

Titel:

Halmhuse

Undertitel:

På vej mod passivhuse

Projektperiode:

Indeklima og Energi
Afgangsprojekt

Fra 2. september 2008
Til 18. juni 2009

Projektforfatter:

Peter Vester
Sidsel Petersen Warming

Vejledere:

Per Heiselberg

Oplag: 4

Rapport sideantal: 337

Vedlagt:

Billags CD
Tegningsmappe

Synopsis:

Følgende rapport omhandler halmhuse og undersøgelser af muligheden for at konstruere et halmhus på passivhus niveau. Erfaringen med halmhuse i Danmark er ikke særlig stor og der mangler viden om snittet halm som isoleringsmateriale. Der er arbejdet med tre hovedområder, som materialeværdier for snittet halm, tæthed og kuldebroer og nedsættelse af mandtimer på byggepladsen.

Til bestemmelse af materialeværdier for den snittede halm er der udført forsøg i en hot box. Der udføres i alt fem forsøg med fem testelementer indeholdende to typer halm, tre komprimeringer på hhv. løstfyldt, 300 kg og 600 kg samt et halm og ler element.

Undersøgelse af kuldebroer og utætheder er udført på et eksisterende halmhus i Friland, hvor der er udført tryktest og termografering. Det har givet et overblik over tætheden af halmhuse samt hvor der forekommer kuldebroer. Ud fra dette er der opstillet *COMSOL*-modeller for de observerede utætheder og kuldebroer, hvor den fundne varmeledningsevne ved hot box forsøgene er benyttet. *COMSOL*-modellerne er benyttet til beregning af linjetabskoefficienter.

For at nedsætte tidsforbruget og derved omkostningerne på byggepladsen, er der arbejdet med ideer til udformning af et halm og ler element, som kan indgå i elementbyggeri. Der er derfor i rapporten udformet to forslag til hvordan et sådan halm og ler element kan se ud.

Til sidst i rapporten er de relevante resultater fra undersøgelser og forsøg gennem projektet, blevet samlet til energiberegninger i hhv. *PH-PP* og *Be06*, for at bestemme om det er muligt at konstruere et hus med halmisolering på passivhus niveau.

Forord

Denne rapport er udarbejdet af projektgruppe B126b på kandidatuddannelsens 3. og 4. semester ved B-sektoren på studieretningen Indeklima og Energi under Det Ingeniør-, Natur- og Sundhedsvidenskabelig fakultet, Aalborg Universitet. Der er udarbejdet et langt afgangsspeciale, hvor projektgruppen har valgt at beskæftige sig halmhuse og teste hvorvidt det kan opnå status som et passivhus.

Bagerst i rapporten findes en række bilag samt en bilags CD, med de opstillede programmer og rapporten i pdf-format. Til udarbejdelsen af programmerne er der anvendt Mathworks MATLAB R2007b, Microsoft Office Excel 2007, PHPP, Be06, samt COMSOL Multiphysics 3.4. Til rapporten er der ligeledes vedlagt tegninger i en tegningsmappe.

I rapporten henvises der til kilder på følgende måde:

[’Forfatterens efternavn’ ’årstal’]

Ved normer o.lign. angives kilder ved:

[’Nummer på norm’ ’årstal’]

Supplerende oplysninger om kilderne findes i litteraturlisten.

En særlig tak rettes til Torben Christensen og Knud Erik Olesen for deres hjælp i laboratoriet. Desuden rettes der en tak til Tina Madsen, Steen Møller, Caroline Whitmeyer og Michael Callesen for at gøre det muligt, at producere halmelementerne samt at lave tryktest på halmhuse. Der rettes også en tak til TRI-CONSULT A/S for udlevering af PHPP- og Be06-beregninger for et komfort hus. Der rettes til sidst en særlig tak til Rasmus Lund Jensen for at have bistået med information og teoretisk viden i laboratoriet.

Abstract

This project fokuses on straw houses and development of these. Throughout the project there has been a collaboration with the association Friland that has experience with construction of straw houses.

Straw houses in Friland are build with nature materials and are thereby very enviromentally friendly. In the building industri today passive houses and other types of low energy building are becoming more and more interesting. The focus is on the energy consumption from finished construction to the destruction meaning the service life of the building. However there is less focus on the energy consumption used to construct the building materials as well as energy used to recycle or destruct used building materials.

This energy is one of the main focuses in Friland which is why they use materials like straw, clay or recycled materials such as old windows and doors. They want to reduce the energy used to construct the materials. The materials straw and clay both have a low energy consumption doing production, because they are natural and can be used almost directly from the field or ground. The question is if these houses can be constructed as low energy buildings in their service life?

The project aims to find out how and if it is possible to developpe a straw house with nature materials that fulfils the demands for passive houses. It would then be possible to build a house that is both enviromental friendly and with low energy consumption.

There is not a lot of experience and knowledge about the straw houses in Denmark. The energy consumption for a straw house is therefore uncertain and the houses are build based on the limited experience and a presumption about the U-value for straw. In this project experiments are therefore made to determine the thermal conductivity of straw with different densities as well as

an element with both clay and straw. These experiments are conducted in a hot box constructed by Aalborg University. With the thermal conductivity it is possible to determine the insulation power for a wall constructed with straw as the insulation material and thereby figure out if it is realistic to use straw as insulation in a house that should fulfil the demands for passive houses.

To determine the state of the houses build in Friland today with regards to the energy consumption a blowerdoor-test and thermal imaging have been carried out in a house in Friland. The house is small, but based on the latest experience and ideas in Friland. The insulation in the house is cut straw that has been blown into hollow rooms created by wooden frames. The insulating is cohesive the whole way around meaning that nothing interrupts the insulation between the walls, roof and floor. The point of the blowerdoor-test is to determine how airtight the house is, because this has a big influence on the energy consumption. The thermal imaging determines where there might be problems with thermal bridges or leakages in the construction. From the thermal images the linear thermal transmittance can be found and compared with the calculated linear thermal transmittance from models in the program *COMSOL*.

Both the linear thermal transmittance and the thermal conductivity are used in calculations in the programs *PHPP* and *Be06* to evaluate whether the demands for passive houses are fulfilled as well as the demands from the building regulation.

To industrialize the construction of a straw house two suggestions to construction of straw elements will be given. If these straw elements can become a reality this will lower the price for a straw house as well as lower the construction time which is rather long today.

Indhold

1 Problemanalyse	1
1.1 Analyse af problemstilling	3
2 Problemformulering	7
3 Løsningsstrategi	9
4 Problemafgrænsning	11
5 Halmhusets historie	13
6 Halmhuse i Danmark	15
7 Materialer og konstruktionsdele	19
7.1 Materialer	19
7.1.1 Halm	19
7.1.2 Ler	20
7.1.3 Kalkmørtel	21
7.1.4 Muslingskaller	21
7.1.5 Træ	21
7.2 Konstruktionsdele	22
7.2.1 Terrændæk	22
7.2.2 Tagkonstruktion	24
7.2.3 Ydervægge	26
8 Friland	29
9 Passivhuse	31
9.1 Byggetekniske løsninger til passivhuse	33
9.1.1 Projektering af et passivhus	33
9.1.2 Tæthed	34

9.1.3	Kuldebroer	35
9.1.4	Isolering	36
9.1.5	Vinduer og døre	36
10	Komfort hus	39
11	<i>PHPP</i>	41
11.1	Beregningsbetingelser i <i>PHPP</i>	41
11.2	Forskelle på <i>PHPP</i> og <i>Be06</i>	43
12	Følsomhedsanalyse	45
12.1	Morris metoden	45
12.2	<i>SimLab</i>	46
12.3	Parametere til følsomhedsanalyse	46
12.3.1	U-værdi	47
12.3.2	Linjetab omkring vinduer	48
12.3.3	Infiltration	50
12.3.4	Resultat af følsomhedsanalyse	50
12.4	Følsomhedsanalyse for ydervægskonstruktion	52
12.4.1	Resultat af fin følsomhedsanalyse	53
12.5	Optimering af <i>PHPP</i> - beregning	54
13	Varmeledningsteori	57
13.0.1	Varmeledning	57
14	Hot box	63
14.1	Formålet med den guardede hot box	63
14.2	Hot box'ens opbygning	64
15	Komprimeringsforsøg	67
16	Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg	71
16.1	Forudsætninger	71
16.2	Målepunkter	71
16.3	Termoelementer	76
16.3.1	Kalibrering	77
16.4	Konstruktion af testelementer	81
16.4.1	Testelement med fabriksnittet halm	81
16.4.2	Væg med ler og fabriksnittet halm	81
16.4.3	Testelement med fabriksnittet rapshalm	83
16.4.4	Halm papir blanding	84
16.4.5	Problemer med halm papir elementet	84

Indhold

16.5	Komprimering	85
16.5.1	Komprimeringssystem	86
16.5.2	Komprimering af testelement	87
16.6	Fremgangsmåde	90
16.7	Måleudstyr, fejlkilder og usikkerhed	93
16.7.1	Kalibreringsfejl	93
16.7.2	Temperaturudsving i laboratoriet	94
16.7.3	Fejl ved termoelementer	94
16.7.4	Antagelse om stationær tilstand	94
16.7.5	Måleudstyr	94
16.7.6	Fejl ved testelementerne	98
17	Resultat behandling	101
17.1	Krav der skal overholdes før forsøg	103
17.2	Varmeledningsevner for snittet halm	117
17.3	Halm ler element	118
18	3D-beregninger	121
18.1	Beskrivelse af bygning i Friland	121
18.2	<i>COMSOL</i>	129
18.2.1	Varmeledning	129
18.2.2	Konvektion	129
18.2.3	Stråling	130
18.3	Formål med at benytte <i>COMSOL</i>	130
18.4	Beregning i <i>COMSOL</i>	130
18.5	Beregningsmetode i <i>COMSOL</i>	132
18.5.1	Randbetingelser	132
18.6	Modeller i <i>COMSOL</i>	133
18.6.1	Tagkonstruktion	134
18.6.2	Glasparti	135
18.6.3	Fundament	136
18.6.4	Vindue med skrå lysninger	137
18.6.5	Vindue med lige lysninger	138
18.7	Resultater for <i>COMSOL</i> modeller	139
18.7.1	Tagkonstruktion	139
18.7.2	Glasparti	140
18.7.3	Fundament	141
18.7.4	Vindue med skrå lysninger	142
18.7.5	Vindue med lige lysninger	144
19	Linjetabskoefficienter	147

19.1	Modeller til beregning af linjetabskoefficienter	147
19.2	Beregning af linjetabskoefficienter	152
19.3	Resultater af linjetabsberegninger	154
19.4	Modeller for vindue	158
19.5	Kontrol af modeller i <i>COMSOL</i>	159
20	Målinger i Friland	167
20.1	Blowerdoor-test	167
20.2	Termografbilleder	168
21	Forsøget i Friland	171
21.1	Forsøgsforløb	171
21.2	Fejl og mangler ved forsøget	176
21.3	General blowerdoor-test	179
21.3.1	Valideringshuset	179
21.3.2	Testhuset	182
21.4	Fejl ved vinduesventil	185
21.4.1	Vinduesventil	186
21.4.2	Beregning af luftmængde gennem vinduesventil	188
21.5	Tryktabsberegninger justeret for åben vinduesventil	189
21.6	Termografering	190
21.7	Kuldebrostørrelse ud fra termografbilleder	201
21.7.1	Beregning af kuldebrostørrelse	201
21.7.2	Sammenligning af linjetabskoefficienter	204
21.8	Konklusion på forsøg i Friland	206
22	PHPP- og Be06- beregninger	209
22.1	PHPP- beregning	209
22.2	Be06- beregning	214
23	Sandwichelementer i beton	217
23.1	Konstruktion	217
23.2	Transport	218
23.3	Tidsforbrug	219
23.4	Halm og ler element	221
23.5	Træelementer	222
23.6	Transport	223
23.7	Montering	224
23.8	Samling	224
23.9	Udformning af halm og ler element	225

Indhold

24 Diskussion	229
25 Konklusion	233
26 Perspektivering	237
26.1 Fremtidige projekter	239
Litteratur	241
A Materialedata for isoleringsmaterialer	247
A.1 Halmballer	247
A.2 Hørfibre	247
A.2.1 Byggeregler og forskrifter	248
A.3 Lerjord	248
A.4 Kalkmørtel	250
A.5 Muslingskaller	250
B Materialeverdier	253
C Resultater fra komprimerings test	255
D Opsætning af hot box	259
D.1 Hot box'en	259
D.2 Styling	260
D.3 Indledende resultater	262
E Kalibreringer	263
F Målepunkters placering	281
G Udførsel af forsøg i Friland	285
H Termograferingsbilleder	289
H.1 Originale termografibilleder	310
I Beregning af kuldebroer ifølge DS 418	319
I.1 Kuldebroer for konstruktioner	319
I.2 Kuldebroer ved vinduer og døre	321
J Tryktests rapporter	323

1 Problemanalyse

Der er øget fokus på nedsættelse af CO₂-udledning og dermed energiforbrug i hele verden. I 1992 i Rio de Janeiro underskrev 155 lande Klimakonventionen, som trådte i kraft i 1994 [Miljøministeriet 2003]. Klimakonventionen sigtede mod en stabilisering af udledningen af drivhusgasser på 1990-niveauet, i de industrialiserede lande inden år 2000 [Finansministeriet n.d.]. 192 lande har i dag tiltrådt konventionen [Klima og Energiministeriet 2009].

Der blev i 1997 forhandlet et tillæg til Klimakonventionen i form af Kyoto-protokollen, hvor der blev sat konkrete grænser for udledningen af 6 forskellige drivhusgasser, herunder blandt andet CO₂, i industrilandene. Protokollen blev vedtaget i december 1997 og trådte i kraft i februar 2005 med 144 tiltrådte lande. Disse lande forpligter sig dermed til at nedbringe deres samlede udledninger af drivhusgasser til 5 % under niveauet fra 1990, i perioden 2008-2012. Samlet set skal EU nedbringe udledning af drivhusgasser med 8 % i forhold til 1990-niveauet. [Efteruddannelsesudvalget for bygge/anlæg og industri 2008]

Reduktionsmålene for EU-landene variere fra land til land pga. den interne ”byrdefordeling”, som er aftalt landene imellem. Danmarks reduktionsmål er på 21 %, hvilket er et af de højeste i verden [Efteruddannelsesudvalget for bygge/anlæg og industri 2008]. Der er derfor stor fokus på energiforbrug i alle brancher i Danmark. I byggebranchen blev der foretaget stramninger i forhold til energiforbruget i nye bygninger i 2006. Der blev indført tre forskellige energiklasser for nybyggeri. Den første energiklasse skal som minimum overholdes, hvorimod de to lavenergiklasser, lavenergiklasse 1 og 2 omfatter fremtidige stramninger i henholdsvis 2010 og 2015. Det fremgår nemlig af en energipolitisk aftale fra juni 2005, at energiforbruget skal strammes med 25 % i 2010 og yderligere 25 % i 2015, altså det der svarer til henholdsvis lavenergiklasse 2 og 1. Det er på nuværende tidspunkt frivilligt hvilken en af de tre energiklasser der bygges efter. [Økonomi- og Erhvervsministeriet 2007]

Energiforbruget defineres i bygningsreglementet som den samlede tilførte energi til opvarmning, ventilation, køling og varmt brugsvand i boliger. For kontorbyggeri skal belysning også inkluderes i energiforbruget. De tre energiklasser ser ud som følger for henholdsvis boliger og kontorbyggeri. [BR08 2008]

Energiramme for boliger

$$q_r = 70 + \frac{2200}{A}$$

Lavenergiklasse 2 for boliger

$$q_r = 50 + \frac{1600}{A}$$

Lavenergiklasse 1 for boliger

$$q_r = 35 + \frac{1100}{A}$$

Energiramme for kontorbyggeri

$$q_r = 95 + \frac{2200}{A}$$

Lavenergiklasse 2 for kontorbyggeri

$$q_r = 70 + \frac{1600}{A}$$

Lavenergiklasse 1 for kontorbyggeri

$$q_r = 50 + \frac{1100}{A}$$

Hvor

q_r er det årlige energiforbrug pr. opvarmede etageareal [kWh/m²pr.år]
 A er det opvarmede etageareal [m²]

Regeringen har udover disse energiklasser besluttet, at energiforbruget i nye byggerier i 2020 skal reduceres med 75 % vha. en strategi for energirigtige boliger dvs. en 75 % reduktion af den nuværende energiklasse, som minimum skal overholdes [Økonomi- og Erhvervsministeriet 2007].

I et forsøg på at være på forkant med udviklingen i forhold til energikravene er nye typer af byggeri blevet taget i betragtning. Dette er bl.a. lavenergi-huse og passivhuse. Lavenergi-husene bygges efter de to lavenergiklasser i det nuværende bygningsreglement, hvorimod passivhuse maksimalt må have et energiforbrug til rumopvarmning på 15 kWh/m²pr.år. [Rockwool n.d.] Det samlede primære energibehov inkl. energiforbrug til husholdning må maksimalt være på 120 kWh/m²pr.år. Begge beregnes pr. nettoareal. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008]

1 Problemanalyse

Der er bygget lavenergihuse forskellige steder i Danmark og passivhusene er også på vej ind, men det går langsomt. Det skyldes sandsynligvis, at det oftest er dyrere at bygge både lavenergihuse og passivhuse i forhold til almindelige villaer. Den ekstra investering, der skal foretages under byggeriet, indtjenes dog som minimum i bygningens levetid og mere til, samtidig med at erfaringer fra tidligere byggerier kan sænke kvadratmeterprisen på disse boliger.

Det meste fokus i byggebranchen er på nuværende tidspunkt placeret på energiforbruget i bygningernes levetid og ikke så meget på miljøvenlige materialer. Dette skyldes sandsynligvis at der kun fokuseres på energiforbruget i bygningernes levetid og ikke på energiforbruget i hele livscyklussen dvs. fremstillingsprocessen for materialerne, bygningens levetid og nedtagningen af bygningen. En anden grund til den manglende fokus på livscyklussen kunne være at de personer der senere skal flytte ind i huset kun bekymrer sig om hvor meget det koster at bo i huset og ikke hvad det har kostet at fremstille materialerne.

Det er sandsynligt, at der i den nærmere fremtid kommer et tidspunkt hvor energiforbruget i bygningernes levetid ikke kan reduceres yderligere. På det tidspunkt er det nødvendigt at kigge på andre steder hvor energiforbruget kan reduceres. Dette kunne være fremstillingsprocessen og nedtagningen. En måde at reducere den samlede energi i bygningens livscyklus kunne være halmhusbyggeri. Til halmhusbyggeri bruges naturlige materialer som halm og ler. Materialerne er derfor miljøvenlige, hvilket er godt under nedtagning af en bygning og der kan højst sandsynligt spares energi under fremstillingsprocessen pga. af den minimale behandling af materialerne.

Spørgsmålet er om halmhusbyggeri kan leve op til de skrappe energikrav som f.eks. passivhuse, så byggeriet både kan blive energirigtigt og miljøvenligt.

Dette projekt forsøger at give svaret på dette spørgsmål ud fra problemstillingerne opstillet i det følgende afsnit.

1.1 Analyse af problemstilling

I projektet opstilles følgende problemstilling. Hvert af de følgende problemer bliver kort beskrevet i dette afsnit.

Isolering

I halmhusbyggeri bruges halm som isolering. Det kan være i form af halm-baller, enten miniballer eller bigballe. Derudover bruges fintsnittet halm som løsfyldsisolering. Problemet med disse forskellige typer isolering er, at materialeværdierne ikke er fastlagt for alle typer og det vides derfor ikke hvilken type der er bedst. Det vides desuden heller ikke hvor godt halm egner sig som isolering i forhold til traditionel isolering fra f.eks. Rockwool og Isover.

Kuldebroer

Kuldebroer er steder i en konstruktion, hvor varmetabet er større end i den resterende del af konstruktionen. Der er kuldebroer i alle konstruktioner, men bl.a. i passivhuse ligges der stor vægt på at mindske kuldebroer mærkbart. Det vides ikke om det også er muligt at konstruere et halmhus med mærkbart minskede kuldebroer eller hvordan det kan udformes.

Tæthed

For at holde energiforbruget i en bygning på et minimum, er det nødvendigt at sikre at bygningen er tæt. Dette er også en stor del af arbejdet under opbygningen af et passivhus. I halmhuse foretrækkes naturmaterialer eller miljøvenlige materialer. Problemet er derfor om det er muligt at konstruere et tæt halmhus med brug af miljøvenlige materialer.

Kvalitet af byggeriet

Halmhusbyggeriet i Danmark er ikke særlig udbredt. En af grundene til det er usikkerheden om kvaliteten af byggeriet. Det er svært at give et præcist bud på levetiden af et halmhusbyggeri i Danmark, idet erfaringerne med halmhuse her i landet ikke er særlig stor. Den manglende erfaring skyldes, at der først blev bygget halmhuse til beboelse i Danmark i 1990'erne [Jettie Nielsen n.d.b]. I udlandet er der erfaringer med halmhuse som er over 100 år gamle [Rolf Jacobsen 1999]. Det kan ikke føres direkte til Danmark, da klimaerne er forskellige.

1 Problemanalyse

Energiforbrug

Som før nævnt er der øget fokus på energiforbrug i bygningernes levetid i dag. Halmhusbyggeri er et miljøvenligt byggeri, så udfordringen er om det er muligt at bygge et energirigtigt halmhus. Det vil blive undersøgt om det er muligt at komme ned på passivehus niveau med de senere fundne materialeleværdier.

Energiforbrug gennem hele livscyklussen

Der er i dag ikke særlig stor fokus på energiforbruget gennem hele livscyklussen for en bygning, som også tidligere nævnt. Dette emne er også en vigtig faktor i forsøget på at spare energi og være miljøbevidste. Spørgsmålet er om der kan spares endnu mere energi ved at bygge halmhuse i forhold til traditionelle boliger. Det er sandsynligt at der kan spares energi når hele livscyklussen betragtes, men det vides ikke med sikkerhed.

Mandtimer og pris

Materialerne til halmhusbyggeri er billige, men til gengæld skal der bruges mange mandtimer på byggeriet. Det er derfor vurderet at et halmhus og et traditionelt hus koster nogenlunde det samme at opføre, hvis det gøres af professionelle håndværkere [Jettie Nielsen n.d.b]. I et halmhusbyggeri kan der spares penge hvis bygherren selv udfører byggeriet, men måske er det muligt at sænke prisen på halmhusbyggeri udført af professionelle håndværkere ved at industrialisere byggeriet eksempelvis ved konstruktion af sandwichelementer eller andre mulige løsninger. Derved er det sandsynligt, at der kan spares mandtimer til opførelsen af boligen.

2 Problemformulering

Ud fra den megen fokus på energiforbruget i bygningernes levetid og mindre fokus på miljøet, ønskes det at udføre et miljørigtigt byggeri uden at forøge energiforbruget og prisen på byggeriet. Dette kan evt. gøres ved at industrialisere halmhusbyggeriet og undersøge muligheden for brug af dette i forbindelse med passivhuse, som nævnt i tidligere afsnit. Herved rejses følgende spørgsmål.

- Hvad er materialeparametrene for de naturlige isoleringsmaterialer?
- Hvordan optimeres tætheden og kuldebroer i et eksisterende halmhusbyggeri?
- Er det muligt at opfylde kravene til et passivhus ved brug af naturmaterialer?
- Hvordan kan antallet af mandtimer på byggepladsen reduceres i forbindelse med halmhusbyggeri?

3

Løsningsstrategi

I det følgende vil projektforsløbet blive beskrevet. Både projektforsløb og sammensætning er illustreret på Tegning 09 i tegningsmappen.

Kuldebro- og tæthedsanalyse

Kendskab til evt. kuldebroer og utætheder i en bygning er vigtig for energiforbruget i bygningens levetid. I dette projekt er kuldebroer og utætheder lokaliseret med hhv. termografibilleder og en blowerdoor-test i et halmhusbyggeri i Friland. Der tages to sæt termografibilleder, det første sæt billeder bliver taget inden der udføres en blowerdoor-test og det andet under blowerdoor-testen. Grunden til dette er for, at se om evt. utætheder er mere fremtrædende under blowerdoor-testen, hvilket er forventet. På den baggrund forventes det muligt at kunne se forskel på kuldebroer og utætheder med de to sæt billeder.

For at kunne beregne et linjetab for forskellige samlinger til brug i programmerne *PHPP* (Passive House Planning Package) og *Be06*, udføres tredimensionelle beregninger på samlinger i et halmhusbyggeri fra friland, i programmet *COMSOL*. De tredimensionelle beregninger bruges desuden også til at finde steder, hvor det kunne være en god ide at optimere kuldebroer.

Materialeparameterundersøgelse for snittet halm

Her udføres forsøg med to typer snittet halm. Til forsøgene benyttes en guarded hot box. Materialeværdien der findes er varmeledningsevnen, som skal bruges til senere beregninger af energiforbrug i *PHPP* og *Be06*.

Materialeparameterundersøgelse for vægelement

Vægelementet bliver sammensat af snittet halm og ler. Der udføres forsøg på et vægelement for at finde materialeværdierne for et samlet vægelement, idet

disse er ukendte. Det forventes at materialeværdierne ændres i vægelementet i forhold til de enkelte materialer, idet der kan opstå et komposit materiale når f.eks lerpudsen pudses på halmkonstruktionen. Resultaterne skal bruges til vurdering af vægelementets brug i et halmhus på passivhus niveau samt vurdering af en evt. optimering af vægelementet. Forsøget udføres igen vha. en guarded hot box.

Sceeninganalyse

I projektet laves en sceeninganalyse i form af en følsomhedsanalyse vha. Morris metoden. Denne Morris metode udføres på baggrund af simuleringer med programmet *PHPP*, for at finde frem til de parametre der har størst betydning for energiforbruget i et passivhus. Derved kan der sættes fokus på de vigtigste parametre ved optimering af energiforbruget i halmhusbyggeri på passivhus niveau. Analysen udføres ved at indsætte en række forskellige værdier for hver af de udvalgte parametre og vurdere deres indflydelse på resultatet i forhold til hinanden.

Passivhus niveau

Her foretages en undersøgelse af om de fundne værdier og resultater fra de forrige undersøgelser og forsøg, kan opfylde kravene til et hus på passivhus niveau. Dette gøres i programmet *PHPP*, som bruges ved dimensionering af passivhuse. Der vil desuden også blive udført en beregning i *Be06*, for at se hvad det opnåede resultat svarer til i dette program.

Perspektivering

I dette afsnit analyseres mulighederne for at øge interessen for halmhusbyggeri. Hvilke emner der skal sættes fokus på for at opnå en øget interesse. Kan de behandlede emner i rapporten hjælpe med til dette og kan nogle af dem evt. erstatte noget af det der findes på markedet i dag. Der gives desuden forslag til emner det bør undersøges dybere.

4 Problemafgrænsning

Rapporten omhandler varmetransport i halmhusbyggeri. Dette er et omfattende emne og kan dermed være grundlag for et større forskningsprojekt. Rapporten afgrænses derfor til nogle bestemte emner, hvorved den ønskede dybde opnås.

Materialer

Der findes forskellige måder at behandle halm på. Det kan snittes eller presses til mini- eller bigballer. Dertil kommer at der er forskellige størrelser af snittet halm ligesom at halmen kan presses med forskellige tryk. Det er for omfattende at udfører forsøg på alle former, hvorfor der er udvalgt to typer snittet halm, som vil blive benyttet. Der afgrænses derfor fra de andre typer af snittet eller presset halm.

Livscyklusanalyse

En livscyklusanalyse omhandler energiforbruget til fremstillingsprocesserne af benyttede materialer, bygningens levetid samt nedtagningen af bygningen. Der afgrænses fra at udføre en livscyklusanalyse og derfor betragtes kun energiforbruget i bygningens levetid.

Klima

Klimaet har betydning for halmhusbyggeri, da det kan påvirke levetiden af bygningerne negativt hvis klimaforholdene ikke tages i betragtning. Der afgrænses i projektet fra at udføre en klimaundersøgelse.

Programmernes troværdighed

I projektet benyttes en række forskellige programmer. Der afgrænses fra at verificere programmerne.

5 Halmhusets historie

I det følgende afsnit vil der blive givet et historisk overblik over halmhusbyggeriets udvikling op gennem tiden.

Brugen af halm til byggeri er kendt helt tilbage fra 4000 f.kr., hvor egypterne brugte en blanding af jord og halm. Halmen fungerede som armering for jorden og gav samtidig en vis isoleringsevne. I årene 2000-1600 f.kr. blev en kombination af ler og halm brugt som isolering i bl.a. luksuriøse bade. Længere oppe i tiden blev halmen brugt til tagtækning i Nordeuropa. Denne tradition kan føres over 2000 år tilbage.[Rolf Jacobsen 1999]

For 500 år siden blev en blanding af ler og halm stoppet ind i væggene på nogle bygninger i Tyskland. Disse bygninger er stadig i brug i dag og materialet blev genbrugt i væggene under en senere restaurering af bygningerne.[Paul Lacinski og Michel Bergeron 2000]

Byggemetoden, The Nebraska Style House som stadig benyttes stammer tilbage fra omkring slutningen af det 19. århundrede, hvor ballepressen blev opfundet, denne var enten hestedrevet eller drevet af damp[Athena Swentzell Steen 1994]. I området Sand Hills i Nebraska flyttede nybyggere til i 1880'erne. Da tømmer var begrænset og derfor dyrt blev der i begyndelsen benyttet græstørv til at opbygge vægge med, men pga. udviklingen af ballepresseren og dårlig græstørvskvalitet blev forsøg med stabling af halmballer afprøvet.[Paul Lacinski og Michel Bergeron 2000] De fleste huse blev bygget som midlertidige, hvilket ændrede sig da nybyggerne indså at disse huse var velegnede til permanente boliger. Bygningerne blev derefter pudset både indvendig og udvendig.[Athena Swentzell Steen 1994]

Halm blev ligeledes brugt meget i forbindelse med genopbygningen i vesttyskland i tiden umiddelbart efter 2. verdenskrig. I forbindelse med dette arbejde blev der udarbejdet byggeforskrifter(1944), DIN-normer og oprettet skoler for selvbyggere.[Rolf Jacobsen 1999]

Mellem de tidlige 1950'ere og tidlige 1980'ere stagnerede halmhusbyggeriet næsten, sandsynligvis pga. muligheden for masseproducerede konstruktionsma-

terialer, hvilket gjorde at husejere og husbyggerne ikke længere var afhængige af lokale byggemateriale leverandører.[Athena Swentzell Steen 1994]

Halmhusbyggeriet blomstrede op igen sent i 1970'erne og i begyndelse af 1980'erne inspireret bl.a. af en artikel skrevet af Roger Welsch i 1974[Athena Swentzell Steen 1994]. Artiklen handlede om halmhusene i Nebraska [Rolf Jacobsen 1999].

Mange af de byggede halmhuse rundt omkring i verden er stadig i brug i dag. Nogle huse er helt tilbage fra 1914 [Athena Swentzell Steen 1994]. I Danmark er der blevet bygget med halmballer siden 1997. Det er derfor svært på nuværende tidspunkt at sige noget om bl.a. holdbarhed og egnethed i det danske klima.[Jettie Nielsen 2007]. I det følgende afsnit vil halmhuse i Danmark blive beskrevet ud fra den erfaring der eksistere.

6 Halmhuse i Danmark

I det følgende vil det blive beskrevet hvordan et halmhus kan være bygget op i Danmark. Det følgende afsnit er baseret på [Jørgen Munch-Andersen og Birthe Møller Andersen 2004] medmindre andet er angivet.

Halmhusene i Danmark er hidtil blevet opbygget på stort set samme måde, hvor halmballer er brugt som isolering i væggene. Halmhuset består af en bærende konstruktion som regel et træskelet, som kan udføres på forskellige måder enten som fritstående eller gemt i vægkonstruktionen. Når der benyttes et fritstående træskelet til at bære konstruktionen benyttes der oftest rundtømmer, da disse giver et naturligt og rustikt udseende. Der kan på figur 6.1 ses et træskelet af rundtømmer, der skal være bærende og synligt i et halmhus. Der er også placeret rundtømmer i tagkonstruktionen, hvilke også skal være synlige.



Figur 6.1: Figuren viser et halmhus der er under opførsel, hvor rundtømmer skal være bærende og synlige.

I halmhusene der bygges i dag er der ofte benyttet løsfyldsisolering i form af snittet halm, som blæses ind i de konstruerede hulrum. Fordelen ved løsfyldsisolering er at det slutter tæt til konstruktion og det kan pakkes tættere. Ulempen ved løsfyldsisolering er at der kan opstå sætninger hvis indblæsningen ikke udføres ordentligt. Det er derfor vigtigt at være omhyggelig med denne proces. [Jettie Nielsen n.d.a]

Et af de første spørgsmål, der opstår i forbindelse med halmhusbyggerier er om det er brandfarligt? Halmen kan brænde, men det betyder ikke at konstruktionen som helhed er brandfarlig. Brandfarligheden afhænger af overfladebehandlingen på halmvæggen. Der benyttes oftest en lerpuds på indersiden mens der benyttes enten lerpuds eller kalkmørtel på ydersiden. Hvis lerpudslaget er udført med tilstrækkelig omhyggelighed og i en tykkelse på 40 mm overholder dette brandkravene til ydervægskonstruktioner, beskrivelse af undersøgelsen kan ses i bilag A.1. For enfamiliehuse uden integreret carport eller garage anses brandkravene for opfyldt hvis de bærende dele udføres som BD 30 [Erhvervs- og Byggestyrelsen 2008].

Grunden til, at der benyttes kalkmørtel på ydersiden er, at kalkmørtel kan påføres i et tyndere lag [Jettie Nielsen 2007]. Til beskyttelse mod vind og vejr benyttes ofte også træ, som monteres udenpå ler- eller kalkpudsen med et ventileret hulrum imellem.

Fugt i konstruktionen kan være en trussel mod halmhuse, da halmen kan rådne og danne svampespore, som det ligeledes gælder for isoleringen i traditionelle byggerier. Fugt i konstruktionen forhindres ved at være omhyggelig med lerpudslaget eller ved at placere en dampspærre i konstruktionen. Alt efter hvilken overflade der er valgt på ydersiden kan det være en god ide med et forholdsvist stort udhæng som dermed beskytter ydervæggen mod direkte regn. Der kan være andre løsninger for både yder- og indersiden af vægkonstruktionen, men uanset hvilken løsning der vælges er det vigtigt at tage diffusions og brandhæmmende egenskaber i betragtning.

Terrændækket i halmhuse består ofte af blåmuslinger der er rengjorte. De benyttes både som det kapillarbrydende lag, men også som det isolerende lag. Der kan her benyttes et lag polystyren til at øge isoleringsværdien hvis dette er ønskeligt. Blåmuslinger har også været benyttet til linjefundament under bærende ydervægge. Ifølge Steen Møller viser erfaring fra Friland, at dette giver anledning til sætninger. Derfor benyttes der nu ofte betonstøbte linjefundamenter eller punktfundamenter under bærende konstruktionsdele.

Tagkonstruktionen består af tagdækning, spær, isolering og en loftbeklædning

6 Halmhuse i Danmark

som normale tagkonstruktioner. I Danmark bygges der gerne med skråt loft til kip, hvormed taget bliver et såkaldt paralleltag. Der benyttes da halm som isolering i tagkonstruktionen og for at få plads til halmballerne anvendes der ofte to lag bjælkespær, hvor det nederste ofte er af kraftig rundtømmer så halmen kan lede belastningen fra selve tagbelægningen ned i dette kraftige rundtømmer som leder dem ud i ydervæggen eller ud til søjler som leder dem ned i fundamentet, dette kan ses på figur 6.2.



Figur 6.2: Figuren viser en tagkonstruktion, der skal isoleres med halmballer.

Vinduer og døre varierer i hvert enkelt hus, det er vigtigt at overveje lysindfaldet fra disse til de enkelte rum i huset, da ydervæggene i halmhusbyggeri generelt er tykkere og derfor er med til at hindre dagslys i at komme ind i huset. Desuden er det her vigtigt at få tætnet godt omkring vinduer og døre for at mindske kuldebroer.

I det efterfølgende afsnit vil mange af de nævnte materialer, i dette afsnit, blive beskrevet i en mere detaljeret grad.

7 Materialer og konstruktionsdele

I det følgende vil der blive givet en detaljeret beskrivelse af de enkelte materialer og efterfølgende en beskrivelse af opbygningen af de konstruktionsdele, der bliver benyttet i halmhuse. I beskrivelsen af de forskellige materialer vil der blive lagt vægt på deres styrker og svagheder samt evt. specielle forhold der skal tages hensyn til, når materialet benyttes i byggeri. Der vil under de enkelte konstruktionsdele blive taget udgangspunkt i skitser, der overholder bygningsreglementet ifølge [Jørgen Munch-Andersen og Birthe Møller Andersen 2004]. Kapitlet er baseret på [Jørgen Munch-Andersen og Birthe Møller Andersen 2004], medmindre andet er anført.

7.1 Materialer

I det følgende vil de materialer der oftest bliver benyttet til klimaskærmen i halmhusbyggerier blive beskrevet nærmere.

7.1.1 Halm

Halm er et biprodukt fra landbrugsproduktionen, hvor der er store mængder der ikke bliver benyttet til andet end at brænde af for at udvinde energi. Halm er en vedvarende kilde, som kan høstes i store mængder hvert år. Ud fra en hensigt om at spare energi i fremstillingen af byggematerialer, er det ideelt at bruge halmballer i konstruktioner, da det vil være muligt at spare energi i forhold til betonelementer. Ideen med at benytte naturlige materialer i konstruktioner er, at spare energi på produktionen i forhold til eks. betonelementer. Som halmen benyttes i dag kræves der flere mandtimer på byggepladsen i forhold til betonelementbyggeri, det vil kunne løses ved at konstruere et halm og ler element, hvor der benyttes mindre energi på behandling af de enkelte delelementer.

Halmballer kan i bygningssammenhæng benyttes som isolering enten bærende eller ikke-bærende i en væg. Desuden kan halm snittes og fyldes i en stående

ydervæg med f.eks. træskelet. Der er i dag ikke foretaget undersøgelser der viser, hvad der sker med isoleringsværdien hvis halm snittes og blæses ind i ydervægge såvel som tag- og gulvkonstruktioner. Der udføres derfor forsøg senere i dette projekt, for at bestemme denne isoleringsevne.

Det er vigtigt, at halmen ikke udsættes for direkte regn i byggeprocessen, da halm relativt hurtigt begynder at danne svampespore som er farligt både under byggeprocessen, men kan også skade indeklimaet i det endelige byggeri. Der er ikke lavet test af hvor meget fugt halm kan tåle, men periodiske belastninger op til de 18 %, som træ kan tåle, giver ikke problemer for halmen. Halm er, som tidligere nævnt, et brandbart materiale og det er derfor nødvendigt at beklæde halmen med et brandhæmmende materiale såsom ler, hvilket vil blive beskrevet i det efterfølgende afsnit.

7.1.2 Ler

Lerholdig jord kan benyttes direkte som den er. Den kan benyttes som puds, lergulv, lersten og selvfølgelig industrielle teglsten. I halmhuse benyttes lerjord oftest som lerpuds, hvor det kan anvendes på forskellige måder enten direkte på halmen hvor det er med til at styrke konstruktionen, på et trådnæt som er placeret tæt på halmballerne eller ved forskalling. Lerpuds kan desuden anvendes på ydersiden af vægkonstruktionen, hvor det dog ikke specielt modstandsdygtigt overfor regn, som kan skylle lerpudsen ned og derfor skal væggen behandles og gerne beskyttes med et stort udhæng. Der kan i stedet benyttes kalkmørtel, som nævnt i tidligere afsnit, på væggens yderside. Det vil blive beskrevet i det efterfølgende afsnit.

Det er en fordel at benytte lerpuds på indersiden af væggen fordi det har en relativ stor varmekapacitet og derfor kan være med til at udjævne temperaturudsving over døgnet. Desuden kan det optage og afgive fugt og dermed bidrage til styring af fugtudsving over døgnet og skabe et bedre indeklima.

Det er vigtigt, at fokusere på områder hvor ler benyttes sammen med andre materialer, da lerpuds arbejder meget ved indtørring og ændringer i fugtindholdet, derfor kan det være svært at holde tæt ved f.eks. trækonstruktioner placeret i lerpudslaget. Hvis lerpudsen bliver påført omhyggeligt og efterpudses igen, når lerlaget er helt udtørret kan revner i laget undgås og derved er det ikke nødvendigt, at indlægge en dampspærre i konstruktionen for at opnå lufttæthed i vægkonstruktionen.

Lerpudsen virker også som et brandhæmmende lag. Hvis lerpudsen er tykkere

7 Materialer og konstruktionsdele

end 40 mm overholder det brandkravene for ydervægskonstruktioner i enfamiliehuse, som kræver BD 30 [Erhvervs- og Byggestyrelsen 2008]. Det er nødvendigt, at pudse halmisoleringen med et materiale som minimum opfylder kravene til et klasse 2 materiale, lerpudsen opfylder kravene for klasse 1 og er dermed egnet som brandhæmmende lag. Lerlaget kan behandles på forskellige måder enten med linolie eller med forskellige naturmalinge, hvis der ønskes et andet udseende.

7.1.3 Kalkmørtel

Kalkmørtel er i ren form læsket kalk og sand hvori der tilsættes vand. Der findes forskellige tilslagsmaterialer der kan øge styrken, dette behøver nødvendigvis ikke at være cement. I halmhuse er det oftest ren kalkmørtel der benyttes i konstruktionen. Kalkmørtel benyttes oftest på ydersiden af en ydervægskonstruktion, da kalkmørtlen er mere modstandsdygtig overfor vejrpåvirkninger end ler. Det er også tættere end lermørtel, hvilket er en ulempe da det kan forårsage fugtophobninger, idet væggen ikke kan komme af med den overskydende fugt. Det giver dog som regel ikke problemer, da der normalt påføres et tyndere lag kalkmørtel i forhold til lermørtlen og dermed vil fugt lettere kunne trænge ud i det fri.

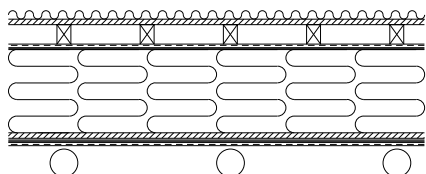
7.1.4 Muslingskaller

Muslingskaller bliver oftest benyttet i terrændæk men kan også benyttes som tagdækning, da erfaring har vist at de ikke blæser væk. Muslingskaller benyttes i terrændæk, fordi de både kan virke som det kapillarbrydende lag, men også som det isolerende lag. Knuste muslingskaller har en smule bedre isoleringsevne end hele skaller pga. der er flere og mindre hulrum. Det medfører, at der skal bruges en større mængde skaller og rumvægten af skallerne kan blive helt op til fordoblet, derfor benyttes der oftest hele muslingskaller til det varmeisolerende og kapillarbrydende lag. Muslingskaller bliver nemlig i dag opkøbt til andet end boligbyggeri og derved er prisen steget.

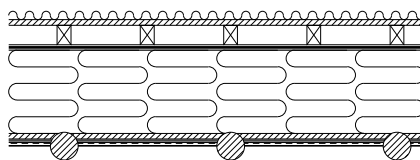
7.1.5 Træ

Træ bliver i høj grad brugt i halmhuse, for det meste som bærende konstruktion. I de danske halmhuse bliver der oftest benyttet naturtræ direkte som

rundtømmer. Der er forskellige måder at placere træet i konstruktionen som vist på figur 7.1 og 7.2.



Figur 7.1: Figuren viser en vægkonstruktion hvor den bærendekonstruktion er placeret udenfor vægen.



Figur 7.2: Figuren viser en vægkonstruktion hvor den bærendekonstruktion er placeret i vægens overflade.

Når træet bliver placeret i væggens lerpudsede overflade kan dette skabe problemer, da træet arbejder anderledes end lerpudsen og dermed kan dette skabe utætheder omkring trækonstruktionen. Det er derfor vigtigt at sætte sig ind i hvilken træsort det er bedst at benytte, da de har forskellige egenskaber. Der findes flere naturmaterialer udover de ovenstående, som kan benyttes til halmbyggei, men dette er de mest brugte materialer og derfor tages der udgangspunkt i disse gennem projektet. Optimeringen af de enkelte konstruktionslementer vil også blive forsøgt ved at benytte disse materialer om muligt. Konstruktionsdelene er beskrevet i efterfølgende afsnit.

7.2 Konstruktionsdele

Konstruktionsdelene i et halmhus er markant anderledes end i et traditionelt byggeri. I de følgende afsnit vil terrændækket, tagkonstruktionen og ydervæggene blive beskrevet.

7.2.1 Terrændæk

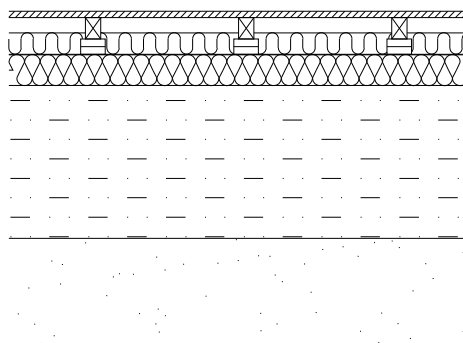
Et terrændæk består groft set af de følgende tre lag, som er et kapillarbrydende lag, et varmeisolerende lag og øverst en trykfordelende plade. I et halmhus bliver der til hhv. det kapillarbrydende og det varmeisolerende lag oftest benyttet det samme materiale, nemlig muslingeskaller, som tidligere beskrevet. Grunden til dette er den relative store mængde luft der er i laget af muslingeskaller. Kravet til isoleringsevnen varierer alt efter om der benyttes gulvvarme eller ej

7 Materialer og konstruktionsdele

i gulvkonstruktionen. Der tillægges ingen isoleringsevne til den nederste del af muslingeskallelaget, idet dette kun fungerer som et kapillarbrydende lag.

Terrændæk kan være opbygget som vist på figur 7.3, hvor der er indlagt en dampspærre, som benyttes til tætning mod radon og fugt. I forhold til fugt er det normalt ikke nødvendigt med en dampspærre medmindre at der lægges en fugtfølsom gulvbelægning.

Øverst i terrændækskonstruktionen er der oftest placeret en trykfordelingsplade, som kan være lavet af beton, lerpuds eller andre pladevirkende materialer. Terrændækket forbindes ofte med fundamentet.



Figur 7.3: Figuren viser en simpel terrændækskonstruktion hvor der er lavet et trægulv på strøer.

Før i tiden blev der støbt en kassette hvori der blev fyldt muslingeskaller. Kassetterne blev benyttet som linjefundamenter under bærende ydervægge, men ifølge Steen Møller fra Friland har det vist sig at muslingeskallerne ikke har den forventede styrke og dermed bliver knust under de store laster og kan forårsage sætninger. Derfor benyttes der nu enten støbt linjefundament eller punktfundament under bærende søjler, som også tidligere nævnt.

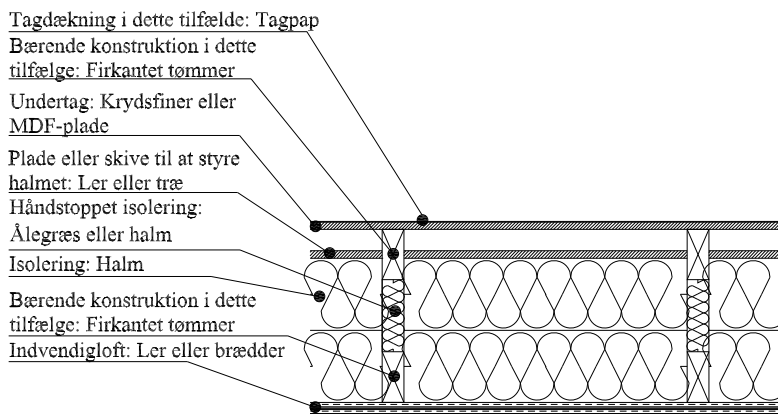
Ved punktfundamenter kan det vælges, at løfte hele konstruktionen over jordoverfladen. Det vil sige at gulvkonstruktionen og isoleringen bliver løftet op på bjælker, der leder belastningen ned i fundamenterne. Ved løsfyldsisolering kan dette være en fordel, da hulrummet fra ydervæggen så kan fortsætte ned i hulrummet i gulvkonstruktionen.

Der blæses normalt ind i et hulrum af gangen for at være sikker på, at alle hulrum fyldes ordentlig. Det er ikke nødvendigvis et støbtfundament, der løfter

hele bygningen, det kan også være havefliser eller andet der er stablet ovenpå punktfundamenterne. En anden fordel ved at løfte konstruktionen er, at der ikke samles fugt i fundamentet, som det kan være tilfældet ved linjefundamenter, hvor fugten kan trænge op i halmen i ydervæggen og måske skabe problemer.

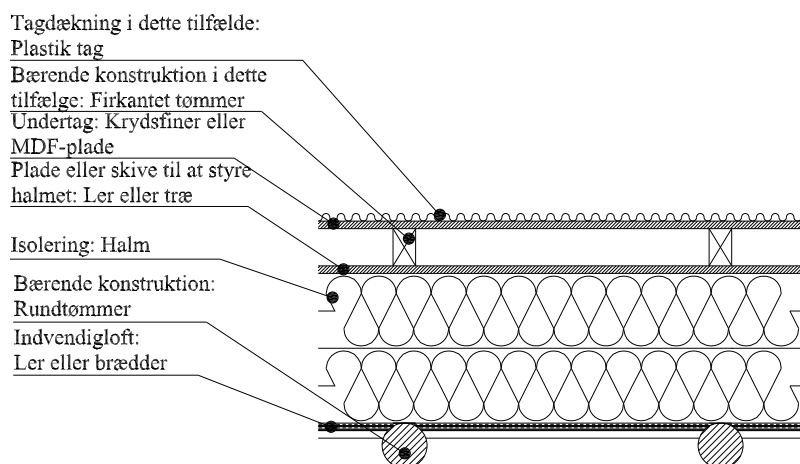
7.2.2 Tagkonstruktion

Tagkonstruktionen består af tagdækning, spær, varmeisolering og inderst en loftbeklædning. Tagdækningen består oftest af tagpap, et jordlag eller evt. et lag muslingeskaller, der kan dog også benyttes normale teglsten. En tagkonstruktion i et halmhusbyggeri består oftest af to sæt spær, et til at bære den forholdsvis tunge halmisolering, og et andet spær benyttes til enten af føre lasten fra tagbelægningen ned til de bærende spær eller direkte ud til de bærende søjler. Der er skitseret forskellige løsningsmodeller på figur 7.4, 7.5 og 7.6.

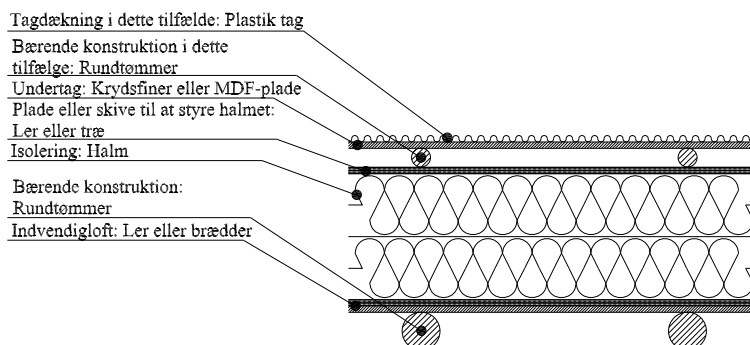


Figur 7.4: Figuren viser en simpel tagkonstruktion, hvor de bærende elementer er skjult.

7 Materialer og konstruktionsdele



Figur 7.5: Figuren viser en simpel tagkonstruktion, hvor de bærende elementer er synlige på indersiden.



Figur 7.6: Figuren viser en tagkonstruktion, hvor der er benyttet rundtømmer til at bære hhv. tag og isolering hver for sig.

Disse løsninger kan udføres enten med synlige eller skjulte spær. Benyttes der synlige spær er det oftest store rundtømmerbjælker, som kan lede den samlede last ud til de bærende stolper, mens de skjulte spær kan være udformet af forskellige typer træ og på forskellige måder.

Da varmeisoleringen er halm er det vigtigt at have et brandhæmmende lag på indersiden af konstruktionen. Her kan der være ekstra omkostninger forbundet med at benytte ler som brandhæmmende lag pga. den relativt høje densitet og store vægt, selv ved tynde lag. Der kan benyttes andre materialer som f.eks. gipsplader i stedet for ler.

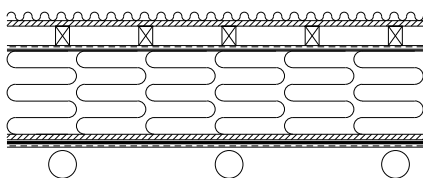
7.2.3 Ydervægge

Ydervæggen i et halmhus består oftest af halm mini- eller bigballer som isolering, men snittet halm, som blæses ind i hulrummet i væggen kan også bruges. På indersiden af denne vægkonstruktion kan der pudses med et lag lerpuds, som dermed er med til bl.a. at beskytte halmen mod fugt. Ydersiden af vægkonstruktionen bliver oftest behandlet med kalkmørtel, da kalkmørtel er mere modstandsdygtig overfor regn. Det er vigtigt, at der ikke kan komme større mængder fugt ind i vægkonstruktionen, da det kan forårsage råd i halmen. Skulle det ske, at fugt kommer ind i konstruktionen er det vigtigt at det også kan komme ud igen inden for kort tid, for at undgå skader.

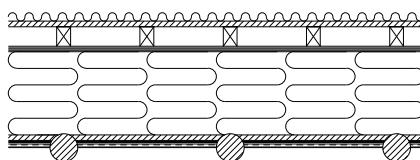
Den bærende konstruktion kan være hele ydervæggen, men kan også bestå af bærende søjler placeret inde i væggen. Den bærende konstruktion kan desuden være synligt placerede søjler i siden af væggen eller opføres som en trækonstruktion for sig selv, som vist på figur 7.7. Der er forskellige problemer ved de enkelte løsninger, såsom den bærende konstruktion der står helt frit, inde i rummet og derved optager en del af det frie areal. Hvis den bærende konstruktion er placeret i siden af selve vægkonstruktionen kan dette være med til at skabe utætheder, da træ og lerpuds arbejder forskelligt ved temperatur- og fugtændringer. Er de bærende søjler placeret inde i væggen kan det skabe kuldebroer eller øge tykkelsen af væggen. Det er derfor op til den enkelte bygherre at finde den bedste løsning.

En halmvægskonstruktion opbygges normalt af halmballer som ofte ligges med stråretningen vinkelret på overfladen, hvilket betyder at isoleringen har en bredde på 450 mm. Herefter bliver der lagt overflader på hhv. inder- og ydersiden, dette giver en samlet vægtykkelse på ca. 520 mm, når væggen er færdigbehandlet. Ydervægge med løsfyldsisolering er ofte en smule breddere.

7 Materialer og konstruktionsdele



Figur 7.7: Figuren viser en vægkonstruktion hvor den bærende konstruktion er placeret udenfor vægen.



Figur 7.8: Figuren viser en vægkonstruktion hvor den bærende konstruktion er placeret i vægens overflade.

Ved vægkonstruktioner med løsfyldsisolering konstrueres der en tæt konstruktion, med et tætsluttende lag, hvis materiale kan variere alt efter hvor fint løsfyldsisoleringen er. I tilfælde med fint snittet halm bliver der benyttet en tæt membran, hvorpå der monteres et plastiknet eller en trækonstruktion, som pudsen kan lægges på. Denne løsning giver en pudset overflade i ler eller kalkpuds, som skal modstå vind og vejr. Derfor kan det være en god ide at påmontere lægter udenpå pudsen og derefter beklæde disse med træbeklædning for bedre at kunne beskytte mod vejret. Ved at montere lægter på pudsen først skabes et ventileret hulrum mellem puds og træ, som gør det muligt for evt. fugt at trænge ud igennem vægkonstruktionen. Løsfyldsisoleringen kan benyttes på forskellige måder, det kan blæses ind eller stoppes ind med hænderne. I tilfælde, hvor det blæses ind gøres det i ét hulrum af gangen. Det er vigtigt altid at være opmærksom på isoleringen i samlingen mellem tagkonstruktion og ydervæg, da der her vil være en højere temperaturforskel på ude og inde. Fugt kan også blive et problem i denne samling.

Selvom materialer og konstruktioner er anderledes i halmhuse end i traditionelt byggeri, er der stadig mange muligheder for variationer både af materialer og konstruktioner. I Friland eksperimenteres der meget med nye byggeformer og materialer, i forsøg på hele tiden at forbedre konstruktionerne. I det følgende afsnit vil det blive beskrevet hvad Friland er og hvad de står for.

8 Friland

Det følgende afsnit giver en beskrivelse af andelsforningen Friland og er baseret på [Friland n.d.], medmindre andet er angivet.

Friland er en selvopstartet andelsforening, som ligger i Feldballe ved Rønde på Djursland. Andelsforeningen købte i marts 2002 et stykke jord og dette blev startskuddet til Friland. Målet med denne andelsforening er at skabe en aktiv landsby, hvor der bliver mere tid til familien. Andelsforeningen består af selvbyggere og iværksættere, der gerne vil bygge gældfrit for at få tid og penge til det de har lyst til. Dette er muligt ved at bygge halmhuse, som er billigere end traditionelt byggeri ved selvbygning. Denne målsætning ønskes opnået gennem andelsforeningens grundværdier listet op herunder.

- Fra gældstynget villa til gældfrit selvbyggerhus.
- Fra lønmodtager til iværksætter.
- Fra bar mark til aktiv landsby.

Gældfrihed og affaldsfrihed stiller krav til bygherrerne. Det medfører nemlig at bygherren skal tænke kreativt i både byggeprocessen, men også i fremstillingen af de benyttede byggematerialer, ved at benytte natur- og genbrugsmaterialer. Der er blevet skabt et fællesskab i andelsforeningen, hvor der findes alternative måder at løse problemer på, både i byggemodningsprocessen, men også under selve byggeriet.

For at imødekomme grundværdierne om at gå fra lønmodtager til iværksætter, er det et krav at der skal drives minimum en virksomhed pr. lod i andelsforeningen. Denne skal kunne drives fra boligen, da dette vil være med til at skabe en aktiv landsby. Gældfriheden skal drive lysten til iværksættelsen af virksomheden og ikke den mulige indkomst. Der skal fremvises en realistisk plan for både bosætning og etablering af selvstændig erhvervsvirksomhed, før der kan blive tale om optagelse i andelsforeningen.

På grund af grundværdien om gældsfrit selvbyggerhus ligger priserne for disse huse i Friland også væsentligt lavere end på resten af Djursland. Kvadratmeter-

prisen for en bolig i dag på Djursland svinger mellem ca. 4.700 og 75.700 kr.pr.m² [Boliga.dk n.d.]. I Friland bliver kvadratmeterprisen vurderet af andelsforeningens vurderingsudvalg og de har en maksimal vurdering på 1200 kr.pr.m² plus minus 75 %. Denne lave kvadratmeter pris giver beboerne i Friland en større mulighed for, at gøre det de har lyst til med deres liv, uden at skulle bekymre sig om høje huslejepriser osv.

I programserien "Halmhuset" fulgte Danmarks Radio i 1999 byggeriet af et fritidshus i halm til en materialepris på 365 kr.pr.m². Dette var det første halmhus i Danmark.

Friland handler ikke kun om halmbyggeri, men er en alternativ måde at tænke, udføre og designe byggeri på. Der bliver i Friland bygget med naturmaterialer som ler, sand, pil, kalk, hamp, hassel, papir, halm, græstørv, hør, rundtømmer og marksten. En af grundene til, at der bliver bygget med naturmaterialer er for at genopdage den viden, der er gået tabt gennem tiden og evt. optimere den i en retning hvor det ikke kun handler om hvad der er moderne, men hvad der kan gavne naturen og miljøet på sigt. Der vil i denne sammenhæng også i mindre omfang blive brugt genbrugsmaterialer i form af flasker, gamle aviser, muslingeskaller o. lign. Når huset er bygget, åbner det for en ny måde at leve på.

For at give mere liv til landsbyen er der bopælspligt for alle andelshaverne inden for et år efter erhvervelse af andelen. I forbindelse med dette skal der umiddelbart efter opstartes selvstændig virksomhed, hvis dette ikke allerede er gjort.

Ligesom halmhuse, åbner passivhuse også op for en anden måde at bo og leve på. Formålet med passivhuse er, at minimere energiforbruget til rumopvarmning samt det primære energibehov til husholdning osv. Passivhuse er en anden måde at værne om miljøet på og vil blive beskrevet i det efterfølgende afsnit.

9 Passivhuse

I det følgende vil der blive givet en beskrivelse af passivhuse, hvad der lægges vægt på i forhold til energiforbrug og hvad der er de vigtigste ting at fokusere på under opførslen af et passivhus.

Betegnelsen passivhus stammer fra Tyskland og Østrig, hvor der er bygget op mod 8000 passivhuse. Da betegnelsen ikke er beskyttet har alle i princippet lov til at kalde en bygning for et passivhus. I Tyskland er der derfor oprettet en certificeringsordning, som kan give et bevis, i form af et certifikat, for at bygningen rent faktisk lever op til kravene for passivhuse. Omkring 1500 af de 8000 passivhuse er certificerede i Tyskland.

Først i 2007 er der blevet åbnet for certificering af passivhusrådgivere i Danmark, hvilket betyder at passivehuse i Danmark kan certificeres af udvalgte danske firmaer [Passivhus.dk n.d.]. Prisen for en typisk certificering af en bygning er ca. 7.000-10.000 kr. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008].

I det europæiske projekt PEP (Promotion of European Passive Houses) er der i samarbejde med de 9 medlemslande og Passiv Haus Institut i Darmstadt udarbejdet en fælles europæisk definition af passivhus betegnelsen, som er opstillet herunder. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008]

- Det totale energibehov til rumopvarmning begrænset til 15 kWh/m^2 boligareal
- Det totale primære energiforbrug til varmt brugsvand, rumopvarmning/køling, ventilation, pumper, husholdningsstrøm, lys mv. begrænset til 120 kWh/m^2 boligareal.
- Husets lufttæthed målt ved blowerdoor-test $n_{50} < 0.6 \text{ h}^{-1}$ dvs. at der ved en trykdifference på 50 Pa skal være et luftskifte mindre end 0.6 h^{-1}

Citeret fra [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008]

Det skal bemærkes, at det ikke er tilladt at opnå de 15 kWh/m^2 ved produceret varme fra f.eks. solvarmeanlæg. Det er til gengæld muligt at nedsætte

det primære energibehov vha. solvarme dog ikke vha. el til solceller. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008]

Den primære energi på 120 kWh/m² er fremkommet af en konverteringsfaktor på 2,7 mellem elforbrug og primært energiforbrug til produktion af el. Denne faktor er i Danmark på 2,5. Det er tilladt at benytte den konverteringsfaktor som benyttes i det pågældende land.

Først i 2007 er der blevet åbnet for certificering af passivhusrådgivere i Danmark, hvilket betyder at passivehuse i Danmark kan certificeres af udvalgte danske firmaer [Passivhus.dk n.d.]. Prisen for en typisk certificering af en bygning er ca. 7.000-10.000 kr. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008].

Til beregning af energiforbrug i passivhuse benyttes programmet *PHPP*, som er beskrevet i afsnit 11. Til kravet om lufttæthed udføres en blowerdoor-test, som beskrevet i afsnit 20.1. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2008]

Under byggeprocessen for passivhuse er der nogle vigtige faktorer at sætte fokus på. Dette er bl.a. tætheden af bygningen, det er vigtigt at være omhyggelig med tæthed i alle samlinger i bygningen. Derudover søges det at mindske kuldebroer mærkbart for at minimere varmetabet gennem konstruktionen. Dette gælder ikke kun vægkonstruktioner, men også tag og gulve. Det er selvfølgelig også vigtigt at isolere hele bygningen godt for at minimere varmetabet. Der til kommer valg af vinduer og døre, som har stor betydning for bygningens samlede varmetab.

Den øgede fokus på tæthed, kuldebroer, isolering samt vinduer og døre med meget lave U-værdier gør at det koster omkring 5-15 % mere at bygge et passivhus, men til gengæld kan der spares op til 80 % på opvarmning af bygningen. En anden besparelse ved at bygge et passivhus frem for et traditionelt hus er, at der i et passivhus ikke er brug for et varmeanlæg. Opvarmningen af huset kan klares med det mekaniske ventilationsanlæg med varmegenvinding. Det betyder at de samlede omkostninger for et passivhus og et traditionelt hus vil nærme sig hinanden i løbet af bygningernes levetid. [Klaus Ellehauge og Troels Kildemoes Møller 2005]

I det følgende afsnit vil konstruktionen af et passivhus blive beskrevet ud fra, hvilke ting det er særlig vigtigt at være opmærksom på.

9.1 Byggetekniskeløsninger til passivhuse

I det følgende vil der blive givet beskrivelser af byggetekniskeløsninger i passivhuse som gør det muligt at opfylde de strenge krav, som blev nævnt i afsnit 9. Dette afsnit er baseret på [KOMFORT HUSENE n.d.a] medmindre andet er angivet.

9.1.1 Projektering af et passivhus

Ved projektering af et passivhus er det vigtigt, at tage omgivelserne og placeringen af huset i betragtning, da det har stor betydning for driften af huset. Det er særlig vigtigt, at fokusere på husets orientering, omgivelsernes struktur og husets byggeform. Huset skal placeres således at facaden med det største vinduesareal er placeret mod syd, for at kunne udnytte solens energi i de kolde måneder. Om sommeren skal disse sydvendte vinduer helst afskærmes fra direkte sol for at undgå overophedning. Dette kan gøres med et stort udhæng eller en anden form for solafskærmning. Vinduesarealet mod øst, vest og nord skal gerne holdes på et minimum, især mod nord pga. den begrænsede solmængde på denne facade. Vinduerne på disse facader er kun for at kunne opretholde den nødvendige mængde dagslys i huset. For at kunne udnytte varmen og lyset fra solen er det vigtigt, at der ikke er noget der skygger for vinduerne i huset. Derfor skal strukturen for omgivelserne undersøges. Med hensyn til husets byggeform er en kompakt byggeform at foretrække dvs. med mindst mulig vægareal hvilket har en gunstig virkning på varmetabet i huset. På figur 9.1 er der vist eksempler på forskellige byggeformer.

Husets grundrids har indflydelse på energibehovet. Et kantet grundrids giver større facadeareal, som varmen kan forsvinde ud igennem.				
Type 1: helt firkantet	Type 2: med lille vinkel/karnap	Type 3: med større vinkel/karnap	Type 4: med flere vinkler og karnapper	Type 5: meget kantet grundrids
				

Figur 9.1: Figuren viser forskellige byggeformer. [ISOVER n.d.].

I forhold til passivhuse er type 1 på figur 9.1 at foretrække, idet den har den mest kompakte byggeform og derved et lavere varmetab.

9.1 Byggetekniske løsninger til passivhuse

Udover placering, orientering og udformning er tæthed også en vigtig faktor i et passivhus, som det bliver beskrevet i det efterfølgende afsnit.

9.1.2 Tæthed

Lufttætheden i et passivhus er afgørende for varmetabet og ventilationen, det er derfor vigtigt at dampspærren ikke bliver brudt. Hvis bygningen er tæt er det nemmere at styre ventilationen og det sikres at luften i boligen kommer forbi varmeveksleren. Dette giver en besparelse på el-regningen og et bedre indeklima i boligen. Hvis det er nødvendigt at bryde dampspærren er det vigtigt at tætnes ordentligt omkring gennembrydningen for at minimere utætheden. Gennembrydningerne føres normalt i præfabrikerede gummislanger, som sikres med fugemasse, som det kan ses på figur 9.2. Alle samlinger i dampspærren tættes med tape, også hæfteklammerne som benyttes til montering af dampspærren tapes til, som er vist på figur 9.3.



Figur 9.2: Figuren viser en hvordan en gennembrydning af dampspærren kan løses.

For at opnå den bedst mulige tæthed omkring vinduer og døre føres dampspærren med ud forbi vinduer og døre. Tætningen kan også ske ved at dampspærren monteres på vinduet eller døren inden den monteres i huset og herefter tapes dampspærren for væggen og vinduet sammen og ligeledes for døren. Der findes



Figur 9.3: Figuren viser en samling i dampspærren med hæfteklammer og tape.

også andre måder til montering af vinduer i passivhuse, som dog ikke vil blive beskrevet her.

I passivhuse gives der ofte dispensation til behovsstyret ventilation og luftskiftet kan derfor komme helt ned på $0,3\text{ h}^{-1}$ som minimum. På grund af de lave luftskifte er det vigtigt at sikre tætheden i bygninger, for at kunne styre ventilationen og være sikker på, at luften kommer ind og ud de steder hvor det er planlagt.

Men også kuldebroer er vigtige at undgå i passivhuse pga. varmetabet, hvilket beskrives i det følgende afsnit.

9.1.3 Kuldebroer

Kuldebroer i et traditionelt hus står for omkring 10-15 % af varmetabet. I passivhuse er målet at holde på varmen, ligesom en termokande dvs. passivt i modsætning til en kaffemaskinen som aktivt holder kaffen varm ved hjælp af en varmeplade. Ved at holde på varmen er det muligt mærkbart at mindske kuldebroer og derved mindske tilførslen af energi til opvarmning af huset. For at kunne opnå den passive opvarmning er det nødvendigt at forsøge at undgå kuldebroer i et passivhus. Det gøres ved at sørge for at varmen ved hver en-

este mulige kuldebro får den længste vej ud af huset. Det gælder derfor om at isolere tilstrækkeligt på den udvendige side af den genstand der gennem-bryder isoleringslaget eller sørge for at de gennembrydende materialer har en så lille varmeledningsevne som muligt. Ved vinduer f.eks føres isoleringen normalt op foran vinduesrammen enten indvendig eller udvendig for at minimere kuldebroen og dermed varmetabet.

Isoleringen i passivhuse er ligeledes af stor vigtighed for at kunne holde passivt på varmen. Dette beskrives i det kommende afsnit.

9.1.4 Isolering

En af ekstra omkostningerne ved at bygge et passivhus er den ekstra isolering i vægge såvel som tag og gulv, men isoleringen er en vigtig faktor i forsøget på at minimere varmetabet gennem konstruktionerne og derved holde bedre på varmen.

For et enfamilie passivhus skal U-værdien gerne ligge under $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket medfører en isoleringstykkelse på ca. 300 mm i vægge og 450 mm i tag og gulv. Der kan selvfølgelig benyttes et tykkere lag isolering for at opnå et lavere U-værdi, men det er en god ide at lave en beregning på, hvornår isoleringtykkelsen er neglignel for varmetabet, idet den ekstra isolering forbi dette punkt kun er en unødvendig omkostning.

Det er ikke kun isoleringen som har indflydelse på varmetabet for et passivhus. Valg af vinduer og døre har også stor betydning, som det er beskrevet i det efterfølgende afsnit.

9.1.5 Vinduer og døre

Ved passivhusets indtog i Danmark var det svært, hvis ikke umuligt, at frem-skaffe danske vinduer med den krævede U-værdi under $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$. Derimod var det ikke noget problem at skaffe dem i Tyskland, hvor der er en større er-faring med passivhuse. Der er dog blevet ændret på dette problem for flere og flere danske vinduesproducenter har lanceret produkter, som opfylder de strenge krav [Komfort Husene n.d.b].

Et passivhusvindue skal lade mest mulig solenergi passere gennem vinduet sam-tidig med, at den holder på varmen. Dette kan gøres med lavenergiglas, gerne tre lag og en varmisolerende vinduesramme.

De strenge krav til passivhusvinduer gør, at der på en kold vinterdag gerne skulle være en indvendig overfladetemperatur på vinduet på 17°C . Derved undgås kuldenedfald som kan mærkes som træk ved vinduerne og der sikres et godt termisk indeklima. En af ulemperne med passivhusvinduer er, at de ofte er meget tunge pga. den store mængde glas. Det kræver derfor en kraftigere fastgørelse end ved traditionelle vinduer, samtidig med at kuldebroer skal undgås. Vinduerne monteres gerne indefra, men det er også muligt at montere nogle vinduer udefra. Hvis isoleringen er ført op foran karmen udvendig er passivhusvinduet trukket lidt tilbage i facaden, som det kan ses på figur 9.4.



Figur 9.4: Figuren viser et eksempel på et vindue, hvor isoleringen er ført hen foran karmen. [Kuben Byg A/S 2008].

Der findes også vindueskonstruktioner hvor isoleringeen er placeret på den indvendige side, disse kan derfor placeres ude ved facaden.

I det efterfølgende kapitel beskrives opbygningen af et passivhus, som er en af komfort husene fra Vejle. Dette hus benyttes som udgangspunkt for senere energiberegninger i både *PHPP* og *Be06*.

10

Komfort hus

I det følgende beskrives opbygningen af passivhuset fra komforthusene i Vejle. Der er taget udgangspunkt i dette hus med de tilhørende beregninger foretaget i *PHPP* og *Be06*, for at der er en chance for, at et halmhus kan overholde kravene til passivhuse. Det antages derfor, at det er muligt at udføre konstruktionerne, som gjort i dette passivhus, men med halm som isolering. Det menes ikke, at være realistisk at benytte et eksisterende halmhus som udgangspunkt, idet der ved konstruktion af disse ikke tages højde for, at det skal være et passivhus. Det er dermed ikke bygget kompakt eller placeret korrekt i forhold til omgivelserne.

Passivhuset er i et plan med fladt tag og hvidpudsede facader. Dette tag er dog blevet modificeret til at have en hældning på 20° , for at simulere et hus som har tilnærmelsesvis samme form, som huset i Friland, beskrevet i afsnit 18.1.

Det største glasareal er placeret mod syd for at udnytte solens energi om vinteren, mens glasarealet mod nord er holdt på et minimum. Opholdsrummet samt køkkenet er placeret mod syd, øst og vest, mens alle værelser vender mod nord. Huset er beskyttet mod direkte sol med et udhæng på den sydlige side og udhænget går i et med taget til carporten. Huset er indrettet således at alle installationskrævende rum er placeret i den tunge kerne i midten af huset. Dette er gjort for at få dem placeret så centralt som muligt. Ydervæggene er opbygget af præfabrikerede træelementer, isolering og en dampspærre. Udvendig er væggen pudset med dekorationspuds eller glat filtpuds, mens den indvendige side er beklædt med fibergips. Trækonstruktionen er bærende, ligesom nogle af skillevæggene bestående af fibergips og isolering. Det er kun skillevæggen som går gennem hele huset indeholdende dørene til værelserne, som er bærende. Skillevæggene der adskiller rummene er ikke-bærende.

De indvendige tunge skillevægge består af insitustøbt beton. De er placeret i kernen af huset. Mellem de tunge vægge og tagkonstruktionen er der placeret et glasbånd, som skal få den tunge kerne til at virke som et stort møbel i huset. Der er fundamenter under alle bærende vægge på ydervægge og skillevægge. Derudover er der også placeret fundamenter under væggene i den tunge kerne, selvom de ikke er bærende. Fundamenterne er opbygget af Lecatherm blokke,

Leca blokke, beton, isolering og sundolitt. Opbygningen og materialerne variere lidt i forhold til hvor fundamenterne er placeret. Terrændækket i huset er opbygget af armeret beton, Sundolitt, komprimeret sandfyld og isolering. Derudover er der selvfølgelig lagt en passende gulvbelægning i de forskellige rum bl.a. klinker og parket. Ligesom i fundamentet variere opbygningen af terrændækket nogle steder.

Der er installeret et ventilationssystem med varmegenvinding, som både skal ventilere huset, men også sørge for den nødvendige opvarmning. For at forvarme indblæsningsluften benyttes jordslanger. Jordslangerne kan også bruges til nedkøling af indblæsningsluften i sommerperioden. Der blæses ind i alle værelser såvel som stue/opholdsrummet, mens udsugningen foregår i køkkenet, teknikrummet samt begge badeværelser. Skulle der være brug for ekstra opvarmning er det tænkt at det skal gøres vha. en håndklædetørrer.

Ventilationssystemet er et kombinationsanlæg som skal dække ventilation med varmegenvinding, opvarmning af brugsvand såvel som evt. opvarmning af huset via et vandbåret centralvarmesystem. Der er givet dispensation til at udstyre huset med behovsstyret ventilation, for at opnå bedre indeklima og spare på el-forbruget. Det betyder at ventilationen styres efter CO₂ og temperatur. Der skal stadig opretholdes et minimumsluftskifte pga. bygningskonstruktionerne og det atmosfæiske indeklima, når der ikke er personer tilstede. For at opnå yderligere besparelser på el-forbruget er huset udstyret med automatisk nedslukning af standby-el dvs. at huset automatisk slukker for alle elektriske installationer der står på standby, forudsat at disse ikke er nødvendige for driften af bygningen.

Energiberegninger for dette passivhus er bl.a. udført i programmet *PHPP*, som beskrives i det følgende afsnit.

11 *PHPP*

Passive House Planning Package normalt omtalt som *PHPP*, er udviklet på Passivhaus Institut(PHI) i Darmstadt i Tyskland. Det er muligt at lave en energiberegning for passivhuse i *PHPP*, men i Danmark er det stadig påkrævet, at der ligeledes udføres en beregning i *Be06* for, at få en byggetilladelse af de danske myndigheder. Derfor vil der blive lavet beregninger i både *PHPP* men også i *Be06*. Begge programmer benyttes til beregning af det totale energiforbrug i bygninger. *PHPP* benyttes til passivhuse, hvor *Be06* benyttes til beregninger i alle bygninger, da dette bruges til godkendelser fra staten. I forbindelse med beregninger i programmerne er det vigtigt at fremhæve forskellene i disse, men også hvilke betingelser *PHPP* beregner efter, da det ikke er efter de danske normer. *PHPP* er udviklet så det kan benyttes i hele verden, selv hvis det hovedsaglige problem er køling.

