet

En detaljert visning av målepunktene fra laboratorieforsøkene finnes i Vedlegg 2.

Figur 7.5 og Figur 7.6 viser strømningsbildet langs vinduet, over karmkanten nedover langs veggen og videre ut i rommet. Skaleringen av hastighetsvektorene er basert på hastighetsmålinger fra en måleserie langs vinduets glassflate midt på vinduets bredde der stativet med hastighetsfølerne satt fast og ble justert ut fra glasset manuelt (oppsett illustrert i Figur 7.3) og en måleserie med målinger over karmkanten, nedover langs veggen og videre ut i rommet (oppsett illustrert i Figur 7.4). Det er 1 centimeter i virkeligheten mellom hver av de illustrerende hastighetsvektorene. En detaljert oversikt over de målte hastighetene til luftstrømmen i flere ulike målepunkt kan leses i de påfølgende delkapitlene. Figurene er proporsjonalt skalert ned fra den virkelige målestokken. Den første figuren er skalert ned til 8 prosent av de virkelige målene med unntaket av det forstørrede område som har en målestokk 1:3,06, den samme målestokken som hele Figur 7.6.



Figur 7.5 Strømningsbildet på øvre del av vinduet



Figur 7.6 Detaljert visning av kaldrasets strømningsbildet på nedre del av vinduet, over karmkanten, nedover langs veggen og videre utover i rommet

Den røde streken i figuren indikerer kaldrasets strømningsbildet og tykkelse nedover langs vinduet, over karmkanten, langs veggen og videre ut over i rommet langs gulvet. Tykkelsen

på kaldraset langs vinduet er basert på teoretiske beregninger og delvis på observasjoner med røykgasstilsetning. Det var vanskelig å observere noen klar tykkelse på luftstrømmen over karmkanten og videre nedover langs veggen og ut i rommet. Usikkerheten rundt dette er markert ved at streken for kaldrasets form er tegnet som en ufullstendig strek i dette området. Hastighetsvektorene viser at det er høyere hastighet over karmkanten enn nedover langs veggen, før hastigheten igjen øker når den brer seg utover i rommet langs gulvet. Det kan også observeres at mange av målepunktene har maksimalhastigheten innerst helt nær vindusglasset. Årsaken til dette vil bli diskutert i kapittel 8.2.

7.2.1 Målinger langs vinduets glassflate midt på vinduets bredde

Det er målt både overflatetemperatur, lufthastighet og temperatur på luftstrømmen nedover langs vinduets glassflate.

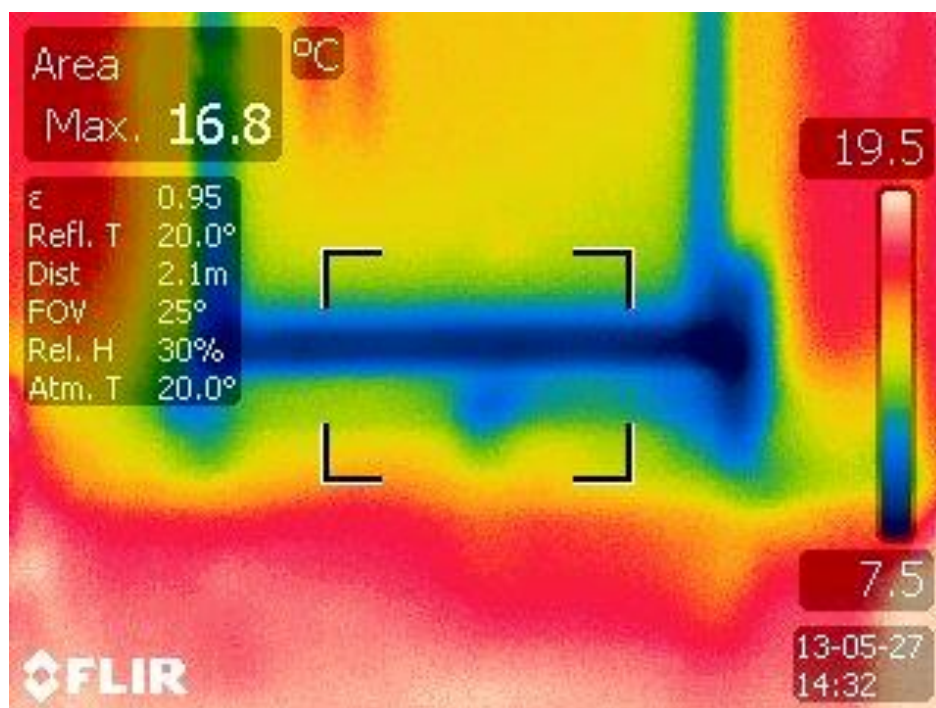
Rom- og overflatetemperatureer

Måleresultatene av overflatetemperaturene og romtemperaturene er fra et sett med målinger. Det vises ikke resultater fra andre måleserier da de samme trendene finnes for overflatetemperatur og romtemperatur i de andre måleseriene midt på vinduets bredde. I tillegg til målepunktene beskrevet i Tabell 7.3 ble den simulerte utetemperaturen i klimarommet, samt overflatetemperaturen på vindusglasset mot klimarommet logget i måleserien. Målingen av overflatetemperaturen til vinduet mot klimarommet ble logget i et punkt midt på vinduet. I løpet av måleserien er det små variasjoner i disse temperaturene. Den laveste gjennomsnittstemperaturen i klimarommet ble målt til $-20,24$ °C og den høyeste målte gjennomsnittstemperaturen var $-19,50$ °C. Dette gir en temperaturvariasjon gjennom måleserien på $0,74$ °C. Romtemperaturen i testrommet varierer fra $20,53$ °C til $21,28$ °C, som gir en variasjon i måleserien på $0,75$ °C. De stabile romtemperaturene i klimarommet og testrommet gjør at overflatetemperaturen til vindusglasset inn mot klimarommet kun varierer $0,22$ °C gjennom måleserien og har en overflatetemperatur mellom $-16,66$ °C og $16,88$ °C.

Tabell 7.4 Overflatetemperatureer målt midt på vinduets bredde

	Temperatur [°C]									
	tg1	tg2	tg3	tg4	tg5	tg6	tg7	tg8	tg9	tg10
Minimum	6,73	15,06	16,96	17,01	17,07	17,29	17,72	17,50	17,69	15,58
Maksimum	7,83	15,98	17,79	17,40	17,58	17,63	18,63	17,79	19,31	16,32
Variasjon	1,1	0,92	0,83	0,39	0,56	0,34	0,91	0,1	1,62	0,74

Tabell 7.4 viser at overflatetemperaturene til vinduet i testrommet varierer relativt lite gjennom måleserien. Den største forandringen i overflatetemperatur er ved tg9 som varierer 1,62 °C i løpet av måleserien. Den høye temperaturmålingen i dette punktet på 19,31 °C er fra målingen der hastighetsfølerne er plassert helt inntil glassflaten, noe som betyr at hastighetsføleren kan ha påvirket overflatetemperaturloggingen. De andre målepunktene har en variasjon på 0,4 °C til 1,09 °C i løpet av måleserien. Det kan observeres at temperaturen helt nederst på glassflaten er omtrent syv grader lavere enn målepunktet over. Varmetapet i randsonen nederst kommer tydelig fram på termograferingsbildet illustrert i Figur 7.7.

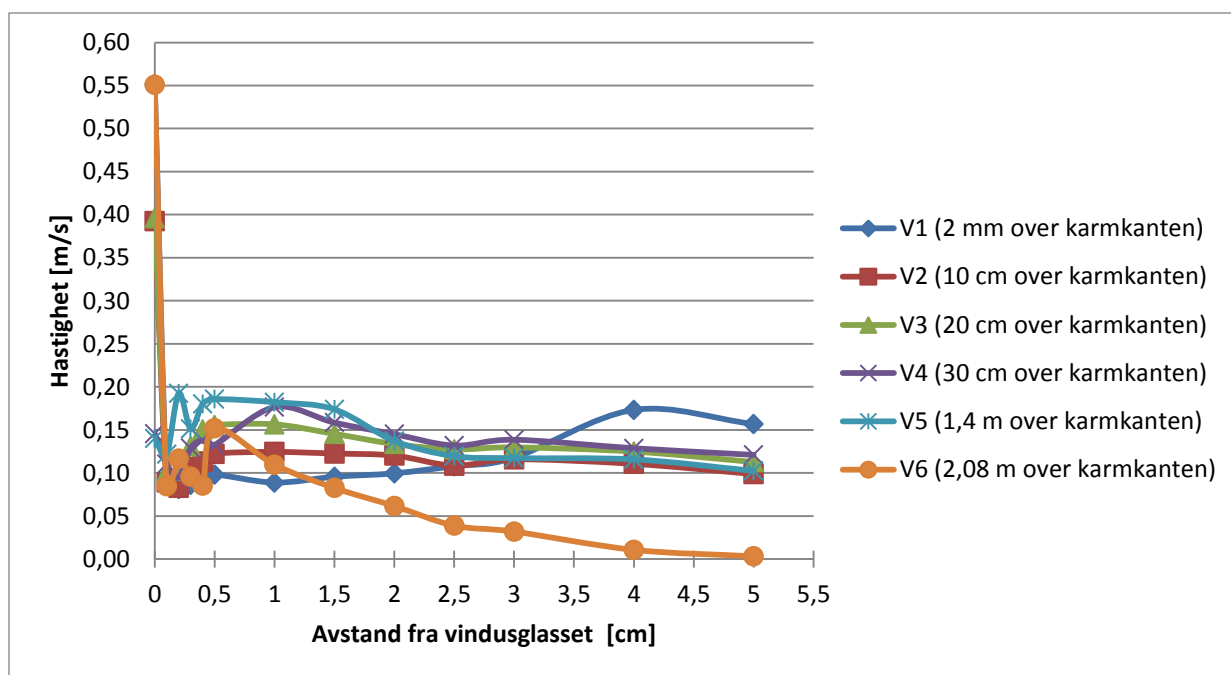


Figur 7.7 Termografering som viser varmetapet nederst på vinduet

De leste temperaturene med termograferingskamera stemmer godt overens med de målte overflatetemperaturene også på resten av vinduet som ikke vises i figuren over.

Hastighet og temperatur på luftstrøm

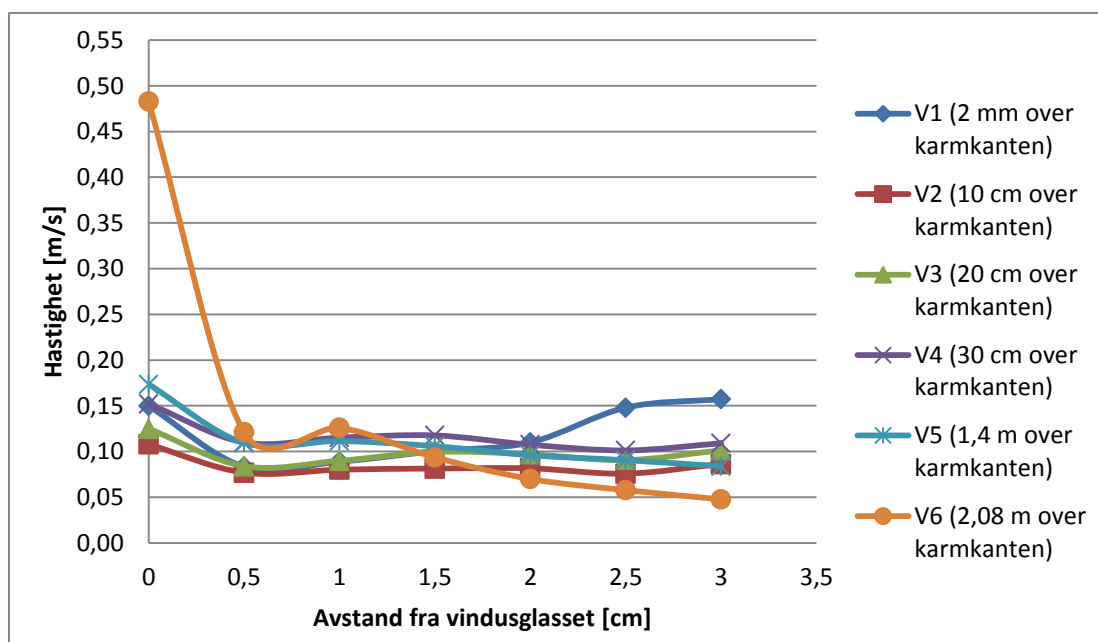
Tabeller til resultatfigurene kan leses i Vedlegg 3. Målte hastigheter og temperaturer ved de ulike målepunktene i samme måleserie som overflate og romtemperaturene presentert over kan leses i Figur 7.8 og Figur 7.10.



Figur 7.8 Resultatet av hastighetsmålingene for kaldraset midt på vinduets bredde med fastsatt stativ og manuell flytting av hastighetssensorene

Som Figur 7.5 og Figur 7.6 tidligere i dette kapittelet viser med hastighetsvektorer, måles det høyest hastighet når hastighetsfølerne er plassert helt inn til vindusglasset for 4 av de 6 målepunktene. Når sensoren flyttes bare 1 millimeter fra glassoverflaten synker hastigheten i disse målepunktene drastisk. Eksempelvis synker hastigheten fra 0,55 til 0,08 m/s i målepunkt V6. For målepunktene V4 og V5 er hastigheten vesentlig lavere inne nær glassflaten med hastigheter på henholdsvis 0,146 m/s og 0,14 m/s. Fallet i hastighet er ikke så dramatisk for disse målepunktene når følerne flyttes millimeter fra glassflaten.

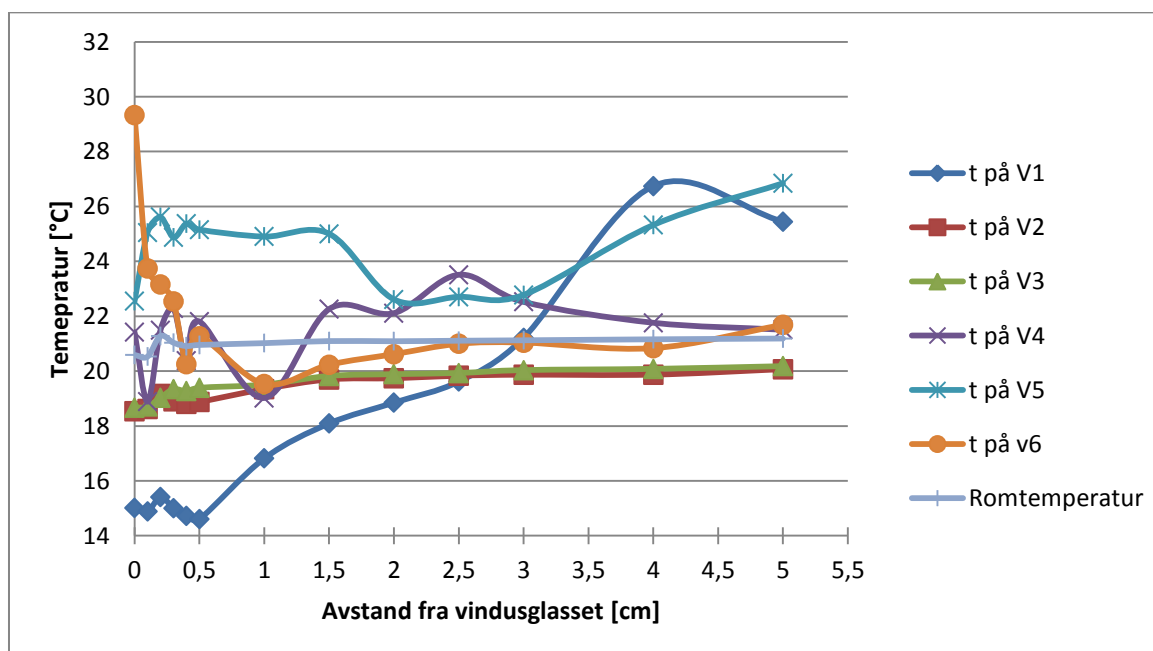
Resultatet fra den andre målemetoden der hele stativet med hastighetsfølere og termoelementer flyttes unna vinduet viser noe annerledes resultater for hastighetene enn måleresultatene presentert i Figur 7.8 over. Resultatet fra denne måleserien kan leses i Figur 7.9. Det er færre målepunkter ved denne metoden. Fordi hastighetsfølerkulene er skjøre og fort kan bli ødelagte ble flyttinga av stativet en utfordring som begrenser antall målepunkter i nærheten av glassoverflaten.



Figur 7.9 Resultatet av hastighetsmålingene for kaldraset midt på vinduets bredde med flytting av hele stativet og alle hastighetsfølerne samtidig

Resultatet fra Figur 7.9 viser lavere hastighet helt inntil glasset enn resultatet fra den andre målemetoden og det er kun et av målepunktene som viser markant høyere hastighet helt nær vindusglasset i forhold til andre avstander fra glasset.

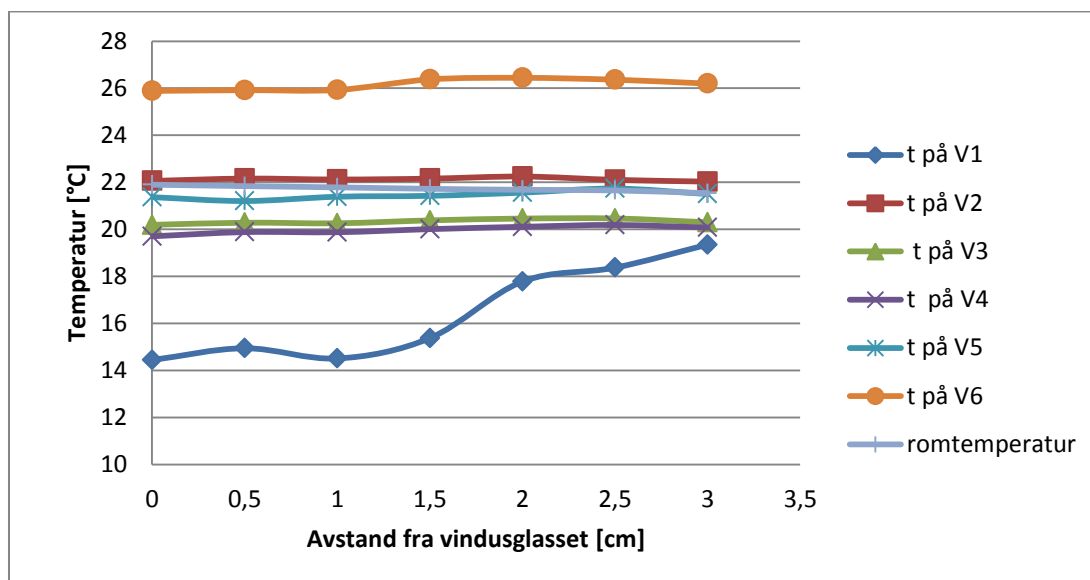
Temperaturen på luftstrømmen blir registrert av termoelementer helt i nærheten av hastighetsfølerne. Resultatet fra disse målepunktene samt romtemperaturen fra samme måleserie kan leses i Figur 7.10.



Figur 7.10 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset midt på vinduets bredde med fastsatt stativ og manuell flytting av følere.

Figur 7.10 viser stor spredning i temperaturer for de ulike målepunktene. Det registreres høyere temperatur på kaldrasstrømningen enn den målte romtemperaturen i flere av målepunktene.

Resultatet av temperaturmålingene med metoden der hele stativet flyttes unna vindusglasset kan leses i Figur 7.11.



Figur 7.11 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset midt på vinduets bredde med flytting av hele stativet og alle termoelementene samtidig

Det er mindre spredning i resultatene fra målingene presentert i Figur 7.11 sammenliknet med resultatene fra målemetoden i Figur 7.10. Men også her har temperaturen til den nederste luftstrømmen en markant oppgang etter hvert som den flyttes unna vindusoverflaten. Der er flere målepunkter der det registreres høyere temperatur på luftstrømmen enn i rommet generelt også i denne måleserien.

Overgangen fra laminær til turbulent strømning

Observasjon med røyktilsetning i luftstrømmen langs vinduet indikerer at strømmingen nærmest glasset er tilnærmet laminær hele veien ned til karmkanten. Strømmingen får noe innslag av turbulens nederst, men det kan virke som den aldri rekker og slå fullstendig om til å være helt fullstendig turbulent. Strømmingen én centimeter fra vinduet viser seg å være noe mer turbulent tidligere enn luftstrømmen helt inn til glasset.

7.2.2 Målinger langs vinduets glassflate i kanten av vinduet

Målepunktene V2-V6 ble plassert 1,5 centimeter fra karmkanten, mens målepunktet V1 ble plassert 5 millimeter nærmere kanten da festet på stativet gjorde det umulig å få den i helt

nøyaktig samme posisjon som de andre. Høydene på målepunktene er de samme som ved målingene midt på vinduets bredde og er beskrevet i innledningen av dette kapittelet i Tabell 7.3 og Figur 7.3.

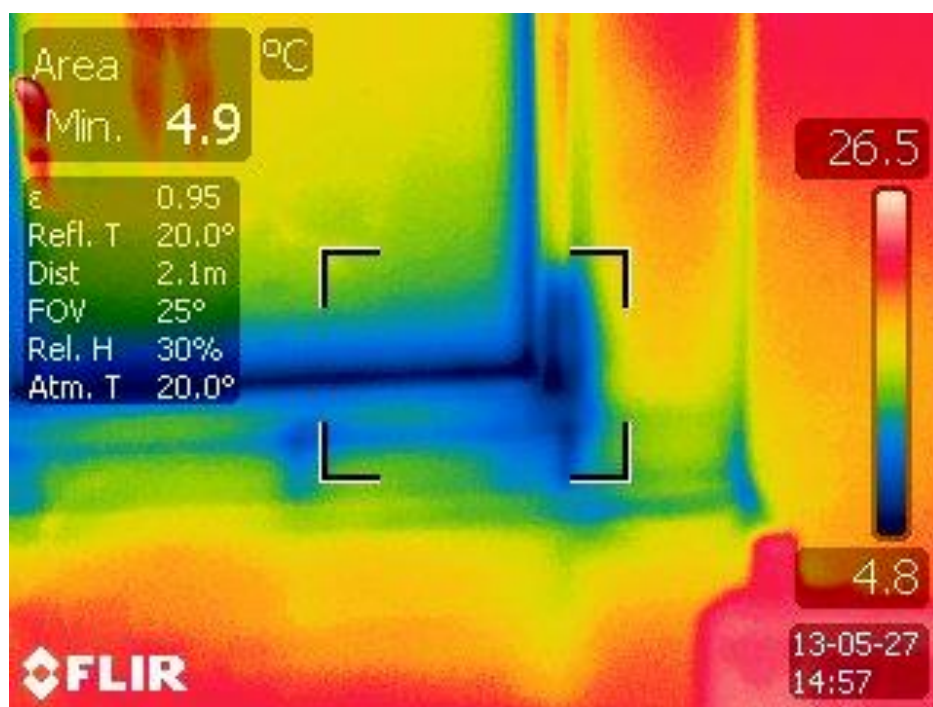
Romlufts- og overflatetemperaturer

Temperaturen i klimarommet varierer mellom $-20,08\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-20,22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Det gir en variasjon på $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$ i løpet av serien. Den samme variasjonen finnes på overflaten til vinduet inn mot klimarommet som varierer mellom $-16,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $-16,94\text{ }^{\circ}\text{C}$. Romtemperaturen i testrommet er relativt stabil i løpet av måleserien. Den varierer $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ fra $20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $21\text{ }^{\circ}\text{C}$. I Tabell 7.5 følger resultatet av overflatetemperaturene på vindusglasset i testrommet.