11.1 Beregningsbetingelser i *PHPP*

I *PHPP* bliver der benyttet nogle standard betingelser og beregningsmetoder disse er oversat fra [Dr. Wolfgang Feist et. al. 2007] hvor de er listet på engelsk.

- Vejrdata for andre lande: Lokale vejrdatasæt(passende til bygningens lokation; Afvigende højde af lokationen: brug temperaturkorrektion på - 0,6 °C for hver 100 m forskel i højde)
- Ansøgerens eget vejrdata: For godkendelse af anvendelighed spørg venligst den ansvarlige certificeringsgruppe.
- Opsætningstemperatur: 20 °C uden nedsættelse af temperaturen om natten.
- Interne varmekilder: 2,1 W/m², så længe Passive House Institute ikke har specificeret nogle andre nationale værdier.
- Beboelse: 35 m²/person, det er tilladt at bruge afvigende værdier med en forklaring (aktuel beboelse eller specifikation af bygningens design) i

intervallet 20-50 m²/person.

- Huslig varmtvandskrav: 25 liter/pr.person/pr.dag af 60 °C; Koldt vandstemperatur er 10 °C hvis der ikke er opgivet andre nationale værdier af Passive House Institute.
- Den gennemsnitlige luftstrøm er på 20-30 m³/h pr. person i en husholdning; Brug som minimum et luftskifte på 0,3 gange i timen anvendt på det benyttede gulvareal multipliceret med 2,5 m af rumhøjden. De tilførte luftmængder skal svare til de aktuelle indstillingsværdier af ventilations-systemet.
- Huslig elektricitetsenergiforbrug: Brug standard værdier fra *PHPP*; afvigende værdier kun med individuel verifikation af henholdsvis bygningsejeren eller det huslige elektricitets energikoncept.
- Klimaskærm: Benyt udvendige dimensioner uden undtagelser.
- U-værdier for uigennemsigtige bygningsselementer: *PHPP* metoden på basis af EN 6946 med vurderet værdi af den termiske konduktivitet der følger den nationale norm eller den tekniske godkendelse af den ledende regeringsautoritet .
- U-værdier for vinduer og døre: *PHPP* metoden er baseret på EN 10077 med beregnede vurderede værdier for vinduesrammen U-værdi U_f , glaskan-tens linjetab Ψ_g og installations linjetab $\Psi_{installation}$
- Glas: Beregnet U-værdi U_g (præcision: to decimaler) baseret på EN673 og g-værdi baseret på EN410.
- Effektivitet af varmegenvinding: Undersøgelsesmetode fra Passive House Institute(referer til www.passiv.de); alternativt følges DiBt-metoden (German Institute for Building Technology) eller ækvivalent fratrække 12 % af værdien.
- Effektivitet af varmegenerator: Henholdsvis *PHPP* metode eller individuel verifikation.
- Primære energi faktorer: *PHPP* datasæt.

Fordi passivhuse og *PHPP*- beregninger er så udbredt i Tyskland acceptere byggemyndighederne *PHPP*- beregninger som tilstrækkelig dokumentation for nybyggeri. Som tidligere nævnt er dette ikke tilfældet i Danmark og derfor er det vigtigt at kende de væsentlige forskelle mellem *PHPP* og *Be06*, hvilket er beskrevet herunder.

11.2 Forskelle på *PHPP* og *Be06*

opgives energiforbruget til det indvendige beboelsesareal, mens det i *Be06* er i forhold til det udvendige opvarmede etage areal. For lavenergihuse kan det betyde, at *Be06* regner helt op til 20 % mindre energiforbrug end *PHPP*. De to programmer benytter desuden forskellig geometri ved beregning af transmissionsarealer og linjetabskoefficienter samt jordtemperaturer, *Be06* benytter samme jordtemperatur over hele året, mens der i *PHPP* udregnes en temperatur der varierer over året. Det interne varmetilskud er også forskelligt i de to programmer, da der i *PHPP* benyttes et internt varmetilskud på $2,1 \text{ W/m}^2$ for det indre areal, og *Be06* benytter et internt varmetilskud på 5 W/m^2 for det ydre areal. Ifølge SBI anvisning 213 skal der benyttes et luftskifte på $0,5 \text{ h}^{-1}$ hvilket er det der bliver benyttet i *Be06*, mens der i *PHPP* benyttes et luftskifte på $0,3 \text{ h}^{-1}$. Derudover benyttes der forskellige formler til beregning af infiltrationsluftskiftet fra en blowerdoor-test.

Det kan derfor være vanskeligt, at overføre en *PHPP*- beregning til *Be06* og omvendt. Der er dog udviklet enkelte konverteringsprogrammer som kan gøre overføringen lidt lettere. Disse vil ikke blive beskrevet i dette projekt.

Idet *PHPP* indeholder adskillelige faktorer som kan ændres, vil der i det følgende kapitel blive udført en følsomhedsanalyse til bestemmelse af de vigtigste faktorer, så det er muligt at fokusere på nogle af dem i dette projekt.

12 Følsomhedsanalyse

I de følgende afsnit vil det blive beskrevet hvordan en følsomhedsanalyse udføres og hvad formålet med analysen er. Analysen udføres i programmet *SimLab*, som ligeledes kort bliver beskrevet i det efterfølgende. Følsomhedsanalysen udføres for at finde ud af hvilke parametre der har størst betydning i programmet *PHPP*, hvor parameterne til analysen vælges fra. Desuden vil analysen blive benyttet til at optimere den nuværende *PHPP*-model af komfort huset så denne kommer til at overholde kravet for et passivhus. *PHPP*-beregningen for komfort huset er venligst modtaget fra TRI-CONSULT A/S, som har udført beregningen. Grunden til at beregningen ikke overholder kravet på nuværende tidspunkt skyldes ændring af taghældningen til 20° , som er indført i dette projekt, som tidligere beskrevet. Det betyder, at vægarealet er forstørret mod syd, øst og vest samt en forøgelse af arealet for tagkonstruktionen. Komfort huset er beskrevet i afsnit 10. *PHPP*-beregningen både original og modificeret kan ses på den vedlagte bilags CD som henholdsvis *PHPP_original_komfort_hus.xls* og *PHPP_modificeret_komfort_hus.xls*. Afsnittene er baseret på [SimLab 2008], medmindre andet er anført.

12.1 Morris metoden

Denne metode benyttes til, at finde ud af hvor følsom en model er overfor ændringen af de udvalgte parametre dvs. om de har en effekt eller er neglicible. Ud fra analysen kan det ligeledes bestemmes om parametrene har indflydelse på hinanden, og om de er lineære eller ikke-lineære.

Metoden virker ud fra en-faktor-af-gangen princippet dvs. at der i analysen kun ændres en faktor af gangen. For hver parameter skal der angives en maksimums- og minimumsværdi, samt et niveau. Niveaue angiver antallet af intervaller som parameteren inddeles i, mellem de angivne maksimums- og minimumsværdier. Derudover vælges en fordeling af intervallerne, som ofte vælges til at være uniform dvs. at intervallerne inddeles i lige store intervaller. Der kan også vælges normal-, lognormal-, weibull- eller eksponentialfordeling. Programmet der benyttes er *SimLab*, som er beskrevet i det efterfølgende afsnit.

12.2 *SimLab*

Programmet *SimLab* benyttes til at udføre usikkerheds- og følsomhedsanalyser. Processen for følsomhedsanalyser er som følger. Hver af de valgte parametre inddeles i intervaller mellem minimums- og maksimumsværdiene, ud fra det valgte niveau, som tidligere nævnt. Herefter vælger programmet en tilfældig startværdi indenfor et af intervallerne for hver parameter og derefter ændres en parameter af gangen til en ny værdi. Hver gang en parameter ændres vurderes effekten af denne ændring, hvorefter en ny parameter ændres.

Når alle parametre har ændret værdi en gang, vælger programmet en ny startværdi og endnu en gang ændres parametrene en af gangen. Antallet af gange denne process udføres beregnes ud fra antallet af niveauer, r og antallet af parametre, k , efter følgende formel.

$$\text{Antal gennemløb} = r \cdot (k + 1) \quad (12.1)$$

For at kunne udføre analysen skal parametrene vælges og dette er gjort i det følgende afsnit.

12.3 Parametre til følsomhedsanalyse

Det er valgt at lave to følsomhedsanalyser, først en grov analyse der viser hvilke værdier der har stor indflydelse på energiforbruget til opvarmning og derefter en fin analyse, som er beregnet i *PHPP*. Der er taget udgangspunkt i et passivhus fra projektet Komfort Husene ved Vejle, som tidligere nævnt. Dette er valgt da der var adgang til *PHPP* beregningerne for disse huse, huset er tidligere beskrevet i afsnit 10. Modellen overholder ikke kravet for et passivhus, det er en af grundene til denne analyse bliver udført, for at se betydningen af de udvalgte faktorer. Det betyder, at der kan justeres på de mest betydende parametre, for derved at opnå en model, der kommer til at overholde passivhus kravende, disse nye faktorer er beskrevet i 12.5. Til følsomhedsanalysen er der benyttet fiktive værdier til simuleringerne. Der er udvalgt 5 værdier der bliver vurderet i den grove analyse, det er U-værdien for hhv. tag-, væg- og gulvkonstruktionen, samt infiltrationen, og linjetab omkring vinduer og døre. I de efterfølgende afsnit vil det blive beskrevet, hvilke parametre der er udvalgt og hvorfor de er valgt.

12 Følsomhedsanalyse

12.3.1 U-værdi

U-værdien varieres for væg-, gulf- og tagkonstruktion i klimaskærmen. Det er valgt efterfølgende at lave en analyse der viser hvad der har størst indflydelse på U-værdien, dette vil blive beskrevet i afsnit 12.4. U-værdien er valgt pga. den har indflydelse på store flader, hvorfor disse må forventes at have relativ stor indflydelse på det samlede energitab. Derudover er det en værdi der skal tages stilling til inden et byggeri starter, da det er dyrt at ændre efter færdiggørelsen af en bygning.

Intervallerne er valgt ud fra værdierne der er benyttet i det valgte komfort hus. U-værdierne fra huset er valgt til at være guidende derfor er det valgt hhv. at halvere og fordoble den værdi og dermed finde intervaller som vist i tabel 12.1.

	Minimumsværdi [W/m ² K]	<i>PHPP</i> værdi [W/m ² K]	Maksimumsværdi [W/m ² K]
Tagkonstruktion	0,035	0,076	0,15
Vægkonstruktion	0,04	0,085	0,17
Gulvkonstruktion	0,03	0,068	0,13

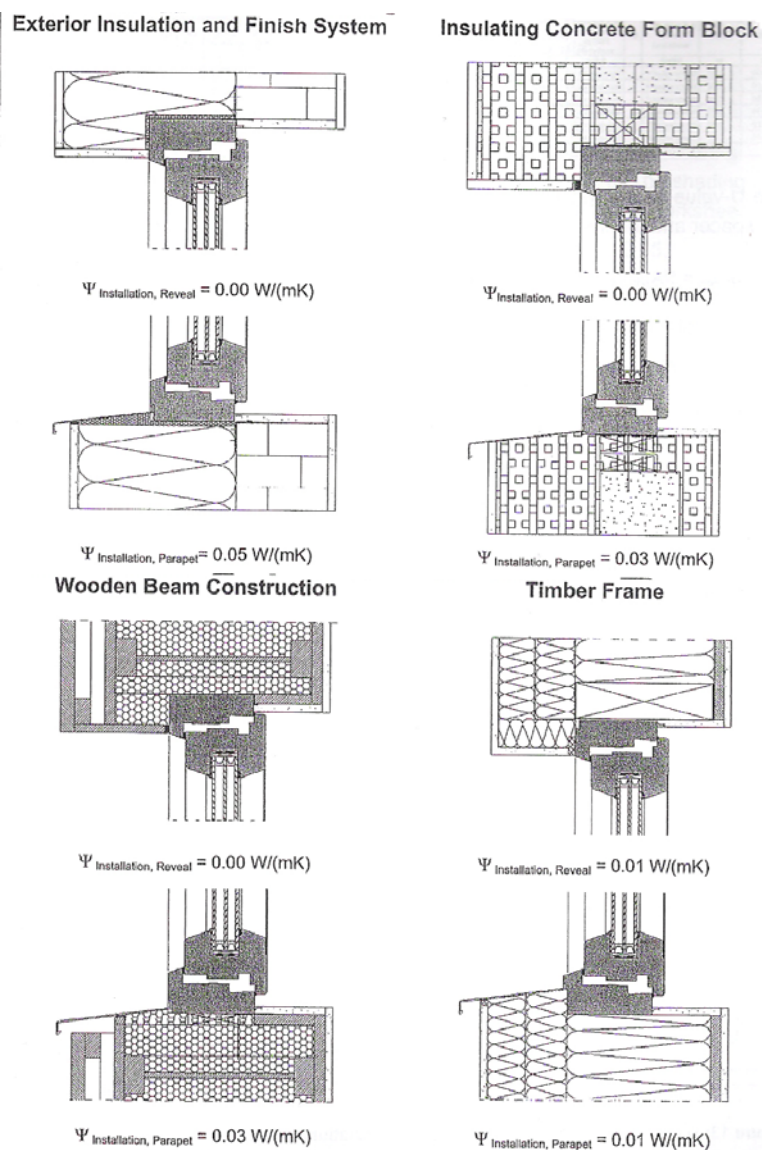
Tabel 12.1: Viser de valgte maksimums- og minimumsværdier for U-værdien.

12.3.2 Linjetab omkring vinduer

Det er valgt at se på hvor stor betydning linjetabet omkring vinduerne har, fordi der er stor fokus på at løse disse kuldebroer på den optimale måde i passivhuse og det er derfor valgt at se hvilken betydning den enkelte måde at løse kuldebroerne omkring vinduerne har. Det vil desuden være muligt at optimere omkring vinduerne i et halmhus, da løsningsmetoder der bliver brugt i passivhuse i dag sandsynligvis vil kunne overføres til lignende løsninger med halmhusbyggerier.

Intervallerne for linjetabskoefficienterne omkring vinduet er valgt ud fra de forudindtastede værdier i den benyttede *PHPP*-beregning i fanebladet Wintype. Der kan på figur 12.1 ses forskellige løsningsforslag til hvordan de enkelte linjetab kan opnås.

Det valgte interval kommer til at gå fra 0-0,088 W/mK, som er hhv. minimums- og maksimumsværdier fra fanebladet Wintype i *PHPP*-bereningen.



Figur 12.1: Figuren viser forskellige måder at montere vinduer på samt de tilhørende linjetab for løsningerne.

12.3.3 Infiltration

Der vil desuden blive set på tætheden af bygningen ved at ændre på resultatet af blowerdoor-testen. Dette gøres for at undersøge om der ved at tætne bygningen mere end kravet på $0,6 \text{ h}^{-1}$ spares mærkbart på energien til opvarmning. Grunden til dette er, at det vurderes at være muligt at tætne halmhuse lige så godt som passivhuse.

Det er valgt at lade intervallet for infiltration gå fra den øvre tilladte grænse for passivhuse og ned på en meget lav nedre grænse, det vil sige intervallet for resultatet af blowerdoor-testen går fra $0,1$ - $0,6 \text{ h}^{-1}$.

12.3.4 Resultat af følsomhedsanalyse

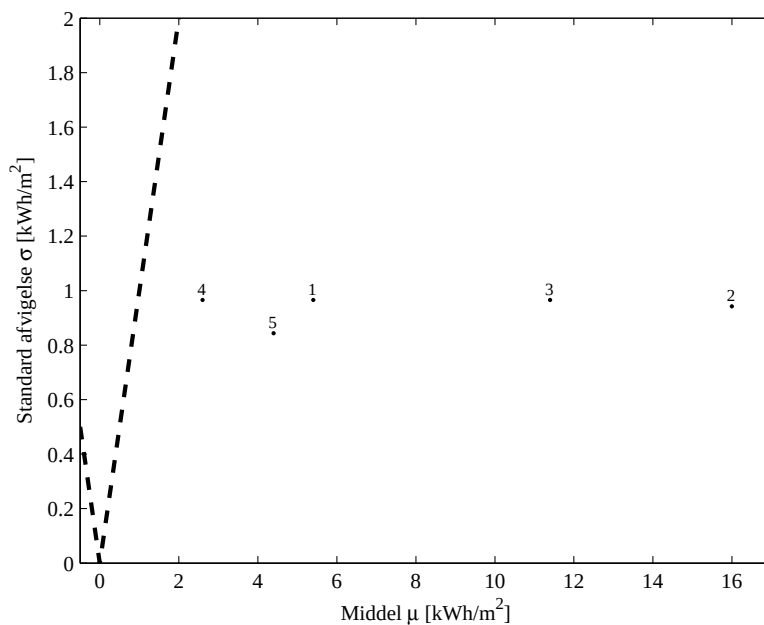
I det følgende afsnit gennemgås resultaterne af følsomhedsanalyserne.

Indflydelsen fra de valgte parametre er vist på grafen på figur 12.2 fra *MATLAB*. Grafen er tegnet med resultatet fra en Morris metode i *SimLab*. Ud fra dataen er det muligt at se om de enkelte parametre er lineære eller ikke-lineære, korrelerede eller ikke korrelerede. Derudover kan det ses hvilke parametre der er vigtigst for det samlede energiforbrug til varme i henhold til *PHPP*, som nævnt i tidligere afsnit.

En høj middelværdi giver en indikation af, at værdierne har en stor betydning ligesom punkterne gør jo længere væk fra origo de er. For at se om faktorerne er lineære eller korrelerede er det nødvendigt at plotte en V-kurve, hvilket er gjort på figur 12.2. Hvis faktorerne er placeret inde i V-kurven betyder det at faktoren er korreleret, med et eller flere af de andre faktorer, eller at den ikke er lineær. Hvis en faktor er placeret udenfor V-kurven betyder det, at den ikke er korreleret eller at den er lineær. V-kurven er ikke en skarp opdeling af om faktorerne er korrelerede eller ej, men mere en indikation af om de er meget eller lidt korrelerede alt efter om de er langt fra eller tæt på kurven.

Ud fra figur 12.2, hvor numrene er som vist i tabel 12.2, kan det ses at der ikke er punkter i det korrelerede eller ikke-lineære område. Det var forventeligt, da der ikke er værdier der er direkte afhængige af hinanden. Derudover befinder alle punkter sig i det lineære område. Det kan også ses udfra figur 12.2, at det er U-værdierne for de enkelte konstruktionsdele der har størst betydning. Dette er en af grundene til, at det er valgt at lave en finere analyse dermed ment, at der ses på hvilke parametre der har størst betydning for U-værdien i

12 Følsomhedsanalyse



Figur 12.2: Figuren viser plottet af følsomhedsanalysen fra *MATLAB*. Numrerne til parametrene kan ses i tabel 12.2.

Parametre	Minimumsværdi	Maksimumsværdi	Mummer på figur 12.2
U-værdi _{gulv}	0,03	0,13	1
U-værdi _{væg}	0,04	0,17	2
U-værdi _{tag}	0,035	0,15	3
Infiltration	0,100	0,600	4
Linjetab	0	0,088	5

Tabel 12.2: Viser intervallerne for de enkelte parametre samt hvilket nummer de har på figuren.

en ydervægskonstruktion som f.eks. klimaskærmen i et halmhusbyggeri. Denne analyse er beskrevet i de følgende afsnit.

12.4 Følsomhedsanalyse for ydervægskonstruktion

For at lave en følsomhedsanalyse for en ydervægskonstruktion, er det nødvendigt at vurdere hvilke parametre der har betydning i en U-værdi beregning. Det er valgt at forsimple ydervægskonstruktionen, så den består af tre lag, svarende til tre materialer. Det er hhv. en indervæg, et isoleringslag og en ydervæg. Det er valgt at yder- og indervæggen hver har en varmeledningsevne, λ -værdi, og en tykkelse, e , som kan varieres. Dette er en forsimpning, da den yderste og inderste konstruktion oftest består af flere materialer i et halmhusbyggeri, som f.eks. træ, lerpuds og luft. For isoleringen er det valgt, at det ligeledes kan variere i tykkelsen og varmeledningsevnen. Desuden kan isoleringslagets indhold af træ også varieres, derfor bliver varmeledningsevnen for træet varieret og mængden af træ i isoleringslaget varieret ved en procentvis skala. Alle disse simuleringer udføres i *PHPP*, for at se hvilken betydning disse ændringer har i *PHPP*, da programmet benyttes til den endelige simulering af bygningen.

Maksimums- og minimumsværdier for de valgte parametre er listet i tabel 12.3.

Parametre	minimumsværdi	maksimumsværdi
$\lambda_{indervæg}$	0,5	1,5
$e_{indervæg}$	33	100
$\lambda_{isolering}$	0,037	0,05
$e_{isolering}$	300	700
Procent træ	0	20
$\lambda_{træ}$	0,1	0,2
$\lambda_{ydervæg}$	0,3	1,5
$e_{ydervæg}$	33	150

Tabel 12.3: Viser intervallerne for parametrene for den fine følsomhedsanalyse.

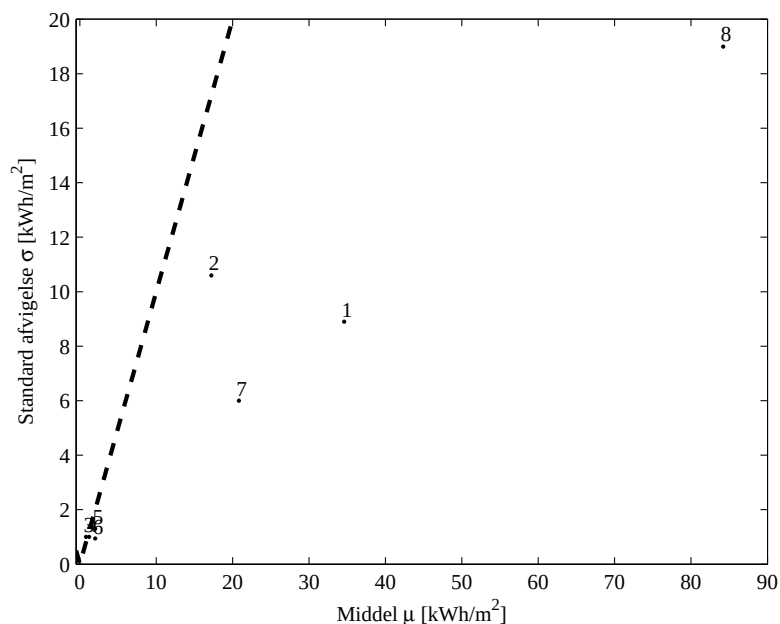
Værdierne for isolering svinger mellem isoleringsværdien for et traditionelt isoleringsmateriale som glasuld og til den tilnærmede isoleringsevne for halm. Med hensyn til tykkelse er der set på hvilke bredder der benyttes i passivhuse samt

12 Følsomhedsanalyse

hvor bredden for halmisolering der benyttes i dag. Resultaterne for analysen er beskrevet i det efterfølgende afsnit.

12.4.1 Resultat af fin følsomhedsanalyse

Ud fra figur 12.3 kan det ses, at der er en del parametre der har en meget lille indflydelse på U-værdien. Dette var forventet, da hhv. for- og bagvæggen har en lille tykkelse i forhold til isoleringen. Det ses tydeligt på figuren, at det er alle parametrene, der beskriver isoleringslaget, der har den største betydning ifølge analysen. Det ses da punkterne 1, 2, 7 og 8 ligger længst fra origo, det er som det kan ses i tabel 12.4, $\lambda_{isolering}$, $e_{isolering}$, *Procent træ* og $\lambda_{træ}$. Grunden til, at tykkelsen af isoleringen har specielt stor betydning er, at den også ændrer på mængden af træ, som er beregnet som en procentdel af isoleringslaget.



Figur 12.3: Figuren viser plottet af følsomhedsanalysen fra *MATLAB*. Numrerne til parametrene kan ses i tabel 12.3.

Som forventet er den største betydning for U-værdien og dermed for hele konstruktionen, at ændre isoleringstykkelsen, da det er her der kan være store energimængder at spare i den endelige bygning. Det er vigtigt at huske på, at

12.5 Optimering af *PHPP*- beregning

Parametre	Minimumsværdi	Maksimumsværdi	Nummer på figur 12.3
$\lambda_{indervæg}$	0,5	1,5	3
$e_{indervæg}$	33	100	4
$\lambda_{isolering}$	0,037	0,05	7
$e_{isolering}$	300	700	8
Procent træ	0	20	1
$\lambda_{træ}$	0,1	0,2	2
$\lambda_{ydevæg}$	0,3	1,5	5
$e_{ydevæg}$	33	150	6

Tabel 12.4: Viser intervallerne for de enkelte parametre for den fine følsomhedsanalyse.

dette vil minimere gulvarealet hvis ikke hele konstruktionen laves større. Det ses også at det er nødvendigt, at optimere på isoleringen for ikke at få tykke vægkonstruktioner, som vil være med til at mindske dagslyset.

På baggrund af de to følsomhedsanalyser kan *PHPP*- beregningen optimeres efter ændring af taghældningen, så den igen overholder kravene for et passivhus. Dette er gjort herunder.

12.5 Optimering af *PHPP*- beregning

Efter følsomhedsanalysen er gennemført er det valgt at rette parametre til så *PHPP*-beregningen igen overholder passivhus kravet. Parametrene er valgt ud fra, hvilke parametre der har vist sig at have betydning for, hvor meget energi der bliver benyttet til rumopvarming. Derfor er det valgt at justere på parametre der har indflydelse på U-værdien og resultatet af en fiktiv tryktest. Dette har medført ændringerne vist i følgende tabeller, 12.5, 12.6, 12.7, 12.8 og 12.9.

Terrændæk			
	Gammel	Ny	Enhed
λ	0,38	0,37	W/mK
brede	275	300	mm

Tabel 12.5: Viser gamle og nye værdier for terrændækskonstruktionen.

Ydervæg			
	Gammel	Ny	Enhed
λ	0,37	0,35	W/mK
brede	145	180	mm
%-træ 1	7,5	5	%
%-træ 2	5	3	%

Tabel 12.6: Viser gamle og nye værdier for ydervægskonstruktionen.

Tagkonstruktion			
	Gammel	Ny	Enhed
λ	0,37	0,35	W/mK
brede 1	195	200	mm
brede 2	120	130	mm
%-træ	8	5	%

Tabel 12.7: Viser gamle og nye værdier for tagkonstruktionen.

Terrændæk med varme			
	Gammel	Ny	Enhed
λ	0,38	0,36	W/mK
brede	275	300	mm

Tabel 12.8: Viser gamle og nye værdier for terrændæk med varme.

Ventilation			
	Gammel	Ny	Enhed
n ₅₀	0,42	0,35	h ⁻¹

Tabel 12.9: Viser gamle og nye værdier for den fiktive tryktest.

12.5 Optimering af *PHPP*- beregning

Dette har medført at beregningerne i *PHPP* overholder kravene til passivhuse, denne *PHPP* beregning kan ses på bilags CD'en.

13 Varmeledningsteori

I det følgende gennemgås teorien for varmeledning. Teorien knytter sig til beregningerne i *MATLAB* programmerne *Lambda.m* og *Lambda_ler.m* på bilags CD'en. Afsnittet er baseret på [E. J. Funch 1994], [Hansen, Kjerulf & Stampe 1997] og [Mogens Steen-Thøde 2008], medmindre andet er anført.

Varmeledning er transport af varmeenergi fra en højere til en lavere temperatur i faste legemer. Varmeledning i byggematerialer har betydning for energiforbruget til opvarmning i bygninger. Det er valgt, at finde varmeledningsevnen for de konstruerede testelementer, beskrevet i afsnit 16.4 vha. forsøg. Forsøgene udføres i en hot box, som er beskrevet i afsnit 14.

13.0.1 Varmeledning

For at løse de matematiske problemer omkring varmebalance, bygges der på de generelle fysiske love til beregning af varmetransport som er termodynamikkens første hovedsætning om energibevarelse. De generelle fysiske love kan benyttes uden at betragte mediets natur, hvormed de generelle fysiske love ikke kan benyttes til en fuldstændig beskrivelse af de enkelte problemer. Derfor er Foursiers lov om varmeledning anvendt til at beskrive mediets natur. Termodynamikkens første hovedsætning lyder som følgende. "For et afgrænset system er tilvæksten i energi pr. tidsenhed = summen af de tilførte varmestrømme + effekten af det arbejde, der udføres på systemet". Der kan inden for bygningsfysik ses bort fra det sidste led, da der ikke udføres arbejde på systemet. Dermed bliver den første hovedsætning til den generelle varmebalanceligning.

$$\frac{dE}{d\tau} = \sum \Phi_i \quad (13.1)$$

Hvor

E er energi.[J]

τ er tid.[sek]

Φ_i er varmestrømmen.[W]

At der sker en tilvækst i energi er et udtryk for at der akkumuleres varme i systemet, dette giver anledning til en temperaturændring i det betragtede volumen.

$$\frac{dE}{d\tau} = \int_V \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dV \quad (13.2)$$

Hvor

t er temperatur. [$^{\circ}\text{C}$]

ρ er massefylde. [kg/m^3]

c er varmekapacitet. [J/kgK]

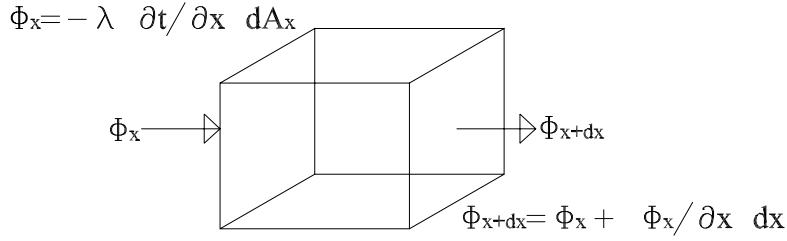
V er volumen. [m^3]

For at det er muligt at fastsætte hvilken teori, der skal benyttes er det nødvendigt at vide hvilke forudsætninger der er inden problemet kan beskrives. I rapporten beregnes stationære tilfælde, hvor summen af den tilførte varmemenstrøm til systemet er lig med summen af den afgivne varmemenstrøm fra systemet. I det stationære tilfælde sker der ingen ændringer i systemets indre energi og dermed heller ingen ændring af temperaturen som funktion af tiden. Ligning (13.2) kan derfor skrives på følgende måde.

$$\frac{dE}{d\tau} = 0$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$$

For at opstille teorien er det forudsat at de betragtede modeller består af faste materialer og at der ved rande mellem forskellige materialer er så god kontakt, at der ikke skabes ekstra modstand mod varmeledning fra det ene materiale til det andet. Det er desuden antaget at alle materialerne er isotrope, hvilket betyder at varmeledningsevnen er ens i alle retninger. Derudover er alle materialeværdier konstante. Den generelle varmebalanceligning (13.1) benyttes på et udskåret prisme vist på figur 13.1 og udtrykket er opskrevet i ligning (13.3), der kan tilføres en volumenafhængig varmeudvikling hvis dette ønskes.



Figur 13.1: Figuren viser varmebalancen for et udskåret prisme.

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dV = \Phi_x - \Phi_{x+dx} + \Phi_y - \Phi_{y+dy} + \Phi_z - \Phi_{z+dz} \quad (13.3)$$

Hvor

Φ_x er varmemestrømmen i x-retningen. [W]

Den udadgående varmemestrøm i hver enkel akse retning kan udtrykkes ved.

$$\Phi_{x+dx} = \Phi_x + \frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx$$

Indføres dette i (13.3) fås:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dV = -\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dx - \frac{\partial \Phi_y}{\partial y} dy - \frac{\partial \Phi_z}{\partial z} dz \quad (13.4)$$

eller gennem en arealflade.

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dV = -\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} dA_x dx - \frac{\partial \Phi_y}{\partial y} dA_y dy - \frac{\partial \Phi_z}{\partial z} dA_z dz \quad (13.5)$$

Da volumen indgår i alle led kan det omskrives til.

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{\partial \Phi_x}{\partial x} - \frac{\partial \Phi_y}{\partial y} - \frac{\partial \Phi_z}{\partial z} \quad (13.6)$$

Det er ikke muligt at beskrive varmemestrømmen yderligere med den generelle varmebalanceligning, det er derfor nødvendigt at benytte Fouriers lov om varmeledning, der sammenknytter temperatur og varmemestrømsintensitet, som er opskrevet i formel (13.7).

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad (13.7)$$

Indsættes Fouriers lov om varmeledning i ligning (13.6) kommer den generelle varmestrømsligning til at se således ud.

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (13.8)$$

Denne benyttes på de enkelte elementer igennem de faste konstruktioner og kan omskrives til formel (13.9).

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (13.9)$$

Hvor

t er temperatur. [°C]

τ er tiden. [sek]

a er temperaturledningstallet bestående af $\frac{\lambda}{c \cdot \rho}$. [m²/s]

λ er varmeledningsevnen. [W/mK]

c er materialets varmekapacitet. [J/kg°C]

ρ er materialets massefylde. [kg/m³]

x, y og z er længderne i varmestrømmenes retninger. [m]

Prismet kan ses på figur 13.1. Dette er det generelle udtryk hvorfra det er muligt, at udlede formelen for en stationær endimensionel varmeledning, som benyttes i forsøget. Varmeledningen skal være stationær dvs. at temperaturen ikke variere med tiden, derfor er:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \quad (13.10)$$

Formlen udledes for x-retningen og udtrykket $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ integreres to gange, hvorved formel (13.11) fås.

$$t = c_1 x + c_2 \quad (13.11)$$

Hvor

c_1 og c_2 er konstanter.

Randbetingelserne for udtrykket er opstillet herunder.

Hvor

13 Varmeledningsteori

$$\begin{array}{ll} x = 0 & t = t_{oi} \\ x = e & t = t_{ou} \end{array}$$

e er tykkelsen af elementet. [m]

t_{oi} er den indvendige overfladetemperatur. [°C]

t_{ou} er den udvendige overfladetemperatur. [°C]

Indsættes disse randbetingelser i formel (13.11) fås formel (13.12).

$$t = t_{oi} - \frac{t_{oi} - t_{ou}}{e}x \quad (13.12)$$

Formel (13.12) er et udtryk for temperaturfordelingen i et homogent materiale ved endimensionel, stationær varmeledning. Ved at differentiere denne formel med hensyn til x og indsætte udtrykket i Fouriers ligning, i afsnit 18.5 formel (13.7), opnås formel (13.13). Denne formel gælder for en endimensionel, stationær varmemestrøm gennem et materiale.

$$\phi = \frac{(t_{oi} - t_{ou}) \cdot A}{R_m} \quad (13.13)$$

Hvor

ϕ er varmemestrømmen. [W]

A er det betragtede areal af væggen. [m²]

R_m er isolansen for materialet. [°Cm²/W]

Formel (13.13) kan udvides til at omfatte flere forskellige materialegag under forudsætning af, at materialegagene er i kontakt med hinanden. Formel 13.14 er formel for stationær endimensionel varmemestrøm gennem en væg af flere materialer.

$$\phi = \frac{(t_{oi} - t_{ou})}{R_{m_1} + R_{m_2} \dots} \cdot A \quad (13.14)$$

Hvor

$R_{m_1} \dots$ er isolansen for de forskellige materialegag. [°Cm²/W]

$$R = \frac{\lambda}{e}$$

Både formel (13.13) og formel (13.14) benyttes ved beregning af varmeledningsevnerne for de forskellige testelementer baseret på forsøgsresultater. Varmeledningsevnen, λ skal først isoleres i begge formler, hvorved formel (13.15) og formel (13.16) fremkommer. I forsøgene med hot box'en måles lufttemperaturen og det er derfor nødvendigt at tilføje overgangsisolanserne for hver side af testelementet.

$$\lambda_1 = \frac{e}{\frac{(t_i - t_u) \cdot A}{\phi} - R_i - R_u} \quad (13.15)$$

$$\lambda_1 = \frac{e_1}{\frac{(t_i - t_u) \cdot A}{\phi} - R_i - \frac{e_2}{\lambda_2} - R_u} \quad (13.16)$$

Hvor

R_i er den indvendige overgangsisolans. [$^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$]

R_u er den udvendige overgangsisolans. [$^{\circ}\text{Cm}^2/\text{W}$]

For at kunne benytte formlerne, er det nødvendigt at skabe stationære, endimensionelle varmestrømme i forsøgene der udføres. Den stationære tilstand skabes ved at holde en konstant temperatur i hot box'en, som ikke ændre sig med tiden. En endimensionel varmeledning forekommer ved en uendelig stor væg, hvor der kun er en varmestrøm vinkelret på væggen. Denne vinkelrette varmestrøm skabes vha. målekassen, som er monteret på testelementet inde i hot box'en, som beskrevet i afsnit 14.

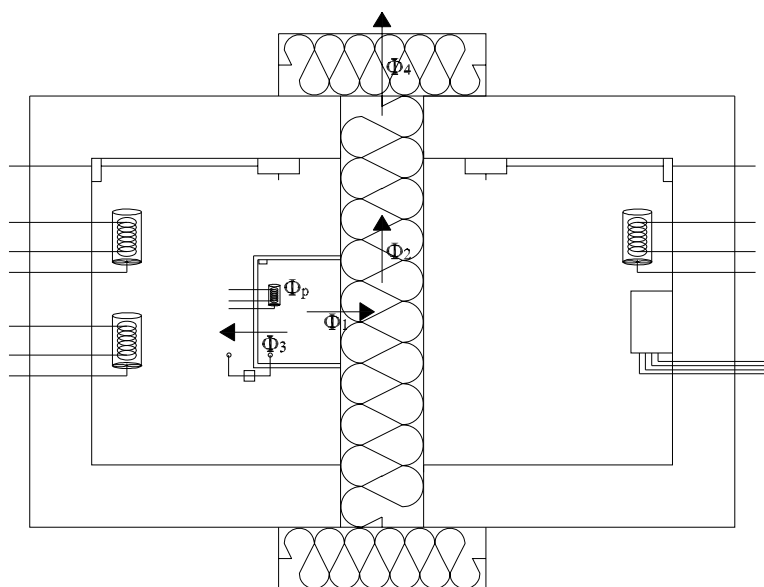
14 Hot box

I dette kapitel vil hot box'en blive beskrevet, både hvordan den virker men også hvad formålet med en hot box er. Til beskrivelse af hot box'en vil erfaring og observationer blive benyttet, da hot box'en er konstrueret fra bunden, i klimalaboratoriet på Aalborg Universitet. Der skal i forbindelse med hot box'en prioriteres at hot box'en ikke er blevet kalibreret ved test med en prøve hvor isoleringsevnen er kendt. Dette bivirker at der ikke er lavet nogen vurdering af hvor stor Φ_2 er, hvilken er senere beskrevet.

14.1 Formålet med den guarded hot box

Formålet med en guarded hot box er at skabe en endimensionel varmemstrøm gennem prøven. Det gøres ved at placere en testelementet mellem to rum med forskellige temperaturer. Der vil være et energitab gennem enderne af prøven, til det omkringliggende rum. For at forhindre indvirkningen fra dette på selve prøveområdet vil der blive benyttet en såkaldt guarded hot box. Den guarded hot box måler vha. en målekasse, som placeres på testelementet inde i den varme del, på en mindre del af testelementet. Dermed forhindres det, at energitabet i enderne af prøven påvirker måleområdet. Der skabes dermed et område hvor der bør være en endimensionel varmemstrøm, som kan ses på figur 14.1.

ϕ_1 er den varmemstrøm der bevæger sig gennem prøven til det kolde rum. ϕ_2 er varmemstrømmen der løber på langs af prøven, som skal forblive 0. Dette gøres ved at have den samme temperatur i målekassen, som i den varme guarded del, og sørge for at målekassen har den rette størrelse, så den ikke bliver påvirket af ϕ_5 , som er den varmemstrøm der er ud gennem testelementets ender til det omkringliggende rum. Denne varmemstrøm kan mindskes ved at efterisolere omkring testelementet, i dette tilfælde gøres det i bunden samt omkring testelementet med polystyrenplader. ϕ_3 må forventes at være 0, da der vil være samme temperatur i hhv. måleboksen og i den guarded del. ϕ_p er den tilførte effekt i målekassen, som skal være kendt da det må forventes at være den effekt der bevæger sig gennem væggen i et stationært tilfælde. Der er specifikke krav til målekassens størrelse i [ISO 8990 1996], måle kasse n skal være minimum ter



Figur 14.1: Figuren viser en illustration af varmestrømmen i hot box'en.

gange prøvens tykkelse eller en 1×1 meter, i hot box'en der benyttes er der derfor lavet en målekassen på 1×1 meter, da prøven er 300 mm og tre gange tykkelsen af prøven er dermed mindre end 1×1 meter. Desuden må næsen af målekassen ikke overskride 2% af måleområdet bredde eller 20 mm, denne næse er konstrueret så den er 15 mm og dermed overholder denne kravet i [ISO 8990 1996].

14.2 Hot box'ens opbygning

Hot box'en består af to kasser, der kan trækkes sammen vha. en wire. De to kasser har et indvendigt hul mål på 1480×1480 mm, hvilket er det område der vil blive udsat for belastning. Hot box'en kan ses på figur 14.2.

På fladerne omkring åbningerne er der placeret en gummimembran, der former sig efter prøvens overflade ved tryk og dermed slutte helt tæt, så utætheder mellem kasserne og prøven undgås.

Selve hot box'en består af to individuelle kasser, som skal sikre at der kan genereres en varm og en kold side, og derved sikre at der er en varmestrøm gennem prøven. Der er lavet en illustrations tegning, som kan ses på figur 14.3.



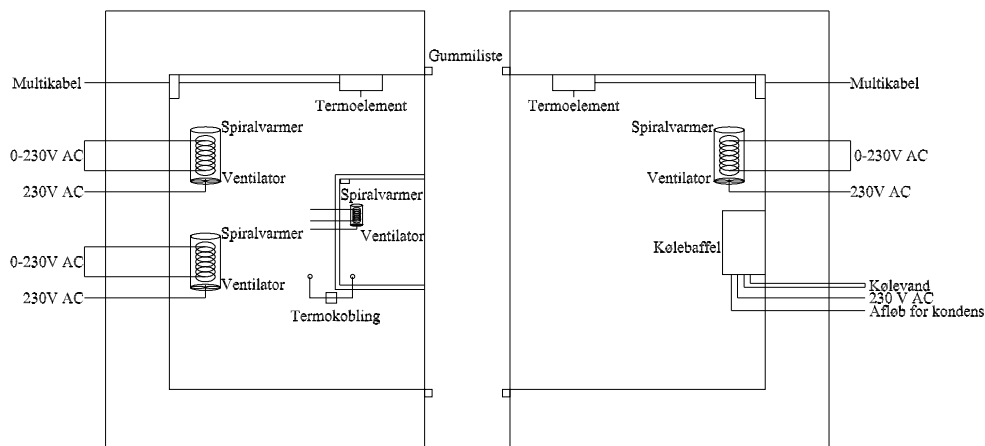
Figur 14.2: Figuren viser et billede af hot box'en.

I den varme del er der placeret to spiralvarmere, som tilfører energi til kassen. De bliver styret af en transformator udenfor kassen, som kan justere mængden af energi der tilføres til kassen. Der er ved hver af disse spiralvarmere placeret en ventilator, der søger for opblanding af luften i kassen. Desuden vil disse ventilatorer skabe tvungen konvektion ved overfladen af prøven.

I den kolde del er der placeret både en varmespiral og en kølebaffel. Dette er gjort for at kunne holde en så præcis temperatur som muligt. Kølebafflen er koblet til en kølekonvektor hvor det er muligt at indstille vandets temperatur, mens varmespiralen styres med en transformator. Der er i den kolde guardede del placeret en PT1000 der styre køleanlægget, denne måler temperaturen til styresystemet som kontrollere koldtvands fremløbet.

Der vil desuden være placeret flere termoelementer, som beskrevet i afsnit 16.2, i begge kasser. De vil være med til at sikre, at der er fuld opblanding i kasserne og vise den præcise temperatur så denne kan finjusteres med hhv. varme- og køleflader.

14.2 Hot box'ens opbygning



Figur 14.3: Figuren viser en illustration af hot box'en.

Der er desuden lavet plads til en befugter og et gasmålesystem, der er sat i til kalibrering af andre instrumenter, dette vil ikke blive benyttet i dette projekt.

Grunden til, at denne hot box hedder en guarded hot box er, fordi at målekassen, som er placeret direkte på testelementet, er placeret inde i den guarded kasse, som er den kasse elementet monteres i. Målekassen kan ligeledes ses på figur 14.3. Målekassens størrelse er sammenhængende med testelementets tykkelse og er udstyret med to spiralvarmere og to ventilatorer, igen for at skabe fuld opblanding og tvungen konvektion. Der er endvidere en række normkrav, der skal beregnes ud fra resultaterne, dette er gjort i afsnit 17.

Før der kan udføres forsøg i hot box'en, skal testelementerne til forsøgene konstrueres. Da nogle af testelementerne skal komprimeres udføres der først nogle indledende forsøg, hvor halmen komprimeres i en skraldespand. Dette er beskrevet i det efterfølgende afsnit.

15 Komprimeringsforsøg

I dette kapitel vil de indledende forberedelser til konstruktionen af testele-
menterne bliver beskrevet. Der vil blive udført komprimeringsforsøg men en
mindre prøve af halmen, der skal benyttes i de endelige testelementer.

For at kunne bestemme mængden af materialer, der skal medbringes fra Fri-
land, til konstruktion af testelementer, er det nødvendigt at lave trykprøver
med halm svarende til det der benyttes i testelementerne. Det blev gjort ved
at fylde en metalskraldespand med snittethalm, for derefter at trykke prøverne
sammen ved hjælp af en masse. I dette tilfælde blev der benyttet en række
jerngenstande, som kan ses på figur 15.1.



Figur 15.1: Figuren viser et billede af de jerngenstande der blev benyttet.

Det er valgt at benytte disse genstande, af to grunde, den ene er at det gjorde
det muligt trinvist at øge vægten, den anden er at de hydrauliske trykprøv-
ningsmaskiner der er til rådighed ikke er konstrueret til at trykke med lave tryk
og vil derfor være upræcise.

Den gradvise forøgelse af vægten, gør det muligt at komme frem til, hvor meget
halmen kan presses sammen ved et realistisk tryk, dermed ment et tryk der
kan genskabes ved skalering til en større prøve. Det blev under disse prøvninger

også observeret, hvordan prøven reagerer, når lasten på den fjernes.

Der er benyttet tre forskellige halmtyper. Den første er en blanding af havre, byg og hvede der er snittet sammen til en type halm. Den anden er rapshalm som er en lidt stivere halm, og til sidst er der fabriksnittet havre. Den fabriksnittet havre er snittet i størrelsen >20 mm, mens de to andre halmtyper er af størrelsen 20-60 mm.

Komprimeringen er lavet over tre gange, for at simulere at prøven bliver komprimeret flere gange og opnår en tættere komprimering. For at opnå en så jævn komprimering som muligt, er der benyttet en rund træplade, som er skåret til så den passer ned i skraldespanden. Der er i tabel 15.2 og 15.3 taget et udvalg af prøverne, hvor det blandt andet er vist hvor meget prøven er komprimeret ud fra vægt og antal mm, som prøven er blevet trykket sammen. Dette er regnet om til en volumen og en densitet.

Prøverne har vist, at de tre typer, rapshalm, fabriksnittet havre halm og blandingen af byg, havre og hvede reagerer forholdsvis ens ved tryk. Der er dog forskelle som specielt kan ses forskel på startvægten af prøverne, hvor rapshalm er den halm med den højeste densitet. Startværdierne kan ses på tabel 15.1

	Vægt kg	Højde m	Diameter m	Areal m ²	Volumen m ³	Densitet kg/m ³
Byg, havre og hvede	0,485	0,17	0,27	0,057256	0,009733	49,82822
Fabriksnittet havre	0,441	0,2	0,27	0,057256	0,011451	38,51157
Rapshalm	0,733	0,2	0,27	0,057256	0,011451	64,01129

Tabel 15.1: Viser startværdierne for prøverne.

Det ses i tabel 15.1, at prøverne har forskellige densiteter, det skyldes typen af halm, og kan få betydning for vægten på de endelige prøver. Den fabriksnittede havre er komprimeret i plastsække og det er derfor nødvendigt, at få det løsnet op. Det gøres med håndkraft, hvorefter halmen drysses let ned i skraldespanden. Der vil i det efterfølgende blive vist et udsnit af værdier for prøverne før komprimering, under komprimering og efter komprimeringen, hvor lasten er fjernet igen. De resterende komprimeringer kan ses i bilag C. Resultatet efter første komprimering kan ses i tabel 15.2.

Det kan ses ud fra densiteten, at det er muligt at sammenpresse den fabriksnittede havre mest, dette kan være fordi det har været komprimeret før og dermed lettere bliver trykket sammen, men det kan også være fordi den in-

15 Komprimeringsforsøg

	Før			
	Vægt kg	Højde m	Volumen m ³	Densitet kg/m ³
Byg, havre og hvede	0,485	0,17	0,0097	49,828
Fabrikssnittet havre	0,441	0,2	0,0115	38,512
Rapshalm	0,733	0,2	0,0115	64,011
Efter med vægt				
Byg, havre og hvede	0,485	0,087	0,005	97,366
Fabrikssnittet havre	0,441	0,085	0,0049	90,616
Rapshalm	0,733	0,113	0,0065	113,294
Efter uden vægt				
Byg, havre og hvede	0,485	0,108	0,0062	78,433
Fabrikssnittet havre	0,441	0,116	0,0066	66,399
Rapshalm	0,733	0,133	0,0076	96,258

Tabel 15.2: Viser værdierne for prøverne før og under første komprimering samt efter den sidste komprimering under last.

deholder mere luft ved helt løsfyldte prøver. Derudover kan det ses, at det er rapshalmen der er sværest at presse sammen.

Efter at lasten er fjernet udvider alle prøverne sig lidt igen, det ses også her at det er den fabrikssnittede havre som udvider sig mest og rapshalmen mindst. Det kan tyde på, at rapshalmen er mere stiv og dermed lettere bliver ødelagt når den presses sammen, eller fordi de enkelte strå er stivere og dermed holder bedre på de omkringliggende strå, hvorfor den er svære at presse sammen og udvide igen.

Værdierne for den fjerde komprimering kan ses i tabel 15.3, hvor der er belastet med en samlet vægt på ca. 91 kg. Det ses at det er blandingen af byg, havre og hvede der kan presses mest sammen og rapshalmen der kan presses mindst sammen. Denne ekstreme vægt er blevet benyttet til at se, om der sker en pludselig forøgelse af komprimeringen ved en høj belastning men dette er ikke tilfældet, derfor er denne ikke yderligere benyttet da dette tryk vil være umuligt at udføre på den endelige prøve under laboratorie omstændighederne.

	Før			
	Vægt kg	Højde m	Volumen m ³	Densitet kg/m ³
Byg, havre og hvede	1,063	0,3	0,0172	61,886
Fabrikssnittet havre	0,929	0,3	0,0172	54,085
Rapshalm	1,359	0,3	0,0172	79,119
Efter med vægt				
Byg, havre og hvede	1,063	0,169	0,0097	109,857
Fabrikssnittet havre	0,929	0,165	0,0094	98,336
Rapshalm	1,359	0,225	0,0129	105,492
Efter uden vægt				
Byg, havre og hvede	1,063	0,191	0,0109	97,204
Fabrikssnittet havre	0,929	0,19	0,0109	85,397
Rapshalm	1,359	0,231	0,0132	102,752

Tabel 15.3: Viser værdierne for prøverne før og efter den fjerde komprimering.

Ud fra resultaterne af trykprøvningerne er det valgt, at mængden af halm skal svarer til en sammenpresning på tre gange volumen. Derfor er der blevet skaffet minimum 2,025 m³ af hhv. rapshalm og fabrikssnittet havre.

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

Forsøg på, de tidligere beskrevne, testelementerne, kapitel 16.4, vil blive beskrevet i det efterfølgende kapitel. Til det vil hot box'en, der er beskrevet i kapitel 14, mens de indledende forberedelser er beskrevet i bilag D, blive benyttet. Forsøgsbeskrivelsen vil bygge på [ISO 8990 1996] og [DS/EN 1946-4 2000], medmindre andet er anført.

16.1 Forudsætninger

Det forudsættes, at der kan opnåes stationære tilfælde under forsøget, dette vil blive underbygget ved målepunkter flere steder i hot box'en, disse målepunkter bliver beskrevet i afsnit 16.2.

Desuden vil der være en forudsætning om en endimensionel varmestrøm gennem testelementet, dette vil blive opnået ved at have samme temperatur i den guardedede del, som i målkassen. Der vil derudover være en forudsætning om at testelementerne er jævnt opbygget. Det er så vidt muligt forsøgt ved at presse testelementet jævnt, men også ved at fordele løsfyldsisoleringen jævnt ved hhv. halm samt halm og ler elementet.

16.2 Målepunkter

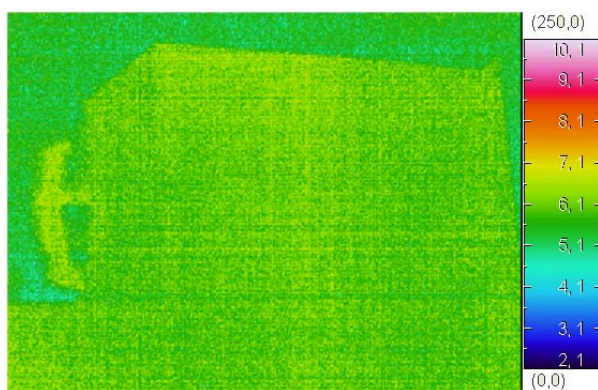
I det følgende vil der blive givet en beskrivelse samt begrundelse for placeringen af de enkelte målepunkter i og ved hot box'en.

Det er valgt at benytte termoelementer til måling i alle punkter. Hovedformålet med målepunkterne er, at give overblik over temperaturfordelingen i de enkelte kasser, som skal være jævne. Grunden til der ønskes en jævn overfladetemperatur er, at dette skaber en jævn strålingspåvirkning på målekassen fra de omkringstående flader. Det er valgt at placere et termoelement på hver overflade, disse er tilnærmelsesvis placeret på midten af de enkelte overflader.

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

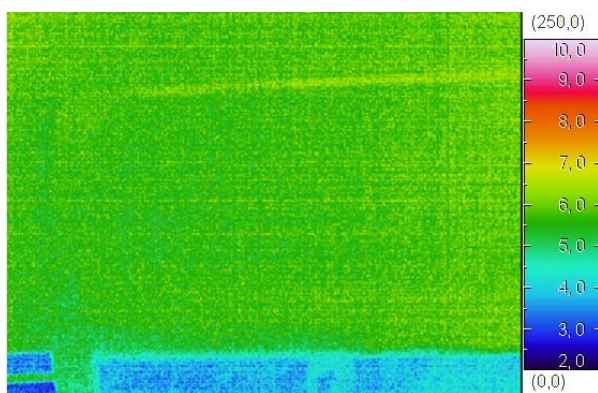
tur i den varme kasse, disse er placeret i ens højde på begge sider samt bag målekassen. Termoelementerne er placeret på midten af fladerne.

Der er taget termografibilleder af hver endeflade under et testforsøg for, at kontrollere at der er en jævn temperatur henover fladerne, disse billeder kan ses på figur 16.2, figur 16.3, figur 16.4, figur 16.5 og figur 16.6.



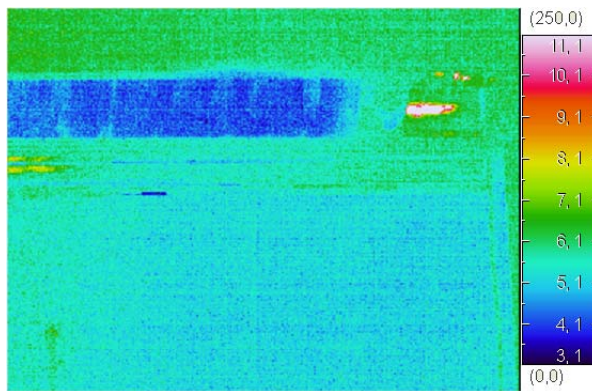
Figur 16.2: Viser temperaturen ved toppen af varme afskærmningen, samt hot box'ens side i den kolde side.

På figur 16.2 kan der ses en relativ lille temperaturforskel mellem afskærmningen og hot box'ens sider i den kolde side. Den fremkommer, fordi det er to forskellige materialer og luftstrømningerne formentlig er lidt forskellige omkring afskærmningen. Der benyttes ikke varme i den kolde side, da det er fundet at det gør målingerne mere svingende.



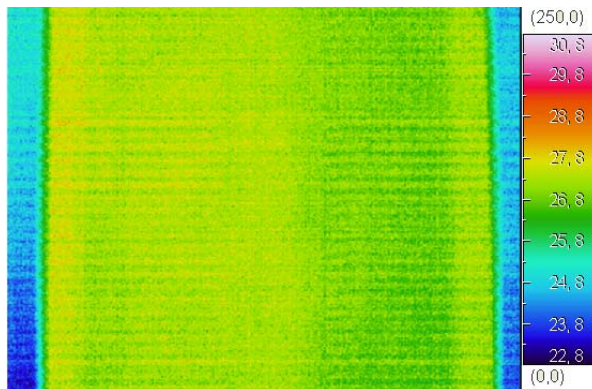
Figur 16.3: Viser temperaturen ved køleanlægget.

På figur 16.3 kan ses en temperaturforskel mellem overfladerne over køleanlægget og ved selve udblæsningen, det kan ikke ændres, og da størstedelen af endevæggen i hot box'en er placeret under, er der taget termografi billeder af denne som kan ses på figur 16.4. Slangerne der fører det kolde vand hen til anlægget fremstår også med en lavere temperatur. Det kunne løses ved at isolere slagnerne, hvilket dog ikke er blevet gjort, idet det vurderes ikke at have en betydelig indflydelse.



Figur 16.4: Viser temperaturen ved køleanlægget, samt væggen herunder.

På figur 16.4 kan ses, at temperaturen under indblæsningen fra køleanlægget er ensartet, hvilket betyder at størstedelen af endevæggen har denne temperatur.

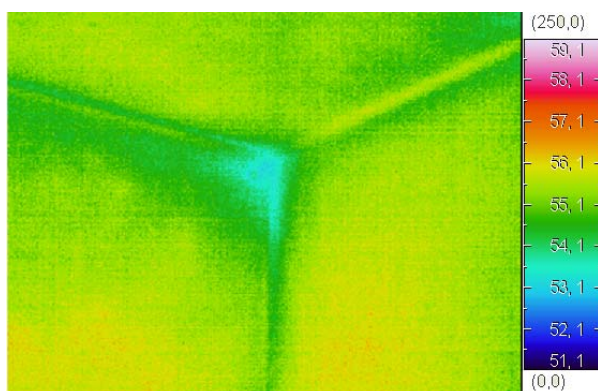


Figur 16.5: Viser temperaturen ved afskærmningen omkring varmeanlægget.

På figur 16.5 kan det ses, at temperaturen på varmeafskærmningen er varmere end vægoverfladen, men idet forskellen er under en grad, antages det ikke at

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

give problemer. Der vil dog under forsøgene blive holdt øje med temperaturforskellen for denne, så den ikke bliver for stor.



Figur 16.6: Viser temperaturen i et hjørne.

På figur 16.6 kan det ses, at temperaturen i hjørnet afviger lidt fra overfladerne omkring hjørnet. En af grundene til dette kan være kuldebroer, men en anden og mere sandsynlig årsag kan være fordi hot box'en har været kølet ned til 3 °C lufttemperatur for derefter at blive varmet op til ca. 60 °C. Kassen har derfor sandsynligvis ikke været gennemvarmet, hvilket har resulteret i de afvigende temperaturer. Problemet blev kontrolleret efter ca. 3 timer og her var problemet næsten forsvundet.

Det ses generelt ud fra billederne, at der ikke er nogle markante temperaturforskelle over de enkelte flader, dermed er det vist at de enkelte flader tilnærmelsesvis har den samme overfladetemperatur. Når det er muligt vil der dog blive holdt øje med de nævnte afvigelser, for at sikre at der ikke opstår problemer.

For at sikre der ikke er påvirkninger fra luften, når der måles overfladetemperaturer, er det valgt at have kontakt mellem fladen og 100 mm af termoelementerne fra enden. Det gøres ved hjælp af tape og termopasta, hvilket leder overfladetemperaturen til termoelementet for at sikre den målte temperatur kun er overfladen.

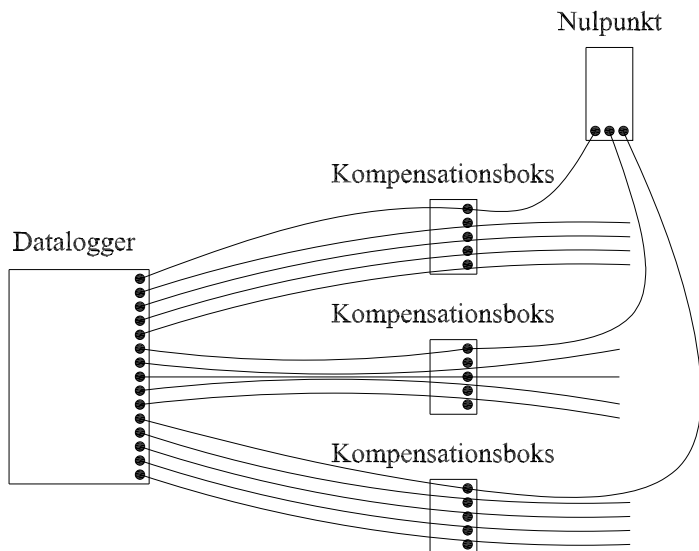
De målte lufttemperaturer måles i luften, vha. et termoelement, der er placeret i et sølvbelagt rør med en lille ventilator på. Dette gøres for, at måle lufttemperaturer og ikke operative temperaturer. Ved hjælp af de sølvbelagte rør minimeres strålingen fra andre flader og sikre tvungen konvektiv overgang mellem luft og termoelement.

16.3 Termoelementer

I det følgende vil det blive beskrevet hvordan termoelementerne er koblet sammen med en kompensationsboks, hvilket bygger på [N. Artmann, R. Vonbank R. L. Jensen 2008], og hvordan kalibreringen er blevet udført.

Termoelementerne til måling af temperaturer i hot box'en, som beskrevet i afsnit 16.2, skal kalibreres, som beskrevet i det efterfølgende.

Der benyttes kompensationsbokse til at fordele termoelementerne til de enkelte dele af hot box'en. Det er derfor ikke nødvendigt at benytte en ispunktreference til hvert eneste termoelement, men kun en ispunktreference til hver kompensationsboks. Der er placeret en kompensationsboks i hhv. den kolde side, den varme side og målekassen. Termoelementerne er sluttet til i de tre kompensationsbokse og fra dem bruges kobberledning til at lede signalet ud i dataloggeren udenfor hot box'en. Dette er illustreret på figur 16.7. Det kan

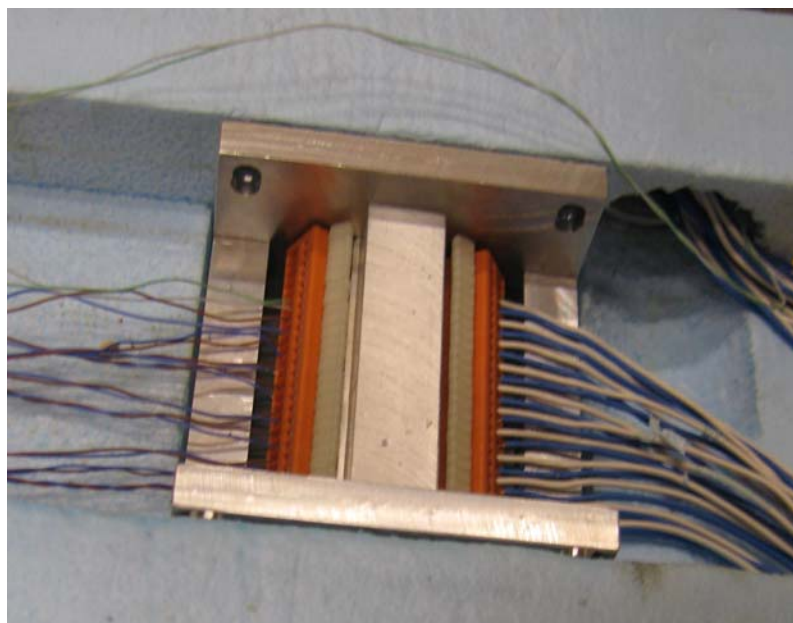


Figur 16.7: Figuren viser en illustration af hvordan en kompensationsboks er koblet til systemet.

ses på figuren, at der er monteret et termoelement mellem kompensations-

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

boksen og en ispunktreference. Dette termoelement måler temperaturforskellen mellem nulpunktet og kompensationsboksen. Termoelementerne fra kompensationsboksen måler temperaturforskellen mellem kompensationsboksen og målepunktet hvor temperatur ønskes målt. Den ønskede temperatur fremkommer ved at addere de to målte temperaturer. Opstillingen kan ses på figur 16.8.



Figur 16.8: Figuren viser et billede af kompensationsboks hvor ledninger i højreside er almindelige kobberledninger og ledninger i venstre side er termoelementer.

For at sikre alle termoelementerne måler den korrekte temperatur, er de blevet kalibreret som beskrevet i det efterfølgende afsnit.

16.3.1 Kalibrering

Termoelementerne er blevet kalibreret, mens de var monteret i kompensationsboksene, for at mindske fejlen. Det er gjort ved at benytte en ISOTECH ISO-CAL VENUS 2140B plus kølebrønd og et Tinsley- ASL F200 Precision Thermometer, som er specielt beregnet til kalibrering og derfor antages at måle den sande temperatur. Ved kalibreringen er der blevet logget hvert 10. sek i 10 min, mens præcisionstermometeret er blevet aflæst manuelt ved logningens start, efter 5 min og ved afslutning af logningen. De aflæste værdier fra præ-

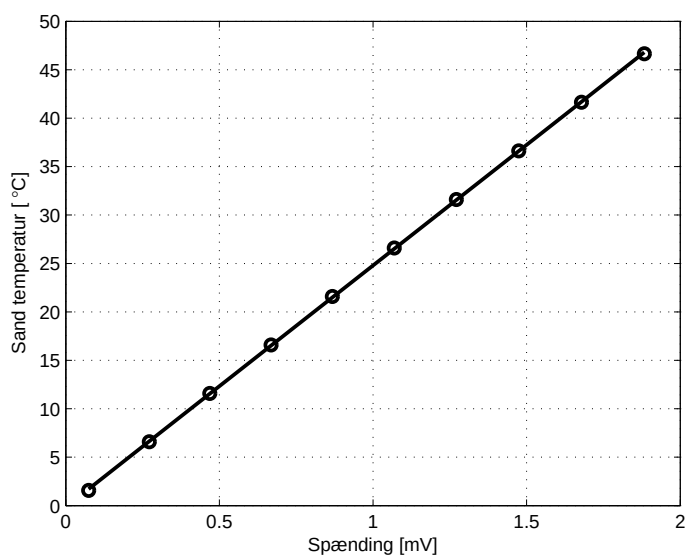
cisionstermometeret mm. kan ses i excelark *kalibrering_af_termoelementer.xls* på bilags CD'en. For at sikre der er opnået en stabil temperatur i kølebrønden er der ventet 30 min mellem hver eneste kalibrering. Alle termoelementerne er kalibreret inden for hele det forventede temperaturspektrum, dvs. mellem 0°C og 45°C med 5°C intervaller. Det er gjort over to omgange da der var fejl på nogle af termoelementerne første gang. Alle aflæste temperaturer og målinger kan ses i bilag E.

Ud fra målingen og den eksakte temperatur er der lavet en regressionslinje, hvortil ligningen er fundet. Som eksempel er målingerne for kanal syv vist i tabel 16.1.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [$^{\circ}\text{C}$]	Brønd [$^{\circ}\text{C}$]
0,075	1,56	0
0,272	6,59	5
0,469	11,58	10
0,668	16,59	15
0,868	21,59	20
1,069	26,61	25
1,271	31,61	30
1,474	36,62	35
1,678	41,64	40
1,883	46,65	45

Tabel 16.1: Viser kalibrering af kanal 7, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometer er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Tabel værdierne kan ses plottet sammen med regressionslinjen på figur 16.9.



Figur 16.9: Figuren viser en kalibreringskurve for kanal 7 i dataloggeren.

16.3 Termoelementer

Ud fra dette er der fundet en A og en B til at beskrive regressionslinjen, $y = Ax + B$, som kan ses i tabel 16.2 som er for alle termoelementer.

Kanal	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	24,96	24,79	25,03	24,92	24,82	24,78	24,98	25,06	24,91
B	-0,11	-0,03	-0,23	-0,144	-0,09	-0,05	-0,22	-0,27	-0,17
Kanal	13	14	15	16	17	18	19	20	21
A	24,70	24,78	24,71	24,65	24,65	24,64	24,63	24,92	24,69
B	0,04	-0,03	0,09	0,12	0,12	0,11	0,12	-0,12	0,14
Kanal	22	23	24	25	26	27	28	29	30
A	24,79	24,69	24,69	24,78	24,71	24,66	24,61	24,64	24,73
B	0,06	0,14	0,14	0,02	0,09	0,14	0,22	0,11	0,06
Kanal	31	32	33	34	35	36	37	38	39
A	24,72	24,15	24,66	24,73	24,66	24,68	24,63	24,83	24,65
B	0,09	0,10	0,14	0,06	0,15	0,14	0,20	-0,05	0,12

Tabel 16.2: Viser faktor A og B for alle de kalibrerede termoelementer.

16.4 Konstruktion af testelementer

I det følgende beskrives konstruktionen af de testelementer inkl rammerne for elementerne, som benyttes til forsøgene med hot box'en. Det beskrives både hvordan testelementerne og rammerne er opbygget og hvilke problemer der opstod under konstruktionen af dem. Derudover listes mængderne af halm, ler, vand, sand og papir der er brugt til hvert enkelt testelement.

Rammerne til testelementerne er konstrueret af spærtræ med en tykkelse på 45 mm. Der er konstrueret to størrelse rammer, to på 220 mm og en på 300 mm. For at få aluminiumspladen, som skal placeres på rammen til at slutte tæt er der lavet en nedfræsning med en dybde og en bredde på henholdsvis 3 mm og 8 mm. To af rammerne lakeres med en grunder, for at sikre at fugten fra henholdsvis leren samt halm papir blandingen ikke trænger ud i spærtræet. Der bankes aluminiumshjørner på rammerne for, at give dem større stabilitet ved transport med gaffeltruck og trykbelastningen i hot box'en under forsøg.

Tre af testelementerne er udført i samarbejde med Steen Møller, Caroline Whitmeyer fra Friland samt halmbygger Michael Callesen. De tre elementer er alle med løsfyldsisolering iform af fabrikssnittet halm. Det ene testelement er med et lag ler på hver side og det andet er kun med fabrikssnittet halm og det sidst testelement er med en halm papir blandingen.

16.4.1 Testelement med fabrikssnittet halm

Dette testelement har en simpel konstruktion bestående af fabrikssnittet halm, som er fyldt i rammen med hånd. Halmen er rystet løst ned i rammen for at opnå et minimum af komprimering. Mængden af halm brugt til dette testelement er 48,3 kg.

Siderne af rammen er beklædt med en aluminiumsplade med en tykkelse på 3 mm. Dette gøres for at sikre, at der ikke er luftstrømninger igennem testelementet, idet dette vil påvirke resultaterne i forsøget.

16.4.2 Væg med ler og fabrikssnittet halm

Det var nødvendigt at konstruere dette testelement af flere omgange pga. de forskellige lag i elementet og tørringsprocessen for leren. I første omgang udlægges det første lag ler på i alt 40 mm, som afrettes med en lægte for at

sikre en plan overflade. For at sikre at leren ikke løsner sig fra rammen, når elementet rejses op på højkant, er der monteret skruer på indersiden af rammen ca. midt i lerlaget. For at forstærke lerlaget er der ligeledes placeret et hjørnet i midten af lerlaget. I første omgang var det meningen, at halmen skulle ligges på mens lerlaget stadig var vådt, for at presse halmen lidt ned i leren. Det blev ændret idet halmen sandsynligvis ville forsinke tørringen af lerlaget. Lerlaget skal derfor være tørt før konstrueringen af testelementet kan fortsættes. For at fremskynde tørringen er siden af rammen på testelementet beklædt med et lag kraftigt papir og 9 mm volierenet med 13×25 mm masker. Denne beklædning gør det muligt for fugten i leren, at trænge ud gennem siderne. Volierenettet understøttes af lægter som cirka er placeret for hver 100 mm.

Efter en tørringsproces på to dage fyldes halmen løst i rammen på samme måde, som nævnt i overstående afsnit 16.4.1. Halmen fyldes op til kanten af rammen dvs. at der fyldes 40 mm ekstra halm i rammen i forhold til det der skal være. Oven på halmen ligges en måtte af tynde bambusrør, for at få en nogenlunde jævn fordeling af lerlaget oven på halmen. Denne måtte skal ligeledes sikre en forholdsvis ens komprimering af halmen. Halmen komprimeres med håndkraft så der er plads til det øverste lag ler. Herefter tages bambusmåtten forsigtigt af og der fyldes igen halm i op til kanten af rammen. Måtten ligges på igen og der monteres skruer hele vejen rundt på indersiden af rammen som i det første lag ler. Herefter udlægges et lag ler på ca. 40 mm, som igen afrettes med en lægte til sidst for at sikre en plan flade.

Efter tørring i tre dage har det været nødvendigt, at udbedre skader som er opstået omkring skruerne i det øverste lag. Skaderne er opstået under tørring af leren, fordi ler og halm er sunket en smule sammen og dermed er leren blevet trukket ned forbi skruerne inden tørringen var fulstændig. På grund af dette er der dannet revner omkring skruerne. Skaderne er blevet udbedret ved at fugte leren med en våd afrettet. For at få lerlaget op i plan med rammekanten er der tilføjet et ekstra lag ler oven på det i forvejen eksisterende lag.

Idet siden af testelementet er understøttet for hver 100 mm og volierenettet ikke er tilstrækkelig stift, forekommer der mindre nedbøjninger imellem understøtninger. Det gør, at det nederste lag ler ikke er jævnt på ydersiden. Det er derfor nødvendigt, at befugte ydersiden af elementet igen, når lægter, volierenet og papirlag fjernes og testelementet kan rejses op på højkant. Befugtningen af fladen gør det muligt, at fjerne ujævnhederne på ydersiden af lerlaget.

I tabel 16.3 kan mængderne af halm og materialer til leren ses. Mængderne for den ekstra mængde ler nødvendig for at kunne udbedre de opståede skader kan ses i tabel 16.4.

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

Materialer	Vægt [kg]
Sand(Lerblanding)	296,1
Ler pulver(Lerblanding)	73,75
Vand(Lerblanding)	55,53
Halm(Lerblanding)	2,17
Ler første lag	174,19
Ler andet lag	253,42
Vand til opfugtning	1,10

Tabel 16.3: Tabellen viser vægten af mængderne af materialer brugt til lerblanding og løsfyldsisolering i testelementet.

Materialer	Vægt [kg]
Vand til opfugtning	1,10
Sand(Lerblanding)	50,00
Ler pulver(Lerblanding)	8,16
Vand(Lerblanding)	9,26
Halm(Lerblanding)	0,363
Ler tilovers	5,30
Samlet mængde ler	62,48

Tabel 16.4: Tabellen viser vægten af mængderne af materialer brugt til den ekstra lerblanding.

Ud fra disse tabeller kan det ses at der er blevet fordelt 315,9 kg ler oven på den løst fyldte halm, det svarer til at halmen tildels er presset som med 300 kg komprimering. Det betyder, at når λ -værdien for halmen imellem lerlagene, skal benyttes til at finde varmeledningsevnen for lerpudsen, benyttes den senere beregnede λ -værdi for halm komprimeret med 300 kg. Grunden til det kan antages som helt jævnt fordelt er, at der er placeret et bambusnet under lerlaget hvilket vil fordele trykket mere ligeligt.

16.4.3 Testelement med fabrikssnittet rapshalm

Dette testelement har samme simple rammekonstruktion, som elementet med fabrikssnittet halm. Halmen benyttet i dette element er fabrikssnittet rapshalm, som komprimeres med en vægt på 600 kg. Metoden rapshalmen kom-

primeres med er beskrevet i et senere afsnit. Mængden af halm der er benyttet til elementet er 92,98 kg.

Der er også i dette element benyttet en 3 mm aluminiumsplade pga. luftstrømninger.

16.4.4 Halm papir blanding

Dette testelement består af halm og en papir blanding af avispapir og vand. Avispapiret sættes i blød, hvorefter det blandes med et røreværk med piskeris. Fabrikssnittet halm, papir blanding og ekstra vand blandes derefter i en tvangsblender for at få en jævn masse. Det kan være svært at blande disse materialer ordentligt sammen. Der blev derfor blandet af fire gange, hvoraf de tre første gange er fra samme papir blanding. Den fjerde blanding halm og papir er udelukkende fra nr. 2 papir blanding. Bunden i denne ramme er konstrueret på samme måde som i afsnit 16.4.2, af papir, volierenet og lægter. Dette er for, at fugten kan trænge ud igennem bunden af rammen. For at mindske nedbøjningerne for dette testelementet er lægterne her kun placeret med et par centimeters mellemrum.

I tabel 16.5 kan mængderne af materialer til de fire blandinger ses.

Materialer		Vægt [kg]			
Blandingnr.		1	2	3	4
Papir blanding	Tørt papir	7,50	2,98		
	Vand	75	35,85		
Halm papir blanding	Halm	6,87	6,97	6,93	10,03
	Papir blanding	28,47	26,92	26,99	38,83
	Vand	37,27	33,68	45,44	59,09
	Samlet	72,61	67,58	79,36	107,95

Tabel 16.5: Tabellen viser vægten af mængderne af materialerne brugt til testelementet.

16.4.5 Problemer med halm papir elementet

I det følgende beskrives med problemer der er opstået med testelementet af halm papir blandingen. Afsnittet er baseret på observationer og vurderinger.

Konstruktionen af testelementet er beskrevet i afsnit 16.4.4, hvori det er nævnt at denne blanding af halm og papir indeholder store mængder vand. Denne vandmængde giver anledning til en lang tørringsproces. Derfor blev elementet klodset op på lægter, efter konstruktionen, for at få luft under elementet og derved fremskynde tørringsprocessen. Tørringsprocessen for testelementet var langsomlig og efter ca. fire dage begyndte prøven at spire. Det skyldes hhv. det store vandindhold i prøven og det restkorn, som ikke er blevet sorteret fra halmen. Det er problematisk, at elementet har så højt et vandindhold i så lang tid, da dette kan forårsage organisk vækst i form af f.eks. spire, men også råd og svamp. Det vurderes derfor, at hvis denne type isolering skal kunne bruges i konstruktioner, er det nødvendigt med en hurtig og effektiv tørringsproces. En sådan tørringsproces vil kræve en stor mængde energi og det harmonere ikke med princippet for halmhuse. Dette princip er, at skære ned på energiforbruget til fremstilling af byggematerialer. Det er derfor vurderet, at hvis mængden af vand i konstruktionen ikke kan reduceres kraftigt under fremstillingsprocessen uden brug af ekstra energi, er det ikke muligt at benytte denne konstruktion som isolering.

Det er på grund af tidspres og en vurdering af, at elementet ikke kan blive en realitet valgt ikke at udføre test af halm papir elementet. Testelementet er desuden også svundet ind med tiden og udfylder derfor ikke den konstruerede ramme. Dette kan give anledning til afvigelser, i form af en påvirkning på den endimensionelle varmestrøm i målekasse, under et forsøg pga. den manglende masse.

For det skulle være muligt at benytte halm papir elementet skal vandindholdet nedsættes betydeligt, det kunne evt. ske ved at benytte et andet bindemiddel end papir, eller ved evt. at blande det tørt for derefter at tilsætte en mindre mængde vand, hvilket ville betyde betyde en kortere tørringstid.

16.5 Komprimering

I det følgende afsnit vil komprimeringsmetoden for forsøget med hot box'en blive beskrevet samt udførslen af komprimeringen på testelementerne.

16.5.1 Komprimeringssystem

Testelementet bestående af halm vil blive komprimeret et par gange, for at undersøge hvor stor indflydelse det har på varmeledningsevnen. Der er derfor blevet udformet et hejsesystem, som kan ses på figur 16.10, til at påføre den ønskede vægt i form af jernlodder. De vil blive placeret jævnt udover hele træpladen, som vist på figur 16.10.



Figur 16.10: Figuren viser et billede af det benyttede hejsesystem der er lavet til komprimering af halmen, påført en last i form af x antal 10 kg jernlodder.

Det blev i de indledende forsøg med komprimering af halm i en skraldespand, beskrevet i af snit 15, fundet at halmen kan komprimeres ca. tre gange. Vægten der blev brugt til komprimeringen er blevet omregnet til en vægt, som skal påføres træpladen for at opnå den ønskede komprimering. I tabel 16.6 er vægten i spanden og den omregnede vægt opstillet.

På grund af de store belastninger der skal påføres træpladen for at matche belastningen i skraldespanden, er det valgt at lave to komprimeringer af halmen med hhv. 300 kg og 600 kg, hvilket ville svare til 8,76 kg og 17,53 kg i skraldespands forsøget.

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

	I spand kg	På hele elementet kg
Vægt 1	0,47	16,02
Vægt 2	3,98	136,28
Vægt 3	7,51	257,02
Vægt 4	16,60	568,26
Vægt 5	25,65	877,96
Vægt 6	36,21	1239,39
Vægt 7	46,77	1601,16

Tabel 16.6: Tabellen viser de belastninger der skal påføres testelementet.

16.5.2 Komprimering af testelement

Ved komprimering af testelementet er det først forsøgt at sænke de 300 kg ned på den fyldte ukomprimerede testelement. Det synes ikke, at have en særligt stor effekt på halmen. Derfor blev hele prøven tømt uud på gulvet for i stedet, at kunne presse prøven over flere gange, det vil desuden også være med til, at sikre en jævn komprimering af hele testelementet. På figur 16.11 ses udførelsen af en komprimering med 300 kg.



Figur 16.11: Figuren viser udførelsen af en komprimering med 300 kg.

Komprimeringstiderne kan ses i tabel 16.7.

Højden der er listet i tabel 16.7 er det lag af halm der løst er blevet strøget oven på det underliggende lag. Grunden til der er lagt hhv. 110 mm og 50 mm på i 4.

Komprimering nr.	Fyldt i [mm]	Komprimering	
		Start	Slut
1	100	09:20	09:30
2	100	09:48	09:58
3	100	10:17	10:27
4	110	11:56	12:06
5	100	12:20	12:30
6	50	13:08	13:18

Tabel 16.7: Tabellen viser hvor meget snittet halm, der blev fyldt i samt tiden for komprimering med 300 kg.

og 6. komprimering er pga. at den 300 mm ramme ved den 4. komprimering blev fyldt, hvorefter der blev monteret en styre ramme til at muliggøre, der blev fyldt halm over testelementets ramme, som derefter blev presset ned. Styrrammen kan ses på figur 16.12.



Figur 16.12: Figuren viser styrrammen benyttet ved komprimering af testelementerne.

Ved de 50 mm var det den sidste komprimering hvormed det kom til at passe med overkanten af rammen. Det medførte, at halmen ekspanderede over pressefladen hvor aluminiumspladen skulle monteres, hvilket dog ikke gav problemer. Der blev fyldt 11,21 kg halm i testelementet i alt, hvorefter prøven blev samlet og monteret i hot box'en.

Til komprimering med 600 kg, er halmen der er komprimeret med 300 kg benyttet, dette kan give en fejl da halmen har været presset sammen i forvejen. For

16 Forsøgsbeskrivelse for hot box forsøg

at mindske fejlen er formen igen blevet tømt og derefter fyldt op med 100 mm løst halm af gangen. Komprimeringstider og lagstørrelser kan ses i tabel 16.8.

Komprimering nr.	Fyldt i [mm]	Komprimering	
		Start	Slut
1	130	09:05	09:15
2	100	09:30	09:40
3	100	10:02	10:12
4	100	10:28	10:38
5	100	10:50	11:00
6	90	11:17	11:27
7	30	11:37	11:47

Tabel 16.8: Tabellen viser hvor meget snittet halm, der blev fyldt i samt tiden for komprimering med 600 kg.

Grundet en indstillingsfejl blev der inden den første komprimering fyldt 130 mm halm i. Det blev ikke observeret med det samme, derfor blev det ikke ændret. Der er efterfølgende fyldt 100 mm isolering i af gangen. Under denne komprimering blev der igen påsat en ekstra ramme, til ekstra halm. hvorefter det blev presset ned. De sidste 30 mm er fyldt i, for at komprimeringen er ensartet og svarer til et tryk på 600 kg, det betyder at med de 600 kg på prøven var rammen lige fyldt.

Efter at have beregnet varmeledningsevnen for de første forsøg, er det fundet at komprimeringen med 600 kg har den laveste λ -værdier, hvorfor det efterfølgende er valgt at presse rapshalmen med 600 kg. Komprimeringstiderne for det kan ses i tabel 16.9

Komprimering nr.	Fyldt i [mm]	Komprimering	
		Start	Slut
1	100	10:45	10:55
2	100	11:13	10:23
3	105	11:50	12:00
4	40	12:15	12:30

Tabel 16.9: Tabellen viser hvor meget snittet rapshalm, der blev fyldt i samt tiden for komprimeringen med 600 kg.

Det kan ses ud fra tabellen, at rapshalmen ikke bliver komprimeret særligt

meget, idet der er fyldt 345 mm i en ramme, der er 300 mm høj. Det svarer overens med, at rapshalm som udgangspunkt har en højere densitet, som beskrevet i afsnit 16.4 og dermed bliver svære at presse sammen med samme vægt, som det også blev set i afsnit 15 hvor der blev lavet testforsøg med jerngenstande og en metal skraldespand.

16.6 Fremgangsmåde

I dette afsnit vil fremgangsmåde for hot box forsøget blive beskrevet trinvis. Der vil være en beskrivelse af hvert step for sig. De forskellige steps er listet herunder. Alle steps udføres ved hvart af forsøgene.

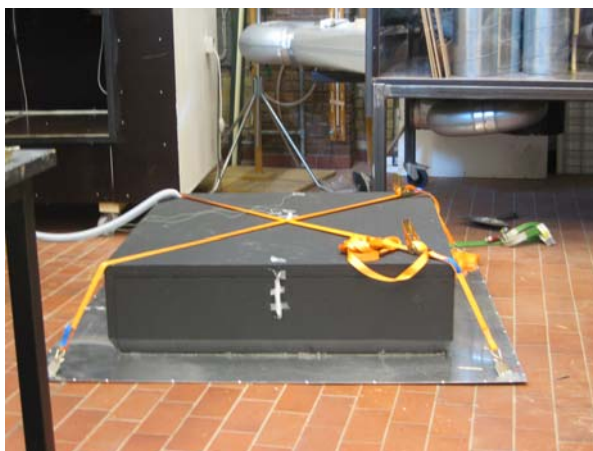
- Testelementet udarbejdes
- Montering af målekassen.
- Opsætning af prøve.
- Opstart og indsvigning.
- Indregulering af temperature.
- Måling og afslutning.

Testelementet udarbejdes

Denne udarbejdelse er tidligere beskrevet i afsnit 16.4, hvor det er beskrevet hvordan hvert enkelt testelement er konstrueret og i afsnit 16.5.2 er det beskrevet hvordan komprimeringen af de enkelte testelementer er foretaget.

Montering af målekassen

Montering af målekassen sker ved at testelementet placeres liggende ved siden af hot box'en, hvor målekassen er lokaliseret. Her løftes målekassen samt aluminiumspladen, til den ene side af testelementet på plads, hvorefter aluminiumspladen monteres med skruer i rammen. Målekassen fastspændes på denne aluminiumsplade ved at spænde stropper henover og fastgøre dem til aluminiumspladen, dette kan ses på figur 16.13. Efter målekassen og aluminiumspladen er placeret på testelementet, er den klar til at blive opsat i hot box'en.



Figur 16.13: Figuren viser et billede af målekassen placeret oven på aluminiumspladen, ved siden af hot box'en, klar til montering på testelementet.

Opsætning af prøve

Opsætningen af prøven foregår mens hot box'en er skilt fra hinanden, det vil sige den varme og kolde side er skubbet fra hinanden. Montering foregår ved, at der monteres en løfteanordning, som kan løftes med en truck på testelement rammen. Herefter bliver testelementet forsigtigt løft op i stående position hvorfor det roligt køres ind mellem den varme- og kolde side af hot box'en, hvilket kan ses på figur 16.14. Testelementet holdes løftet mellem hot box'ens to sider, her kontrolleres og eftermonteres alle termoelementerne. Når dette er gjort skubbes den kolde og varme side på plads, hvorefter de spændes sammen med de to wire. Afstanden mellem den kolde og varme side på begge sider af testelement kontrolleres for at opnå ensartet tryk på testelementet.

Opstart og indsvigning

Alt det slukkede udstyr tændes, det er ventilatorer, varmespiraler og varmetråde. Det er vigtigt at ventilatorerne tændes først for at undgå overophedning af varmetråde og spiralvarmere.

I indsvigningsperioden er der ikke meget manuelt arbejde, der kan med fordel skrues op for energitilførelsen her. Det er der gjort mellem alle forsøg, og danfoss controlleren benyttes til at sørge for der ikke bliver tilført mere energi end nødvendigt for at opretholde den valgte temperatur.



Figur 16.14: Figuren viser et billede af testelementet der løftes på plads i hot box'en.

Indregulering af temperaturerne

Indreguleringen af temperaturerne sker ved at tage en logning over et passende tidsinterval, men minimum 15 min og ud fra denne kontrollere temperaturforskellen mellem målekassen og den varme side, hvorefter energitilførelsen til den varme side justeres. Dette udføres gentagne gange indtil der er opnået en minimal temperaturforskel mellem den varme side og målekassen. Herefter ventes der ca. en time, før der foretages en logning for at kontrollere der stadig er en minimal temperaturforskel. Er der dette tilfældet kan målingerne foretages, hvis ikke skal der foretages yderligere indregulering.

Måling og afslutning

Når målingerne udføres logges temperaturerne hvert 10. sek. Wattmeteret er ikke tilsluttet en datalogger og den tilførte energi opskrives derfor manuelt hvert tiende sekund. Dette gøres i 30 min hvorefter logningen stoppes og forsøget er slut.

Afslutningen af forsøget sker ved at slukke for alle instrumenterne, for derefter at nedtage prøven med truck. Den bliver enten tømt og genfyldt til en ny komprimering eller bare tømt.

Herefter skal resultaterne behandles og der skal beregnes varmeledningsevnen ud fra målingerne foretaget under forsøgene. Under denne resultatbehandling er nødvendigt, at undersøge om evt. krav til fejl er overholdt samt om de har indflydelse på resultaterne. Dette foretages alt sammen i det efterfølgende afsnit.

16.7 Måleudstyr, fejlkilder og usikkerhed

I det efterfølgende afsnit vil fejlkilder og usikkerheder ved hot box forsøget blive beskrevet. Først vil der herunder blive listet fejl og usikkerheder. Derefter vil det enkelte måleudstyr og evt. fejl ved disse blive beskrevet, samt hvilken indflydelse det kan have på resultaterne. Der vil endvidere blive beskrevet generelle fejl ved forsøget.

- Kalibreringsfejl.
- Temperaturudsving i laboratoriet.
- Fejl ved termoelementer.
- Antagelse om stationær tilstand.
- Fejl på måleudstyr.
- Fejl ved testelementerne.

Udover disse selvfundne fejl og mangler er der i det efterfølgende afsnit listet fejl beskrevet i [*DS/EN 1946-4* 2000].

16.7.1 Kalibreringsfejl

Under kalibrering af termoelementerne er kompensationsboksen ikke blevet varmet op eller kølet ned alt efter placering. Dermed kan det give anledning til en fejl på termoelementerne, der går fra kompensationsboksene og til nulpunktsreferencen eller fra kompensationsboksene og ud til målepunkterne. Denne fejl er dog forsøgt minimeret ved at kalibrere hele systemet samlet, så det er temperaturforskellen fra nulpunktsreferencen og til punktet den er kalibreret efter, ved en rumtemperatur på 21 °C.

16.7.2 Temperaturudsving i laboratoriet

Der vil være en mindre fejl ved målingerne, da der er temperaturudsving i laboratoriet, hvor hot box'en er placeret. Det er specielt pga. solens energi gennem vinduerne. Denne fejl er forsøgt minimeret ved at benytte en guarded hot box. Med et præcist styresystem til hot box kunne denne fejl sandsynligvis helt bortskrives. På grund af det manuelle styresystem ville rumtemperaturen have en mindre indflydelse på resultaterne, da energitabet ud gennem hot box'en varierer over døgnet. Målingerne for forsøgene er derfor foretaget hen på aftenen, hvor solen står lavt og derfor ikke påvirker temperaturen i laboratoriet i så høj grad.

16.7.3 Fejl ved termoelementer

En fejl ved termoelementerne er, at de termoelementer der måler overfladetemperaturerne er placeret på overfladen, hvor de bliver påvirket af konvektion og stråling. Denne fejl er forsøgt mindsket ved at overholde normkravende om, som siger at termoelementerne skal have kontakt med overfladen 100 mm hen til målepunktet. Men også ved at benytte termopasta, som dermed hjælper med til at lede overfladetemperaturen til termoelementet.

16.7.4 Antagelse om stationær tilstand

Der kan være fejl omkring antagelsen om stationær tilstand, det vil sige at der stadig er små ændringer som funktion af tiden. Dette skyldes specielt den manuelle styring, men tildels også temperaturudsvingene i laboratoriet. For at sikre en stationær tilstand, er der målt på tidspunkter af dagen hvor temperaturen i laboratoriet er forholdsvis konstant. Udstyret er desuden indstillet på en sådan måde, at der ikke har været synlige udsving på udstyret i en time op til forsøget og hen over målingsintervallet, dette er sikret vha. en kanalskriver.

16.7.5 Måleudstyr

I dette afsnit vil instrumenter og fejl ved disse blive beskrevet hver for sig. Det gøres for, at skabe et overblik over hvilke funktioner det enkelte instrument har og hvorfor instrumenterne bliver benyttet.

Datalogger

Dataloggeren er en Helios Datalogger, som er kalibreret sammen med alle termoelementerne. Den bliver styret af en computer hvor alle logningerne bliver glemt, desuden er der lavet en opsætningsfil på computeren, som er sat op til at udføre en logning hvert 10 sek. Der bliver logget fra kanal 2 til 39, hvilket er der alle termoelementer sidder. Det er valgt at måle millivolt og opsætningsfilen er indstillet til, at spændingerne ikke overskrider 0,064 volt, hvilket betyder at præcisionen er større i det lave område. Ved Helios dataloggeren foretages målingerne i steps, som svarer opløsningen på loggeren. Det betyder, at en målingerne bliver inddelt i de intervaller, med spring som svarer til loggerens steps dvs. at hvis to målinger ligger inden for samme step, får de begge samme værdi. Der er udført en mindre test omkring 0 millivolt, hvilket viser at disse steps er symmetriske omkring 0 på hhv. positiv og negativ side. Det vurderes, at denne fejl ikke har nogen indflydelse af betydning på resultaterne.

Transformator

Der bliver benyttet transformatorer til alle instrumenterne der tilfører energi til hot box'en, dette gøres for at kunne kontrollere den tilførte energi. Desuden holder transformatorerne en fast energimængde, som på de fleste af transformatorerne kan aflæses direkte som en spænding og en strømstyrke. Fejl ved transformatorerne er, at de ikke holder en helt konstante spændinger, dette eksempelvis ses ved aflæsningerne på Wattmeteret på bilags CD'en.

Nulpunktsreference

Nulpunktsreferencen bliver benyttet, som et punkt hvor der er nulgrader. Det betyder at termoelementerne kan måle spændingsforskellen mellem et punkt og nul. Der er ført et termoelement fra hver kompensationsboks hen til nulpunktsreferencen. Denne skal adderes med den målte spændingen mellem et punkt og kompensationsboksen for dermed at finde den faktiske spænding mellem nulpunktsreferencen og punktet. Nulpunktsreferencen står og slår til og fra for at opretholde nulpunktet. Dette resulterer i mindre udsving, men det antages at denne fejl er negligerbar, da kalibreringen er foretaget under disse forhold. En automatisk nulpunktsreference, som den benyttede har ifølge [DS/EN 1946-4 2000] en præcision på 0,02 K

Wattmeter

Wattmeteret bliver benyttet til at måle den mængde energi, der bliver tilført varmetrådene i målekassen. Wattmeteret bliver benyttet, da det gør aflæsningen simplere og dermed mere præcis. Der vil dog være en minimal usikkerhed på dette instrument, der ifølge kalibrerings informationer på instrumentet er 0,01 %. Det antages dermed ikke at have nogen betydning da de målte effekter er på mellem 10-25 W.

Multimeter

Multimeteret er benyttet til ventilatorerne i hot box'en, som dog ikke er blevet logget. Den er benyttet til vurdering af om energitilførslen skulle forøges eller mindskes ud fra målingerne på kanalskriveren. Idet multimeteret ikke er brugt i målingerne til forsøget, vil den ikke have nogen indflydelse på resultaterne.

Varmespiral

Det er benyttet varmespiraler i hot box'en, som er bygget op med en varmetråd i midten med jern omkring. På grund af den ekstra masse omkring varmetrådene er tidskonstanten større for disse varmespiraler sammenlignet med dem i målekassen. Det har muligvis givet en længere indstilling tid, men det har sandsynligvis ikke nogen indflydelse på resultaterne fra forsøget.

I målekassen er varmetrådene placeret frit, hvilket betyder at energien bliver leveret direkte til den forbipasserende luft og derved giver en lav tidskonstant.

Ventilatorer

I hot box'en er der placeret to relativt store ventilatorer, for at skabe tvungen konvektion ved overfladerne. Problemet ved størrelsen af disse er den store mængde energi de kan levere, som er mere end der skal tilføres hot boxen. Temperaturen bliver derfor reguleret ved at styre effekten til disse to ventilatorer. I målekassen er der placeret to mindre computerventilatorer, som skal skabe tvungen konvektion. Effekten fra disse skal medregnes i beregningerne af varmeledningsevnen.

Kompensationsbokse

Kompensationsboksen er lavet for, at mindske chancen for brud på termoelementerne. En kompensationsboks er lavet så temperaturforskellen mellem kompensationsboksen og punktet bliver målt. Det betyder, at der kun skal trækkes termoelementer mellem kompensationsboksen og målepunkterne, og kun et termoelement skal trækkes fra kompensationsboksen til nulpunktsreferencen. Fra kompensationsboksen og ud til dataloggeren, som registrere spændingsforskellen trækkes der almindelige kobberledninger. Temperaturen over kompensationsboksen kan variere, det er dog forsøgt forhindret ved at konstruere kompensationsboksen i aluminium. En kompensationsboks har ifølge [DS/EN 1946-4 2000] en præcision på 0,1-0,5 K, det vides dog ikke helt hvad fejlen på de benyttede kompensationsbokse er, da de er konstrueret af Aalborg Universitet.

Kanalskriver

Kanalskriveren er koblet til tre termoelementer, som ikke er kalibreret, for at give et hurtigt overblik over, om opstillingen er stationær. Termoelementerne er placeret i hhv. målekasse, den varme side og den kolde side. Vha. termoelementerne plotter kanalskriveren værdierne direkte på en graf. som svare til temperaturerne. Fejl ved kanalskriveren er ikke relevant, da disse data ikke bliver benyttet til at beregne forsøgsresultater med, men udelukkende til at give et billede af forholdene.

Danfoss controller

Danfoss controlleren bliver benyttet som afbryder til energitilførelsen dvs. hvis temperaturen overstiger en fastsat temperatur slukker controlleren for strømmen til de forskellige transformatorer den er koblet til. Det betyder, at temperaturen falder og det indikere at der bliver tilført for meget energi til at have et stationært tilfælde på en ønsket temperatur, og energitilførelsen kan ned sættes. Danfoss controlleren benyttes også til at hjælpe med at gennemvarme hot box'en, når testelementet har været taget ned. Dette gøres ved med vilje at tilføre for meget energi og Danfoss controlleren tænder og slukker for tilførelsen, og dermed opnås en ca. temperatur på flader og konstruktionsdele i kassen. Danfoss controlleren kan holde en fast temperatur omkring $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$, hvilket kun er tilfredsstillende i indstillingsfasen. Fejl på Danfoss controlleren er ikke relavante, da den udelukkende benyttes til at holde en ca. temperatur

så dette ikke skal gøres manuelt under hele indsvingningsforløbet.

16.7.6 Fejl ved testelementerne

Der har i forbindelse med konstruktionen og målingerne på testelementerne været mindre problemer, som giver anledning til fejl under målingerne på de enkelte elementer. Disse vil blive listet op herunder og beskrevet enkeltvis. Betydningen af disse fejl vil ligeledes blive vurderet i det efterfølgende.

- Dimension af testelementet.
- Kondensvand.
- Luftspalte i prøve.
- Flere komprimeringer.
- Lerlagets tykkelse
- Glitning af lerlag.

Dimension af testelementet

Det antages at dimensionerne af testelementerne fyldt med halm er kendt med en rimelig præcision, da det har været muligt at måle gentagende gange på rammen som holder prøverne. Det medfører at der også er blevet forskellige måleinstrumenter løbende og målt af forskellige personer, hvorfor der antages ikke at være fejl på dimensionerne af testelementet.

Kondensvand

Fejl med dannelse af kondensvand er blevet vurderet af have indflydelse på to måder ved der hhv. dannes kondens i selveprøven og i den kolde side. Grunden til der dannes kondens i den kolde side er pga. det fugt der er i den varmeluft som køles ned dette bliver til kondens på de koldeoverflader, det vurderes at dette ikke er af nogen betydning. Da det er i bunden af selvekassen og relativt lidt på overfladen. Men der hvor det kan give anledning til fejlmålinger er når der dannes kondens i selve testelementet, hvilket betyder at halmen klistre sammen og tvinger luft væk fra områder. Det har dog ikke været muligt at fjerne

denne kodens dannelse, da prøven kapsles inden i en træramme hvorpå der er monteret aluminiumsplader på beggesider hvilket indkapsler en vis mængde fugt. Denne vil så kondensere tæt på aluminiumspladen mod den kolde side. En måde hvorpå dette kunne være ændret var ved at samle prøverne i et rum med meget lav relativ fugtighed eller i et koldere lokale, dette har dog ikke været muligt.

Luftspalte i prøve

Under prøvningen med testelement 1, løsthalm, her blev der under monteringen formodet at prøven kunne sætte sig når den blev rejst. Det viste sig at den satte sig ca. 40 mm, hvilket har en vis indflydelse på prøvningen, men den var dog ikke i nærheden af måleområdet, hvorfor det antages at testen kan benyttes, dog skal der her medtages at der har været en mindre fejl på elementet.

Flere komprimeringer

Ved testelement 2 og 3 er der en mindre fejl i og med halmen fra det foregående element benyttes og derfor har været komprimeret før. Det kan gøre at det har lettere ved at blive komprimeret igen. Det antages dog ikke at have den store betydning. En anden ting der kan være med at det bliver benyttet igen er at der sker et tab hvergang formen bliver tømt og genfyldt med det samme halm, dette spild antages dog at være omkring 10 g, hvorfor det ikke antages at have nogen betydning.

Lerlagets tykkelse

Lerlagets tykkelse var tænkt som et helt jævnt lag, men dette var svært at holde da den løse halm gav efter få vægten af leren, og da det er nødvendigt at fylde hele rammen måtte der fyldes yderligere ler på. Dette har medført at lerlaget er blevet tykkere end den ønskede 40 mm og efter prøven er taget ned er den blevet skåret i mindre stykker for at se hvordan lerlagets tykkelse varierer over prøven, det varierer fra 60 mm til 70 mm hvilket er vurderet at være acceptabelt.

Glitning af lerlag

Da halmprøven pudset med ler blev vendt og de understøttende rammer, net og papir blev fjernet vidste det sig at der var kommet en del ujævnheder i prøvens overflade. Men her kunne disse ujævnheder glites ud, ved at det blev opfugtet og det blev glitet ud, dette kunne det da der ikke var tilsat hærdende materialer som cement. På figur 16.15 kan det ses hvordan glitningen blev udført umildbart inden det var helt glittet.



Figur 16.15: Viser hvordan glitningen blev udført umildbart inden testelementet var færdig glittet.

Dette medførte en mindre overskuds mængde af ler 5,145 kg. Dette har formentlig været med til at nedsætte lerlagets tykkelse. Det antages dog ikke at have nogen betydning udover at der ikke vil blive regnet med 40 mm på begge sider, men med på 65 mm på den ene side.

17 Resultat behandling

I det følgende kapitel vil resultaterne fra hot box forsøgene blive behandlet. For at sikre at de overholder en vis præcision følges [DS/EN 1946-4 2000], hvori der er opstillet krav til bl.a. udstyr og målinger m.m. De krav der vil blive beregnet er dem der er beskrevet som øvre værdier i [DS/EN 1946-4 2000], som henviser til [ISO 8990 1996] og gælder for den guarded hot box. Punkterne er opstillet herunder og er citeret fra [DS/EN 1946-4 2000] appendix A.1.1 - Accuracy and repeatability, stability, uniformity.

- 2.3.1 - maximum error allowed in the measurement of the specimen heat flow rate caused by the metering box losses. 0,5 %
- 2.3.2 - maximum variation allowed in air temperature across the air flow parallel to specimen surface. 2 %
- 2.3.2 - maximum air temperature gradients allowed along the air flow. 2 K/m
- 2.3.2 - maximum error allowed in the measurement of the specimen heat flow rate caused by the measurement of shaft power. 0,5 %
- 2.4 - maximum error allowed in the measurement of the specimen heat flow rate caused by heat flow rate at the edge of the specimen. 0,5 %
- 2.4 - maximum imbalance error due to non-uniformity of temperature as a percentage of the heat flow rate through the metered area of the specimen. 0,5 %
- 2.7.1 - maximum difference allowed in surface temperature as percentage of mean surface-to-surface temperature difference for inhomogeneous specimens. 20 %
- 2.7.5 - required short-term and long-term stability of the temperature as a percentage of the temperature difference over the specimen. 1 %
- 2.7.5 - maximum allowed additional imbalance heat flow rate error due to the controllers. 0,5 %

-
- 2.8 - required accuracy in the measurements of temperature differences between heating and cooling unit as a percentage of the air-to-air temperature difference. $\pm 1\%$
 - 2.8 - maximum equivalent level of uncertainty of the instrument in temperature measurements. 0,05 K
 - 2.8 - maximum error allowed in the measurement of specimen heat flow rate due to instrumentation accuracy. 1,5 %
 - 3.5 - maximum allowed difference between two subsequent measurement periods for resistance, transmittance, power and temperature. 1 %

Punkterne er opstillet herunder og er citeret fra [DS/EN 1946-4 2000] appendix A.1.2 - Equipment design requirements.

- 1.6.1.1 - maximum allowed heat flow rate through the metering box walls as a percentage of the total power input. 10 %
 - 2.2 - recommended minimum total hemispherical emissivity for any surface in contact with the specimen. 0,8
 - 2.3.1 - maximum width of the gasket on the nose on the metering box as a percentage of the metering width. 2 %
 - 2.3.1 - maximum width of the gasket on the nose on the metering box. 20 mm
 - 2.6 - recommended range of air velocity in simulating natural conditions for building component. 0,1 m/s to 10 m/s
 - 2.7.1 - maximum thermocouple diameter when measuring air and surface temperature 0,25 mm
 - 2.7.1 - recommended length of the adjoining wire of the junctions in thermal contact with the surface. 100 mm
 - 2.7.3 - maximum surface area to be covered by one pair of junctions. 0.25 m²
 - 2.7.3 - maximum distance between two pairs of junctions along the perimeter of the metered area. 0,5 m
-

17 Resultat behandling

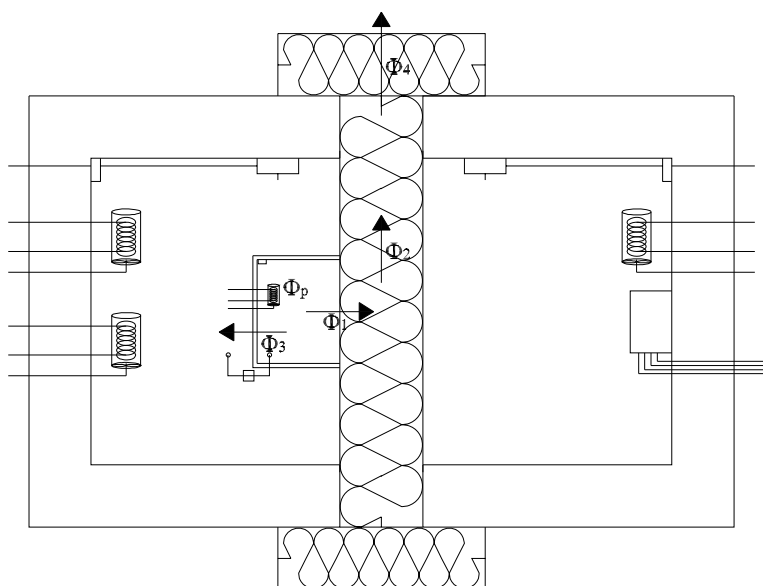
Først vil punkterne der ikke er relevante for de udførte målinger, men som kan overvejes inden forsøget blive beskrevet. Dette gøres enkeltvis i de efterfølgende afsnit. Herefter vil undersøgelser under og efter forsøget blive beskrevet. Der er enkelte punkter der ikke er blevet udført, hvilket også vil blive beskrevet her.

17.1 Krav der skal overholdes før forsøg

I dette afsnit er punkter der skal tages stilling til, inden forsøget udføres, listet. Både der krav som er overholdt og hvordan de er overholdt, men også krav der ikke er blevet overholdt og i så fald hvorfor de ikke er overholdt.

Punkt 1.6.1.1

Der er udført en kontrol af hvor stort varmetab, Φ_3 der er gennem målekassen, i forhold til den samlede energi der er tilført målekassen, $\Phi_p + \Phi_v$ jævnfør afsnit 1.6.1.1 i [ISO 8990 1996]. Varmestrømmene kan ses på figur 17.1



Figur 17.1: Figuren viser en illustration af varmemstrømmene i hot box'en.

I afsnit 1.6.1.1 er der opstillet et krav om, at varmemstrømmen gennem målekassen

17.1 Krav der skal overholdes før forsøg

maksimalt må udgøre 10 % af den samlede tilførte energi i målekassen. Dette kan beregnes som vist i formel (17.1)

$$\%gennem - målekassen = \max \left(\frac{\Phi_{3,i}}{\Phi_{p,i} + \Phi_{v,i}} \right) \cdot 100 \quad (17.1)$$

Hvor

$\%gennem - målekassen$ er den procentvise varmestrøm gennem målekassen i forhold til den totale tilførte effekt i målekassen. [%]

$\Phi_{3,i}$ er varmestrømmen gennem målekassen, til hvert tidsskridt. [W]

$\Phi_{p,i}$ er effekten tilført til varmetrådene i målekassen, til hvert tidsskridt. [W]

$\Phi_{v,i}$ er effekten tilført til de tre ventilatorer i målekassen, til hvert tidsskridt. [W]

i er tidsskridt fra 1-180. [–]

Resultaterne af beregningerne for alle forsøg er listet i tabel 17.1

Gennem-målekassen	
[%]	
Forsøg 1	9,0
Forsøg 2	8,2
Forsøg 3	11,6
Forsøg 4	9,0

Tabel 17.1: Tabellen viser hvor stor en procentdel af energitilførelsen der passerer målekassens sider.

Ud fra tabellen kan det ses, at det kun er forsøg 3 der ikke overholder dette krav. Det er antaget, at det er pga. målefejl på instrumentet, da der er tale om 6 målinger ud af 180 der overskrider 10 %. Dermed antages det, at ved en gentagelse af målingerne efter en evt. flytning af ledningerne eller termoelementerne, så de ikke løber i samme slange, vil øge præcisionen. Det er dog ikke hele fejlen, idet afvigelsen kun optræder i dette ene forsøg. Der kunne have været lavet et forsøg mere uden at ændre opsætningen for, at se om dette ville ændre noget, men grundet tidspres har det ikke været muligt.

Punkt 2.2

Der er i afsnit 2.2 [ISO 8990 1996] krav om et højt emissionstal dvs. det skal være over 0,8 for alle fladerne. Det antages, at når fladerne er sorte og lavet af træ eller matsort malede aluminiumsplader, er emissionstallet over 0,8, da alle sorte malinger ifølge [Omega Engineering, inc n.d.] er over 0,9. Der er dog et problem i hver af kasserne mht. kompensationsboksene. Der er lavet et aluminiumsprofil til at spænde disse fast med, dette profil er ikke blevet malet og har derfor et emissionstal der er lavere end 0,8. Det samme problem gør sig gældende i målekassen, men her er der også konstrueret skjolde til at afskærme for varmetrådene. Disse skjolde er ligeledes konstrueret af aluminiumsplader, der ikke er blevet malet. Det antages dog ikke at have en betydning for resultatet.

Punkt 2.3.1

Dette punkt er et krav til bredden af næsen på målekassen, den er lavet som en spids hvor isoleringslaget snævrer ind og bliver til bredden af krydsfinerpladen. Det giver spidsen en bredde på 15 mm hvilket er under 20 mm eller 2 % af målekassens bredde, som i dette tilfælde er 1 m. Kravet er derfor overholdt. Dette punkt i [ISO 8990 1996] omhandler også måden hvorpå energitabet gennem målekassen beregnes. Dette dokumenteres ved at benytte en tilfældig måling som kontrol. Måden hvorpå energitabet gennem målekassen bliver beregnet i første omgang i *MATLAB*, er ved at regne endimensionelle varmemestrømme, med udvendige arealer. Her tages der ikke højde for indsnævringen ved næsen af målekassen, som er vist på figur 17.2.

Varmestrømsberegningen ser ud som vist herunder, i formel (17.2).

$$\Phi_{\text{Målekasse}} = \frac{(t_{oi} - t_{ou}) \cdot A}{\frac{e_{poly}}{\lambda_{poly}} + \frac{e_{finer}}{\lambda_{finer}}} \quad (17.2)$$

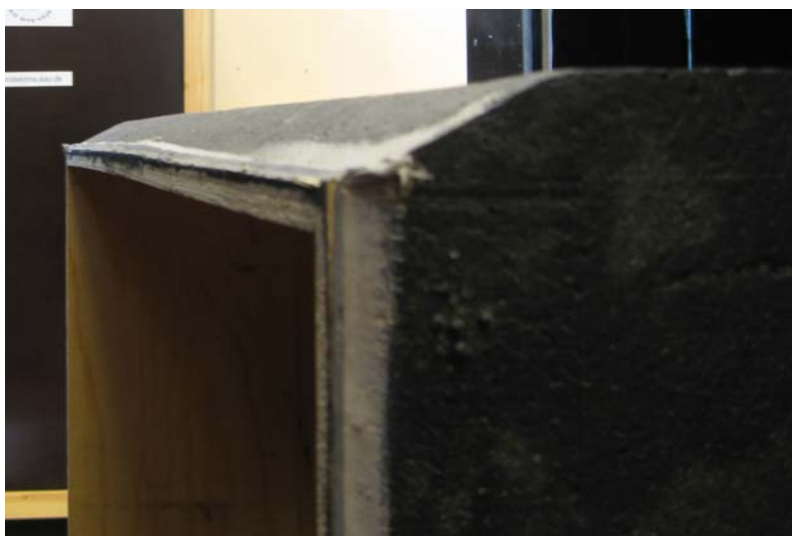
Hvor

$\Phi_{\text{Målekasse}}$ er varmemestrømmen gennem målekassen. [W]

t_{oi} er overfladetemperaturen på indersiden af de enkelte overflader i målekassen. [°C]

t_{ui} er overfladetemperaturen på ydersiden af de enkelte overflader på målekassen. [°C]

e_{poly} er tykkelsen af polystyrenen. [m]



Figur 17.2: Figuren viser et billede af hvordan næsen på målekassen snævre ind.

e_{finer} er tykkelsen af krydsfineren. [m]

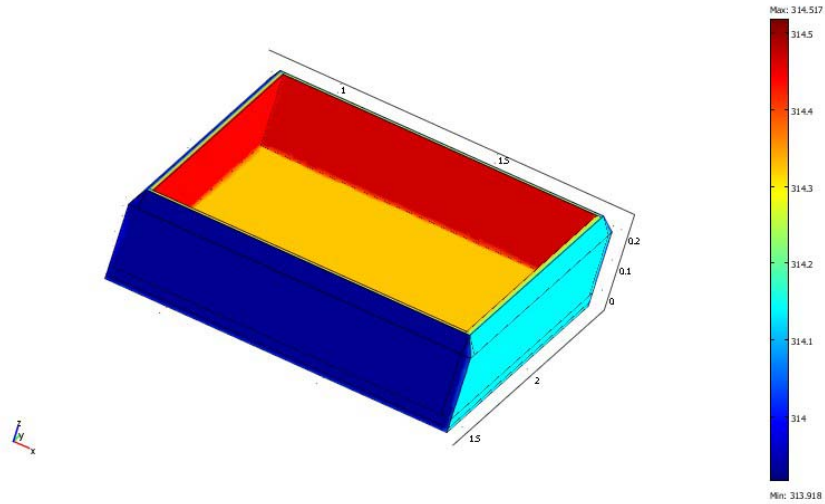
λ_{poly} er varmeledningstallet for polystyrenen. [W/mK]

λ_{finer} er varmeledningstallet for krydsfineren. [W/mK]

Udregningerne er foretaget for en tilfældig måling, som i dette tilfælde er måling 22 i det 3. forsøg. Resultatet af disse håndberegninger er et varmetab fra målekassen på 0,877 W.

Der er efterfølgende sat en *COMSOL*-model op, som vist på figur 17.3. Dette gøres for undersøge, om de endimensionelle beregninger er tilstrækkelige til beregning af dette krav. *COMSOL*-modellen kan bl.a. tage hensyn til den tredimensionelle varmestrøm, der vil forekomme i hjørnerne af målekassen samt indsnævringen ved næsen af målekassen.

Udfra denne *COMSOL*-model er varmestømmen gennem målekassen blevet beregnet til 0,860 W. Det betyder, at der er en forskel på 0,0168 W. Denne fejl i beregningerne skal sammenlignes med den varmestrøm der er gennem testelementet. Fejlprocenten er beregnet til 0,12 %. Da kravet til denne fejl er, at den skal holdes under 0,5 % antages det at alle beregningerne overholder kravet.



Figur 17.3: Figuren viser modellen fra *COMSOL*, med de målte overfladetemperature.

Punkt 2.3.2

Dette krav skal sikre, at luften bliver jævnt fordelt og at der ikke er stillestående luft, som vil skabe temperaturforskelle. Det beregnes for, at vise der ikke er for store temperaturvariationer langs testelementet. Det skal vises, at temperaturforskellen langs testelementet ikke udgøre mere end 2 % af luft-til-luft temperaturforskellen mellem kold og varm side.

I praksis gøres dette ved at beregne temperaturforskellen mellem termoelement 9 og termoelement 11 i den varme side, som er placeret på hver side af målekassen i luften mellem målekassen og indvendige side på hot box'en. Termoelementnumrerne kan ses i bilag F. Derefter divideres dette med temperaturforskellen mellem kold og varm side, dette er gjort for samtlige tidsskridt i alle forsøgene. Den benyttede formel (17.3) kan ses herunder.

$$\% - afvigelse_i = \frac{t_{varme9,i} - t_{varme11,i}}{t_{m\ddot{a}le6,i} - t_{kolde8,i}} \cdot 100 \quad (17.3)$$

Hvor

$\% - afvigelse_i$ er den procentvise afvigelse i forhold til temperaturfor-

17.1 Krav der skal overholdes før forsøg

skellen mellem kold og varm side, til tidsskridt i. [%]

$t_{varme9,i}$ er temperaturen for termoelement 9 i den varme kasse placeret i luften ved siden af målekassen, til tidsskridt i. [°C]

$t_{varme11,i}$ er temperaturen for termoelement 11 i den varme kasse placeret i luften ved siden af målekassen, til tidsskridt i. [°C]

$t_{kolde8,i}$ er temperaturen for termoelement 8 i den kolde side hvilket repræsenterer lufttemperaturen i den kolde side, til tidsskridt i. [°C]

$t_{måle6,i}$ er temperaturen for termoelement 6 i målekassen hvilket repræsenterer lufttemperaturen på den varme side, til tidsskridt i. [°C]

Disse beregninger er udført for samtlige 180 tidsskridt ved hvert forsøg, hvorefter den maksimale, minimale og middelværdien er fundet til 0,78 %, 0,37 % og 0,56 % for forsøg 1. Det betyder, at normkravet på de 2 % er overholdt. Afvigelser er beregnet for alle de udførte forsøg og kan ses i tabel 17.2

%-afvigelse	Forsøg 1 [%]	Forsøg 2 [%]	Forsøg 3 [%]	Forsøg 4 [%]
minimum	0,37	0,42	0,44	0,38
middel	0,56	0,53	0,52	0,5
maksimum	0,78	0,66	0,6	0,57

Tabel 17.2: Viser lufttemperaturens %-afvigelse, i forhold til temperaturforskellen mellem kold og varm side.

Ud fra tabel 17.2 kan det ses, at alle forsøgene overholder normkravet på 2 %.

Det er ikke alt der er til dette krav, der er også krav til at temperaturen ikke må ændre sig mere end 2 K/m. Dette er beregnet ud fra temperaturen på alle termoelementer der er placeret i luften i hhv. den varme side og målekassen. Her er afstanden mellem termoelementerne kendt, og temperaturforskellen, ved hver måling, ganges op til K/m i formel (17.4).

$$\Delta t = (t_{j,i} - t_{k,i}) \cdot \frac{1}{x} \quad (17.4)$$

Hvor

Δt er temperaturændringen pr. meter ved en kendt temperatur i to punkter. [K/m]

$t_{j,i}$ er temperaturen for termoelement j placeret i målekassen eller den varme side, til tidsskridt i. [°C]

17 Resultat behandling

$t_{k,i}$ er temperaturen for termoelement k placeret i målekassen eller den varme side, til tidsskridt i . [$^{\circ}\text{C}$]

x er afstanden mellem de termoelement j og k . [$^{\circ}\text{C}$]

Da der er placeret 3 termoelementer i luften i den varme side og 1 i luften i målekassen, er det nødvendigt, at lave 6 beregninger for at have relationen mellem alle termoelementerne med. Disse er listet i tabel 17.3.

Første termoelement	varme9	varme9	varme10	maale6	maale6	maale6
Andet termoelement	varme11	varme10	varme11	varme9	varme10	varme11
	[K/m]	[K/m]	[K/m]	[K/m]	[K/m]	[K/m]
Forsøg 1						
Minimum	0,10	0,14	-0,03	-0,20	0,06	0,09
Maksimum	0,20	0,27	0,09	0,48	0,74	0,82
Forsøg 2						
Minimum	0,11	0,20	-0,04	-0,62	-0,34	-0,32
Maksimum	0,18	0,28	0,05	0,31	0,59	0,57
Forsøg 3						
Minimum	0,13	0,22	-0,03	-0,48	-0,17	-0,13
Maksimum	0,18	0,28	0,05	0,53	0,83	0,85
Forsøg 4						
Minimum	0,11	0,18	-0,04	-0,62	-0,35	-0,34
Maksimum	0,17	0,26	0,08	0,34	0,56	0,60

Tabel 17.3: Tabellen viser den minimale og maksimale temperaturændring for hvert enkelt forsøg.

Da ingen af forskellene forårsager en ændring på mere end 2 K/m er normkravet for dette overholdt for alle målinger, for alle forsøg.

Der findes yderligere et punkt 2.3.2 i [ISO 8990 1996]. Dette er dog kun relevant, hvis ventilatormotorerne er placeret uden for målekassen, og da motorerne er placeret i målekassen i disse tilfælde behandles dette ikke. Den tilførte energi til motorerne skal dog summeres med energien der er tilført i målekassen.

Punkt 2.4

Punkt 2.4 i [ISO 8990 1996] siger noget om Φ_5 , som er varmestrømmen gennem enderne af testelementet og kan ses på figur 17.1. Det er varmestrømmen, der

17.1 Krav der skal overholdes før forsøg

er mellem elementet og laboratoriet. Det er vigtigt, at bestemme denne da den kan påvirke måleområdet og skabe en todimensionel effekt. Varmestrømmen kan beregnes ud fra ISO 8302, men pga. tidspres har det ikke været muligt at anskaffe denne og punktet er derfor ikke beregnet.

Der er derfor blevet lavet en antagelse om endimensionelle varmemestrømme, hvorved det er muligt at lave håndberegninger. Dette er gjort med antagelse om, at enderne af testelementet har en lineær varierende temperatur, som varierer mellem overfladetemperaturerne på hver side af testelementet. Det er desuden antaget, at der kun er en varmestrøm fra testelementet og ud til laboratoriet. Derfor er det beregnet for hvert tidsskridt hvor stor en del af testelementets ende der er varmere end laboratoriet og derefter er temperaturen over dette stykke blevet midlet. Først beregnes afstanden til middelrumtemperaturen, derefter findes middeltemperaturen for det beregnede stykke. Til sidst beregnes der en endimensionel varmestrøm, dette er vist herunder i formel (17.5).

$$\Phi_{5,i} = \frac{\frac{t_{ov,i} - t_{lab,i}}{2} \cdot (1,55 \cdot afstand_i \cdot 4)}{\frac{e}{\lambda} - R_{oi} - R_{oi}} \cdot 100 \quad (17.5)$$

Hvor

$\Phi_{5,i}$ er den endimensionelle varmestrøm gennem alle elementets ender. [W]

$t_{ov,i}$ er overfladetemperaturen på testelementet i målekassen, til hvert tidsskridt. [°C]

$t_{lab,i}$ er middeltemperaturen i laboratoriet, til hvert tidsskridt. [°C]

$afstand_i$ er afstanden fra den varme side og til det punkt hvor testelementets temperatur er lig med laboratoriets middeltemperatur, til hvert tidsskridt. [m]

e er tykkelsen af isoleringen omkring testelementet. [m]

λ er varmeledningstallet for isoleringen. [W/mK]

R_{oi} er overgangstallet på hhv. den kolde og varme side. [m²K/W]

i er tidsskridt fra 1-180. [—]

Ud fra disse beregninger er der fundet frem til, hvor stor en procentdel $\Phi_{5,i}$ udgør af varmemestrømmen, der passerer gennem prøven. For forsøg 1 udgør det 6,47 %, for forsøg 2 er det 8,27 %, forsøg 3 er det 9,21 % og for forsøg 4 udgør varmemestrømmen gennem elementets ender 9,04 % af varmemestrømmen gennem prøven. Dette er alt for meget, da krav siger at det maksimalt må udgøre 0,5 %. Der kan være flere grunde til dette bl.a. at der kun regnes på varmemestrømmen

17 Resultat behandling

ud af testelementet og ikke ind. Ligeledes kan det være pga. de simplificeringen med endimensionelle beregninger, som er benyttet.

Punkt 2.4 i [ISO 8990 1996] stiller desuden krav til hvor stor fejl, der må stamme fra emissionstallet, og temperaturforskelle i hot box'en. Dette er dog ikke beregnet, da der ikke er fundet vinkeltal eller præcise emissionstal. Kravet forventes ikke overholdt, da der forekommer temperaturforskelle samt ikke alle emissionstal er over de 0,8, som er et af de andre krav. En af måderne hvorpå dette kunne være undgået er ved at placere en baffel mellem udstyr i hot box'en og testelementet for at opnå et vinkelforhold tæt på en og for at have kontrol over emissionstallene på materialet bafflen er konstrueret af.

Punkt 2.6

For at udføre forsøget på en sådan måde, at den svarer til virkelige omgivelser, anbefales det at have vindhastigheder mellem 0,1 m/s og 10 m/s. Dette er dog ikke blevet målt, hvorfor der burde laves yderligere målinger så lufthastighederne kunne måles. Disse forsøg er ikke udført på grund af tidsmangel.

Punkt 2.7.1

I det omtalte afsnit i [ISO 8990 1996] er der krav til termoelementerne. Der er krav til dimensionerne på termoelementerne samt til hvordan de er monteret i hot box'en. Termoelementerne der måler luft- og overfladetemperature må ikke have en diameter over 0,25 mm. Dette er kontrolleret og termoelementerne er målt til 0,10 mm. Derudover skal termoelementer der måler overfladetemperaturer have kontakt med overfladen i minimum 100 mm, dette er blevet sikret ved at monterer termoelementerne med termopasta og tape de sidste 100 mm af termoelementet op til målepunktet.

Punkt 2.7.1 i [ISO 8990 1996], omhandler også inhomogene testelementer, men da disse halmelementer antages at være homogene kan der ses bort fra disse normkrav, som omhandler temperaturforskelle på den enkelte flade på testelementet i forhold til forskellen i overfladetemperaturen henover testelementet.

Punkt 2.7.3

I punkt 2.7.3 i [ISO 8990 1996] er der krav til, hvor tæt termoelementerne skal placeres, der skal placeres et termoelement pr. 0,25 m² og pr. 0,5 m, dette er ikke overholdt, da der kun er placeret et termoelement pr. flade. Der er som tidligere nævnt blevet taget termografibilleder af hot box'ens sider for dermed at dokumentere en ensartet temperatur. Det antages derfor, at der er ensartet temperatur henover de enkelte flader. Der bør dog placeres flere termoelementer i hot box'en ved senere forsøg, da dette vil dokumentere ensartede temperature under hele forsøget.

Punkt 2.7.5

Punkt 2.7.5 i [ISO 8990 1996] skal skabe en sikkerhed for, at resultatet holdes stabilt og ikke variere for meget. Det betyder, at temperaturen ikke må drive eller variere mere end 1 % fra en tidligere måling. Da der på grund af tidspres ikke er udført mere end en måling for hvert forsøg, er denne variation vurderet henover et forsøg. Dette gøres ved at tage den maksimaletemperatur for hvert enkelt termoelement og trække den tilsvarende laveste temperatur fra, for derefter at dividere den med den mindste lufttemperaturforskel mellem kold og varm side, som vist formel (17.6)

$$\% - variation_j = \frac{t_{max,j} - t_{min,j}}{\min(t_{m\ddot{a}le6} - t_{kold8})} \cdot 100 \quad (17.6)$$

Hvor

$\% - variation_j$ er temperaturudsving for hvert termoelement i forhold til luft-til-luft forskellen mellem kold og varm side for termoelement j. [K/m]

$t_{max,j}$ er den højest målte temperatur med termoelement j. [°C]

$t_{min,j}$ er den mindste målte temperatur med termoelement j. [°C]

$\min(t_{lv} - t_{lk})$ er den mindste forskel mellem lufttemperaturerne på hhv. kold og varm side. [°C]

I de efterfølgende tabeller er dette udregnet for alle termoelementer i hhv målekassen, tabel 17.4, varm side, tabel 17.5, og kold side, tabel 17.6.

Som det kan ses i de tre tabeller er der variation i målekassen, hvilket ikke er ønskeligt, men det har ikke været muligt at ændre. En af teorierne om, hvorfor

17 Resultat behandling

Målekasse									
Termoelement nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forsøg 1 [%]	1,21	1,36	1,18	1,63	1,44	1,32	1,22	1,52	1,47
Forsøg 2 [%]	1,45	1,94	1,46	2,09	1,94	1,86	2,11	1,99	1,95
Forsøg 3 [%]	1,33	1,73	1,37	1,96	1,76	1,73	1,86	1,82	1,68
Forsøg 4 [%]	1,13	1,58	1,13	1,74	1,58	1,58	1,76	1,70	1,66

Tabel 17.4: Tabellen viser den procentvise variation i målekassen i forhold til luft-til-luft temperaturen mellem målekassen og kold side.

Varm side								
Termoelement nr.	1	2	3	4	5	6	7	
Forsøg 1 [%]	0,98	0,59	0,62	0,44	0,66	0,77	1,05	
Forsøg 2 [%]	0,88	0,53	0,46	0,53	0,56	0,45	0,56	
Forsøg 3 [%]	0,62	0,25	0,31	0,21	0,31	0,34	0,35	
Forsøg 4 [%]	0,58	0,19	0,23	0,19	0,29	0,22	0,35	
Termoelement nr.	8	9	10	11	12	13	14	15
Forsøg 1 [%]	0,70	0,43	0,44	0,70	0,37	0,37	0,44	0,73
Forsøg 2 [%]	0,70	0,46	0,49	0,49	0,49	0,49	0,53	0,56
Forsøg 3 [%]	0,50	0,28	0,24	0,25	0,25	0,21	0,34	0,34
Forsøg 4 [%]	0,52	0,26	0,19	0,32	0,19	0,19	0,26	0,35

Tabel 17.5: Tabellen viser den procentvise variation for den varme side i forhold til luft-til-luft temperatur mellem målekassen og kold side.

der er større variationer i målekassen end i kold og varm side, er fordi der er trukket ledninger til ventilatorer og varmeklader, i målekassen, i den samme flexslange som termoelementerne ligger i. Det kunne forbedres ved at trække disse separat, så evt. påvirkninger af termoelementerne undgås.

Punkt 2.8

Punkt 2.8 i [ISO 8990 1996] skal sikre, at temperaturforskellen blive målt med en vis præcision dvs. den målte temperatur ikke må variere mere en $\pm 1\%$ af luft-til-luft temperaturforskellen mellem kold og varm side. Dette gøres ved at tage den maksimale og minimale afvigelse fra middelværdien og dividere denne

17.1 Krav der skal overholdes før forsøg

Kold side									
Termoelement nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Forsøg 1 [%]	0,62	0,66	0,62	0,61	0,73	0,62	0,70	0,87	0,66
Forsøg 2 [%]	0,63	0,56	0,63	0,62	0,70	0,63	0,63	0,77	0,63
Forsøg 3 [%]	0,63	0,66	0,73	0,65	0,79	0,76	0,76	0,85	0,66
Forsøg 4 [%]	0,63	0,71	0,70	0,62	0,74	0,73	0,73	0,80	0,67

Tabel 17.6: Tabellen viser den procentvise variation for den kolde side i forhold til luft-til-luft temperaturen mellem målekassen og kold side.

med middelværdien for temperaturforskellen. Det ser ud som i formel (17.7).

$$\begin{aligned}
 A_{fvig+} &= \frac{\max(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i}) - \min(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})}{\max(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})} \cdot 100 \\
 A_{fvig-} &= \frac{\min(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i}) - \max(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})}{\min(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})} \cdot 100 \quad (17.7)
 \end{aligned}$$

Hvor

A_{fvig+} er afvigelsen for den højest målte værdi, i forhold til middelværdien. [%]

A_{fvig-} er afvigelsen for den laveste målte værdi, i forhold til middelværdien. [°C]

$\max(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})$ er den største forekommende lufttemperaturforskel mellem kold og varm side. [°C]

$\min(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})$ er den mindst forekommende lufttemperaturforskel mellem kold og varm side. [°C]

$\min(t_{m\grave{a}le6,i} - t_{kolde8,i})$ er middel lufttemperaturforskel mellem kold og varm side. [°C]

i er tidsskridtende fra 1-180. [-]

Disse beregninger er udført for de 4 første forsøg, resultaterne af disse kan ses i tabel 17.7.

Som det kan ses i tabel 17.7 er kravet på en maksimal afvigelse på 1 % ikke overholdt for forsøg 2 på den negative side dvs. den minimale temperatur samt forsøg 3 på den positive side. Dette er dog kun en lille overtrædelse, som igen kan skyldes at der er trukket ledninger til ventilatorer og varmetråde til målekassen i samme flexslange som termoelementerne.

Dette punkt omhandler også præcision af måleudstyret, som ikke må have udsving over 0,05 K, hvilket var antaget muligt ved at kalibrere termoelementerne, men ud fra målinger og ovenstående beregninger har det vist sig ikke

17 Resultat behandling

Mindste temperatur Forskel [%]	Højeste temperatur Forskel [%]
Forsøg 1	
-0,91	0,98
Forsøg 2	
-1,18	0,93
Forsøg 3	
-0,89	1,10
Forsøg 4	
-0,87	0,96

Tabel 17.7: Tabellen viser den positive og negative variation i temperaturforskellen mellem kold og varm side.

at være muligt. Det skyldes sandsynligvis tildels opløsningen på Fluk Helios Plus 2287A, dataloggeren og tildels at der er trukket termoelementer sammen med ledninger hvor der løber en spænding i. Denne antagelse er lavet ud fra, at termoelementerne måler små udsving over stationære tilfælde hvor der ikke justeres på instrumenterne.

I punkt 2.8 [ISO 8990 1996] er der yderligere krav til indflydelsen fra fejl på instrumenterne, på varmestrømmen beregnet i formel (17.8). Beregningerne er foretaget med antagelse om, at middelværdien af alle målingerne er de eksakte tilførte mængde af energi i hot box'en.

$$\begin{aligned}
 Afvigelse - instru_+ &= \frac{\max(\Phi_{p,i} + \Phi_{v,i} - \Phi_{3,i})}{\text{middel}(\Phi_{p,i} + \Phi_{v,i} - \Phi_{3,i})} \cdot 100 \\
 Afvigelse - instru_- &= \frac{\min(\Phi_{p,i} + \Phi_{v,i} - \Phi_{3,i})}{\text{middel}(\Phi_{p,i} + \Phi_{v,i} - \Phi_{3,i})} \cdot 100
 \end{aligned} \tag{17.8}$$

Hvor

$Afvigelse - instru_+$ er afvigelsen forårsaget af instrumenternes højeste måling, på varmestrømmen gennem testelementet. [%]

$Afvigelse - instru_-$ er afvigelsen forårsaget af instrumenternes mindste måling, på varmestrømmen gennem testelementet. [%]

$\Phi_{p,i}$ er effekten tilført til varmetrådene i målekassen, til hvert tidsskridt. [W]

17.1 Krav der skal overholdes før forsøg

$\Phi_{v,i}$ er effekten tilført til de tre ventilatore i målekassen, til hvert tidsskridt. [W]

$\Phi_{3,i}$ er varmemestrømmen gennem målekassen, til hvert tidsskridt. [W]

i er tidsskridt fra 1-180. [—]

Beregningsresultaterne for indflydelsen af instrumenternes usikkerhed på varmemestrømmen gennem testelementet kan ses for hvert enkelt forsøg i tabel 17.8. Det kan

Mindste varmemestrøm Forskel [%]	Største varmemestrøm Forskel [%]
Forsøg 1	
0,97	1,05
Forsøg 2	
0,95	1,05
Forsøg 3	
0,94	1,06
Forsøg 4	
0,95	1,04

Tabel 17.8: Tabellen viser den positive og negative variation temperatur forskellen mellem kold og varm side.

ses at normkravet på 1,5 % er opfyldt for alle de udførte forsøg.

Punkt 3.5

Punkt 3.5 i [ISO 8990 1996] omhandler beregninger på to efter hinanden følgende forsøg på det samme isoleringsmateriale. På grund af tidspres er der ikke udført sådanne forsøg, derfor kan det ikke dokumenteres at dette normkrav er opfyldt. Men idet temperaturerne i et forsøg svinger mere end 1 %, må det formodes at der er større forskel mellem to uafhængige forsøg. Disse fejl kan mindskes ved at trække strømkabler og termoelementer hver for sig, og dermed mindske usikkerheden på målingerne.

17.2 Varmeledningsevner for snittet halm

I dette afsnit vil varmeledningsevnerne, λ -værdierne, for snittet halm, blive beregnet, beregninger bygger på normkravene, som beskrevet herover. Velvidende at alle normkravene ikke er overholdt er det vurderet, at målinger har en vis præcision og derfor stadig vil kunne benyttes til at dokumentere forholdsvis præcise λ -værdier for det snittede halm. λ -værdierne er beregnet for både luft-til-luft temperaturer, samt overflade-til-overflade temperaturer. Overflade-til-overflade er bedre at bruge hvis der stor usikkerhed på overgangstallet mellem luften og overfladen, mens det er bedre at benytte luft-til-luft, hvis usikkerheden er stor ved måling af overfladetemperaturer. Netop de to fremhævede eksempler er værdier og måletekniske værdier der kan være en vis usikkerhed ved. På trods af der ikke er lavet dybere undersøgelser af hvilken metode der er den mest præcise, er det valgt at benytte λ -værdien beregnet ud fra overfladetemperaturerne. En måde at bestemme hvilken metode er bedst er ved at benytte et kalibreret testelement, hvor λ -værdien er kendt og det dermed er muligt at finde den mest præcise måle- og beregningsmetode. λ -værdierne, er beregnet som vist i formel (17.9).

$$\begin{aligned}\lambda_{luft} &= \frac{e}{\frac{(t_i - t_u) \cdot A}{\Phi_1} - R_i - \frac{e_{alu}}{\lambda_{alu}} - R_u} \\ \lambda_{overflade} &= \frac{e}{\frac{(t_{oi} - t_{ou}) \cdot A}{\Phi_1} - \frac{e_{alu}}{\lambda_{alu}}}\end{aligned}\tag{17.9}$$

Hvor

λ_{luft} er varmeledningstallet for den snittede halm beregnet ud fra lufttemperaturer. [W/mK]

$\lambda_{overflade}$ er varmeledningstallet for den snittede halm beregnet ud fra overfladetemperaturer. [W/mK]

t_i er lufttemperaturen i målekassen. [°C]

t_u er lufttemperaturen i den kolde kassen. [°C]

t_{oi} er overfladetemperaturen på testelementet i målekassen. [°C]

t_{ou} er overfladetemperaturen på testelementet i den kolde kassen. [°C]

e_{alu} er tykkelsen af aluminiumspladerne på hver side af testelementet. [m]

λ_{alu} er varmeledningstallet for aluminiumspladerne. [W/mK]

R_u og R_i er overgangsisolansen på hhv. kold og varm side af testelementet. [—]

	λ_{luft} [W/mK]	$\lambda_{overflade}$ [W/mK]
Forsøg 1	0,15	0,14
Forsøg 2	0,14	0,13
Forsøg 3	0,12	0,11
Forsøg 4	0,13	0,12

Tabel 17.9: Tabellen viser de beregnede λ -værdier for alle fire forsøg beregnet med lufttemperaturer og overfladetemperaturer.

Disse λ -værdier er beregnet for alle forsøg og resultaterne kan ses i tabel 17.9.

Udfra tabel 17.9 kan det ses, at λ -værdien falder med komprimeringen af halmen. Det tyder på, at komprimeringen med de 600 kg ikke er den minimale λ -værdi, der kan opnåes for snittet halm. Denne kan sandsynligvis blive endnu bedre med en højere komprimering hvilket kan holdes op mod at en halmballes λ -værdi variere mellem 0,080 og 0,052 W/mK, som skrevet i bilag A.1, alt efter hvilken retning der måles i. Dette betyder formentlig, at snittet halm kan komme ned i nærheden af disse. Derfor vil det for at lave et bedre billede af hvordan halmens λ -værdi variere være nødvendigt at lave forsøg med hårdere komprimede prøver. Dette har dog ikke været muligt, som følge af tidspres samt måden hvorpå halmen er blevet presset.

Det er valgt, at udføre de videre beregninger med λ -værdien beregnet med overfladetemperaturene, fra forsøg 3, da det er den bedste λ -værdi, og målingen af overfladetemperaturen antages at være mere præcis end beregninger med lufttemperatur og benyttelse af tabel opslag for overgangsisolansen mellem luften og overfladen.

17.3 Halm ler element

Det sidste testelement der er blevet udført hot box målinger på, er halm ler elementet. Det startede med at være et helt løst fyldt element men da det øverste lag ler blev placeret ovenpå halmen har det vist sig, at det presser halmen sammen med en vægt på 315,9 kg fordelt forholdvist jævnt. Der er først beregnet en samlet λ -værdi for hele testelementet. Under disse beregninger er det fundet, at halm ler blandingen har en lavere λ -værdi, som kan ses i tabel 17.10, end et halmelement, hvilket ikke kan være korrekt, eftersom λ -værdien for ler ifølge tabelopslag ligger omkring 1.5 W/mK.

17 Resultat behandling

	λ_{luft} [W/mK]	$\lambda_{overflade}$ [W/mK]
Forsøg 5	0,13	0,12

Tabel 17.10: Tabellen viser den beregnede λ -værdi hvis halm ler elementet antages som et materiale, beregnet med lufttemperaturer og overfladetemperaturer.

Derfor er der ikke udført beregninger for, at kontrollere om forsøgsdataen overholder normkravene, men i stedet lavet en revurdering af de benyttede formler til at beregne λ -værdien. Efter flere beregninger frem og tilbage mellem de originale formler og de omskrevne formler, er det vurderet at omskrivningen er udført korrekt.

Derfor er det konstateret, at det må være målingerne der har været en fejl på, hvilket ikke umiddelbart er kommet til syne under målingerne. Noget må have påvirket f.eks. den stationære balance. Det vurderes derfor, at der er stor sandsynlighed for, at det er en af følgende to muligheder. Første mulighed er en fejl på måleudstyret eller opsætningen, der har været den samme under hele det 5. forsøg. Det er dog ikke særlig sandsynligt, da der ikke kan findes nogen årsag til at en sådan fejl skulle opstå mellem forsøg 4 og 5. Mulighed to er, at lerlaget kan være blevet varmet op til en højere temperatur end lufttemperaturerne i den varme side og derfor er den målte effekt mindre end den faktiske effekt der passerer gennem prøven.

Der er mulighed for en sådan fejl, da der under indreguleringen blev tilført en højere mængde energi end under selve forsøget. Det blev under forsøget antaget, at 10 timer var nok til afgivelse af den overskudende varme i testelementet, men ud fra målingerne og de senere beregninger kan det konstateres, at dette ikke er tilfældet.

Disse erfaringer har vist vigtigheden i at gentage forsøgene flere gange, dermed sagt at hvis forsøget var blevet gentaget dagen efter eller flere dage efter havde det vist at der havde været et problem med målingerne. Dette var dog ikke muligt pga. tidspreds.

Det er vurderet at en sådan fejl ikke er tilfældet ved forsøgene med halmelementerne, da disse ikke har samme høje termiske masse, som leren.

Den valgte varmeledningsevne benyttes i det efterfølgende kapitel til tredimensionelle beregninger i *COMSOL*. Ved hjælp af disse beregninger kan linjetabskoefficienter bestemmes og energiberegninger udføres.

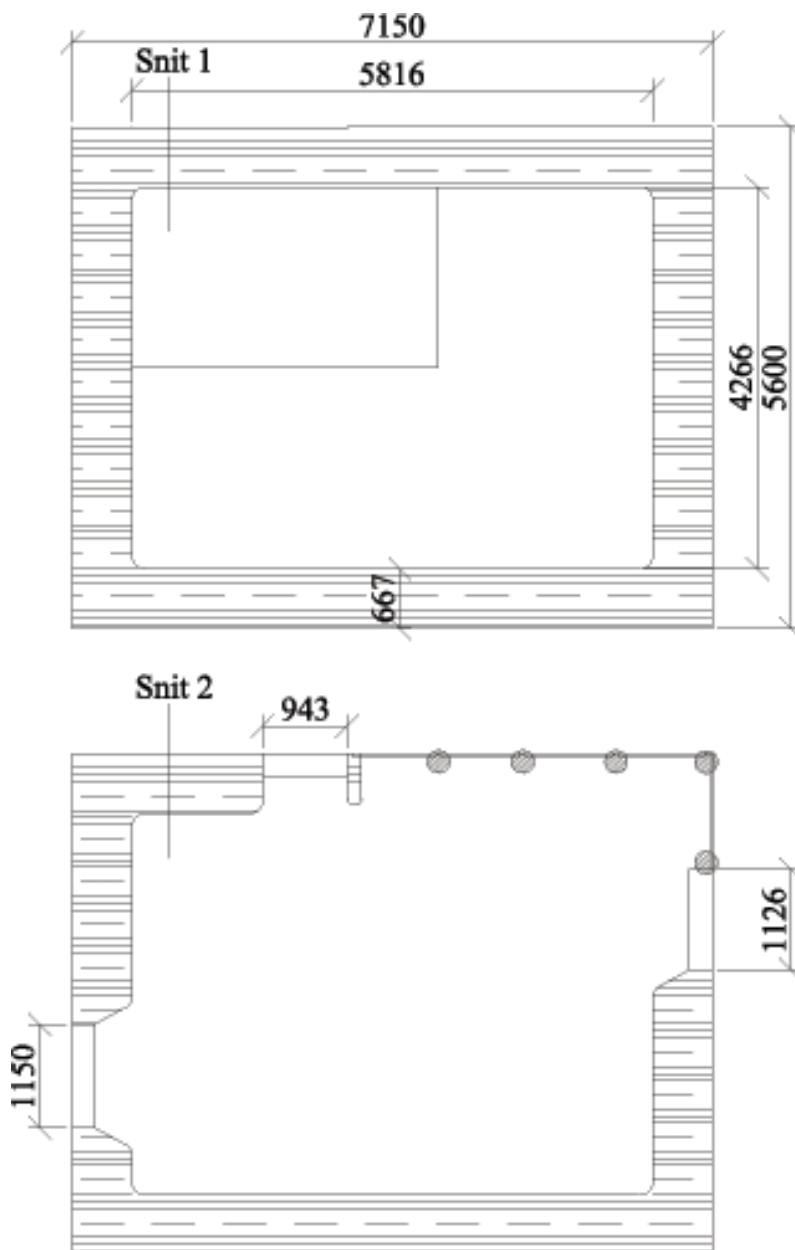
18 3D-beregninger

Der er i det følgende opsat tredimensionelle beregninger for udvalgte kuldebroer, ved vinduer, tagkonstruktion og fundament. Disse er valgt da det menes at være nogle af de karakteristiske steder, som bør kunne forbedres og optimeres i forbindelse med en energioptimering af hele bygningen. Det er valgt at tage udgangspunkt i et hus på Friland, som vil blive beskrevet i det efterfølgende. De tredimensionelle beregninger opsættes i programmet *COMSOL* og disse modeller er beskrevet i afsnit 18.6.

18.1 Beskrivelse af bygning i Friland

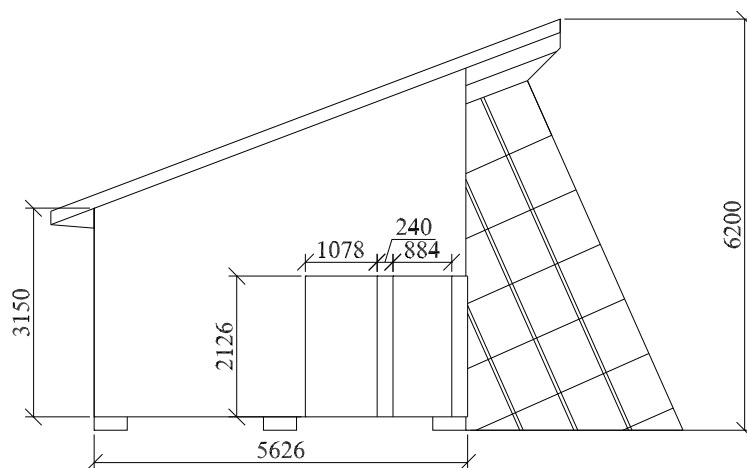
I det følgende beskrives det udvalgte hus i Friland, som der udføres tredimensionelle beregninger på. Huset er valgt fordi det er opført med snittet halm som isolering i både tag, gulv og ydervægge. Der vil desuden blive udført en blowerdoor-test og taget termografibilleder for at lokalisere evt. kuldebroer og utætheder i huset, dette bliver nærmere beskrevet i afsnit 20.

Huset er et enpersoners hus i et plan med et nettoareal på ca. 25 m^2 samt bruttoareal på ca. 40 m^2 . Huset består af et stort rum med en hems på omkring $7,5\text{ m}^2$, som udgør soveværelse, i det sydøstlige hjørne. Det store rum indeholder stue og køkken. En oversigtstegning kan ses på figur 18.1. Det er sandsynligvis ikke muligt at konstruere dette hus som et pasivhus, da der er et relativt stort ydervægsareal pga. lofthøjden.



Figur 18.1: Figuren viser en plantegning af huset i Friland, med snit tæt ved hhv. tag og igennem køkken vinduet. Snit 1 er gennem tagkonstruktionen og snit 2 er gennem gulvkonstruktionen.

Køleskabet i køkkenet er placeret inde i ydervæggen dvs. at der kun er papir, forskallingsbrædder, luft og kalmarbrædder bag køleskabet. Dette er gjort for at køle køleskabet ned på bagsiden for derved at spare energi. Der er bygget en skrå glasfacade ud fra huset på sydsiden, som kan ses på figur 18.2. Den skal fungere som ekstra klimaskærm og mindske varmetabet på sydsiden. Derudover er der mulighed for at bruge arealet som en udestue i forårs-, efterårs- og sommerperioden.



Figur 18.2: Figuren viser en husetsfacade set fra vest.