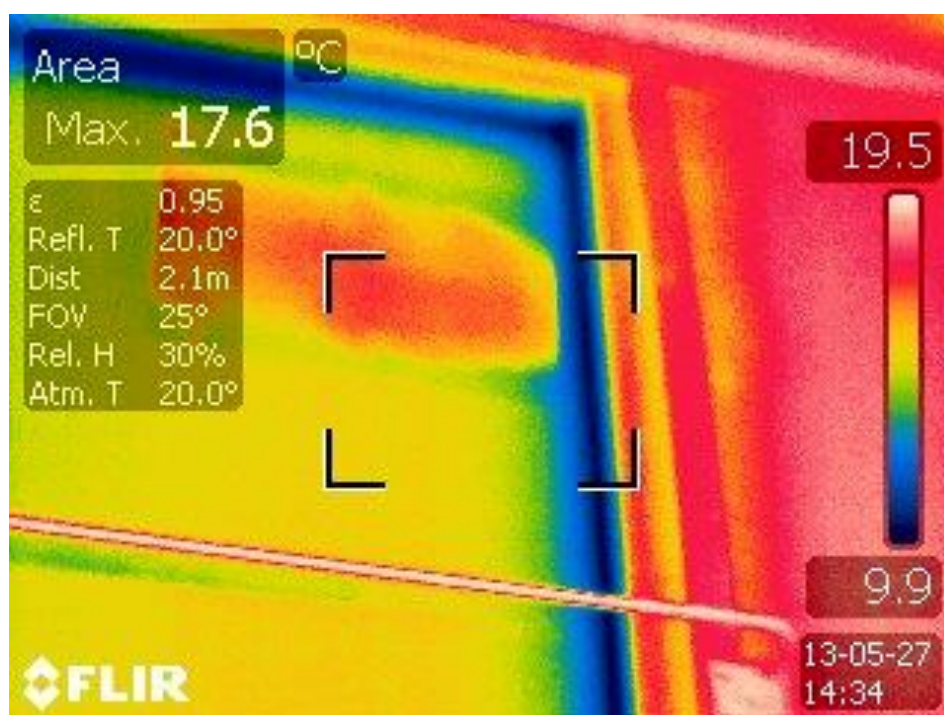
Tabell 7.5 Overflatetemperaturer målt i kanten av vinduet

	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]									
	tg1	tg2	tg3	tg4	tg5	tg6	tg7	tg8	tg9	tg10
Minimum	3,47	9,22	9,80	9,37	10,40	10,75	11,39	10,94	11,37	12,45
Maksimum	3,95	11,31	10,35	10,18	10,89	11,29	12,37	11,59	13,50	17,37
Variasjon	0,48	2,09	0,55	0,81	0,49	0,54	0,98	0,65	2,13	4,92

De stabile temperaturene i klimarommet og den lille variasjonen i romtemperaturen i testrommet bør gi relative stabile overflatetemperaturer på vinduet i de fleste målepunktene. Likevel kan det registreres en differanse på nesten $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ på overflatetemperaturen øverst på vinduet i løpet av måleserien. En analyse av målingene i det øverste punktet viser at det kun er de to første målingene som står for den høyeste målte temperaturen. Etter dette stabiliserer temperaturverdien seg og varierer fra $13,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ til $12,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, noe som gir en variasjon på $1,24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dette likner mer på resultatene fra de andre målepunktene. Det er noe høyere sprik i målingene i denne måleserien sammenliknet med overflatetemperaturmålingene midt på vinduet. Overflatetemperaturene i kanten av vindusglasset er noe lavere sammenliknet med midt på vinduets bredde. Termografering viser at det er store varmetap i kanten av vinduet, spesielt helt nederst i hjørnet. Dette er illustrert i Figur 7.12 og Figur 7.13.



Figur 7.12 Termografering av hjørne nederst ved vinduskarmen

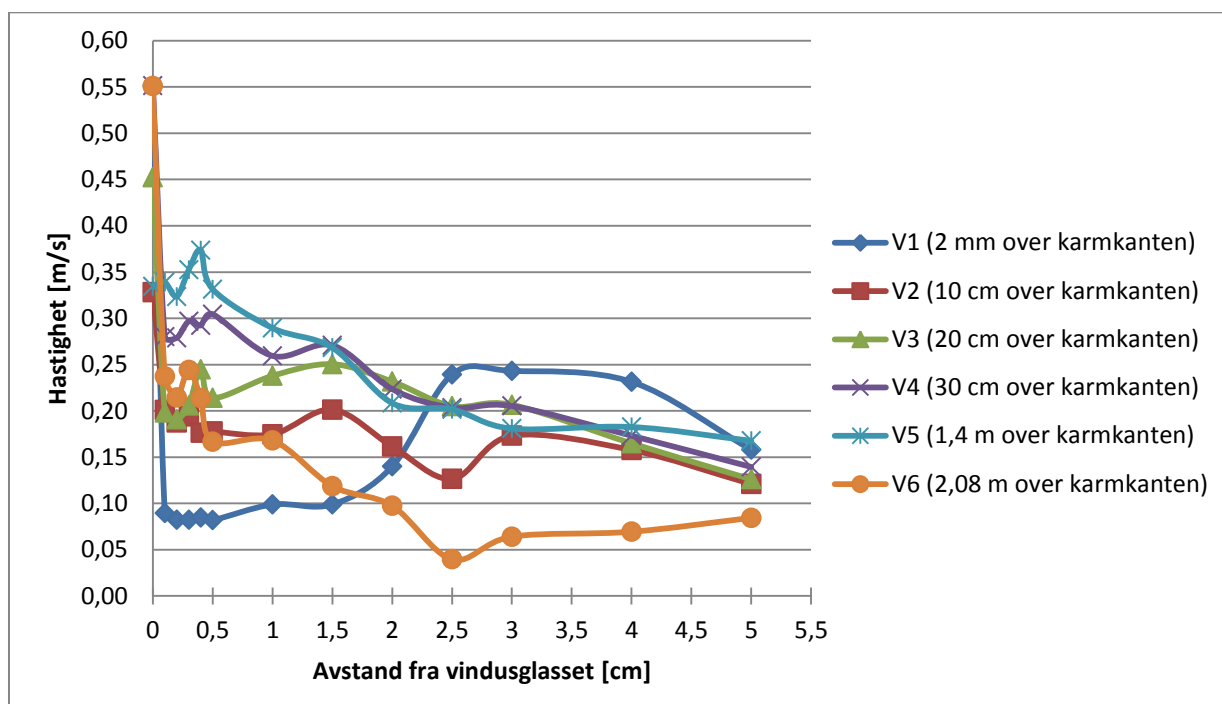


Figur 7.13 Termografering av øvre del av kanten av vinduet

Overflatetemperaturene registrert med termograferingskamera viser god overenstemmelse med de målte overflatetemperaturene med termoelementene.

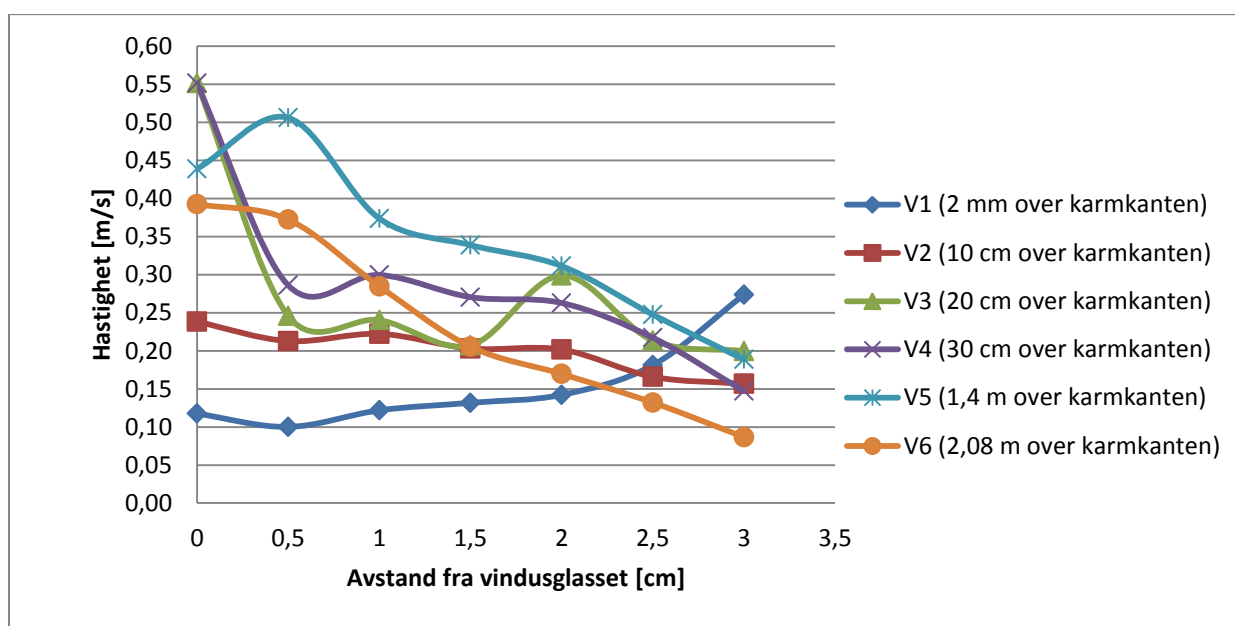
Hastighet og temperatur på luftstrøm

Med de samme metodene som nevnt i forrige delkapittel ble det gjort målinger i kanten av vinduet.



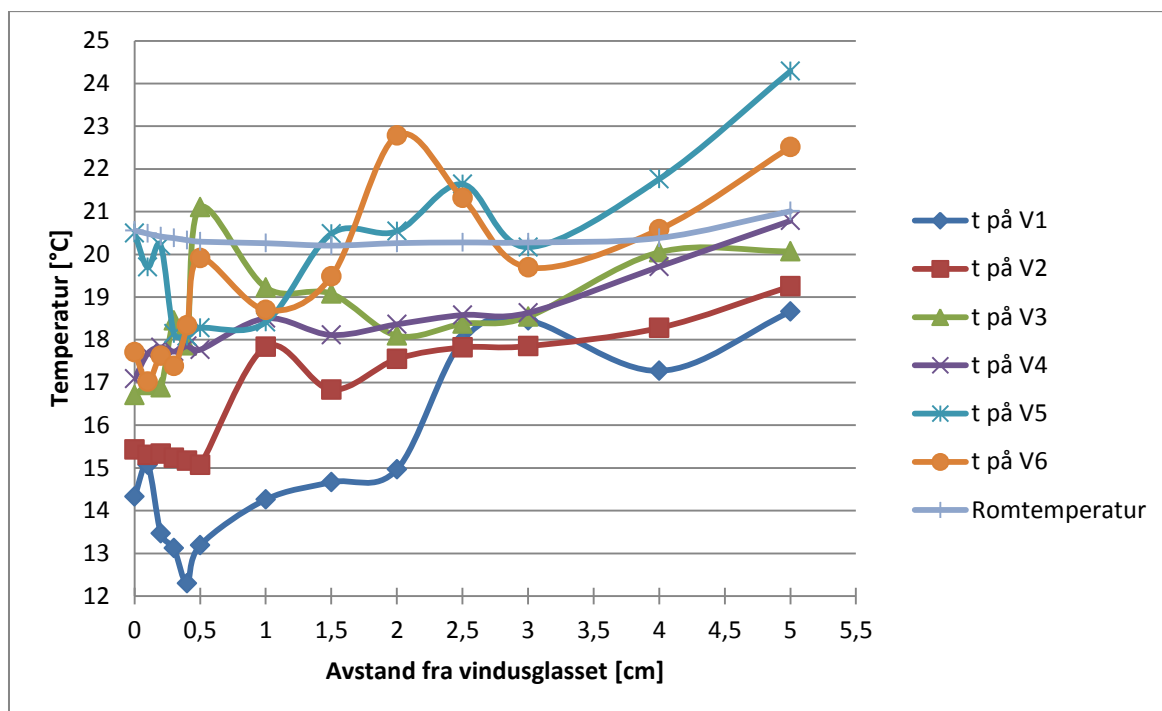
Figur 7.14 Resultatet fra hastighetsmålinger på kaldraset i kanten av vinduet med fastsatt stativ og manuell flytting av hastighetsfølerne

I kanten av vinduet måles det en del høyere hastigheter i enkelte målepunkter sammenliknet med målingene midt på vinduets bredde.



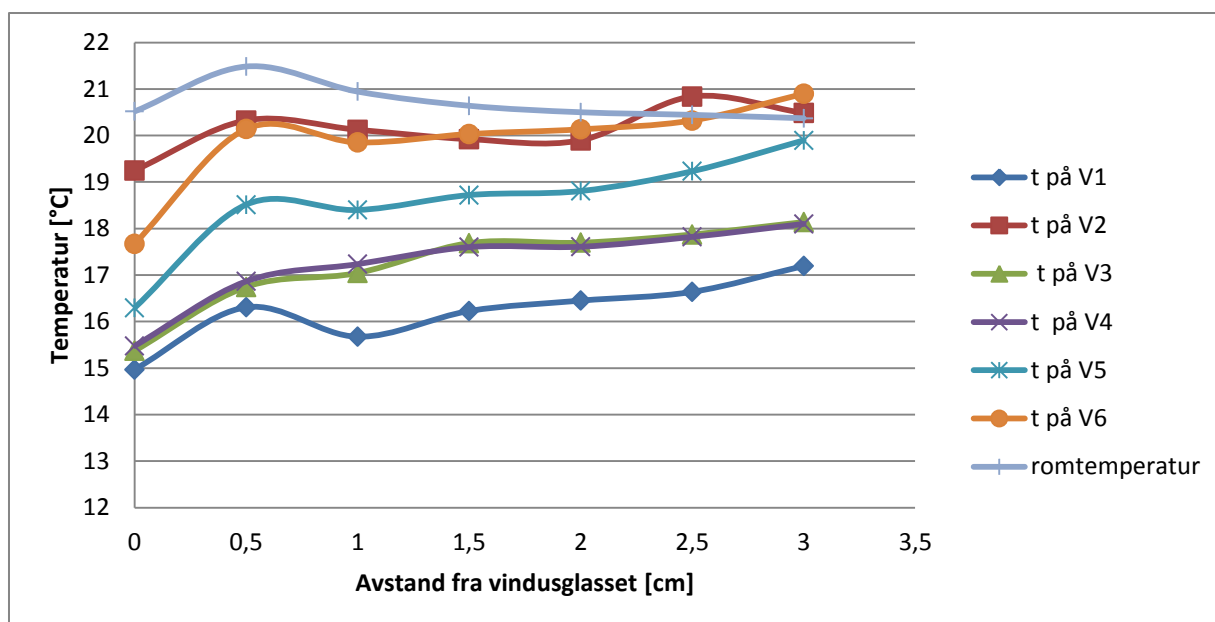
Figur 7.15 Resultatet av hastighetsmålingene til kaldraset i kanten av vinduet med flytting av hele stativet og alle hastighetsfølerne samtidig

Temperaturen til kaldraset ved ulike avstander fra vindusglasset målt i kanten av vinduet vises i de to neste figurene.



Figur 7.16 Resultatet av temperaturmålinger på kaldraset i kanten av vinduet med fastsatt stativ og manuell flytting av hastighetssensorene

I denne måleserien er det stor spredning i temperaturmålingene både i ulike målepunkt og innad i et målepunkt når avstanden fra vindusglasset varieres. Eksempelvis varierer temperaturen til luftstrømmen nederst ved karmkanten på målepunkt V1 fra 12,3 °C til 18,7 °C og i løpet av måleserien og det er 5,6 °C forskjell mellom temperaturen på V5 og temperaturen på V1 når de er plassert 5 centimeter fra vindusglasset.



Figur 7.17 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset i kanten av vinduet med flytting av hele stativet og alle termoelementene samtidig

Resultatene fra målingen der hele stativet flyttes illustrert i Figur 7.17 viser temperaturer som varierer relativt lite i forhold til målinger med den andre målemetoden. I tillegg registreres det i nesten alle målepunkter og avstander temperatur på luftstrømmen som er under romtemperatur.

Overgang fra laminær til turbulent strømning

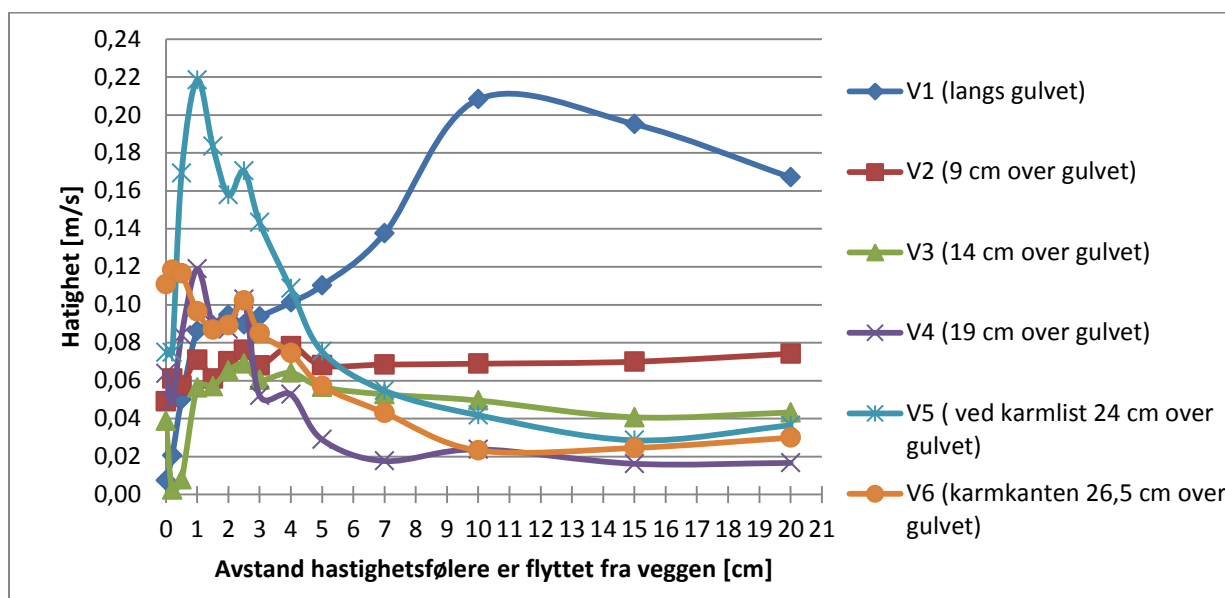
Tilsetning av røyk til luftstrømmen langs kanten av vinduet gir tegn til turbulent strømning høyere opp på vinduet enn ved forsøket midt på vinduets bredde. Om luftstrømningen er fullstendig turbulent nederst nær karmkanten er vanskelig å konkludere ut fra det som ble observert med røyktilsetningen. Det som kan sies med sikkerhet er at det er mye mer bevegelse og turbulens i strømmingen langs kanten av vinduet sammenliknet med observasjoner gjort mitt på vinduets bredde.

7.2.3 Målinger ved vinduskarmen og ut i rommet midt foran vinduet

Målingene av kaldrasstrømningen over vinduskarmkanten, nedover langs veggen og videre ut i rommet langs gulvet hadde tilsvarende overflatetemperaturer og og simulert utetemperatur som presentert i kapittel 7.2.1. Derfor er det bare hastigheten og temperatur på kaldrasstrømningen, samt romtemperatur som blir presentert i dette kapittelet. Navn på følere og tilhørende posisjon i rommet kan leses i Figur 7.4 innledningsvis i dette kapittelet.

Lufthastighet

Figuren under viser resultatet av hastighetsmålingene av kaldrasstrømningen over karmkanten, nedover langs veggen og videre ut i rommet langs gulvet. Tilhørende tabell til figuren kan leses i Vedlegg 3.