Vægge

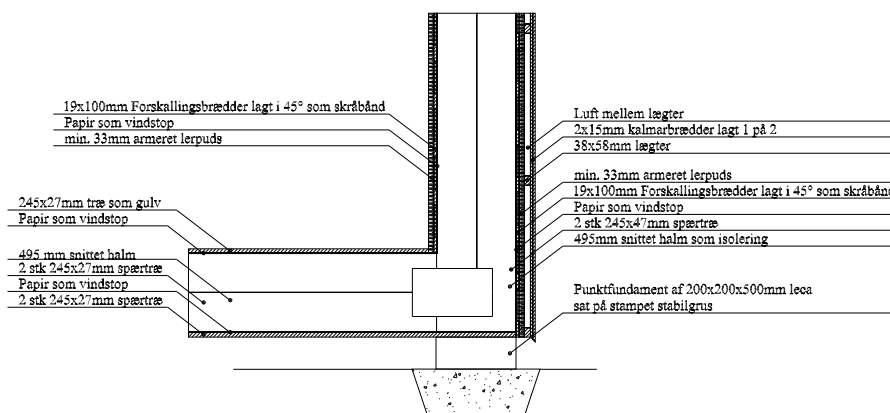
Konstruktionen er isoleret med fintsnittet rapshalm, holdt inde af et lag papir, hvorpå der er monteret 19×100 mm forskallingsbrædder med en vinkel på 45° . Papiret skal også gøre det svære for vinden at trænge igennem konstruktionen. Isoleringstykkelsen er på 495 mm og er brudt på tværs af to 245×47 mm spærtræ, som skal fordele kræfterne fra taget. Udenpå forskallingsbrædderne er der pudset med 33 mm lerpuds. Lerpudsen er ligeledes påført mellem forskallingsbrædderne i en lagtykkelse på 19 mm. Tykkelsen af lerpudsen varierer selvfølgelig lidt, idet den påføres med håndkraft. Lerpudsen er armeret med et net af plastik for bedre at holde på puds og hjælpe til med at styre puds under påførelse. For at skabe en afstand mellem lerpudsen og de to udvendige lag kalmarbrædder, er der monteret 38×58 mm lægter i passende højder henover hele vægkonstruktionen. Kalmarbrædderne er i gran med en tykkelse på 15 mm og er lagt 1 på 2. Vægkonstruktionen er opbygget på samme måde

18.1 Beskrivelse af bygning i Friland

på indvendig side, bortset fra lægterne og kalmarbrædderne. En snittegning af væggen kan ses på figur 18.3. I det sydvestlige hjørne af rummet er der opstillet fem rundtømmer søjler i douglastræ med en diameter på ca. 240 mm. Mellem disse søjler bliver der monteret lavenergi termoruder fra Interglas. Søjlernes placering kan ses på figur 18.1

Fundament

Fundamentet er opbygget som et punktfundament af $200 \times 200 \times 500$ mm Leca-blokke, placeret ovenpå stampet stabilgrus. Herpå er der placeret 30 mm brædder samt et lag papir til at holder det fintsnittede rapshalm inde. Isoleringstykkelsen er også her 495 mm. Isoleringen er også her brudt på tværs, som det er gjort i væggene. Indvendig er der ovenpå papiret monteret 245×27 mm gulvbrædder. En snittegning af fundamentet kan ses på figur 18.3.

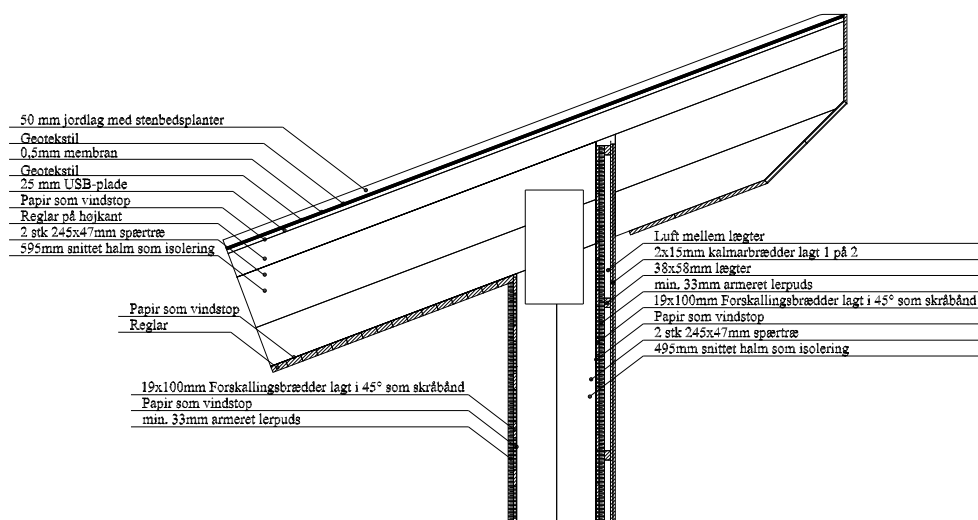


Figur 18.3: Figuren viser samlingen mellem terrændæk og ydervæg, snit 2 på figur 18.1, kan også ses på Tegning 07 i tegningsmappen.

Tag

Tagkonstruktionen er øverst belagt med 50 mm jord hvor der er plantet stenbedsplanter. Herunder er der placeret to lag geotekstil med en 0,5 mm membran imellem. Der er under det nederste lag geotekstil monteret en 25 mm usb plade og herefter et lag papir til at holde på den fintsnittede rapshalm, som her har en tykkelse på 595 mm. Isoleringen er i taget brudt af to 245×27 mm spærtræ samt ca. 100×27 mm reglar sat på højkant pga. den ekstra isolering. Herunder er der igen et lag papir. Indvendig er der opsat reglar som loftbeklædning på papiret. Tagkonstruktionen kan ses på figur 18.4.

18.1 Beskrivelse af bygning i Friland



Figur 18.4: Figuren viser samlingen mellem tag og ydervæg, snit 1 på figur 18.1, kan også ses på Tegning 08 i tegningsmappen.

Vinduer og døre

Vinduerne er placeret mod syd, øst og vest. Der er mod syd placeret et stort glasparti med fire store glaselementer samt en hoveddør. Der er desuden placeret to små vinduer oppe under taget, som giver dagslys til hemsen indenfor. Placeringen af de sydvendte vinduer kan ses på figur 18.6 og 18.5. Der er mod vest også placeret et stort vinduesparti samt en terassedør. Mod øst sidder der et køkkenvindue med karm. Mål på vinduer og glas kan ses i tabel 18.1. Der er desværre ingen information tilgængelig om hoveddøren i huset.



Figur 18.5: Figuren viser et billede af vinduerne som giver lyst til hemsen.



Figur 18.6: Figuren viser placeringen af de store sydvendte vinduer.

18.1 Beskrivelse af bygning i Friland

Placering	Mål (h x b) mm	Glas- eller karm mål	Rude opbygning mm
Vinduesparti Syd	2070×940	Glas	4-16-4
Vinduesparti Syd	2680×980	Glas	4-16-4
Vinduesparti Syd	3190×990	Glas	4-16-4
Vinduesparti Syd	2690×890	Glas	4-16-4
Hems vindue Syd	650×650	Karm	4-16-4
Hems vindue Syd	650×850	Karm	4-16-4
Vinduesparti Vest	2190×1290	Glas	4-16-4
Terrassedør Vest	1790×640	Glas	4-6-4
Terrassedør Vest	2126×1126	Karm	
Køkkenvindue Øst	120×115	Karm	4-16-4

Tabel 18.1: Vinduer og døre i huset.

De store ruder er monteret direkte ind i de opstillede søjler af douglas gran ved at skære en del af søjlen af og montere glasset på søjlen sammen med en gummiliste, som det kan ses på figur 7.3. Herefter monteres det afskårne stykke af søjlen på ydersiden af glasset. Vinduerne med karm som f.eks. køkkenvinduet er monteret i det yderste af væggen, hvorefter der er isoleres med hør rundt langs karmen og dette er derefter pudset med ler.

18.2 *COMSOL*

I det følgende afsnit vil der blive givet en beskrivelse af programmet *COMSOL* samt teorien bag programmet. Afsnittene er baseret på [COMSOL AB 2007] og [Mogens Steen-Thøde 2008], medmindre andet er anført.

COMSOL er et multifysisk program, som kan løse fysiske problemer på tværs af hinanden. Det betyder, at det er et program der bl.a. kan beregne varmemestrømsproblemer både i en, to og tre dimensioner, hvorfor dette program er valgt.

Der skal til beregningerne kun benyttes den del der hedder "Heat Transfer Module", som er lavet til at løse problemstillinger vedrørende varmemestrømme. Varmestrømsmodellen understøtter alle fundamentale mekanismer i konvektion, varmeledning og stråling både flade til flade og flade til omgivelser. En varmemestrøm er defineret, som en bevægelse af energi som følge af en temperaturforskel. Den er karakteriseret ved tre mekanismer varmeledning, konvektion og stråling, hvilket *COMSOL* som tidligere nævnt kan beregne.

18.2.1 Varmeledning

Varmeledning forekommer på forskellige måder alt efter hvilket medie det sker i. I de opsatte modeller foregår varmeledning i faste materialer hvor det er ved molekylebevægelse, hvilket betyder at materialer med mange molekyler er gode varmeledere. Varmestrømmen er typisk proportional med temperaturgradienten i forbindelse med varmeledning.

18.2.2 Konvektion

Konvektion sker enten i medier, gas eller væskeform, som resultat af mediets egen bevægelse. Eller som i konstruktionstilfælde mellem et fast materiale og et bevægende medie oftest den frie luft på overfladen. Her bliver luften varmet op og energien fra en varm væg vil blive overført til den koldere luft, eller omvendt i tilfælde hvor luften er varmest.

18.2.3 Stråling

Stråling er energi der er lagret i fotoner, hvilket en fast flade kan optage eller reflektere. Varmestrømsmodellen i *COMSOL* indeholder både stråling mellem flader og fra flade til omgivelserne, hvor omgivelserne behandles som et sort legeme med en kendt temperatur. Stråling vil altid forekomme, det er igen et spørgsmål om energien bliver tilført eller fjernet fra en flade ved stråling, da dette afhænger af de omkringliggende fladers temperature og vinkelforhold.

18.3 Formål med at benytte *COMSOL*

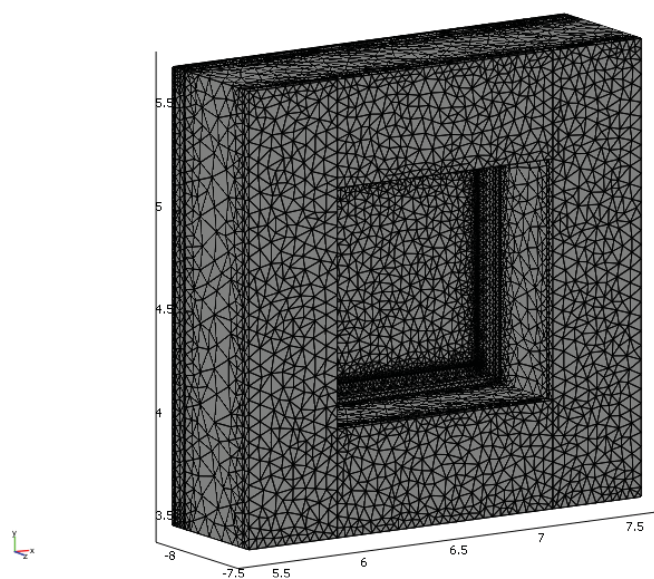
COMSOL benyttes til at lave en tredimensionel beregning af udvalgte samlinger, hvor der kan opstå kuldebroer eller linjetab, i konstruktionen. Det er valgt ikke at benytte *COMSOL* til at beregne konvektion og stråling, da overgangstallene fra DS418 er benyttet hvor konvektion og stråling indgår. Desuden gør det muligt at sammenligne de beregnede temperaturer i *COMSOL* med håndberegninger som er foretaget i afsnit 19.5. Dernæst ønskes det at kunne benytte disse beregninger til at beregne et linjetab, som svarer til den forskel der er på energitabet i den gængse konstruktion, kontra i de kuldebroer eller linjetab der beregnes i *COMSOL*.

18.4 Beregning i *COMSOL*

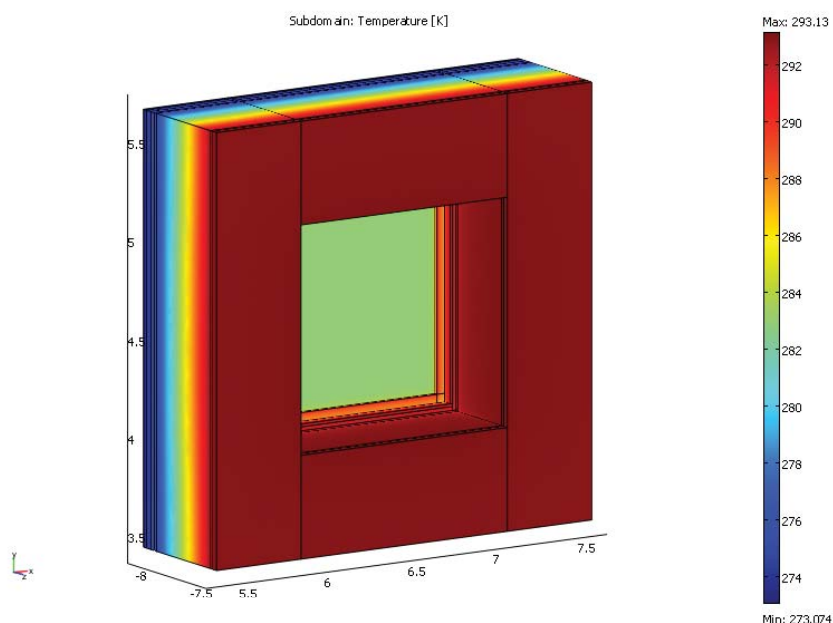
For at beregne teoretiske problemer i *COMSOL*, skal der konstrueres en model. I dette projekt er det valgt at tegne modellerne i tre dimensioner i *AutoCAD* for derefter at importere dem i *COMSOL*. Det er gjort ved hjælp af modulet "CAD Import Module," hvilket er et modul der kan importere exporterede filer fra *AutoCAD*. Det er også muligt at tegne i *COMSOL*, dette er en anden måde at tegne på og vil derfor kræve tilvending, hvorfor modellerne som tidligere nævnt konstrueres i *AutoCAD*. Inden simuleringen af modellen kan starte, skal alle betingelser beskrives, dette gøres med subdomain og boundary settings. Subdomain settings beskriver hvilket materiale de enkelte dele i modellen er lavet af og hvilke egenskaber materialet har, mens boundary settings er randbetingelserne for beregningen, som bliver sat på de frie flader. Her bliver overgangsisolansen fra DS418 benyttet i stedet for at beskrive stråling og konvektion på overfladen, desuden indsættes rumtemperatur og udetemperatur her, så *COMSOL* kan beregne en varmestrøm.

18 3D-beregninger

Når modellerne er sat op skal der dannes et net af trekanter hvilket *COMSOL* benytter som beregningspunkter som det kan ses på figur 18.7, dette net variere i tæthed alt efter elementernes størrelse. Dernæst kan modellen simuleres og temperaturfordelingen kan ses på modellerne, som vist på figur 18.8. Der er mulighed for mange former for databehandling i *COMSOL* efter modelsimuleringen som f.eks. specifik temperatur i udvalgte punkter, temperaturforløb gennem konstruktionen osv.



Figur 18.7: Figuren viser en model fra *COMSOL* hvorpå der er tegnet net.



Figur 18.8: Figuren viser en model fra *COMSOL* hvorpå temperatur fordelingen er vist.

18.5 Beregningsmetode i *COMSOL*

I dette afsnit vil randbetingelserne bag *COMSOL* blive beskrevet, det vil de blive ud fra [COMSOL AB 2007]. Varmeledningsteorien er beskrevet i afsnit 13.0.1, hvilket ligger tilgrunde for *comsol* beregningerne.

18.5.1 Randbetingelser

I varmemestrømsmodellen i *COMSOL* er det som standard muligt at benytte to randbetingelser enten en specifik temperatur eller en specifik varmemestrøm. Ved en specifik temperatur fastsættes overfladetemperaturen, det kan bruges til sammenligning med målinger, hvor overfladetemperaturen er kendt og derved fjerne de usikkerheder der vil være med overgangsisolansen.

Den anden måde der kan benyttes er en specifik varmemestrøm, her vælges der en rumtemperatur hvorefter overfladetemperaturen beregnes ud fra en valgt overgangsisolans. Formel (18.1) er den generelle formel der benyttes i *COMSOL*, men fordi der ikke tages højde for stråling og konvektion i dette projekt, vil formelen der benyttes se ud som efterfølgende formel (18.2).

$$-n \cdot q = q_0 + q_r + q_s + h(T_{inf} - T) \quad (18.1)$$

Hvor

q er den totale varmemestrøm. [W/m²]

n er normal vektor på randen.

q_0 er den indadrettede varmemestrøm vinkelret på fladen. [W/m²]

q_r er strålingen til fladen. [W/m²] (enhed ikke sikker)

q_s er bidraget fra grænselaget. [W/m²] (enhed ikke sikker)

h er U-værdien for overgangsisolansen (1/overgangsisolans). [W/m²K]

T_{inf} er den eksterne temperatur. [K]

T er overfladenstemperatur. [K]

Formel (18.2) benyttes i dette projekt.

$$-n \cdot (-k \cdot \nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) \quad (18.2)$$

Hvor

∇T er temperaturgradienten. [K]

k er varmeledningsevnen. [W/mK]

I tilfældene der beregnes i *COMSOL* er det randbetingelsen for varmemestrømmen der benyttes. Den indadrettede varmemestrøm vinkelret på fladen, q_0 sættes til nul da der ikke er nogen indadrettet varmemestrøm. For h benyttes den reciproke værdi af hhv. den indvendige og udvendige overgangsisolans fra DS 418. Der fastsættes også en indvendig og udvendig temperatur på hhv. 293,15 K og 273,15 K.

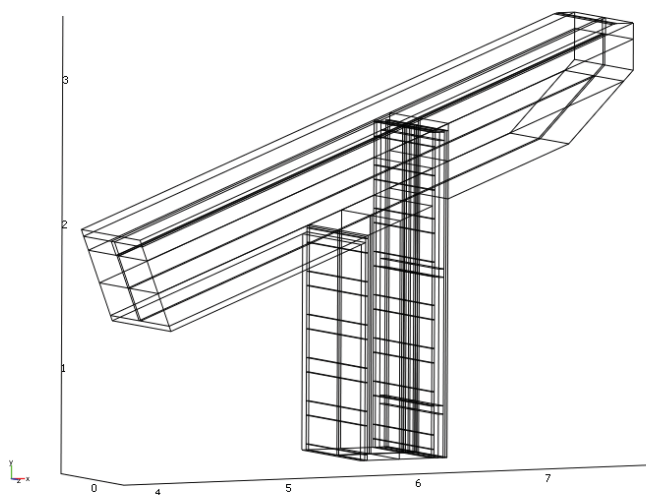
18.6 Modeller i *COMSOL*

I det følgende vil der blive givet en beskrivelse af de opstillede modeller i programmet *COMSOL*. Desuden vil der blive givet et overblik over forsimplinger

i modellerne og de benyttede materialeværdier vil blive listet. Alle materialeværdier er listet i excelark *Materialevaerdier.xls* på bilags CD'en. Forsimplinger er foretaget pga. begrænsninger i programmet *COMSOL*. Modellerne er konstrueret på baggrund af konstruktionstegninger for det tidligere beskrevne hus i Friland i afsnit 18.1. Der er ialt optegnet fem modeller, som vil blive beskrevet hver for sig i de følgende afsnit.

18.6.1 Tagkonstruktion

Modellen er konstrueret som et udsnit af tagkonstruktion samt noget af væggen midt for facaden på huset. Udsnittet kan ses på figur 18.9. Det er valgt at tage 1 m med af vægkonstruktionen samt ca. 1,5 m af taget som er placeret over rummet. Udhængen på huset er medtaget i fuld længde. Bredden af modellen er 0,927 m og består af to isoleringslag med spærtræ imellem.



Figur 18.9: Figuren viser modellen af taget fra *COMSOL*.

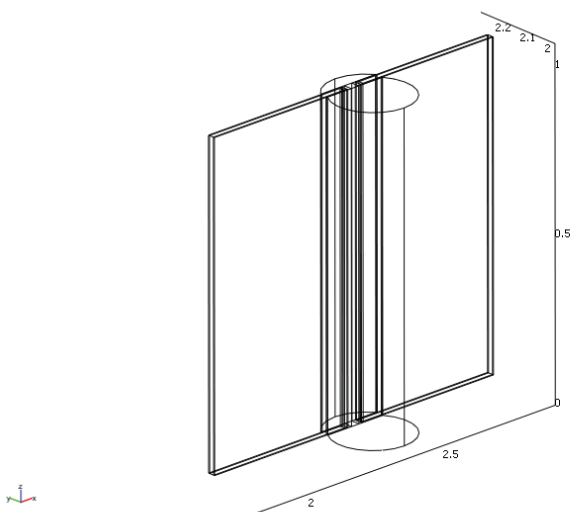
Forsimplinger

Forsimplingerne i denne model består i, at papirlagene mellem isoleringen og lerpudsen ikke er medtaget. Derudover er der set bort fra de to lag geotekstil og

usb pladen samt membranen i tagkonstruktionen mellem jordlaget og isoleringen. Der er ligeledes set bort fra beklædningsbrædderne placeret på undersiden af udhænget. Det er vurderet at disse forsimplinger ikke vil have betydning for simuleringerne. Det har været nødvendigt at foretage disse forsimplinger, idet programmet *COMSOL* ikke kan håndtere større flader med så små tykkelser da det giver mange trekanter og i nogen tilfælde så små trekanter de ikke kan tegnes inden for den ønskede tykkelse. For at forsimple tegningen af modellen, er forskallingsbrædderne placeret vandret henover væggen, i stedet for med en vinkel på 45° , som de er på huset i Friland.

18.6.2 Glasparti

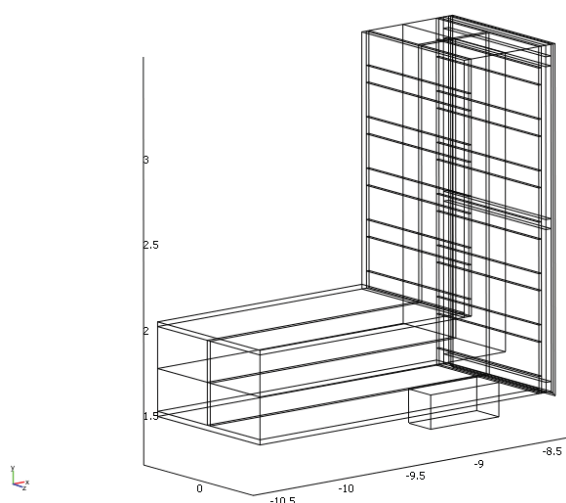
Glaspartiet består i alt af fem glaselementer samt en terrassedør. Modellen er begrænset til to stykker glas, et på hver side af en søjle i douglas gran, som glassene er monteret i. De to glas er hver kun halv bredde i forhold til de originale. Modellen er konstrueret til at være et stykke på 1 m i midten af glassets højde. Modellen kan ses på figur 18.10.



Figur 18.10: Figuren viser modellen af en samling i vinduespartiet fra *COMSOL*.

18.6.3 Fundament

Modellen er ligesom modellerne for tagkonstruktionen- og glaspartiet konstrueret på baggrund af enpersons huset i Friland. Udsnittet er taget fra terrænniveau og op til omkring 1,5 m på den inderste væg i rummet. Ligeledes er der medtaget ca. 1,5 m af gulvet ind i rummet. Bredden af udsnittet er 0,927 m med lecablokken placeret midt for bredden. Modellen kan ses på figur 18.11.



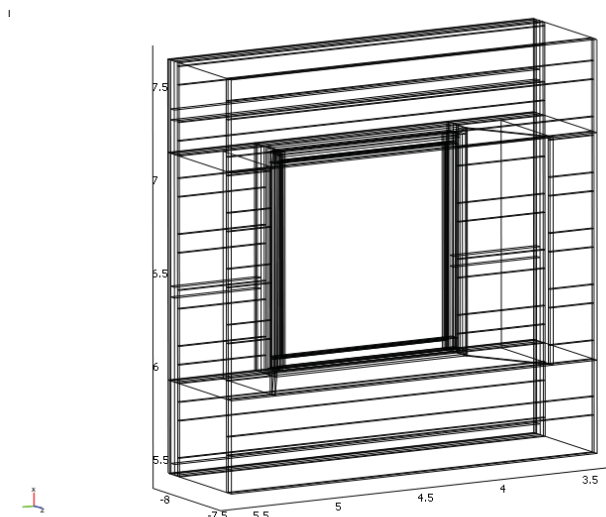
Figur 18.11: Figuren viser modellen af fundamentssamlingen fra *COMSOL*.

Forsimplinger

I denne model er der også set bort fra papirlagene mellem isolering og forskallingsbrædder. Derudover er det også her valgt at placere forskallingsbrædderne vandret henover væggen, istedet for med en vinkel på 45° , som de er placeret i huset i Friland. Ligeledes er brædderne placeret som nederste lag i gulvkonstruktionen blevet forenklet, så de i modellen er konstrueret, som en stor plade med tykkelsen af brædderne. Dette er også gjort for gulvbrædderne inde i huset. Det vurderes, at de foretagne forsimplinger ikke vil have en afgørende betydning for simuleringer af modellen.

18.6.4 Vindue med skrå lysninger

Modellen for dette vindue består af et vindue samt et vægstykke på hver side af vinduet. Vægstykkerne er opbygget på samme måde som den beskrevne vægkonstruktion i afsnit 18.1. Spærtræet i denne model er placeret direkte op af karmen i vinduet, idet vinduet er fastgjort i spærtræet, hvilket betyder det gennembrøder isoleringen. Vinduet er opbygget af en vindueskarm og vinduesramme, begge i fyrtræ. Derudover er der glassdelen som består af to lag glas med argon imellem. Hele vejen rundt om vindueskarmen er der et isoleringslag af hør. Lysningerne i denne model er skrå, mens top og bund er lige, da dette er normalt i halmhuse pga. dagslyset. Lysninger samt top og bund i vindueshullet er pudset med lerpuds. Modellen kan ses på figur 18.12



Figur 18.12: Figuren viser modellen af vindue med skråsider fra *COMSOL*.

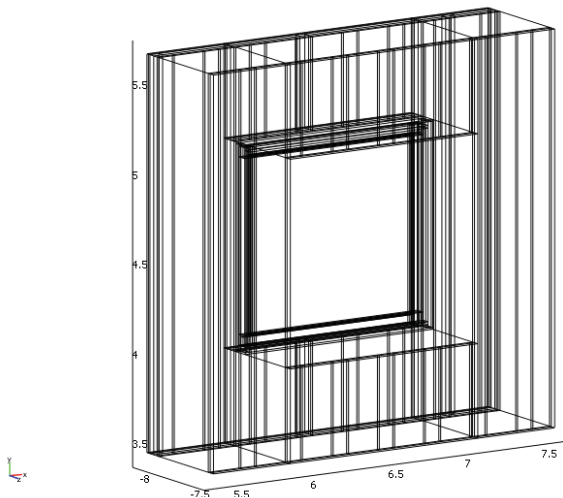
Forsimplinger

Det har været nødvendigt at forsimple glassdelen i vinduet pga. for små tykkelse. De to sykker glas samt argon mellem glassene er derfor lavet som et materiale og materialeværdierne er arealvægtede for dette materiale ud fra materialeværdierne for glas og argon. Derudover er der set bort fra papirlagene i

væggen af samme grund som tidligere beskrevet.

18.6.5 Vindue med lige lysninger

Det er valgt at lave en model med vinkelrette lysninger, da dette kan være nødvendigt hvis vinduet placeres i en facade i stedet for en gavl pga. afstanden mellem det gennembrydende spærtræ. Modellen er bortset fra lysningerne konstrueret på samme måde som modellen med de skrå lysninger. Modellen opstilles også for at kunne sammenligne de to vindues modeller og bestemme, hvor der opnås den mindste kuldebro. Modellen kan ses på figur 18.13



Figur 18.13: Figuren viser modellen af vindue med ligesider fra *COMSOL*.

Forsimplinger

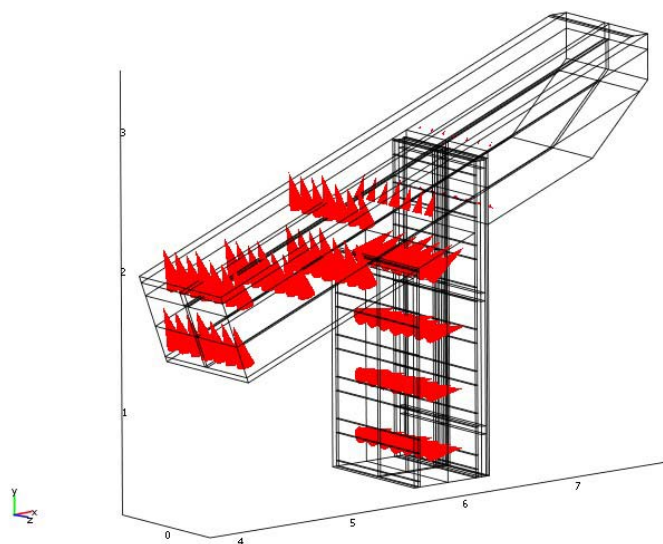
Der er foretaget samme forsimplinger i denne model som modellen med skrå lysninger, som er beskrevet ovenover.

18.7 Resultater for *COMSOL* modeller

I det følgende vil resultaterne af *COMSOL*-modellerne blive beskrevet, herunder hvor der kan være problemer i forhold til konstruktionsopbygningen og forslag til løsning af disse problemer. Afsnittet er baseret på vurderinger og observationer.

18.7.1 Tagkonstruktion

I tagkonstruktionen, som kan ses på figur 18.14 er der et lidt større energitab, som forventet, gennem det bærende spærtræ der går på tværs af isoleringen. Det skyldes, at spærtræet er gennemgående og har en lidt højere varmeledningsevne end isoleringen. Dog ses det også, at varmestrømmen gennem spærtræet og isoleringen næsten er ens, hvilket skyldes den høje varmeledningsevne, der er fundet for halm.



Figur 18.14: Figuren viser et pileplot af tagkonstruktionen beregnet i *COMSOL*.

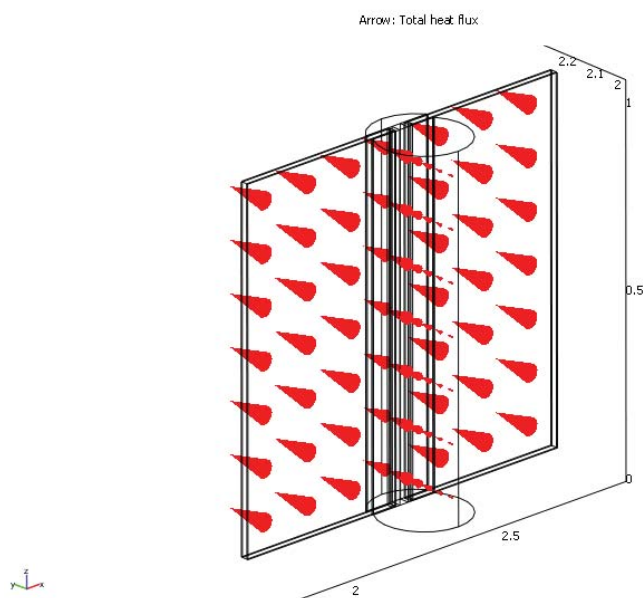
Trods det er dette stadig et af de steder der kan optimeres, ved at mindske disse kuldebroer, som eksistere flere gange i ydermurens længde. Det kunne

f.eks. gøres ved at lave en afstand mellem de to stykker spærtræ. Derved er det muligt for det snittede halm at placere sig i mellem dem og dermed mindske kuldebroen. I taget kunne det også løses på andre måder, en af måderne kunne være ved at lade ydermuren være bærende altså ved at placere nogle bjælker eller søjler i ydermuren som bærer tagkonstruktionen og lade noget bærende på undersiden bære den tunge halm. Idet bjælker eller søjler ikke vil være gennembrydende i isoleringslaget, vil kuldebroer her så godt som undgås. I traditionelt byggeri er dette ikke et problem idet isoleringsmaterialet her er forholdsvis let, hvorimod halmhuskonstruktioner er tunge pga. halmens høje densitet og mængde og derfor er det nødvendigt med noget til at bære det tunge isoleringsmateriale.

18.7.2 Glasparti

Ved en samling i glaspartiet ses det udfra figur 18.15, at størstedelen af energitabet sker gennem selve glasset. Der kan derfor spares en del energi ved at købe bedre ruder, dette kunne f.eks. være passivhusvinduer som er kort beskrevet i afsnit 9.1. Desuden burde der blive placeret et isolerende materiale i hulrummet mellem de to vinduesglas inden i rundtømmeret.

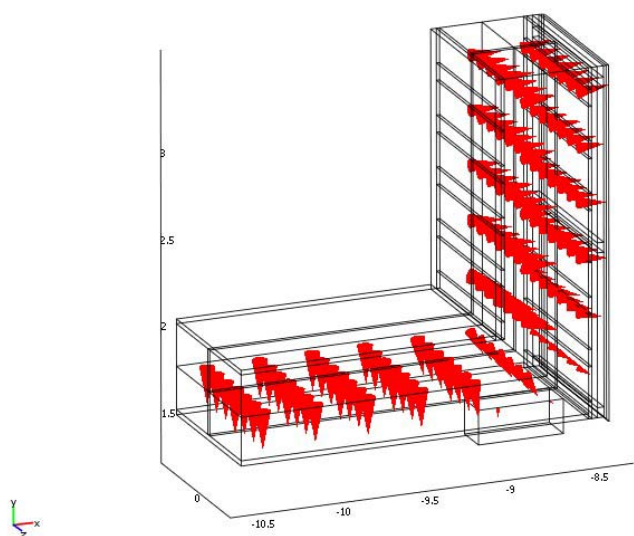
Det er her vigtigt at huske er det ikke er taget i betragtning hvor meget solenergi der kommer ind i bygningen igennem den transperrante glasflade, hvilket vil have en positiv indvirkning på det samlede energiforbrug i bygningen over året.



Figur 18.15: Figuren viser et pileplot af glaspartiet beregnet i *COMSOL*.

18.7.3 Fundament

Det ses ud fra figur 18.16 at der overordnet er samme problem ved de bærende dele, som ved tagkonstruktionen, da disse også her er gennemgående. Det betyder, at der også i gulvkonstruktionen skal findes en brugbar løsning til optimering af konstruktionen.

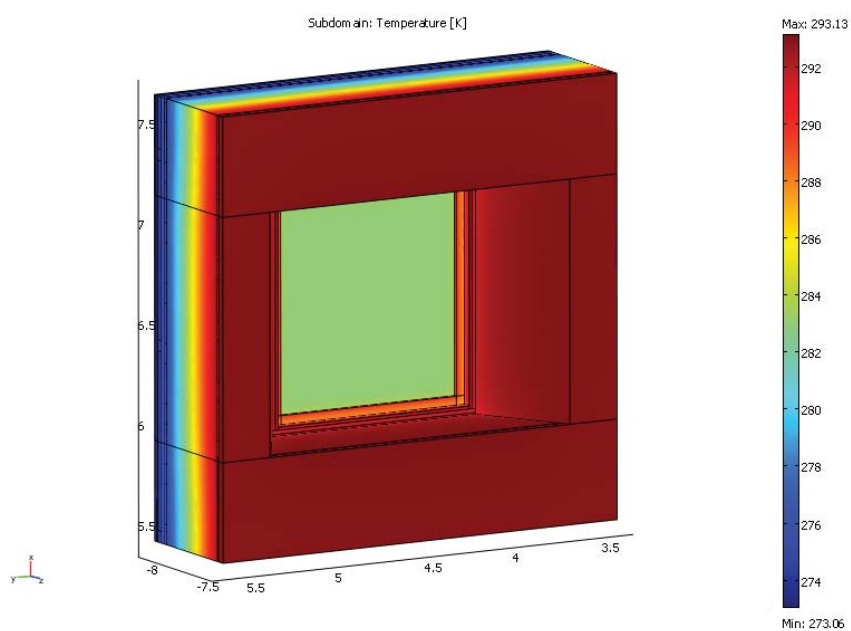


Figur 18.16: Figuren viser et pileplot af fundamentssamlingen beregnet i *COMSOL*.

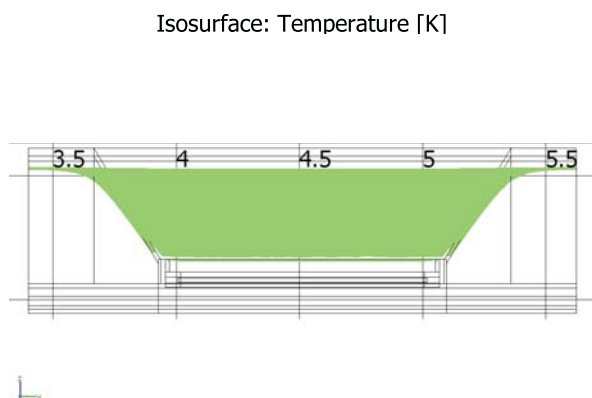
18.7.4 Vindue med skrå lysninger

I simuleringen for vinduet med skrå lysninger vist på figur 18.17 kan det ses, at det først og fremmest er nødvendigt at benytte en bedre rude men i særdeleshed også at få en bedre isolering af karmen, eller som minimum en mere energirigtig karm. Energitabet i denne model skyldes sandsynligvis den massive trækarm der er benyttet i huset i Friland. En måde hvorpå dette kan forbedres er ved at lade isoleringen passere hen forbi karmen som vist i afsnit 9.1.

Figur 18.18 er lavet for at sammenligne vinduessamlingen med de hhv. skrå og lige lysninger. Dette vil blive gjort i det efterfølgende afsnit. Det kan ses at den plottede temperatur på 292 K, bryder de skrålysninger hvilket betyder at der her er en mærkbar kuldebro. Et af løsningsforslagene til dette er den efterfølgende vindueskonstruktion med lige lysninger.



Figur 18.17: Figuren viser den i *COMSOL* beregnede temperaturfordeling for vindueskonstruktionen med skrå lysninger.



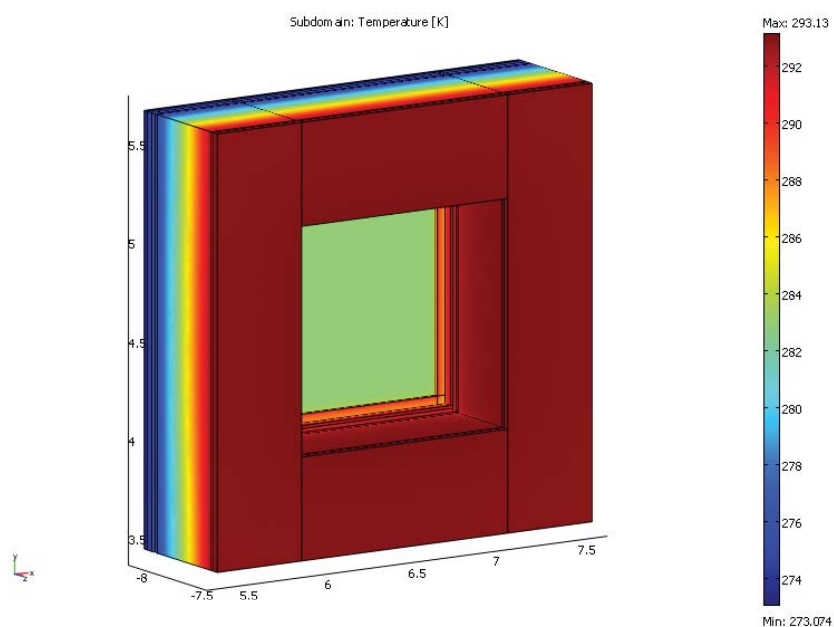
Figur 18.18: Figuren viser hvor i konstruktionen der er en temperatur på 292 K for vindueskonstruktionen med skrå lysninger.

18.7.5 Vindue med lige lysninger

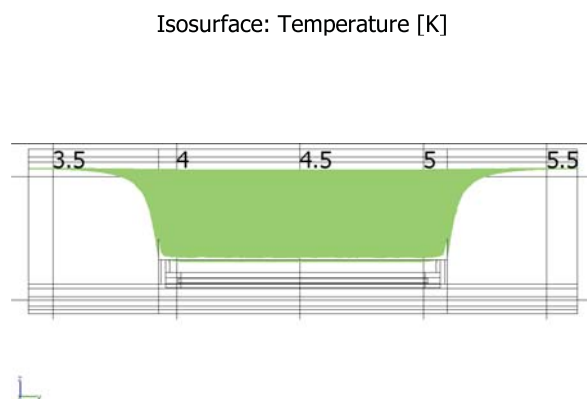
Til sammenligning med vinduessamlingen med skrå lysninger, figur 18.18, er temperaturen 292 K optegnet for vinduessamlingen med lige lysninger, hvilket kan ses på 18.20. Det kan ses på begge figurer, at den optegnede temperatur bryder begge konstruktioner. Det vurderes at brydningen på figur 18.20 skyldes den dårligt isolerende karm og ikke konstruktionen af lysningen. Det ses, at den skrå lysnings overfladetemperatur når ned på en temperatur på 292 K før konstruktionen med den lige lysning.

Det vil kræve en større undersøgelse, at bestemme hvilken lysning der var den mest optimale. Dette skyldes, at der kommer mere lys ind i rummet ved en lysning med skråsider. Det forsøges her at komme ned på passivhus niveau, hvorfor det mest relavante er at holde på varmen, da det er her det største krav til passivhuse findes. Derfor må det i denne situartion være mest optimalt, at arbejde videre med vindueskonstruktionen med de lige sider. Dette bestemmes dog først med sikkerhed ved senere beregninger, som udføres i det efterfølgende afsnit.

For at bestemme betydningen af samlingerne mellem konstruktionerne såsom samlingen mellem væg- og tagkonstruktion, vil der i det efterfølgende afsnit blive beregnet linjetabskoefficienter ud fra *COMSOL* modellerne.



Figur 18.19: Figuren viser den i *COMSOL* beregnede temperaturfordeling for vindueskonstruktionen med lige lysninger.



Figur 18.20: Figuren viser hvor i konstruktionen der er en temperatur på 292 K for vindueskonstruktionen med lige lysninger.

19 Linjetabskoefficienter

I det følgende kapitel beregnes linjetabskoefficienter for udvalgte samlinger og konstruktionsdele med udgangspunkt i de konstruerede *COMSOL* modeller.

Det er valgt, at beregne linjetabskoefficienterne for disse konstruktioner for, at vurdere om de har en negativ indflydelse på energitabet ud gennem konstruktionerne eller om de er neglicible.

Ifølge [*DS 418* 2005] kan der ses bort fra kuldebrovirkning, hvis isoleringen i en konstruktion er ubrudt eller kun brudt af materialer med en varmeledningsevne mindre end $0,3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Derudover kan der ligeledes ses bort fra kuldebrovirkninger, hvis linjetabskoefficienten er mindre end $0,02 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Ifølge *PHPP* skal linjetabskoefficienten være mindre eller lig med $0,01 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ for at være neglicible i et passivhus.

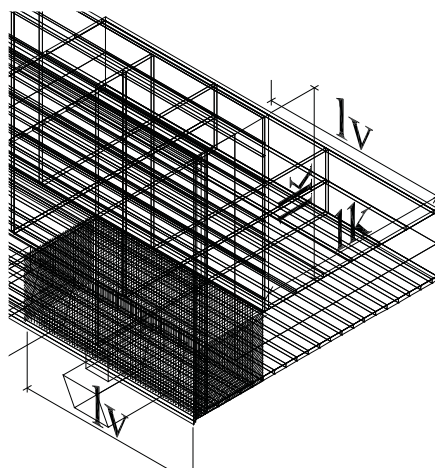
19.1 Modeller til beregning af linjetabskoefficienter

De konstruerede modeller i *COMSOL* er beskrevet i afsnit 18.6. Disse modeller benyttes til beregning af linjetabskoefficienter i form af en todimensionel varmestrøm, men i disse beregninger er nogle af modellerne ændret lidt, hvilket vil blive beskrevet i det følgende. Derudover vil det også fremgå hvordan den vandrette og lodrette længde af kuldebroen er defineret i de forskellige modeller samt hvilket område linjetabskoefficienten beregnes for.

Fundament

Der er ikke lavet ændringer i modellen for fundamentet. På figur 19.1 kan det ses hvordan den vandrette længde, l_v og lodrette længde, l_k for den endimensionelle varmestrøm er defineret.

Som det kan ses på figur 19.1 benyttes der indvendige mål for den vandrette og lodrette længde af kuldebroen i de endimensionelle varmestrømsberegninger. For de todimensionelle varmestrømme benyttes de udvendige flader for den samlede linjetabskoefficient. Til linjetabskoefficienterne for henholdsvis gulv og



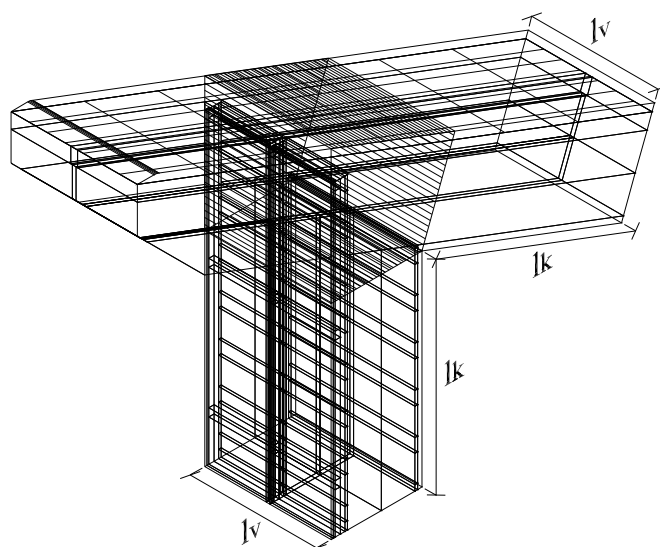
Figur 19.1: Figuren viser den vandrette og lodrette længde af kuldebroen for fundamentet.

væg benyttes de indvendige flader i *COMSOL* modellen. Den samlede linjetabskoefficient beregnes for det skraverede område på figur 19.1, hvilket er hjørnesamlingen mellem væg og gulv. Derudover beregnes der en linjetabskoefficient for henholdsvis væg og gulv separat.

Tag

I denne model er det valgt, at se bort fra udhænget på taget dvs. at taget stopper ved ydersiden af væggen. Det er vurderet, at udhænget ikke har en indvirkning på en evt. kuldebro og derfor ikke er relevant. Den todimensionelle varmestrøm fra *COMSOL* beregnes som en gennemsnitlig varmestrøm fordelt ud over den valgte udvendige flade. Det er ligeledes den udvendige flade der er brugt for vægstykket til den todimensionelle varmestrøm. På figur 19.2 kan definitionen af den vandrette og lodrette længde for endimensionelle varmestrømsberegninger ses, samt området linjetabskoefficienten beregnes for, hvilket er det skraverede område på figuren. Der beregnes desuden, ligesom for fundamentet, et linjetab for henholdsvis tag og væg separat.

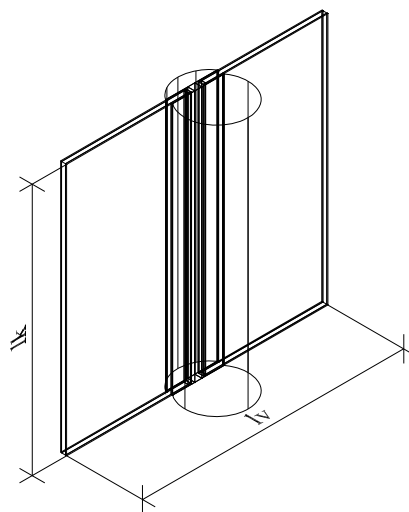
Den samlede linjetabskoefficient for modellen beregnes for hjørnesamlingen mellem væg og tag.



Figur 19.2: Figuren viser den vandrette og lodrette længde af kuldebroen for tagkonstruktionen.

Glasparti

Denne model er ikke ændret og på figur 19.3 kan l_k og l_v for hele modellen ses.



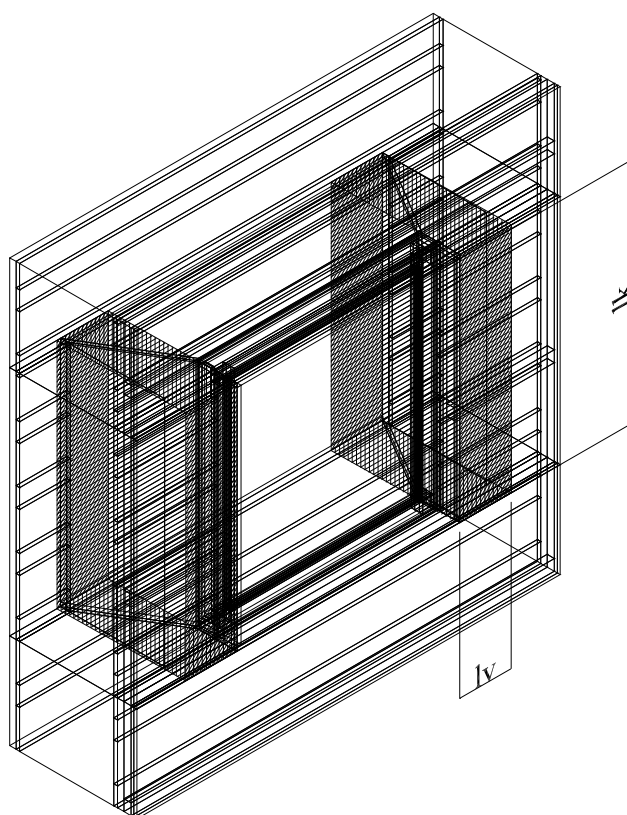
Figur 19.3: Figuren viser den vandrette og lodrette længde af kuldebroen for glaspartiet.

19.1 Modeller til beregning af linjetabskoefficienter

Linjetabskoefficienten for denne model beregnes for douglas gran søjlen i forhold til kun glas dvs. at den endimensionelle varmestrøm beregnes for et helt stykke glas og holdes op imod den todimensionelle varmestrøm fra *COMSOL*. I *COMSOL* består modellen af to stykker glas og en douglas gran søjle. Herved kan det beregnes hvor stor betydning douglas gran søjlen og det lille mellemrum mellem de to stykker glas har i form af en linjetabskoefficient.

Vinduer med skrå og lige lysning

Disse modeller er ligeledes blevet ændret. Vægstykkerne over og under vinduet medtages ikke i beregningerne, idet disse ikke er relevante. Linjetabskoefficienterne i disse modeller beregnes for lysningerne ved vinduet og herefter sammenlignes linjetabskoefficienterne for at kunne fastslå, om den lysning er bedre i forhold til kuldebrovirkning end den skrå lysning, som det er vurderet i afsnit 18.7.5. Definition af l_k og l_v for de endimensionelle varmestrømsberegninger for modellerne kan ses på figur 19.4. Længderne er ens på begge modeller og derfor vises det kun for den ene model her. Det samme gælder for det område som linjetabskoefficienterne beregnes for, som ligeledes kan ses på figur 19.4 som det skraverede område.



Figur 19.4: Figuren viser den vandrette og lodrette længde af kuldebroen for vinduerne.

For den todimensionelle varmemstrøm, for lysningerne, i *COMSOL* benyttes samme flade som markeret på figur 19.4 som l_v . Det samme gælder for l_k , som ligeledes er det samme for både den endimensionelle og todimensionelle varmemstrøm. For stykket som indeholder både vægstykke og vindue er den todimensionelle varmemstrøm i *COMSOL* beregnet for hele den indvendige bredde af modellen minus lysningen. Den endimensionelle varmemstrøm for væg og vindue er beregnet for hele vægstykket uden lysning og vindue med den inderste ramme dvs. at det resterende træ udenom vindue ikke medregnes her.

Beregning af de endimensionelle varmemstrømme er vist i det efterfølgende afsnit.

19.2 Beregning af linjetabskoefficienter

Til beregning af linjetabskoefficienter i konstruktioner benyttes den todimensionelle varmemstrøm som kan beregnes i et simuleringsprogram, som anvender numeriske løsningsmetoder. I disse beregninger benyttes programmet *COMSOL*, som tidligere nævnt. Derudover skal den endimensionelle varmemstrøm beregnes for konstruktionen. Beregningerne for linjetabskoefficienterne kan ses i excelarket *Kuldebroberegning.xls* på bilags CD'en. I bilag I er metoden til beregning af kuldebroer ifølge [DS 418 2005] beskrevet. Beregningsmetoderne fra [DS 418 2005] bruges som inspiration til disse beregninger.

Udtrykket til beregning af den endimensionelle varmemstrøm kan ses i formel (19.1).

$$\Phi_{1Dim} = U \cdot A \cdot \Delta t \quad (19.1)$$

Hvor

Φ_{1Dim} er den endimensionelle varmemstrøm. [W]

U er transmissionstallet for det valgte snit i konstruktionen. [W/m°C]

A er arealet af det betragtede udsnit. [m²]

Δt er temperaturforskellen mellem inde og ude. [°C]

U -værdien for den endimensionelle varmemstrøm beregnes efter øvre og nedre grænseværdi. Formlen for den øvre grænseværdi kan ses i formel (19.2).

$$U'_{\text{øvre}} = \frac{1}{R_i + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e}{\lambda'} + \frac{e_2}{\lambda_2} + R_u} \quad (19.2)$$

Hvor

19 Linjetabskoefficienter

U' er den øvre grænseværdi for transmissionskoefficienten. [$\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$]
 R_i og R_u er henholdsvis den indvendige og udvendige overgangsisolans. [$^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$]
 e er tykkelsen af materialelaget. [m]
 λ er varmeledningsevnen for materialerne. [W/mK]
 λ' er den arealvægtede varmeledningsevne for det inhomogene materialelag. [W/mK]

For den øvre grænseværdi arealvægtes λ -værdien for det inhomogene lag, som i disse modeller er isoleringslaget pga. det gennembrydende spærtræ.

Formel (19.3) viser formelen for den nedre grænseværdi.

$$U''_{\text{nedre}} = \frac{A_1 \cdot U_1 + A_2 \cdot U_2}{A_1 + A_2} \quad (19.3)$$

Hvor

U'' er den nedre grænseværdi for transmissionskoefficienten. [$\text{W}/^\circ\text{Cm}^2$]
 A_1 og A_2 er arealerne for materialerne i det inhomogene lag. [m^2]
 U_1 og U_2 er transmissionskoefficienterne for materialerne i det inhomogene lag. [$\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$]

For den nedre grænseværdi beregnes to transmissionskoefficienter for homogene lag. Forskellen på de to transmissionskoefficienter er, at de beregnes med hvert deres materiale fra det inhomogene lag. I dette tilfælde betyder det, at den ene transmissionskoefficient beregnes med en homogent lag af spærtræ i stedet for det inhomogene lag, mens den anden transmissionskoefficient beregnes med en homogent lag af halm. De beregnede transmissionskoefficienter arealvægtes herefter, som vist i formel (19.3).

For at få en samlet transmissionskoefficient vægtes den øvre og nedre grænseværdi, som vist i formel (19.4).

$$U = \frac{2 \cdot U' \cdot U''}{U' + U''} \quad (19.4)$$

Linjetabskoefficienten beregnes ud fra formel (19.5).

$$\psi = \frac{\Phi_{2Dim} - \Phi_{1Dim}}{l_k \cdot \Delta t} \quad (19.5)$$

Hvor

ψ er linjetabskoefficienten for den valgte konstruktion. [W/m°C]

Φ_{2Dim} er den todimensionelle varmestrøm. [W]

Φ_{1Dim} er den endimensionelle varmestrøm. [W]

l_k er længden af kuldebroen. [m]

Resultaterne af beregningerne kan ses i det følgende afsnit.

19.3 Resultater af linjetabsberegninger

I det følgende vil resultaterne for de forskellige modeller bliver vist og vurderet.

Fundament

Der er beregnet ialt tre forskellige linjetabskoefficienter for denne model, som er for henholdsvis væggen, gulvet og tilsidst et samlet linjetab. Alle linjetabskoefficienterne kan ses i tabel 19.1.

19 Linjetabskoefficienter

Konstruktioner	ψ [W/m°C]
Væg	- 0,114
Gulv	0,007
Samlet	- 0,025

Tabel 19.1: Linjetabskoefficienter for model af fundament.

Den todimensionelle varmestrøm for henholdvis vægstykket og gulvet separat indeholder ikke hjørnesamlingen mellem væg og gulv. Linjetabskoefficienten for væggen viser, at linjetabet i denne konstruktion er neglicibel, idet den er negativ. Dette skyldes sandsynligvis, at det materiale som gennembryder isoleringslaget, i dette tilfælde spærtræ, har en varmeledningsevne mindre end 0,3 W/m°C.

For gulvet er linjetabskoefficienten ikke negativ, som det kan ses i tabel 19.1, men den er stadig neglicibel, idet den ikke overstiger 0,02 W/m°C fra [DS 418 2005] eller 0,1 W/m°C, som er kravet for passivhuse.

Den samlede linjetabskoefficient inkludere hjørnesamlingen mellem væg og gulv samt vægstykket og gulvet. Denne er ligeledes neglicibel, idet den er negativ. Det betyder, at der ikke er en kuldebro af betydning i hjørnesamlingen mellem væg og gulv, samt i væg og gulv hver for sig. Det er derfor ikke nødvendigt, at korrigere for kuldebroer i senere beregninger.

Tag

Der er for taget ligeledes beregnet tre linjetabskoefficienter, som kan ses i tabel 19.2.

Linjetabskoefficienten for væggen er igen negativ, som væggen i modellen for fundamentet. Derfor vil denne ikke blive vurderet yderligere her.

Konstruktioner	ψ [W/m°C]
Væg	- 0,023
Tag	0,014
Samlet	- 0,089

Tabel 19.2: Linjetabskoefficienter for model af tag.

19.3 Resultater af linjetabsberegninger

Linjetabskoefficienten for taget er ligeledes neglicibel, selvom linjetabskoefficienten for taget er på grænsen til at overskride kravet til passivhuse. Som ved de andre linjetabskoefficienter er der heller ikke i taget brugt gennembrydende materialer med varmeledningsevne over $0,3 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$, til trods for den høje værdi. Denne værdi kan måske skyldes en højere todimensionel påvirkning fra væggen.

Den samlede linjetabskoefficient er også negativ ligesom for væggen og dermed neglicibel. Det betyder, at hjørnesamlingen ikke indeholder betydelige kuldebroer og det er derfor ikke nødvendigt at korrigere energitabet i senere beregninger.

Glasparti

I denne model er der kun beregnet én linjetabskoefficient, som kan ses i tabel 19.3.

Konstruktioner	ψ [W/m $^{\circ}$ C]
Samlet	- 0,020

Tabel 19.3: Linjetabskoefficienter for model af glasparti.

Udfra tabellen kan det ses, at douglas gran søjlen her ikke har en negativ indvirkning på energitabet for glaspartiet, idet linjetabskoefficienten er negativ. Der skal derfor ikke korrigeres for dette i senere beregninger.

Vindue lige lysning

Der er beregnet tre linjetabskoefficienter for denne model, som alle kan ses i tabel 19.4.

Konstruktioner	ψ [W/m $^{\circ}$ C]
Vindue og væg	- 0,162
Lysning	0,032
Samlet	- 0,130

Tabel 19.4: Linjetabskoefficienter for model af vindue med lige lysninger.

19 Linjetabskoefficienter

Som det kan ses i tabel 19.4 er linjetabskoefficienten for vinduet og vægstykket negativ og dermed neglignibel. Derimod er linjetabskoefficienten for lysningen positiv og overholder ikke kravet for hverken traditionelle bygninger eller passivhuse. Det er derfor nødvendigt, at korrigere for dette i senere beregninger. Den positive linjetabskoefficient skyldes den brydning af vægkonstruktionen, som lysningen er.

Den samlede linjetabskoefficient er negativ ligesom for væggen og derfor neglignibel for den samlede konstruktion, som modellen indeholder.

Vindue skrå lysning

Der er ligeledes beregnet tre linjetabskoefficienter for denne model, som kan ses i tabel 19.5.

I denne model er linjetabskoefficienten for vindue og vægstykke ligeledes negativ og neglignibel. Og heller ikke her overholder linjetabskoefficienten for lysningen kravet på de $0,02 \text{ W/m}^2\text{C}$ for traditionelle bygninger eller $0,1 \text{ W/m}^2\text{C}$ for passivhuse. Derfor er det også her nødvendigt, at korrigere med denne linjetabskoefficient i senere beregninger af energitab i bygningen. Den positive linjetabskoefficient skyldes også her brydningen af vægkonstruktionen, som det er tilfældet i modellen med lige lysninger.

Den samlede linjetabskoefficient er igen negativ og neglignibel for den samlede model.

I det efterfølgende afsnit sammenlignes de to typer lysninger fra de to modeller for vinduet.

Konstruktioner	ψ [$\text{W/m}^2\text{C}$]
Vindue og væg	- 0,152
Lysning	0,060
Samlet	- 0,092

Tabel 19.5: Linjetabskoefficienter for model af vindue med skrå lysninger.

19.4 Modeller for vindue

I det følgende afsnit vil de to modeller for køkkenvinduet blive sammenlignet idet der er forskelligt udformede lysninger i de to modeller, som beskrevet i afsnit 18.6. Det har ud fra beregninger af linjetabskoefficienterne vist sig, at der er positive linjetabskoefficienter for begge type lysninger. Værdierne for lysningerne kan ses i tabel 19.6.

Konstruktioner	ψ [W/m°C]
Vindue skrå lysning	0,060
Vindue lige lysning	0,032

Tabel 19.6: Linjetabskoefficienterne for vinduet.

19 Linjetabskoefficienter

Udfra tabellen kan det ses, at ingen af linitabskoefficienter overholder kravet for passivhuse eller kravet fra [DS 418 2005].

Udfra værdierne i tabel 19.6 kan det konkluderes, at den bedste konstruktion af lysningerne er de lige lysninger, idet de har den mindste linjetabskoefficient. Den lavere linjetabskoefficient skyldes sandsynligvis det ekstra stykke væg i form af en trekant, som mangler i modellen med den skrå lysning.

En evt. løsning kunne være, at lade halmisoleringen og ydervæggen fortsætte hen foran vindueskarmen, for derved at mindske kuldebroen. Derudover kunne vinduet med fordel flyttes til enten formuren eller bagmuren. Ved f.eks. at flytte vinduet ud til formuren kan halmisoleringen føres hen foran vindueskarmen på indersiden af vinduet og det gennembrydende spærtræ i isoleringslaget kan fjernes. Det vil mindske kuldebroen og føre til en mindre linjetabskoefficient. Disse løsninger kunne muligvis mindske linjetabskoefficienten for de lige lysninger, nok til at kunne overholde kravet i [DS 418 2005]. Begge løsninger benyttes i passivhuse til at mindske kuldebroer.

Linjetabskoefficienten for de lige lysninger vil blive benyttet i beregningerne for energiforbruget i *PHPP* og *Be06*.

For at kontrollere beregningerne i *COMSOL* udføres håndberegninger af temperaturforløbet gennem konstruktionerne, som derefter sammenlignes med temperaturer fra *COMSOL*.

19.5 Kontrol af modeller i *COMSOL*

I det følgende afsnit vil værdier for temperaturfordelingerne i to af *COMSOL* modellerne blive sammenlignet med håndberegninger af temperaturfordelingerne i modellerne. De to modeller er for fundament og tag. Dette gøres for at kontrollere at modellerne i *COMSOL* er sat korrekt op. Der vil blive givet et eksempel på en håndberegning gennem konstruktionen, mens der for de øvrige håndberegninger henvises til excelark *Haandberegninger_til_comsol.xls* på bilags CD'en.

Der udføres en beregning af temperaturforløbet gennem vægkonstruktionen som eksempel. Til beregningen benyttes randbetingelserne som kan ses i tabel 19.7.

De benyttede materialeværdier kan ses i tabel B.2.

19.5 Kontrol af modeller i COMSOL

	Omgivelsestemperatur [°C]	Overgangsisolans [°Cm ² /W]
Indvendig	20	0,13
Udvendig	0	0,04

Tabel 19.7: Randbetingelser til håndberegning for vægkonstruktion.

Materiale	Varmeledningsevne [W/m°C]	Varmedfylde [J/kg°C]	Densitet [kg/m ³]
Douglas gran	0,14	2500	495
Lægter	0,14	2500	500
Lerpuds	1,5	920	1500
Forskallingsbrædder	0,14	2500	500
Spærtræ	0,14	2500	500
Isolering	0,11	1750	97,16

Tabel 19.8: Materialeverdier for vægkonstruktion i COMSOL modeller.

For at kunne beregne temperaturerne gennem konstruktionen skal varmemstrømmen pr. areal bruges og denne beregnes ud fra formel (19.6)

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{t_i - t_u}{\sum R_m} \quad (19.6)$$

$$\frac{\Phi}{A} = \frac{20 - 0}{0,13 + 0,034667 + 4,5 + 0,034667 + 1,478599 + 0,214286 + 0,04}$$

$$\frac{\Phi}{A} = 3,11$$

Hvor

Φ er varmemstrømmen. [W]

A er det betragtede areal af væggen. [m²]

t_i er omgivelsestemperaturen indenfor. [°C]

t_u er omgivelsestemperaturen udenfor. [°C]

R_m er isolansen for de forskellige materialeg. [°Cm²/W]

Overfladetemperaturen på den indvendige side beregnes efter formel (19.7).

$$t_{oi} = t_i - \frac{\Phi}{A} \cdot R_i \quad (19.7)$$

$$t_{oi} = 20 - 3,11 \cdot 0,13$$

$$t_{oi} = 19,6$$

19 Linjetabskoefficienter

Hvor

t_{oi} er den indvendige overflade temperatur.

Herefter beregnes temperaturen mellem indvendige lag lerpuds og isoleringslaget t_1 ved at benytte den beregnede indvendige overfladetemperatur i stedet for den indvendige omgivelsestemperatur.

$$\begin{aligned}t_1 &= t_{oi} - \frac{\Phi}{A} \cdot R_{lerpuds} \\t_1 &= 19,6 - 3,11 \cdot 0,034667 \\t_1 &= 19,49\end{aligned}\tag{19.8}$$

Denne temperatur benyttes til beregning af temperaturen mellem isoleringslaget og det efterfølgende lag lerpuds t_2 .

$$\begin{aligned}t_2 &= t_1 - \frac{\Phi}{A} \cdot R_{isolering} \\t_2 &= 19,49 - 3,11 \cdot 4,5 \\t_2 &= 5,50\end{aligned}\tag{19.9}$$

Som det kan ses på resultatet fra formel (19.9) sker der et stort temperaturfald henover isoleringslaget, som skyldes isoleringens høje isoleringsværdi. Temperaturen mellem lerpudslaget og hulrummet med luft t_3 kan herefter bestemmes ud fra formel (19.10).

$$\begin{aligned}t_3 &= t_2 - \frac{\Phi}{A} \cdot R_{lerpuds} \\t_3 &= 5,50 - 3,11 \cdot 0,034667 \\t_3 &= 5,39\end{aligned}\tag{19.10}$$

Den sidste temperatur inde i konstruktionen er mellem luftlaget og den udvendige beklædning i gran t_4 , som kan ses i formel (19.11).

$$\begin{aligned}t_4 &= t_3 - \frac{\Phi}{A} \cdot R_{luft} \\t_4 &= 5,39 - 3,11 \cdot 1,478599 \\t_4 &= 0,79\end{aligned}\tag{19.11}$$

Den udvendige overfladetemperatur t_{ou} beregnes i formel (19.12).

$$t_{ou} = t_4 - \frac{\Phi}{A} \cdot R_{gran} \quad (19.12)$$

$$t_{ou} = 0,79 - 3,11 \cdot 0,214286$$

$$t_{ou} = 0,12$$

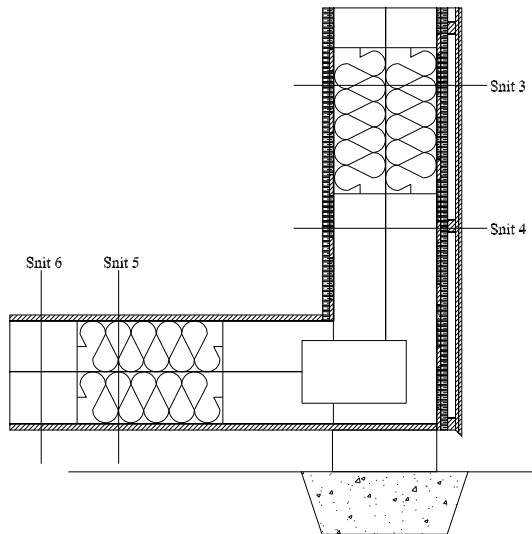
For at kontrollere at håndberegningen er udført korrekt beregnes den udvendige omgivelsestemperatur, som allerede er kendt. Dette gøres i formel (19.13).

$$t_u = t_{ou} - \frac{\Phi}{A} \cdot R_u \quad (19.13)$$

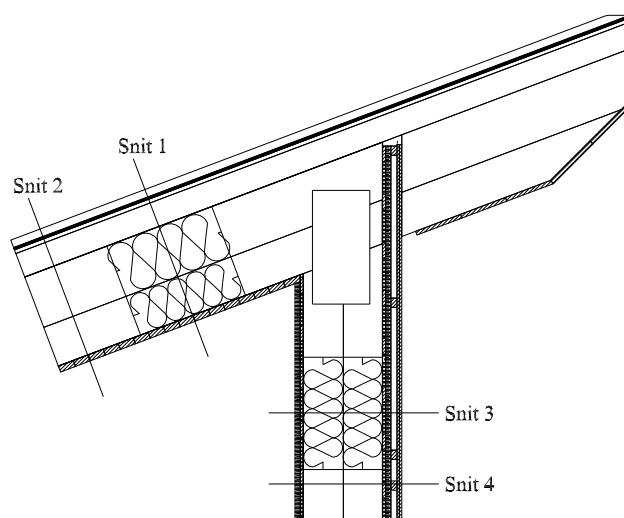
$$t_u = 0,12 - 3,11 \cdot 0,04$$

$$t_u = 0$$

Hermed er den ene af håndberegningerne for vægkonstruktionen gennemført. Resultaterne for de andre håndberegninger og værdierne fra *COMSOL* modellerne samt afvigelsen mellem håndberegninger og *COMSOL* er listet i tabel 19.9. De forskellige snit kan ses på figur 19.5 og figur 19.6.



Figur 19.5: Figuren viser et fiktivt snit da snittene går gennem både isolering og spærtræ.



Figur 19.6: Figuren viser et fiktivt snit da snittene går gennem både isolering og spærtræ.

	[°C]	t_{oi} [°C]	t_1 [°C]	t_2 [°C]	t_3 [°C]	t_4 [°C]	t_5 [°C]	t_{ou}
Snit 1	Håndbereg.	19,56	18,59	0,25				0,14
	<i>COMSOL</i>	19,49	18,50	0,12				0,07
	Afvigelse	0,06	0,09	0,13				0,07
Snit 2	Håndbereg.	19,45	18,25	0,31				0,17
	<i>COMSOL</i>	19,62	18,42	0,13				0,07
	Afvigelse	0,17	0,18	0,18				0,10
Snit 3	Håndbereg.	19,59	19,49	5,50	5,39	0,79		0,12
	<i>COMSOL</i>	19,49	19,08	4,87	4,56	0,70		0,11
	Afvigelse	0,10	0,41	0,63	0,83	0,09		0,01
Snit 4	Håndbereg.	19,41	19,25	3,12	2,50	2,40	1,16	0,18
	<i>COMSOL</i>	19,49	19,38	4,05	3,72	3,66	1,48	0,11
	Afvigelse	0,08	0,13	0,93	1,22	1,27	0,32	0,07
Snit 5	Håndbereg.	19,49	18,73	1,00				0,16
	<i>COMSOL</i>	19,30	18,51	0,87				0,14
	Afvigelse	0,19	0,21	0,14				0,02
Snit 6	Håndbereg.	19,37	18,43	1,24				0,19
	<i>COMSOL</i>	19,30	18,43	0,99				0,14
	Afvigelse	0,07	0,00	0,24				0,06

Tabel 19.9: Resultater fra håndberegninger af temperaturforløb

Ud fra tabel 19.9 kan det ses, at resultaterne fra *COMSOL* og håndberegningerne stemmer næsten overens, hvilket betyder at modellerne i *COMSOL* højst sandsynlig er sat korrekt op. De små afvigelser kan skyldes afrundningsfejl eller forskelle på beregningsmetoder i *COMSOL* og håndberegningerne. Fordi programmet *COMSOL* beregner tredimensionelle varmestrømme, kan der være påvirkninger fra andre retninger, som ikke er medtaget i håndberegningen af den endimensionelle varmestrøm og dette kan derfor også være en grund til afvigelserne. De lidt større afvigelser for snit 4 kan skyldes, at temperaturen fundet i *COMSOL* er fra et snit gennem vægkonstruktionen med en bredde, som tykkelse af spærtræet dvs. 0,047 m. På grund af denne smalle bredde har den todimensionelle virkning en stor effekt i *COMSOL*, mens der ikke tages hensyn til dette i håndberegningerne. Beregningerne for vægkonstruktionen i modellen med fundamentet kan ses i excelarket *Haandberegninger_til_comsol.xls* på bilags CD'en. For disse beregninger er afvigelserne større end dem vist i tabel 19.9, hvilket skyldes modelopsætningen i *COMSOL*. Det har i fundamentsmodellen ikke været mulig, at udtage temperaturer for bredden af spærtræet, men kun den fulde bredde af modellen. Det betyder, at temperaturerne fra *COMSOL* bliver kraftigt påvirket af isoleringslaget osv., hvilket ikke er tilfældet i håndberegningerne.

20 Målinger i Friland

Det er valgt at lave forsøg på huset i Friland, beskrevet i afsnit 18.1. I forsøget vil der blive taget termografibilleder og udført en blowerdoor-test. Der vil blive taget termografibilleder før forsøget samt under blowerdoor-testen, dette vil formentlig gøre evt. utætheder mere fremtrædende. I de følgende afsnit vil det blive beskrevet hvordan et sådant forsøg med blowerdoor-test og termografering skal udføres, mens det i kapitel 21 er beskrevet, hvordan forsøget blev udført i praksis.

20.1 Blowerdoor-test

En blowerdoor-test bliver udført på en bygning, for at vise hvor tæt klimaskærmen er. Blowerdoor-testen bliver i dette projekt udført for at kontrollere om et hus, der er konstrueret med fintsnittet halm overholder tæthedskravene i bygningsreglementet.

Blowerdoor-testen udføres ved hjælp af et dørpanel der erstatter en yderdør i klimaskærmen. I dette panel placeres der en ventilator, hvormed der kan laves over- eller undertryk i bygningen. Til at bestemme størrelsen af over- eller undertrykket i bygningen benyttes der i dette tilfælde en styreenhed, som er forbundet til ventilatoren samt slanger udenfor og inde i bygningen. Disse slanger måler trykforskellen mellem ude og inde, samtidig med får styreenheden information fra ventilatoren om hvor meget luft denne leverer for at holde det ønskede over- eller undertryk. Der udføres et antal målinger, i [DS/EN 13829 2001] er 8-10 målinger anbefalet.

Forsøget bør begyndes med den største trykforskel, som er anbefalet til $\Delta P \pm 100 \text{ Pa}$ i programmet *Door Fan*, som følger med til blowerdoor'en. Desuden er det anbefalet at lave en logaritmisk fordeling af punkterne og minimumsværdien bør være 10 Pa. Når en blowerdoor-test udføres er det nødvendigt at tætnes alle "ønskede" utætheder, som ventilation, emhætte, afløb, ventilationsspalter på vinduer og brændeovn hvis der er sådan en dvs. alt der er lavet for at bryde klimaskærmen. Disse utætheder lukkes oftest med tape, her er det vigtigt at

benytte tape der er velegnet på de enkelte overflader og som ikke efterlader mærker efter testen er udført.

Hvis der findes en brændeovn i bygningen der har været brugt bør der ikke testes med undertryk i bygningen, da sod og aske med stor sandsynlighed vil blive trukket ud i rummet. Hvis der ikke forefindes sådanne forhindringer for testen bør testen laves både med over- og undertryk, da dette vil hjælpe med til at eliminere fejl ved f.eks vindtryk og naturlige drivkræfter. Dette kan gøres forholdsvis simpelt ved at vende ventilatoren i døren.

Efter opsætning af udstyr og tætning af bygningen kan testen udføres.

20.2 Termografibilleder

Termografibilleder tages med et kamera der omdanner varmestråling fra en overflade til en temperatur, derfor er det vigtigt at kende de enkelte strålingstal, så termografibilledet kan korrigeres for at få en mere præcis temperatur. Strålingstal kan findes ved tabelopslag. Udover strålingstallene for overfladerne er det også vigtigt at måle og notere indvendige og udvendige temperaturer, vind- og fugtforhold, overskyethed samt evt. nedbør.

Under termograferingen er det anbefalet at tage termografibilleder af det samme sted fra flere forskellige vinkler, for at kunne vurdere om evt. variationer i overfladetemperaturerne skyldes refleksion.

Ved undersøgelse af utætheder skal termograferingen foretages på den side af bygningen hvor det laveste tryk er dvs. hvis der skabes undertryk inde i bygningen skal termograferingen foregå indenfor.

Under termograferingen er termografikameraet placeret på en stativ for at undgå rystelser og dermed upræcise billeder.

Der tages to sæt billeder af bygningen, den ene hvor huset står til normal benyttelse, mens det andet sæt billeder tages, mens der bliver udført en blowerdoor-test. Begge sæt billeder bliver taget indenfor.

Det første sæt termografibilleder bliver taget for at skabe et tydeligt overblik over hvor kuldebroer og utætheder befinder sig i praksis. Temperaturforskellen på ude og inde vil være med til at vise de steder i konstruktionen hvor der kommer en større mængde varme ud. Det andet sæt termografibilleder bliver som nævnt taget, mens der udføres en blowerdoor-test med undertryk.

20 Målinger i Friland

Blowerdoor-testen skaber undertryk i bygningen, hvilket tydeliggøre utætheder, da temperaturen her vil falde yderligere på indersiden af bygningen pga. kold luft der vil blive presset igennem utæthederne.

I det efterfølgende kapitel gennemgås forsøget udført på det valgte hus i Friland, med udgangspunkt i dette kapitel.