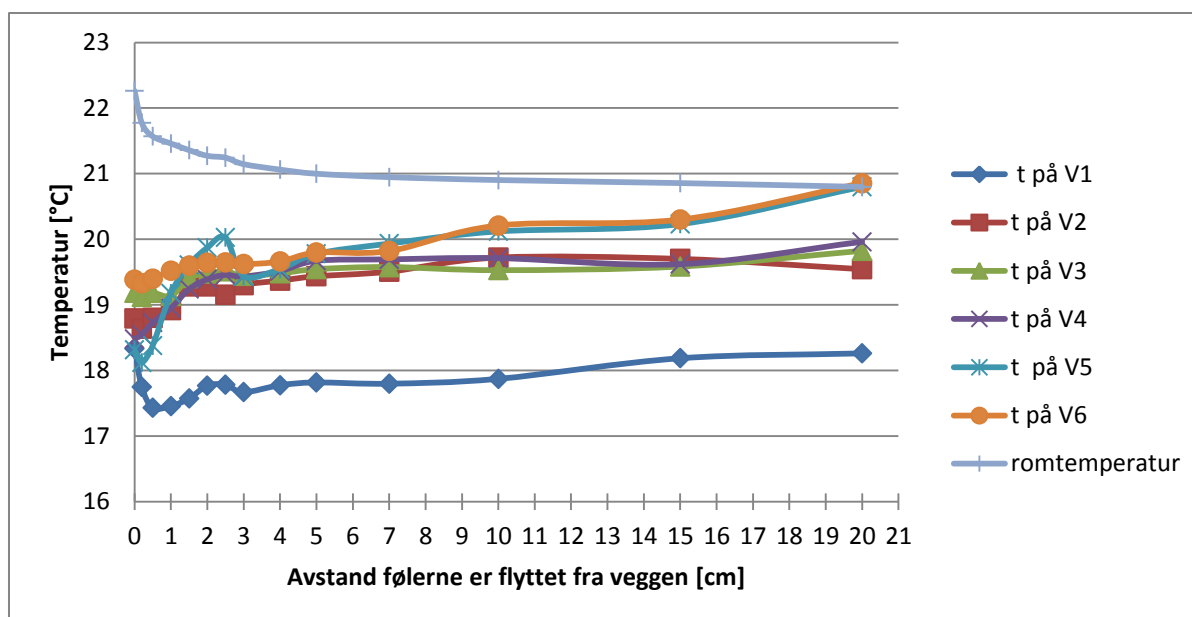


Figur 7.18 Resultat fra hastighetsmålinger på kaldraset over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet midt foran vinduet

Figur 7.18 viser stor hastighet ved karmlista rett etter karmkanten til vinduet. Etter hvert som stativet flyttes utover i rommet stiger hastighetene for strømmingen langs gulvet, mens den synker hos de følerne som registrerer hastighetene høyere opp. Det ble også gjort hastighetsmålinger 60 centimeter fra vinduet på grensen der oppholdssonen i rommet starter. Der ble det målt hastigheter ned mot 0,05 i alle målepunktene. De lave hastighetene er grunnen til at målepunktet ikke er med i figurene da dette hadde ført til justert akse i figuren og resultatene fra de andre punktene ville ha kommet dårligere frem. Oppholdssonen defineres som 0,1 meter over gulvet. I målepunkt V2 som er tilnærmet denne avstanden fra gulvet registreres det en lav hastighet på bare 0,07 m/s allerede 5 centimeter fra veggen.

Temperatur

Figur 7.19 viser temperaturen til luftstrømmens ved tilhørende hastighetsføler. Temperaturene til luftstrømmen 60 centimeter fra vindusveggen viser omtrent de samme temperaturene som den illustrerte temperaturen 20 centimeter fra vindusveggen. For å få til en bedre illustrert figur er ikke dette målepunktet tatt med i figuren.



Figur 7.19 Resultatet av temperaturmålingene til luftstrømmen over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet midt foran vinduet

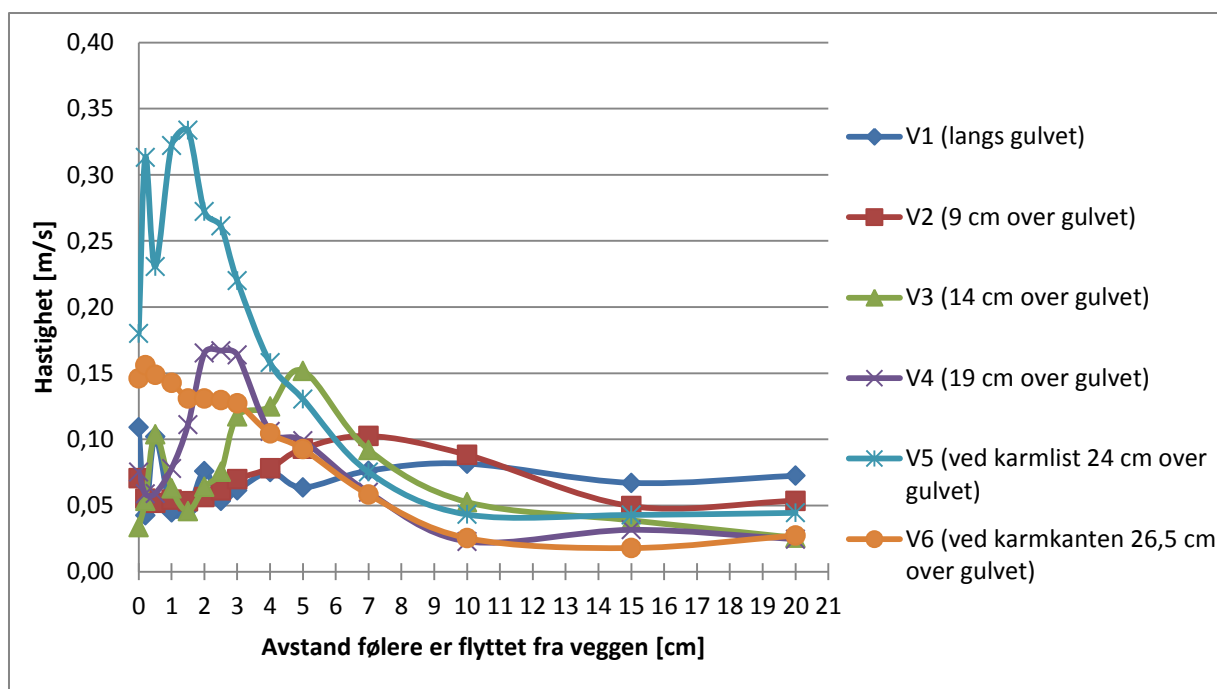
Temperaturen er lavest helt nede nær gulvet. Etter hvert som målepunktene beveger seg lenger ut i rommet går temperaturene i de øverste punktene mot romtemperatur. Det kan merkes er at ingen av målepunktene har feilmålinger der temperaturen er langt over romtemperaturen.

7.2.4 Målinger ved vinduskarmen og ut i rommet foran kanten av vinduet

Det er tilsvarende overflatetemperaturer og simulert utetemperatur som presentert i kapittel 7.2.2 gjennom denne måleserien. Derfor blir bare temperaturen og hastigheten til luftstrømmen samt romtemperautren presentert i dette kapitlet.

Lufthastighet

Figur 7.20 viser hastigheten på luftstrømmen over karmkanten og ned langs veggen og utover langs gulvet foran kanten av vinduet.

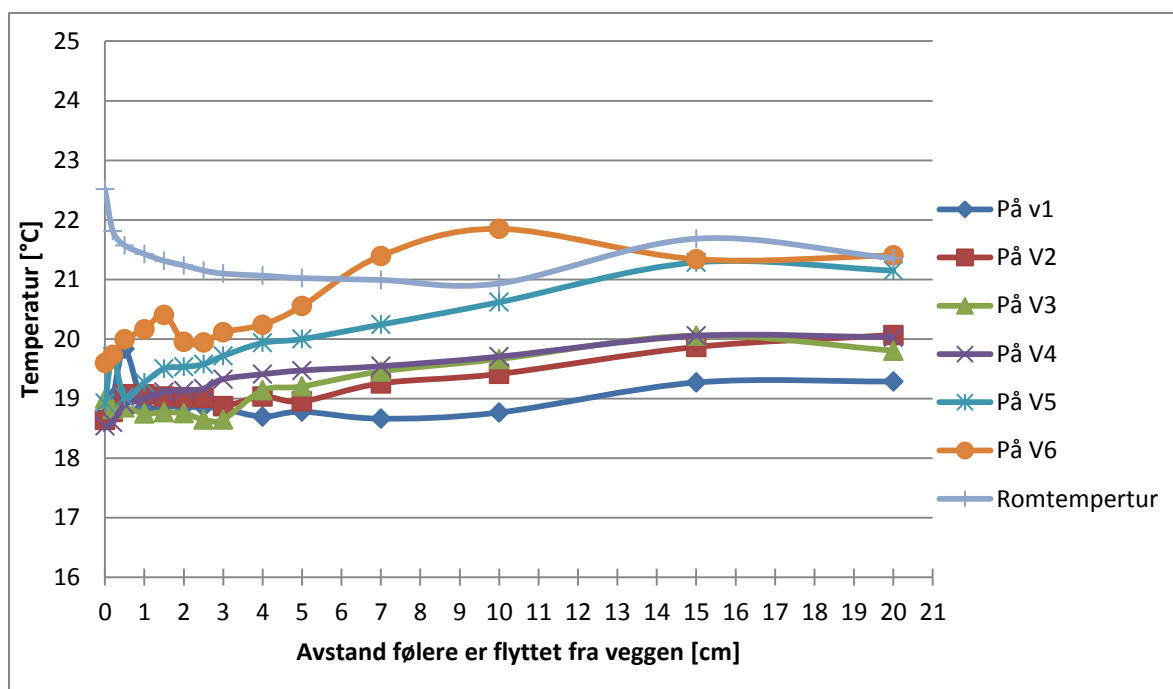


Figur 7.20 Resultat fra hastighetsmålinger på kaldraset over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet foran kanten av vinduet

I motsetning til hastigheten midt foran vinduet oppstår det lave hastigheter også helt nede nær gulvet etter kort avstand fra veggen. Ellers er strømningsmønsteret noenlunde det samme som i Figur 7.18 i forrige delkapittel. 60 centimeter fra veggen er det registrert en maksimal gjennomsnittshastighet i målepunkt V2, 9 centimeter over gulvet, på 0,07 m/s. Dette er et godt stykke under grenseverdien på 0,15 m/s som kan skape diskomfort.

Temperatur

Figur 7.21 viser resultatet av temperaturmålingene på kaldraset over karmkanten, nedover langs veggen og utover i rommet langs gulvet i kanten foran kanten av vinduet.



Figur 7.21 Resultat fra temperaturmålingene på kaldraset over karmkanten og videre utover i rommet langs gulvet foran kanten av vinduet

Her er det bare noen få målinger som er over romtemperaturen, ellers kan det observeres at lufttemperaturen går mot romtemperaturen for de øverste målepunktene etter hvert som måleinstrumentene flyttes lengre unna vinduet.

7.2.5 Kontrollmålinger av hastighetene nedover vindusglasset med en hastighetsføler midt på vinduets bredde

På bakgrunn av resultatene i de foregående kapitlene ble det bestemt å gjennomføre noen serier med kontrollmålinger der det bare er en hastighetsføler som flyttes nedover vinduet for å måle hastighet og temperatur til kaldraset i målepunktene. Målet med disse kontrollmålingene er å prøve å belyse måleoppsettets innvirkning på måleresultatet.

Romtemperatur og overflatetemperaturer

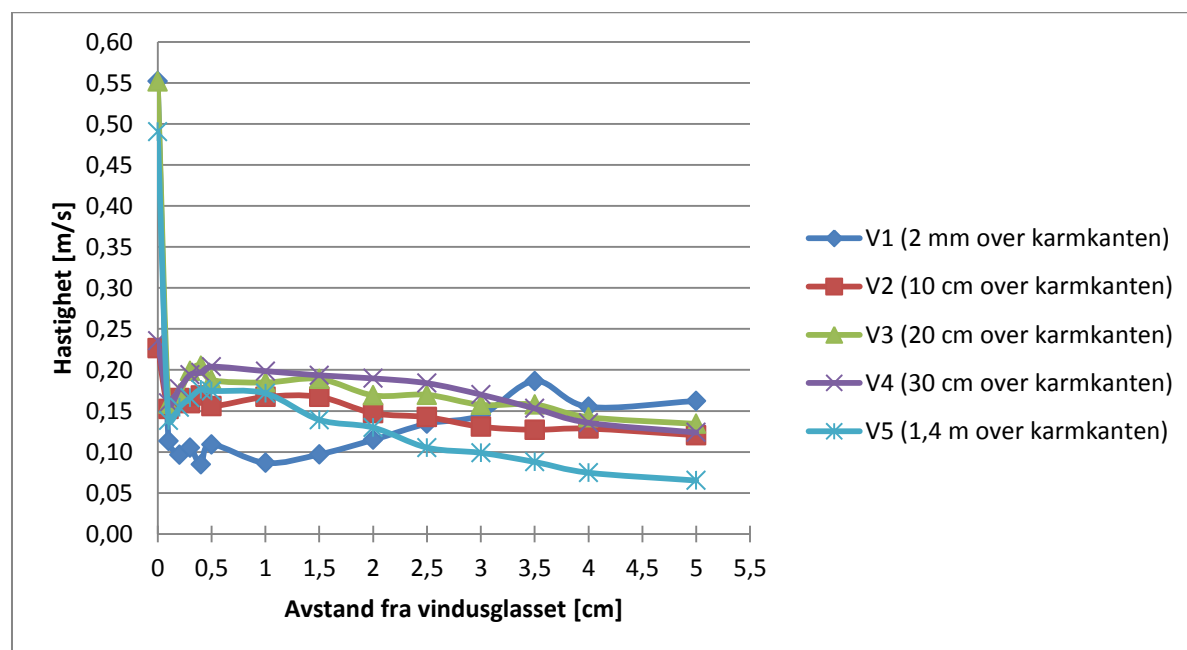
Det varme sommerklima utenfor laboratoriet har varmet opp tilhørende rom og det har sivet inn varme til testrommet fordi døra inn til testrommet har stått oppe. Det var en romtemperatur i testrommet på 21,5 °C da forsøkene begynte. På grunn av tidspress ble det bestemt at målingene skulle gjennomføres med denne romtemperaturen da det bare er én grad varmere enn det de andre forsøkene ble gjennomført ved. Poenget med kontrollmålinene er uansett og se på hastighetsmålingene i hvert punkt i forhold til hverandre i forbindelse med det opprinnelige måleoppsettet og dets innvirkning på måleresultatet. I løpet av loggeperioden varierer den gjennomsnittlige romtemperaturen i testrommet mellom 21,28 °C og 22,12 °C, noe

som gir en variasjon på 0,84 °C. Gjennom den første måleserien i målepunkt V1 er romtemperaturen stabil rundt 21,5 °C, mens for de andre fire seriene er romtemperaturen rundt 21,8 °C, se Figur 7.23. Temperaturene i klimarommet er relativt konstant og varierer mellom -19 °C og -19,8 °C i løpet av serien. Temperaturen i klimarommet øker gradvis i samme takt som romtemperaturen i testrommet øker. Den samme trenden blir målt på vinduets overflate i klimarommet. Den varierer mellom -16,6 °C og -17,9 °C.

Overflatetemperaturene på innsiden av vindusglasset i målepunktene varierer lite og viser samme trend som de originale målingene. Lavest temperatur er nederst på vinduet med målte verdier mellom 7 og 7,82 °C. Nest nederste målepunkt har overflatetemperatur på 15,6-15,8 °C. Målepunkt tg3, tg4 og tg5 har alle temperaturer på rundt 18 °C gjennom serien. Hvor de henholdsvis varierer mellom 17,4-18,4 °C, 18,1-18,6 °C og 18,3-18,7 °C.

Hastighet og lufttemperatur

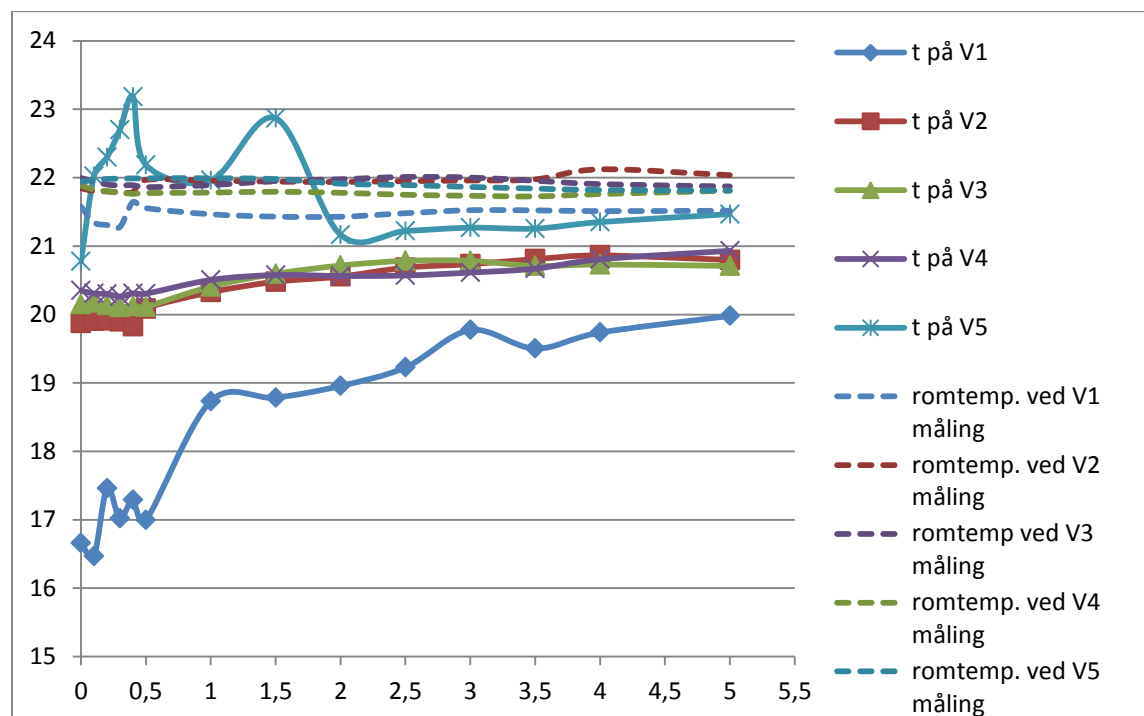
I Figur 7.22 illustreres hastighetsresultatene for de ulike målepunktene ved ulike avstander fra vindusglassoverflaten.



Figur 7.22 Resultatet av hastighetsmålingene nedover vindusglassoverflaten ved kontrollmålingene midt på vinduets bredde

Det kan observeres at de fleste målepunktene har samme trend som ved det opprinnelige måleoppsettet presentert i kapittel 7.2.1. Der flere av målepunktene har høyere hastighet enn målepunktene under seg.

De ulike temperatuere til luftstrømmen sammen med de tilhørende romtemperaturer til måleseriene kan leses i Figur 7.23.



Figur 7.23 Resultatet av temperaturmålingene til kaldraset ved kontrollmålingene

Det er verdt og merke seg at det er små svingninger i de tre midterste målepunktene og at det kun er t på V5 som kommer over den tilhørende målte romtemperaturen.

7.2.6 Standardavvik og turbulensintensitet for luftstrømningen ut i rommet

Standardavvik forteller noe om spredningen i resultater fra en måleserie i forhold til gjennomsnittet av målingene. Å dividere standardavviket på gjennomsnittet av målingene gir relativt standardavvik. For lufthastighet omtales dette relative standardavviket som turbulensintensitet (se likning (3.3) i kap. 3.2). Turbulensintensiteten er avgjørende for hvordan folk opplever luftbevegelse i rommet. Typisk varierer turbulensintensiteten til luftstrømmer i rom med mekanisk omrøringsventilasjon mellom 30 og 60 prosent (Blom, 1999). I rom som er naturligventilert eller utstyrt med foretrekkes ventilasjon er turbulensintensiteten normalt lavere. I laboratorieforsøket er det ikke noe aktivert ventilasjonssystem i testrommet. Det vil derfor ikke være noen tilluftstrømmer fra ventilasjonsanlegget som påvirker strømningsbildet i rommet. Tabell 7.6 viser resultatet av beregnede gjennomsnittshastigheter, standardavvik og relativt standardavvik for en måleserie midt foran vinduet med avstand 10-60 centimeter fra vinduet.

Tabell 7.6 Gjennomsnittshastigheter, standardavvik og relativt standardavvik for en måleserie for en luftstrøm langs gulvet ut i rommet

Avstand fra glasset	Målepunkt	Gjennomsnittshastighet [m/s]	Standardavvik	Relativt standardavvik
10 cm	V1	0,108	0,0080	7,37 %
	V2	0,065	0,0049	7,57 %
	V3	0,039	0,0123	32,01 %
	V4	0,021	0,0127	58,93 %
	V5	0,040	0,0084	20,92 %
	V6	0,024	0,0166	68,02 %
15 cm	V1	0,093	0,0059	6,34 %
	V2	0,079	0,0073	9,20 %
	V3	0,051	0,0134	26,51 %
	V4	0,025	0,0150	60,59 %
	V5	0,038	0,0093	24,71 %
	V6	0,024	0,0150	61,48 %
20 cm	V1	0,147	0,0148	10,04 %
	V2	0,053	0,0111	20,89 %
	V3	0,040	0,0144	36,00 %
	V4	0,029	0,0154	53,93 %
	V5	0,047	0,0066	13,84 %
	V6	0,042	0,0100	23,78 %
60 cm	V1	0,003	0,0048	168,42 %
	V2	0,065	0,0102	15,69 %
	V3	0,046	0,0159	34,37 %
	V4	0,036	0,0165	45,24 %
	V5	0,045	0,0119	26,43 %
	V6	0,035	0,0133	37,85 %

Det er store forskjeller i de beregnede relative standardavvikene. Den største turbulensintensiteten er i målepunktet V1 nederst, nærmest gulvet og 60 centimeter fra vinduet som er beregnet til 168,42 prosent. Med den lille hastigheten som måles i dette punktet vil ikke den store turbulensintensiteten i luftstrømmen ha noe betydning for trekkfølelse og den termiske komforten. Sammenliknet med de andre avstandene fra vinduet for målepunktet V1 ligger turbulensintensiteten der mellom 6,34 og 10 prosent. Målepunkter høyere opp lengre unna gulvet har høyere turbulensintensitet. I de aller fleste målepunktene er det dog målt så lave hastigheter at turbulensintensiteten har liten eller ingen betydning i forhold til termisk diskomfort som følge av trekk.

7.2.7 Asymmetrisk stråling

Tabellene i dette kapittelet viser resultatet av målt strålingsasymmetri forårsaket av vinduet i testrommet gjennomført som beskrevet i kapittel 5.5.4.

Tabell 7.7 viser resultatet fra målingene der sensoren var plassert 0,6 meter over gulvet og simulerte en sittende person i nærheten av vinduet (Fanger, et al., 1985). I denne måleserien varierer den simulerte utetemperaturen i klimarommet fra -20,6 °C til -20,8 °C, mens romtemperaturen i testrommet varierer mellom 21,1 °C og 20 °C. Resultatet i Tabell 7.7 viser at det blir noe mindre differanse mellom de to plane strålingstemperaturene og mindre asymmetrisk stråling etter hvert som avstanden fra vinduet øker.