21 Forsøget i Friland

De følgende afsnit vil beskrive forløbet af forsøget foretaget på enpersoners huset i Friland. Derudover vil fejlkilder og mangler ved forsøget blive beskrevet samt hvilke resultater der er opnået.

Blowerdoor-testen blev udført systematisk udfra en forberedt gennemførselsliste se bilag G, hvor alle punkter blev gennemgået og tjekket.

Blowerdoor-testen er baseret på [DS/EN 13829 2001] og [Retrotec Energy Innovations Ltd. 2005], mens termograferinger er baseret på [DS/EN 13187 1999].

21.1 Forsøgsforløb

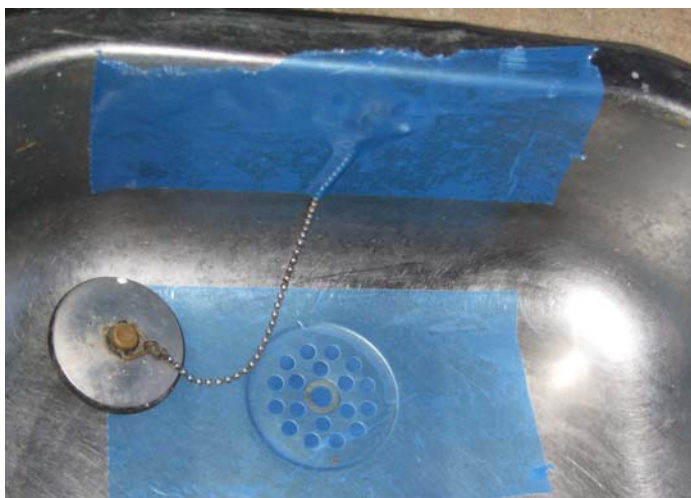
Det første der blev gjort efter ankomst til lokationen var at lægge de udvendige slanger ud. Aalborg Universitets eget vinddæmpningsudstyr blev benyttet. Det består af fire slanger i stedet for to, som er det der følger med til blowerdoor'en. Fordelen ved at benytte flere slanger er, at et overtryk, påført af vinden, i en af slangerne sandsynligvis bliver negligeret eller ulignet af påvirkningerne på de andre slanger, da slangerne placeres forskellige steder omkring bygningen. Vinddæmpningssystemet kan ses på figur 21.1.

De fire slanger blev sammenkoblet for derefter at blive tilsluttet en slange forbundet med styreenheden til blowerdoor'en.



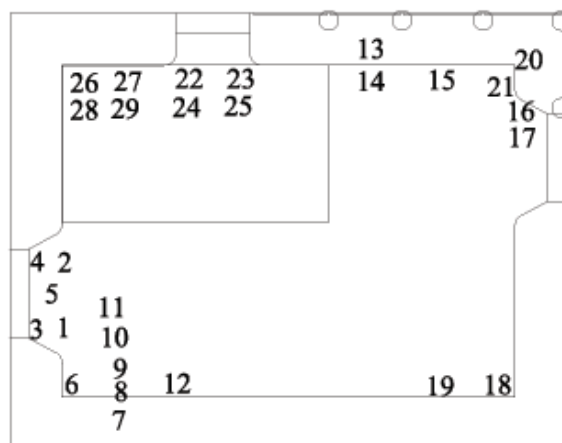
Figur 21.1: Figuren viser det benyttede vinddæmpningssystem fra Aalborg Universitet.

Herefter blev alle selvskabte åbninger tapet til indvendig, som det kan ses på figur 21.2. Selvskabte åbninger kan f.eks. være emhætte, ventilationsåbninger og afløb. Det er oftest ikke nødvendigt at tape afløbene til pga. vandlåsen, men fordi at bygningen kan udsættes for overtryk eller undertryk kan det ske at vandet i vandlåsen bliver trykket eller suget ud, hvormed der skabes en uønsket utæthed. Derfor tapes afløbene til for en sikkerheds skyld.



Figur 21.2: Figuren viser et eksempel på tapning af en selvskabt åbning i bygningen i Friland. I dette tilfælde er det afløbet i køkkenvasken.

Det første sæt termografibilleder blev taget umiddelbart før opsætningen af blowerdoor'en. På figur 21.3 kan det ses hvor termograferingen blev foretaget.



Figur 21.3: Figuren viser en oversigt for hvor termografibillederne blev taget.

Det var planlagt at blowerdoor'en skulle opsættes i bygningens hoveddør i den sydlige facade, men pga. pladsproblemer blev dette ændret til havedøren i den vestlige gavl. Opsætningen af blowerdoor'en blev gjort i henhold til anvisningerne i [Retrotec Energy Innovations Ltd. 2005]. Der blev benyttet en blowerdoor af typen Model 5 Ridgid Plastic Door Panels. Den opsatte blowerdoor kan ses på figur 21.4.



Figur 21.4: Figuren viser den opsatte blowerdoor i den vestlige facade.

Efter opsætningen blev samlingerne i blowerdoor'en tapet til for at optimere tætheden af denne.

Til styring af blowerdoor'en blev der benyttet en DM-2 Dual Channel Pressure Gauge, som blev sluttet til blowerdoor'en samt en medbragt bærbar computer med den nødvendige software.

Herefter blev de indvendige slanger placeret og forbundet med styreenheden DM-2. Der er tre slanger indenfor en gul, en blå og en grøn. Den gule slange forbindes med blowerdoor'en og kan derved måle trykket over ventilatoren. Den blå slange placeres omkring midt i bygningen, også hvis der er flere rum i bygningen. Den grønne placeres i umiddelbar nærhed af ventilatoren, men skal beskyttes mod luftstrømmen fra ventilatoren. I forsøget blev det gjort ved at placere den grønne slange i en af taskerne fra blowerdoor'en, ved siden af ventilatoren.

Der er en fjerde slange, rød, tilsluttet styreenheden, dette er slangen som er forbundet til vinddæmpningssystemet udenfor bygningen.

Den blå og den røde slange måler trykforskellen mellem inde og ude, mens den grønne slange måler trykket i det rum hvor ventilatoren er placeret for at korrigere for evt. fejl i trykket. Det kan forekomme at der i en bygning med flere rum, opstår et større tryk i rummet med ventilatoren sammenlignet med de øvrige rum. Ved at måle trykket i det rum samt trykket i de øvrige rum,

21 Forsøget i Friland

med den blå slange, kan der korrigeres for denne fejl. I dette forsøg er det ikke så nødvendigt med den grønne slange idet bygningen kun består af et rum.

Før forsøget startes skal der bestemmes et luftstrømningsområde for ventilatoren dvs. åbningsstørrelsen i ventilatoren. Dette gøres ud fra erfaringer eller ved at køre nogle testforsøg med ventilatoren.

Luftstrømningsområdet i ventilatoren blev for dette forsøg bestemt til C8 dvs. at alle otte afblændingspropper foran ventilatoren skal fjernes, som det kan ses på figur 21.5. Luftstrømningsområdet afhænger af tætheden af bygningen, jo mere tæt bygningen er jo flere huller skal være afblændet. Hvis det ikke er nok at fjerne de otte afblændingspropper kan de to ringe foran ventilatoren fjernes.



Figur 21.5: Figuren viser det valgte luftstrømningsområde for ventilatoren.

Både før og efter forsøget laves en statisk trykmåling for at kontrollere at trykforskellen mellem indenfor og udenfor ikke overstiger ± 5 Pa, for så er testen ugyldig. Skulle det ske, at trykforskellen overstiger det tilladte kan dette måske skyldes, at slangerne udenfor bliver påvirket af vinden. Det kan derfor være en god ide, at forsøge at beskytte slangerne mod vinden ved at ligge dem i læ. Der var ikke problemer med vindpåvirkning i dette forsøg og derfor kunne forsøget med undertryk påbegyndes. Resultaterne og aflæsning af værdier blev foretaget automatisk i Retrotec's program *Door Fan*. Forsøget bestod af både overtryk og undertryk, hvor ventilatoren i blowerdoor'en blev vendt mellem de to.

Under forsøget med undertryk blev der ikke registreret ændringer i klimaskærmen udover en smule halm som dryssede ned fra tagkonstruktionen inde i bygningen. Det andet sæt termografibilleder blev taget under dette forsøg idet den kolde luft udefra bliver trukket ind igennem evt. utætheder og derved tydeliggøre utætheder i konstruktionen. Dette gør det muligt, at skille utætheder fra kuldebroer.

Ventilatoren blev vendt, så forsøget med overtryk kunne påbegyndes efter samme fremgangsmåde som for undertryk. Der blev ikke ændret på luftstrømningsområdet. Her blev der ligeledes ikke registreret ændringer i klimaskærmen.

Før og efter forsøget blev der målt fugt og temperatur indenfor og udenfor. Derudover blev vindforholdene registreret ud fra Beufort skalaen.

21.2 Fejl og mangler ved forsøget

I det følgende vil blive givet en beskrivelse af fejlkilder og mangler ved forsøget foretaget i bygningen i Friland.

I bygningens konstruktion er der sket skader pga. problemer med mus. Det formodes derfor, at der nogle steder er huller i papirlaget mellem halm og ler på begge sider af isoleringen. Det vides ikke hvor skaderne er sket eller omfanget af disse, og det må derfor betragtes som en fejlkilde i forsøget. Det vides heller ikke om musene har forårsaget andre skader i konstruktionen. Skaderne kan give udslag i kuldebroer eller utætheder i konstruktionen, som ellers ikke ville forekomme på disse steder. Det vurderes, at det har en indflydelse på resultaterne for både blowerdoor-testen og termograferingen.

Derudover er der ifølge Tina, som ejer bygningen, steder hvor der ikke er tilstrækkelig puds på væggene. Dette kan igen forårsage kuldebroer eller utætheder i konstruktionen. Det er ikke oplyst hvor disse steder befinder sig. Betydningen af dette er vurderet til det samme som ovenstående.

Det medbragte udstyr til måling af temperatur og fugt indenfor og udenfor bygningen virkede ikke optimalt på lokationen og disse værdier er derfor blevet skønnet ud fra de få hurtige målinger der blev foretaget. Det antages at målingerne svarer nogenlunde overens med den rigtige temperatur, idet udstyret blev placeret i rummet før der blev udført målinger. Dette gælder også for målingerne foretages udenfor. Disse værdier benyttes i forbindelse med blowerdoor-testen, for at korrigere værdier for luften såsom massefylde, den-

sitet osv. Det er vurderet, at dette ikke vil få en stor betydning for resultaterne i blowerdoor-testen. Derudover benyttes temperaturerne til bestemmelse af kuldebrostørrelser ud fra termografibillederne, hvor temperaturerne har en stor indflydelse på varmestrømmen gennem konstruktionerne. Det vurderes derfor, at de skønnede temperaturer her kan have en betydelig indflydelse på resultatet for kuldebrostørrelserne.

Efter afslutning af forsøget er der fundet en friskluftsventil i et vindue oppe på hemsen. Denne skulle have været tapet til, men pga. uvidenhed om dens eksistens blev dette ikke gjort. Dette kan have en betydelig indflydelse på resultaterne for blowerdoor-testen, da det er en betydelig utæthed i konstruktionen, som ikke skulle være der.

På grund af manglende tid under undertryksforsøget er hovedparten af termografibillederne i det andet sæt billeder blevet taget i et undertryk som er lavet efter afslutning af forsøget. Ventilatoren blev sat til at køre med en kraft på 50 % af ventilatorens motorkraft. Det er vurderet at dette ikke vil få betydning for resultaterne af termograferingen, idet dette bare skal foretages under undertryk.

Det er i [DS/EN 13187 1999] anbefalet, at tage flere termografibilleder af samme sted, men fra forskellige vinkler, for at undgå refleksion. Dette blev ikke gjort under forsøget i Friland, men det er vurderet, at det ikke har stor indflydelse på termografibillederne og derfor ikke vil blive et problem.

Vindforholdene for lokationen er vurderet ud fra Beaufort skalaen og DMI's vejrdato for østjylland. Der burde måske være foretaget målinger på lokationen for at få en mere præcis bestemmelse af vindforholdene. Vindhastighed og vindretning har betydning for blowerdoor-testen, idet der kan skabes overtryk på den ene side af bygningen og undertryk på den anden. Afhængig af hvor store disse tryk er og hvordan evt. utætheder er formet kan dette enten virke til gunst eller ugunst for testen og utæthederne i konstruktionen. Det vurderes, at en ikke helt præcis vurdering af vindforholdene kun kan have en minimal betydning for resultaterne af blowerdoor-testen.

I den nordlige vægkonstruktion er der et indhug i væggen hvor isoleringen mangler. Planen for dette indhug er at indsætte et køleskab. Grunden til denne konstruktionen er for at spare energi til køleskabet. I stedet for køleskabet er der på nuværende tidspunkt indsat en åben reol med køkkenredskaber. Da køleskabet ikke er indsat endnu er det ikke muligt ud fra termografibillederne at vurdere om der kunne være problemer på dette sted i konstruktionen i form af kuldebroer. I forhold til blowerdoor-testen vides det ikke om der er

21.2 Fejl og mangler ved forsøget

utætheder bag reolen, hvilket vil have en indflydelse på forsøget. Det vurderes at dette godt kan have en mindre indflydelse på resultaterne fra forsøget med blowerdoor-testen.

Den benyttede blowerdoor er ifølge [Niels Møller Bartholomæussen og Òli Pòr Jónsson 2007], utæt. Dette kan bl.a. skyldes små fejl ved opsætning af døren samt konstruktionen af døren. Det er forsøgt at tætné døren ved at tape alle revner i døren. Døren kan ikke blive helt tæt med tapen, men utætheden kan sandsynligvis mindskes nok til at nærme sig utætheden i den erstattede dør. Det er også bl.a. er med til, at gøre en forskel i valideringstesten, beskrevet i det følgende afsnit.

Termografikameraet, NEC San-ei TH9100 benyttet til termograferingen i huset har en nøjagtighed $\pm 2^\circ\text{C}$, hvilket kan have en betydelig indflydelse på senere resultater. Det vælges dog, at se bort fra denne usikkerhed, da der efterfølgende er indsat emissionstal for materialerne på termografibillederne, som beskrevet herunder. Det antages, at disse emissionstal har en tilpas lille usikkerhed til at minimere usikkerheden på termografikameraet.

Emissionstal til termografibillederne indsættes i et redigeringsprogram, for at opnå den korrekte overfladetemperatur. Disse emissionstal vælges ud fra et lignende materiale, som det benyttede til konstruktionerne i huset, men vil være generelle værdier fra tabelopslag. Der kan derfor være en mindre usikkerhed på overfladetemperaturerne fra termografibillederne. Det vurderes, at denne usikkerhed ikke vil have en indvirkning af betydning på resultaterne, som beregnes vha. overfladetemperaturerne i senere afsnit. Der kan desuden også indføres en afstand, mellem kameraet og den aktuelle overflade, i redigeringsprogrammet for at opnå en mere korrekt emission fra overfladen. Denne afstand blev desværre ikke opmålt under termograferingen og er derfor ikke mulig at indføre. Det vurderes dog, at denne heller ikke vil have en betydelig indflydelse på de senere beregnede resultater.

Termografikameraet er ikke kalibreret, hvilket skyldes at det er nyt. Det vurderes, at der kun er lille usikkerhed pga. den manglende kalibrering, da kameraet er nyt og at det derfor ikke vil have en betydning for temperaturerne på termografibillederne.

21.3 General blowerdoor-test

Der er udført blowerdoor-test for to udvalgte huse i Friland. Det ene er huset som er beskrevet i afsnit 18.1, hvilket vil blive kaldt testhuset i det følgende. Det andet hus tilhører Steen Møller, vores kontaktperson i Friland. Dette hus vil i det følgende blive kaldt valideringshus. Det er valgt at lave en blowerdoor-test på valideringshuset, fordi Steen Møller har haft et firma ude og lave en tryktest og det er dermed muligt at sammenligne resultaterne fra den professionelle test med testen udført under valideringsforsøget. I programmet *Door Fan*, som benyttes til blowerdoor-testen, udarbejdes der automatisk en rapport med data og resultater fra testen. Disse vil blive vedlagt som bilag J, som vil indeholde både testresultater fra firmaet *TætHus ApS*, testresultater fra test udført på valideringshuset samt tryktestresultater fra testhuset.

21.3.1 Valideringshuset

Før der kan udføres en blowerdoor-test er det nødvendigt at lukke alle selvskabte åbninger i klimaskærmen som tidligere nævnt. I denne valideringstest var det vigtigste ikke at alle åbninger blev lukket, men at det var de samme åbninger som TætHus ApS havde forseglet. Derfor blev alle ventilationsspjæld ikke tapet til, men bare lukket, med undtagelse af en, som var tapet til fra TætHus ApS testen, hvorfor tapen under denne test blev siddende. Det blev desuden valgt at tape blowerdoor'en til under denne test pga. utæthed, hvilket ikke blev gjort under den professionelle test. Det eneste der blev tapet til på ny var brændeovnen, som blev tapet på den måde ejeren af huset, som under testen som TætHus ApS udførte.

Ved udførsel af en blowerdoor-test skal der først indsættes nogle faste værdier som bl.a. beskriver bygningens fysiske rammer i programet *Door Fan*. Til denne validering hvor der bliver sammenlignet med et eksisterende resultat er det valgt at benytte samme fysiske rammer som ved det tidligere forsøg, dette betyder at værdierne for de fysiske rammer kommer til at se ud som i tabel 21.1.

21.3 General blowerdoor-test

	Størrelse	Enhed
Opvarmet Brutto Etage Areal	75	m ²
KlimaSkærmsAreal	190	m ²
Indre Volumen	163	m ³

Tabel 21.1: Viser værdierne for de fysiske rammer for valideringshuset.

Derudover skal der indsættes meteorologisk data før og efter en forsøgsserie. Denne forsøgsserie kan være sammensat på tre forskellige måder. Første mulighed er at der kun testes for overtryk i bygningen, dette betyder der genereres et overtryk i bygningen på minimum 50 Pa og maximum 100 Pa hvorefter der arbejdes i steps ned til omkring 10 Pa. Der skal være mellem 8-10 steps. Det samme kan gøres med undertryk, hvor der bare er ændret fortegn. Til sidst kan der udføres en test hvor der benyttes både over- og undertryk. Den sidste er den mest præcise test, da denne vil mindske fejlen ved f.eks. vindtryk på bygningens yderside, som nævnt i tidligere afsnit. Det vil sige, hvis der f.eks. er overtryk på en af ydervæggende, som følge af vindretningen og denne side er mest utæt, vil dette medføre at blæsten er med til at gøre den "mere tæt" ved overtryk i bygningen. Det er derfor valgt, at udføre testen med både over- og undertryk i bygningen. Den meteorologiske data er listet i tabel 21.2 for begge forsøg.

Som det ses af tabel 21.2 ligger det statiske tryk for valideringsforsøget en del højere, dette kan skyldes to ting, enten at der var en højere trykforskel på inde og ude, hvilket ikke er specielt sandsynligt, da det er forholdsvis højt. Den anden mulighed er, at slangerne udenfor bygningen er blevet påvirket af

		Valideringsforsøg		TætHus ApS		
		Før	Efter	Før	Efter	enhed
Barometer Trykket		101325	101325	101325	101325	Pa
Relativ Fugtighed		60	22	80	80	%
Vindstyrke		5	5	3	3	m/s
Inde Temperatur:		24	19	22	22	°C
Ude Temperatur		3	3	0	0	°C
	P01+	0	0	0	0	Pa
Statisk Tryk	P01-	-4,24	-4,19	-0,94	-0,72	Pa
	P01	-4,24	-4,19	-0,94	-0,72	Pa

Tabel 21.2: Viser den meteorologiske data før og efter forsøget for valideringshuset.

21 Forsøget i Friland

vinden, selvom det medfølgende vinddæmpningssystem til blowerdoor'en blev benyttet under valideringsforsøget. Testen er stadig gyldig, da værdierne ligger indenfor ± 5 Pa. I testrapporten i bilag J kan det ses, at der i de to tests er benyttet forskellige åbninger hhv. C6 og C8, hvilket betyder at der er fjernet hhv. 6 og 8 propper. Grunden til der ikke er benyttet samme antal åbninger er, at der i certifikatfilen der benyttes til Aalborg Universitet's blowerdoor ikke er certificering til at benytte 6 åbninger. Ved selve testen er trykpunkterne blevet fordelt logaritmisk, det er gjort da der i brugermanualen [Retrotec Energy Innovations Ltd. 2005] står at det giver et bedre resultat. Målingerne kan ses i bilag J. Resultatet kommer til at se ud på følgende måde, resultater fra valideringen i tabel 21.3 og *TætHus ApS* resultater i tabel 21.4.

			Enheder	UnderTryk	OverTryk	Gennemsnit
LuftFlow Koefficient	(CL)	l/s		15,37	52,52	
LuftFlow Karakteristik	(n)			0,78	0,55	
Resultat Faktor		%		97,51	98,60	
Flow		l/s		329,72	443,89	386,94
Luftskifte/Time	(ACH)	/hr		7,28	9,81	8,55
LG Klimaskærmsareal		l/sm ²		1,74	2,34	2,04
LG Gulv Areal	(SLR)	l/sm ²		4,40	5,92	5,16

Tabel 21.3: Viser resultaterne fra målingerne udført på valideringshuset. Flow, lufskifte og luftgennemtrængelighed er ved 50 Pa. LG i tabellen er forkortelse for luftgennemtrængelighed.

21.3 General blowerdoor-test

		Enheder	UnderTryk	OverTryk	Gennemsnit
LuftFlow Koefficient	(CL)	l/s	103,01	87,78	
LuftFlow Karakteristik	(n)		0,6631	0,7396	
Resultat Faktor		%	99,99	99,97	
Flow		l/s	382,9	440,2	411,50
Luftskifte/Time	(ACH)	/hr	8,46	9,72	9,09
LG Klimaskærmsareal		l/sm ²	2,02	2,32	2,17
LG Gulv Areal	(SLR)	l/sm ²	5,11	5,87	5,49

Tabel 21.4: Viser resultaterne fra målingerne udført på valideringshuset af TætHus ApS. Flow, lufskifte og luftgennemtrængelighed er ved 50 Pa. LG i tabellen er forkortelse for luftgennemtrængelighed

Ud fra resultaterne af de to forsøg kan det ses at der opnås et bedre resultat for valideringsforsøget end forsøget udført af TætHus Aps. En af grunden til dette kan være at blowerdoor'en i valideringstesten blev tapet til, og da TætHus ApS udførte testen var blowerdooren ikke tapet til. Derudover kan det ses ud fra tabellerne ovenfor, at der er større utætheder end hvad der tillades ved et passivhus. Under testen blev der fundet utætheder både ved at mærke med hænder eller tænde en lighter. Utætheder kunne tydeligt mærkes omkring træ/lerpuds samlinger, hvor materialerne arbejder forskelligt, som det er beskrevet i afsnit 7.1.2. Det betyder, at hvis der skal opnås en tæt konstruktion bør træet ikke gennembyrde lerpudslaget eller også skal der placeres en membran der kan arbejde både med træ og lerpuds.

21.3.2 Testhuset

Udførsel af testen på testhuset er beskrevet i afsnit 21. De åbninger der var i testhuset var en varmeveksler, en emhætte, afløb i vask og en kattelem, som kan ses på figur 21.6. Derudover var der også en friskluftsventil i et vindue oppe på hemsen, som desværre blev over set under testen, som det er beskrevet i afsnit 21.2.

Det beskedne antal åbninger skyldes, at huset er bestående af et rum. På samme måde som med valideringshuset i afsnit 21.3.1, blev der indtastet fysiske værdier for testhuset, som kan ses i tabel 21.5.

Som det kan ses ud fra tabel 21.5 er gulvarealet mærkbart mindre end klimaskærmsarealet. Det skyldes at bygningen er relativ høj, og har tykke ydervægskonstruktioner. Denne byggeform er ikke hensigtsmæssig i forhold til at nå ned på passivhus niveau, som er formålet med projektet.



Figur 21.6: Figuren viser kattelemmen i bygning i Friland.

	Størrelse	Enhed
Opvarmet Brutto Etage Areal	30	m ²
KlimaSkærmsAreal	210	m ²
Indre Volumen	100	m ³

Tabel 21.5: Viser værdierne for de fysiske rammer for testhuset.

Dernæst blev der som ved valideringshuset fundet meteorologisk data inden testen gik i gang, som kan ses i tabel 21.6. Vindhastigheden er bestemt ud fra beaufort skala, desuden er det understøttet med data fra nærmeste vejstation ved DMI som kan ses på figur 21.7.

Som det kan ses i tabel 21.6 ligger det statiske tryk mærkbart lavere end ved valideringshuset, det er fordi det tidligere nævnte vinddæmpningssystem fra Aalborg Universitet er benyttet, og dermed mindsker påvirkningen af vinden udenfor. Dermed kan det ses, at dette er med til at forbedre målingernes præcision.

Alle målinger kan ses i bilag J, mens resultaterne er vist i tabel 21.7.

Som forventet viser resultatet et højt luftskifte på $16,39 \text{ h}^{-1}$ ved et tryk på

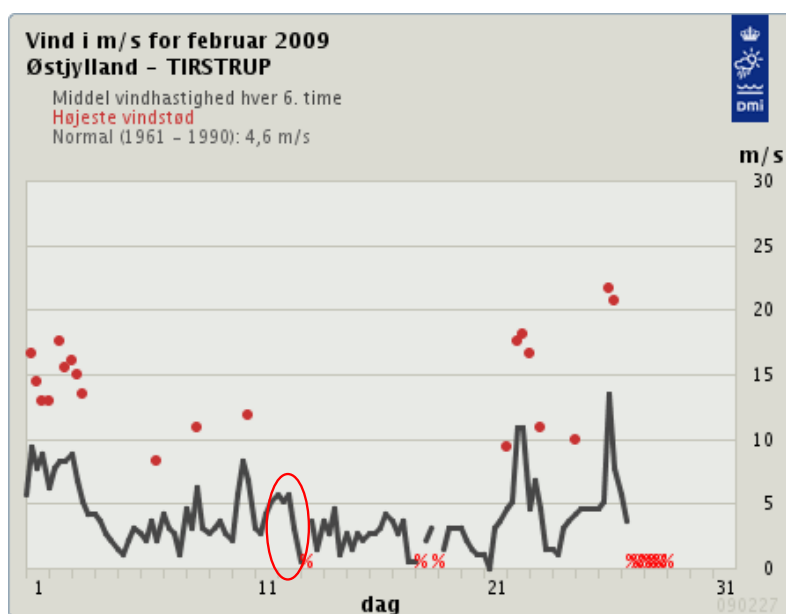
21.3 General blowerdoor-test

		Før	Efter	Enhed
Barometer Tryk		101325	101325	Pa
Relativ Fugtighed		55	50	%
Vindstyrke		5	5	m/s
Inde Temperatur:		23	5	°C
Ude Temperatur		2	2	°C
Statisk Tryk	P01+	0	0.09	Pa
	P01-	-1,75	-0,24	Pa
	P01	-1,75	-0,14	Pa

Tabel 21.6: Viser de metrologiske data før og efter forsøget for testhuset.

		Enheder	UnderTryk	OverTryk	Gennemsnit
LuftFlow Koefficient	(CL)	l/s	29,89	32,06	
LuftFlow Karakteristik	(n)		0,6874	0,6868	
Resultat Faktor		%	98,16	98,92	
Flow		l/s	440	470,56	455,28
Luftskifte/Time	(ACH)	/hr	15,84	16,94	16,39
LG		l/sm ²	2,1	2,247	2,17
LG Gulv Areal	(SLR)	l/sm ²	14,66	15,69	15,18

Tabel 21.7: Viser resultaterne fra målingerne udført på testhuset. Flow, luftskifte og luftgennemtrængelighed er ved 50 Pa. LG i tabellen er forkortelse for luftgennemtrængelighed.



Figur 21.7: Viser data for nærmeste DMI-vejrstation [Danmarks Meteorologisk Institut 2009].

50 Pa, hvilket hovedsagligt skyldes to ting. Den ene er, at huset ikke er lavet med det mål at det skulle være meget tæt, men også det skæve forhold mellem klimaskærmsareal og gulvareal har en betydning. En anden ting der kan have stor indvirkning på dette resultat er, at det har vist sig at mus har spist papirlaget, som skulle virke som vindbremse, som beskrevet i afsnit 21.2. Desuden er loftet og gulvet beklædt med brædder, hvor der ikke er gjort noget specielt for at lave det tæt. En ting der kunne gøre bygningen tættere ville være, hvis der var pudset med lerpuds under brædderne i gulvet og over brædderne i loftet eller der var placeret en tæt membran på disse steder.

Det vurderes, at tætheden af bygningen kunne forbedres mærkbart hvis der ikke var lagt så stor vægt på, at der kun må benyttes naturmaterialer.

21.4 Fejl ved vinduesventil

Som tidligere beskrevet er blowerdoor-testen udført, mens en vinduesventil var åben. Tætheden er en vigtig faktor i et passivhus, hvilket er det niveau projektet sigter imod med et halmhus. Vigtigheden af tætheden er beskrevet i

afsnit 9.1 og det er derfor nødvendigt at beregne indflydelsen på blowerdoor-testen af denne åbne vinduesventil.

Det er umiddelbart ikke muligt at vide, hvor stor en fejl der er anledning til derfor er det forsøgt at beregne flere overslag på fejls størrelse og derved vurdere indflydelsen på forsøgsresultaterne. Overslagene vil blive beregnet som enkelttabsberegninger, for vinduesventilen.

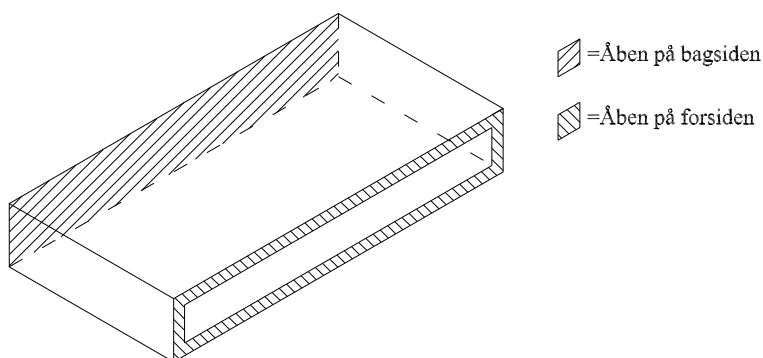
21.4.1 Vinduesventil

I forbindelse med beregningerne har det været nødvendigt at simplificere vinduesventilen. Der tages udgangspunkt i en vinduesventil som vist på figur 21.8.



Figur 21.8: Viser et billede af den vinduesventil, som der tages udgangspunkt i.

Dette er en vinduesventil hvor der trykkes på midterstykket, som herefter popper ud og derved opstår der en sprække hvor luften kan passere igennem. Den benyttes oftest i bygninger hvor der kun er udsugning fra f.eks. emhætte og badeværelse, men ingen tilførsel af frisk luft fra ventilationsanlæg. Den simplificerede vinduesventil ser ud som illustreret på figur 21.9.



Figur 21.9: Viser en perspektiv tegning af vinduesventilen.

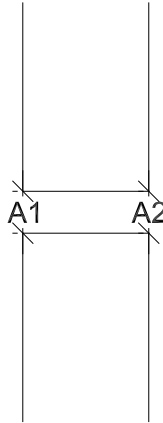
På figur 21.9 er det illustreret, at åbningen på indvendig side har samme gennemstrømningsareal som på ydersiden, dette skyldes at det midterste stykke bliver skubbet frem og dermed bliver der er større areal rundt om den frem-skudte plade. Det er vurderet, at luftmængden gennem ventilen beregnes bedst ved en enkelttabsberegning. I forbindelsen med enkelttabsberegningen er det nødvendigt at bestemme hvilke enkelttab, der kan beskrive vinduesventilen på den bedst mulige måde. Der er ikke lavet målinger eller detaljerede beregninger til at dokumentere valget, derfor vil der blive beregnet et interval, hvori det vurderes at fejls størrelse findes. Det er her valgt kun at se på enkelttab ved hhv. indløb og udløb.

En af måderne hvorpå vinduesventil kan simplificeres er ved at have et skarp-kantet indløb eller udløb. Det vil svare til den ene halvdel af modellen med to enkelttab, som vist på figur 21.10.

På figur 21.10 er der vist både et indløb og et udløb, som simplifikation af vinduesventilen. Hvis der ses isoleret på en af disse, vil dette være den simpleste måde at beskrive vinduesventilen på.

Ved en forsimpeling med to enkelttab bliver der taget højde for et indløb og et udløb. Det vil ikke blive vurderet hvad der sker i selve ventilen. Denne forsimpeling kan se ud som på figur 21.10.

De enkelte resultater vil blive beregnet og diskuteret i det efterfølgende afsnit som omhandler beregningsgangen.



Figur 21.10: Viser en illustration af vinduesventilens enkelttab.

21.4.2 Beregning af luftmængde gennem vinduesventil

Til beregning af luftmængden, er der udført en enkelttabsberegning over vinduesventilen. Formlen der benyttes ser ud som formel (21.2).

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (21.1)$$

$$(21.2)$$

Hvor

ΔP er tryktabet over enkeltmodstanden

ζ er modstandstallet for enkeltmodstanden

ρ er densiteten af det strømmende medie

v er hastigheden på det strømmende medie

For at gøre det muligt at beregne luftmængden skal hastigheden omskrives til et udtryk hvor luftmængden og gennemstrømningsarealet, A , benyttes, derefter isoleres Q som er luftmængden. Dette kan ses i formel (21.3).

$$\Delta P = \zeta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{Q}{A} \right)^2$$

$$Q = \frac{2^{\frac{1}{2}} \cdot A \cdot (\Delta P \cdot \zeta \cdot \rho)^{\frac{1}{2}}}{\zeta \cdot \rho} \quad (21.3)$$

Til beregningerne benyttes et modstandstal for vinduesventilen. Det er nødvendigt at beregne modstandstallet, da der ikke forekommer tabelværdier og

producenten heller ikke har opgivet noget modstandstal for vinduesventilen. Modstandstallet findes ved at bruge forsimpingerne for vinduesventilen i form af indløb og udløb.

For et skarpkantet indløb antages modstandstallet at være 0,5. Modstandstallet for udløbet fra vinduesventilen kan ifølge [Brorsen & Larsen 2003] sættes lig med hastighedsfordelingskoefficienten, som findes som tabelopslag i [Brorsen & Larsen 2003].

Da der som tidligere skrevet er tale om et interval, er det valgt at beregne med det højeste og det laveste modstandstal som er hhv. 0,5 for en indsnævring alene og 2,5 for et indløb og et udløb. Det betyder, at de to yderpunkter bliver beregnet ud fra følgende formel (21.4).

$$\begin{aligned}Q_{maks} &= \frac{2^{\frac{1}{2}} \cdot 0,0035 \cdot (50 \cdot 0,5 \cdot 1,29)^{\frac{1}{2}}}{0,5 \cdot 1,29} \\Q_{maks} &= 0,0436 \text{ m}^3/\text{s} \\Q_{min} &= \frac{2^{\frac{1}{2}} \cdot 0,0035 \cdot (50 \cdot 2,5 \cdot 1,29)^{\frac{1}{2}}}{0,5 \cdot 1,29} \\Q_{min} &= 0,0195 \text{ m}^3/\text{s}\end{aligned}\tag{21.4}$$

Dette betyder, at fejlen forårsaget af den åbne vinduesventil ligger i intervallet mellem 19,5 l/s til 43,6 l/s. Dette er indsat i tryktabsberegningerne og ses i afsnit 21.5.

21.5 Tryktabsberegninger justeret for åben vinduesventil

De beregnede luftmængder fra vinduesventilen indsættes i 21.7, der indsættes både minimumsværdier, kan ses i tabel 21.8, og maksimumsværdier som kan ses i tabel 21.9. Det er antaget at ventilen har lige stor betydning på over- og undertryk.

Dermed er det vist at det ikke er den afgørende faktor for om det pågældende hus ligger i nærheden af kravende til et passivhus. Men det betyder, at fejlen er af en størrelsesorden mellem 4 % og 10 %, hvilket er regnet ud fra den maksimale ændring og minimale ændring af luftskiftet.

21.6 Termografering

		Enheder	UnderTryk	OverTryk	Gennemsnit
Flow		l/s	420,5	451,06	435,78
Luftskifte/Time	(ACH)	h^{-1}	15,14	16,24	15,69

Tabel 21.8: Viser resultaterne fra målingerne udført på testhuset. Flow og luftskifte er ved 50 Pa hvor den mindste fejl er subtraheret fra de oprindelige resultater.

		Enheder	UnderTryk	OverTryk	Gennemsnit
Flow		l/s	396,4	426,96	411,68
Luftskifte/Time	(ACH)	h^{-1}	14,27	15,37	14,82

Tabel 21.9: Viser resultaterne fra målingerne udført på testhuset. Flow og luftskifte er ved 50 Pa hvor den største fejl er subtraheret fra de oprindelige resultater.

21.6 Termografering

I det følgende afsnit vil det blive undersøgt vha. termografibilleder taget i forbindelse med forsøg i Friland, hvor der optræder kuldebroer og utætheder i bygningen. Der vil blive udvalgt nogle billeder som eksempler, mens de resterende billeder kan ses i bilag H. Der er enkelte termografibilleder taget under forsøget, uden tilhørende billede pga. manglende lys, som gør at de ikke er tilgængelige.

Der er billedhenvisninger, som f.eks. "Billed 1", i figurteksterne i dette afsnit. Disse henviser til numrerne på oversigtstegningen på Tegning 06 i tegningsmappen.

Der er i forbindelse med forsøget lavet to sæt termografibilleder, som beskrevet i afsnit 20.2. Formålet med de to sæt billeder er ved sammenligning, at kunne udpege evt. kuldebroer og utætheder.

Ved denne sammenligning af de to sæt termografibilleder er det vurderet, at temperaturfaldet på vægkonstruktionerne er omkring 2–4 °C pga. temperaturfaldet i bygningen. Dette tages med i vurderingen af evt. kuldebroer. Temperaturintervallet på billederne er ændret for at kunne sammenligne billederne. De oprindelige termografibilleder kan ses i bilag H.1, hvor det kan være nemmere at se kuldebroer og utætheder.

Der er desuden indsat emissionstal for de forskellige materialer, som kan ses på billederne, for at gøre overfladetemperaturerne mere præcis. De benyttede emissionstal kan ses i tabel 21.10.

21 Forsøget i Friland

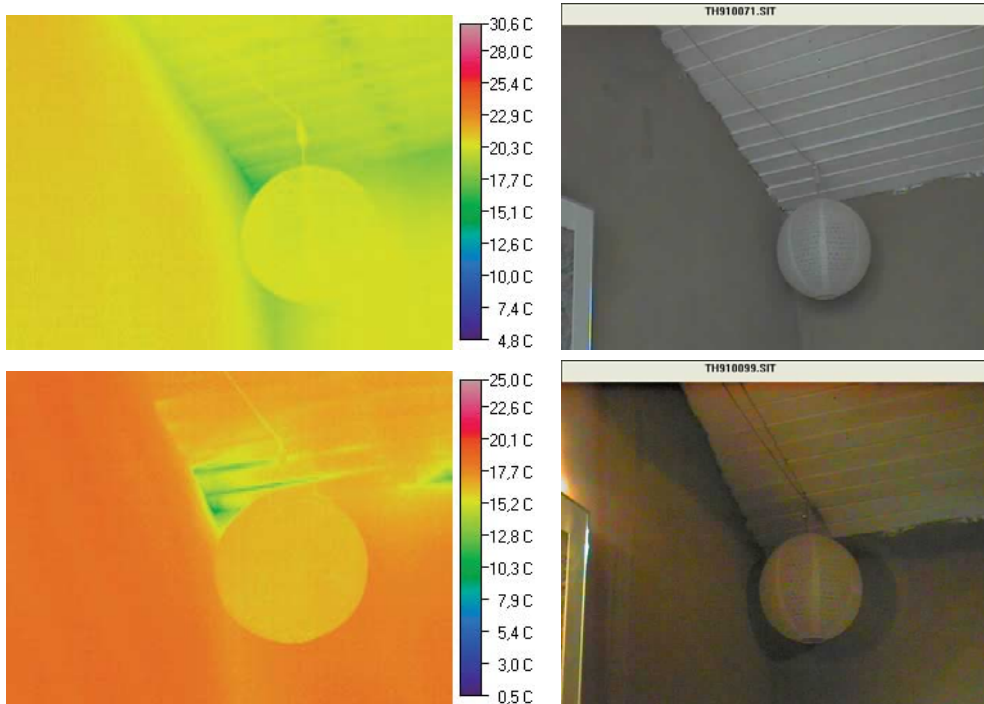
Materiale	Emissionstal [–]	Temperatur [°C]
Ler	0,39	20
Glas	0,93	20-100
Træ (eg)	0,91	38
Hvid	0,93	24
Zink, galvaniseret	0,28	38
Bomuld	0,77	20

Tabel 21.10: Tabellen viser de benyttede emissionstal, samt temperaturerne de er gældende for.

Som det kan ses ud fra tabel 21.10 er der to temperaturer der afviger fra almindelig rumtemperatur. Det vurderes, at det ikke vil have en indflydelse på præcisionen af overfladetemperaturerne på billederne, idet emissionen sandsynligvis ikke vil ændre sig betydeligt ved almindelig rumtemperatur.

21.6 Termografering

Det er ud fra billederne observeret, at der er utætheder flere steder i samlingen mellem tag- og vægkonstruktion, som det bl.a. kan ses på figur 21.11, hvor utæthederne træder tydeligt frem på det nederste billede, som er taget under forsøget med blowerdoor'en.

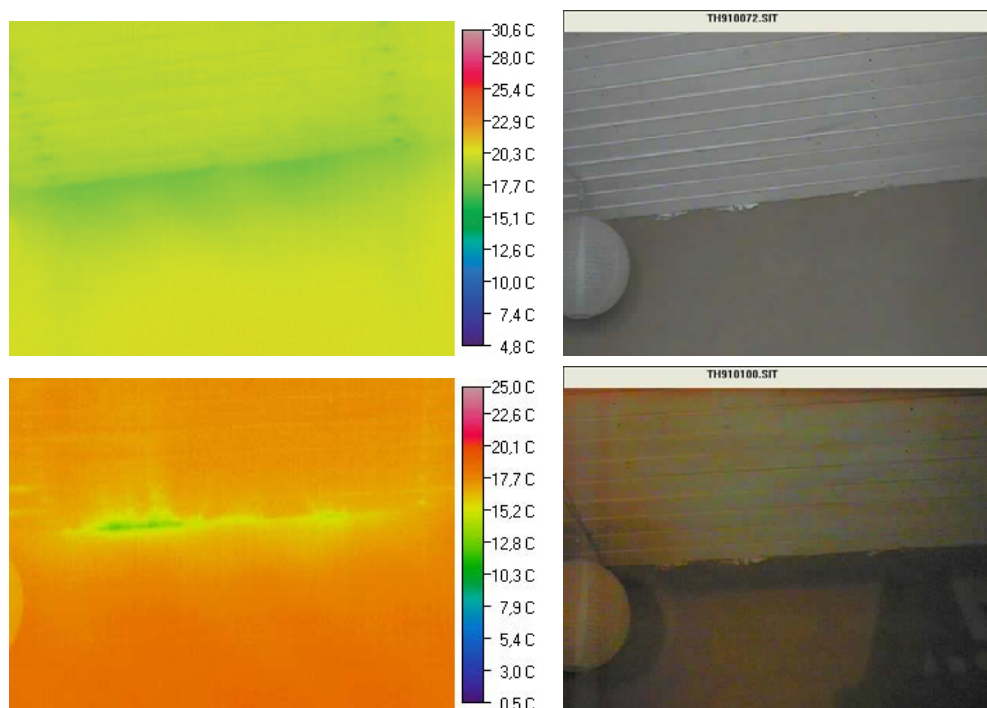


Figur 21.11: Figuren viser et eksempel på utæthed i bygning i Friland. Dette billede viser samlingen mellem tag og væg i det nordvestlige hjørne i bygningen. Billed 18. Øverst: Før forsøget. Nederst: Under forsøget.

Disse utætheder kunne antyde, at pudslaget ikke er blevet ført langt nok op enten på indersiden eller ydersiden af konstruktionen. Dette kan desuden skyldes de beskrevne problemer med mus i afsnit 21.2.

21 Forsøget i Friland

På den nordlige facade er der observeret en svag kuldebro mellem tag og væg, som kan ses på figur 21.12.



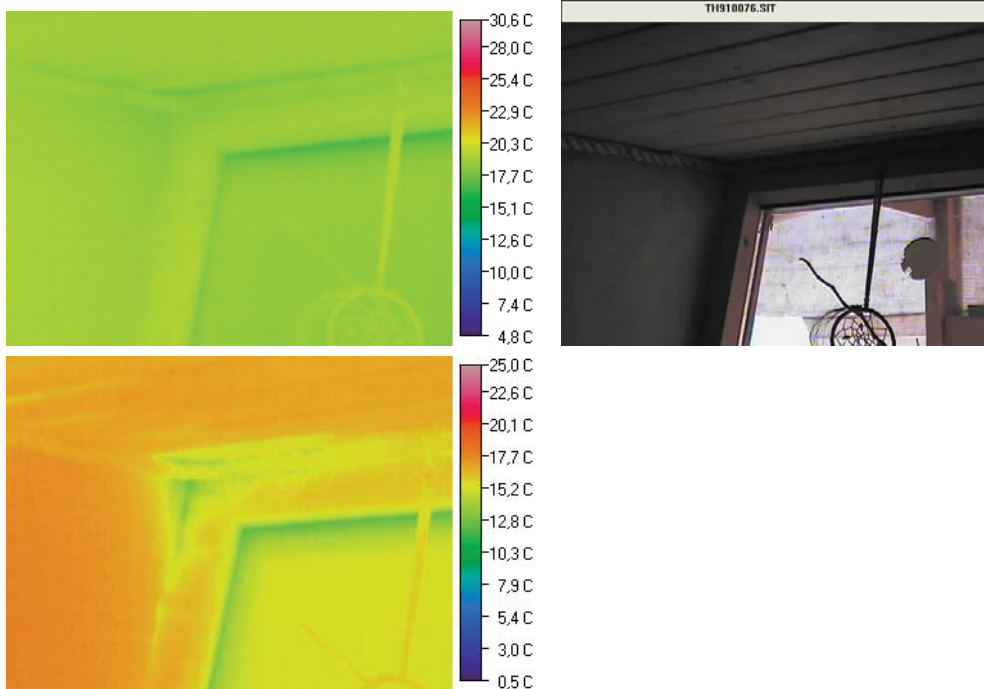
Figur 21.12: Figuren viser en kuldebro i samlingen mellem væg og tag på den nordlige facade. Billed 19. Øverst: Før forsøget. Nederst: Under forsøget.

Denne kuldebro kan skyldes manglende isolering på dette sted i konstruktionen. Der kan også ses en mindre utæthed i samlingen mellem væg og tag, hvilket tyder på manglende puds eller papirlag på dette sted.

Der er placeret to små vinduer på hemsen hvor det ene kan åbnes og det andet ikke kan. Vinduerne er monteret i den sydlige facade og derfor beskyttet af den ekstra klimaskærm i form af glas, som er lavet på denne facade. I øjeblikket består denne klimaskærm af udspændt kraftigt plastik, som tilsyneladende giver denne effekt. Denne ekstra klimaskærm og det faktum at vinduerne er placeret oppe under taget i den ekstra klimaskærm, er sandsynligvis årsagen til, at temperaturen på disse ruder er højere end ruden i køkkenvinduet i den østlige facade. De store glaspartier mod syd har en temperatur der er en anelse højere end køkkenvinduet, men lavere temperatur end vinduerne ved hemsen

idet de ikke er placeret så højt.

Ruderne i de store glaspartier er alle med varm kant for at mindske kuldebroen på dette sted. Køkkenvinduet og de to små vinduer på hemsen er ikke med varm kant, hvorfor der opstår en kuldebro rundt langs glassets kant i vinduerne. Kuldebroen der er svagt antydnet ved de store glaspartier, mellem glas og douglas gran søjler, skyldes sandsynligvis temperaturforskellen mellem søjlerne og glasset. På figur 21.13 kan der ses et eksempel på den omtalte kuldebro for et af hemsvinduerne.



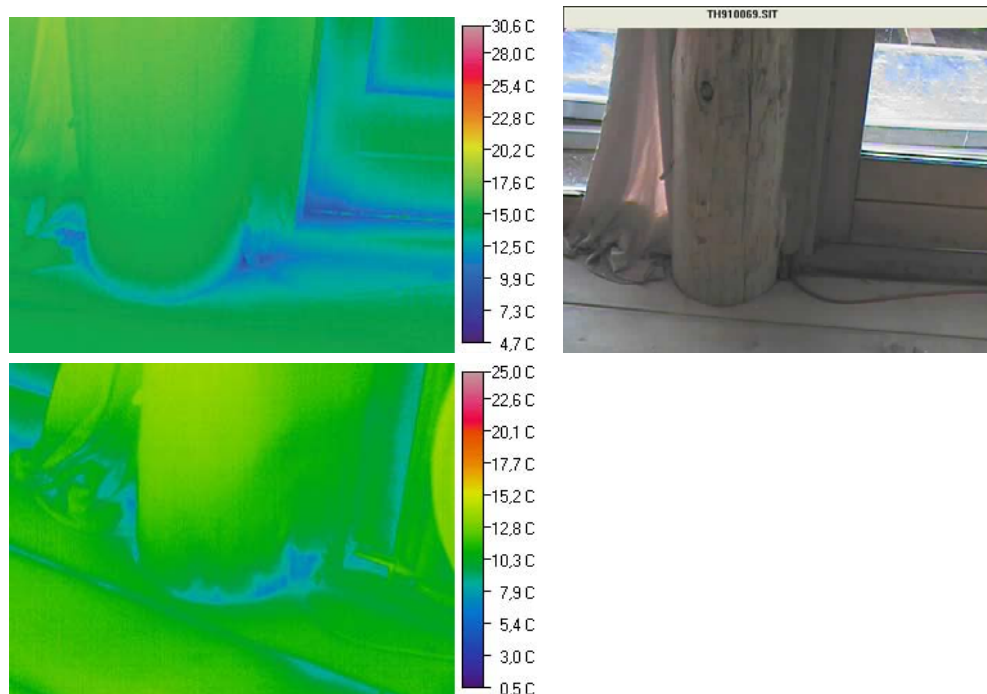
Figur 21.13: Figuren viser et eksempel på en kuldebro rundt langs glasset i ruderne. Dette billede er fra det faste vindue oppe ved hemsen. Billed 26. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

På figur 21.13 kan det ligeledes ses, at der er en utæthed i hjørnet af vindueskarmen. Denne utæthed kan skyldes revner i lerpudsen, mangel på lerpuds eller papirlag. Denne utæthed viser sig i flere af hjørnerne i vindueskarmene ved vinduerne oppe på hemsen.

I samlingerne mellem de store douglas gran søjler, som er benyttet ved de store

21 Forsøget i Friland

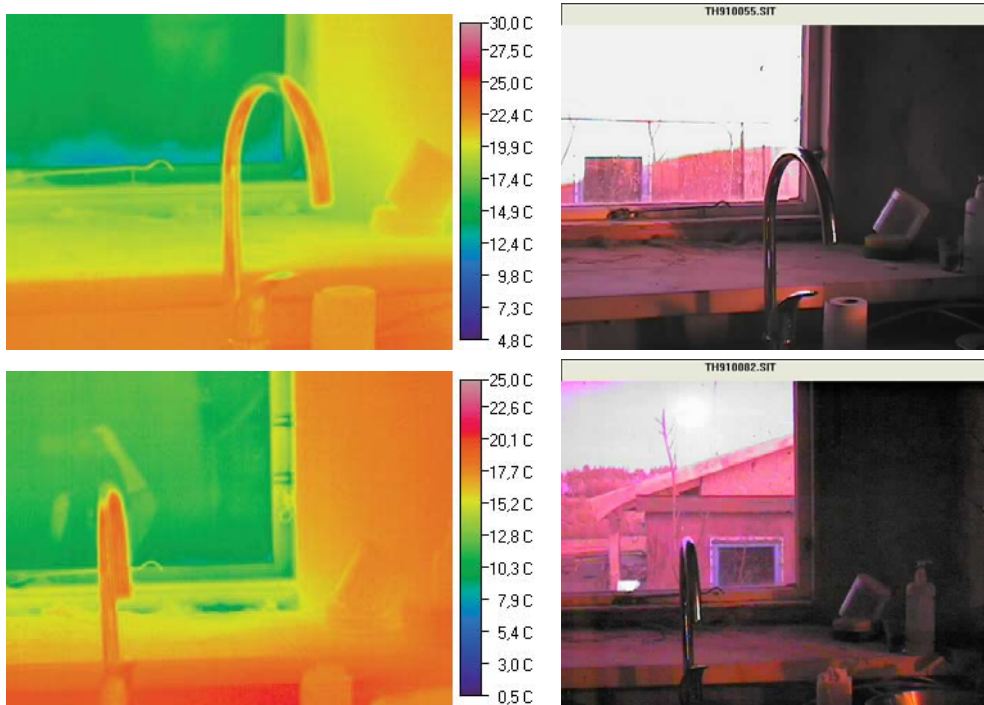
vinduespartier og gulvkonstruktionen, er der tegn på utætheder, men også en kuldebro. Der kan ses et eksempel på dette på figur 21.14.



Figur 21.14: Figuren viser et eksempel på utætheder omkring douglas søjlerne. Billed 16. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

Det kan være vanskeligt at tætnes i samlingen mellem douglas gran søjlen og gulvet eller mellem tagkonstruktion og douglas gran søjle. En evt. løsning på dette problem kunne være at indlægge en gummifuge i samlingen. Dette er gjort i samlingen mellem glaseruderne og douglas gran søjlerne, hvor der ikke er observeret problemer. Med hensyn til kuldebroen skyldes dette sandsynligvis manglende isolering i gulvet på dette sted. Halmen er blæst ind i hulrummene i både gulv, væg og tag. Det er muligt, at halmen ikke har kunnet udfylde hulrummet omkring douglas søjlen pga. det kringlede rum som søjlen forårsager.

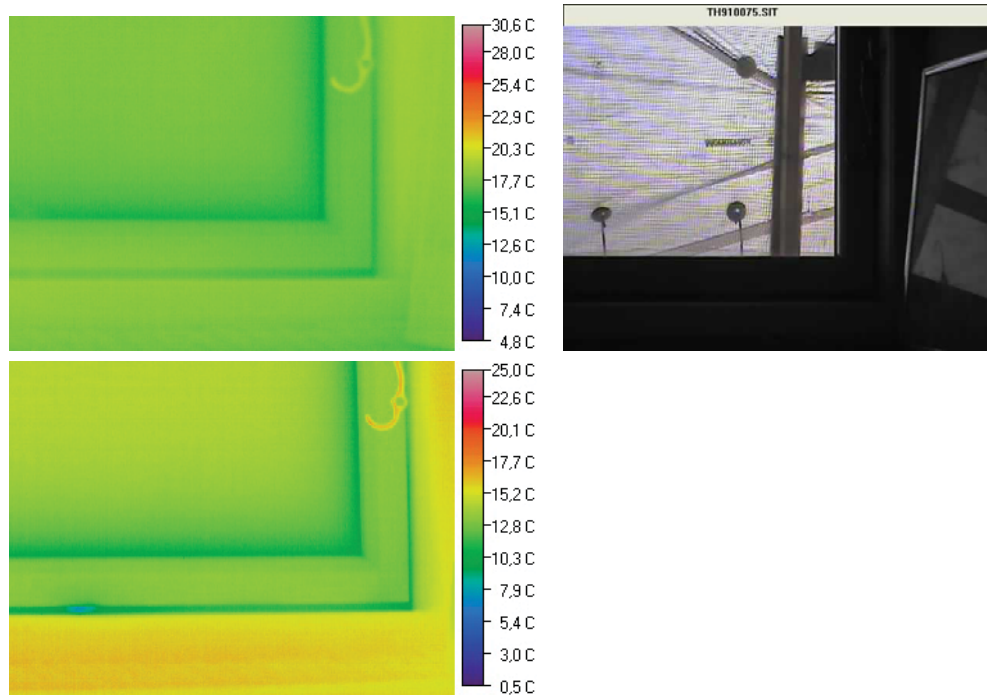
I køkkenvinduet i den østlige facade er der observeret nogle små utætheder i den lodrette højre side af vinduet, som det kan ses på figur 21.15.



Figur 21.15: Figuren viser utætheder i højre side af køkkenvinduet i den østlige facade. Billed 2.

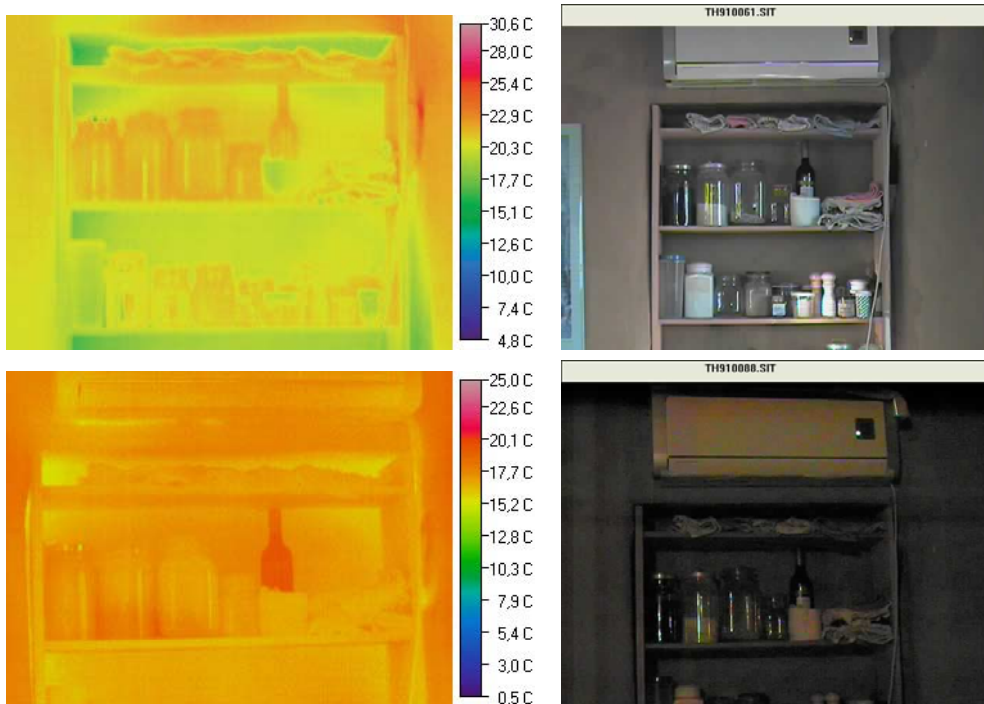
Utætheden skyldes sandsynligvis en defekt i gummilisten placeret mellem vinduesrammen og vindueskarmen. På figur 21.15 kan det ligeledes ses, at der er en utæthed mellem vindueskarmen og bordpladen. Dette skyldes sandsynligvis manglende puds eller tætning med andet materiale i denne samling.

Derudover kan der ses en kuldebro mellem karmen og rammen i vinduet, hvilket skyldes, at der kun er en gummiliste mellem disse to. Kuldebroen kan bedre ses på figur H.23 i bilag H.1. Dette er også gældende for vinduet ved hemsen som kan åbnes, som kan ses på figur 21.16, hvor der også kan observeres en utæthed mellem ramme og karm i vinduet. Dette skyldes sandsynligvis, som ved køkkenvinduet, en defekt gummiliste.



Figur 21.16: Figuren viser en utæthed i bunden af vinduet ved hemsen, i den sydlige facade samt en kuldebro mellem ramme og karm. Billed 25. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

I den nordlige væg i bygningen er der lavet et indhug i væggen, hvor det er planen at placere et køleskab, som tidligere nævnt i afsnit 21.2. Ideen med dette er, at mindske energiforbruget til køleskabet, idet bagsiden af køleskabet vil blive kølet ned af den kolde væg bagved. Omkring køleskabet skal der tætnes for at undgå utætheder og kuldebroer. Der er på nuværende tidspunkt ikke indsat et køleskab, men i stedet er der placeret en åben reol. Det betyder, at dette stykke af vægkonstruktionen i øjeblikket er en kuldebro pga. den manglende isolering, som det kan ses på figur 21.17.



Figur 21.17: Figuren viser kuldebro ved reolen på den nordlige væg. Billed 8.

Umiddelbart over reolen er der placeret en varmeveksler med en nedadrettet varmestrøm. Denne varmeveksler blev slukket ved ankomst til lokationen, hvorfor temperaturen på væggen er mere lig temperaturen på væggen bag reolen på det andet sæt termografibilleder, taget under forsøget. Billedet kan ses nedest på figur 21.17. Det er sandsynligt, at varmestrømmen fra varmeveksleren har en gunstig virkning på den øvre del af det kolde vægstykke, hvilket kan ses ved at sammenligne figur 21.17 øverst med figur 21.18, hvor det kan ses at temperaturen på væggen bag reolen er faldende ned mod gulvet. Disse billede

21 Forsøget i Friland

er taget kort tid efter, at varmeveksleren blev slukket.

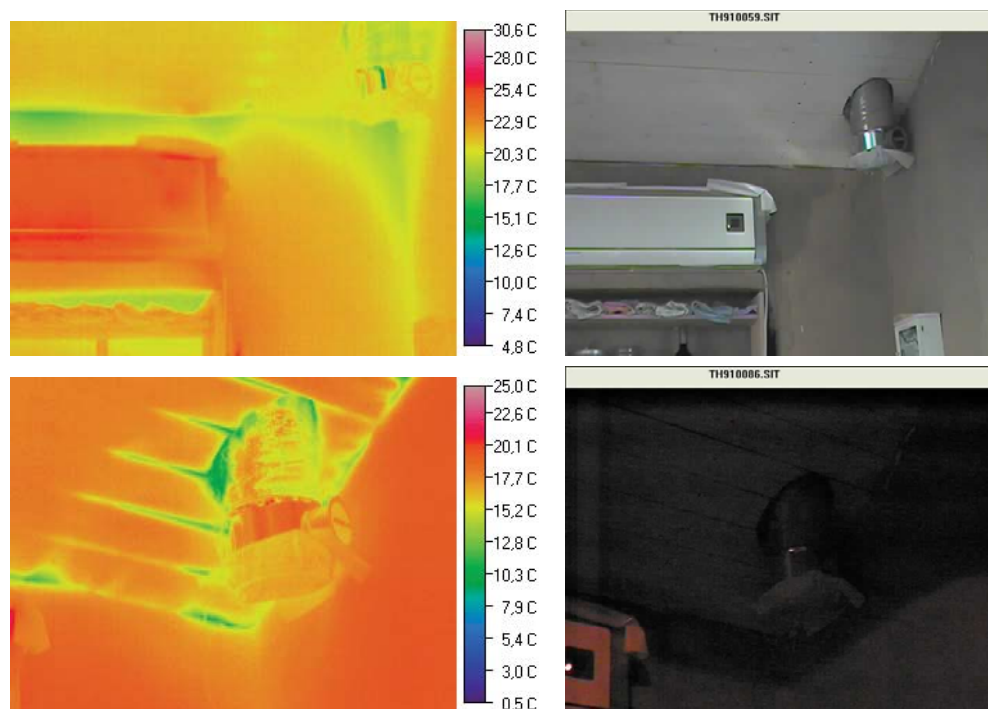


Figur 21.18: Figuren viser kuldebro ved reolen på den nordlige væg. Billedet er taget før forsøget. Billed 10.

Det er anbefalet at indsætte det planlagte køleskab eller færdiggøre vægstykket, så det svarer til de resterende vægge, for at undgå dette varmetab. Det kan ikke udelukkes, at der også findes utætheder bag reolen, men de fremtræder ikke tydeligt på termografibillederne pga. tingene på reolen.

21.6 Termografering

Over komfuret, som er placeret i det nordøstlige hjørne af bygningen, er der monteret et ventilationsrør, som gennembryder tagkonstruktionen. Dette ventilationsrør fungerer som emhætte i bygningen. Udfra figur 21.19 kan det ses, at der forefindes utætheder omkring hvor røret gennembryder konstruktionen.



Figur 21.19: Figuren viser utæthed ved gennembrydende rør i nordøstlig hjørne af bygningen. Billed 6. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

Utætheden ved denne gennembrydning skyldes sandsynligvis mangel på tætning omkring ventilationsrøret og isolering i loftkonstruktionen. Det kan også her have været svært at blæse halm ind hele vejen rundt om røret.

Ud fra observationer i dette afsnit er det vurderet, at mange af kuldebroerne og utæthederne sandsynligvis kan udbedres og derved forbedre tætheden og varmetabet igennem konstruktionerne. Disse kuldebroer og utætheder kunne sandsynligvis være undgået, ved en mere nøjagtig og omhyggelig udførsel af konstruktionen især med hensyn til tætning med ler og opfyldning af isolering. Det kan dog ikke udelukkes, at problemet med mus ligeledes har en indflydelse

på disse utætheder og kuldebroer, og konstruktionen ville måske se anderledes ud, hvis dette problem ikke var tilstede.

For at kunne bestemme hvor stor en indflydelse disse kuldebroer har på energitabet, beregnes størrelsen på kuldebroerne ud fra termografibillederne i det efterfølgende afsnit.

21.7 Kuldebrostørrelse ud fra termografibilleder

I det følgende vil størrelserne på linjetabskoefficienterne for kuldebroerne blive beregnet ud fra temperaturerne på termografibillederne samt de målte indvendige og udvendige temperaturer. Det bliver gjort for, at kunne sammenligne med de kuldebroer beregnet med *COMSOL*, som beskrevet i afsnit 19. Derudover gøres det for, at bestemme betydningen af de observerede kuldebroer i det forrige afsnit.

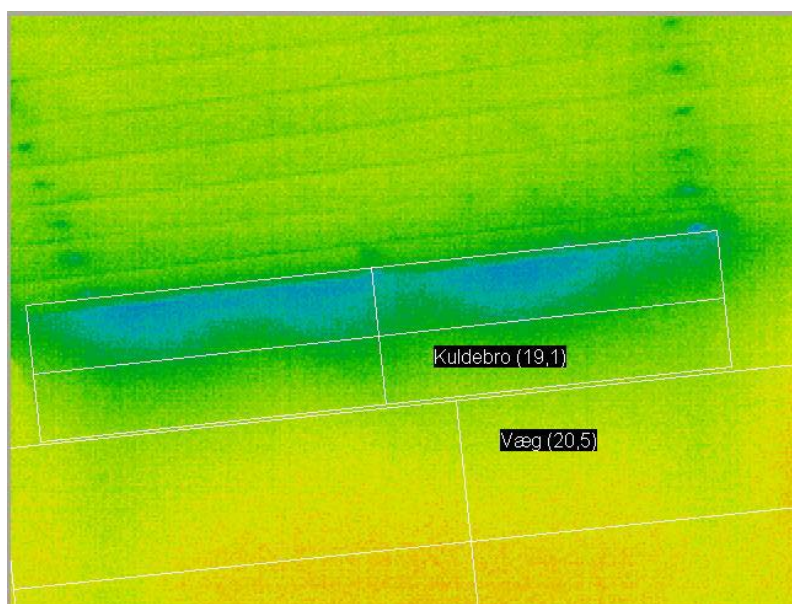
I det første afsnit vil der blive gennemgået et beregningseksempel på beregning af de nye linjetabskoefficienter. Alle beregninger kan ses i excelark *kuldebrostørrelse.xls* på bilags CD'en.

21.7.1 Beregning af kuldebrostørrelse

Eksemplet der bliver gennemgået er for et vægstykke på den nordlige facade. Ved beregningen medtages både virkningen af selve kuldebroen samt de todimensionelle varmemstrømme der måtte være i konstruktionen. Det antages, at der var en stationær tilstand under termograferingen dvs. at temperaturen ikke har ændret sig betydeligt indenfor eller udenfor. Det er termografibilleder taget før blowerdoor-testen der bruges til disse beregninger, da de ikke er påvirket af nedkøling og det ændrede tryk i huset, som opstod under blowerdoor-testen.

Termografibilledet benyttet til beregning af linjetabskoefficienten for vægstykket kan ses på figur 21.20.

Der beregnes først en varmemstrøm for et vægstykke uden kuldebro, som på figur



Figur 21.20: Figuren viser termografibilledet af vægstykket benyttet til beregning af kuldebrostørrelsen for væggen.

21.20 hedder "Væg". Det gøres ud fra formel (21.5).

$$\Phi_{væg} = \alpha_i \cdot A \cdot (t_i - t_{oi}) \quad (21.5)$$

$$\Phi_{væg} = \frac{1}{0,13} \cdot (1,1 \cdot 1) \cdot (23 - 20,5)$$

$$\Phi_{væg} = 21,2 \text{ W}$$

Hvor

$\Phi_{væg}$ er vægstykket uden kuldebro. [W]

α_i er varmeovergangstallet. [W/°Cm²]

A er det betragtede areal bestående af $(B \cdot H)$. [m²]

B er bredden af kuldebroen. [m]

H er højden af det betragtede område. [m]

t_i er den indvendige lufttemperatur. [°C]

t_{oi} er den indvendige overfladetemperatur. [°C]

Ifølge [DS 418 2005] skal der ved beregning af en linjetabskoefficient medtages 1 m af konstruktionen op til kuldebroen og derfor er højden af dette vægstykke udvidet til 1 m med samme temperatur som arealet "væg" på termografibilledet.

21 Forsøget i Friland

Herefter beregnes varmemstrømmen for et vægstykke indeholdende kuldebroen, $\Phi_{Kuldebro}$ hvilket gøres som i formel (21.5). Den indvendige overfladetemperatur er for denne beregning areal vægtet mellem kuldebroen og vægstykket uden kuldebro. Dette kan ses i formel (21.6).

$$\begin{aligned} t_{oi, arealvægt} &= \frac{(B \cdot H_{Kuldebro}) \cdot t_{oi, kuldebro} + (B \cdot H_{Væg}) \cdot t_{oi, væg}}{(B \cdot H_{Kuldebro}) + (B \cdot H_{Væg})} \quad (21.6) \\ t_{oi, arealvægt} &= \frac{(1,1 \cdot 0,3) \cdot 19,1 + (1,1 \cdot 0,7) \cdot 20,5}{(1,1 \cdot 0,3) + (1,1 \cdot 0,7)} \\ t_{oi, arealvægt} &= 20,1 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Varmestrømmen, $\Phi_{Kuldebro}$ er beregnet til 24,7 W. Med de to varmemstrømme samt arealet og den lodrette længde af kuldebroen, hvilket her svarer til bredden B , kan der bestemmes en linjetabskoefficient ud fra formel (21.7).

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{\Phi_{Kuldebro} - \Phi_{Væg}}{A \cdot l_k} \quad (21.7) \\ \Psi &= \frac{24,7 - 21,2}{(1,1 \cdot 1) \cdot 1,1} \\ \Psi &= 2,9 \text{ W/}^\circ\text{Cm} \end{aligned}$$

Hvor

Ψ er linjetabskoefficienten. [W/°Cm]

l_k er den lodrette længde af kuldebroen. [m]

I beregningen af varmemstrømmene benyttes der varmeovergangstal fra [DS 418 2005]. Varmeovergangstal afhænger af både stråling og konvektion ved overflader og beskriver overgangen mellem luft- og overfladetemperatur. Størrelsen af overgangstallet afhænger af mange faktorer som f.eks. luft- og overfladetemperatur, lufthastighed, materialer osv. Der er derfor en usikkerhed ved at benytte standard værdier. Det er derfor valgt, at beregne en varmemstrøm for vægstykket uden kuldebro ud fra U-værdien og udetemperaturen i stedet for overgangstallet og indvendig lufttemperatur. Dette gøres for, at vurdere om overgangstallet er realistisk for denne situation. Beregningen kan ses i formel (21.8).

$$\begin{aligned} \Phi &= U \cdot A \cdot (t_{oi} - t_u) \quad (21.8) \\ \Phi &= 0,23 \cdot (1,1 \cdot 1) \cdot (20,5 - 2) \\ \Phi &= 4,65 \text{ W} \end{aligned}$$

Ved sammenligning af resultatet fra formel (21.8) og formel (21.5) vurderes det, at der er en stor usikkerhed i en af de to formler. Der er andre faktorer end varmeovergangstallet der kan være skyld i forskellen på resultaterne. En af disse faktorer kan være U-værdien i formel (21.8), idet den er beregnet ud fra en antagelse om en ensartet vægkonstruktion, hvilket ikke behøver at være situationen i den virkelige konstruktion. Dertil kommer, at U-værdien er beregnet midt på et vægstykke uden hensyntagen til samlinger samt at varmeledningsevnen for isoleringen i konstruktionen, stammer fra forsøgene med hot box'en, som er beskrevet i afsnit 17.2. Komprimeringen og typen af halm er ikke nødvendigvis den samme i forsøgene og i den virkelige konstruktion og kan derfor give anledning til en forskel i varmestrømme.

En faktor som også kan have stor indflydelse på resultatet i formel (21.5), udover varmeovergangstallet, er den indvendige lufttemperatur. Som det er beskrevet i afsnit 21.2 er denne temperatur skønnet ud fra nogle korte målinger pga. problemer med det medbragte udstyr. Det betyder, at temperaturen kan være skønnet til en forkert værdi og derved beregnes der en forkert varmestrøm gennem væggen. Hvis dette skulle være tilfældet vil det ikke have en indflydelse på den beregnede linjetabskoefficient i dette afsnit, idet der benyttes samme indvendige lufttemperatur til beregning af begge varmestrømme. Det kan derimod have en indflydelse i sammenligningen af varmestrømmene i formel (21.8) og formel (21.5), idet den indvendige lufttemperatur kun benyttes i formel (21.5).

Det er selvfølgelig også muligt, at forskellen i de to resultater skyldes at der er brugt en standard værdi for overgangstallet.

21.7.2 Sammenligning af linjetabskoefficienter

I afsnit 19 beregnes linjetabskoefficienter for forskellige modeller i *COMSOL* for, at undersøge om evt. kuldebroer i de forskellige konstruktionssamlinger kan have betydning for energitabet i huset. I afsnittet blev det fundet, at linjetabskoefficienterne, undtagen for de to modeller af lysningerne ved køkkenvinduet, er uden betydning. I dette afsnit undersøges det om de samme konstruktions-samlinger, som i afsnit 19 har betydning i det virkelige hus.

Der er, i dette afsnit, ikke beregnet en linjetabskoefficient for gulvkonstruktionen, da det ikke var muligt ud fra de tilgængelige termografibilleder. Som det er beskrevet i afsnit 21.6 er der også observeret kuldebroer på termografibillederne for gulvet. Det er derfor sandsynligt, at der også ved denne konstruktionssam-

21 Forsøget i Friland

ling, i det virkelige hus, er en kuldebro af betydning. Der er ligeledes ikke beregnet en linjetabskoefficient for de lige lysninger ved køkkenvinduet, idet huset i Friland er med skrå lysninger og der er derfor af gode grunde ingen termografibilleder tilgængelige med lige lysninger.

I tabel 21.11 er linjetabskoefficienterne beregnet i afsnit 19 og ud fra termografibillederne opstillet.

Konstruktioner	Linjetabskoefficient	
	<i>COMSOL</i> [W/°Cm]	Termografibilleder [W/°Cm]
Væg	- 0,0475	0,1538
Tag	- 0,0161	0,0429
Lysning skrå	0,0740	0,0806

Tabel 21.11: Sammenligning af linjetabskoefficienter. *COMSOL* og Termografibilleder henviser til linjetabskoefficienter beregnet ud fra hhv. modeller i *COMSOL* og termografibilleder.

Ud fra tabel 21.11 kan det ses, at ingen af linjetabskoefficienterne beregnet ud fra termografibillederne overholder kravene i [DS 418 2005] eller *PHPP*, som er henholdsvis 0,2 og 0,1 W/°Cm. Det betyder, at der ikke kan ses bort fra kuldebroerne i konstruktionssamlingerne. Grunden til at disse linjetabskoefficienter ikke overholder kravene kan skyldes, at konstruktionen ikke er udført præcist som beskrevet på tegningerne, hvilket er forventet. Det er nemmere at udføre en konstruktion præcis efter tegningerne på en fabrik under kontrollerede forhold i forhold til ude på en byggeplads. Linjetabskoefficienterne i afsnit 19 er, som tidligere nævnt, beregnet ud fra informationer på konstruktionstegningerne for huset. Idet de alle overholder kravene, undtagen for to modeller, vurderes det at konstruktionsudformningen på tegningerne er korrekt med hensyn til kuldebroer. Det er derfor nødvendigt at være meget omhyggelig med udførelsen af konstruktionerne for at opnå ubetydelige kuldebroer, som på tegningerne.

For de skrå lysninger ved køkkenvinduet er linjetabskoefficienterne, som kan ses i tabel 21.11, begge positive og overholder ikke kravene i [DS 418 2005] og *PHPP*. Dette skyldes sandsynligvis den manglende isolering ved at lysningen er skrå samt det gennembrydende spærtræ, som er beskrevet i afsnit 19.4. Der er i afsnittet ligeledes givet forslag til løsninger på problemerne.

Idet huset i Friland ikke er optimalt konstrueret og der er problemer med mus osv. er det valgt ikke at medtage linjetabskoefficienterne beregnet ud fra termografibilleder, i energiberegninger i *PHPP* og *Be06*.