Tabell 7.7 Plan strålingstemperatur for målinger 0,6 meter over gulvet

Avstand fra vindusglasset [m]	Temperatur på flate mot vindusglasset [°C]	Temperatur på flate ut mot rommet [°C]	Asymmetrisk strålingstemperatur [°C]
0,25	15,5	19,8	4,3
0,4	15,5	19,4	3,9
0,6	15,8	19,4	3,6
1	16,8	20,4	3,6

Måleresultatene fra målingene når sensoren var plassert 1,1 meter over gulvet og som simulerte en stående person (Fanger, et al., 1985) kan leses i Tabell 7.8. I denne måleserien varierer både temperaturen i klimarommet og testrommet kun med 0,1 °C. testrommet har en romtemperatur på 20,1 - 20,2 °C mens temperaturen i klimarommet varierer mellom -20,8 °C og -20,9 °C.

Tabell 7.8 Plan strålingstemperatur for målinger 1,1 meter over gulvet

Avstand fra vindusglasset [m]	Temperatur på flate mot vindusglasset [°C]	Temperatur på flate ut mot rommet [°C]	Asymmetrisk strålingstemperatur [°C]
0,4	16,1	19,8	3,7
0,6	16,6	19,7	3,1
1	17	19,8	2,8

Ut fra Tabell 7.7 og Tabell 7.8 kan det observeres at strålingsasymmetrien er noe lavere ved målinger 1,1 meter over gulvet sammenliknet med målingene 0,6 meter over gulvet.

8 Diskusjon

Måleresultat gir ikke alltid de svarene man forventer eller ønsker. I påfølgende kapittel følger en diskusjon av måleresultatene fra det foregående kapittelet.

8.1 Overflatetemperatur

Det måles ikke uniform overflatetemperatur på vinduet hverken i feltmålingene eller laboratoriemålingene. Dette kommer tydelig fram i laboratoriemålingene der simulert utetemperatur er rundt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Størst varmetap oppstår i randsonen. Årsaken er kuldebroer i overgangene mellom glass og karm i avstandslistene mellom glassene. De lave overflatetemperaturene i randsonen indikerer et varmetap som bør kunne unngås gjennom å videreutvikle vinduets oppbygging.

8.2 Hastighet

Det presenteres separate diskusjoner for kaldraset nedover vindusglasset og luftstrømmen over karmkanten og ut i rommet.

8.2.1 Luftstrøm nedover langs vindusglasset

Grunnleggende teori om naturlig konveksjonsstrømmer tilsier at strømmingen skal akselerere og øke hastigheten etter hvert som lufta går nedover vindusoverflaten. I feltmålingen er det vanskelig å se en slik akselerasjon i midten av vinduet selv med mange målepunkter. Den lave hastigheten til luftstrømmen ned langs midten av vinduet kan i seg selv være årsaken til at det ikke kan observeres noen klar akselerasjon. Nøyaktigheten til måleinstrumentet benyttet i feltmålingene er kun oppgitt for hastigheter mellom $0,15\text{ m/s}$ og 50 m/s . Det er usikkert hvor nøyaktig instrumentet er ved de lave hastigheter, noe som kan medvirke til at akselerasjonen ikke kan sees på målingene. I kanten av vinduet ses det noe akselerasjon nedover vinduet i feltmålingene med unntak av helt nederst i hjørnet. At akselerasjonen kan observeres bedre i kanten kan skyldes at det her er høyere hastigheter og mer luft i bevegelse.

Hastighetsresultatene fra laboratoriemålingene viste ingen tegn til akselerasjon nedover glassflaten, snarere tvert i mot. I måleserien midt på vinduets bredde og i kanten av vinduet måles det ved flere ulike avstander fra vindusglassoverflaten høyere hastigheter høyere opp enn lengre nede på vinduet. Spesielt midt på vinduets bredde er dette tydelig enkelte avstander fra vindusglasset. Det kan være flere årsaker til dette. For at kaldraset skal få en naturlig konveksjonsstrøm nedover langs vindu må det oppstå nok dominerende drivkrefter til å drive

strømningen nedover langs vinduet. Det kan hende at kaldrasstrømningen blir påvirket av andre luftbevegelser i rommet slik at den ikke klarer og mobilisere til å akselerere nedover flaten. En typisk kilde som kan forårsake en slik påvirkningskraft er luft fra ventilasjonsanlegget. Ventilasjonsanlegget var slått av under laboratoriemålingen og det kan følgelig ikke være luftstrøm derfra som påvirket kaldrasstrømningen. Det er vanskelig å si eksakt hvilke andre luftbevegelser som oppstår i rommet og om de påvirker kaldrasstrømningen. Luftbevegelse i rommet kan forårsakes av flater i rommet, menneskelig aktivitet, luftstrøm gjennom døråpningen etc. Et annet aspekt som kan ha påvirket hastigheten til kaldraset er plasseringen av hastighetssensorene på nedre del av vinduet. Det kan være at disse har vært plassert for nærme hverandre slik at hastighetsfølerne har påvirket hverandre. Selv om hastighetsfølerkula er liten er det snakk om lave hastigheter slik at det ikke skal store påvirkninger til før luftstrømmen avtar i hastighet. I tillegg til muligens å være fysisk i veien for luftstrømmen nedover langs vindusglasset kan de mengdene varme som genereres nær følerkula også ha innvirkning på resultatet og akselerasjon av luftstrøm. Ved små hastigheter vil varmen fra kula kunne påvirke luftstrømmen helt nær kula og skape mer luftbevegelse og høyere hastighet enn det kaldraset opprinnelig hadde. Dette usikkerhetsmomentet forsvinner dersom den virkelige hastigheten på kaldraset hadde vært større (jf. kap. 6.1.1). Hadde vinduet vært bredere slik at det hadde vært en større andel av vinduet som hadde stabile forhold upåvirket av karmkantene kunne hastighetsfølerne med fordel blitt satt ovenfor hverandre diagonalt. Da ville man sikret at hastighetsfølerne ikke påvirker hverandre når luftstrømmen kommer nedover langs vinduet. Kontrollmålinger gjort med en hastighetsføler som flyttes til alle målepunktene viste derimot at det ikke virker som avstanden mellom hastighetsfølerne er årsaken til at det er høyere hastighet i enkelte målepunkt høyere opp på vinduet enn lengre nede. Den virkelige forklaringen på den manglende akselerasjonen og den avtagende hastigheten er dermed usikker og det er nødvendig med flere forsøk med ulike måleoppsett for å avdekke årsaken.

Det måles høyere hastigheter på kaldraset i kanten av vinduet enn midt på vinduets bredde både ved feltmålingene og laboratoriemålingene. Det kan ha sammenheng med at det her er større varmetap og følgelig lavere overflatetemperatur på vindusoverflaten. Det oppstår da en større temperaturforskjell mellom romlufta og overflaten til vinduet noe som generer til mer varmeutveksling, mer luft blir avkjølt og raser nedover vindusglasset.

Helt inne nær vindusglassets overflate tilsier teorien at hastigheten til kaldraset skal være null på grunn av friksjonskrefter. Uansett målemetode er dette ikke tilfelle for noen av

målepunktene ved laboratoriemålingene. Hastighetsfølerkula tar inn hastigheter fra hele sin overflate og gir tilbake et gjennomsnitt av dette. Selv med sin lille overflate med en diameter på kula på rundt 1 millimeter vil deler av overflaten til denne følerkula komme bittelitt unna glassoverflaten. Det kan være denne delen av kula som er årsaken til at det registreres hastighet på det som regnes som helt inntil glasset. I tillegg kan det være andre forhold som påvirker målingene helt inn til glasset. Det er usikkert hvilke forhold dette er, men det kan muligens være strålingsutveksling mellom hastighetsfølerkula og vinduet. Temperaturforskjellen mellom vindusoverflaten og hastighetsfølerkula vil føre til at det utveksles strålingsvarme mellom de to flatene. Eller det kan være hastighetsføleren får en ukjent reaksjon når den presses mot en kaldere overflate som gjør at den viser høyere hastighet enn de faktiske forhold. Observasjon med røykgass underbygger antagelsen om en påvirket hastighetsmåling inntil glasset. Tidtaking av luftstrømmens ferd nedover langs glassflaten midt på vinduets bredde ga hastighetsresultater på cirka 0,15 m/s. Dette resultatet er mer forenelig med hastighetsmålingene gjort i andre målepunkter millimeter fra vindusglasset.

Det er ikke alle målepunktene som har den markant høyere hastigheten helt innerst ved vindusglasset. Spesielt med målemetoden der stativet er løst og alle hastighetsfølerne justeres likt fra glasset ved at stativet flyttes ut fra veggen er det flere målepunkter som har lavere hastighetsregistrering på luftstrømmen helt nær glassflaten. Håndtering av skjøre hastighetsfølere på et ustabil stativ kan ha ført til at enkelte følere ikke har kommet like nære glassflaten som de andre og at dette gir utslag på hastighetsregistreringen. Unøyaktig justering av følere kan også være årsaken til at noen målepunkter har lavere hastigheter enn forventet, ut fra de andre punktene, helt inntil glasset ved den andre metoden.

Teorien tilsier at hastigheten til kaldraset skal være størst nederst på vinduet. Dette registres ikke i laboratorieforskene verken i målingene midt på vinduets bredde eller i kanten av vinduet. Forklaringen er et fysisk fenomen. Nederst nær karmen vil det oppstå en stagnasjon av luftstrømmen på grunn av omstilling av retning. Med et målepunkt bare 2 millimeter over karmkanten har målepunktet sannsynligvis registrert hastigheten i dette stagnasjonsområdet og viser følgelig lavere hastighet enn de øvrige målepunktene høyere opp på vinduet.

8.2.2 Luftstrøm over karmkanten og langs gulvet

Teorien tilsier at hastigheten til kaldraset når sin maksimale hastighet rett før den slipper den kalde flaten og at luftstrømmen etter dette ikke akselerer noe mer. Figuren med

hastighetsvektorene illustrerer derimot at kaldraset har høyere hastighet langs gulvet enn den har nederst på vinduet. Dersom det antas at det nederste målepunktet befinner seg i strømmingens stagnasjonsområde er ikke dette oppsiktsvekkende. Det merkelige er at strømmingen langs gulvet også har høyere hastighet enn målepunktene 10 centimeter over karmkanten (som antas og være utenfor luftstrømmens stagnasjonsområde) dersom det ses bort fra hastighetsmålingen helt inn til glasset (jf. diskusjonen i kap. 8.2.1). Maksimalhastigheten til luftstrømmingen her er 0,124 m/s, men luftstrømmens langs gulvet har maksimal hastighet på 0,208 m/s. Ut fra teori skal det altså ikke være mulig. I tillegg til viser målingene svært lave hastigheter på luftstrømmen nedover langs veggen før den bres ut over gulvet og hastigheten går opp igjen (jf. Figur 7.6). Forklaringen på dette er vanskelig å fastslå, men det kan være påvirkningskilder og andre luftstrømmer i rommet som gjør at kaldrasstrømmingen øker langs gulvet.

8.3 Luftstrømtemperatur

Temperaturmålingene til kaldrasstrømmingen er særs usikre da resultatet viser at flere av temperaturene til luftstrømmen registreres med høyere temperatur enn målt romtemperatur ved flere av målingene. Kaldras er avkjølt romluft og følgelig ha lavere temperatur enn romtemperaturen. Det å få høyere temperatur på luftstrømmen i kaldraset enn romtemperaturen skal i utgangspunktet ikke være mulig ut fra fysikkens grunnleggende lover. En mulig feilkilde til målingene er plassering av termoelementet for nærme hastighetsfølerkula. Hastighetskula genererer varme og det vil være høyere temperatur i nærheten av denne (jf. kap. 6.1.1). Dette er et moment som ble prøvd unngått under målingene, men uoppmerksomhet eller at termoelementet har beveget på seg selv fordi den ikke har sittet godt nok fast kan ha ført til at dette usikkerhetsmomentet er årsaken til de høye temperaturmålingene på luftstrømmen. Det er gjennomsnittstemperaturen av en måleserie på 30 registreringer som blir presentert i figurer og tabeller. Det ble sjekket gjennom flere av måleregistreringene for å kontrollere at det ikke er en eller flere av registreringene som fører til at gjennomsnittstemperaturen blir mye høyere enn det som er fremtredende for målingen i punktet av måleserien. Det ble ikke avdekket noe slikt så det er nærliggende å tro at det er plasseringen av termoelement for nærme hastighetsføleren som er årsaken til de høye luftstrømtemperaturene. Det er grunn til å tro at de verdiene som er under romtemperaturene ikke har blitt påvirket av dette fenomenet og at disse resultatene er pålitelige nok til å brukes i videre vurdering av kaldras.

8.4 Overgang fra laminær til turbulent strømning

Strømningsbildet til kaldrasstrømningen baseres på menneskelige observasjoner med det blotte øye. Resultatet av overgangen fra laminær til turbulent strømning som presenteres er derfor basert på subjektive betraktninger og vurderinger. Tolkningen tilsier at det skapes mer luftbevegelse og turbulens én centimeter fra vinduets glassoverflate enn helt inn til glasset. Det kan ha sammenheng med at strømmingen der har noe større bevegelsesfrihet og blir ikke i like stor grad begrenset av vinduets glassoverflate. En annen forklaring kan være at det lettere kan komme andre luftstrømmer som forstyrrer kaldraset og gir mer turbulens i luftstrømmen litt unna vindusglasset. Med røykgass er det kun luftstrømmen som er 0-2 centimeter fra vindusoverflaten som følger flaten og har en typisk kaldrasform. Strømninger utenfor dette blir klart påvirket av andre luftstrømmer og forsvinner delvis utover i rommet. Dette kan tyde på at den naturlige konveksjonsstrømmen nedover langs vinduets glassoverflate er liten og ikke har nok krefter til å opprettholdes i stor skala og tykkelse.

Det er mer bevegelse i strømmingen langs kanten av vinduet der hastigheten er større. Det kan virke som omslaget fra laminær til turbulent strømning skjer tidligere her enn midt på vinduets bredde. Årsaken til dette kan være at det er enklere å mobilisere en turbulent strømning med høyere hastigheter og mer luft i bevegelse. Mer om overgangen fra laminær til turbulent strømning kan leses i kapittel 9.3.1.

8.5 Asymmetrisk stråling

Det måles litt høyere asymmetrisk strålingstemperatur 0,6 meter over gulvet kontra 1,1 meter over gulvet (jf. kap 7.2.7). Overflatetemperaturen på vinduet er noe kaldere nederst på vinduet enn høyere opp og det er sannsynligvis forklaringen på hvorfor det skapes noe mer asymmetrisk stråling 0,6 meter over gulvet fremfor 1,1 meter over gulvet.

I følge den norske standarden NS- EN ISO 7730 skal det ikke være mer enn 5 prosent som skal føle termisk diskomfort som følge av asymmetrisk stråling. Det medfølger at strålingstemperaturasymmetrien ikke kan være mer enn 10 °C (jf. Figur 3.3 i kap. 3.3). Begge måleseriene i dette forsøket viste strålingstemperaturasymmetrien et godt stykke under denne grensen. Resultattabellene i kapittel 7.2.7 viser at strålingstemperaturasymmetrien aldri når over 4,5 °C, noe som er under halvparten av den maksimale strålingstemperaturasymmetri grensen i den norske standarden NS-EN ISO 7730.

9 Sammenlikning av måleresultater og beregningsmodeller

I dette kapittelet skal dagens formelverk vurderes opp mot måleresultatene fra forsøkene. Gjennom feltmålingene er det varierende uteforhold som det er vanskelig og kontrollere. Uteklimate kan ha hatt variasjoner i form av temperatur- og vindendringer i løpet av måledagen og det er usikkert hvordan dette eventuelt har innvirket på måleresultatet. Et annet usikkerhetsaspekt ved feltmålingene er U-verdien for selve glasset til vinduet i kontorbygget. Dokumentasjonen som er tilgjengelig gir bare en total standard U-verdi og ingen informasjon om hvordan rutekombinasjonen er bygd opp i forhold til tykkelse på glass og gasslag, gasstype eller emissivitet. Dette gjør det vanskelig å regne seg fram til en korrekt U-verdi for glasskombinasjonen som kan brukes til en eventuell sammenlikning av beregningsmodeller og målinger. De transiente uteforholdene og usikkerheten rundt rutes U-verdi gjør at det kun foretas sammenlikninger av beregningsmodeller og målingene gjort i laboratoriet på NTNU. I laboratoriet er det kontrollerte forhold og god dokumentasjon på det installerte vinduet. Målingene derfra er derfor velegnet som grunnlag for sammenlikning opp mot dagens beregningsmodeller.

For å regne med beregningsmodellene kreves det bruk av noen konstante verdier på bestemte variabler i likningene. I den teoretiske beregningen av overflatetemperaturen er utetemperaturen satt til -20 °C og innetemperaturen til 21 °C . Noe som er tilnærmet de forholdene som måles ved forsøket i laboratoriet. Med en simulert utetemperatur på -20 °C må glassets standard U-verdi korrigeres for klimapåvirkningen. Beregningen gjøres ved hjelp av programmet laget av ENSI AS omtalt i kapittel 3.4. Korrigeringsberegningene gir vindusglasset en U-verdi på $0,61\text{ W/m}^2\text{K}$ som brukes i utregningene. Øvrige variabler som er satt konstante i beregningene er volumetrisk termisk ekspansjonskoeffisient $\beta=1/300$ og innside termisk motstand $R_i=0,13\text{ m}^2\text{K/W}$. Formlene brukt til beregningene i dette kapittelet finnes i kapittel 3.5. I beregningsmodellene er det maksimalhastigheter til luftstrømmen som regnes ut. Det vil derfor være maksimalhastigheten av gjennomsnittsmålingene i hvert målepunkt som danner grunnlaget for sammenlikningen. Da det er mye usikkerhet rundt måleresultatet til hastigheten helt inn til vindusglasset (jf. kap. 8.2.1) blir disse sett bort fra som grunnlag i sammenlikningen. Det brukes maksimalhastighet fra de andre avstandene fra vindusglasset for hvert målepunkt. Resultater fra måleserien der stativet med hastighetsfølerne er satt fast og følerne flyttes manuelt fra vindusglasset brukes i sammenlikningen.

9.1 Begrensninger ved formelverkene

Ved sammenlikning av formelverk og målingene i laboratoriet er det noen aspekter som kan være begrensende faktorer for å få formelberegningene til å stemme med måleresultatene.

9.1.1 Historisk perspektiv

Formlene som presenteres i denne oppgaven er utviklet gjennom ulike tidsepoker da standarden på vinduene var en annen enn den er i dag. U-verdikravet til vinduer er i norske byggeforskrifter halvert fra $2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ til $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ fra år 1987 til 1997. Det generelle U-verdikravet til vinduer på $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ gjelder fortsatt i dagens byggeforskrift fra 2010. I tillegg til den ordinære byggeforskriften finnes det en egen standard for passivhus der U-verdikravet til vinduer er satt til $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$. Skåret begynte utvikling av sitt formelverk tilbake på 1970-tallet. Hans forenklinger harmonerer med forhold der vinduene sannsynligvis har hatt U-verdi tilsvarende krav i teknisk forskrift fra 1987 eller dårligere. I formelverket presentert av Nielsen i Danvak brukes en konstant fra en dansk byggeforskrift fra 1994 i beregningen av hastighet. Dette formelverket er altså av nyere dato enn Skårets, men det har skjedd mye i vindus- og glassbransjen de siste 20 årene så også dette formelverket er trolig basert på vinduer med dårligere egenskaper enn det som finnes på markedet i dag. Heiselbergs formelverk for hastigheter til luftstrømmen fra kaldras som går ut i oppholdssonen bygger på laboratorieforsøk og formelverket ble ferdigstilt i 1994. Det antas at dette formelverket har tilpasninger til vinduer fra denne tiden. Laboratorieforsøkene i denne oppgaven er gjennomført på et vindu med en standard total U-verdi på $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$. Det er det beste isoleringsvinduet som finnes på markedet i dag i den størrelsen. Det har en U-verdi som er vesentlig bedre enn det som er tilfelle for vinduene brukt i utviklingen av formelverket til både Skåret, Danvak og Heiselberg. Dette bør tas i betraktning når formelverkene sammenliknes med måleresultatene.

9.1.2 Forenkling av virkeligheten

Et annet aspekt tilknyttet utarbeidelsen av formelverket i tillegg til vinduets historiske utvikling av standard er forenklinger. Formelverk fremstiller en simplifisert matematisk modell av aktuelle forhold. I den forbindelse gjøres det ofte forenklinger som ikke er helt forenelig med realitetene. For eksempel vil den indre varmemotstandskoeffisienten variere med utetemperaturen på lik linje med U-verdien. Allikevel er denne satt som en konstant verdi uavhengig av de klimatiske forholdene. Et annet eksempel er den volumetriske termiske ekspansjonskoeffisienten som i utgangspunktet varierer med en gjennomsnittstemperatur av overflaten og lufta omkring. Forhold rundt vinduet kan være transiente og kan innvirke på de

to temperaturene som danner grunnlaget for den volumetriske termiske ekspansjonskoeffisienten. I beregningene settes denne verdien allikevel ofte konstant. Den volumetriske termiske ekspansjonskoeffisienten er uttrykt som $1/T$ og liten endring i temperaturen gir minimal endring av volumetrisk termisk ekspansjonskoeffisient. Det spiller derfor en liten rolle i den store sammenhengen dersom denne variabelen settes konstant selv om forholdene er variable. Andre forenklinger gjøres også av utvikleren av formelverket underveis i formeldannelsene. For å oppfatte disse er det viktig å lese forutsetningene for bruk av formelverket. En typisk antagelse som gjøres i formeldannelsen er bestemmelse av strømningstype. Ofte er strømningen komplisert og det er ikke alltid gitt at forenklingen om strømningen er laminær eller turbulent stemmer med virkeligheten. Ulike forenklinger av virkeligheten og antagelser gjøres altså ved dannelse og bruk av formlene. Sannheten er at forholdene som regel er mye mer kompleks og sammensatt enn det de matematiske modellene klarer å beregne. Det kan være en tankevekker når formelverk og målinger sammenliknes videre i dette kapitlet.