21.8 Konklusion på forsøg i Friland

Det følgende afsnit er en konklusion på både blowerdoor-test og termografering samt forslag til forbedringer.

Det kan konkluderes for blowerdoor-testen, at tæthedskravet for bygningen ikke er overholdt, idet der er et luftskifte på 14,821/s *pr.m*² hvor det tilladte er 1,51/s *pr.m*². Dette er inklusiv fratrækningen af gennemsnitsværdien for den beregnede fejl fra den åbne vinduesventil.

Det store luftskifte skyldes sandsynligvis, at arealet for klimaskærmen er mærkbart større end gulvarealet i huset. Dette forhold mellem arealerne gør, at der er en stor overflade i form af klimaskærmen, hvor der kan opstå utætheder, mens arealet som det beregnede luftskifte fordeles på ikke er særlig stort. Derudover er det også vurderet, at skaderne på papirlagene i væggen, pga. mus, kan have en betydelig indflydelse på utætheden, idet papirlaget skulle fungere som

vindbremse. Problemet med det skadede papir er størst på steder, hvor der er revner i pudslaget.

Ud fra dette kan det konkluderes, at bygningen sandsynligvis er en smule mere tæt end hvad testen viser, men trods dette vil den stadig langt fra overholde tæthedskravet på $1,51/s \text{ pr.m}^2$.

Ud fra termografibillederne blev det observeret, at de fleste utætheder befandt sig i samlingen mellem tag- og vægkonstruktion samt ved douglas gran søjlernes gennembrydning af gulvkonstruktionen. De observerede utætheder i samlingen mellem væg og tag kan blive forstærket af luft som trænger igennem hullerne i papirlaget. Disse utætheder skyldes sandsynligvis først og fremmest, at der mangler lerpuds i disse samlinger. Derfor kan utæthederne i disse samlinger sandsynligvis forbedres ved at udbedre evt. revner i lerpudset eller føre lerpudslaget højere op i tagkonstruktionen.

På termografibillederne er det ligeledes observeret, at utæthederne fra samlingen mellem tag- og vægkonstruktion fortsætter ind under loftbrædderne i tagkonstruktionen, hvilket sandsynligvis skyldes utætheder i papirlagene og at der ikke er et lerpudslag i tagkonstruktionen over loftbrædderne. Disse utætheder kunne måske også forbedres ved at ligge en tæt membran over loftbrædderne, så den kolde luft ikke trænger fra væggen op under loftbrædderne.

Der er kuldebroer rundt langs glasset i køkkenvinduet og de to vinduer på hemsen. Dette skyldes, at vinduerne ikke er lavet med en varm kant, men det har ikke en mærkbar betydning. Det kan sandsynligvis forbedres ved, at isolere et stykke hen foran den kolde kant.

Køkkenvinduet og det ene vindue på hemsen kan åbnes og her er der også observeret kuldebroer, mellem vinduets karm og ramme, som sandsynligvis er svær at udbedre uden at udskifte vinduerne til bedre vinduer. I køkkenvinduet og vinduet ved hemsen er der også observeret små utætheder mellem vinduets karm og ramme. Disse skyldes sandsynligvis en defekt gummiliste, som evt. kan skiftes for at forbedre dette.

Der er flere steder i bygningen hvor enten gulvkonstruktionen eller tagkonstruktionen gennembrydes af enten douglas gran søjler eller et ventilationsrør. Ved disse gennembrydninger er der problemer med utætheder, hvilket er observeret på termografibillederne. Utæthederne kan måske udbedres ved at tætnes med en form for isoleringsmateriale eller membran.

I den nordlige væg er der gjort plads til montering af køleskab i væggen. Køleskabet er ikke på plads endnu og dette bevirker, at der her er en stor kuldebro.

21.8 Konklusion på forsøg i Friland

Denne kan relativt let forbedres ved enten, at montere køleskabet som planlagt eller isolere vægstykket, som i resten af bygningen.

Det kan udfra termografibillederne konkluderes at der er flere steder med utætheder og kuldebroer. Derudover kan det konkluderes, at de fleste af utæthederne og enkelte af kuldebroerne kan forbedres med simple indgreb og mindre omkostninger. Dette skulle forbedre tætheden i bygningen og mindske varmetabet.

22 *PHPP*- og *Be06*- beregninger

I det følgende vil *PHPP*- og *Be06*-beregningen for henholdsvis komfort huset og det fiktive halmhus blive beskrevet samt sammenlignet. Komfort huset er beskrevet i afsnit 10. Halmhuset er konstrueret på fuldstændig samme måde som komfort huset. Den eneste forskel på de to beregninger er, at der i beregningen for halmhuset benyttes varmeledningsevnen for halm fundet i forsøgene med hot box, som er beskrevet i afsnit 17.2. Som tidligere nævnt er *PHPP*-beregningen venligst udlånt af TRI-CONSULT A/S. *Be06*- beregningen er ligeledes lavet af dette firma og er derfor lavet med samme værdier som i *PHPP*, men omregnet til at passe i en *Be06*- beregning.

22.1 *PHPP*- beregning

Programmet *PHPP*, som er beskrevet i afsnit 11 benyttes ved beregning af passivhuse, for at kunne kontrollere om de overholder de nødvendige krav til passivhuse. De benyttede *PHPP*-beregninger kan ses på den vedlagte bilags CD.

I dette projekt ønskes det at konstruere et hus, med isolering af halm, som opfylder disse krav. Den fundne varmeledningsevne for halm, fundet i forsøg med hot box'en, indsættes derfor i *PHPP*- beregningen for komfort huset. Denne beregning vil i de efterfølgende afsnit bliver omtalt som halmhuset. Dette halmhus sammenlignes med det modificerede komfort hus. Modificeret på den måde, at taghældningen er ændret. Udover den fundne varmeledningsevne for halm, indsættes også de beregnede linjetabskoefficienter fra afsnit 19.3, som ikke overholder kravene til et passivhus dvs. linjetabskoefficienter større end $0,1 \text{ W/}^\circ\text{Cm}$. Der er i afsnit 19.3 fundet en linjetabskoefficient, der ikke overholder kravene. Linjetabskoefficienten kan ses i tabel 22.1.

22.1 PHPP- beregning

Konstruktioner	ψ [W/m°C]
Vindue lige lysning	0,032

Tabel 22.1: Tabellen viser linjetabskoefficienten der indsættes i *PHPP*.

For at få det modificerede komfort hus til at overholde kravene til et passivhus efter at have indsat linjetabskoefficienten og ændret taghældningen, har det været nødvendigt, at ændre isoleringstykkelsen i *PHPP*. Tabel 22.2 viser isoleringstykkelserne før og efter ændringen.

	Isoleringstykkelser [m]	
	Før	Efter
Terrændæk	0,550	0,640
Terrændæk m. gulvvarme	0,550	0,600
Ydervæg	0,455	0,710
Tagkonstruktion	0,510	0,675

Tabel 22.2: Tabellen viser de samlede isoleringstykkelser før og efter ændring.

Tabel 22.3 viser intervallet for U-værdier og areal samt orientering for vinduerne i komfort huset. Disse værdier er ens i begge *PHPP*- beregninger.

		Enheder	Vinduer
Antal i alt			14
Areal	Min.	[m ²]	1,9
	Max.	[m ²]	6,5
U-værdi	Min.	[W/m ² K]	0,66
	Max.	[W/m ² K]	0,78
Orientering	Nord		3
	Syd		4
	Øst		3
	Vest		4

Tabel 22.3: Tabellen viser værdier for vinduerne i *PHPP*-beregningen for det modificerede komfort hus og halmhuset.

22 PHPP- og Be06- beregninger

Intervallerne for U-værdierne for vinduerne afviger fra U-værdierne i *Be06*. Dette skyldes sandsynligvis, at U-værdierne i *PHPP* bliver beregnet ud fra EN 10077, mens de i *Be06* bliver beregnet ud fra SBI-anvisning 213.

Arealer og U-værdier for ydervægskonstruktion samt terrændæk og tagkonstruktion for begge *PHPP*-beregninger kan ses i tabel 22.4. Disse U-værdier er for beregningerne med den ekstra isolering fra tabel 22.2, efter indsættelse af linjetabskoefficient og ændring af taghældning.

	Areal [m ²]	U-værdi [W/m ² K]	
		Komfort hus	Halmhus
Opvarmet etageareal	140,8		
Terrændæk	169	0,06	0,17
Terrændæk m. gulvvarme	9,4	0,06	0,15
Ydervæg	239,3	0,06	0,16
Tagkonstruktion	179,8	0,06	0,18

Tabel 22.4: Tabellen viser areal og U-værdi for *PHPP*-beregningen for det modificeret komfort hus og halmhus.

Ud fra tabel 22.4 kan det ses, at U-værdierne ændre sig betydeligt efter indsættelse af den fundne varmeledningsevne. Dette skyldes naturligvis den høje varmeledningsevne der er fundet i afsnit 17.2 for halmisolering.

Nøgletal for *PHPP*-beregningerne er vist i tabel 22.5.

	Enheder	Nøgleværdier	
		Komfort hus	Halmhus
Heating load	[W/m ²]	11	20
Cooling load	[W/m ²]	11	11
Specific Primary Energy Demand	[kWh/(m ² år)]	120	
Specific Space Heat Demand	[kWh/(m ² år)]	14	40

Tabel 22.5: Tabellen viser nøgletal for *PHPP*-beregningen for det modificeret komfort hus og halmhuset.

Som det kan ses i tabel 22.5 stiger det samlede energibehov til opvarmning kraftigt efter indsættelse af varmeledningsevnen. Dette indikerer at varmeledningsevnen, som beskrevet i afsnit 12.3.4, har en stor betydning. Ud fra værdierne kan det konstateres, at *PHPP*-beregningen for halmhuset langt fra er op-

22.1 PHPP- beregning

fyldt med varmeledningsevnen for halm. Som det kan ses i tabellen er der for halmhuset ingen specific space heat demand, hvilket sandsynligvis skyldes en beregningsfejl i programmet, men det vides ikke hvilken.

For at undersøge, om det er muligt at få halmhusets samlede energibehov til opvarmning ned på de krævede $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})$, forøges isoleringstykkelsen igen indtil kravet er opfyldt. Tykkelserne er listet i tabel 22.6.

	Isoleringstykkelser [m]
Terrændæk	1,400
Terrændæk m. gulvvarme	1,300
Ydervæg	2,400
Tagkonstruktion	1,850

Tabel 22.6: Tabellen viser de samlede isoleringstykkelser, der kræves for at halmhuset overholder kravene.

Med isoleringstykkelserne fra tabel 22.6 kan kravene til et passivhus overholdes, men disse tykkelse er ikke realistiske i et byggeri og kan derfor ikke bruges. Det er derfor nødvendigt, at finde en lavere varmeledningsevne for at opfylde kravene til et passivhus. I bilag A.1 findes to varmeledningsevner for en halm-baller, som er bestemt i Tyskland. Den laveste af disse værdier er målt, vinkelret på stråretningen, til $0,052 \text{ W/mK}$. Denne værdi indsættes i PHPP- beregningen med isoleringstykkelserne fra tabel 22.2 efter ændringen.

Nøgletallene for PHPP- beregningen med varmeledningsevnen for en halmballe kan ses i tabel 22.7

	Enheder	Nøgleværdier
Heating load	$[\text{W}/\text{m}^2]$	13
Cooling load	$[\text{W}/\text{m}^2]$	11
Specific Primary Energy Demand	$[\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})]$	129
Specific Space Heat Demand	$[\text{kWh}/(\text{m}^2 \text{ år})]$	19

Tabel 22.7: Tabellen viser nøgletal for PHPP-beregningen med varmeledningsevnen for en halmballe.

Kravene til det samlede energibehov til opvarmning samt det totale primære energiforbrug er ikke helt opfyldt med den sidst benyttede varmeledningsevne,

22 PHPP- og Be06- beregninger

derfor forsøges det igen at øge isoleringstykkelse til kravene er opfyldt. Disse tykkelser kan ses i tabel 22.8.

	Isoleringstykkelser [m]
Terrændæk	0,800
Terrændæk m. gulvvarme	0,800
Ydervæg	1,050
Tagkonstruktion	0,950

Tabel 22.8: Tabellen viser de samlede isoleringstykkelser, der kræves for at halmhuset overholder kravene med varmeledningsevnen for en halmballe.

Sammenlignes værdierne fra tabel 22.8 med værdierne fra tabel 22.2 efter ændringen, kan det ses at isoleringstykkelserne stadig er 20-32% større med varmeledningsevnen for halmballen. Selvom isoleringstykkelserne er blevet mindre vurderes de stadig at være for store.

Ud fra undersøgelserne i dette afsnit vurderes det, at det ikke er muligt at opfylde kravene til et passivhus med varmeledningsevnen på 0,11 W/mK uden brug af urealistiske isoleringstykkelser. Ligeledes er det heller ikke muligt med varmeledningsevnen for en halmballe, men energiforbruget er væsentlig lavere med denne værdi, hvilket understøtter teorien om, at varmeledningsevnen forbedres ved komprimering.

Det har i projektet kun været muligt at udføre forsøg med komprimeringer på hhv. 300 og 600 kg, men ud fra sammenligning med varmeledningsevnen for en halmballe, beskrevet i afsnit A.1, vil det være hensigtsmæssigt at udføre forsøg med større komprimeringer.

For at kunne opfylde kravene til et passivhus kræves det, at der opnås en varmeledningsevne mindre end 0,052 W/mK, som er for en halmballe målt vinkelret på stråretningen. Dette kunne måske opnås med en isolering som halm papir blandingen, beskrevet i afsnit 16.4.4, idet papir blandingen fylder hullerne ud mellem halmstrående og forhindre cirkulation af luft i isoleringen. Det er dog nødvendigt, at løse problemet med dette element, beskrevet i afsnit 16.4.5, før det kan bruges som isolering.

Ved komprimering af den fintsnittede halm er det vigtigt, at være opmærksom på, at det ikke er muligt at benytte et lag papir til at holde halmen på plads, som det er beskrevet for de nuværende i Friland i afsnit 18.1. Det er også

nødvendigt, at være opmærksom på dette ved konstruktion af et halm og ler element til brug i elementbyggeri, som bliver beskrevet senere i projektet.

Da det ikke er muligt, at opfylde kravene til passivhuse med den benyttede varmeledningsevne, vil det i det efterfølgende afsnit blive undersøgt om kravene til den gældende energiramme kan opfyldes.

22.2 Be06- beregning

Be06-programmet benyttes til beregning af energiforbruget for at dokumentere, at bygninger overholder den gældende energiramme. Derfor er det nødvendigt, at lave en *Be06*-beregning til trods for, at der allerede er lavet en *PHPP*-beregning. *Be06*- beregningen udføres her for at undersøge, om halmhuset med varmeledningsevnen, fundet ved forsøg, kan overholde kravene til den gældende energiramme i bygningsreglementet. Det gøres da det i forrige afsnit er fundet, at halmhuset ikke kan overholde kravene til et passivhus.

Der henvises til [SBI 213 2005] for vejledning til programmet *Be06*.

I *PHPP*-beregningerne er der ændret på taghældningen i forhold til den originale beregning, hvilket er beskrevet i afsnit 10, dette er ligeledes gjort for begge *Be06*-beregninger. Den originale *Be06*-beregning er venligst modtaget fra TRI-CONSULT A/S, som har udført både *PHPP*- og *Be06*-beregningen for komfort huset. Både den originale *Be06*-beregning for komfort huset, den modificerede og den for halmhuset kan ses på den vedlagte bilags CD under henholdsvis *Be06_original_komfort_hus.xml*, *Be06_modificeret_komfort_hus.xml* og *Be06_halmhus.xml*. I afsnit 19.3 er der beregnet linjetabskoefficienter for forskellige konstruktionsdele og her er det fundet, at linjetabskoefficienten for den lige lysning ikke overholder kravet til linjetabskoefficienter i [DS 418 2005]. Denne indsættes derfor i *Be06*- beregningerne, ligesom ved *PHPP* .

Formålet med at sammenligne de to *Be06*-beregninger er, at vurdere hvor stort energiforbruget er i halmhuset i forhold til komfort huset. Derved er det muligt at se, hvor godt halm isolerer i forhold til traditionel isolering. Derudover er det muligt ud fra *Be06*-beregningen for halmhuset, at konstatere om halmhuset kan overholde energirammen og hvor store forbedringer der evt. er brug for.

I tabel 22.9 kan værdier for vinduerne ses. Disse værdier er ikke ændret i forhold til den originale *Be06*-beregning og er ens i begge beregninger.

I tabel 22.10 kan arealer og U-værdier for begge *Be06*-beregninger ses.

22 PHPP- og Be06- beregninger

			Enheder	Vinduer
Antal i alt				14
Areal	Min.	[m ²]		1,9
	Max.	[m ²]		6,5
U-værdi	Min.	[W/m ² K]		0,62
	Max.	[W/m ² K]		0,71
Orientering	Nord			3
	Syd			4
	Øst			3
	Vest			4

Tabel 22.9: Tabellen viser værdier for vinduerne i *Be06*-beregningen for det modificerede komfort hus og halmhuset.

	Areal [m ²]	U-værdi [W/m ² K]	
		Komfort hus	Halmhus
Opvarmet etageareal	169,0		
Terrændæk	131,6	0,068	0,19
Terrændæk m. gulvvarme	9,4	0,069	0,2
Ydervæg	199,1	0,085	0,22
Tagkonstruktion	179,8	0,076	0,2

Tabel 22.10: Tabellen viser areal og U-værdi for *Be06*-beregningen for det modificeret komfort hus og halmhuset.

I tabel 22.10 er arealet for ydervæggene og tagkonstruktionen justeret til at svarer til en taghældning på 20°, ligesom det er gjort i *PHPP*-beregningerne. U-værdierne for halmhuset er taget fra *PHPP*-beregningerne, som er bestemt med varmeldeningsevnen ved forsøg med hot box'en. Isoleringstykkelserne for U-værdierne svarer til værdierne i tabel 22.2 før ændringen.

Tabel 22.11 viser nøgletallene for *Be06*-beregningen for det modificerede komfort hus og halmhuset.

Ud fra tabellen kan det ses, at komfort huset mere end overholder energiklasse 1, som er på 41,5 kWh/m²år. Det samme er gældende for halmhuset, selvom det samlede energibehov er lidt højere for halmhuset sammenlignet med det modificerede komfort hus. I tabel 22.11 ses det, at varmerelaterede værdier for halmhuset, er steget betydeligt med den nye varmeledningsevne pga. det øgede

22.2 Be06- beregning

		Komfort hus	Halmhus
Bidrag til energibehov	Varme	1,7	2,3
	El til bygningsdrift	9,2	12,2
	Overtemp. i rum	7,4	2,7
Udvalgte elbehov	Varmepumpe	5,7	8,8
	Ventilatorer	2,3	2,3
	Pumper	0,9	0,9
	Total elforbrug	39,8	42,9
Netto behov	Rumopvarmning	9,8	34,9
	Varmt brugsvand	17,1	17,1
Varmetab fra installationer	Rumopvarmning	0,3	0,3
	Varmt brugsvand	4,0	4,0
Ydelse fra særlige kilder	Varmepumpe	25,5	50,0
Samlet energibehov		32,0	35,6

Tabel 22.11: Tabellen viser nøgletals værdierne for *Be06*-beregningen for det modificerede komfort hus og halmhus. Enheden for alle faktorer i tabellen er kWh/m² år

varmetab, mens overtemperaturen for bygningen er faldet.

Ud fra *Be06*- beregningerne kan det konkluderes, at det er muligt at konstruere et halmhus ud fra principperne for et passivhus i form af byggemetoder og tætninger, men med en varmeledningsevne for finsnittet halm komprimeret med 600 kg, som overholder lavenergiklasse 1 i bygningsreglementet. Det er til gengæld ikke muligt, at overholde kravene til passivhuse med denne varmeledningsevne, som beskrevet i det forrige afsnit. Der kræves derfor flere undersøgelser og forsøg for at kunne nå ned på passivhus niveau. Der vil blive givet forslag til evt. undersøgelser og forsøg senere i projektet.

23 Sandwichelementer i beton

I det følgende beskrives konstruktion og transport af sandwichelementer i beton samt antallet af mandtimer til henholdsvis konstruktionen og monteringen. Afsnittet er baseret på [Søren Fisker, Willy Olsen et.al. 2004] og [Søren Fisker, Willy Olsen et.al. 2005], medmindre andet er angivet.

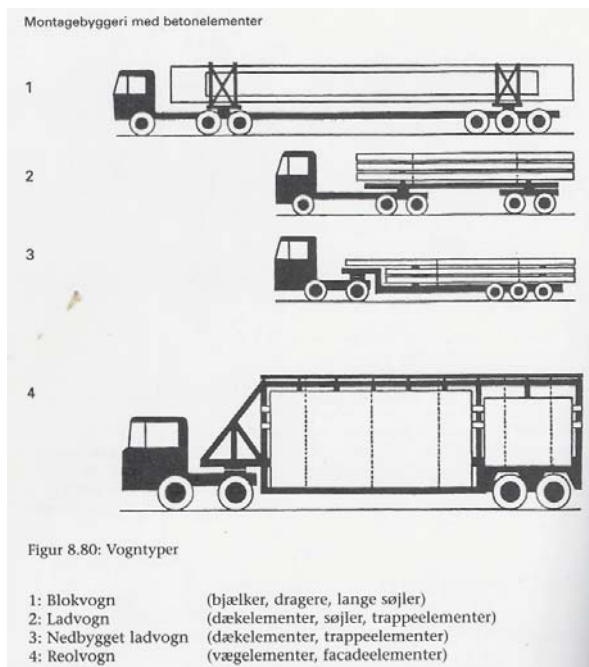
23.1 Konstruktion

Sandwichelementer i beton støbes i vandrette forme, lavet af stål. Det kan være nødvendigt med en efterbehandling af forpladen i form af afspuling, hvorfor formbunden skal smøres med et retaderende middel, som forsinker afbindingen. Fremstillingen foregår normalt ved først at støbe en forplade i bunden af formen. I formen kan der være udsparringskasser til evt. vindueshuller osv. placeret samt præfabrikeret armering og evt. specialprofelering. For at sikre fastholdelsen af forpladen hænges den op i bagpladen med specialophæng samt forbindes med bagpladen vha. bindere jævnt fordelt i elementet. Forpladen udstøbes og vibreres enten med stavvibratorer eller med vibreringsudstyr monteret på formen. Herefter lægges isolering i formen sammen med evt. indstøbningsdele til installationer, beslag og løfteranordninger, som kan benyttes ved senere håndtering af elementet. Som isolering benyttes betonelementbatts. Betonelementbatts anvendes fordi de er trykstabile dvs. at de kan modstå trykpåvirkninger uden betydelig komprimering [Rockwool A/S n.d.]. Ovenpå isoleringen ilægges bagpladens armering og herefter støbes bagpladen i beton.

Elementets opsider dvs. frie sider skal beskyttes mod udtørring altså forhindre vandet på overfladen i at fordampe. Dette gøres ved at tildække overfladen med plast eller ved curing. Hvis betonoverfladen får lov til at udtørre kan der ske et plastisk svind, som kan skabe betydelige revner i betonen.

23.2 Transport

Vægelementer bliver, i Danmark, transporteret via vejnettet på lastvogne. Transporteres elementerne til udlandet foregår det normalt via jernbane- eller skibstransport. Der findes forskellige lastvognstyper til de forskellige typer elementer, som skal transporteres. Vægelementer transporteres gerne på det der hedder en reolvogn, hvor elementerne lænes op af et fast midterstykke, der er formet som en oprejst trekant. Der spændes kæder eller wire ned på begge sider, for at sikre elementerne. Udover reolvognen findes blokvognen, ladvognen og den nedbyggede ladvogn. De fire vogntyper kan ses på figur 23.1.



Figur 23.1: Figuren viser fire vogntyper til transport af elementer samt beskriver hvilke elementer der passer til hvilken vogntype.

Ved transport af elementer er det nødvendigt at undersøge følgende punkter, for at sikre at det er muligt at gennemføre transporten uden at beskadige veje eller elementer.

- Vægtgrænser for kørebaner, jernbanestrækninger, broer og færger
- Beskaffenhed af kørebaner, færdselsreguleringer (rundkørsler, hastighedsdæmpende foranstaltninger), trafikmængde og vejarbejder på kørselsruten

23 Sandwichelementer i beton

- Dimensionsbegrænsninger ved vejbredder og -sving, viadukter, broer, el-ledninger, skilte og andre forhindringer
- Færdselsmyndighedernes eventuelle regulerende foranstaltninger som køretilladelser, midlertidige vejspærringer og eventuelle begrænsninger i kørselstidspunkt
- Transportkøretøjerne udnyttes normalt vægtmæssigt, idet blokvogne laster ca. 35000 kg og øvrige vogne ca. 25000 kg

[Søren Fisker, Willy Olsen et.al. 2004, s. 585]

Foruden disse punkter er det også vigtigt, at sikre at vejene på byggepladsen er bæredygtige, så der ikke opstår vridning mellem for- og bagvogn på lastvognen, idet det kan give skader på elementerne.

23.3 Tidsforbrug

I det følgende beskrives og sammenlignes antallet af mandtimer for hhv. et betonelement og et træelement. Det er vurderet, at en træelement vil svare til et element i ler og halm med træskelet, som vil blive beskrevet i kapitel 23.4. Disse to elementtyper sammenlignes for kunne vurdere om det er muligt at spare tid, ved et halm og ler element. Desuden beregnes antallet af mandtimer for opbygning af en facadevæg ude på byggepladsen. Dette skal tilnærmelsesvis repræsentere antallet af mandtimer, der benyttes til at bygge et halmhus i Friland i dag. Dermed kan det ligeledes vurderes, hvor meget tid der kan spares ved at udvikle et element i ler og halm.

Tidsforbruget for en aktivitet i forbindelse med et byggeri beregnes normalt i mandtimer. Tidsforbruget afhænger af mange faktorer som f.eks. byggepladsen. I dette afsnit bliver tidsforbruget sammenlignet ved de optimale arbejdsbetingelser, da det antages at det ekstra tidsforbrug, som f.eks. vejrforhold og ikke optimale betingelser for de benyttede maskiner vil være ens ved de to typer elementarbejde. Der vil desuden ikke blive set på transporttiden hen til byggepladsen, men alene på arbejdet udført på pladsen. Til at beregne tidsforbruget på byggepladsen vil [Søren Fisker, Willy Olsen et.al. 2005] blive benyttet.

Bygningen antages at være et enfamilie hus, hvor alle elementerne er færdigproduceret inden de ankommer til byggepladsen. Der vil blive set isoleret på montagearbejdet af en facadevæg på 100 m², uden montering af vinduer og døre

da det forventes at være samme tid i de to tilfælde. For at kunne sammenligne antallet af mandtimer, er det nødvendigt at beregne det rigtige tidsforbrug ud fra antallet af gentagelser. Tiden pr. enhed bliver mindre ved flere gentagelser, blandt andet pga. at værktøjer, materialer osv. er fundet frem og rutine kommer ligeledes ind som en faktor. Til at beregne dette benyttes Wrights formel, som kan ses i formel (23.1). Beregningerne kan ses i excelark *Wrights_formel.xls* på bilags CD'en.

$$t_x = T_1 \cdot x^{-k} \quad (23.1)$$

Hvor

t_x er tiden i gennemsnit pr. enhed.[mh/stk]

T_1 er det teoretiske tal for styktiden for første enhed.[mh/stk]

x er antallet af enheder.[–]

k er en konstant der udtrykker oplærings- og indkøringsfasen. [–]

Først beregnes tiden for betonavægge. Tiderne er taget for et facadeelement der er 7 m², det er antaget at have en sådan højde at det passer i facadevæggen. Tiden er for hvert enkelt element er beregnet ud fra Wrights formel (23.1). Ud fra tabelopslag kendes værdierne for betonelementer for 3000 stk. og 500 stk. Disse værdier indsættes i wrights formel. Udtrykket for 3000 stk. kan ses herunder i formel (23.2). De 1,38 mh/stk i formel (23.2) stammer fra 1 mh/stk til montering samt 0,38 mh/stk til fugning omkring elementet.

$$1,38 = T_1 \cdot 3000^{-k} \quad (23.2)$$

$$1,38 = T_1 \cdot 3000^{-k}$$

Herefter isoleres k og beregnes som 2 ligninger med 2 ubekendte, k bliver i dette tilfælde 0,106 hvorefter T_1 beregnes, i dette tilfælde til 3,23. Så kan Wrights formel benyttes med det faktiske antal elementer, som beregnes ved at dividere de 100 m² med de 7 m², dermed fås 14,3 elementer. Beregningen af mandtimerne pr. element kan ses herunder.

$$\begin{aligned} t_x &= 3,23 \cdot 14,3^{-0,106} \\ t_x &= 2,44 \text{ mh/stk} \end{aligned} \quad (23.3)$$

Det samlede antal mandtimer bliver dermed 2,44 mh/stk multipliceret med de 14,3 elementer, hvilket betyder at der bliver brugt 34,85 mh på 100 m² facadevæg i beton.

23 Sandwichelementer i beton

For træelementerne beregnes den benyttede tid, som ovenfor med en elementstørrelse på $7,5 \text{ m}^2$. Det er antaget, at det er manuel montering incl. fodrem. Det antages desuden, at vægelementerne passer i højden, derfor kan element antallet beregnes ved at dividere de 100 m^2 med de $7,5 \text{ m}^2$, dermed fås 13,3 element. Ved tabelopslag er det fundet, at det taget 0,8 mh/stk ved 2500 stk ved 250 stk tillægges en tid på 24 %. Dette bliver omregnet ved hjælp af Wrigths formel til 1,30 mh/stk. Dermed kan den benyttede tid beregnes til 13,3 multipliceret 1,30 mh/stk til 17,35 mh for 100 m^2 . Hvilket betyder at det tager ca. den halve tid at få monteret 100 m^2 træfacade sammenlignet med en beton facade.

Til sidst beregnes antallet af mandtimer der kræves, hvis en tømrer skulle bygge og opsætte facadestykker, da denne tid vil ligge nærmest den tid der benyttes i dag i Friland. Det nødvendige pudse arbejde, vil blive antaget at være en manuel pudsning af en mure.

Denne beregning kommer til at se ud på følgende måde. Det er valg at benytte en let facadevæg med stolpeskelet, med en stolpe afstand på 0,6 m. Det betyder, at arbejdet for tømren er $0,42 \text{ mh/m}^2$, ved en element størrelse på 7 m^2 . Der vil derfor blive benyttet 42,24 mh på at konstruere vægelementerne på byggepladesen, hvorefter de skal pudses af en murer som bruger $0,51 \text{ mh/m}^2$. Det betyder der benyttes 51,34 mh på 100 m^2 facadevæg. Herefter skal elementerne rejses, som hvis det var færdige elementer, dette skal der benyttes 17,35 mh til, som beregnet ovenover. Det medfører en samlet tid på 110,93 mh for en facadevæg på 100 m^2 . Dermed kan det tydeligt ses, at der er en stor mængde tid og udgifter at spare ved at konstruere vægelementer fremfor, at bygge det hele på pladsen.

23.4 Halm og ler element

Der vil i dette kapitel blive beskrevet hvorvidt det er muligt at konstruere halm og ler elementer til elementbyggeri. Der vil blive søgt erfaring og inspiration i eksisterende elementbyggeri metoder. Det vil blandt andet være ved producenter af betonelementer og i særdeleshed træelementer. Grunden til der vil blive søgt inspiration ved producenter af træelementer er, at det forventes at det bærende skelet skal produceres i træ. Da halm og ler elementer kan være et helt projekt i sig selv, er det valgt at opstille en liste med de udvalgte problemstillinger i forbindelse med halm og ler elementer, der vil blive analyseret nærmere. Undersøgelserne vil være med til at skabe et indblik i en del af de problemer, der kan opstå ved at benytte snittet halm som isolering i træelementer.

De problemer der vil blive analyseret nærmere er listet herunder.

- Træelementer: Hvordan holdes den løse halm på plads.
- Transport: Stabilitet af ler og snittet halm.
- Montering: Hvordan monteres de enkelte elementer på pladsen.
- Samling: Hvordan samles elementerne.
- Opbygning: Hvordan kan elementerne opbygges.

Problemerne vil ikke blive løst teoretisk, men ud fra projektgruppens egne ideer og vurdering med inspiration fra træelementindustrien og Friland. Det betyder, at der ikke vil blive givet endegyldige svar og konklusioner på løsningsforslagene. Grunden til det er ønskeligt at producere et halm og ler element er, fordi de store udgifter ved halmhus byggeri er forbundet med tidsforbruget på byggepladsen. Et halm og ler element vil betyde nedsættelse af mandtimerne brugt på byggepladsen og dermed være med til at sænke de samlede omkostninger betydeligt.

23.5 Træelementer

Der findes træelementer ved flere forskellige producenter, heriblandt [Taasinge Træ A/S n.d.] og [Palsgaard Gruppen n.d.], der vil blive set nærmere på disse allerede eksisterende elementer og hvordan den bærende rammekonstruktion er bygget op. De vil blive vurderet i forhold til hvordan de egner sig til et løsfyldsisoleringsmateriale, som snittet halm. Rammerne har den fordel at det er muligt at benytte forskellige facade- og evt. tagbeklædninger. Det stemmer overens med målet om, at kunne benytte ler som beklædning, specielt på innersiden af væggene. Det medføre også, at det er muligt for bygherren at præge den enkelte byggesag. Desuden findes der træelementer i dag i forskellige størrelser og mange producenter producere også specialelementer, som giver flere muligheder for geometriske udfoldelser.

Mange elementer leveres uden facadebeklædning, som efterfølgende bliver monteret på byggepladsen. Det kan dog være et problem med løsfyldsisolering, da denne dermed skal blæses ind i vægkonstruktionen på byggepladsen. Der kunne evt. benyttes vindgips eller asfaltgrundet krydsfiner til at holde den snittede

halm på plads i stedet for det tynde papirlag, som benyttes i husene i Friland i dag. Det vil dog nedsætte det miljøvenlige aspekt i vægkonstruktionen, men det vil være med til at skabe en frihed omkring transport og indblæsning af den snittede halm. Ved brug af vindgips eller asfaltgrundet krydsfiner øges muligheden også for komprimering af den snittede halm, så der kan opnås en bedre varmeledningsevne, som beskrevet i afsnit 17.2. Det vil desuden gøre det muligt at sprøjte lerpudsen på vægoverfladerne. Til dette er der fundet en mulig sprøjtepistol på [Munk Clemmensen APS n.d.], som kan sprøjte lerpuds med naturfibre, iform af f.eks. snittet halm, som det benyttes i Friland på en facade. Det vil dog være tidsbesparende at undersøge hvorvidt ler vil kunne holde til transport, idet dette vil være med til at øge produktionshastigheden, da lerpudsen dermed kan påføres på en fabrik under kontrollerede forhold.

Træelementerne kan opbygges som de udføres ved eks. [PT Elementer n.d.a], hvor der er lavet rammer til isolering i konstruktionen. Der vil dog skabes kuldebroer i konstruktionen ved denne konstruktion, da rammerne skal være gennemgående for at holde på den snittede halm. Her kunne der med fordel benyttes en mere fast isolering som eks. halm papir blandingen, som dog er afskrevet i afsnit 16.4.5 pga. store mængder vand ved konstruktionen. Det bør vurderes hvorvidt løsfyldsisoleringen skal blæses i vægkonstruktionen før eller efter transporten af elementerne, hvilket beskrives i det følgende afsnit.

23.6 Transport

Der er en del problemstillinger omkring transporten af træelementerne blandt andet rystelserne af elementerne kan skabe problemer. Det er både med hensyn til lerpudsens styrke, men også komprimeringen af halmisoleringen, som følge af rystelserne under transport. Derfor bør der laves undersøgelser for hvorvidt lerpudsen kan holde til rystelserne, når dette dækker en relativ stor flade. Det har vist sig under destruktion af testelementet bestående halm beklædt med ler, at leren var stærkere end forventet, dette skyldes i særdeleshed hornettet der var placeret midt i lerslagene, dette virkede som armeringsnet og holdt leren godt sammen. Dette forudsætter dog ikke, at halmelementer med lerpuds kan holde til transport, da det er en anden belastning i form af rystelser det her bliver udsat for.

Dernæst bør der laves undersøgelser for, hvorvidt snittet halm bliver yderligere komprimeret af rystelserne. Disse to problemer kan bortskaffes ved at transportere elementerne ud på pladsen uden ler og den snittede halm. Det vil dog

sætte arbejdstiden på byggepladsen op, hvilket ikke er den ideelle løsning, da det ønskes at nedsætte arbejdstiden på byggepladsen. En anden løsning kunne være at lave facaderne med træ på både indvendige og udvendige overflader. Ved denne løsning er det nødvendigt, at overveje brandkravene og det er ikke muligt at opnå lers gode egenskaber for indeklimaet, med hhv. lagring af energi og fugt. Til gengæld kan facaden monteres på fabrikken i stedet for på byggepladsen.

Det vil i de efterfølgende løsningsforslag blive antaget, at den snittede halm og lerpudsen kan transporteres uden mærkbar komprimering af halmen eller skader på leren. Komprimering af halmen kan forårsage at halmen bliver ulige fordelt og dermed kan der i værste tilfælde blive områder i toppen af hulrummet, hvor der ikke er noget halm.

23.7 Montering

En af de store forskelle ved montering af beton vægelementer og træ vægelementer er vægten. Ifølge [PT-elementer n.d.b] ligger vægten for et træelement mellem 145 kg/m^2 og 245 kg/m^2 for et standard element. For et betonelement ligger vægten mellem 230 kg/m^2 og 300 kg/m^2 . Det vurderes, at vægten for et halm og ler element svarer nogenlunde overens med et træelement. På grund af den lavere vægt er det sandsynligt, at der kan bruges en mindre kran på byggepladsen med en længere rækkevidde.

23.8 Samling

Det antages, at samlingen af elementer i ler og halm vil svarer nogenlunde overens med samling af træelementer, derfor beskrives processen for træelementer i dette afsnit.

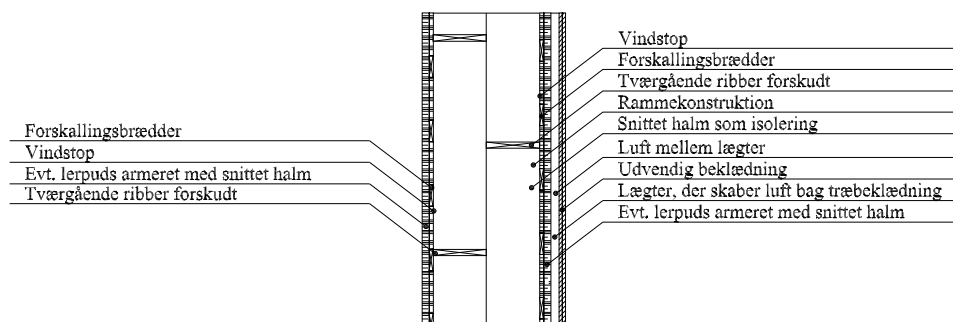
Facadetræelementer monteres løbende, forankringen foregår til fodremmen eller direkte til fundamentet med vinkelbeslag eller andet specielt beslag. Hvis det er enkeltstående elementer skal der foretages afstivning med skråstivere, som ved andet elementbyggeri. Så snart elementerne er monteret i passende antal kan den evt. udvendige og indvendige beklædning påføres. Denne kan være klargjort i forskellig grad inden elementet skal monteres, her er det vigtigt at undersøge begrænsningerne for de naturlige materiales fugt indhold samt transporten af elementerne.

23.9 Udformning af halm og ler element

Ved udformning af halm og ler elementet er der, som tidligere nævnt, set meget på hvordan træelementer er udformet. Det er desuden antaget, at der ikke er problemer med yderligere komprimering og holdbarhed af hhv. halm og lerpuds. Der vil blive lavet vurderinger af, hvordan problemer med evt. komprimering af løsfyldsisoleringen kan minimeres, under transporten. En måde hvorpå dette kan gøres er ved at trykke halmen, med et beregnet tryk under en rystelse hvorved komprimeringen vil være optimal inden transporten af elementet. Derefter kan der udføres et forsøg som udføres med et antal prøver, som kan vise hvor meget halmen i gennemsnit vil blive komprimeret over et vist tidsinterval med rystelser. En fordel ved at komprimere halmen inden det bliver transporteret er, at den komprimerede halm sætter sig mindre over tid. Derudover har forsøg i hot box'en, beskrevet i afsnit 17.2 vist, at komprimering af halmen forbedre varmeledningsevnen.

Det viste sig under destruktion af testelementet med halm og ler, at det havde været svært at styre lerlaget tykkelse hvorfor det ville være en fordel at kunne rejse elementerne under konstruktionen og sprøjte leren på, hvilket ville medføre en mere jævn fordeling, da lerlaget på testelementet var helt op mod 70 mm tykt nogle steder. Den ønskede tykkelse var 40 mm.

Der er tegnet to forslag på figur 23.2 og figur 23.3 til hvordan halm og ler elementet kan bygges op. Det er ikke et endeligt forslag, hvor der er beregnet statiske egenskaber osv. Forslagene bygger alene på en praktisk baggrund om hvordan halmen kan blive mere eller mindre fastholdt under transporten samt de træelementer der allerede er i produktion og hvordan konstruktionerne er opbygget i Friland.



Figur 23.2: Figuren viser det første forslag til et halm og ler element.

På figur 23.2 er der lavet en rammekonstruktion, der er gennemgående og vil lukke elementet i enderne. Det er selvfølgelig muligt, at indsætte rammer midt i elementet, hvis dette er nødvendigt i forhold til de statiske beregninger. Mellem rammerne er der placeret ribber, som er lavet for at mindske komprimeringen af halmen. På grund af disse ribber vil halmen ikke falde sammen i hele elementets højde, men kun i nogle mindre firkanter. Det vil mindske muligheden for et gennemgående hul uden isolering. Det vil dog kun være nødvendigt såfremt halmen ikke kan pakkes, så den ikke bliver yderligere komprimeret under transporten. På figur 23.2 er det illustreret med to forskudte ribber, det antal kan dog øges hvis det viser sig at være nødvendigt, så træribberne bliver endnu mindre og dermed mindre kuldebroer.

På siderne af rammerne vil det være muligt at placere en vindbremse, det kan f.eks. være det genbrugspapir der benyttes i Friland i dag. Det skal dog undersøges hvorvidt papiret kan holde halmen på plads både når der blæses/trykkes halm ind i rammerne. Under transporten og monteringen er dette også vigtigt. Der kan i stedet benyttes en krydsfinerplade eller en anden plade, som ligeledes vil styrke væggens skivevirkning i et evt. etagebyggeri. Udenpå denne plade vil der blive monteret forskallingsbrædder eller lægter, lægterne bliver brugt til at skabe afstand mellem vindbremsen og den endelige beklædning, så det er muligt at trække elkabler her. Den endelige beklædning kan evt. være lerpuds, som sprøjtes på og glattes, med den antagelse at det er stærkt nok til at blive transporteret. Skulle der evt. ske skader i form af revner, har lerpudsen den fordel at den kan fugtes op og glattes på ny, da der ikke er blandet andre bindingsmidler i. Dette vil kunne gøres efterfølgende i forbindelse med montage af elementerne.

For elementet på figur 23.2 er det valgt, at have en facadebeklædning af lerpuds dækket af en træfacade. Grunden til dette er, at lerlaget på ydersiden kan laves tyndere end det indvendige lerlag og derved vil størstedelen af fugten fra det daglige brug trænge ud på ydersiden i stedet for tilbage i huset.

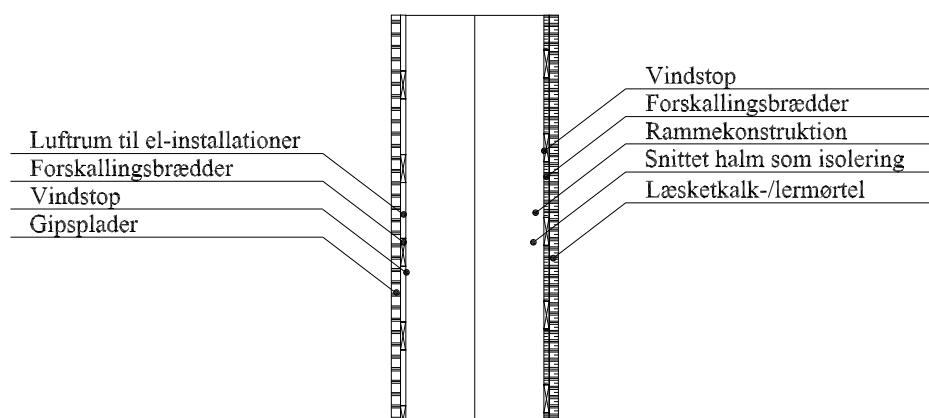
Der er flere muligheder for at fylde/blæse den snittede halm ind i træelementet. To af de overvejede metoder er enten at presse eller blæse det i, mens hele vægelementet ligger ned. Det vil mindske problemerne med at få fyldt alle de lukkede rum ud mellem ribberne og det vil være muligt at forskyde de evt. ekstra rammer der skal være i store elementer. De kan dermed forskydes på samme måde, som ribberne og mindske kuldebrovirkningen, det er dog ikke muligt i enderne da det vil medføre at løsfyldsisoleringen falder ud af vægelementet.

Ved at fylde halmen ind i et stående element er det nødvendigt, at blæse det ind

23 Sandwichelementer i beton

flere steder for at sikre halmen bliver fordelt ligeligt i alle hjørnerne. Her kan der evt. arbejdes med nogle forskellige tryk, som dermed vil tvinge halmen ud i alle hjørner, dette tryk skal evt. varieres under indblæsning, da tyngdekraften vil spille ind på det nederste halm og dette kan skabe en usikkerhed om en jævn fordeling af halmen.

Det andet løsningsforslag til et element, kan ses på figur 23.3. Den minder meget om det ovenfor beskrevne element. Der vil derfor kun blive gennemgået de ting der er forskellige fra det første element. Der er taget udgangspunkt i isoleringslagets opbygning i huset i Friland, beskrevet i afsnit 18.1, hvor isoleringslaget kun er brudt af to lodrette stykker spærtræ, som er med til at danne det hulrum, hvor halmen blæses ind.



Figur 23.3: Figuren viser det andet forslag til et halm og ler element.

Der er i denne konstruktion ikke benyttet ribber, fordi det er antaget at halmen kan klare til transporten uden yderligere komprimering. Det vil også gøre det lettere at efterfylde eller helt at undlade den snittede halm i produktionsfasen. Trærammerne kan laves på fabrikken, transporteres tomme og få blæst den snittede halm ind, ude på byggepladsen. Det kræver dog en mobil ventilator, som evt. kan være placeret på elementvognen. Dette vil give mulighed for at lave væg- og tagkonstruktion med gennemgående isolering, ved at lade hulrummene støde sammen og udforme en tæt løsning mellem tagelementet og vægelementet. Det kan mindske evt. kuldebroer i væg- og tagkonstruktionen. Det kræver omhyggelig udførsel af indblæsning af halmen, som det kan ses i kapitel 21.6 hvor der forekommer tydelige kuldebroer ved denne samling, formentlig af udførelsmæssige årsager. På figur 23.3 er løsningsforslaget tegnet med en lasket kalkmørtel på ydersiden og en gipsplade på indvendig side, her

23.9 Udformning af halm og ler element

vil det også være muligt at benytte beklædningen fra 23.2 eller en kombination af disse. Der kan påføres samme tykkelse af læsket kalkmørtel, da det er ligeså diffusions åbent som lermørtel. Fordelen ved en læsket kalkmørtel er desuden, at det er mere modstandsdygtigt over for de meteorologiske forhold og dermed er lettere at vedligeholde.

Der vil også være mulighed for at udskifte nogle af naturmaterialerne, med bedre alternativer det vil dog ikke være i overensstemmelse med at lave et miljøvenligt produkt.

Der er gennem dette afsnit fundet to mulige løsninger på et færdigt halm og ler element, der skal dog foretages en del undersøgelser før et færdigt element kan blive en realitet. Det er specielt problemer omkring holdbarheden, da naturmaterialer ikke er tilsat bindemidler, idet det vil forøge energiforbruget til produktionen og den naturlige nedbrydelse og mindske genbrugsmulighederne. Elementet på figur 23.3, er målrettet mod at udføre det afsluttende arbejde med halmisoleringen på byggepladsen. Elementet på figur 23.2 er forsøgt konstrueret så det kan færdiggøres på fabrikken, dog med montering af evt. facadebeklædning på byggepladsen. Grunden til det kunne være at lerpuds eller anden facadebeklædning vil have bedre af at blive monteret på byggepladsen.

24 Diskussion

I dette afsnit vil undersøgelserne og resultaterne i rapporten blive diskuteret. Der er i rapporten fundet frem til varmeledningsevnen for halm, som er relativt høje i forhold til traditionelle isoleringsmaterialer. Det vurderes dog, at der med optimering af komprimeringsmetoden ville kunne opnås lavere værdier for den snittede halm. Dette kunne være muligt, hvis der var firmaer der var interesseret i projektet med, at benytte halm som isolering og dermed vil lig til at lave nogle investeringer i projektet. Varmeledningsevnerne fundet i dette projekt ligger umiddelbart under værdien for træ, hvilket bevirker at energiberegninger med denne varmeledningsevne i *PHPP*, ikke kan opfyldes, medmindre der bruges urealistisk isoleringstykkelser. Det er derfor ikke på nuværende tidspunkt muligt at konstruere et halmhus på passivhus niveau.

Den fundne varmeledningsevnen er dog ikke så dårlig, at det er urealistisk at benytte halm som isoleringsmateriale. I de udførte *Be06*-beregninger opfyldes kravene for energiklasse 1, forudsat at huset er konstrueret på samme måde som passivhuset, der er brugt som udgangspunkt. I disse beregninger er det ligeledes forudsat, at det eneste naturlige byggemateriale brugt, er halm. De resterende byggematerialer svarer til den oprindelige beregning af passivhuset. Det betyder, at der som start på udviklingen af halmhuse kunne benyttes naturligt isoleringsmateriale sammen med traditionelle materialer.

Både Friland og byggeindustrien har fokus på, at mindske energiforbruget for bygninger. På nuværende tidspunkter ligger de to parter fokus på to forskellige steder i en bygnings livscyklus. I Friland fokuseres der på det miljøvenlige aspekt for fremstillingen af byggematerialer samt energiforbruget til dette. I byggeindustrien fokuseres der på energiforbruget i bygningens levetid og ikke i så høj grad på fremstillingen. Formålet med dette projekt har været, at fører disse to fokuser nærmere hinanden og dermed forsøge at opnå en optimal nedsættelse af energiforbruget i en bygnings livscyklus samt undersøge hvilke forhindringer, der skal overvindes for at nå dertil. Idet udviklingen af byggeindustrien skubbes i retning af lavere energiforbrug, i form af stramninger i bygningsreglementet, vil det stadig være nødvendigt at finde metoder til mindskning af varmeledningsevnen for halm. Hvis ikke dette gennemføres, vurderes det at chancerne for at få halmhuse ført ind, som en del af byggeindustrien og opnå

en optimal bygning, er minimale.

En af de positive ting der følger med halm som isolering er, at det, som nævnt, belaster miljøet minimalt, i forhold til andre traditionelle isoleringsmaterialer. Det er dog ikke relevant, hvis halmen ikke kan godtgøre for den ekstra energi der bliver benyttet i bygningens levetid, for så ender det op med at være negativt for miljøet at benytte halm som isolering.

Afgasning af kunstige gasser i huse bygget af naturlige materialer, kan argumenteres at være betydelig lavere end i huse bygget af traditionelle byggematerialer. Dette burde medføre et sundere og bedre indeklima. For at kunne opnå dette kræves det, at nogen i byggeindustrien er villig til at investere i halmisoleringsproduktet og lave de nødvendige undersøgelser og optimeringer, for ellers kommer produktet ikke ind på markedet, som et reelt alternativ til de uorganiske isoleringsmaterialer.

Halmbyggerier bliver i dag betragtet som en alternativ livsstil, som kan skyldes at det oftest er folk der ønsker at leve på en miljøvenlig måde, der får øjnene op for halmhuse. Med denne rapport er det forsøgt, at gøre halmhuse mere tilgængelig for en bredere del af befolkningen. Det kan forhåbentlig være med til, at få interessen for halmhuse til at stige. Det kan forhåbentlig også være et skridt på vejen til, at industrialisere halmhusbyggerier. Det er dog vigtigt, at det ikke medfører at halm som isoleringsmateriale bevæger sig i samme retning, som med andre isoleringsmaterialer hvor der tilsættes forskellige stoffer for at forbedre materialets egenskaber. Dette ville gå imod princippet for halmhuse i Friland, som stiler mod kun at bygge af naturlige materialer. Det ville være nemmere, at få halm inført i byggeindustrien, hvis det kunne behandles med uorganiske midler, da halmen derved kunne gøres mere modstandsdygtig og sandsynligvis også bedre isolerende, men formålet med naturlige materialer ville være væk.

Ud fra blowerdoor-test og termografering er det fundet, at det valgte hus i Friland indeholder en betydelig mængde kuldebroer og utætheder, som langt fra er optimal hvis der skal opnås et lavere energiforbrug i bygningens levetid. I passivhuse er tæthed og undgåelse af kuldebroer to faktorer der ligges stor vægt på. og derfor er det muligt at forbedre indeklimaet i passivhuse i form af mindre kuldenedfald og træk fra konstruktioner og vinduer. Med denne tæthed kræves det dog, at der investeres i et ventilationsanlæg som er dimensioneret til huset. For at mindske kuldenedfaldet fra vinduerne er det ligeledes nødvendigt, at investere i vinduer til passivhuse, som ofte er trelags-vinduer og i den dyrere ende af prisskalaen. Disse investeringer kunne helt sikkert forbedre tætheden af huset i Friland sammen med en mere omhyggelig udførsel af konstruktionerne.

Der er dog stadig et problem i halmhuset og det er den høje varmeledningsevne der er fundet for halm, i dette projekt. Det kan diskuteres, om det er værd at investere i ventilationsanlæg og vinduer, hvis isoleringen i væggene ikke er optimal. Det vurderes ud fra undersøgelser i kapitel 22, at det er det værd, for selvom der ikke kan opnås et hus på passivhus niveau, er det muligt at opnå energiklasse 1 i bygningsreglementet trods den dårlige isoleringsevne. Denne beregning er dog ikke foretaget på et halmhus, men på et passivhus med halmisolering som eneste alternative byggemateriale. Det vides ikke, om det er muligt at opfylde de samme krav med et hus bygget udelukkende af naturmaterialer, men det vurderes at være sandsynligt.

25 Konklusion

Dette projekt omhandler udvikling af halmhuse, for at undersøge om det er muligt, at bygge et halmhus på passivhus niveau. I problemformulering blev der rejst følgende spørgsmål, som vil blive besvaret en af gangen i denne konklusion.

- Hvad er materialeparametrene for de naturlige isoleringsmaterialer?
- Hvordan optimeres tætheden og kuldebroer i et eksisterende halmhusbyggeri?
- Er det muligt at opfylde kravene til et passivhus ved brug af naturmaterialer?
- Hvordan kan antallet af mandtimer på byggepladsen reduceres i forbindelse med halmhusbyggeri?

Hvad er materialeparametrene for de naturlige isoleringsmaterialer?

Ud fra forsøg med en hot box blev der, i afsnit 17.2, fundet varmeledningsevner for fem forskellige testelementer. Testelementerne bestod af hhv. fabrikssnittet halm, fabrikssnittet halm komprimeret med 300 kg, fabrikssnittet halm komprimeret med 600 kg, fintsnittet rapshalm komprimeret med 600 kg og fabrikssnittet halm med 40 mm ler på hver side. Der blev beregnet varmeledningsevner baseret på både overfladetemperaturer og lufttemperaturer. Den bedste værdi af disse beregninger er varmeledningsevnen, for fabrikssnittet halm komprimeret med 600 kg beregnet med overfladetemperaturer. Varmeledningsevnen for dette forsøg blev beregnet til 0,11 W/mK. ud fra forsøgene kunne der ses en tendens til forbedring af varmeledningsevnerne ved højere komprimering. Det kan derfor konkluderes, at varmeledningsevnen for snittet bliver bedre jo mere halmen komprimeres. derudover kan det også konkluderes, at den almindelig fabrikssnittede halm er bedre isolerende end den snittede rapshalm. Det konkluderes, at det skyldes at rapshalmen ikke kunne komprimeres så hårdt, som den fabrikssnittede halm pga. de mere grove og stive strå.

Hvordan kan antallet af mandtimer på byggepladsen reduceres i forbindelse med halmhusbyggeri?

I afsnit 23.3 blev antallet af mandtimer for hhv. betonelementer, træelementer samt manuel opbygning og montering af facadeelementer, beregnet. Det er antaget, at træelementer svarer godt overens med et halm og ler element. Ud fra disse resultater kan det konkluderes, at der kan spares en betydelig mængde mandtimer ved at industrialisere halmbyggeriet i form af elementer frem for den manuelle opbygning ude på byggepladsen. Det er en vigtig faktor i halmhusbyggeri, idet mandtimerne udgør en betydelig af omkostningerne til et halmhusbyggeri i dag.

Det kunne ligeledes ses, at der evt. også kunne spares lidt mandtimer ved at gå fra betonelementer til halm og ler elementer, men det er ikke mange.

I kapitel 23.4 blev der givet to forslag til konstruktion af halm og ler elementer, som kan hjælpe med til at industrialisere halmbyggeriet. Ud fra disse forslag kan det konkluderes, at det er sandsynligt, der kan udføres elementer med ler og halm, men det kræver at der først udføres en række undersøgelser og forsøg pga. den manglende viden omkring emnet. Under destruktion af testelementet med halm og ler, blev der dog observeret en uventet styrke af lerpudsen, som bestyrker troen på, at det er muligt at konstruere et halm og ler element til brug i byggeindustrien.

Er det muligt at opfylde kravene til et passivhus ved brug af naturlige isoleringsmaterialer?

Det er ud fra beregninger i *PHPP* i kapitel 22 fundet, at det ikke er muligt at opfylde kravene for et passivhus, med den fundne varmeledningsevne, med realistiske isoleringstykkelser. Det må derfor konkluderes, at der kræves optimering af denne varmeledningsevne, for at kunne opfylde de fastsatte krav i *PHPP*, hvis det skal gøres med normale isoleringstykkelser. I det samme kapitel blev der ligeledes udført med bergning med *Be06*, hvor det overraskende viste sig, at konstruktionen med komprimeret halmisolering uden problemer kunne opfylde kravene i energiklasse 1 i bygningsreglementet. Derudfra kan det konkluderes, at det er muligt at konstruere et lavenergihus med halmisolering. Derfor vurderes det også, at være muligt at konstruere et hus med flere naturmaterialer udover halm, idet de andre naturmaterialer der benyttes vurderes ikke, at ligge langt fra de traditionelle byggematerialer mht. varmeledningsevne. Det kræver dog flere undersøgelser og forsøg, før det kan endeligt konkluderes at være

muligt.

Hvordan optimeres tætheden og kuldebroer i et eksisterende halmhus-byggeri?

Baseret på den udførte blowerdoor-test og termografering kan det konkluderes, at der i det udvalgte hus i Friland er en lang række steder, hvor det er muligt at optimere kuldebroer og utætheder. Det er baseret på vurderingerne fra afsnit 21.8, hvor det er anslået at hovedparten af kuldebroerne såvel som utæthederne, kan fjernes eller mindskes betydeligt ved mere omhyggelig udførsel af konstruktionen. Det blev dog også i dette afsnit vurderet, at en del af problemerne kunne skyldes mus i konstruktionen, som ejeren af huset havde gjort opmærksom på.

Som konklusion på projektet kan det konkludere, at der stadig er et stykke vej fra halmhus til pasivhus.

26 Perspektivering

I det følgende vil emnet halmhuse og udvikling af disse blive sat i perspektiv til byggeindustrien i dag. Der vil desuden i slutningen af denne perspektivering blive givet forslag til projekter, der kan være med til yderligere, at belyse områder og videre udvikle løsninger der er belyst i denne rapport.

Hovedformålet med rapporten var, at lave en kvalitativ vurdering af, hvorvidt det er muligt at konstruere et passivhus med naturlige materialer som isolering. Projektet har desuden beskæftiget sig med, vejen fra halmhus helt ned på passivhus niveau og spørgsmålet om det overhovedet er muligt at udføre. Vurderingerne i projektet er i høj grad baseret på forsøg, der er udført i Friland samt i klimalaboratoriet på Aalborg Universitet. Ved disse forsøg er der fundet en varmeledningsevne, som tidligere har været ukendt. Indtil nu er halmhuse med snittet halm, som isolering blevet bygget ud fra tidligere erfaringer.

En af grundene til, at halmhuse ikke er mere udbredte i Danmark i dag, skyldes sandsynligvis at ikke alle værdier for materialer benyttet i halmhuse er kendte. Derfor har det ikke været muligt, at sammenligne de isoleringsevner der kendes i dag, med isoleringsevnerne for disse materialer. Dette er formentlig en bremse for byggeindustriens lyst til at beskæftige sig med alternative byggematerialer. Det er for besværligt, hvis ikke umuligt, at finde frem til den korrekte isoleringstykkelse for bygningerne uden en varmeledningsevne. Ved at der nu eksisterende en varmeledningsevne, er det forhåbentlig et skridt i den rigtige retning mod at fjerne denne bremse.

En anden stopklods for halmhusbyggeri på nuværende tidspunkt, er den lange byggeproces sammenlignet med f.eks. elementbyggeri i beton. Byggeri i dag skal være effektivt og nemt, så der kan spares på mandtimerne på byggepladserne. For at kunne indføre halmhusbyggeri vil det være nødvendigt, at om-danne halmhusbyggeri fra selvbyggeri til industrialiseret elementbyggeri, som kan konkurrere med de nuværende elementbyggerier. Kan dette lade sig gøre, vil halmhusbyggeriet have den fordel frem for elementbyggeri i beton, at det sandsynligvis er billigere at opføre samt meget mere miljøvenligt. Der er dog stadig et stykke vej, før elementbyggeri med ler og halm kan blive en realitet, da der er flere områder som stadig kræver undersøgelse og udvikling.

En af problemerne med elementbyggeri i hal og ler er, at det er svært at lave elementer med løsfyldsisolering, som snittet halm er. Derfor må det antages, at for at halm og ler elementerne bliver en realitet skal der nogle pengestærke investorer til. En af måderne hvorpå problemet med løsfyldsisolering kan løses er ved at benytte den snittede halm i en mere kompakt form. Det kan evt. gøres ved at blande det snittede halm med gennemfugtet parpir, så det efter tørring bliver et batlignende element. Det har dog vist sig, at kræve yderligere udvikling da tørringsprocessen er langsom og dette forårsager spiring af rest korn i halmen. Det svære ved at benytte disse alternative isoleringsmaterialer er, at de skal forblive miljøvenlige, hvorfor der ikke kan tilsættes diverse tilsætningsstoffer, som benyttes i de moderne isoleringsmaterialer. Derved bliver det igen besværligt for byggeindustrien, idet de naturlige materialer ikke er så modstandsdygtige som uorganiske isoleringsmaterialer. Det er derfor vigtigt, at der er noget ekstra at vinde ved at benytte naturlige materialer, så det er det besværet værd.

Det vil sandsynligvis ske indenfor den nærmere fremtid, når energiforbruget i bygningens levetid er nedsat så meget, at fokus flyttes mere over på energien, der benyttes til fremstilling af bygningsmaterialer og belastningen af disse på naturen. Det vil medføre, at producenter formodentlig er nødt til at lede efter naturlige materialer, der kan erstatte de materialer der benyttes idag. Derfor vil naturlige materialer formentligt på sigt begynde at komme ind på markedet, trods de dårligere egenskaber.

Industraliseringen af halmhusbyggeri i form af ler og halm elementer kan måske hjælpe de naturlige materialer tidligere ind på markedet, ved en standadisering af elementerne, som det er muligt at benytte både under produktionen og på byggepladsen. Standadisering er en af de faktorer, der gør elementbyggeri til en effektiv og nem byggeform. Ved halmhusbyggeri i dag, er det nødvendigt hele tiden at tænke i alternative løsninger for selv de mindste problemer, idet der ikke er regler og krav til denne byggeform, udover det der er fælles for de to byggeformer og byggeindustrien generelt, som f.eks. styrker og brandsikkerhed. Problemet er igen, at det ligeledes kræver tid, udvikling og investering, som sandsynligvis afhænger af byggeindustrien.

Indførelsen af naturmaterialer i den danske byggeindustri kræver, som nævnt, stadig en del udvikling og undersøgelser for at kunne blive en realitet. I det efterfølgende afsnit er der givet et par forslag til, hvad nogle af disse undersøgelser kunne være.

26.1 Fremtidige projekter

I dette afsnit vil der blive listet projekter, der kan være med til skabe en bedre basis for halmhusbyggeri og belyse problemstillinger, der opstået under arbejdet med halmhusbyggeri i dette projekt.

Udvikling af måder hvorpå der kan produceres halmbats.

I dette projekt kan der arbejdes videre med halm papir elementet. Der kan laves undersøgelser af, hvornår der sker spiring på elementet, samt om det er muligt at udtørre elementet, på en energirigtig måde, inden spiring. Der kan desuden arbejdes med andre måder hvorpå halm kan indgå i isoleringsbats.

Materialedata på komprimeret halm.

Der kan i et sådan projekt arbejdes målrettet med, at bestemme flere materialeleværdier for komprimeret halm. Det kan f.eks. være at bestemme den optimale komprimering af den snittede halm, i forhold til varmeledningsevnen. Derudover kan det undersøges, hvor store mængder fugt, der skal til før der dannes svamp og råd i halmet.

Halm og ler elementer.

Der kan i dette projekt arbejdes med, konstruktion af halm og ler elementer, blandt andet med hensyn til med transport af elementer. Her kan der udføres forsøg med, hvordan ler bliver påvirket af rystelser.

Livscyklus analyse.

I dette projekt kan der laves en energimæssig vurdering af et halmhus kontra elementbyggeri, fra fremstilling af materialer til nedtagning af bygningen. Her kan det bl.a. undersøges, hvor stor indflydelse fremstillingen af delmaterialer har på den samlede livscyklus, samt beregne hvor langt energiforbruget i bygningens levetid skal nedsættes før fremstillingen ikke er den største faktor mere.

Litteratur

Athena Swentzell Steen, Bill Steen, D. B. o. D. E. [1994], *The Straw Bale House*, Chelsea Green Publishing Company. ISBN 0-930031-71-7.

Boliga.dk [n.d.], 'Boliga.dk'. <http://www.boliga.dk> Set d. 13.01.2009.

BR08 [2008], Erhvervs- og Byggestyrelsen. Bygningsreglement for erhvervs- og etagebyggeri.

Brorsen, M. & Larsen, T. [2003], *Lærebog i hydraulik*, Aalborg Universitetsforlag. ISBN 87-7307-691-0.

Carsten Pedersen et.al. [2003], *Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer*, 1. udgave edn, By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut. ISBN 87-563-1178-8 ISSN 0106-6757.

COMSOL AB [2007], *Heat Transfer Module, users guide*.

Danmarks Meteorologisk Institut [2009], 'Vejrarkiv'. <http://www.dmi.dk/>.

Dr. Wolfgang Feist et. al. [2007], *Passive House Planning Package 2007*.

DS 418 [2005], 7. udgave, Dansk Standard. Norm for beregning af bygningers varmetab.

DS/EN 13187 [1999], Dansk Standard. Bygningers termiske ydeevne. Kvalitativ sporing af termiske uregelmæssigheder i en bygnings klimaskærm. Infrarød metode.

DS/EN 13829 [2001], Dansk Standard. Bygningers termiske ydeevne. Bestemmelse af luftgennemtrængelighed i bygninger. Prøvningsmetode med overtryk skabt af ventilator.

- DS/EN 1946-4 [2000], Dansk standard. Byggeprodukters og bygningskomponenters termiske ydeevne. Specifikke kriterier for vurdering af laboratoriers målinger af varmetransmissionsegenskaber. Del 4: måling med (hot box) varmekassemetoder.
- E. J. Funch, C. E. Hyldgård, M. S.-T. [1994], *Grundlæggende klimateknik og bygningsfysik*, Aalborg Universitet.
- Efteruddannelsesudvalget for bygge/anlæg og industri [2008], 'Isolering- Energirigtige løsninger ved isolering af boliger'.
[http://74.125.77.132/search?q=cache:RMDWtAUWR7kJ:materialeplatform.emu.dk/materialer/Set d. 6.6.2009](http://74.125.77.132/search?q=cache:RMDWtAUWR7kJ:materialeplatform.emu.dk/materialer/Set+d.6.6.2009).
- Erhvervs- og Byggestyrelsen [2008], 'Brandeksempler i enfamiliehuse'.
[http://www.ebst.dk/file/9831/Bilag 5: Brandeksempler i enfamiliehuse \(til kap. 5\).pdf](http://www.ebst.dk/file/9831/Bilag%205:Brandeksempler%20i%20enfamiliehuse%20(til%20kap.%205).pdf) Set d.19.08.2008.
- Finansministeriet [n.d.], 'De internationale regler for reduktion af drivhusgasudledningen og anvendelsen af fleksible mekanismer'.
<http://www.fm.dk/Publikationer/2003/En%20omkostningseffektiv%20klimastrategi/3%20De%20delsen%20af%20fleksible%20mekanismer.aspx> Set d. 6.6.2009.
- Friland [n.d.], 'Om Friland'. <http://dr.dk/DR2/Friland/Om+Friland/> Set d. 16.1.2009.
- Hansen, H., Kjerulf, P. & Stampe, O. B. [1997], *Varme og Klimateknik Grundbog*, 2. udgave, Danvak ApS. ISBN 87-982652-8-8.
- ISO 8990 [1996], International Standard. Thermal Insulation – Determination of steady-state thermal transmission properties – Calibrated and guarded hot box.
- ISOVER [n.d.], 'ISOVERs guide til nybyggeri- med fokus på parcelhuse'.
www.isover.dk/graphics/ISOVER_DK/Om_Isover/Kontakta_oss/Brochurer/Energi_nybyg_A4.pdf Set d. 12.06.2009.
- Jettie Nielsen [2007], *Friland ABC et opslagsværk om bæredygtigt byggeri*, DR 2007. ISBN 978 87 7680 155 7.
- Jettie Nielsen [n.d.a], 'Friland ABC, Isoleringsmaterialer'.
<http://dr.dk/DR2/Friland/ABC/Isoleringsmaterialer> Set. 09.01.2009.
- Jettie Nielsen [n.d.b], 'Halmbyggeri'.
<http://dr.dk/DR2/Friland/ABC/Halmbyggeri> Set d. 9.1.2009.

Litteratur

Jørgen Munch-Andersen og Birthe Møller Andersen [2004], *Halmhuse, Udformning og materialeegenskaber*, 1.udgave edn, By g Byg, Statens Byggeforskningsinstitut. ISBN 87-563-1196-6 ISSN 1600-8049.

Klaus Ellehaug og Troels Kildemoes Møller [2005], 'Super lavenergihuse på vej til Danmark', *Vedvarende Energi og Miljø* .

Klaus Ellehaug og Troels Kildemoes Møller [2008], 'Hvad er et dansk passivhus?'.
<http://www.altompassivhuse.dk/download/passivhusartikel3.pdf> Set d. 12.01.2009.

Klima og Energiministeriet [2009], 'Historisk baggrund'.
<http://www.co2info.dk/Mereom/Historiskbaggrund/tabid/133/Default.aspx>
Set d. 6.6.2009.

KOMFORT HUSENE [n.d.a], 'Hvordan bygges et passivhus'.
http://www.komforthusene.dk/graphics/ISOVER_DK/Passivhuse/Hvordan bygges et passiv.pdf Set d. 19.1.09.

Komfort Husene [n.d.b], 'Komfort Husene introducerer dansk passivhusvinduer'. <http://www.komforthusene.dk/graphics/KOMFORT HUSENE/Hvordan passivhus/Artikler/Artikel om danske passivhusvinduer.pdf> Set d. 9.1.2009.

Kuben Byg A/S [2008], 'Billeder fra byggeriet'.
<http://www.komforthusene.dk/sw32767.asp> Set d. 6.6.2009.

Miljøministeriet [2003], 'Renere luft - den danske indsats'.
<http://www2.mst.dk/common/Udgivramme/Frame.asp?http://www2.mst.dk/Udgiv/7972-388-8/html/kap13.htm> Set d. 9.1.2009.

Mogens Steen-Thøde [2008], *Noter til kurset Hygrotermisk Bygningssimulering*, Aalborg Universitet. ISSN 1901-7286.

Munk Clemmensen APS [n.d.]. www.sproejtepodser.dk Set d. 15.05.2009.

N. Artmann, R. Vonbank R. L. Jensen [2008], Temperature measurements using type K thermocouples and the Fluke Helios Plus 2287A datalogger, Technical report, Aalborg University.

Niels Møller Bartholomæussen og Òli Pór Jónsson [2007], Air infiltration and building permeability, the fan pressurization method, Technical report, Aalborg Universitet.

- Økonomi- og Erhvervsministeriet [2007], 'Ændringer i det nye bygningsreglement, BR08'.
<http://www2.mst.dk/common/Udgivramme/Frame.asp?http://www2.mst.dk/Udgiv/publikati7972-388-8/html/kap13.htm> Set d.9.1.2009.
- Omega Engineering, inc [n.d.], 'Table of Total Emissivity'.
<http://www.omega.com/temperature/Z/pdf/z088-089.pdf> Set d. 10.05.2009.
- Palsgaard Gruppen [n.d.]. <http://www.palsgaardtrae.dk/> Set d. 12.05.2009.
- Passivhus.dk [n.d.], 'Certificering af passivhuse'.
<http://www.passivhus.dk/certificering.html> Set d. 20.09.2009.
- Paul Lacinski og Michel Bergeron [2000], *Serious Straw Bale, A home Construction Guide for All Climates*, Chelsea Green Publishing Company. ISBN 1-890132-64-0.
- PT Elementer [n.d.a]. <http://www.palsgaardtrae.dk> Set d. 12.05.2009.
- PT-elementer [n.d.b], Produkt - Byg let med træelementer, *in* 'http://www.palsgaardtrae.dk/pdf/pt-produkt.pdf'.
- Retrotec Energy Innovations Ltd. [2005], *Retrotec 2000 Series Door Fan Manual. For Energy, Scientific and Industrial Users*.
- Rockwool [n.d.], 'Om lavenergi- og passivhus'.
<http://lavenergi.rockwool.dk/sw105734.asp>Set d. 9.1.2009.
- Rockwool A/S [n.d.], 'Betonelementbatts 35'.
<http://guiden.rockwool.dk/produkter/bygningsisolering/betonelementbatts-35> Set d. 7.4.2009.
- Rolf Jacobsen [1999], *Halm som byggemateriale*, Litera. ISBN 82-485-0002-0.
- SBi 213 [2005]. Bygningers energibehov - Beregningsvejledning.
- SimLab [2008], *SimLab user manual*, European Commission, Joint Research Centre.
- Søren Fisker, Willy Olsen et.al. [2004], *Anlægsteknik 1, Materiel og udførelsesmetoder*, Polyteknisk Forlag. ISBN 87-502-0955-8.

Litteratur

Søren Fisker, Willy Olsen et.al. [2005], *Anlægsteknik 2, Styling af byggeprocessen*, Polyteknisk Forlag. ISBN 87-502-0966-3.

Taasinge Træ A/S [n.d.], in '<http://www.taasinge.dk/>'.

A Materialedata for isoleringsmaterialer

I det følgende afsnit vil forskellige materialer, både organiske og uorganiske blive beskrevet. De beskrevende materialer er materialer der oftest bliver benyttet i Friland. Kapitlet er baseret på [Jettie Nielsen 2007], medmindre andet er anført.

A.1 Halmballer

Varmeledningsevnen, λ_{10} , er målt og fastlagt i danske test parallelt på stråretningen for hele tørre baller med en densitet på 85-95 kg/m³ til 0,060 W/mK. Desuden har SBI målt/beregnet U-værdier for en vægkonstruktion med lerpudset halmballer. Vægkonstruktionen er beregnet for foderballer med en densitet på 100 kg/m³ denne konstruktion giver en U-værdi på 0,19-0,20 W/m²K. I Tyskland er der fastlagt tabelværdier for halmballer, hvilket er sat til.

- $\lambda = 0,080$ W/mK parallelt med stråretningen.
- $\lambda = 0,052$ W/mK vinkelret på stråretningen.

Et af problemerne ved halm er at det kan brænde, der er lavet test af Dansk Brandteknisk Institut, med en hel pudset vægkonstruktion testen er blevet udført på en halmballemur opbygget som følgende, 450 mm tyk halmballer, og pudset med 40 mm armeret lerpuds på begge sider. Disse vægkonstruktioner opfylder kravene til en BD30-konstruktion. Testen er dermed dokumentation for at konstruktionen kan benyttes som ydervægge, der skal stadig ved anden anvendelse søges om dispensation.

A.2 Hørfibre

Hørfibre er et let materiale med forholdsvis gode isoleringsegenskaber, det er desuden et let håndterligt materiale hvorfor det oftest bliver benyttet til at

stoppe i sprækker hvor det ikke er muligt at benyttet halm, et eksempel på dette kunne være omkring karmen af vinduer hvor der ellers benyttes skum. Der er ikke udført byggetekniske test for rå hørfibre, derfor er der ikke eksakte tekniske egenskaber for materialet. Der er på baggrund af viden omkring hørmaterialet og de isoleringstest der er udført på rør isoleringsmåtter der findes på markedet, lavet nogle forventninger til løsfyldt rør, der er som følgende: For presset rør bliver der benyttet en varmeledningsevne omkring 0,040 W/mk. Rør er et brændbart materiale derfor skal det benyttes materialer der overholder BD30, som med halm hvor det brændhæmmende materiale kunne være lerpuds. Rør er et hygroskopisk materiale, hvilket kan være en fordel da høren derfor kan anvendes uden dampspærre. Det antages desuden at hørfibrenes kritiske fugtighed er omkring 18-20 %, dette er analogt med træ og halmballer. Derfor skal rør som andre organiske materialer beskyttes mod indtrængning af vand og fugt. Høren er i et vist omfang selvimpregnerende og angribes derfor ikke umiddelbart af skadelige organismer.

A.2.1 Byggeregler og forskrifter

Rå hørfiber isolering opfylder ikke umiddelbart bygningsreglementet, men med udgangspunkt i eksisterende dokumentation for hørmåtter, [Carsten Pedersen et.al. 2003], bør der kunne søges dispensation.

Rå-hørruld kan ikke deklareres mht. isoleringsevnen i henhold til EUs bestemmelser. Derfor skal der søges dispensation for bygningsreglementets isoleringskrav, hvis høren bruges som isoleringsmateriale.

A.3 Lerjord

Lerjord er en betegnelse for jordblanding der indeholder minimum 10 % ler. Denne mængde af ler er tilstrækkeligt for at jorden bliver "klistret" i våd tilstand og får de sammenbindene "lermørtelegenskaber" ved optørring. Lerjord kan benyttes direkte uden nogen form for forarbejdning. Desuden er det et materiale der passer godt ind i Frilands principper, da det er et naturmateriale og det findes i store mængder overalt i verden. Lerjord er blevet brugt som byggemateriale af mennesket siden urtiden. En af fordelene ved at benytte lerjord som puds inden i huset er, at det er fugt regulerende hvilket betyder at det kan optage og afgive fugt hvilket vil medføre aftagning af fugt udsving. Lerjord kan forarbejdes på mange forskellige måder og benyttes til forskellige

A Materialedata for isoleringsmaterialer

formål, nogle af dem er listet op herunder.

- Puds indvendigt og udvendigt direkte på forskellige materialer.
- Til lergulv, hvis det bliver overfladebehandlet.
- Til presning af lersten og tørrede sten.
- Til industialiseret teglsten og mursten.
- Til ler-halm hvor der blandes halmstrå i en lerblanding.

Når lerjord benyttes i byggeriet er det vigtigt, at det er den rigtige blanding. Specielt er det vigtigt der er den rette mængde ler. Det er fordi leren arbejder meget ved opvædning og optørring, det betyder at det ved optørring kan svinde så meget at det slår revner hvilket ikke er ønskeligt. For at lerjorden er egnet til at bygge med bør lerindholdet være mellem 10-25 % indholdet af silt, sand og evt. grus skal være jævnt fordelt. Det at lerjorden arbejder så meget kan også være med til at skabe revner mellem evt. trækonstruktioner og lerpudset. Lerjords rumvægt ligger på omkring 2000 kg/m^3 afhængig af kornfordelingen. Lerpuds er mere sårbar overfor væde end optørring, da dette forbliver vandopløsligt. Et alternativ til ler kunne være at benytte kalkmørtel, oftest på ydersiden, da dette gennemgår en hærdningsproces. Lerjord er ikke brandbart derfor kan det benyttes som brændhæmmende lag udenpå en halmkonstruktion. Der findes begrænset materialedata på lerjord, og den materialedata der findes er baseret på erfaring og kan ses i tabel A.1.

	Rumvægt [kg/m^3]	Ler- indhold [%]	Halm- indhold [kg/m^3]	Tryk- styrke [kg/cm^2 28dg]	Luft- lydisolation [Db.40 cmlag]
Pisé	2000	12	x	15-30	50
Stampet murværk					
Lerbrød	1400	15	x	x	x
Armeret ler, der stables					
Adobe	1700	16	15	40	50
Soltørrede lersten					
Pressede lersten	2000	12	x	25	50
Halm-ler	800	x	90	35	x
blanding af halm og ler					

Tabel A.1: Viser materiale data på forskellige anvendelses metoder af lerjord.

A.4 Kalkmørtel

Kalkmørtel er en betegnelse der benyttes om kalkbaseret mørtel hvor der ikke tilsættes cement. Kalkmørtel kan både været rent læsket kalk eller også kan det være en læsket kalk hvor der er tilsat et hærdende tilslag, som ikke er cement. Kalkmørtel kan ikke opnå den samme trykstyrke som cement mørtler, men kan være en fordel at benytte i halmbyggerier da mørtlen er mere smedig og diffusionsåbne. Selvom kalkmørtel kan ikke opnå samme styrke som cementmørtel, kan den opnå tilstrækkelig styrke til et almindeligt hus. Kalkmørtel kan anvendes til en række forskellige formål i et byggeri en del af dem er listet op herunder.

- Puds indvendigt og udvendigt direkte på forskellige materialer.
- Opmuring.
- Støbte gulve med de rette hærdende materialer.
- Betonfundamenter med hærdende tilslag samt grus og sand.
- Pudsbeklædning på konstruktioner der skal være diffusionsåbne.
- Opmuring og puds på ældre mursten.

Det læskede kalk der benyttes i Danmark er kulekalk, hvilket betyder at det har været lagret fra 6 måneder til 18 år. Kalkens reaktionsevne afhænger af hvor lang tid det har lagret.

A.5 Muslingeskaller

Muslingeskaller benyttes hovedsagligt som tagbelægning eller isolerende og kapillarbrydende fyld under terrændæk. Det er en forholdsvis ny ide at benytte muslingeskaller i Danmark mens de er blevet brugt i årevis i Holland. De skaller der hovedsagligt benyttes er blåmuslingeskaller, anskaffelsesprisen har førhen været billig men er steget i den seneste tid på grund af de bliver opkøbt til andre erhverv. Derfor er det i Danmark blevet besværligt og nødvendigt at se efter andre alternative materialer på markedet. Muslingeskaller bliver hovedsagligt brugt til følgende ting.

- Drænlag under eller ved bygninger.

A Materialedata for isoleringsmaterialer

- Fundering af ikke-bærende vægge.
- Isolerende og kapillarbrydende lag ved krybekældere og i terrændæk.
- Isolering i etageskillelser.
- Drænmateriale i levende tage.

Der er desuden lavet en begrænset mængde materiale data på muslingeskaller, som er listet op i tabel A.2, A.3 og A.4, som er taget fra [Jettie Nielsen 2007], dataen er lavet ved forskellige densiteter da de er udført forskellige steder.

	Densitet [kg/m ³]
Muslingeskaller, hele	308
Muslingeskaller, knuste	655

Tabel A.2: Tabellen viser densiteten for muslingeskaller.

	Aktuel rumvægt [kg/m ³]	Kapillar stighøjde [mm]
Muslingeskaller, hele	288	6
Muslingeskaller, knuste	570	21
Muslingeskaller, knuste(fra sigtet)	526	26

Tabel A.3: Tabellen viser den kapillarbrydende effekt for muslingeskaller.

	Aktuel rumvægt [kg/m ³]	λ_{10} [W/mK]
Muslingeskaller, hele	307	0,120
Muslingeskaller, knuste	655	0,112
Muslingeskaller, knuste(fra sigtet)	555	0,122

Tabel A.4: Tabellen viser den varmeledningsevnen λ_{10} for muslingeskaller.

SBI anbefaler at der anvendes en λ -værdi på 0,135 W/mK.

B Materialeleværdier

I det følgende er materialeleværdier, der er benyttet i *COMSOL* modellerne, beskrevet i afsnit 18.6, listet. Navnene på materialerne svarer til de navne der er benyttet i *COMSOL*.

Materiale	Varmeledningsevne [W/m°C]	Varmefylde [J/kg°C]	Densitet [kg/m³]
Jord	1,5	1260	1200
Reglar	0,14	2500	500
Spærtræ	0,14	2500	500
Isolering	0,11	1750	97,16

Tabel B.1: Materialeleværdier for tagkonstruktionsmodel i *COMSOL*.

Materiale	Varmeledningsevne [W/m°C]	Varmefylde [J/kg°C]	Densitet [kg/m³]
Douglas gran	0,14	2500	495
Lægter	0,14	2500	500
Lerpuds	1,5	920	1500
Forskallingsbrædder	0,14	2500	500
Spærtræ	0,14	2500	500
Isolering	0,11	1750	97,16

Tabel B.2: Materialeleværdier for vægkonstruktion i *COMSOL* modeller.

Materiale	Varmeledningsevne [W/m°C]	Varmefylde [J/kg°C]	Densitet [kg/m³]
Leca blok	0,16		600
Brædder	0,14	2500	500
Isolering	0,11	1750	97,16
Spærtræ	0,14	2500	500
Gulvbrædder	0,14	2500	500

Tabel B.3: Materialeleværdier for fundament i *COMSOL* model.

Materiale	Varmeledningsevne [W/m°C]	Varmefylde [J/kg°C]	Densitet [kg/m³]
Douglas gran	0,14	2500	495
Gummiliste	0,23	130	1000
Lavenergi termorude	0,8	750	2700
Argon	0,018	520	1,761
Varm kant	0,05	750	1150
Atmosfæisk luft	0,0257	1007	1,205

Tabel B.4: Materialeleværdier for glasparti i *COMSOL* model.

Materiale	Varmeledningsevne [W/m°C]	Varmefylde [J/kg°C]	Densitet [kg/m³]
Fyrtræ	0,14	2500	500
Simpel vindue	0,28	600	901,174
Varm kant	0,05	750	1150

Tabel B.5: Materialeleværdier for køkkenvindue i *COMSOL* modeller.

C Resultater fra komprimerings test

I dette bilag vil alle kompresions forsøgende blive beskrevet i tabel C.1

	Vægt kg	Højde m	Dimensioner		
			Diameter m	Areal m ²	Volumen m ³
Mål på spand	1,573	0,31	0,27	0,057256	0,017749
Træplade	0,468	0,015	0,27	0,057256	0,000859

Tabel C.1: Tabellen viser vægt og dimensioner på skraldespanden, samt trykkepladen.

Byg, havre og hvede					
Komprimering 1. gang					
	Vægt kg	lodvægt kg	Mål fra top m	Komprimering m	Volumen m ³
Halm uden plade	0,485		0,14		
Halm og plade	0,953	0,468	0,12		0,009161
+ 1 lille	4,48	3,995	0,149	0,029	0,0075
+ 2 lille	7,993	7,508	0,169	0,02	0,006355
+ 2 lille + 1 stor	17,084	16,599	0,188	0,019	0,005268
+ 2 lille + 2 store	26,131	25,646	0,198	0,01	0,004695
+ 2 lille + 3 store	36,7	36,215	0,204	0,006	0,004351
+ 2 lille + 4 store	47,257	46,772	0,208	0,004	0,004122
Komprimering 2. gang					
Halm uden plade	0,834		0,06		
Halm og plade	1,302	0,468	0,054		0,01294
+ 1 lille	4,829	3,995	0,09	0,036	0,010879
+ 2 lille	8,343	7,509	0,109	0,019	0,009791
+ 2 lille + 1 stor	17,433	16,599	0,131	0,022	0,008531
+ 2 lille + 2 store	26,48	25,646	0,148	0,017	0,007558
+ 2 lille + 3 store	37,048	36,214	0,154	0,006	0,007214
+ 2 lille + 4 store	47,606	46,772	0,16	0,006	0,006871
Komprimering 3. gang					
Halm uden plade	1,063		0,01		
Halm og plade	1,531	0,468	0,017		0,015058
+ 1 lille	5,058	3,995	0,051	0,034	0,013112
+ 2 lille	8,572	7,509	0,067	0,016	0,012195
+ 2 lille + 1 stor	17,663	16,6	0,09	0,023	0,010879
+ 2 lille + 2 store	26,71	25,647	0,106	0,016	0,009962
+ 2 lille + 3 store	37,278	36,215	0,117	0,011	0,009333
+ 2 lille + 4 store	47,837	46,774	0,126	0,009	0,008817

Tabel C.2: Tabellen viser alle komrpimeringsforsøgende for Byg, havre og hvede, med skraldespanden.

I tabel C.2 er alle komprimeringsforsøgende for byg, havre og hvede. Hver nye komprimering betyder at der er fyldt løst halm oven på det komprimerede.

C Resultater fra komprimerings test

Fabrikssnittet havre					
Komprimering 1. gang					
	Vægt kg	Vægt u. halm kg	Mål fra top m	Komprimering m	Volumen m ³
Halm uden plade	0,441		0,11		
Halm og plade	0,909	0,468	0,109		0,009791
+ 1 lille	4,422	3,981	0,154	0,045	0,007214
+ 2 lille	7,95	7,509	0,164	0,01	0,006642
+ 2 lille + 1 stor	17,041	16,6	0,183	0,019	0,005554
+ 2 lille + 2 store	26,088	25,647	0,197	0,014	0,004752
+ 2 lille + 3 store	36,646	36,205	0,203	0,006	0,004409
+ 2 lille + 4 store	47,214	46,773	0,21	0,007	0,004008
Komprimering 2. gang					
Halm uden plade	0,666		0,06		
Halm og plade	1,132	0,466	0,08		0,011451
+ 1 lille	4,464	3,798	0,116	0,036	0,00939
+ 2 lille	8,173	7,507	0,13	0,014	0,008588
+ 2 lille + 1 stor	17,264	16,598	0,149	0,019	0,0075
+ 2 lille + 2 store	26,312	25,646	0,159	0,01	0,006928
+ 2 lille + 3 store	36,87	36,204	0,171	0,012	0,006241
+ 2 lille + 4 store	47,439	46,773	0,179	0,008	0,005783
Komprimering 3. gang					
Halm uden plade	0,929		0,01		
Halm og plade	1,397	0,468	0,03		0,014314
+ 1 lille	4,911	3,982	0,064	0,034	0,012367
+ 2 lille	8,44	7,511	0,084	0,02	0,011222
+ 2 lille + 1 stor	17,531	16,602	0,103	0,019	0,010134
+ 2 lille + 2 store	26,577	25,648	0,114	0,011	0,009504
+ 2 lille + 3 store	37,137	36,208	0,123	0,009	0,008989
+ 2 lille + 4 store	47,705	46,776	0,13	0,007	0,008588

Tabel C.3: Tabellen viser alle komrpimeringsforsøgende for fabrikssnittet havre, med skraldespanden.

I tabel C.3 er alle komprimeringsforsøgende for fabrikssnittet havre. Hver nye komprimering betyder at der er fyldt løst halm oven på det komprimerede.

Rapshalm					
Komprimering 1. gang					
	Vægt kg	Vægt u. halm kg	Mål fra top m	Komprimering m	Volumen m ³
Halm uden plade	0,733		0,11		
Halm og plade	1,201	0,468	0,118		0,009275
+ 1 lille	4,714	3,981	0,138	0,02	0,00813
+ 2 lille	8,241	7,508	0,145	0,007	0,007729
+ 2 lille + 1 stor	17,333	16,6	0,16	0,015	0,006871
+ 2 lille + 2 store	26,38	25,647	0,17	0,01	0,006298
+ 2 lille + 3 store	36,94	36,207	0,176	0,006	0,005955
+ 2 lille + 4 store	47,509	46,776	0,182	0,006	0,005611
Komprimering 2. gang					
Halm uden plade	1,055		0,06		
Halm og plade	1,523	0,468	0,065		0,01231
+ 1 lille	5,037	3,982	0,08	0,015	0,011451
+ 2 lille	8,564	7,509	0,09	0,01	0,010879
+ 2 lille + 1 stor	17,655	16,6	0,103	0,013	0,010134
+ 2 lille + 2 store	26,701	25,646	0,111	0,008	0,009676
+ 2 lille + 3 store	37,259	36,204	0,12	0,009	0,009161
+ 2 lille + 4 store	47,827	46,772	0,124	0,004	0,008932
Komprimering 3. gang					
Halm uden plade	1,359		0,01		
Halm og plade	1,827	0,468	0,01		0,015459
+ 1 lille	5,34	3,981	0,026	0,016	0,014543
+ 2 lille	8,867	7,508	0,036	0,01	0,01397
+ 2 lille + 1 stor	17,958	16,599	0,05	0,014	0,013169
+ 2 lille + 2 store	27,005	25,646	0,057	0,007	0,012768
+ 2 lille + 3 store	37,564	36,205	0,063	0,006	0,012424
+ 2 lille + 4 store	48,133	46,774	0,07	0,007	0,012024

Tabel C.4: Tabellen viser alle komrpimeringsforsøgende for fabrikssnittet rapshalm, med skraldespenden.

I tabel C.3 er alle komprimeringsforsøgende for fabrikssnittet rapshalm. Hver nye komprimering betyder at der er fyldt løst halm oven på det komprimerede.

D Opsætning af hot box

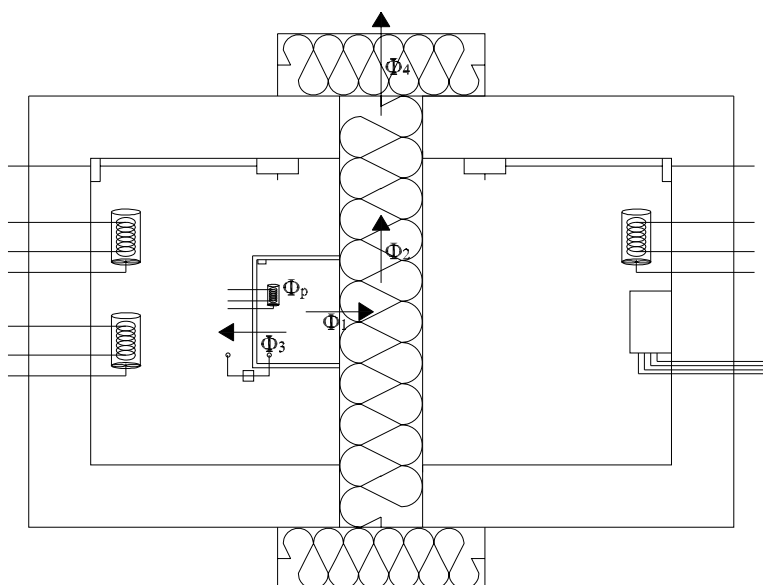
I dette bilag vil de indledende øvelser, der er udført inden hot box forsøget, blive beskrevet. Dermed vil det kunne benyttes som en guide til førstegangsbrugere af hot box'en. Det er i første omgang nødvendigt at forstå formålet med at benytte en hot box og hvad det i det enkelte tilfælde er nødvendigt at måle og med hvilken præcision målingerne skal udføres.

D.1 Hot box'en

Her vil det kort blive forklaret hvad en hot box er og hvad den kan benyttes til. Hot box'en er blevet konstrueret på Aalborg Universitet, med hovedformål som en hot box, hvor temperaturen kan styres uafhængigt i de to halvdele. Imellem de to halvdele kan der placeres et prøveelement, som er illustreret på figur D.1.

Hot box'en kan også benyttes til evt. kalibrering af flere instrumenter på en gang, da den er udformet så hele hot box'en kan styres på en gang. Der kan tilføres fugt i luften, som dog ikke vil blive benyttet i projektet her. For at give et mere visuelt indtryk af hot box'en er der taget et billede, hvor hhv. den varme og den kolde side er trukket sammen med en wire. Det kan ses på figur D.2.

Billedet er taget under de indledende øvelser, for blandt andet at finde ud af hvilke former for styring der skal benyttes i hot box'en, det er beskrevet i det efterfølgende afsnit.



Figur D.1: Figuren viser en illustration af varmestrømmen i hot box'en.



Figur D.2: Figuren viser et billede af hot box'en, trukket sammen med en wire.

D.2 Styring

Der har været forskellige overvejelser omkring hvilke metoder, der kunne benyttes til at styre hot box'en. Der skal udformes en form for styring til dele af hot box'en, det er som minimum nødvendigt at have en styreenhed på enten den

D Opsætning af hot box

guardede del eller på selve målekasse. En af disse to skal styres, da der ikke må være nogen varmeudveksling mellem den guardede del og målekassen. Temperaturen i den varme side er forsøgt styret med hhv. Danfoss controlleren og med et jævnt tilførelse af energien. I den kolde side er der benyttet en køler, som er sluttet til en airconditioning, blevet benyttet hvor temperaturen er indstillet til et par grader under den ønskede temperatur i den kolde side.

Fremløbet af det kolde vand bliver styret af en Danfoss EPT 612, som modtager et signal fra en pt1000 monteret i hot box'en, hvor indstillingerne for denne kan ses på figur D.3. Disse indstillinger vil styre udsvingende og kan optimeres ved beregninger på dette, som kendt med indregulering af eks. ventilationssystemer.

Med indstillingerne som vist på billedet kan systemet holde udsvinget for den kolde side på $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Det gøres ved en temperatur på ca. 46°C i den varme side og ca. 5°C i den kolde side, med en 15 mm MDF-plade imellem som også kan ses på figur D.2, denne plade benyttes kun under testen af hot box'en.



Figur D.3: Figuren viser et billede af indstillingerne på Danfoss EPT 612 til styring af den kolde side.

For at have kontrol over hvor store udsving der har været gennem de indledende forsøg, er temperaturen blevet tilsluttet en kanalskriver, som derved viste udsvingende.

D.3 Indledende resultater

Det har vist sig nødvendigt, at slukke for varmefladen i den kolde side, da denne skabte større udsving end køleren alene. For at styre den varme side blev der koblet en danfoss controller til blæserne i den varme side. Dette burde have været varmespiralerne, men det viste sig under disse indledende øvelser at den mængde energi der bliver tilført til blæserne var mere end nok til at opnå en temperatur på over 50 °C

Danfoss controlleren reagerer langsomt og kan derfor kun holde temperaturen indenfor 0,4 °C, derfor må det antages at der bliver en del indstillingsarbejde mellem hvert forsøg for, at sikre at varmestrømmen mellem den guardedede boks og målekassen er ligmed nul. Dette gøres ved at lade danfoss controlleren styre temperaturen alene i et døgn, hvorved der tilnærmelsesvis opnås den ønskede temperatur i den varme kasse, det kan gøres alene med ventilatorerne eller med ventilatorerne og spiralvarmerne samtidig. Det er fundet bedst at benyttet varmespiralerne i ca. et halvt døgn, hvorefter ventilatorerne benyttes alene. Efter et døgn starter indreguleringen hvilket gøres manuelt, dette gøres ved at skrue effekten for ventilatorerne ned så de holder en konstant temperatur på det ønskede. Det kan være et problem at gøre over et helt døgn, da temperaturen i laboratoriet variere og dermed også energitabet gennem siderne af hot box'en.

Til styring af den tilførte effekt i den varme side benyttes en Regavolt transformator. Den benyttes da den kan høj stabil effekt. I målekassen benyttes der ikke varme spiraler, men varmetråde hvor en ventilator som blæser luften direkte forbi en varmetråd. Dette er lavet med henblik på et senere styringssystem, som skal gøre det muligt at se en hurtig reaktion på instillingerne, dette vil på sigt også blive monteret i den varme kasse. Effekten i målekassen bliver holdt konstant for at opretholde det stationære tilfælde. For at logge temperaturene er alle de monterede termoelementer koblet til en Fluke Helios plus datalogger, i de udførte forsøg logger den hvert 10. sekund, hvilket dog kan varieres efter eget ønske. For at det bliver muligt at lave målinger, der overholder alle krav i [DS/EN 1946-4 2000] og [ISO 8990 1996] er det nødvendigt at udvikle mere autoriseret instillings metoder.

E Kalibreringer

I det følgende vil kalibreringerne for de resterende termoelementer blive vist. Den afvigende temperatur aflæst på præcisionstermometeret, i forhold til brøndtemperaturen, skyldes manglende kalibrering af brønden. Det har ingen betydning for forsøget, idet temperaturen som termoelementerne kalibreres ved ikke har nogen betydning så længe de holder sig inden for det interval af temperaturer der benyttes i forsøget.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,074	1,56	0
0,270	6,59	5
0,467	11,58	10
0,665	16,59	15
0,865	21,59	20
1,067	26,61	25
1,268	31,61	30
1,471	36,62	35
1,675	41,64	40
1,879	46,65	45

Tabel E.1: Viser kalibrering af kanal 4, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,071	1,56	0
0,269	6,59	5
0,467	11,58	10
0,668	16,59	15
0,868	21,59	20
1,071	26,61	25
1,274	31,61	30
1,478	36,62	35
1,683	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.2: Viser kalibrering af kanal 5, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,078	1,56	0
0,275	6,59	5
0,471	11,58	10
0,669	16,59	15
0,868	21,59	20
1,068	26,61	25
1,270	31,61	30
1,472	36,62	35
1,675	41,64	40
1,879	46,65	45

Tabel E.3: Viser kalibrering af kanal 6, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Kanal 8, 9 og 12 er kalibreret igen, idet der var fejl ved den første kalibrering på disse tre termoelementer. De er ligeledes kalibreret i en anden brønd, hvorfor at de aflæste brøndtemperaturer er anderledes.

Termoelementet i kanal 20 er placeret i laboratoriet.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,020	0,29	0
0,218	5,24	5
0,412	10,14	10
0,608	15,30	15
0,805	20,01	20
1,003	24,91	25
1,202	29,82	30
1,404	34,77	35
1,604	39,67	40
1,808	44,64	45

Tabel E.4: Viser kalibrering af kanal 8, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,019	0,29	0
0,217	5,24	5
0,411	10,14	10
0,608	15,30	15
0,806	20,01	20
1,003	24,91	25
1,203	29,82	30
1,405	34,77	35
1,606	39,67	40
1,810	44,64	45

Tabel E.5: Viser kalibrering af kanal 9, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,078	1,56	0
0,275	6,59	5
0,471	11,58	10
0,670	16,59	15
0,869	21,59	20
1,070	26,61	25
1,271	31,61	30
1,474	36,62	35
1,678	41,64	40
1,882	46,65	45

Tabel E.6: Viser kalibrering af kanal 10, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,080	1,56	0
0,276	6,59	5
0,471	11,58	10
0,670	16,59	15
0,869	21,59	20
1,067	26,61	25
1,270	31,61	30
1,472	36,62	35
1,675	41,64	40
1,879	46,65	45

Tabel E.7: Viser kalibrering af kanal 11, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,024	0,29	0
0,219	5,24	5
0,414	10,14	10
0,610	15,30	15
0,806	20,01	20
1,003	24,91	25
1,203	29,82	30
1,405	34,77	35
1,606	39,67	40
1,810	44,64	45

Tabel E.8: Viser kalibrering af kanal 12, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i målekassen.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,069	1,56	0
0,267	6,59	5
0,465	11,58	10
0,666	16,59	15
0,868	21,59	20
1,072	26,61	25
1,276	31,61	30
1,480	36,62	35
1,686	41,64	40
1,892	46,65	45

Tabel E.9: Viser kalibrering af kanal 13, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,071	1,56	0
0,269	6,59	5
0,467	11,58	10
0,668	16,59	15
0,869	21,59	20
1,071	26,61	25
1,275	31,61	30
1,478	36,62	35
1,684	41,64	40
1,890	46,65	45

Tabel E.10: Viser kalibrering af kanal 14, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,068	1,56	0
0,266	6,59	5
0,464	11,58	10
0,664	16,59	15
0,865	21,59	20
1,068	26,61	25
1,274	31,61	30
1,478	36,62	35
1,684	41,64	40
1,890	46,65	45

Tabel E.11: Viser kalibrering af kanal 15, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,065	1,56	0
0,264	6,59	5
0,464	11,58	10
0,665	16,59	15
0,867	21,59	20
1,071	26,61	25
1,275	31,61	30
1,480	36,62	35
1,687	41,64	40
1,894	46,65	45

Tabel E.12: Viser kalibrering af kanal 16, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,064	1,56	0
0,264	6,59	5
0,463	11,58	10
0,665	16,59	15
0,867	21,59	20
1,071	26,61	25
1,275	31,61	30
1,480	36,62	35
1,686	41,64	40
1,893	46,65	45

Tabel E.13: Viser kalibrering af kanal 17, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,063	1,56	0
0,265	6,59	5
0,464	11,58	10
0,666	16,59	15
0,869	21,59	20
1,072	26,61	25
1,275	31,61	30
1,480	36,62	35
1,687	41,64	40
1,894	46,65	45

Tabel E.14: Viser kalibrering af kanal 18, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,065	1,56	0
0,265	6,59	5
0,464	11,58	10
0,666	16,59	15
0,868	21,59	20
1,072	26,61	25
1,276	31,61	30
1,481	36,62	35
1,688	41,64	40
1,895	46,65	45

Tabel E.15: Viser kalibrering af kanal 19, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,614	15,17	15
0,810	20,08	20
1,007	24,96	25

Tabel E.16: Viser kalibrering af kanal 20, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i laboratoriet.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,064	1,56	0
0,263	6,59	5
0,462	11,58	10
0,663	16,59	15
0,865	21,59	20
1,068	26,61	25
1,272	31,61	30
1,476	36,62	35
1,682	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.17: Viser kalibrering af kanal 21, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,067	1,56	0
0,266	6,59	5
0,463	11,58	10
0,664	16,59	15
0,864	21,59	20
1,068	26,61	25
1,271	31,61	30
1,474	36,62	35
1,679	41,64	40
1,885	46,65	45

Tabel E.18: Viser kalibrering af kanal 22, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,063	1,56	0
0,263	6,59	5
0,462	11,58	10
0,663	16,59	15
0,865	21,59	20
1,068	26,61	25
1,272	31,61	30
1,477	36,62	35
1,682	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.19: Viser kalibrering af kanal 23, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,063	1,56	0
0,263	6,59	5
0,462	11,58	10
0,663	16,59	15
0,865	21,59	20
1,067	26,61	25
1,272	31,61	30
1,477	36,62	35
1,682	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.20: Viser kalibrering af kanal 24, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og brøndtemperaturen er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,068	1,56	0
0,267	6,59	5
0,465	11,58	10
0,666	16,59	15
0,867	21,59	20
1,069	26,61	25
1,272	31,61	30
1,476	36,62	35
1,681	41,64	40
1,887	46,65	45

Tabel E.21: Viser kalibrering af kanal 25, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,066	1,56	0
0,265	6,59	5
0,464	11,58	10
0,665	16,59	15
0,867	21,59	20
1,069	26,61	25
1,273	31,61	30
1,478	36,62	35
1,683	41,64	40
1,890	46,65	45

Tabel E.22: Viser kalibrering af kanal 26, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,064	1,56	0
0,264	6,59	5
0,463	11,58	10
0,664	16,59	15
0,866	21,59	20
1,070	26,61	25
1,274	31,61	30
1,479	36,62	35
1,685	41,64	40
1,892	46,65	45

Tabel E.23: Viser kalibrering af kanal 27, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,063	1,56	0
0,264	6,59	5
0,449	11,58	10
0,664	16,59	15
0,867	21,59	20
1,069	26,61	25
1,274	31,61	30
1,479	36,62	35
1,685	41,64	40
1,890	46,65	45

Tabel E.24: Viser kalibrering af kanal 28, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den varme side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,063	1,56	0
0,266	6,59	5
0,465	11,58	10
0,666	16,59	15
0,868	21,59	20
1,072	26,61	25
1,276	31,61	30
1,480	36,62	35
1,688	41,64	40
1,895	46,65	45

Tabel E.25: Viser kalibrering af kanal 29, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,067	1,56	0
0,266	6,59	5
0,464	11,58	10
0,666	16,59	15
0,867	21,59	20
1,069	26,61	25
1,273	31,61	30
1,477	36,62	35
1,683	41,64	40
1,890	46,65	45

Tabel E.26: Viser kalibrering af kanal 30, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,066	1,56	0
0,265	6,59	5
0,463	11,58	10
0,665	16,59	15
0,865	21,59	20
1,068	26,61	25
1,273	31,61	30
1,478	36,62	35
1,683	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.27: Viser kalibrering af kanal 31, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,066	1,56	0
0,264	6,59	5
0,463	11,58	10
0,664	16,59	15
0,865	21,59	20
1,068	26,61	25
1,273	31,61	30
1,478	36,62	35
1,682	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.28: Viser kalibrering af kanal 32, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,065	1,56	0
0,263	6,59	5
0,462	11,58	10
0,664	16,59	15
0,865	21,59	20
1,069	26,61	25
1,274	31,61	30
1,480	36,62	35
1,684	41,64	40
1,891	46,65	45

Tabel E.29: Viser kalibrering af kanal 33, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,068	1,56	0
0,265	6,59	5
0,464	11,58	10
0,666	16,59	15
0,866	21,59	20
1,069	26,61	25
1,273	31,61	30
1,478	36,62	35
1,682	41,64	40
1,889	46,65	45

Tabel E.30: Viser kalibrering af kanal 34, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,065	1,56	0
0,263	6,59	5
0,462	11,58	10
0,664	16,59	15
0,865	21,59	20
1,068	26,61	25
1,274	31,61	30
1,480	36,62	35
1,684	41,64	40
1,892	46,65	45

Tabel E.31: Viser kalibrering af kanal 35, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

E Kalibreringer

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,065	1,56	0
0,263	6,59	5
0,461	11,58	10
0,664	16,59	15
0,864	21,59	20
1,068	26,61	25
1,273	31,61	30
1,478	36,62	35
1,683	41,64	40
1,890	46,65	45

Tabel E.32: Viser kalibrering af kanal 36, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,063	1,56	0
0,261	6,59	5
0,460	11,58	10
0,663	16,59	15
0,864	21,59	20
1,068	26,61	25
1,274	31,61	30
1,479	36,62	35
1,684	41,64	40
1,892	46,65	45

Tabel E.33: Viser kalibrering af kanal 37, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i den kolde side.

Termoelementerne i kanal 38 og 39 er ligeledes placeret i laboratoriet.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,613	15,17	15
0,810	20,08	20
1,008	24,96	25

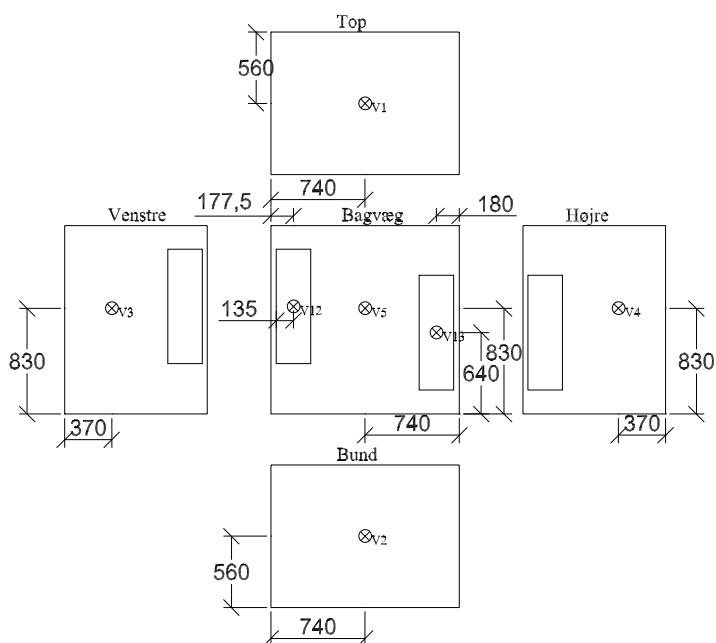
Tabel E.34: Viser kalibrering af kanal 38, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i laboratoriet.

Logning [mV]	Præcisionstermometer [°C]	Brønd [°C]
0,611	15,17	15
0,809	20,08	20
1,008	24,96	25

Tabel E.35: Viser kalibrering af kanal 39, hvor Logning er målingen fra dataloggeren, Præcisionstermometeret er den eksakte temperatur og Brønd er den ønskede temperatur. Termoelementet er placeret i laboratoriet.

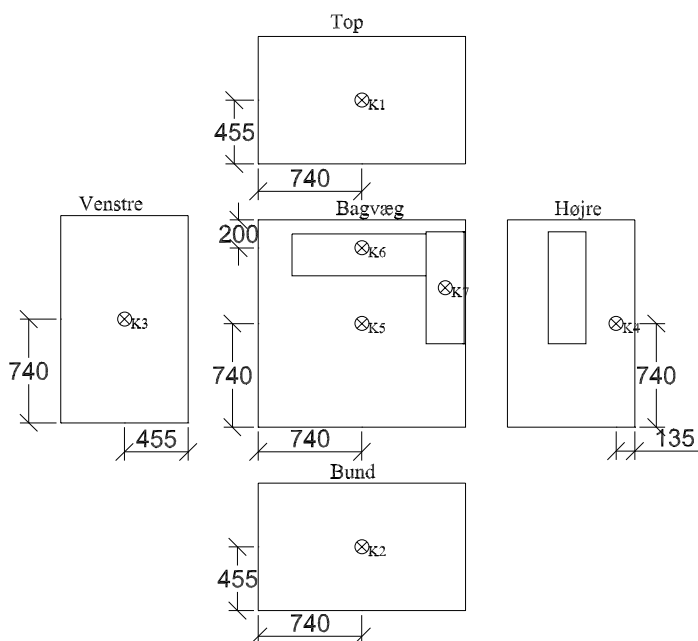
F Målepunkters placering

I dette bilag vil målepunkternes placering blive illustreret på figurer, mens de målepunkter der er placeret i luften eller af anden grund ikke er tegnet på figurene vil blive beskrevet i teksten. Først kan målepunkterne placeret på overfladerne i den varme kasse ses på figur F.1.



Figur F.1: Viser placeringerne af termoelementerne i den varme side i hot box'en. Termoelementerne der ikke er synlige på figuren er placeret enten i luften eller på udvendige overflader af målekassen og kan ses på figur F.4.

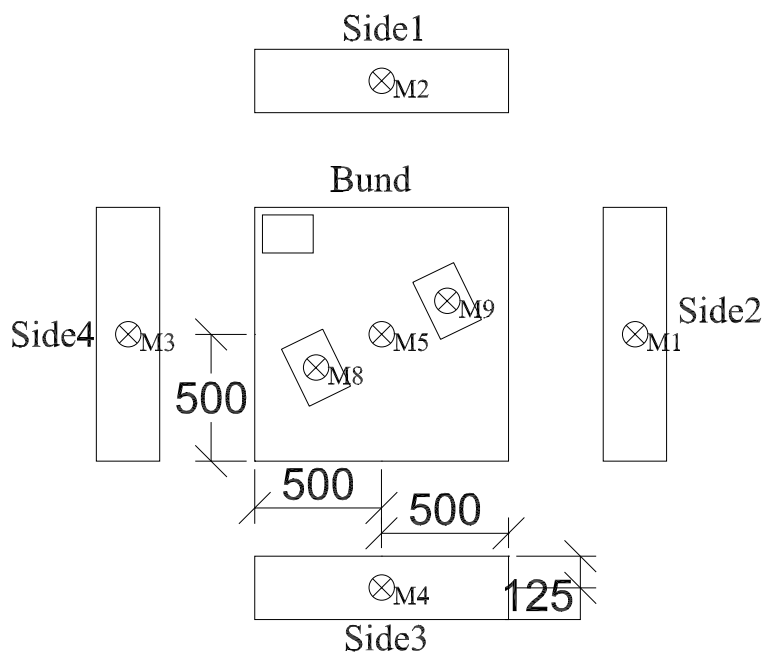
På figur F.2 kan termoelementerne placeret i på overfladerne i den kolde side ses.



Figur F.2: Viser placeringerne af termoelementerne på overfladen i den kolde side i hot box'en. Termoelementerne der ikke er synlige på figuren er placeret enten i luften eller på overflader af testelementet og kan ses på figur F.4.

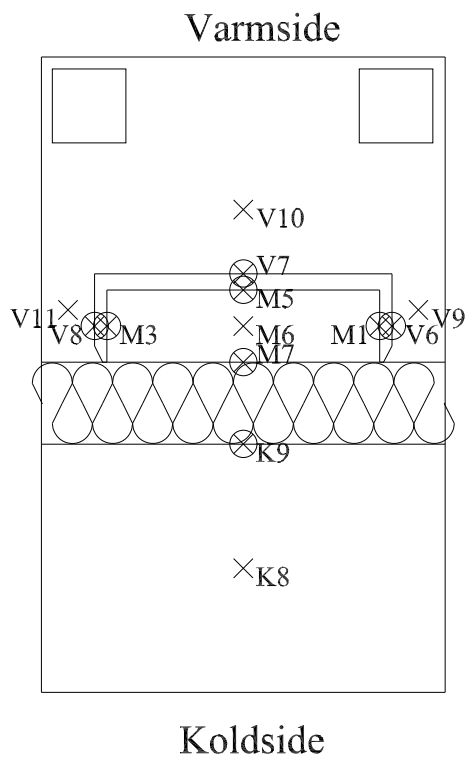
På figur F.3 kan termoelementerne placeret i på overfladerne i den målekassen ses.

F Målepunkters placering



Figur F.3: Viser placeringerne af termoelementerne på overfladen i den målekassen i hot box'en. Termoelementerne der ikke er synlige på figuren er placeret enten i luften eller på overflader af testelementet og kan ses på figur F.4.

På figur F.4 kan termoelementerne placeret på enkelte overflader i målekassen, samt overfladen på testelementet og i luften ses.



Figur F.4: Viser placeringerne af termoelementerne på enkelte overflader i målekassen, på testelementet og i luften

På disse fire figure er der fire termoelementer inde i hot box'en der ikke er vist og det er termoelementerne på hhv. top og bund af målekassen, på indvendig side er det M4 og M2, der sidder over for hhv. V14 og V15. Desuden er der placeret 3 termoelementer i laboratoriet i hhv. 0,1 m, 1 m og 2 m over gulvet.

G Udførsel af forsøg i Friland

Forberedelse af hus og udstyr:

- Tape huller i klimaskærm til.
 - Ventilation.
 - Udluftningsåbninger i vinduer.
 - Lukke alle vinduer (husk klap i tagvinduer).
 - Åben alle indvendige døre.
 - Afløb.
 - Emhætte.
 - Afløb fra vaskemaskine hvis muligt.
- Varmesystem skal evt. slukkes.
 - Lav evt. forsøg åben spjæld og et med lukket spjæld.
- Luk udvendige døre og vinduer.
- Opsætning af blowerdoor.
 - Placer udvendige slanger med monteret vinddæmpningssystem.
 - Opsæt dør med fan.
 - Placer resterende slanger.
- Grøn slange i taske nær fan.
- Blå midt i hus.
- Rød udenfor tilsluttet vinddæmpningssystem.
- Gul sluttes til fan.
- Slutte DM-2 til computer.
- Opsæt vindmåler samt temperatur- og fugtmåler.

-
- Måles før, under og efter forsøg.
 - Vurder også vind efter Beaufort skala.
 - Kan evt. suppleres med DMI's målinger fra nærmeste vejrstation.
 - Opsæt termografikamera.
 - Tag billeder af forsøgsopstilling samt ændringer der er foretaget i klimaskærmen.

Indledende forsøg (Udføres i henhold til DS 13829)

- Zero-flow pressure difference.
 - Dæk fan til med rød kappe.
 - Mål alle værdier Δp_{01} i mindst 30 sek.
 - Kontroller at ingen af de målte værdier er over 5 Pa, for så er forsøget ugyldigt.

Pressure difference sequence (Udføres i henhold til DS 13829)

- Minimumsværdi.
 - Den største værdi af: 10 Pa eller 5x største værdi fra zero-flow pressure difference forsøg(positiv eller negativ er ligemeget).
- Maksimumsværdi.
 - For mindre huse er det anbefalet at benytte ± 100 Pa.
- Laver to datasæt.
 - Det anbefales at vælge mellem 8-10 punkter for hver datasæt.
- Punkterne bør være logaritmisk fordelt.
 - Mål indendørs og udendørs temperaturer.
 - Tag termografibilleder før forsøg.
 - 1. sæt: pressurisation (overtryk i hus).
 - Vend ventilator i blowerdoor.
 - Mål indendørs og udendørs temperaturer.

G Udførsel af forsøg i Friland

- 2.sæt: depressurisation (undertryk i hus).
- Benyt evt. røgpind under forsøg.
- Tag termografibilleder under forsøg.
- Kontroller løbende klimaskærmen for at sikre at der ikke er noget der har ændret sig i form af løs tape eller åbne døre og vinduer.

Afslut forsøg

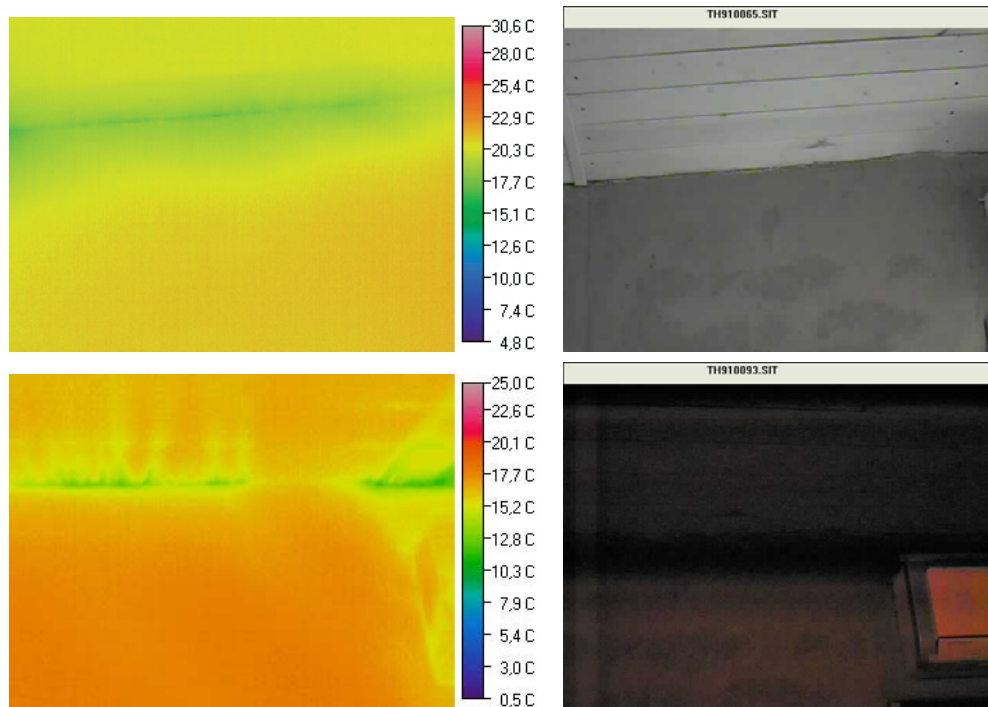
- Zero-flow pressure difference.
 - Dæk fan til med rød kappe.
 - Mål alle værdier Δp_{01} i mindst 30 sek.
 - Kontroller at ingen af de målte værdier ikke er over 5 Pa, for så er forsøget ugyldigt.

Pakke udstyr sammen og levere hus tilbage i samme stand som da vi kom.

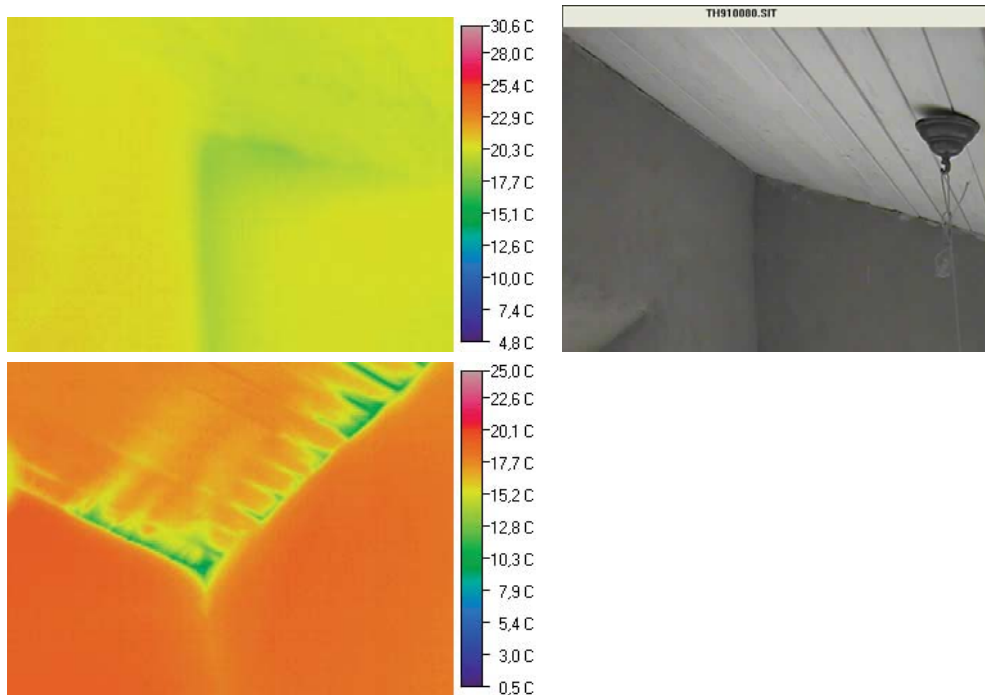
H Termograferingsbilleder

I det følgende afsnit vil de resterende billeder med ens temperaturintervaller, som ikke er vist i afsnit 21.6 fra forsøget i Friland blive vist. Derudover vil der til sidst i kapitlet blive vist de oprindelige termografibilleder.

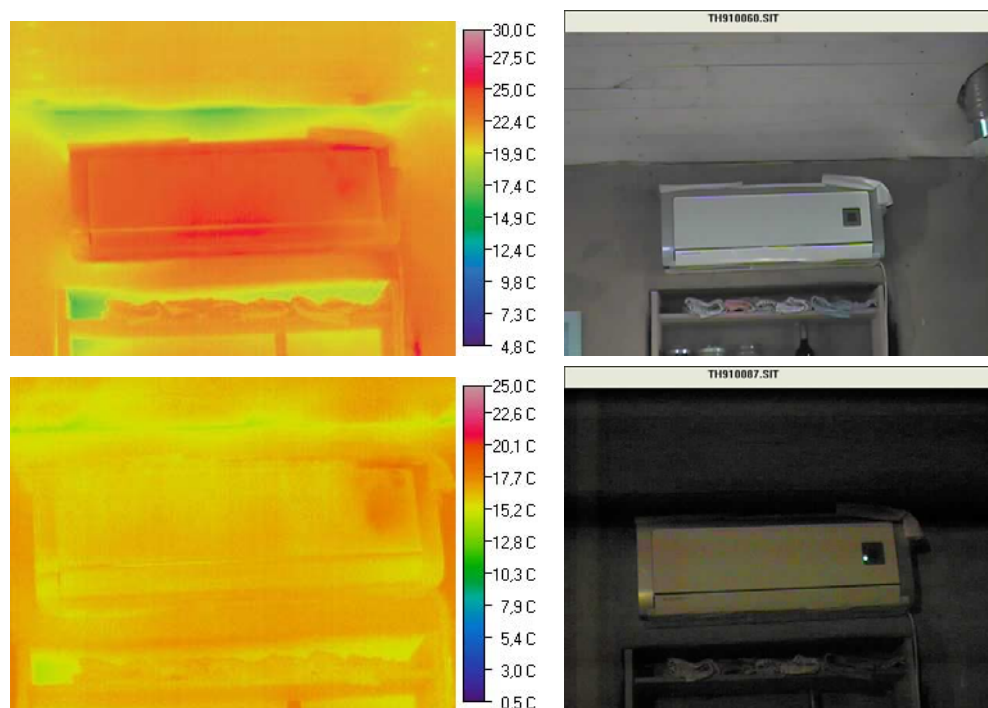
Der er billedhenvisninger, som f.eks "Billed 1", i figurteksterne i dette afsnit. Disse henviser til numrerne på oversigtstegningen på Tegning 06 i tegningsmappen.



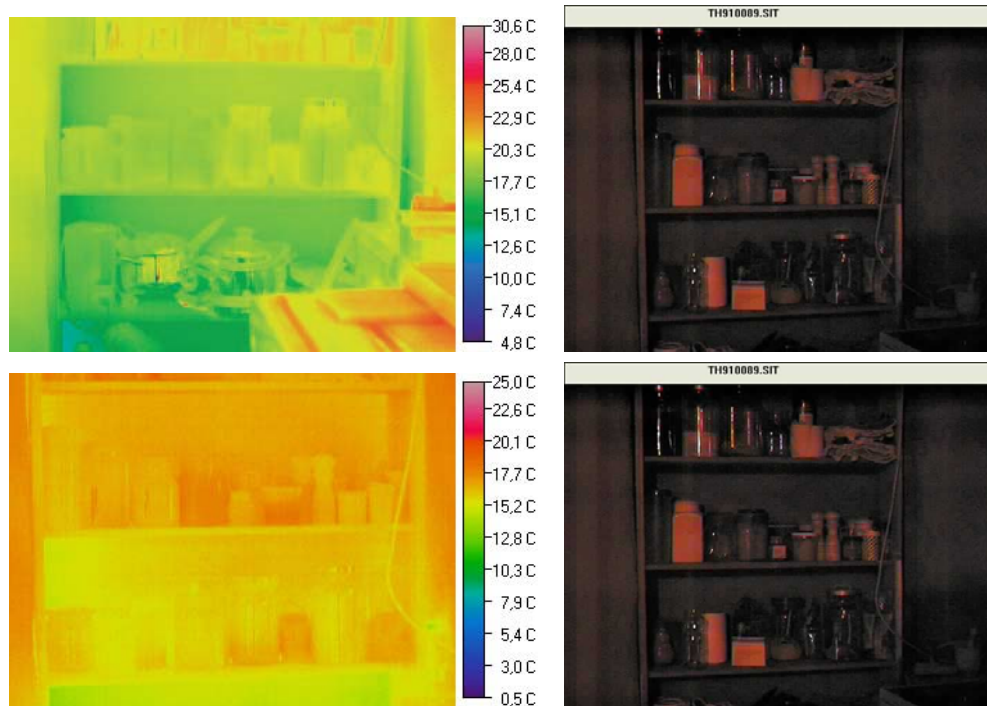
Figur H.1: Figuren viser utætheder ved samlingen mellem tag- og vægkonstruktion. Billed 12. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



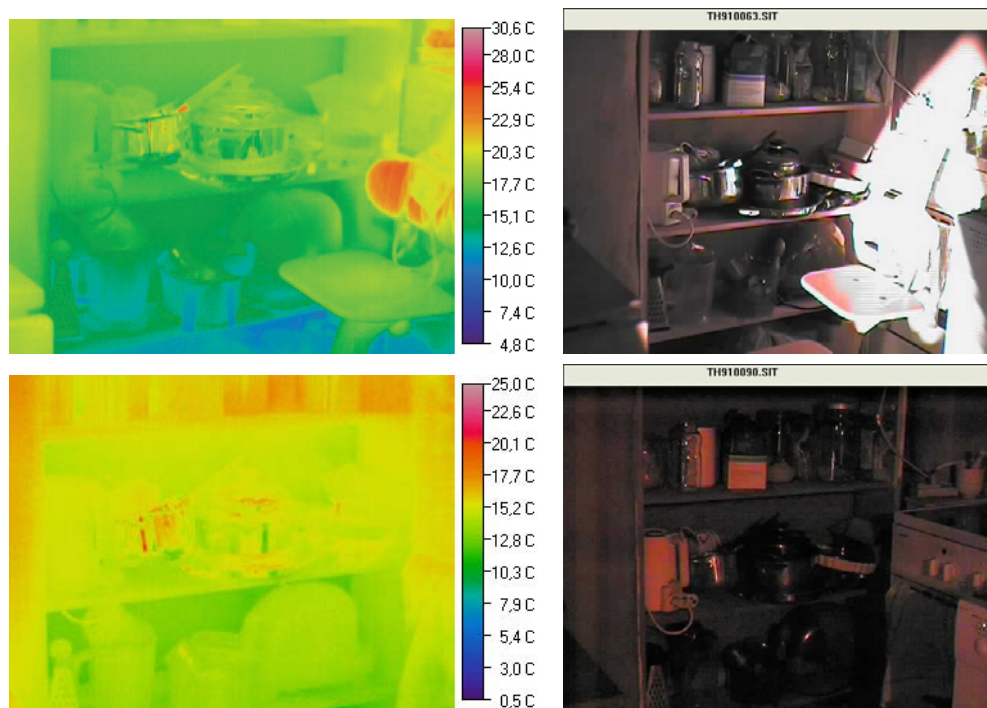
Figur H.2: Figuren viser utætheder i samlingen mellem tag- og vægkonstruktion samt en antydning af en kuldebro i samlingen mellem syd og vest væggen. Billed 20. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



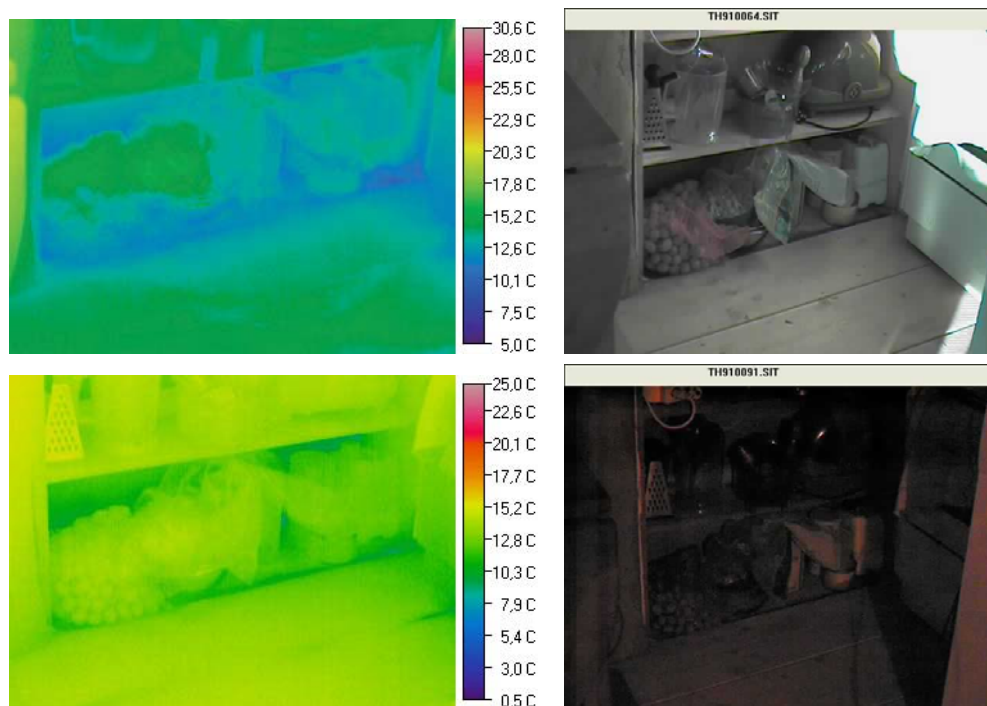
Figur H.3: Figuren viser små utætheder i samlingen mellem tag- og vægkonstruktion samt en evt. kuldebro i den samme samling. Billed 7. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



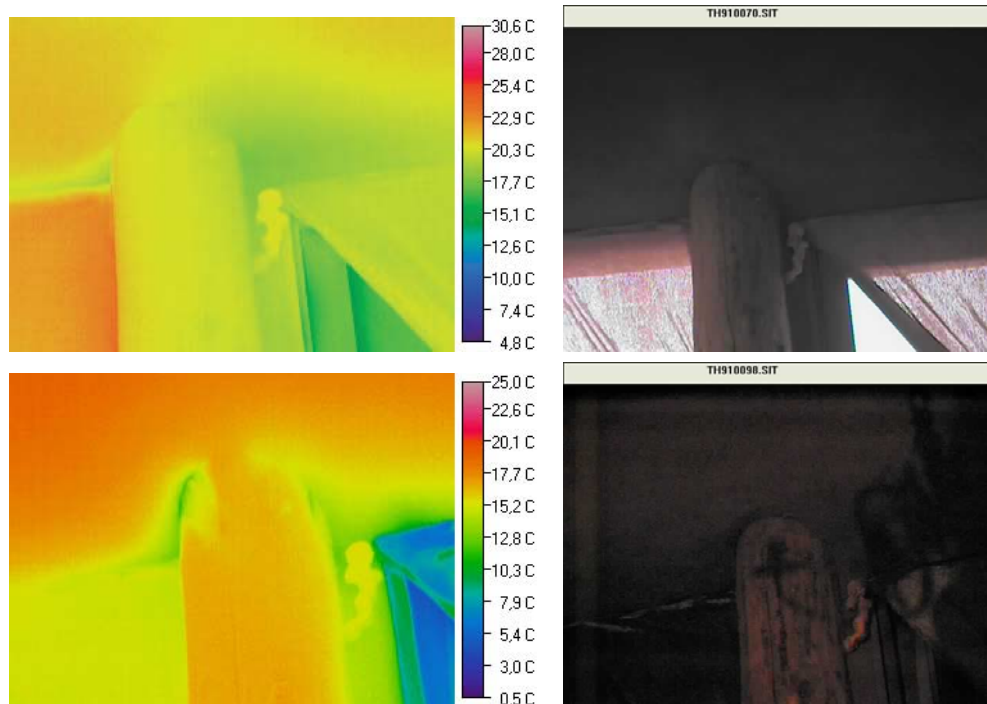
Figur H.4: Figuren viser kuldebroer på væggen bag reolen. Billed 9. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



Figur H.5: Figuren viser kuldebroer på væggen bag reolen. Billed 10. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

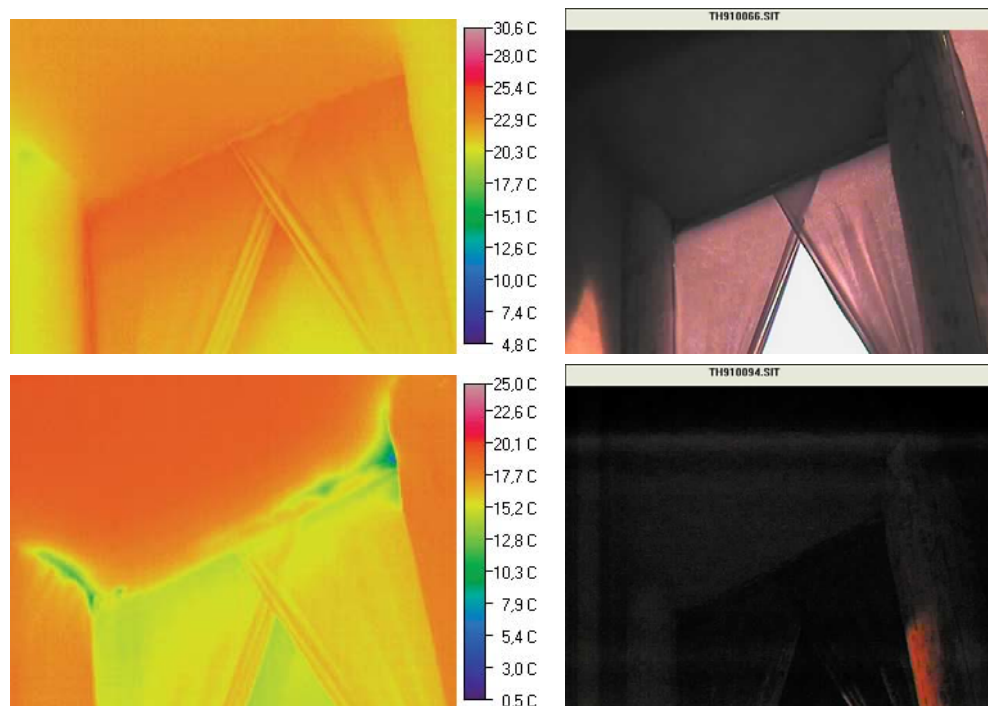


Figur H.6: Figuren viser kuldebroer på væggen bag reolen. Billed 11. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

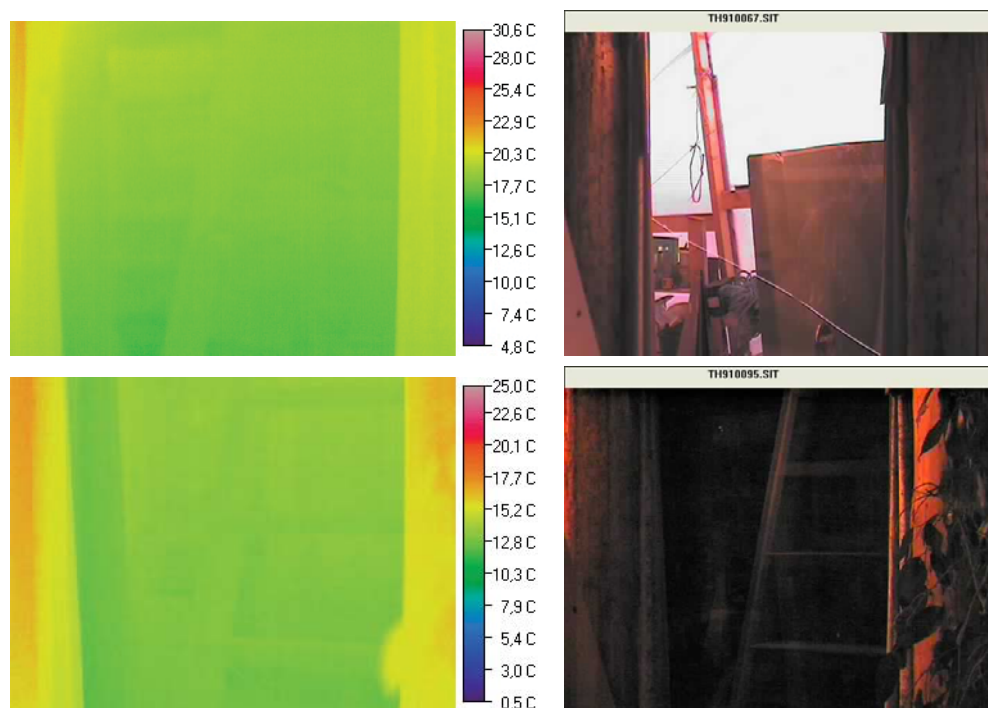


Figur H.7: Figuren viser utætheder omkring douglas søjlen ved samling med væg. Billed 17. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

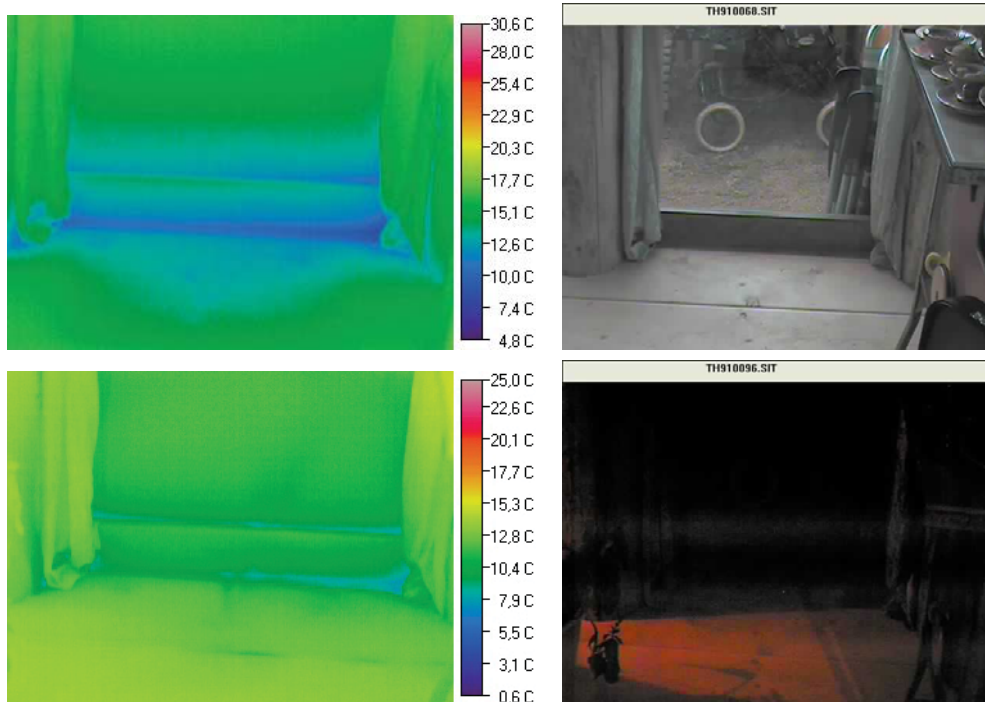
På figur H.7 øverst er det den originale havedør til højre for douglas gran søjlen, mens blowerdoor'en indsat i stedet for havedøren på det nederste billede. Det kolde område på på det nederste billede skyldes, at blowerdoor er lavet af tynd plastik og derfor fungerer som en stor kuldebro.



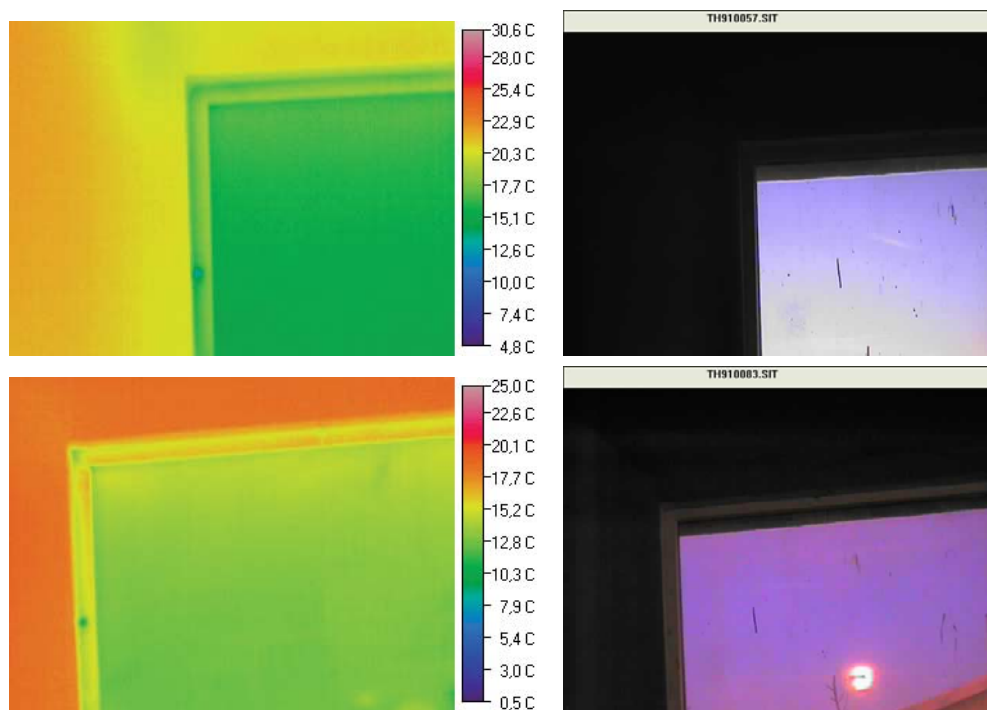
Figur H.8: Figuren viser utætheder omkring douglas søjlen. Billed 13. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



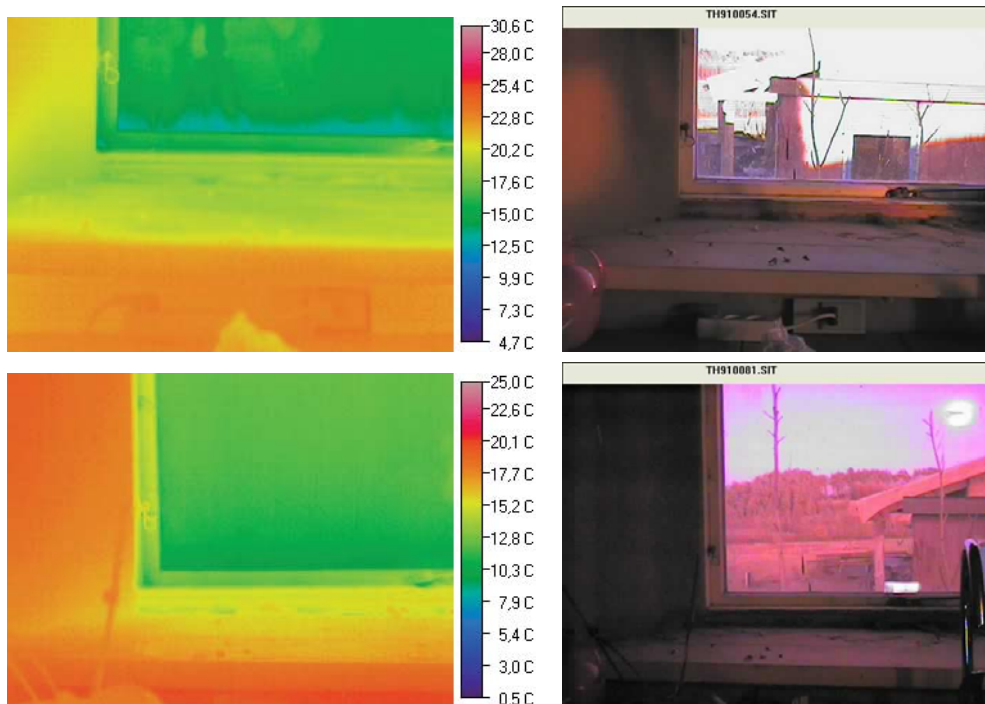
Figur H.9: Figuren viser en svag kuldebro langs glasset. Billedet er taget under forsøget. Billed 14. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



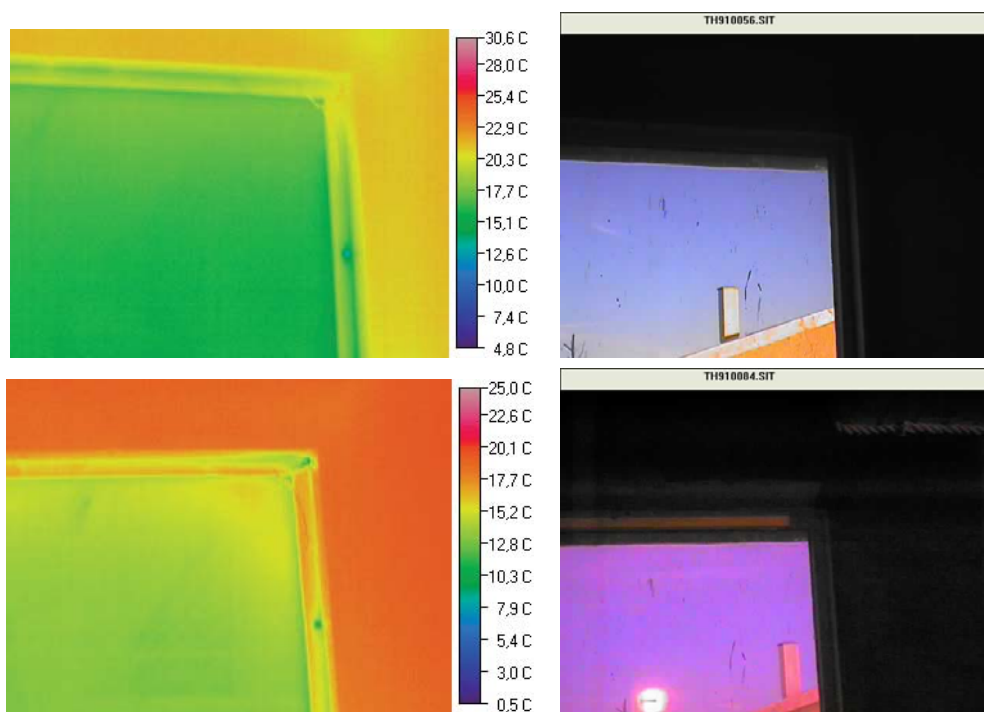
Figur H.10: Figuren viser en kuldebro ved glasset. Billed 15. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



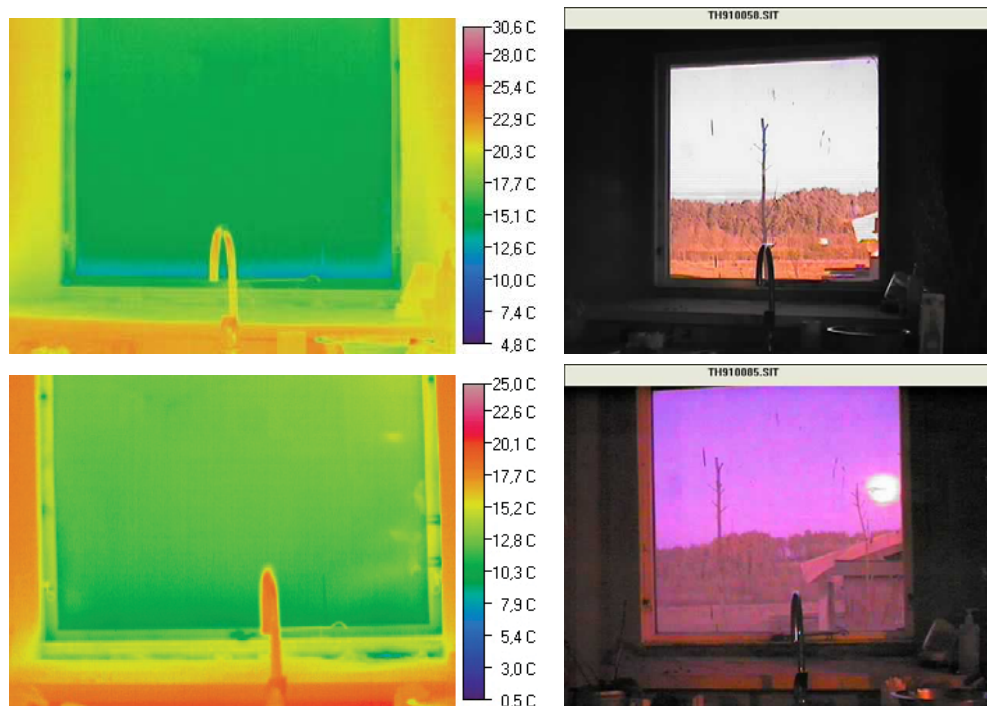
Figur H.11: Figuren viser en kuldebro rundt langs samlingen mellem vinduets ramme og karm. Billed 3. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



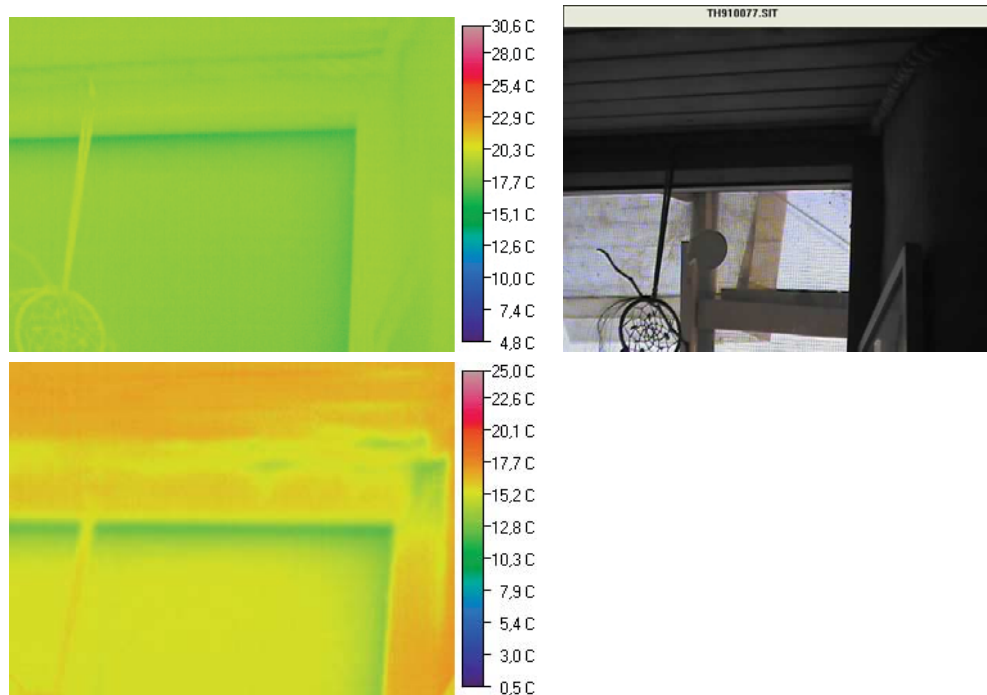
Figur H.12: Figuren viser en kuldebro rundt langs samlingen mellem vinduets ramme og karm samt en svag kuldebro mellem vindues karmen og bordpladen. Billed 1.