9.1.3 Turbulent eller laminært strømningsbildet

Formelverket til Nielsen i Danvak gjelder kun for fullt turbulente strømninger. Skåret har et formelverk for laminære strømninger og et for turbulente strømninger (jf. kap. 3.5.2). Dersom det er klart om strømningen er laminær eller turbulent er det uproblematisk å velge formelverk ut fra strømningsbildet. Iakttagelser av luftstrømmen langs vinduet i laboratoriet konkluderer med at kaldrasets strømningsbildet kan være komplisert og det er ikke alltid like lett å si med sikkerhet om strømningen er turbulent, laminær eller en blanding i overgangsfasen. Antagelser om strømningsbildet til utregninger kan dermed avvike noe fra virkeligheten i laboratoriet og kan være en av årsakene til at teori ikke stemmer godt overens med målingene. Da det er stor usikkerhet rundt bruken av turbulent formelverk i forhold til de faktiske forholdene ved forsøkene er disse resultatene markert med rød tekst i sammenlikningstabellene.

9.1.4 Skårets formelverk

En forenkling av virkeligheten finnes i Skårets formelverk. Der skal det være uniform temperatur på vindusoverflaten, noe som målingene viser at egentlig ikke er tilfelle. Likevel sier Skåret at man kan bruke vindusglassets middeltemperatur over høyden uten å tape særlig nøyaktighet i beregningene (Skåret, 2000).

9.1.5 Danvaks formelverk

Formelverket fra Nielsen i Danvak gjelder kun for fullt utviklet turbulente strømninger. Heiselberg er i likhet med Nielsen en del av nettverket Danvak og det er naturlig og koble hans kriterier for når strømmingen er laminær, turbulent eller begge deler i evalueringen av når formelen til Nielsen kan brukes. Dersom strømmingen er laminær eller i den transiente overgangen med både laminært og turbulent strømningsbilde vil ikke formelverket fra Nielsen i Danvak bli vurdert i sammenlikningen.

9.1.6 Heiselbergs formelverk

Heiselbergs hastighetsformler for kaldrasstrømmingen som går ut i oppholdssonen er som nevnt tidligere basert på målinger gjort på vindu som går helt ned til gulvet. Vinduet som er installert i testrommet på NTNU er plassert 26 centimeter over gulvet og formelverket til Heiselberg kan følgelig ikke brukes som sammenlikningsgrunnlag. I forsøket gjort i laboratoriet ble det påvist lave hastigheter langs gulvet 60 centimeter fra vinduet som definerer starten på oppholdssonen. Det ble derfor ikke gjort målinger med lengre avstand fra vinduet. Tilnærmingen undersøkt av Rueegg et al. (2001) som er omtalt i kapittel 3.5.2 er gjort én meter fra vinduet. Da det er usikkert om denne tilnærmingen gjelder for andre tilfeller enn det som er testet kan ikke denne tilnærmingen brukes til vurdering av måleresultatet opp mot formelverk.

9.2 Overflatetemperatur

Ut fra formel (3.8) kan en teoretisk overflatetemperatur for innsiden av vinduet beregnes. Denne temperaturen gjelder bare for stasjonære forhold ved den utetemperaturen, innetemperaturen, U-verdi og innvendige varmegjennomgangstall man velger å bruke i likningen. Den teoretiske utregnede overflatetemperaturen gjelder typisk for senteret av vinduet der det ikke er noen påvirkninger fra kuldebroer og karmen. Med de konstante forholdene beskrevet innledningsvis i dette kapittelet regnes den teoretiske overflatetemperaturen ut til å være 18,34 °C. Sammenliknet med den målte temperaturen 1,4 meter over karmkanten, som er nesten midt på vinduet er det en differanse mellom de to temperaturene på cirka 0,3 °C. Resultater fra målinger gjort i forbindelse med denne oppgaven viser at bruk av den teoretisk beregnede senterverdien ikke gir et riktig totalbilde av vinduet i sin helhet da det er lavere overflatetemperaturen nederst og i kanten av vinduet. I beregninger av egenskaper til kaldras er det som regel den utregnede teoretiske overflatetemperatur fra senteret av vinduet som brukes. For å få bedre samsvar med teori og virkelighet bør U-verdien justeres opp dersom det skal regnes kaldras i kanten av vinduets glassflate. Et spørsmål som

også bør vurderes er hvor mye den lave overflatetemperaturen nederst på glasset påvirker kaldrasen når det kommer ned til karmkanten.

9.3 Luftstrømning langs vinduets glassflate

Fra målingene av luftstrømmen langs vinduet er det mange spennende resultater som det er interessant og diskutere opp mot formelverk presentert i kapittel 3.

9.3.1 Overgangen fra laminær til turbulent strømning

Grashofstall i likning (3.9) og formelverket til Skåret eller figuren til Heiselberg kan gi svar på hvor på vinduet strømmingen begynner å bli turbulent. Med de betingelsene som er nevnt innledningsvis i kapittelet og egenskapene til vinduet som kan leses i kapittel 5.2 blir den teoretiske differansen mellom vinduets overflatetemperatur og romtemperaturen beregnet til 3,25 °C. Det måles ikke en uniform overflatetemperatur på vindusglasset. Å bruke en gjennomsnittlig middelvei for overflatetemperaturen basert på måleresultatene kan gi en mer realistisk tilnærming. I sammenlikningene i dette kapittelet er det regnet ut en middelovertemperatur basert på målingene midt på vinduets bredde og en midlere overflatetemperatur fra målingene i kanten av vinduet. Det nederste målepunktet for overflatetemperatur er vesentlig lavere enn målepunktene høyere opp på vinduet både midt på vinduets bredde og i kanten (jf. Tabell 7.4 og Tabell 7.5). Det nederste målepunktet er ikke tatt med i beregningene av middelovertemperatur fordi det ville bidratt til å gi en for lav overflatetemperatur i forhold til det som er representativt for største delen av vindusglassets høyde. For målinger midt på vinduets bredde blir den beregnede midlere overflatetemperaturen 17,25 °C, mens den for målinger i kanten av vinduet blir omlag 11 °C.

Dersom middeltemperaturen ut fra målte overflatetemperaturer og verdien for luftas viskositet fastsatt i litteraturen til Skåret (2000) til $15,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ brukes regnes Grashofstallet ut til $9,48 \cdot 10^9$ for strømmingen nederst midt på vinduets bredde og $2,53 \cdot 10^{10}$ for strømmingen nederst i kanten av vinduet. I følge Skåret skal strømmingen da være turbulent nederst både midt på vinduets bredde og i kanten av vinduet. Heiselberg mener derimot at strømmingen er fullstendig turbulent nederst i kanten, mens den er i den transiente overgangsfasen nederst midt på vinduets bredde (jf. kap.3.5.1). Ytterligere utregninger og avlesninger av figurer kan gi svar på hvor på vinduet overgangen fra laminær til turbulent strømning skjer. Videre i dette kapittelet følger en analyse av Skårets og Heiselbergs beregninger på overslaget fra laminær til turbulent strømning.

Skårets beregningsmodell

Videre beregninger med grenseverdien for omslaget fra laminær til turbulent strømning som er fastsatt av Skåret til å være et Grashofstall på 10^9 kan gi svar på når lufta slår om fra laminær til turbulent. Med den teoretiske utregnede temperaturdifferansen og de betingelsene som er gitt omtalt i kapittel 3.5.2 tilsier teorien til Skåret (2000) at strømmingen skal starte og være turbulent ved 1,063 meter målt fra toppen av vindusglasset (se likning (3.12)). Fullstendig turbulent vil strømmingen være etter 1,32 meter. Resultatene fra røykgasstilsetning omtalt i kapittel 7.2.1 viser at strømmingen får innslag av turbulens mye senere enn det den teoretiske utregningen tilsier.

Differansen mellom overflatetemperaturen basert på målinger midt på vinduets bredde og romtemperaturen ligger omtrent en halv grad høyere enn den beregnede verdien. Videre beregninger på bakgrunn av de målte verdiene tilsier at strømmingen skal starte og være delvis turbulent etter 0,93 meter. Altså enda høyere opp enn ved den teoretiske beregnede overflatetemperaturen. Dette stemmer enda mindre med observasjoner gjort med røykgass.

De lave overflatetemperaturene målt i kanten av glasset gjør at luftstrømmen i dette området på glasset i teorien skal slå over til turbulent tidligere enn midt på vinduets bredde. Midlere overflatetemperatur basert på målte temperaturer i kanten av vinduet og romtemperatur gir en differanse mellom de to temperaturene på omlag $10\text{ }^\circ\text{C}$. Denne temperaturdifferansen tilsier at overgangen fra laminært til turbulent strømning langs kanten av vindusglasset skal skje 0,73 meter ned fra vindusglassets øvre kant. Resultatet fra røykgasstilsetningstesting omtalt i kapittel 7.2.2 tilsier at det er mer turbulens i strømmingen og at tendensen til turbulens skjer tidligere her enn midt på vinduets bredde. Men det skjer ikke så tidlig som teorien til Skåret tilsier at det skal gjøre. Turbulensen i strømmingen kommer tydelig fram med røykgasstilsetning cirka én meter over karmkanten.

Heiselbergs figur

Observasjoner gjort i laboratoriet stemmer altså ikke med teorien til Skåret når det gjelder hvor på vinduets glassflate luftstrømmingen skifter fra laminær til turbulent. Figuren til Heiselberg presentert i kapittel 3.5.1 bygger på hans teori om når strømning er fullstendig laminær, turbulent eller befinner seg i et grenseområde. Ved teoretisk beregnet differanse mellom vindusoverflatens temperatur og romtemperaturen på $3,25\text{ }^\circ\text{C}$ og glasshøyden på 2,66 meter skal strømmingen i følge figuren komme inn i det transiente området der den både er laminær og turbulent ved 1,73 meter målt fra toppen av vinduets glassoverflate. I følge

samme figur rekker ikke luftstrømmen å slå om til fullstendig turbulens i løpet av ferdselen nedover langs vinduets glassflate.

Dersom figuren leses utfra bruk av temperaturdifferansen basert på målingene midt på vinduets bredde i laboratoriet vil strømmingen bli en transient strømning som er både laminær og turbulent noen centimeter tidligere enn ved den teoretiske tilnærmingen. Avlesning av figuren til Heiselberg indikerer at dette vil skje når strømmingen kommer 1,58 meter ned på vindusglasset, som er 15 centimeter lengre opp enn ved den teoretiske beregnede temperaturdifferansen.

Ved temperaturdifferansen mellom den midlere overflatetemperaturen basert på målte overflatetemperaturer i kanten av vinduets glassflate og romtemperatur vil strømmingen i følge avlesninger i Heiselbergs figur slå om til fullstendig turbulens før den når karmkanten nederst på vinduet. Luftstrømmen vil nå det transiente området etter omtrent 1,15 meter og være fullstendig turbulent fra 2,21 meter og videre ned til karmkanten.

Som nevnt tidligere er det vanskelig å si om den observerte strømmingen er fullstendig utviklet turbulent eller om den er i det transiente område med både turbulent og laminær strømning på den nedre delen av vinduet. I tillegg kan det hende at avlesningen av figuren er noe unøyaktig da det er få aksepunkter i figuren. Dermed er det vrient og si om teorien til Heiselberg stemmer helt med det som faktisk er tilfelle ved laboratoriemålingene.

Overgangen inn i den turbulente fasen kommer noe senere nede på glasset ved avlesning av figuren til Heiselberg sammenliknet med beregninger gjort med teorien til Skåret. Hvor mye turbulens det er i det transiente sjiktet med både laminær og turbulent strømning er vanskelig å si. Det er nærliggende og tro at den dominerende strømmingstypen vil komme tydeligst frem når røyk tilsettes luftstrømmen. Det kan hende at nettopp dette er tilfelle ved luftstrømobservasjonen gjort i laboratoriet. Gitt at den turbulente strømmingen ikke dominerer strømmingen før etter 2,50 meter målt nedover fra øverst på glasset da turbulens kan observeres i den røyktilsatte luftstrømmen. Da stemmer strømningsbildet ganske godt med avlesningene i figuren til Heiselberg.

9.3.2 Hastighet

Den teoretiske overflatetemperaturen regnet ut i kapittel 9.2 brukes videre i beregningene av hastighet til luftstrømmen i kaldraset. Den teoretiske utregnede overflatetemperaturen begrenser sammenlikningen til kun og gjelde for målinger nedover midt på vinduets bredde da

den teoretiske overflatetemperaturen avviker for mye fra virkelige målinger i kanten av vinduet. Antagelsen om strømmingen er laminær eller turbulent er basert på observasjoner med røyktilsetninger i luftstrømmen beskrevet i kapittel 7.2.1. Skårets beregninger tilsier at strømmingen skal være turbulent nederst på vinduet (jf. kap. 9.3.1). Siden det observeres noe turbulens i kaldraset ved de to nederste målepunktene og formelverket sier at strømmingen skal være fullstendig turbulent her antas det at strømmingen er tilstrekkelig turbulent til å bruke Skårets formelverk for turbulentstrømning i disse punktene. Heiselbergs teori tilsier at strømmingen er i overgangsfasen mellom laminær og turbulent strømning ved alle målepunktene. Observasjon med røykgass kan tyde på at dette stemmer dersom det er den turbulente strømmingen som dominerer nederst ved karmkanten (jf. kap. 9.3.1). Siden teorien fra Danvak, tilknyttet teorien til Heiselberg, bare gjelder for fullstendig turbulente strømninger brukes ikke dette formelverket som grunnlag for sammenlikning mellom beregningsmodeller og målte hastighetsverdier i laboratoriet.

Resultatet av de teoretiske beregningene og målingene kan leses i Tabell 9.1. Der y er lengden på strømningsområde langs vinduet målt ovenfra og nedover ($y=0$ øverst og 2,66 m nederst). For luftstrømmen i det nederste målepunktet nær karmen er det maksimalhastigheten fra målepunkter 3 centimeter eller mindre fra vindusglasset som brukes som grunnlag for å finne maksimalhastigheten til kaldraset. Dette fordi luftstrømmen lengre unna sannsynligvis har startet avbøyningen over karmkanten og hastigheten her vil ikke presentere hastigheten til luftstrømmen som går nedover langs vindusglasset.

Tabell 9.1 Sammenlikning av teoretiske hastighetsberegninger og målte hastigheter

y [m] (tilhørende målepunkt)	Type strømning brukt i beregning, likningsnummer	Skåret [m/s]	Målinger [m/s]
0,58 (V6)	Laminær, (3.10),	0,146	0,152
1,26 (V5)	Laminær, (3.10)	0,216	0,193
2,36 (V4)	Laminær, (3.10)	0,295	0,176
2,46 (V3)	Laminær, (3.10)	0,302	0,156
2,56 (V2)	Turbulent,(3.11)	0,211	0,124
2,66 (V1)	Turbulent,(3.11)	0,218	0,118

Ved de teoretiske hastighetsberegningene akselerer luftstrømmen nedover vinduet, men når skifte fra laminær til turbulent formelverk gjøres går hastigheten ned. I turbulente strømninger er det mer bevegelse i ulike retninger innad i luftstrømmen, noe som fører til at den ikke

klarer å holde like stor hastighet som en laminær strømning. Avstanden mellom målt og beregnet hastighet varierer fra 0,006 m/s til 0,146. Årsaken til differansen mellom teoretisk utregning og målte verdier er blant annet at teorien regner med en akselerasjon av hastigheten, mens resultatet fra målingene ikke har registrert dette. I tillegg er det usikkerhet rundt gyldigheten av formelverket i forhold til de faktiske forhold i laboratoriet under forsøkene.

9.3.3 Temperatur

For luftstrømmer langs vindusflaten er det kun formelverket basert på varmeeffekten gjennom konveksjon som kan brukes som sammenlikningsgrunnlag for målingene og teorien. Dersom det antas lik konvektiv varmeovergangstall for hele vindusflaten kan formelverket brukes til å finne temperaturen til luftstrømmer ved ulike høyder på vinduet. Ved å bruke anslaget til Skåret (2000) på at det konvektive varmeovergangstallet er $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ kan likningene (3.19) og (3.21), eventuelt (3.20) dersom strømningen er turbulent, brukes. I beregningene er det satt inn de konstante verdiene for parameterne som er nevnt i kapittel 3.5.3 og innledningsvis i dette kapittel. Den målte temperaturen som brukes i sammenlikningen er et gjennomsnitt av de målte temperaturene ved de ulike avstandene fra vindusglasset. Målingene over romtemperatur på 21 °C forkastes i gjennomsnittsberegningen fra målte hastigheter fordi det er fysisk umulig at kaldrasstrømningen skal ha høyere temperatur enn romtemperaturen. For målepunktet V5 1,4 meter over karmkanten ble det ikke registrert noen temperaturer under romtemperaturen gjennom måleserien som brukes i sammenlikningen.

y [m] (tilhørende målepunkt)	Type strømning brukt i beregning, likningsnummer	Skåret [°C]	Målinger [°C]
0,58 (V6)	Laminær, (3.20),(3.21)	19,39	20,41
1,26 (V5)	Laminær, (3.20),(3.21)	19,04	-
2,36 (V4)	Laminær, (3.20),(3.21)	18,71	19,43
2,46 (V3)	Laminær, (3.20),(3.21)	18,69	19,53
2,56 (V2)	Turbulent (3.20),(3.22)	18,54	19,33
2,66 (V1)	Turbulent (3.20),(3.22)	18,63	16,30

Med unntak av målepunktet nederst nær karmkanten (V1) er alle de målte temperaturene høyere enn den utregnede. Årsaken er vanskelig å fastslå. Men det kan hende at den konvektive varmeoverføringskoeffisienten i virkeligheten er avvikende fra antagelsen i beregningene. Den lave overflatetemperaturen nederst i karmkanten påvirker den målte

temperaturen til luftstrømmen. Det klarer ikke den teoretiske beregningen og ta med da det i beregningene er antatt en homogen overflatetemperatur og et uniformt konvektivt varmeoverføringstall.

9.3.4 Tykkelse

Røykgasstilsetning på luftstrømmen nær vindusglasset viser at det bare er et tynt sjiktet som går klart nedover glassflaten og danner kaldraset. I Tabell 9.2 kan resultatet fra teoretiske beregninger av tykkelsen til kaldraset med formelverket til Skåret leses.

Tabell 9.2 Tykkelsen på kaldraset langs vinduets glassflate

y [m] (tilhørende målepunkt)	Type strømning ved utregning, likningsnummer	Skåret [m]
0,58 (V6)	Laminær, (3.23)	0,032
1,26 (V5)	Laminær, (3.23)	0,039
2,36 (V4)	Laminær, (3.23)	0,045
2,46 (V3)	Laminær, (3.23)	0,046
2,56 (V2)	Turbulent (3.24)	0,134
2,66 (V1)	Turbulent (3.24)	0,141

Tykkelsesberegninger gjort for den laminære delen av strømmingen viser at tykkelsen skal være mellom 3,2 centimeter til 4,5 centimeter ved de fire øverste målepunktene. Det er vanskelig å si eksakt hvor tykt sjiktet med kaldras som observeres med røykgasstilsetning er. Men det kan se ut som tykkelsen på kaldraset er noe mindre enn den målte tykkelsen for den laminære strømmingen. Observasjon av røykskyen indikerer at strømmingen er turbulent eller hvert fall delvis turbulent nederst på vinduet. Ut fra formelverket til Skåret skal da strømmingen ha en tykkelse på 14,1 centimeter nederst på vinduet. Dette er vesentlig tykkere enn det som er observeres ved testforholdene i laboratoriet. Noe som kan underbygge antagelsen om at strømmingen aldri når fullstendig turbulent strømming med den installerte vindushøyden og testforholdene i laboratoriet.

9.4 Luftstrømning ved karmkanten og langs gulvet ut i rommet

I dette kapitlet skal formelverket for den delen av kaldraset som går over karmkanten, nedover langs veggen og langsetter gulvet ut i oppholdssonen vurderes opp mot måleresultater i laboratoriet. Temperaturen på luftstrømmen blir ikke vurdert i dette kapitlet. Da det kun er Heiselberg som har laget formelverk til temperaturen på denne luftstrømmen

(jf. kap. 3.5.3) og måleoppsettet ved laboratoriemålingene ikke passer med hans kriterier for bruk av formelverket (jf. kap. 9.1.6) finnes det ikke gyldig formelverk for å gjennomføre en slik sammenlikning.

9.4.1 Hastighet

Observasjoner gjort med røykgasstilsetning i luftstrømmer tilsier at strømmingen går over karmkanten og følger veggen ned mot gulvet. Vinduskarmen er altså ikke bred nok til å bøye av luftstrålen ut i rommet når den kommer til karmkanten. Tilfellet som er illustrert i Figur 3.7 i kapittel 3.5.2 passer til situasjonen som observeres i laboratoriet og likning (3.17) brukes i sammenlikningen av teori og målte verdier. En hake ved bruk av denne formelen er at Figur 3.7 tilhørende formelen hentyder at strømmingen må være fullstendig turbulent før den forlater vindusflaten, noe som muligens ikke er tilfelle for de forholdene som ble testet i laboratoriet (jf. kap. 9.3.1). Den utregnede tykkelsen for turbulent strømming nederst på vinduet på 14,1 centimeter er vesentlig tykkere enn det som observeres når røykgass tilsettes luftstrømmen i laboratorieforsøket. Tykkelsen på strømmingen er en avgjørende variabel som har betydning for hastighetsberegningen for strømmingen ut i rommet (jf. likning (3.17)). Å anta fullstendig turbulent strømming vil kunne skape stor usikkerhet rundt sammenlikningsgrunnlaget da forholdene mellom de teoretiske tilnærmingene ikke stemmer godt med de faktiske forholdene som observeres i laboratorieforsøket. Det må huskes på når resultatet av sammenlikningen skal tolkes. Formelverket finner maks hastighet i luftstrømmen langs gulvet. Det er derfor den maksimale målte hastigheten i de ulike målepunktene som blir brukt i sammenlikningen. måleserien som brukes i sammenlikningen er basert på målinger gjort midt foran vinduet presentert i kapittel 7.2.3.

Tabell 9.3 Sammenlikning av Skårets formelverk for hastighet til kaldrasluftstrøm ut i rommet og målte hastigheter

Avstand fra vindusglasset [m]	Skåret [m/s]	Målepunkt med maksimalhastighet	Målte hastigheter [m/s]
0,1	0,259	V1	0,108
0,15	0,253	V1	0,093
0,2	0,247	V1	0,147
0,6	0,213	V2	0,065

De målte hastighetene ligger godt under de beregnede verdiene. Det kan tyde på at bruken av fullstendig turbulent strømming ikke er godt nok for sammenlikningen av formelverk og

målinger. Et annet aspekt som kan påvirke resultatet er den teoretiske utregnede uniforme overflatetemperaturen som brukes i de teoretiske beregningene, men som målingene viser at variere nedover vinduet. Siden hastigheten nederst på vinduet danner grunnlaget for luftstrømmens hastighet langs gulvet ut i rommet vil differansen mellom virkelig og teoretisk overflatetemperatur ha betydning for sammenlikningen.

9.4.2 Termisk komfort

For at kaldraset skal påvirke den termiske komforten må luftstrømmen dominere strømningsbildet i rommet. Det innebærer at den må ha en viss hastighet og temperatur for å føles ubehagelig. En gylden regel er at dersom luftstrømmen har en middelhastighet over 0,15 m/s kan det skape trekkfølelse for de som oppholder seg i nærheten av denne luftstrømmen. Alle målepunktene både midt foran og i kanten av vinduet viser svært lav hastighet ned mot 0,05 m/s og lavere når målepunktene er plassert der oppholdssonen begynner, 0,6 meter fra vinduet. Det skal brukes en hastighet på 0,05 m/s dersom hastigheten er dette eller lavere i formel (3.4) som regner ut andelen misfornøyde som følge av trekk. Det gir en andel misfornøyde på 0 prosent. Hastighetsmålingene og beregningen av termisk komfort i forhold til trekk indikerer at det installerte vinduet ikke skaper trekkfølelse for noen som oppholder seg 0,6 meter eller lengre unna vinduet. De lave hastighetene gjør at dette gjelder uavhengig av temperaturen på luftstrømmen. De gode egenskapene til vinduet gjør at oppholdssonen kan utvides til å gjelde nærmere vinduet uten at det vil påvirke den termiske komforten i forhold til trekk.

De teoretiske hastighetene på luftstrømmen fra kaldraset som når ut i rommet er vesentlig høyere enn de målte verdiene. Maksimalhastighet til luftstrømmen der oppholdssonen starter er beregnet med formel (3.17) til 0,213 m/s (se Tabell 9.1). Dette er høyere enn den anbefalte grenseverdien på 0,15 m/s. Dersom en andel misfornøyde skal beregnes må luftstrømmens temperatur være kjent. En teoretisk tilnærming av denne temperaturen er ikke mulig for de forholdene som er testet i laboratoriet fordi testforholdene ikke stemmer med betingelsene for bruk av tilgjengelig formelverk. Som en tilnærming kan en målte temperatur brukes i en teoretisk beregning av andelen misfornøyde som følge av trekk med teoretiske hastighet på kaldraset. Temperaturen som brukes i beregningene er fra målepunktet 9 centimeter over bakken og 60 centimeter fra veggen, da det er dette punktet som er nærmest den definerte oppholdssonen. En annen avgjørende faktor for andelen misfornøyde som følge av trekk er turbulensintensitet. Dersom turbulensintensiteten på luftstrømmen i rommet er ukjent kan man som en tommelfingerregel bruke turbulensintensitet på 40 prosent. Siden dette skal være en

tilnærmet teoretisk utregning av termisk komfort som følge av trekk settes normverdien på 40 prosent inn i formelen for andelen misfornøyde på grunn av trekk. Med en målt lufttemperatur på 19,1 °C og den teoretiske hastigheten regnes andelen misfornøyde som følge av trekk til å være 30,4 prosent ut fra likning (3.4). Dette er langt høyere enn hva som kan antas at er tilfelle på bakgrunn av hastighets- og temperaturmålinger i laboratoriet.

10 Vurdering av kaldrassikring

Historisk sett har vinduene vært dårlig isolert og det er på bakgrunn av dette blitt konstruert flere tiltak som kan begrense kaldras og dets negative innvirkning på termisk komfort. Med de nye vinduene som er godt isolerte kan det vurderes om kaldras faktisk er et termisk komfortproblem som trenger egne tiltak. De lave hastighetene målt i laboratorieforsøket i forbindelse med denne oppgaven underbygger en antagelse om at kaldras ikke lenger er et problem med hensyn på den termiske komforten, hvis vindushøyden er 2,8 meter eller lavere og vinduet har en god standard U-verdi på $0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ eller bedre. Dersom de nye godt isolerte vinduene fører til at kaldrassikring ikke lenger er nødvendig kan det spares energimengder og kostnader i flere bygningstyper. I dette kapittelet vil det settes fokus på hvilke tiltak som finnes og hvordan det kan spares energi og kostnader dersom kaldrassikring kan droppes.

10.1 Tiltak mot kaldras

Det finnes både aktive og passive tiltak som kan iverksettes dersom kaldras er et problem for den termiske komforten i rommets oppholdssone. I dag er det vanligste tiltaket og sette en varmekilde i form av radiator eller elektrisk panelovn under vinduet fordi den også kan brukes til generell romoppvarming. På høye glassfasader bør det være flere varmekilder på ulike nivåer av glassfasaden, ofte ved de horisontale tverrstengene i glasskjøtene for å få den ønskede effekten av reduksjon av kaldras (Tjelflaat, 1996). I tillegg til varmekilde under vinduet finnes det andre metoder for å redusere eller eliminere kaldras. På høye vinduer kan det for eksempel settes finner på glasset ved ulike høyder. Finnene vil da hindre den nedadgående luftstrømmen i å akselerere videre nedover vinduet. Det er vanlig at hindringen er like bred som vindu/glassfasaden og har en dybde som er større enn tykkelsen på kaldrasets konvektive grensesjikt, δ (Venås & Børresen, u.d.). Det må være liten avstand mellom de horisontale hindringene slik at kaldraset bremses så mye at det ikke genereres til trekkfølelse. Denne løsningen krever ingen ekstra energitilførsel, men fungerer bare dersom strømmingen er turbulent. Et annet alternativ er å ha et avsug under vinduet som fanger opp volumstrømmen til kaldraset. Dette tiltaket vil ikke øke varmetapet gjennom vinduet og det er dermed et energiøkonomisk tiltak mot kaldras (Skåret, 2000). Elektriske varmeelementer i glasskonstruksjonen kan også fungere som kaldrassikring. Å legge inn slike elementer kan øke overflatetemperaturen til vinduet og differansen mellom romtemperaturen og overflatetemperaturen blir følgelig mindre. Konsekvensen er mindre kaldrasdannelse.

Fordelen med varmeelement i glasset er at det kan brukes til flere formål som snøsmelting, hindre asymmetrisk stråling og redusere kondens i tillegg til kaldrassikring. Ulempen med denne løsningen er kostnaden som følger av produksjon av glasset samt at energiforbruket muligens vil øke noe (Tjelflaat, 1996). Et siste alternativ er å sende ut oppadgående luftstrøm under vinduet. Å blåse inn luft rett eller delvis under vinduet fører til at den oppadgående luftstrømmen kan motvirke kaldraset dersom luftinnblåsningen har lik, eller helst litt høyere, bevegelsesmengde enn kaldraset. Høyere bevegelsesmengde på innblåsningslufta enn kaldraset vil føre til at lufta føres opp og over oppholdssonen (Nielsen, 1997).

I dag finnes det gode hjelpemidler for å avsløre kuldeboer og andre varmetap som kan føre til trekk i oppholdssonen. Termografering med IR- kamera er en metode for å avlese temperatur på overflater. Overflatetemperaturene kan avdekke unødvendige varmetap. Etterisolering, bearbeiding av kuldebroer eller bytte ut dårlige isolerte vinduer er tiltak som kan minske varmetap og kaldras og følgelig minske trekk fra vindu. Dette tiltaket skaper bedre termisk komfort samtidig som energibruk og -kostnad kan reduseres.

10.2 Energisparing

Dersom den tiltenkte kaldrassikringen er et passivt tiltak vil ikke energisparefaktoren være av samme karakter som for et aktivt tiltak. Et passivt tiltak innebærer at tiltaket gjennomføres uten å øke energiforbruket. Den eneste økonomiske gevinsten fra kansellering av et slikt tiltak er knyttet til innkjøp, montering og vedlikehold. Bortfall av aktive tiltak gir adskillig mer energi- og energikostnadsbesparelser fordi det da er nødvendig med energitilførsel for å få tiltaket gjennomført.

Ofte er radiatorene under vinduet dimensjonert for å dekke det totale transmisjonstapet og styrt etter behovet for romoppvarming. Egenskapen som kaldrassikring blir en fordelaktig tilleggsfunksjon. Hvis radiatoren skal dekke både transmisjonstap og hindre kaldras kan ikke energikilden tas bort selv om kaldrassikringen kan avvikles. Det kan allikevel spares energi dersom energikilden må levere tilleggsvarme for å hindre kaldras. Da vil dette bli overskuddsvarme som varmekilden ikke lenger trenger å komme med. I kontorbygg er det ofte nok intern varmelast til å dekke behovet for romoppvarming. Hvis det er kaldras må varmekilden under vinduet allikevel stå på for å hindre kaldras og eventuelt asymmetrisk stråling. Uten kaldras kan radiatorene vært avslått i disse periodene. Det ekstra varmetilskuddet fra kaldrassikringen vil føre til at andre tekniske systemer settes i sving for å fjerne overskuddsvarmen i rommet. Det oppstår da både kjøling og oppvarming i rommet på

samme tid. Overskuddsvarmen fjernes ofte ved å tilføre kaldere luft til rommet via ventilasjonsanlegget eller sette i gang andre mekaniske kjøleprosesser. Dette er energikrevende og både energien til unødvendig oppvarming og den ekstra kjølingen kan elimineres dersom kaldrassikring ikke lenger er nødvendig i bygningen. Som følge av dette vil bortfall av kaldras føre til vesentlig mer energibesparelser i slike kontorbygg enn i andre bygninger der kun det ekstra varmtilskuddet faller bort.

En annen fordelaktig konsekvens av bortfall av kaldras er at varmekilder da kan plasseres hvor som helst i rommet. Om det fører til energi- og/eller kostnadsreduksjon er ikke sikkert, men en erstatning eller flytting av radiatorer kan bidra til design av andre løsninger som passer bedre til rommets arkitektur og bruksområde. For eksempel er det da mulig å ha vinduer som går helt ned til gulvet uten og plassere varmekilden foran vinduet. Uten behov for kaldrassikring er det også mulig å erstatte den vanlige romoppvarmingskilden under vinduet med andre varmekilder som for eksempel vannbåren varme eller varmekabler i gulv.

11 Konklusjon

Undersøkelser gjort i denne oppgaven tyder på at kaldras som problem i forhold til termisk komfort blir eliminert i oppholdssonen, 0,6 meter fra veggen og 0,1 meter over gulvet, dersom det installeres moderne godt isolerte vinduer med standard total U-verdi ned mot $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Forsøk i laboratoriet gjort med simulert utetemperatur på $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ og vinduet med glasshøyde på 2,66 meter ga luftstrømhastigheter ned mot $0,05 \text{ m/s}$ i den definerte oppholdssonen. Maksimalhastigheten til kaldrasstrømningen i rommet ble målt til $0,208 \text{ m/s}$ 10 centimeter fra vinduet, midt foran vinduet og helt nede ved gulvet. Dette er en halv meter nærmere enn den definerte oppholdssonen og kun $0,058 \text{ m/s}$ høyere enn den anbefalte grenseverdien i forhold til negativ trekkfølelse på $0,15 \text{ m/s}$. En positiv konsekvens av dette er en mulig utvidelse av oppholdssonen. Kaldrasstrømmen i rommet foran kanten av vinduet har minimal innvirkning på den termiske komforten da alle målepunktene viste lavere hastigheter enn $0,1 \text{ m/s}$ ved de samme forholdene. Dette til tross for at det ble målt høyere hastigheter på luftstrømmen nedover vindusoverflaten i kanten av vinduet sammenliknet med kaldraset midt på vinduets bredde. Høyere hastighet på kaldraset nedover langs kanten av vinduet skyldes lavere overflatetemperatur i området som oppstår på grunn av kuldebroer i overgangen mellom glass og karm i avstandslistene mellom glassene i rutekombinasjonen.

Resultatene av målingene nedover langs vinduets glassoverflate midt på vinduets bredde tyder på lite kaldras. Observasjoner med røykgasstilsetning hentyder en tykkelse ned mot 2-3 centimeter. Hastighetsmålingene viste lave hastigheter ved alle målepunktene med unntak av helt nære vinduet. Det antas at resultatet fra målingen helt inntil glasset har flere feilkilder og at det er de andre målingene fra avstanden fra glasset på én millimeter og utover med hastighetsresultater rundt $0,1 \text{ m/s}$ som representerer det virkelige kaldraset nedover vinduet. Observasjon og tidtaking av kaldraset ved hjelp av røykgasstilsetning underbygger antagelsen om at det skjedde feilmålinger i målepunktene nær vindu og at det bør sees bort fra i tolkningen av resultatene. Tyngdekraft skal i utgangspunktet forårsake en akselerasjon i den naturlige konveksjonsstrømmen i kaldraset. Det blir ikke registrert en slik akselerasjon i laboratoriemålingene, snarere tvert i mot. Det er ved flere avstander fra glassflaten registrert høyere hastighet på de øverste målepunktene kontra de litt lengre ned på glasset. Årsaken til det er sammensatt og usikkert. Mulige årsaker som er diskutert og vurdert er måleoppsett, andre luftstrømmers påvirkning og måleutstyret.

Sammenlikningen av måleresultatene fra laboratoriemålingene opp mot tilgjengelig teoretiske beregningsmodeller for kaldras kan tyde på at det er behov for en oppgradering eller fornying av dette formelverket dersom det ønskes modeller konkret tilpasset vinduer på dagens marked. Spriket mellom modellene og målingene kan skyldes ulike forutsetninger i dannelsen av formelverket og forholdene det ble testet ved. Antagelser og forenklinger i formlene er tilpasset vinduer produsert i en annen tidsalder med vesentlig dårligere U-verdier på vindu enn dagens standard. Tolkning av strømningsbildet langs vinduet skapte hodebry i forhold til hvilket formelverk som faktisk var gyldig for den strømmingen som ble evaluert. Er strømmingen laminær, i overgangsfasen eller turbulent nederst ved karmkanten? Er den nok turbulent til å bruke formelverket for turbulente strømminger? Dette er spørsmål som måtte besvares gjennom tolkning av røyktilsatt luftstrøm for å kunne gjøre beregninger med formelverket. Antagelsene som er gjort kan være feil og det kan hende at strømmingen i virkeligheten befinner seg utenfor gyldighetsområdet til formelverket. Det kan være en årsak til at beregningene ikke stemmer med målingene. Samfunnets fokus på energisparing og varsel om innskrenkninger av krav til U-verdier på vinduer tilsier at det vil bli installert mange vinduer med tilsvarende kvaliteter eller bedre enn det som ble brukt i laboratorieforsøket. Dessverre er det for mye usikkerheter rundt resultatene fra målingene i denne oppgaven til å bruke de som dannelsesgrunnlag for arbeidet med formelforbedringene. Diskuterte usikkerhetsmoment som kan ha forstyrret måleresultatene fra laboratorieforsøket er svakheter ved måleoppsettet og måleutstyret. Det er nødvendig med nye målinger med annet måleoppsett og hastighetsfølere som godt takler lave hastigheter for å danne grunnlag til utbedringen av formelverket.

Den termiske komforten blir ikke nevneverdig påvirket av asymmetrisk stråling fra vinduet i laboratoriet. Selv ved en simulert utetemperatur på -20 °C viser måleresultatene fra laboratorieforsøket en maksimalstrålingsasymmetri på $4,5\text{ °C}$ noe som er hele $5,5\text{ °C}$ under kravet i den norske standarden NS-EN 7730.

12 Referanser

- Anon., 2006. *NS-EN 10077 Termiske egenskaper til vinduer, dører og skodder Beregning av varmegjennomgangskoeffisient*. Lysaker: Norsk standard.
- Anon., 2006. *NS-EN ISO 7730 Ergonomi i termisk miljø Analytisk bestemmelser og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD- indeks og lokal termisk komfort*. Lysaker: Standard Norge.
- Anon., 2011. *NS-EN 673 Bygningsglass Bestemmelse av varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi), Beregningsmetode*. Lysaker: Standard Norge.
- Arbeidstilsynet, 2006. *Veiledning om klima og luftkvalitet på arbeidsplassen*, Oslo: Arbeidstilsynet.
- Blom, P., 1999. *421.501 Temperaturforhold og lufthastighet- Betingelser for termisk komfort*. Oslo: Sintef byggforsk.
- Brüel & Kjær, 1980. *Instruction Manual -Indoor Climate Analyzer*. Nærum, Danmark: Brüel & Kjær.
- Çengel, Y. A., 2006. *Heat and Mass transfer -a practical approach*. 3. red. s.l.:McGraw-Hill Education - Europe.
- Christensen, K. E., Jeppesen, J. & Overby, H., 1994. Reduktion af trækgener i opholdszonen ved montering af sprosser i vindueskonstruktioner. *VVS Danmark*, juni, Volum vol., pp. 42-46.
- Direct industry, 2013. *Ahlborn*. [Internett]
Available at: <http://www.directindustry.com/prod/ahlborm/thermo-anemometers-17042-409320.html>
[Funnet 31 Januar 2013].
- ENSI AS, 2012. *Verktøy for beregning av U-verdi påvirket av forskjellige parametre og for beregning av kaldras*. Oslo: Glass og Fasadeforeningen.
- Fanger, P. O., 1970. *Thermal Comfort - Analysis and applications in environmental engineering*. Lyngby: McGraw-Hill Book Company.

- Fanger, P. O., 1997. Inneklima. I: H. Hansen, P. Kjerulf-Jensen & O. B. Stampe, red. *Varme- og Klimateknik grundbog*. 2 red. Lyngby: Danvak, pp. 31-57.
- Fanger, P. O. et al., 1985. Comfort Limits for Asymmetric Thermal Radiation. *Energy and Buildings*, pp. 225-236.
- Fanger, P. O., Melikov, A., Hanzawa, H. & Ring, J., 1988. Air Turbulence and Sensation of Draught. *Energy and Buildings*, 1988(12), pp. 21-39.
- Fluke Calibration, 2013. *Hydra 2635A/C Portable Data Acquisition*. [Internett]
Available at: http://us.flukecal.com/products/data-acquisition-and-test-equipment/data-acquisition/hydra-2635ac-portable-data-acquisition?geoip=1&quicktabs_product_details=2
[Funnet 8 april 2013].
- Gan, G., 2001. Analysis of mean radiant temperature and thermal comfort. *Building Services Engineering Research and Technology*, 1 Mai, pp. 95-101.
- Gunnarsen, L., 2003. Thermal Climate. I: P. E. Nilsson, red. *Achiving the desired indoor climate- Energy efficiency aspects of system design*. Lund: Studentlitteratur, pp. 91-112.
- Hall, I. A. M., 2009. *Glass og Fasadeforeningen -Glassfasaden er ikke død, men født på ny*. [Internett]
Available at: <http://www.glassportal.no/glassfasaden-er-ikke-doed-men-foedt-paa-ny.4664866-149405.html>
[Funnet 18 februar 2013].
- Hanssen, S. O., 2007a. Innemiljø. I: V. Novakovic, red. *Enøk i bygninger- Effektiv energibruk*. Trondheim: Gyldendal undervisning, pp. 99-134.
- Hanssen, S. O., 2007b. Feilanalyse. I: V. Novakovic, red. *Enøk i bygninger-Effektiv energibruk*. Trondheim: Gyldendal undervisning, pp. 376-380.
- Haukland, S. J., 2013. *Mailkorrespondanse om problematikken rundt utvendig kodens på vindu* [Intervju] (13 mars 2013).
- Heiselberg, P., 1994a. Draught Risk From Cold Vertical Surfaces. I: *Buildings and Enviroment*. Aalborg: Pergamon, pp. 297-301.
- Heiselberg, P., 1994b. Kuldenedfald og træk. *VVS*, juni, vol 30(no.8), pp. 6-8.

Heiselberg, P., Overby, H. & Bjørn, E., 1995. Energy- efficient measures to avoid downdraft from large glazed facades. *Ashrae Transactions vol.101*, pp. 1127-1135.

Huizenga, C. et al., 2006. *Windows performance for human thermal comfort*, Berkeley: Envelope Systems, Center for the Built Environment, Center for Environmental Design Research,.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L. & Lavine, A. S., 2007. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6 red. New York: John Wiley & Sons.

Johnsrud, S., 2012. *Termiske forhold ved fasade uten aktiv kaldrassikring*, Trondheim: Institutt for Energi- og prosesseteknikk, NTNU.

Kimo Instruments, u.d. *Technical Data Sheet Kistoch Datalogger HVAC range: KT210/KH210*. s.l.:Kimo Instruments.

Klima- og forurensningsdirektoratet, 2010. *Innendørs forurensning påvirker helsa*. [Internett] Available at: <http://www.miljostatus.no/Toppmeny/Miljostatus-i-Europa-2010/Miljoproblemer-gjor-oss-sykere/Innendørs-forurensning-pavirker-helsa/> [Funnet 1 Februar 2013].

Kommunal- og regionsdepartementet, 2010. *FOR 2010-03-26 nr 489: Forskrift om tekniske krav til byggverk (byggteknisk forskrift)*. [Internett] Available at: <http://www.lovdata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20100326-0489.html> [Funnet 4 November 2012].

Lavenergiutvalget, 2009. *Energieffektivisering*, Oslo: Olje- og Energidepartementet.

Lilja, G., 1966. Kallras- inte så farligt som det låter?. *Svensk VVS*, pp. 499-506.

LumaSense Technologies, 2013. *Radiant Temperature Asymmetry Transducer*. [Internett] Available at: <http://www.lumasenseinc.com/EN/products/gas-monitoring/thermal-comfort/radiant-temperature/> [Funnet 15 mai 2013].

Manz, H. & Frank, T., 2003. Analysis of Thermal Comfort near Cold Vertical Surfaces by Means of Computational Fluid Dynamics. *Indoor and Built Environment*, 8 desember, pp. 233-242.

Mathisen, H. M., 2013. *Samtaler i veiledningstimer* [Intervju] (januar-juni 2013).

Miljødepartementet, 2012. *ENØK i Kommunene-Utarbeide enøkanalyser*. [Internett]

Available at:

<http://www.regjeringen.no/nb/sub/framtidensbyer/prosjektvisning.html?projectId=239103&id=705593>

[Funnet 6 November 2012].