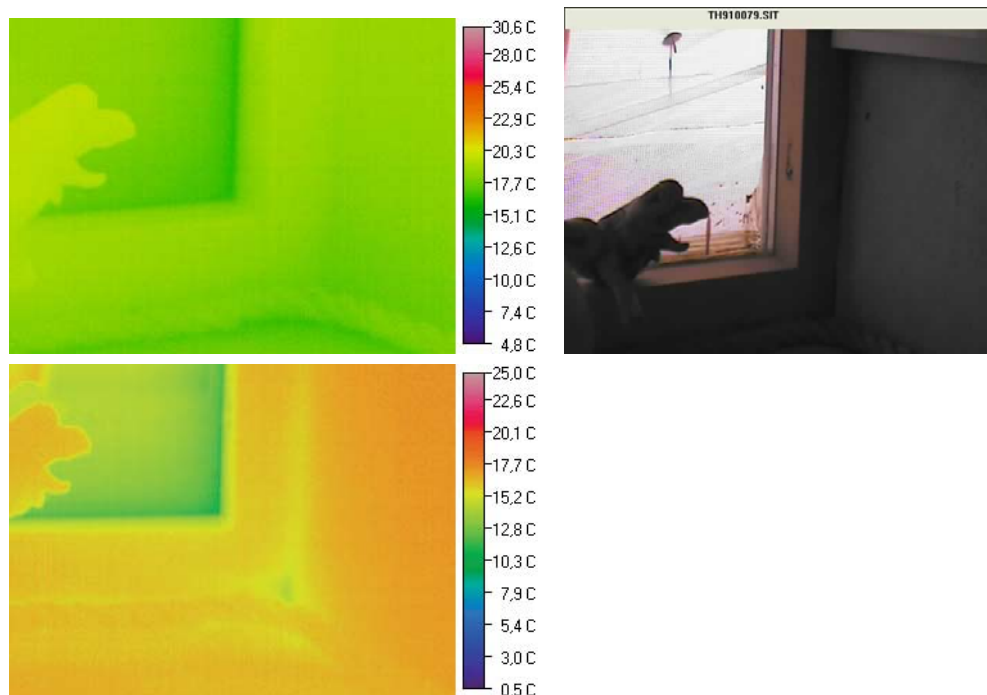
Figur H.13: Figuren viser en kuldebro rundt langs samlingen mellem vinduets ramme og karm. Billed 4. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



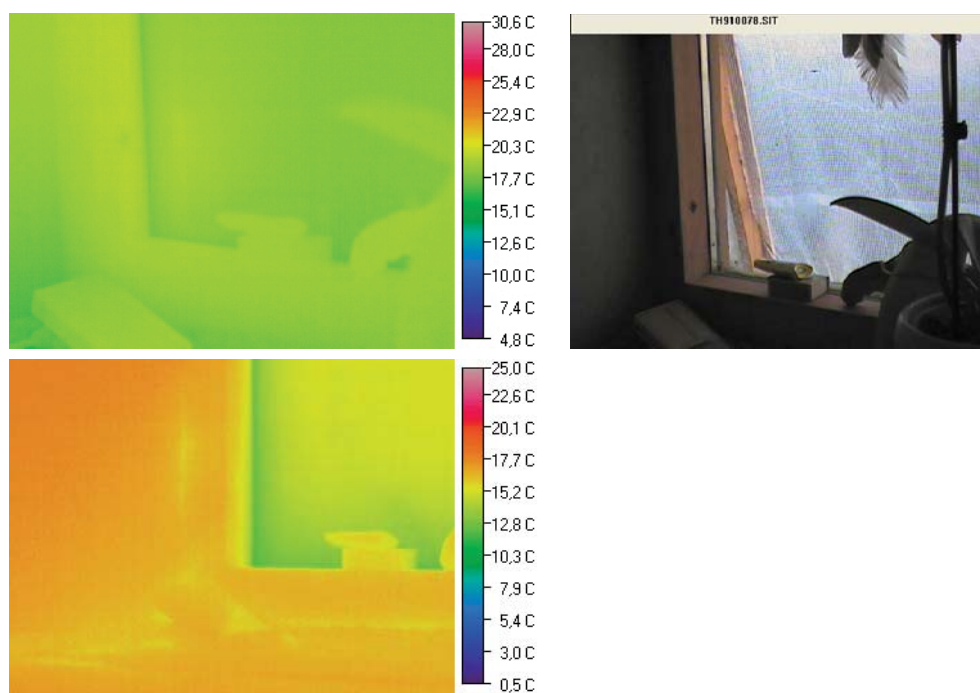
Figur H.14: Figuren viser en kuldebro rundt langs samlingen mellem vinduets ramme og karm samt en svag kuldebro mellem vindues karmen og bordpladen. Derudover kan der ses utætheder i højre nederste hjørne mellem karm og ramme. Billed 5. Øverst: Før forsøg. Næst: Under forsøg.



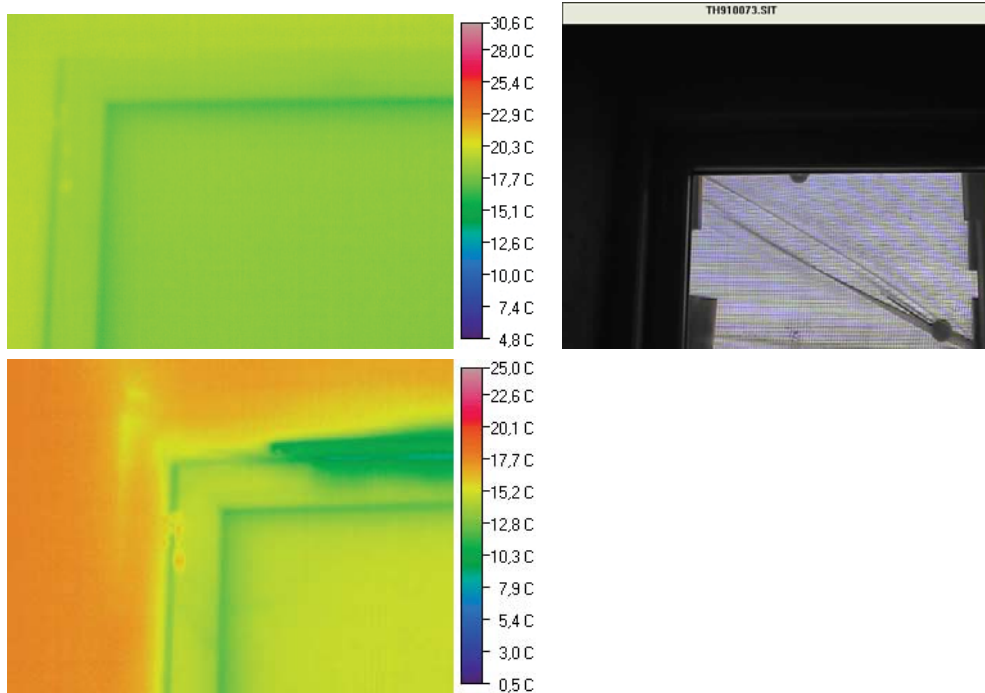
Figur H.15: Figuren viser en kuldebro langs glasset samt en evt. utæthed i hjørnet af vindueskarmen. Billed 27. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



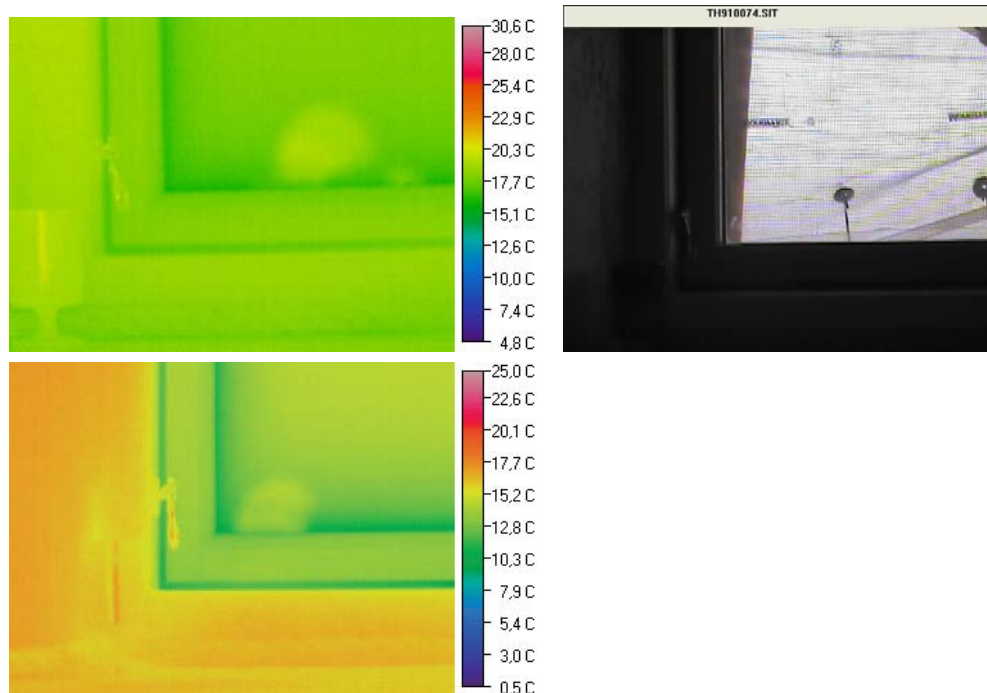
Figur H.16: Figuren viser en kuldebro langs glasset samt en evt. utæthed i hjørnet af vindueskarmen. Billed 29. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



Figur H.17: Figuren viser kuldebroer rundt langs glasset i vinduet og mellem vinduets kram og væggen samt i vindueskarm samlingen i ler. Billed 28. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

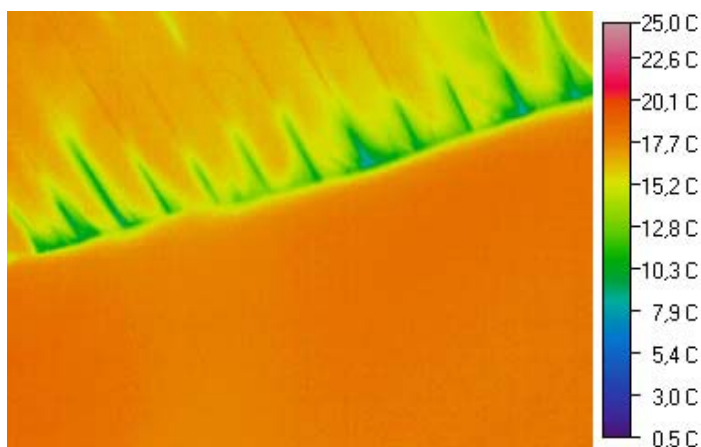


Figur H.18: Figuren viser kuldebroer rundt langs glasset samt i samlingen mellem vinduet karm og ramme, da dette vindue kan åbnes. Derudover kan der ses en stor utæthed øverst i karmen, som skyldes en friskluftventil. Billed 22. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

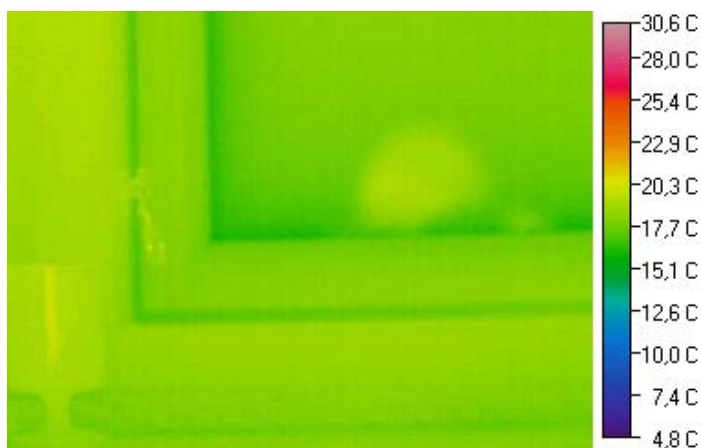


Figur H.19: Figuren viser kuldebroer rundt langs glasset samt i samlingen mellem vinduet karm og ramme. Billed 24. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

Der blev taget et par ekstra billeder under forsøget, som kan ses herunder. Der er ingen billeder før forsøget at sammenligne med.



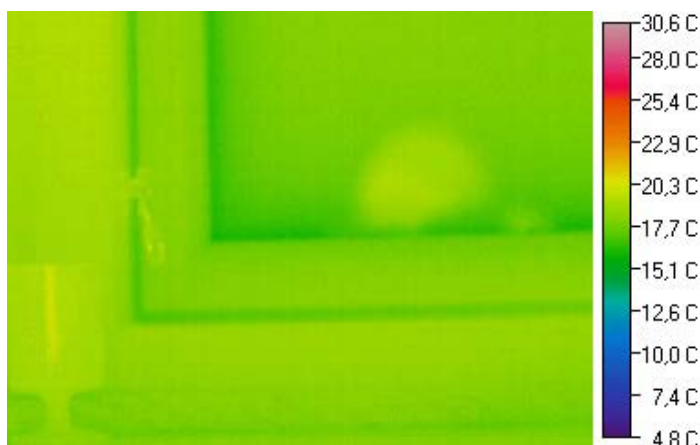
Figur H.20: Figuren viser utætheder i samlingen mellem tag-og vægkonstruktion, som fortsætter ind mellem loftbrædderne. Billedet er taget under forsøget. Billed 21.



Figur H.21: Figuren viser utætheder i samlingen mellem tag- og vægkonstruktion samt i samlingen mellem loftbrædderne. Billedet er taget under forsøget. Billed 30.

H Termograferingsbilleder

Figur H.22 er taget under forsøget. Der blev taget et lignende billede før forsøget, men dette blev ikke gemt på termografikameraet og er derfor gået tabt.

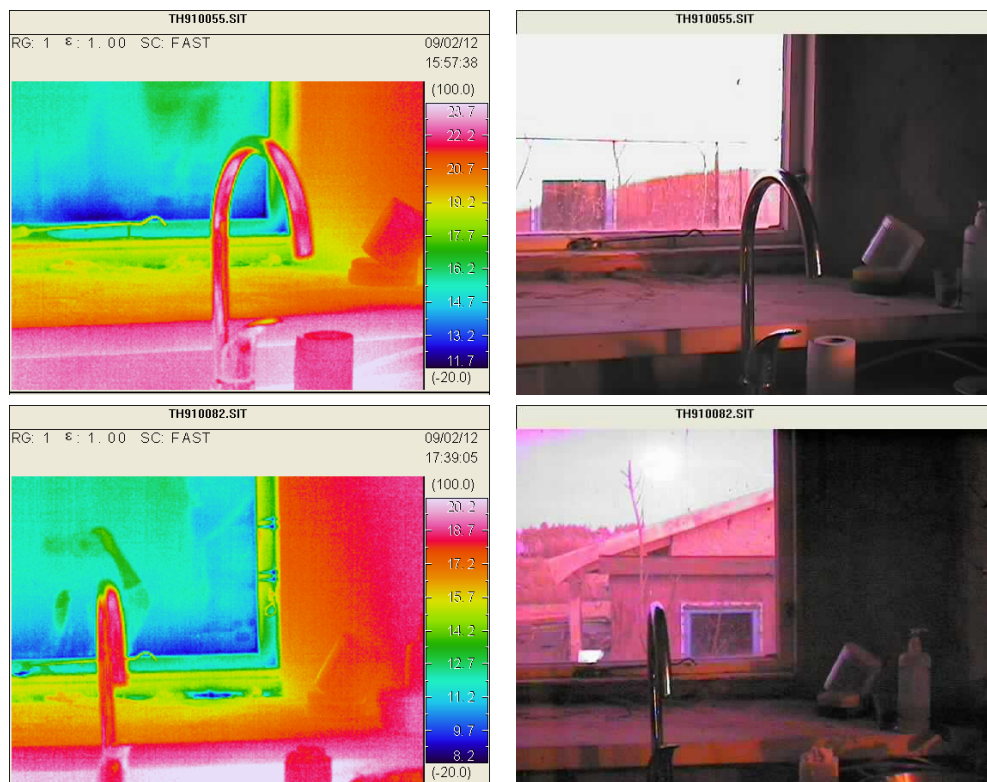


Figur H.22: Figuren viser kuldebroer rundt langs glasset samt i samlingen mellem vinduet karm og ramme. Derudover kan der ses en stor utæthed i form af en friskluftventil i den øverste karm. En utæthed kan også ses i hjørnet af vindueskarmen. Billedet er taget under forsøget. Billed 23.

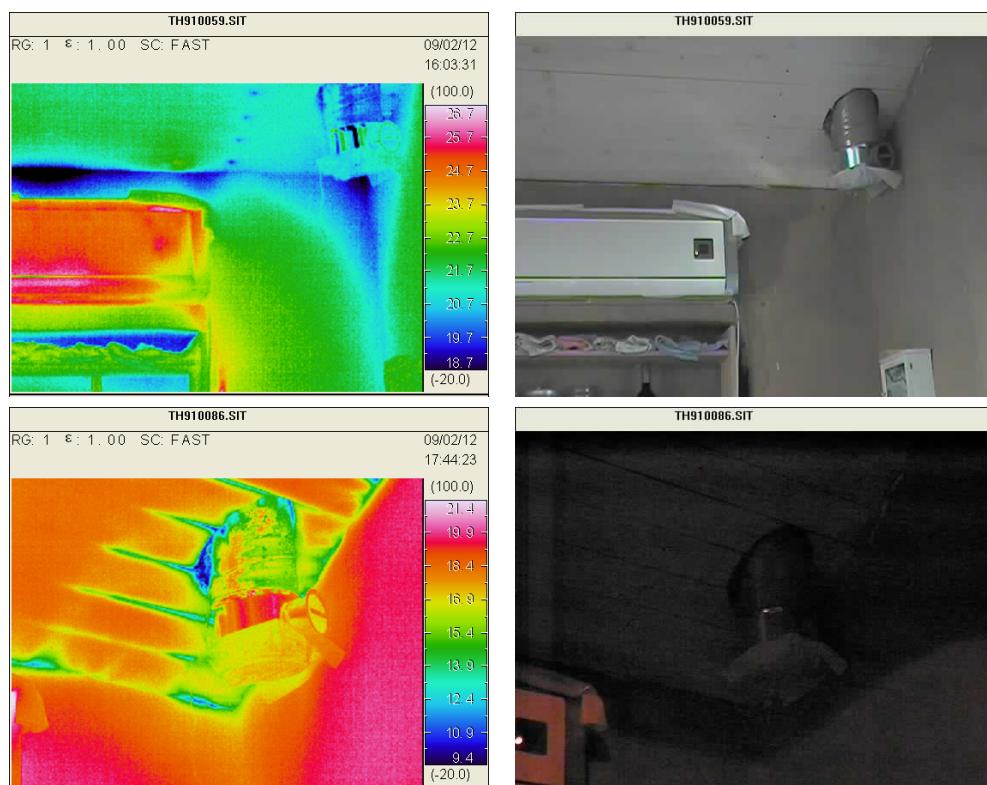
Udfra termograferingen er det vurderet, at der er flere utætheder i bygningen end forventet, men det er ligeledes vurderet at det er muligt at forbedre mange af disse utætheder uden de store omkostninger. Det var forventet at der ville være små utætheder i samlingen mellem glas og douglas gran søjler, men dette er heldigvis ikke tilfældet som det kan ses udfra termograferingen.

H.1 Originale termografibilleder

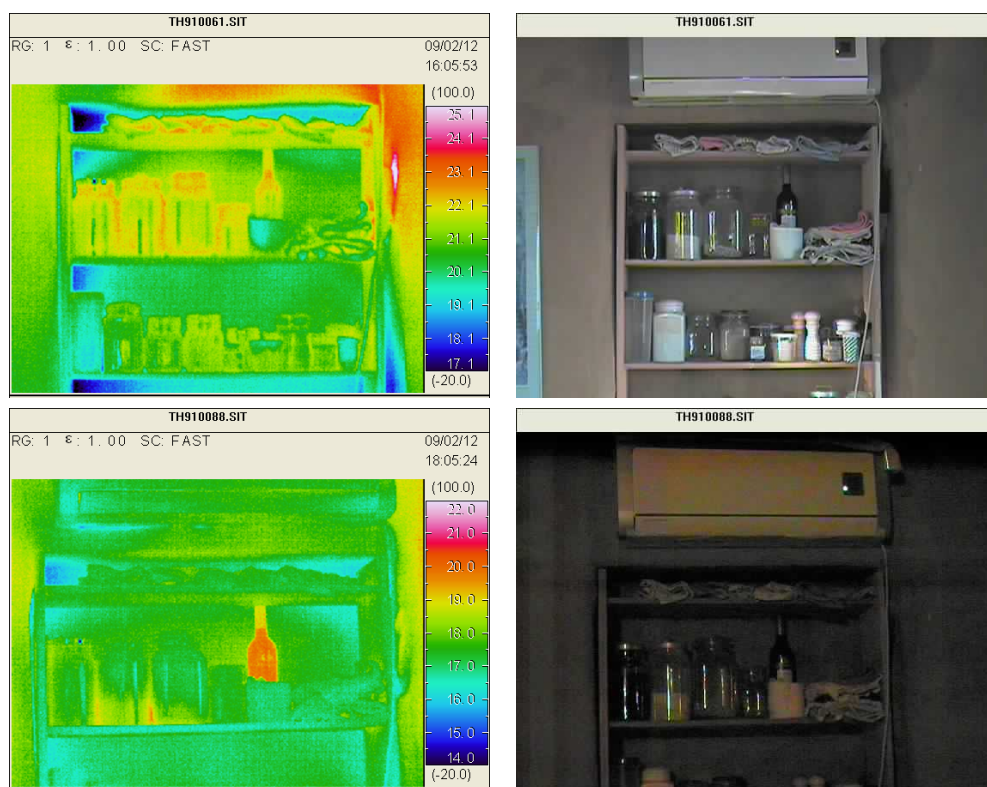
I det følgende er de oprindelige termografibilleder vist.



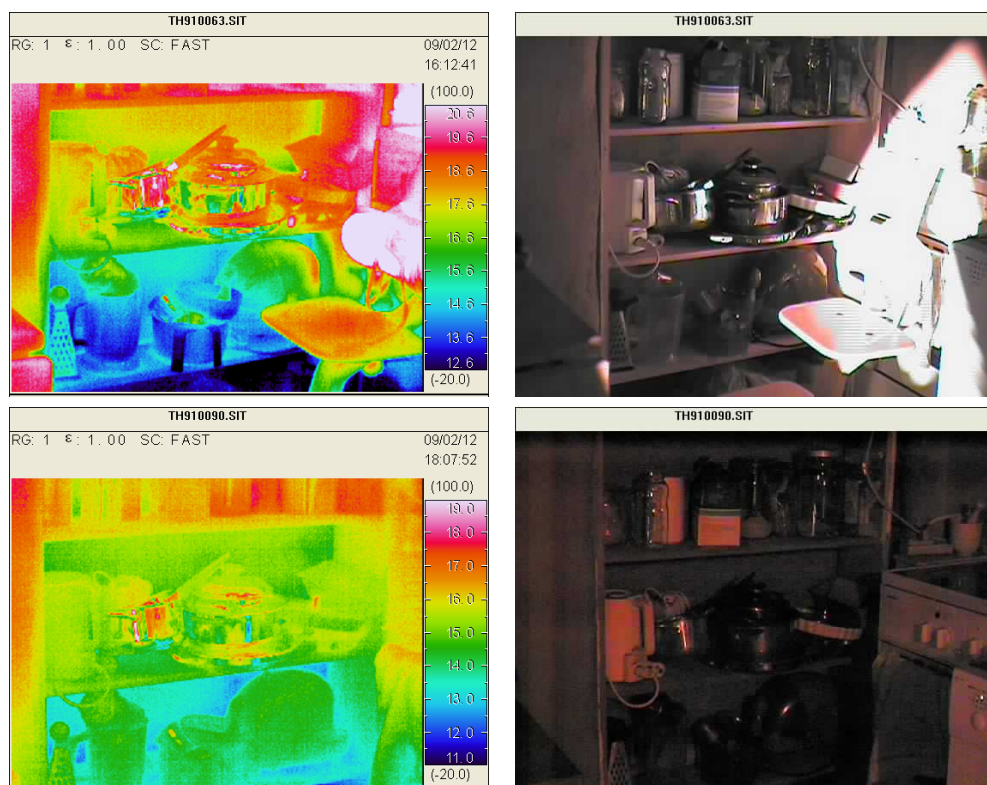
Figur H.23: Figuren viser utætheder i højre side af køkkenvinduet i den østlige facade. Billed 2.



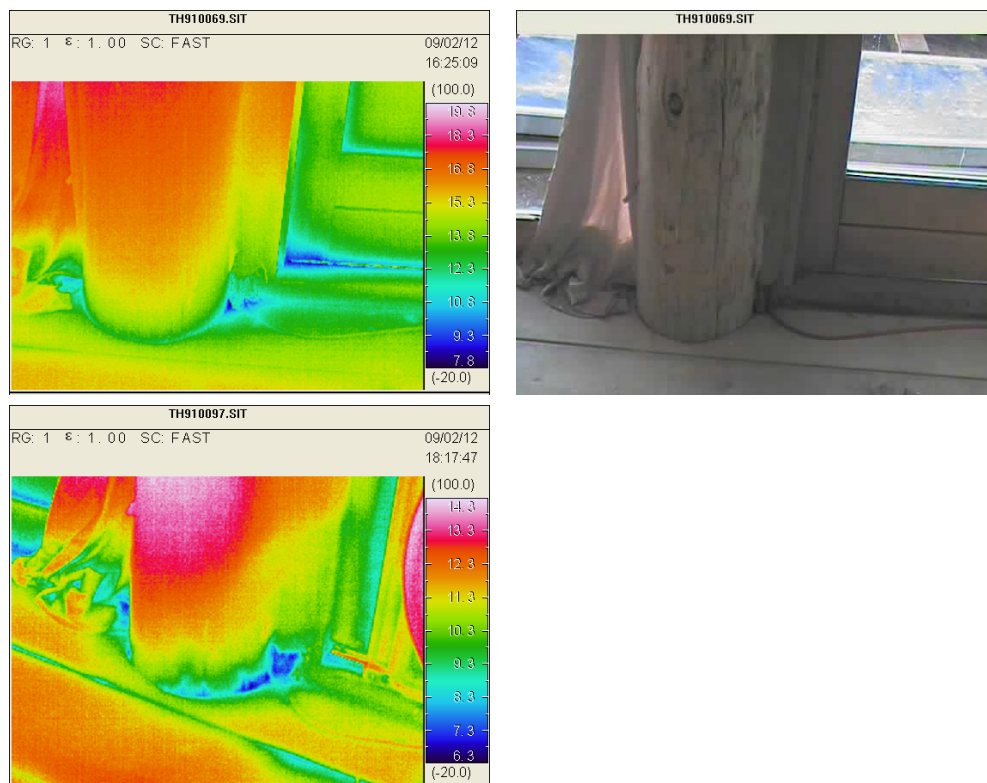
Figur H.24: Figuren viser utæthed ved gennembrydende rør i nordøstlig hjørne af bygningen. Billed 6.



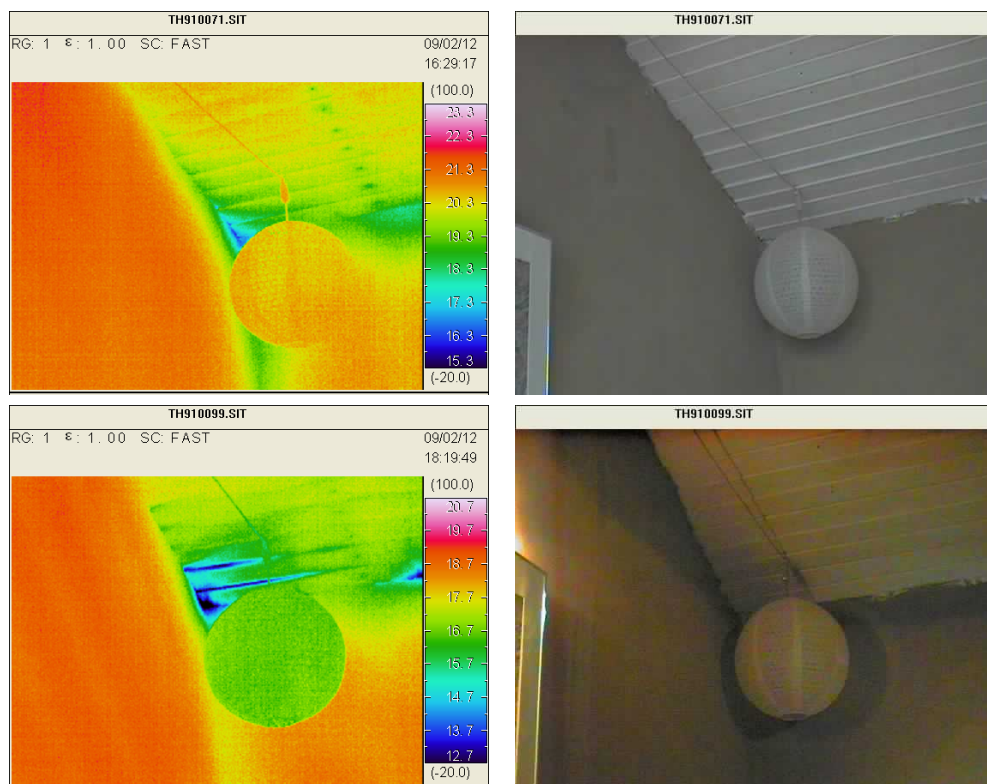
Figur H.25: Figuren viser kuldebro ved reolen på den nordlige væg. Billed 8.



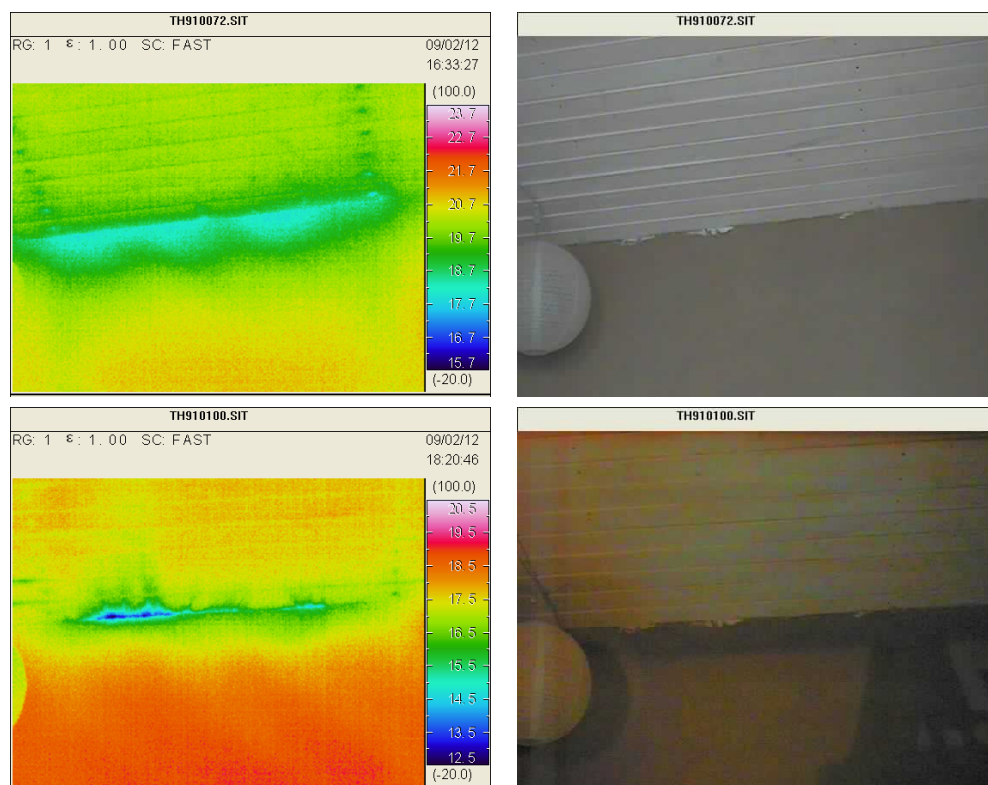
Figur H.26: Figuren viser kuldebroer på væggen bag reolen. Billed 10. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



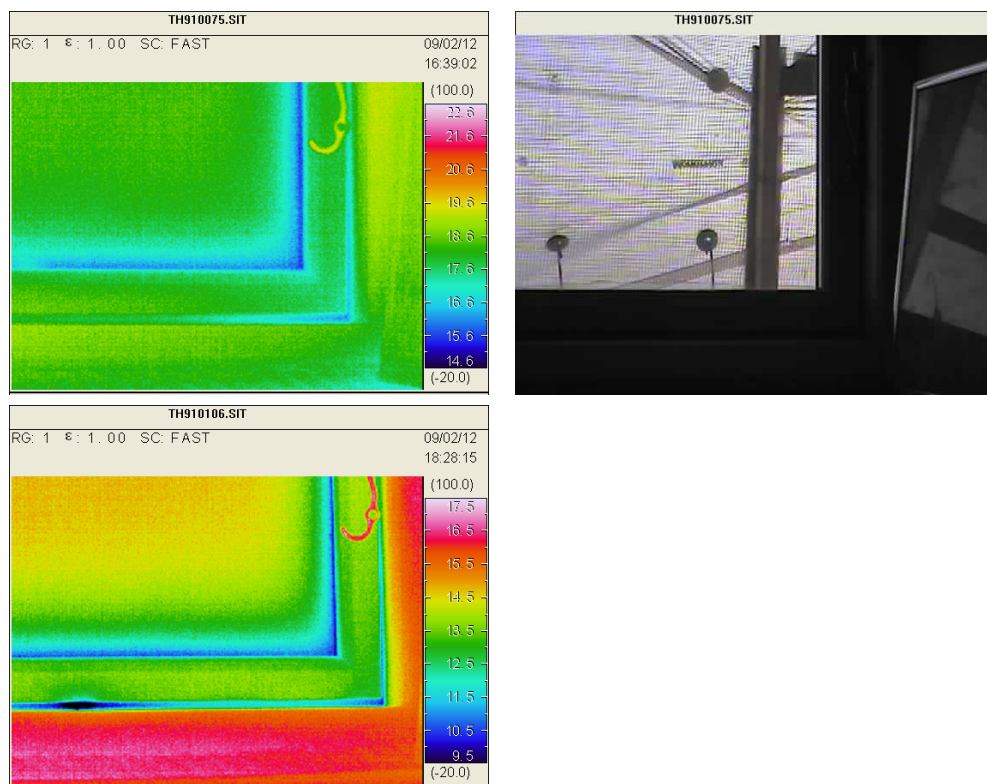
Figur H.27: Figuren viser et eksempel på utætheder omkring douglas søjlerne. Billed 16. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



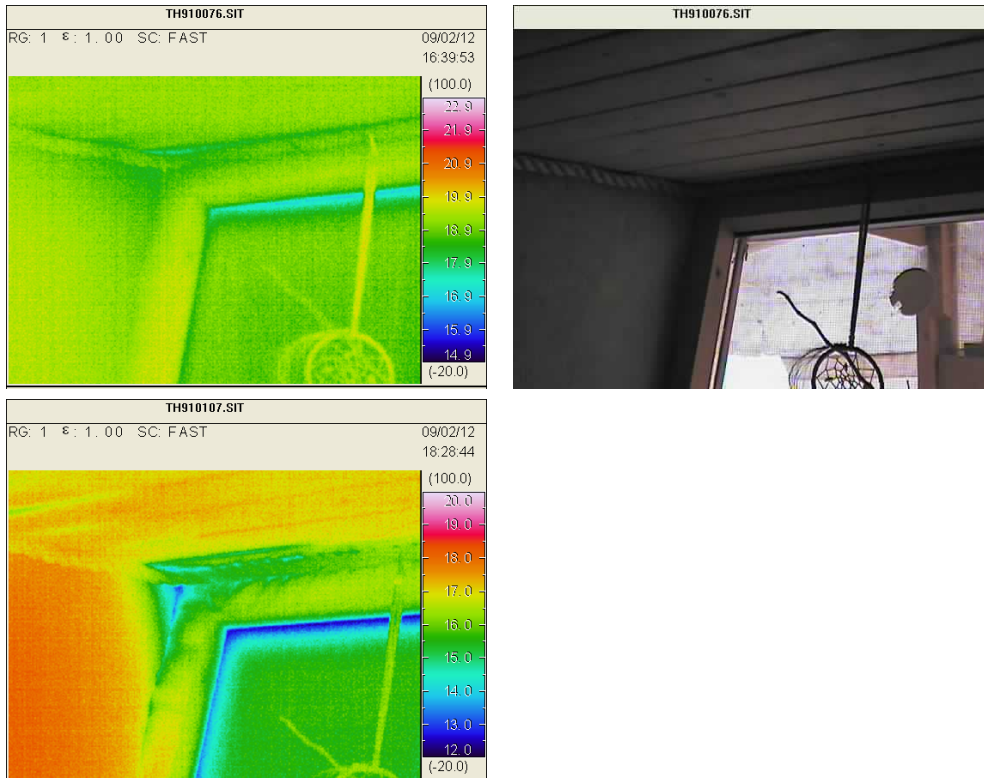
Figur H.28: Figuren viser et eksempel på utæthed i bygning i Friland. Dette billede viser samlingen mellem tag og væg i det nordvestlige hjørne i bygningen. Billed 18. Øverst: Før forsøget. Nederst: Under forsøget.



Figur H.29: Figuren viser en kuldebro i samlingen mellem væg og tag på den nordlige facade. Billed 19. Øverst: Før forsøget. Nederst: Under forsøget.



Figur H.30: Figuren viser en utæthed i bunden af vinduet ved hemsen, i den sydlige facade samt en kuldebro mellem ramme og karm. Billed 25. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.



Figur H.31: Figuren viser et eksempel på en kuldebro rundt langs glasset i ruderne. Dette billede er fra det faste vindue oppe ved hemsen. Billed 26. Øverst: Før forsøg. Nederst: Under forsøg.

I Beregning af kuldebroer ifølge DS 418

I dette bilag vil metoderne til beregning af transmissionskoefficienter og kuldebroer ifølge [DS 418 2005] bliver beskrevet for konstruktioner samt omkring vinduer og døre. Afsnittet er baseret på [DS 418 2005], medmindre andet er anført.

I.1 Kuldebroer for konstruktioner

Der skal tages hensyn til kuldebroer og reducerede isoleringstykkelser ved beregning af transmissionskoefficienter for konstruktioner. Formlen for transmissionskoefficienten ser derfor ud som i formel (I.1).

$$U' = \frac{n \sum_{i=1} A_i \cdot U_i + m \sum_{k=1} l_k \cdot \Psi_k + p \sum_{j=1} \chi_j}{A} \quad (\text{I.1})$$

$$A = \sum_{i=1}^n A_i$$

Hvor

A er konstruktionens samlede transmissionsareal. [m^2]

A_i er delarealet. [m^2]

U_i er delarealets transmissionskoefficient ved endimensionel varmestrøm. [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

l_k er længden af kuldebroen. [m]

Ψ_k er linjetabet for den enkelte lineære kuldebro. [W/mK]

χ_j er punkttabet for den enkelte punktkuldebro. [W/K]

n er antallet af delarealer.

m er antallet af lineære kuldebroer.

p er antallet af punktkuldebroer.

Transmissionskoefficienterne U_i skal beregnes for hvert delareal, som om der kun er en endimensionel varmestrøm. Evt. todimensionelle varmestrømme tages der hensyn til med punkt- og linjetabskoefficienterne.

Det er normalt ikke nødvendigt, at tage hensyn til kuldebrovirkningen i samlinger såsom ydervægshjørner, samling mellem kælderdek, ydervæg og kælderydervæg. Grunden til, at der ikke tages hensyn til samlinger i ydervægskonstruktioner osv. er, at der beregnes med ydre arealer og hjørnesamlinger osv. medtages derfor to gange. Beregningen er på den måde på den sikre side. Dette gælder desuden for samlinger mellem ydervæg og loft, hvor isoleringen ikke er brudt eller kun brudt af materialer med en varmeledningsevne mindre end $0,3 \text{ W/mK}$ som f.eks. træ og letbeton med lav densitet. Hvis linje- eller punkttabet er mindre end $0,02 \text{ W/K}$ kan der normalt ses bort fra dette. Det gælder ikke for linjetabet for betonsandwichelementer, idet længden af lineære kuldebroer ofte er så stor, at linjetabene skal indgå i beregningen, selvom linjetabet er mindre end $0,02 \text{ W/K}$.

Linjetabskoefficienten for konstruktioner beregnes ud fra formel (I.2).

$$\psi = \frac{\Phi_{2Dim} - \Phi_{1Dim}}{l_k \cdot \Delta t} \quad (\text{I.2})$$

Hvor

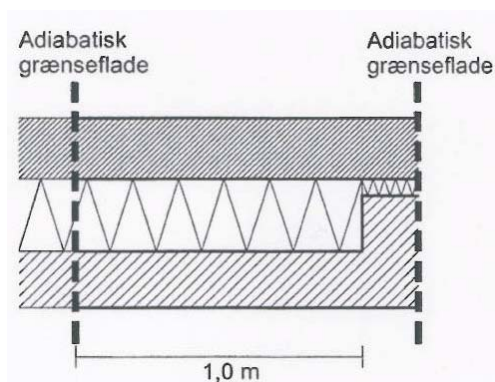
ψ er linjetabskoefficienten for den valgte konstruktion. [$\text{W/m}^\circ\text{C}$]

Φ_{2Dim} er den todimensionelle varmestrøm. [W]

Φ_{1Dim} er den endimensionelle varmestrøm. [W]

l_k er længden af kuldebroen. [m]

Den todimensionelle varmestrøm bestemmes vha. et simuleringsprogram, som benytter numeriske løsningsmetoder. Denne varmestrøm skal beregnes gennem kuldebroen og 1 m af konstruktionen ved kuldebroen. Der ses bort fra varmeudveksling ved de adiabatiskke grænseflader samt varmestrømme i kuldebroens længderetning. De adiabatiskke grænseflader er bestemt af et snit 1 m fra kuldebroen samt i et snit i kuldebroens centerlinjen. Grænsefladerne kan ses på figur I.1.



Figur I.1: Figuren viser de adiabatiske grænseflader ved beregning af linjetabet for konstruktioner.

I.2 Kuldebroer ved vinduer og døre

Transmissionskoefficienten for vinduer og døre beregnes ud fra formel (I.3).

$$U' = \frac{A_g \cdot U_g + l_g \cdot \Psi_g + A_p + A_f \cdot U_f + l_k \cdot \Psi_k}{A_g + A_p + A_f} \quad (\text{I.3})$$

Hvor

A_g er glasarealet. [m^2]

l_g er omkredsen af glasarealet. [m]

A_p er fyldningens areal. [m^2]

A_f er karm-, ramme- og sprosseareal. [m^2]

l_k er længden af andre lineære kuldebroer. [m]

U_g er transmissionskoefficienten midt på ruden. [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Ψ_g er linjetabet for rudens afstandsprofil. [W/mK]

U_p er transmissionskoefficienten for fyldningen. [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

U_f er transmissionskoefficienten for karm og ramme. [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

Ψ_k er linjetabet for andre kuldebroer. [W/mK]

I rudens transmissionskoefficient, U_g ses der bort fra varmetransmissionen gennem afstandsprofilen. Linjetabet for rudens afstandsprofil, Ψ_g kan findes ved tabelopslag i [DS 418 2005] eller ved beregning. For at kunne benytte tabelopslaget skal vinduet have samme opbygning som beskrevet i tabellerne. Linjetabet for andre kuldebroer, Ψ_k kan f.eks. være bundkarme med metalbeklædning i døre eller metalprofiler i ramme eller karm i ovenlys og kan beregnes.

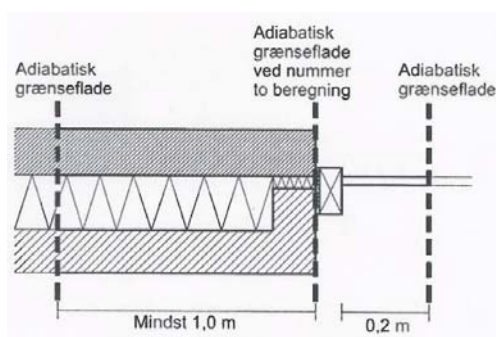
I.2 Kuldebroer ved vinduer og døre

De følgende punkter beskriver fremgangsmåden til beregning af linjetab for samlinger omkring vinduer og døre. Linjetabet beregnes ved:

- at beregne den samlede todimensionale varmestrøm gennem samlingen samt 0,2 m af ruden eller dørpladen og mindst 1,0 m af den øvrige konstruktion op til samlingen.
- at indlægge en adiabatisk grænseflade, hvor samlingen omkring vinduet eller døren støder op til den øvrige konstruktion.
- at beregne de tilsvarende samlede todimensionale varmestrømme gennem henholdsvis vinduet eller døren og den øvrige konstruktion.
- at trække de sidste beregnede varmestrømme fra den samlede todimensionale varmestrøm.
- at dividere med differensen mellem rum- og udetemperatur.

[DS 418 2005, Anneks C]

De todimensionelle varmestrømme beregnes vha. beregningsprogram som f.eks. *COMSOL*. Placeringen af de adiabatiske grænseflader kan ses på figur I.2.

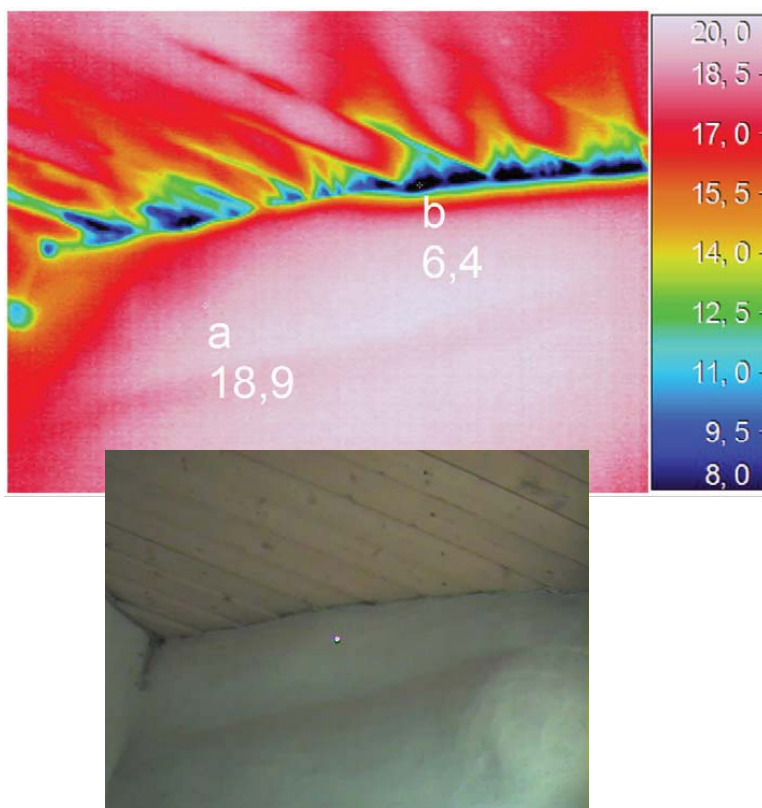


Figur I.2: Figuren viser de adiabatiske grænseflader ved beregning af linjetabet for samlinger omkring vinduer og døre.

J Tryktests rapporter

Luft Lækage Analyse

Halmhus, Friland



Date: 300109
Company : TætHus ApS
Operator: HD

Luft Lækage Analyse for DS/EN 13829

Tester Information

TætHus ApS
Nørregade 32
8660 Skanderborg

004526121470
Hansdollerup@yahoo.dk

Kunde

Kunde Navn
Kontakt Navn
Kunde Telefon

Steen Møller
Steen Møler

Bygning som Testes

Details
Adresse
By
Landsdel
Midlertidig Luft Tætning

Halmhus

Friland

Gennemføringer var tætnet af bygherre

Test

Test #:
Udført den
Operator
Retning(s)
Standard
Noter:

1
2009/01/31
Inde i Zonen
Test begge retninger
EN 13829

Anvendt Udstyr

System
Ventilator serienr. # #
Rumtryksmåler Serienr
Flowtryksmåler Serienr

Certificate # 3262

097898

Calibrated

2013-06-17

098095

Calibrated

2008-06-17

098095

Calibrated

2008-06-17

Meteorologiske måledata

Barometer Trykket
Relativ Fugtighed
Vindstyrke
Inde Temperatur:
Ude Temperatur
Statisk Tryk

Før

101325 Pa
80%
3m/s
22 °C
0 °C
P01+ 0,0 Pa
P01- -0,94 Pa
P01 -0,94 Pa

Efter

101325 Pa
80%
3m/s
22 °C
0 °C
P02+ 0,0 Pa
P02- -0,72 Pa
P02 -0,72 Pa

Statistiske Differenstræk (ude/inde) taget over 30 sek. før testen (max. 5 Pa.)

-0,77	-0,98	-0,99	-0,98	-1,13	-0,85	-0,78	-0,81	-1,07	-1,05
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

UnderTryk

Drossel-Ring - C6

BygningsTryk (Pr.A.) (Pa):	-59,80	-56	-51,30	-48,30	-44,20	-40,20	-36,90	-34,60		
Korrigeret BygTryk (Pa):	59,80	56	51,30	48,30	44,20	40,20	36,90	34,60		
Flow Tryk (Pr.B.) (Pa):	228,90	213,70	190,60	173,70	156,40	138,10	124,60	114,20		
Korrigeret FlowTryk (Pa):	228,9	213,7	190,6	173,7	156,4	138,1	124,6	114,2		
Målt Flow (l/s):	429,8	414,8	390,8	372,4	352,8	330,8	313,8	300,0		
Best Fit Flow (l/s):	1552,2	1486,1	1402,2	1347,3	1270,3	1192,9	1127,0	1079,9		
Fejl (%):	-261,1	-258,3	-258,8	-261,7	-260,1	-260,6	-259,2	-260,1		

OverTryk

Drossel-Ring - C6

BygningsTryk (Pr.A.) (Pa):	59,40	56	50,60	47,30	44,60	40	38,40	34,90		
Korrigeret BygTryk (Pa):	59,40	56	50,60	47,30	44,60	40	38,40	34,90		
Flow Tryk (Pr.B.) (Pa):	314,90	285	254	230,30	215,60	181,40	171,80	155,90		
Korrigeret FlowTryk (Pa):	314,9	285	254	230,3	215,6	181,4	171,8	155,9		
Målt Flow (l/s):	502,6	474,6	446,2	422,3	407,8	369,5	358,6	341,1		
Best Fit Flow (l/s):	1799,9	1723,1	1598,6	1520,8	1456,1	1343,5	1303,5	1214,6		
Fejl (%):	-258,1	-263,1	-258,3	-260,1	-257,1	-263,6	-263,5	-256,1		

Statistiske Differenstræk (ude/inde) taget over 30 sek. efter testen (max. 5 Pa.)

-0,74	-0,75	-0,67	-0,86	-0,67	-0,96	-0,82	-0,65	-0,47	-0,65
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Data Analyse – Optimeret/Beregnet ved mindste kvadratrods princip iflg. EN13829:

	Hældningskoefficient n (n)	Skæring (C) (m³/h)	Korrelation (%)
Best Fit: Least Squares			
UnderTryk	0,6631	103,0081	99,99
OverTryk	0,7396	87,7768	99,97
Gennemsnit	0,7014	95,39246	99,98

Klimaskærm Dimensioner

Opvarmet Brutto Etage Areal (O.BEA.)	75	m²
KlimaSkærmsAreal	190	m²
Indre Volumen	163	m³

Resultat

	Enheder	UnderTryk	OverTryk	Gennemsnit
LuftFlow Koefficient (CL)	(l/s)	103,008	87,777	
LuftFlow Karakteristik (n)		0,6631	0,7396	
Resultat Faktor	(%)	99,99	99,97	
Flow@ 50 Pa	(l/s)	382,9	440,2	411,5
Luftskifte/Time (ACH) @ 50 Pa (ACH)	(/hr)	8,457	9,72	9,089
Luftgennetrængelighed iht. (ACH)	(l/s.m²)	2,02	2,32	2,17
Klimaskærmsareal @ 50 Pa				
Luftgennetrængelighed iht.Gulv Areal (SLR)	(l/s.m²)	5,11	5,87	5,49
(BBR) @ 50 Pa				

Door Fan 3.1 Bygningslækage Analyse Software (Version 3.233)

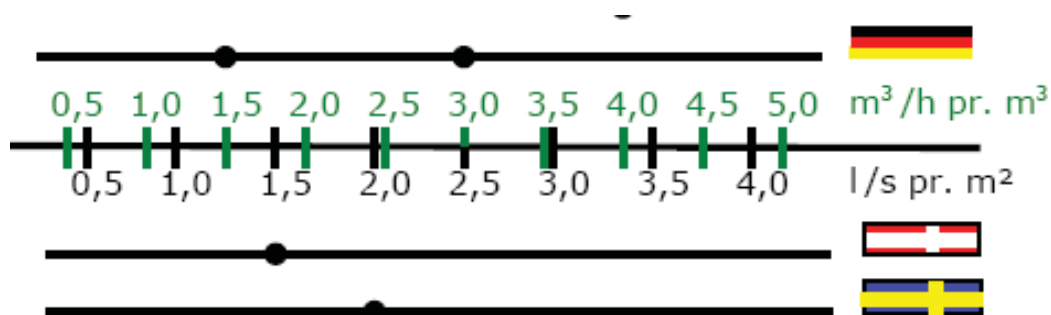
By: Retrotec Energy Innovations Ltd (Canada).

Copyright 2006-2007, Retrotec Energy Innovations Ltd

This software conforms to the EN 13829 testing standard

Tæthedskravet i bygningsreglementet betyder et naturligt luftskifte på max 1,5 l/s/m² ved en trykforskel på 50 Pa.

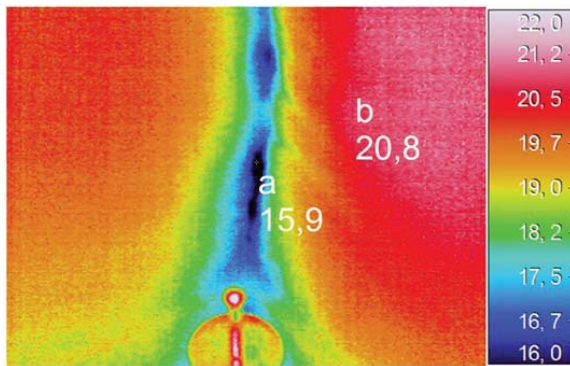
Det målte luftskifte ved denne test var 5,8 l/s/m². Det fremgår tydeligt af de indsatte termobilleder at overskridelsen ikke skyldes forhold forårsaget af byggemetoden halm/lerpus. Derimod store utætheder foruden v. det store vinduesparti i stue samt manglende tætning af udsugningsventiler i bad og stue.



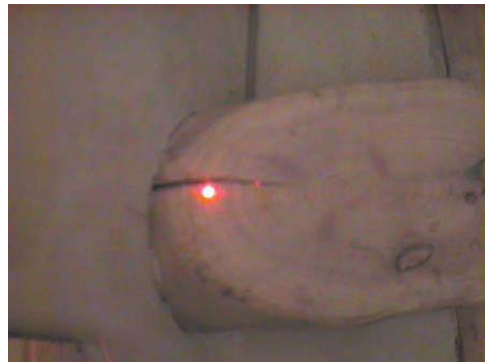
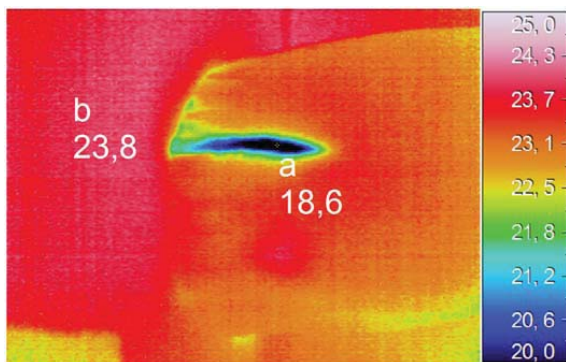
Hvor store utætheder er der tale om ?
Eksempel: 150 m² gulvareal, 50 Pa trykforskel

Specifik lækage rate	Lækageareal	Diameter af fiktivt hul
l/s/m ²	m ²	mm
0,1	0.002	47
0,5	0.009	104
1,0	0.017	147
1,5	0.026	180
2,0	0.034	208
2,5	0.043	233
3,0	0.051	255

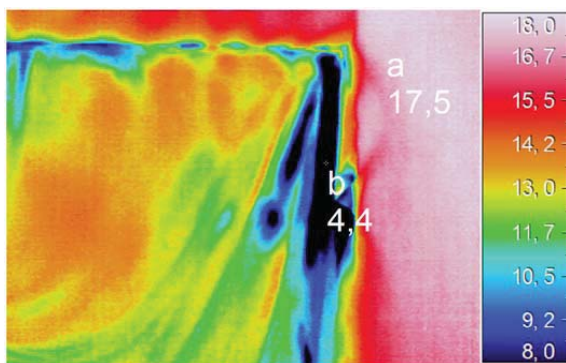
26
Tabel udarbejdet af Jørgen Zhults BYG-DTU



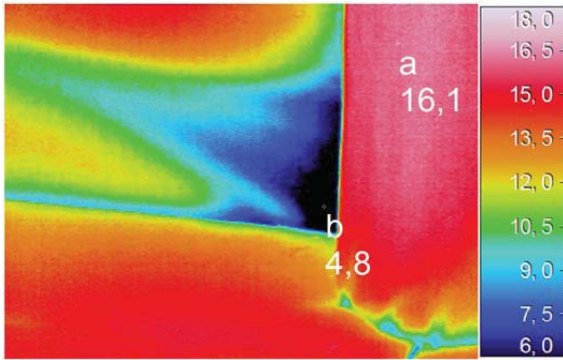
Sprække i puds v. hjørne i badeværelse



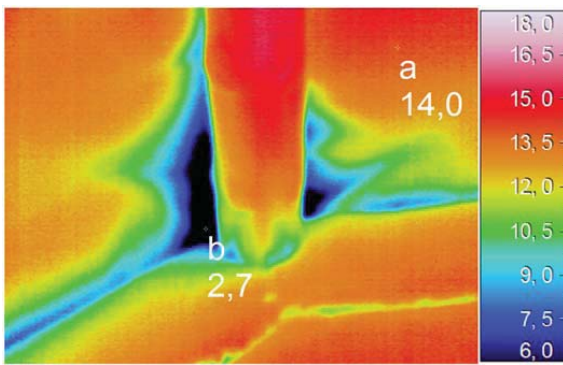
Sprække i bjælke i badeværelse



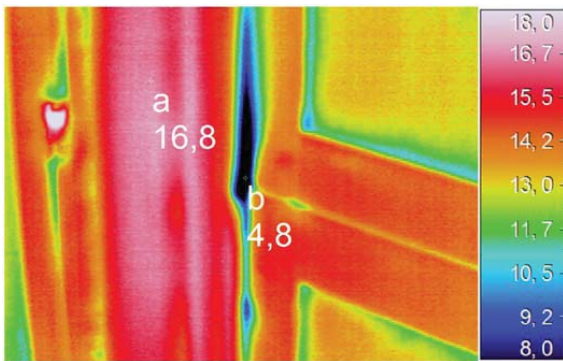
I forbindelse med tæthedsprøvningen er der ikke tætnet tilstrækkeligt v. udsugning fra bad



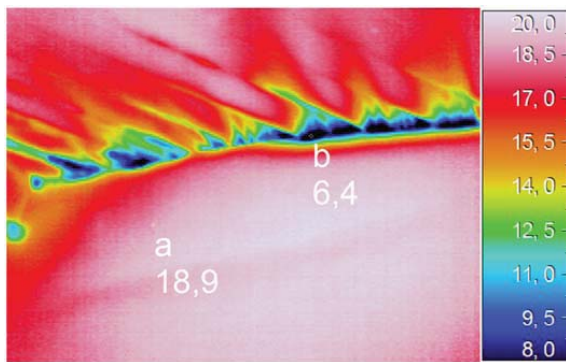
Stor utæthed ved termorude



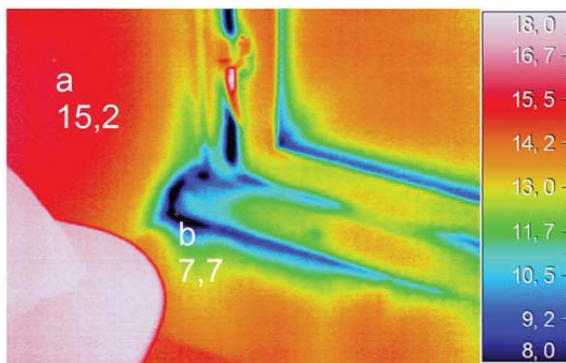
Stor utæthed ved termorude



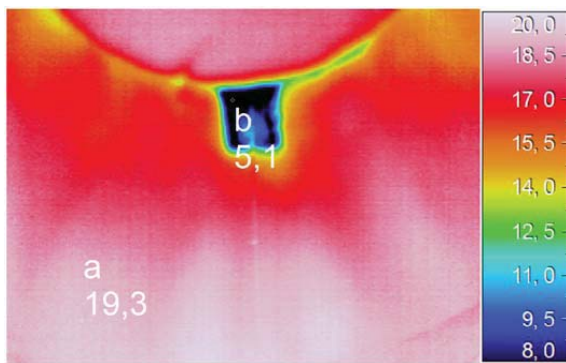
Utæthed v. vindue



Utæthed v. loft/væg over indgangsdør



Utæthed v. vindue



I forbindelse med tæthedsprøvningen er der ikke tætnet tilstrækkeligt v. friskluftventil i loft

TætHus ApS

Nørregade 32

DK-8660 Skanderborg

www.taethus.dk

Tilbyder følgende ydelser:

Tlf.: 48141188/ 70204744/ 26121470

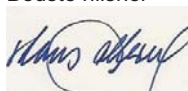
Mail: hansdollerup@yahoo.dk

Danske Bank reg.: 3543

CVR: 29786178

- Be06-beregning
- Termografering
- Lufttæthedsmålinger med blowerdoor
- Rådgivning, bæredygtigt byggeri

Bedste hilsner



Hans Dollerup
TætHus ApS

Door Fan Test Report

Tester Information

Aalborg Universitet
Sohngårdholmsvej 57
Aalborg,
Denmark, 9000
Telefon:99409940, Telfax: 98142555
civil@civil.aau.dk

Customer

Customer Name
Contact Name
Customer Phone

Steen Møller

Building Under Test

Building
Address
City
State
Temporary Air Sealing

halmhus

Test

Test #:
Performed On
Operator
Direction(s)
Standard
Notes:

2
2009/02/19
In the Room
Test both directions
EN 13829

Equipment Used

System	Certificate # 2293		
Fan Serial #	099187	Calibrated	2012-08-05
Room Gauge Serial #	098631A	Calibrated	2007-08-05
Flow Gauge Serial #	098631B	Calibrated	2007-08-05

Environmental Conditions

	<u>Before</u>	<u>After</u>
Barometric Pressure	101325 Pa	101325 Pa
Relative Humidity	60%	22%
Wind Speed	0m/s	0m/s
Inside Temperature	24 °C	19 °C
Outside Temperature	3 °C	3 °C
Static Pressure	P01+ 0.0 Pa	P02+ 0.0 Pa
	P01- 0.0 Pa	P02- 0.0 Pa
	P01 0.0 Pa	P02 0.0 Pa

Static pressure points gathered before test.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Depressurize

Fan Range - Ring C8
10Pa

Take 8 to 10 Pressures, from 50Pa (recommended 100Pa) down to 10 In steps no larger than

Room Pressure (Pa):	-80.16	-75.18	-66.66	-56.67	-50.30	-48.61	-41.02	-36.79	-32.98	-29.11
Corrected Room Pr (Pa):	80.16	75.18	66.66	56.67	50.30	48.61	41.02	36.79	32.98	29.11
Flow Pressure (Pa):	168.40	151.73	129.57	109.89	90.27	84.34	63.34	54.26	42.83	33.76
Corrected Flow Pr (Pa):	168.4	151.7	129.6	109.9	90.3	84.3	63.3	54.3	42.8	LOW
Measured Flow (m³/h):	1682.3	1595.5	1472.6	1354.2	1226.3	1185.1	1026.3	949.5	843.7	749.3
Copyright 2006-2007, Retrotec Energy Innovations Ltd (m³/h):	1718.7	1634.5	1487.3	1309.6	1192.9	1161.3	1016.6	933.6	856.9	776.9
Error (%):	-2.2	-2.4	-1.	3.3	2.7	2.	.9	1.7	-1.6	-3.7

Pressurize

Fan Range - Ring C8
10Pa

Take 8 to 10 Pressures, from 50Pa (recommended 100Pa) down to 10 In steps no larger than

Room Pressure (Pa):	76.52	69.83	62.92	54.01	50.21	45.96	39.90	36.94	32.18	29.00
Corrected Room Pr (Pa):	76.52	69.83	62.92	54.01	50.21	45.96	39.90	36.94	32.18	29.00
Flow Pressure (Pa):	280.99	251.92	222.68	200.96	181.34	165.07	143.79	128.09	114.32	98.95
Corrected Flow Pr (Pa):	281.0	251.9	222.7	201.0	181.3	165.1	143.8	128.1	114.3	98.9
Measured Flow (m³/h):	2019.1	1902.9	1780.0	1705.0	1609.3	1532.5	1429.6	1338.1	1269.2	1170.4
Copyright 2006-2007, Retrotec Energy Innovations Ltd (m³/h):	2016.1	1918.0	1812.0	1667.2	1602.0	1526.5	1413.2	1355.1	1256.7	1187.3
Error (%):	.1	-.8	-1.8	2.2	.5	.4	1.1	-1.3	1.	-1.4

Static pressure points gathered after test.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Data Analysis

	Slope (n)	Intercept (C) (m³/h)	Correlation (%)
Best Fit: Least Squares			
Depressurize	0.7837	55.3417	97.51
Pressurize	0.5457	189.0639	98.6
Average	0.6647	122.2028	98.06

Zone Dimensions

Net Floor Area	75	m²
Zone Area	190	m²
Internal Volume	163	m³

Results

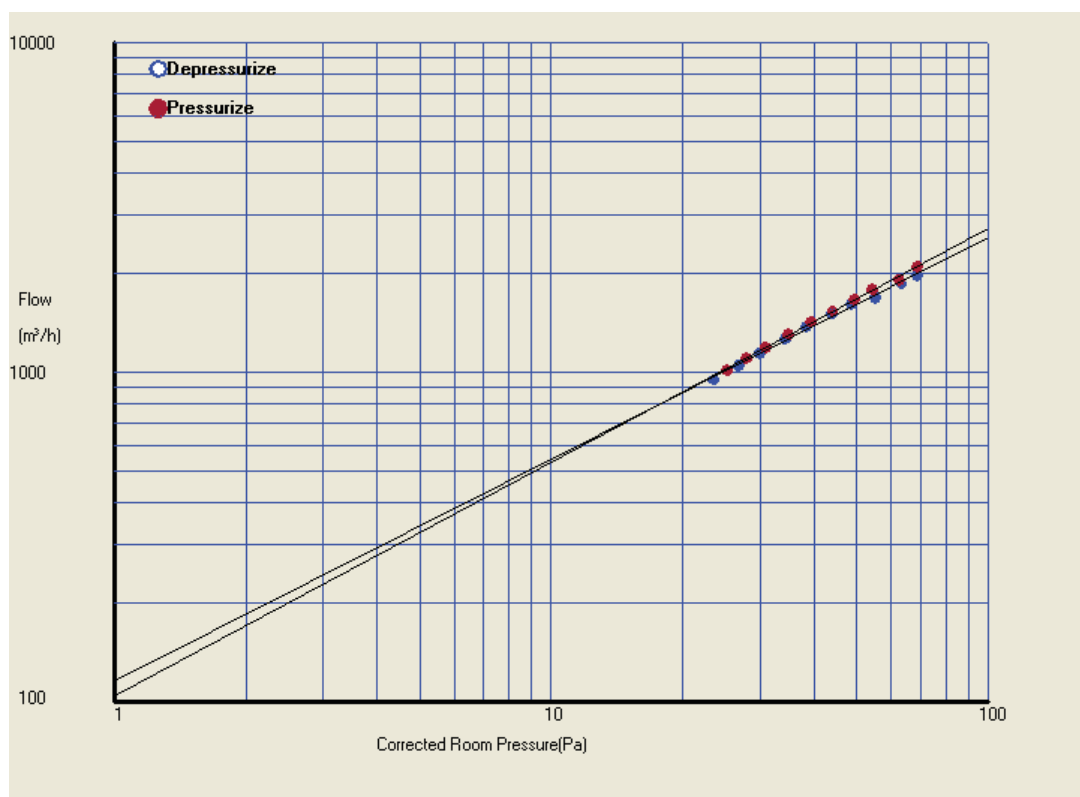
		Units	Depressurize	Pressurize	Average
Air Flow Coefficient	(CL)	(l/s)	15.373	52.518	
Air flow Exponent	(n)		0.7837	0.5457	
Confidence Factor		(%)	97.51	98.6	
Flow@ 50 Pa		(l/s)	329.722	443.889	386.944
Air Changes/Hour @ 50 Pa	(ACH)	(/hr)	7.284	9.81	8.545
Air Permeability@ 50 Pa		(l/s.m ²)	1.736	2.336	2.036
Specific Leakage Rate @ 50 Pa	(SLR)	(l/s.m ²)	4.397	5.919	5.158

Door Fan 3.0 Zone Leakage Analysis Software (Version 3.191)

By: Retrotec Energy Innovations Ltd (Canada).

Copyright 2006, 2007

This software conforms to the EN 13829 testing standard



Door Fan Test Report

Tester Information

Aalborg Universitet
Sohngårdholmsvej 57
Aalborg,
Denmark, 9000
Telefon: 99409940, Telfax: 98142555
civil@civil.aau.dk

Customer

Customer Name
Contact Name
Customer Phone

Building Under Test

Test

1
2009/02/19
In the Room
Test both directions
EN 13829

Equipment Used

System	Certificate # 2293		
Fan Serial #	099187	Calibrated	2012-08-05
Room Gauge Serial #	098631A	Calibrated	2007-08-05
Flow Gauge Serial #	098631B	Calibrated	2007-08-05

Environmental Conditions

	<u>Before</u>	<u>After</u>
Barometric Pressure	101325 Pa	101325 Pa
Relative Humidity	55%	50%
Wind Speed	5m/s	5m/s
Inside Temperature	23 °C	5 °C
Outside Temperature	2 °C	2 °C
Static Pressure	P01+ 0.0 Pa	P02+ 0.0 Pa
	P01- 0.0 Pa	P02- 0.0 Pa
	P01 0.0 Pa	P02 0.0 Pa

Static pressure points gathered before test.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Depressurize

Fan Range - Ring C8
10Pa

Take 8 to 10 Pressures, from 50Pa (recommended 100Pa) down to 10 In steps no larger than

Room Pressure (Pa):	-69.76	-64.23	-56.08	-49.67	-44.77	-39.32	-35.17	-30.91	-27.73	-24.47
Corrected Room Pr (Pa):	69.76	64.23	56.08	49.67	44.77	39.32	35.17	30.91	27.73	24.47
Flow Pressure (Pa):	219.94	197.74	162.42	149.93	130.52	109.12	91.66	75.61	63.60	52.21
Corrected Flow Pr (Pa):	219.9	197.7	162.4	149.9	130.5	109.1	91.7	75.6	63.6	52.2
Measured Flow (m³/h):	1962.0	1857.9	1680.5	1612.9	1503.1	1372.6	1256.7	1140.3	1045.2	946.4
Copyright 2006-2007, Retrotec Energy Innovations Ltd (m³/h):	1991.2	1881.1	1713.7	1576.4	1467.8	1342.5	1243.6	1137.8	1056.0	969.1
Error (%):	-1.5	-1.2	-2.	2.3	2.3	2.2	1.	.2	-1.	-2.4

Pressurize

Fan Range - Ring C8
10Pa

Take 8 to 10 Pressures, from 50Pa (recommended 100Pa) down to 10 In steps no larger than

Room Pressure (Pa):	67.94	61.47	53.31	48.46	43.04	38.33	33.93	29.96	26.97	24.31
Corrected Room Pr (Pa):	67.94	61.47	53.31	48.46	43.04	38.33	33.93	29.96	26.97	24.31
Flow Pressure (Pa):	296.98	251.58	220.15	194.71	167.92	145.43	124.26	105.97	92.06	79.39
Corrected Flow Pr (Pa):	297.0	251.6	220.1	194.7	167.9	145.4	124.3	106.0	92.1	79.4
Measured Flow (m³/h):	2097.4	1906.9	1783.6	1667.9	1539.2	1423.9	1306.3	1197.2	1107.2	1018.0
Copyright 2006-2007, Retrotec Energy Innovations Ltd (m³/h):	2091.8	1953.0	1770.9	1658.6	1528.9	1412.0	1298.5	1192.1	1109.0	1032.8
Error (%):	.3	-2.4	.7	.6	.7	.8	.6	.4	-.2	-1.4

Static pressure points gathered after test.

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Data Analysis

	Slope (n)	Intercept (C) (m³/h)	Correlation (%)
Best Fit: Least Squares			
Depressurize	0.6874	107.6075	98.16
Pressurize	0.6868	115.4041	98.92
Average	0.6871	111.5058	98.54

Zone Dimensions

Net Floor Area	30	m²
Zone Area	210	m²
Internal Volume	100	m³

Results

		Units	Depressurize	Pressurize	Average
Air Flow Coefficient	(CL)	(l/s)	29.891	32.057	
Air flow Exponent	(n)		0.6874	0.6868	
Confidence Factor		(%)	98.16	98.92	
Flow@ 50 Pa		(l/s)	440	470.556	455.278
Air Changes/Hour @ 50 Pa	(ACH)	(/hr)	15.84	16.94	16.39
Air Permeability@ 50 Pa		(l/s.m ²)	2.094	2.241	2.169
Specific Leakage Rate @ 50 Pa	(SLR)	(l/s.m ²)	14.664	15.692	15.178

Door Fan 3.0 Zone Leakage Analysis Software (Version 3.191)

By: Retrotec Energy Innovations Ltd (Canada).

Copyright 2006, 2007

This software conforms to the EN 13829 testing standard