National University of Singapore, u.d. *Climate Analyzer*. [Internett]

Available at: <http://www.bdg.nus.edu.sg/labs/thermallab/Default.htm>

[Funnet 15 mai 2013].

Nielsen, P. V., 1997. Luftfordeling i rum. I: H. E. Hansen, P. Kjerulf- Jensen & O. B. Stampe, red. *Varme- og Klimateknik Grundbog*. Lyngby: Danvak, pp. 203-239.

NorDan AS, 2013. *FAQ*. [Internett]

Available at: <http://www.nordan.no/?s=kaldras>

[Funnet 9 juni 2013].

Olesen, B., 1997. Termiske omgivelser. I: T. Schneider, red. *Teknisk Arbejdshygiejne bind 2*. København: Arbejds miljøinstituttet, pp. 36-40.

Pilkington, 2012. *Glassfakta 2012*. Oslo: Pilkington Norge AS.

Rueegg, T., Dorer, V. & Steinemann, U., 2001. Must cold air down draughts be compensated when using highly insulating windows?. *Energy and Buildings*, pp. 489-493.

Shillinglaw, J. A., 1977. Cold window surfaces and discomfort. *Building Services Engineer (BSE)*, July, pp. 43-51.

Skåret, E., 2000. *Ventilasjonsteknisk håndbok*. Oslo: Norges byggforskningsinstitutt.

Stampe, O., 2000. *Varme- og Klimateknik: Ventilationsteknik*. Lyngby: Danvak.

Thue, J. V., Gustavsen, A. & Aschehoug, Ø., 2007. Vinduer. I: V. Novakovic, red. *ENØK i bygninger- Effektiv energibruk*. Trondheim: Gyldendal undervisning, pp. 201-210.

Thyholt, M. & Gjeving, S., 1998. *SINTEF-rapport STF22 A98512 Utvendig kondens på vindusruter*, Oslo: Sintef .

Tjelflaat, P., 1996. *General Strategies and Calculation Method for Cold Down- Draft Prevention in Large glazed Enclosure*. Yokohama: Roomvent'96.

Toftum, J., 2004. Air movement- good or bad?. *Indoor Air*, pp. 40-45.

Toftum, J. & Nielsen, R., 1996a. Impact of metabolic rate on human response to air movements during work in cool environments. *International Journal of Industrial Ergonomics*, pp. 307-316.

Toftum, J. & Nielsen, R., 1996b. Draught sensitivity is influenced by general thermal sensation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, pp. 295-305.

TSI, 2013. *Products*. [Internett]

Available at: <http://www.tsi.com/products/>

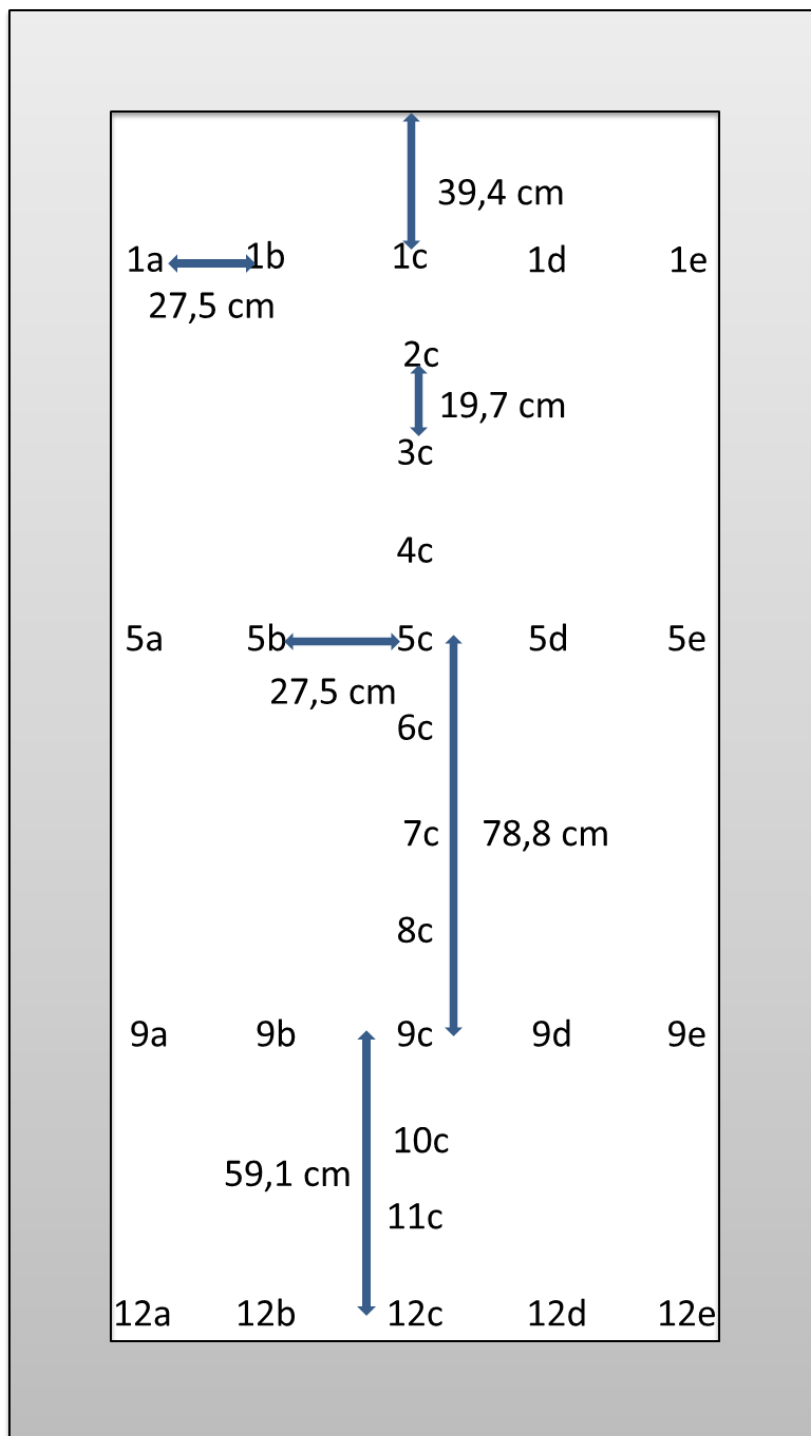
[Funnet 31 Januar 2013].

Uvsløkk, S., 2001. *571.954 Isolerruter Lys- og Varmetekniske egenskaper*. Oslo: Sintef Byggforsk.

Venås, B. & Børresen, B. A., u.d. *On the Use of Downdraft Spoilers in Glazed Atria*. s.l.:Norconsult.

Vedlegg 1

Figur V1-1 viser målepunktene for hastighetsmålinger langs overflaten på vinduet ved feltmålingen i Oslo.



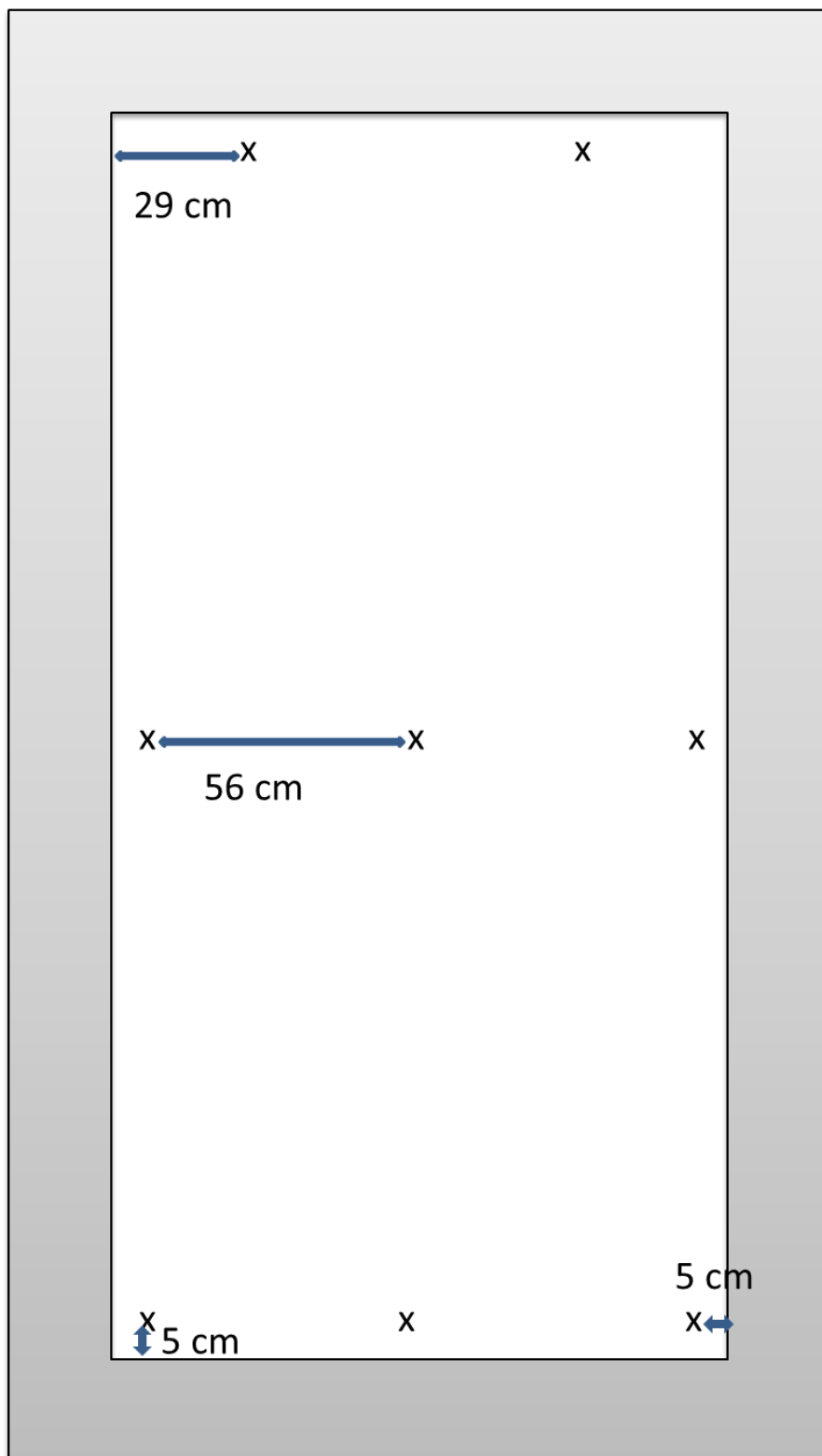
Glassets totale størrelse er:

Bredde: 1,1 meter

Høyde: 2,36 meter

Figur V1-1 Målepunktene på vinduet ved hastighet og temperaturmålinger på luftstrømmen langs vinduet ved feltmålinger

Figur V1-2 viser målepunktene for overflatetemperaturen på vinduet ved feltmålingen i Oslo.

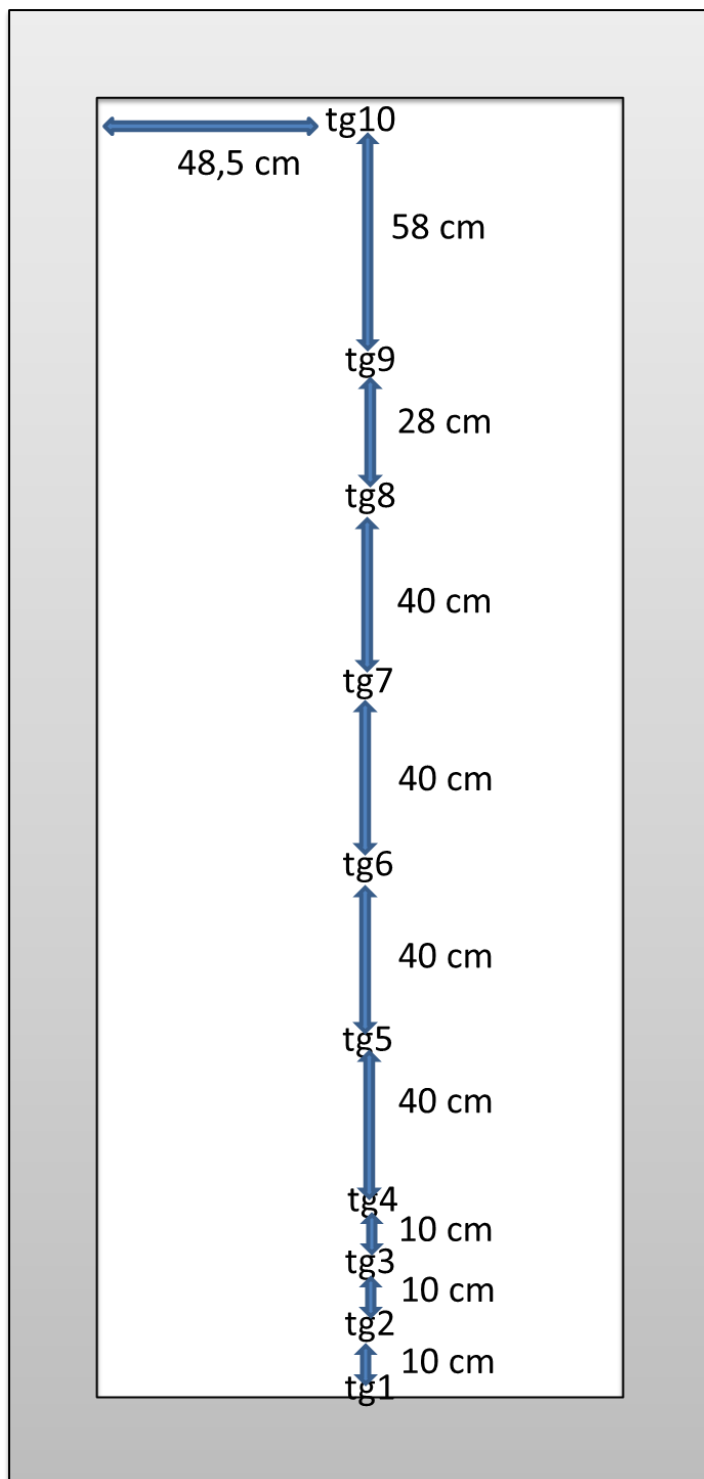


Figur V1-2 Målepunkter for overflatetemperatur på vinduet ved feltmålinger

Vedlegg 2

I dette vedlegget følger figurer som illustrerer målepunkter ved laboratiemålingene.

Figur V2-1 viser plassering av termoelementene til måling av overflatetemperatur på vinduet.



Glassets totale størrelse er:

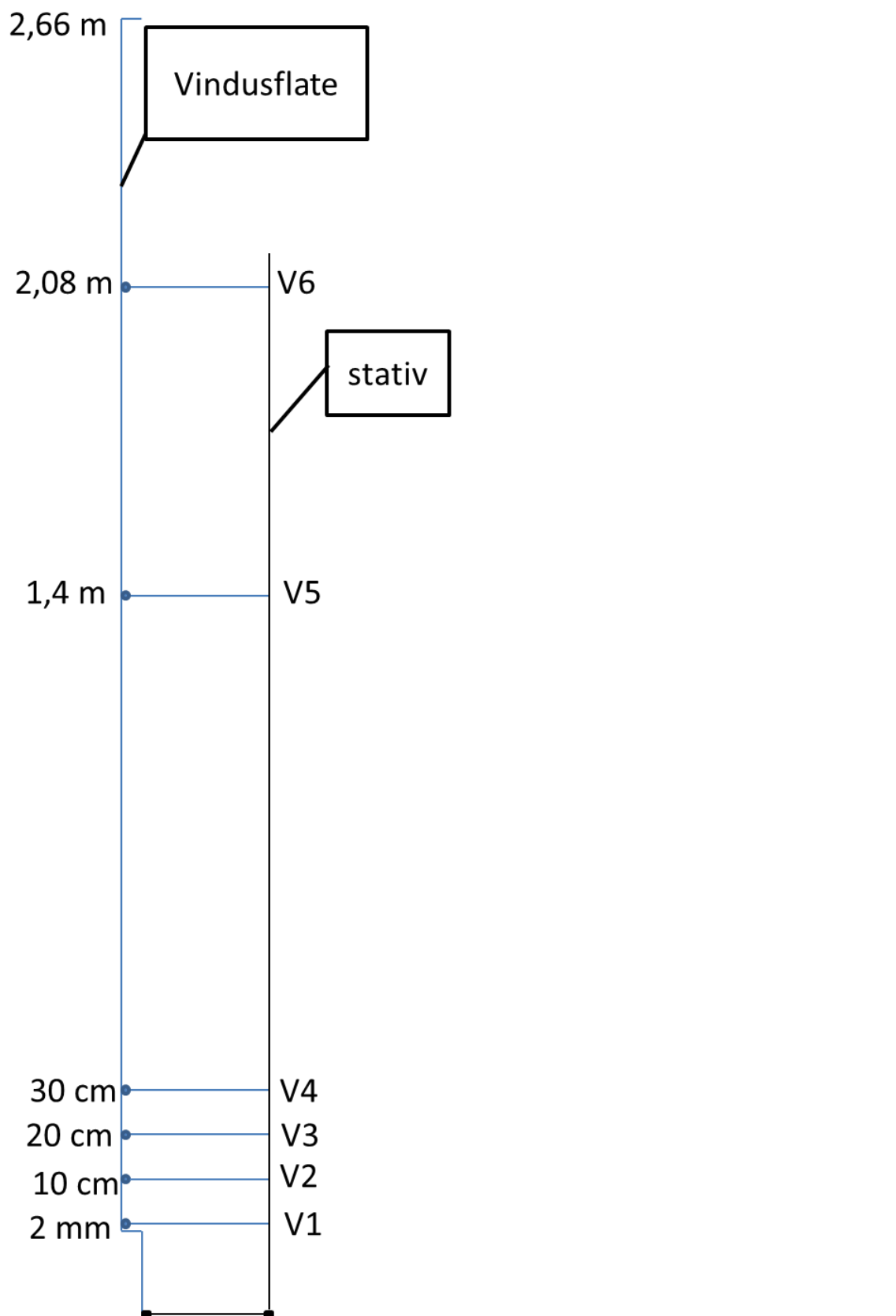
Bredde: 0,97 meter

Høyde: 2,66 meter

De samme høydeavstandene gjelder for overflatetemperaturmålingene i kanten av vinduet. Sensorene ble plassert 0,5 mm fra karmkanten.

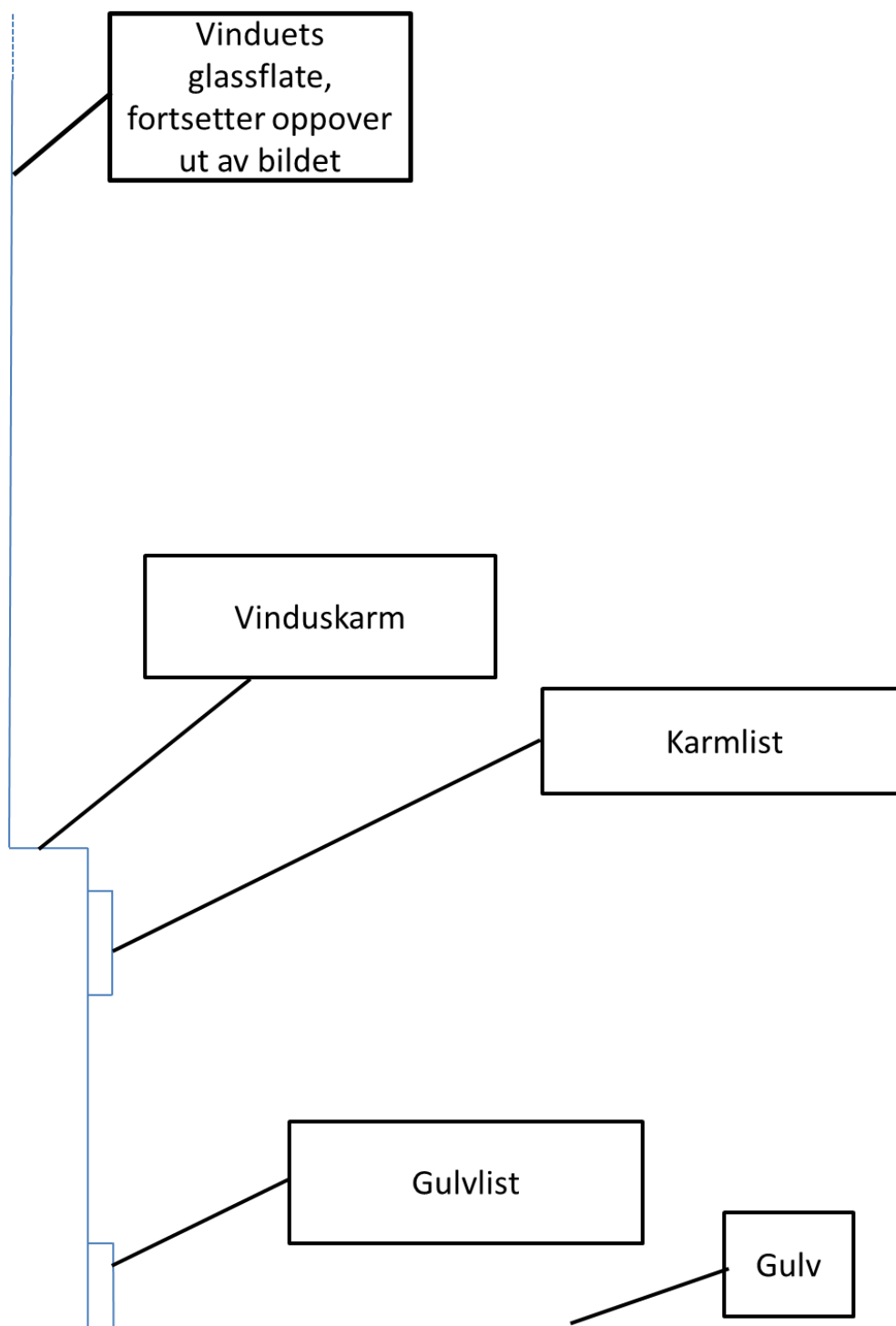
Figur V2-1 Målepunkter for overflatetemperatur målinger på vinduet ved laboratiemålingene

Figur V2-2 viser plasseringen av hastighetsfølere og termoelementer som er teipet på hastighetsfølere. Høydeavstandene gjelder både for målinger midt på og i kanten av vinduet.



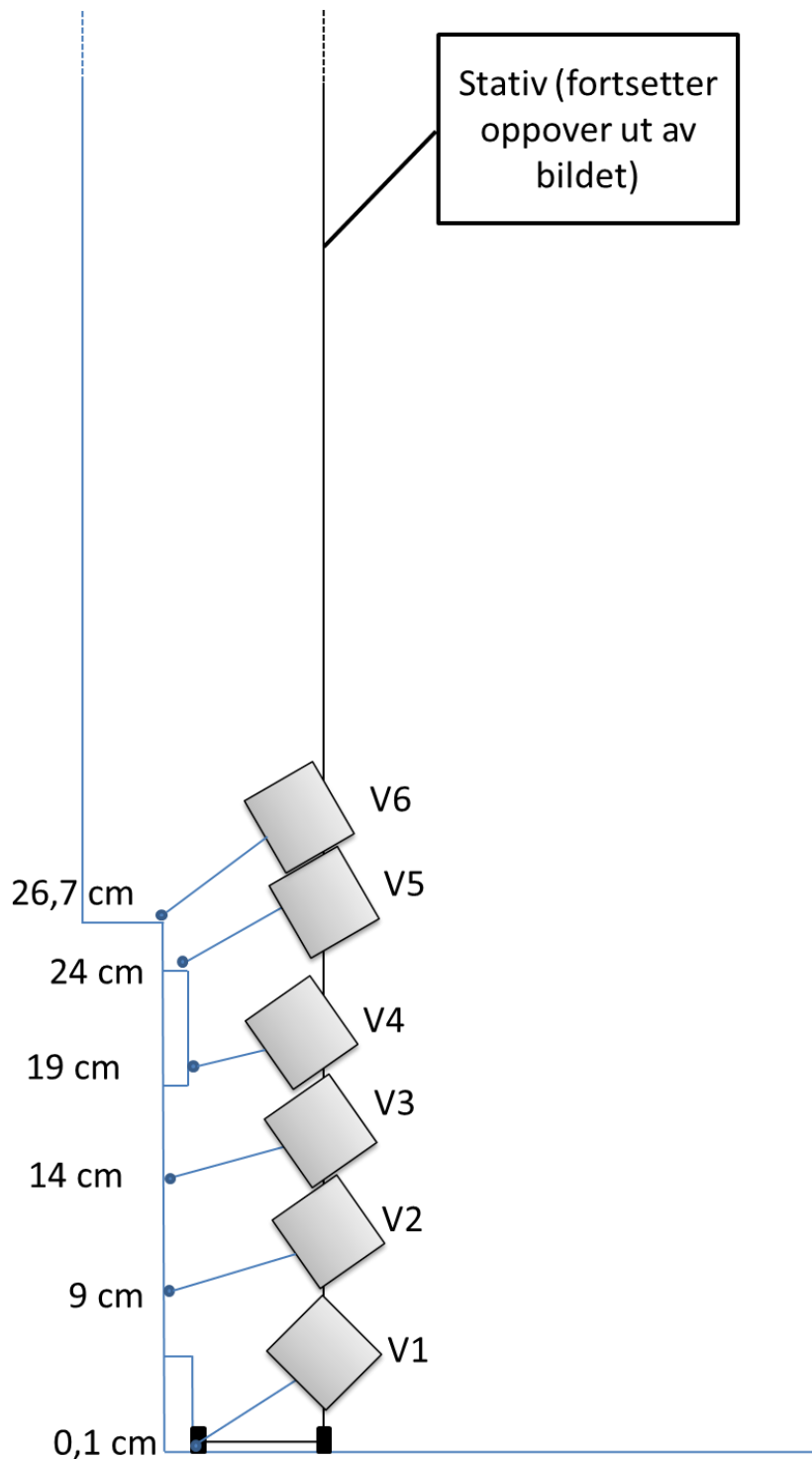
Figur V2-2 Målepunktene for hastighetsmåling på luftstrømmen ved laboratoriemålingene

De neste figurene beskriver måleoppsettet ved målinger av hastigheter og temperatur på luftstrømmen over karmkanten og videre ut i rommet. Figur V2-3 på denne siden viser en forstørret utgave av nedre del av vinduet, vinduskarmen, den ekstra karmen og gulvlisten.



Figur V2-3 Forstørret bilde av nedre del av vinduet og nedenfor vinduskarmen

Figuren på denne siden viser hvor hastighetsfølerne ble plassert i forhold til gulv, vegg, ekstra karm og vinduets karmkant. De samme notasjonene som er illustrert i forrige figur gjelder også i denne figuren.



Figur V2-4 Måleoppsett for hastighetsmåling over karmkanten og nedover langs vegg og utover i rommet

Vedlegg 3

Her følger resultattabeller tilhørende figurene vist i kapittel 7.2.

Tabell V3-1 Resultattabell tilhørende Figur 7.8 målinger midt på vinduets bredde med festet stativ med hastighetsmålere

Avstand fra glasset [cm]	Hastighet [m/s]					
	V1 (2 mm over karmkanten)	V2 (10 cm over karmkanten)	V3 (20 cm over karmkanten)	V4 (30 cm over karmkanten)	V5 (1,4 m over karmkanten)	V6 (2,08 m over karmkanten)
0	0,551	0,393	0,396	0,146	0,140	0,551
0,1	0,093	0,089	0,101	0,110	0,122	0,085
0,2	0,081	0,083	0,103	0,095	0,193	0,116
0,3	0,086	0,107	0,131	0,129	0,151	0,096
0,4	0,091	0,113	0,150	0,138	0,180	0,085
0,5	0,098	0,122	0,156	0,133	0,186	0,152
1	0,089	0,124	0,156	0,176	0,182	0,110
1,5	0,096	0,123	0,145	0,159	0,174	0,083
2	0,100	0,120	0,134	0,145	0,137	0,062
2,5	0,108	0,109	0,127	0,132	0,120	0,039
3	0,118	0,116	0,130	0,139	0,117	0,032
4	0,173	0,111	0,125	0,129	0,116	0,011
5	0,157	0,099	0,113	0,121	0,102	0,003

Tabell V3-2 Resultattabell tilhørende Figur 7.9 målinger midt på vinduets bredde der hele stativet med hastighetsfølere flyttes utover

avstand fra glasset [cm]	Hastighet [m/s]					
	V1 (2 mm over karmkanten)	V2 (10 cm over karmkanten)	V3 (20 cm over karmkanten)	V4 (30 cm over karmkanten)	V5 (1,4 m over karmkanten)	V6 (2,08 m over karmkanten)
0	0,150	0,108	0,125	0,152	0,173	0,483
0,5	0,083	0,077	0,084	0,110	0,109	0,121
1	0,089	0,080	0,090	0,115	0,111	0,126
1,5	0,100	0,081	0,100	0,118	0,106	0,094
2	0,110	0,082	0,097	0,107	0,096	0,070
2,5	0,148	0,076	0,091	0,101	0,090	0,058
3	0,157	0,086	0,101	0,109	0,084	0,048

Tabell V3-3 Resultattabell tilhørende Figur 7.10 målinger midt på vinduets bredde med festet stativ med hastighetsmålere

Avstand fra glasset [cm]	Temperaturer [°C]						
	t på V1	t på V2	t på V3	t på V4	t på V5	t på V6	romtemperatur
0	15,01	18,54	18,66	21,42	22,55	29,33	20,59
0,1	14,88	18,61	18,71	18,88	25,05	23,74	20,53
0,2	15,41	19,16	19,03	21,49	25,61	23,15	21,28
0,3	15,01	18,90	19,34	22,28	24,87	22,54	21,03
0,4	14,72	18,80	19,27	20,39	25,37	20,25	20,91
0,5	14,60	18,87	19,39	21,81	25,15	21,27	20,95
1	16,82	19,34	19,51	19,02	24,90	19,53	21,02
1,5	18,09	19,70	19,82	22,26	25,01	20,23	21,09
2	18,85	19,74	19,89	22,11	22,61	20,62	21,09
2,5	19,62	19,83	19,93	23,51	22,71	21,00	21,11
3	21,21	19,87	20,04	22,52	22,78	21,04	21,12
4	26,74	19,87	20,08	21,76	25,32	20,84	21,16
5	25,44	20,07	20,18	21,51	26,84	21,69	21,19

Tabell V3-4 Resultattabell tilhørende Figur 7.11 målinger midt på vinduets bredde der hele stativet med hastighetsfølere flyttes utover

avstand fra glasset [cm]	Hastighet [m/s]					
	V1 (2 mm over karmkanten)	V2 (10 cm over karmkanten)	V3 (20 cm over karmkanten)	V4 (30 cm over karmkanten)	V5 (1,4 m over karmkanten)	V6 (2,08 m over karmkanten)
0	0,117	0,238	0,551	0,551	0,439	0,393
0,5	0,100	0,213	0,246	0,286	0,506	0,372
1	0,122	0,222	0,240	0,300	0,374	0,285
1,5	0,132	0,203	0,207	0,270	0,339	0,205
2	0,142	0,202	0,299	0,263	0,311	0,170
2,5	0,181	0,166	0,214	0,217	0,248	0,132
3	0,274	0,157	0,200	0,147	0,189	0,087

Tabell V3-5 Resultattabell tilhørende Figur 7.14 målinger i kanten av vinduet med festet stativ med hastighetsfølere

Avstand fra glasset [cm]	Hastighet [m/s]					
	V1 (2mm over karmkanten)	V2 (10 cm over karmkanten)	V3 (20 cm over karmkanten)	V4 (30 cm over karmkanten)	V5 (1,4 m over karmkanten)	V6 (2,08 m over karmkanten)
0	0,551	0,328	0,452	0,551	0,335	0,551
0,1	0,090	0,201	0,198	0,280	0,339	0,237
0,2	0,082	0,187	0,191	0,279	0,324	0,215
0,3	0,082	0,194	0,206	0,297	0,352	0,244
0,4	0,085	0,176	0,245	0,292	0,374	0,214
0,5	0,082	0,178	0,214	0,304	0,331	0,167
1	0,099	0,175	0,238	0,259	0,289	0,168
1,5	0,099	0,201	0,250	0,271	0,268	0,119
2	0,140	0,162	0,232	0,224	0,208	0,097
2,5	0,239	0,126	0,205	0,203	0,202	0,040
3	0,243	0,173	0,207	0,205	0,181	0,064
4	0,231	0,158	0,165	0,173	0,183	0,069
5	0,158	0,121	0,126	0,139	0,168	0,084

Tabell V3-6 Resultattabell tilhørende Figur 7.15 målinger i kanten der hele stativet med hastighetsfølere flyttes utover

avstand fra glasset [cm]	Temperatur [°C]						
	t på V1	t på V2	t på V3	t på V4	t på V5	t på V6	romtemperatur
0	14,44	22,06	20,19	19,70	21,37	25,89	21,90
0,5	14,94	22,16	20,28	19,88	21,20	25,92	21,84
1	14,51	22,12	20,26	19,88	21,39	25,93	21,78
1,5	15,37	22,16	20,38	20,01	21,42	26,38	21,72
2	17,78	22,24	20,46	20,11	21,56	26,44	21,68
2,5	18,37	22,10	20,46	20,18	21,73	26,36	21,65
3	19,35	22,03	20,30	20,07	21,50	26,20	21,54

Tabell V3-7 Resultattabell tilhørende Figur 7.16 målinger i kanten av vinduet med festet stativ med hastighetsfølere

Avstand fra glasset [cm]	Temperaturer [°C]						
	t på V1	t på V2	t på V3	t på V4	t på V5	t på V6	romtemperatur
0	14,33	15,43	16,70	17,08	20,50	17,70	20,56
0,1	15,07	15,30	16,94	17,67	19,70	17,02	20,48
0,2	13,47	15,33	16,88	17,82	20,21	17,62	20,42
0,3	13,12	15,24	18,45	17,72	18,14	17,39	20,38
0,4	12,30	15,17	17,86	17,85	18,09	18,33	20,33
0,5	13,19	15,07	21,10	17,77	18,28	19,91	20,30
1	14,26	17,83	19,22	18,50	18,41	18,70	20,26
1,5	14,67	16,83	19,08	18,11	20,48	19,48	20,21
2	14,96	17,55	18,10	18,36	20,54	22,78	20,26
2,5	17,98	17,82	18,37	18,58	21,64	21,32	20,28
3	18,45	17,85	18,54	18,63	20,17	19,70	20,28
4	17,27	18,28	20,05	19,71	21,76	20,58	20,38
5	18,66	19,25	20,07	20,78	24,29	22,51	21,01

Tabell V3-8 Resultattabell tilhørende Figur 7.17 målinger i kanten der hele stativet med termoelement flyttes utover

avstand fra glasset [cm]	Temperatur [°C]						
	t på V1	t på V2	t på V3	t på V4	t på V5	t på V6	romtemperatur
0	14,97	19,25	15,37	15,48	16,30	17,67	20,52
0,5	16,31	20,32	16,75	16,86	18,51	20,14	21,48
1	15,68	20,12	17,04	17,24	18,40	19,85	20,94
1,5	16,23	19,92	17,69	17,60	18,72	20,03	20,64
2	16,45	19,90	17,70	17,61	18,81	20,13	20,50
2,5	16,64	20,84	17,87	17,82	19,23	20,32	20,44
3	17,20	20,48	18,14	18,10	19,90	20,90	20,37

Tabell V3-9 Resultattabell tilhørende Figur 7.18 hastighetsmålinger på luftstrømmen over karmkanten og ut i rommet langs gulvet midt foran vinduet

avstand fra veggen [cm]	Hastighet [m/s]					
	V1 (langs gulvet)	V2 (9 cm over gulvet)	V3 (14 cm over gulvet)	V4 (19 cm over gulvet)	V5 (ved karmlist 24 cm over gulvet)	V6 (karmkanten 26,5 cm over gulvet)
0	0,007	0,049	0,039	0,064	0,075	0,111
0,2	0,021	0,061	0,002	0,049	0,075	0,118
0,5	0,050	0,057	0,008	0,084	0,169	0,117
1	0,086	0,071	0,056	0,119	0,218	0,096
1,5	0,089	0,061	0,057	0,090	0,184	0,087
2	0,095	0,070	0,065	0,087	0,158	0,089
2,5	0,090	0,076	0,069	0,103	0,170	0,102
3	0,094	0,068	0,060	0,052	0,143	0,085
4	0,101	0,078	0,064	0,053	0,109	0,075
5	0,110	0,068	0,057	0,029	0,075	0,057
7	0,138	0,068	0,053	0,018	0,055	0,043
10	0,208	0,069	0,050	0,024	0,042	0,023
15	0,195	0,070	0,041	0,016	0,029	0,025
20	0,167	0,074	0,043	0,017	0,036	0,030
60	0,038	0,079	0,054	0,039	0,043	0,033

Tabell V3-10 Resultattabell tilhørende Figur 7.19 temperaturmåling på luftstrømmen over karmkanten og ut i rommet langs gulvet midt foran vinduet

avstand fra veggen [cm]	Temperatur [°C]						romtemperatur
	t på V1	t på V2	t på V3	t på V4	t på V5	t på V6	
0	18,3	18,8	19,2	18,5	18,3	19,4	22,3
0,2	17,7	18,6	19,1	18,5	18,1	19,3	21,8
0,5	17,4	18,8	19,2	18,7	18,4	19,4	21,6
1	17,5	18,9	19,1	19,0	19,2	19,5	21,5
1,5	17,6	19,3	19,4	19,2	19,6	19,6	21,4
2	17,8	19,3	19,5	19,4	19,9	19,6	21,3
2,5	17,8	19,2	19,5	19,5	20,0	19,6	21,2
3	17,7	19,3	19,4	19,4	19,4	19,6	21,1
4	17,8	19,4	19,5	19,5	19,5	19,7	21,1
5	17,8	19,4	19,5	19,7	19,8	19,8	21,0
7	17,8	19,5	19,6	19,7	19,9	19,8	20,9
10	17,9	19,7	19,5	19,7	20,1	20,2	20,9
15	18,2	19,7	19,6	19,6	20,2	20,3	20,9
20	18,3	19,5	19,8	20,0	20,8	20,9	20,8
60	18,8	19,1	19,7	19,7	20,3	20,3	20,8

Tabell V3-11 Resultattabell tilhørende Figur 7.20 hastighetsmålinger på luftstrømmen over karmkanten og ut i rommet langs gulvet foran kanten av vinduet

Avstand fra veggen [cm]	Hastighet [m/s]					
	V1 (langs gulvet)	V2 (9 cm over gulvet)	V3 (14 cm over gulvet)	V4 (19 cm over gulvet)	V5 (ved karmlist 24 cm over gulvet)	V6 (ved karmkanten 26,5 cm over gulvet)
0	0,109	0,071	0,034	0,075	0,180	0,146
0,2	0,043	0,055	0,053	0,059	0,313	0,156
0,5	0,102	0,052	0,104	0,059	0,231	0,149
1	0,045	0,055	0,063	0,078	0,322	0,143
1,5	0,047	0,053	0,046	0,111	0,334	0,131
2	0,076	0,056	0,064	0,165	0,272	0,131
2,5	0,054	0,062	0,076	0,167	0,261	0,130
3	0,062	0,070	0,117	0,164	0,220	0,127
4	0,075	0,078	0,125	0,106	0,158	0,105
5	0,064	0,093	0,152	0,099	0,130	0,093
7	0,076	0,103	0,092	0,060	0,075	0,058
10	0,082	0,088	0,053	0,023	0,043	0,025
15	0,067	0,050	0,039	0,032	0,043	0,018
20	0,073	0,054	0,026	0,025	0,044	0,027
60	0,006	0,069	0,043	0,041	0,046	0,040

Tabell V3-12 Resultattabell tilhørende Figur 7.21 temperaturmålinger på luftstrømmen over karmkanten og ut i rommet langs gulvet foran kanten av vinduet

Avstand fra veggen [cm]	Temperatur [°C]						
	t på V1	t på V2	t på V3	t på V4	t på V5	t på V6	romtemperatur
0	18,68	18,64	18,99	18,54	18,93	19,60	22,51
0,2	19,01	18,77	18,82	18,60	19,70	19,73	21,81
0,5	19,83	19,07	18,85	18,90	19,02	19,99	21,57
1	18,84	19,07	18,75	19,00	19,27	20,16	21,43
1,5	18,87	19,03	18,77	19,11	19,50	20,40	21,31
2	18,86	19,02	18,75	19,13	19,53	19,95	21,24
2,5	18,86	19,01	18,64	19,17	19,57	19,94	21,15
3	18,82	18,87	18,65	19,32	19,71	20,11	21,10
4	18,70	19,03	19,14	19,41	19,93	20,24	21,06
5	18,78	18,95	19,20	19,47	20,00	20,55	21,02
7	18,66	19,25	19,45	19,54	20,24	21,39	20,99
10	18,76	19,41	19,66	19,70	20,62	21,85	20,93
15	19,27	19,87	20,06	20,05	21,29	21,34	21,68
20	19,29	20,07	19,80	20,03	21,15	21,40	21,35
60	19,89	19,71	19,69	19,93	20,90	23,29	21,13

Vedlegg 4

I dette vedlegget følger et utdrag av risikovurderingsrapporten om helse, miljø og sikkerhet i forbindelse med laboratorieforsøkene. Rapporten er godkjent av prosjektleder Hans Martin Mathisen, instituttleder Olav Bolland og HMS- ansvarlig på laben Morten Grønli. Fullstendig rapport kan fås ved å kontakte en av disse personene.

Risikomatriksen vil gi en visualisering og en samlet oversikt over aktivitetens risikoforhold slik at ledelse og brukere får et mest mulig komplett bilde av risikoforhold.

IDnr	Aktivitet-hendelse	Frekv-Sans	Kon s	RV
	<i>Fare for fall ved bruk av gardintrapp</i>	3	B	B3
2	<i>Fare for skade fra kniv, drill eller annet utstyr for installasjon av utstyr</i>	2	C	C2
3	<i>Fare for å snuble i utstyret</i>	3	B	B3
4	<i>Avsperring utenom arbeidstid: personer som ikke er operatører kan komme inn i riggområde</i>	3	C	C3

Vurdering restrisiko: restrisiko er akseptabel

Tabellen under tar for seg flere HMS aspekt i forbindelse med gjennomføringen av laboratorieforsøket.

HMS aspekt	Ja	Nei	NA	Kommentar / tiltak	Ansv.
Dokumentasjon, erfaring, kompetanse					
Kjent arbeidsoperasjon?		x			
Kjennskap til erfaringer/uønskede hendelser fra tilsvarende operasjoner?		x			
Nødvendig personell?	x				
Kommunikasjon og koordinering					
Mulig konflikt med andre operasjoner?	x				
Håndtering av en evt. hendelse (alarm, evakuering)?		x			
Behov for ekstra vakt?		x			
Arbeidsstedet					

Uvante arbeidsstillinger?		x			
Arbeid i tanker, kummer el.lignende?		x			
Arbeid i grøfter eller sjakter?		x			
Rent og ryddig?	x				
Verneutstyr ut over det personlige?		x			
Vær, vind, sikt, belysning, ventilasjon?		x			
Bruk av stillaser/lift/seler/stropper?		x			
Arbeid i høyden?	x			Ved montering av utsyr kan det være behov for gardintrapp. Romhøyden er 3 meter	
Ioniserende stråling?		x			
Rømningsveier OK?	x				
Kjemiske farer					
Bruk av helseskadelige/giftige/etsende kjemikalier?		x			
Bruk av brannfarlige eller eksplosjonsfarlige kjemikalier?		x			
Er broken risikovurdert?					
Biologisk materiale?		x			
Støv/asbest/isolasjonsmateriale?		x			
Mekaniske farer					
Stabilitet/styrke/spenning?		x			
Klem/kutt/slag?	x			Kan forekomme ved montering av utstyr	
Støy/trykk/temperatur?		x			
Behandling av avfall?		x			
Behov for spesialverktøy?		x			
Elektriske farer					
Strøm/spenning/over 1000V?		x			
Støt/krypstrøm?		x			
Tap av strømtilførsel?		x			
Området					
Behov for befaring?		x			
Merking/skilting/avsperring?		x			
Miljømessige konsekvenser?		x			
Sentrale fysiske sikkerhetssystemer					
Arbeid på sikkerhetssystemer?		x			
Frakobling av sikkerhetssystemer?		x			
Annet					