



## Varmetab fra spjæld i solvægge



*SEC-R-1*

*Teknologisk Institut  
Danmarks Tekniske Universitet*

# Varmetab fra spjæld i solvægge

*Trine Dalsgaard Jacobsen  
Søren Østergaard Jensen  
Energi Vision  
Teknologisk Institut*

*Karsten Duer  
Institut for Bygninger og Energi  
Danmarks Tekniske Universitet*

*Juli 2000*

Varmetab fra spjæld i solvægge  
SEC-R-1  
1. udgave, 1. oplag 2000  
© Teknologisk Institut, 2000  
Energidivisionen

ISBN: 87-7756-578-9  
ISSN: 1600-3780

# Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med projektet ”Varmetab fra spjæld i solvægge”, som er finansieret gennem Energistyrelsens udviklingsprogram for vedvarende energi under journal nummer 51181/98-0015. Projektet er gennemført under SolEnergiCenteret i et samarbejde mellem Institut for Bygninger og Energi på DTU og Teknologisk Institut, Energi.

Deltagere i projektet:

Teknologisk Institut, Energi: Trine Dalsgaard Jacobsen  
Søren Østergaard Jensen

Institut for Bygninger og Energi, DTU: Karsten Duer  
Lars Kæstel Jørgensen

# Indholdsfortegnelse

Summary.....	3
1. Indledning.....	4
1.1    Forskellige typer solvægge.....	4
1.2    Projektets formål.....	6
2. Baggrund for projektet.....	7
2.1    Varmetab forårsaget af spjæld i solvægge.....	7
2.2    Tidligere måleprojekter.....	9
2.2.1    In situ målinger på solvægge – Egebjerggård og Naturcenter Vestamager.....	9
2.2.2    Solvægsmålinger i PASSYS testcelle.....	11
3. Forsøgsopstilling.....	14
3.1    Beskrivelse af målemetode.....	14
3.2    Udformning af solvæg til forsøgsopstilling.....	15
3.3    Udformning af spjæld.....	17
3.4    Instrumentering.....	18
3.5    Forsøgsplan.....	19
4. Behandling af måleresultater.....	20
4.1    Måleresultater.....	20
4.2    Måleusikkerheder.....	21
4.3    Sammenhæng mellem spjældudformning og U-værdier.....	23
4.4    Utætheder i spjældene.....	25
4.5    Temperaturforhold omkring spjæld.....	26
4.6    Flow gennem åbninger.....	28
4.7    Termisk drivtryk.....	29
4.8    Tryktab i systemet.....	33
5. Model for beregning af varmetab i solvægge.....	37
5.1    Beregning af U-værdi for solvægge.....	37
5.2    Sammenligning af model og måledata.....	40
6. Forøgelse af varmetab som følge af spjæld.....	42
6.1    Forøgelsen i U-værdien ved andre dæklag.....	42
6.2    Beregning af varmetabet som følge af spjæld.....	44
6.3    Varmetab som følge af spjæld i forhold til solvægssydelse.....	46
6.4    Vindpåvirkning.....	47
6.4.1    Solvægge til forvarmning af ventilationsluft.....	47
6.4.2    Solvægge med recirkulation.....	47
6.4.3    Effekten af vinden på varmetabet.....	47
7. Konklusion.....	48
8. Referencer.....	50

## Summary

This report describes the results from the project “Heat loss from dampers in solar walls”, financed by the Danish Energy Agency. The project was carried out by Solar Energy Centre Denmark in a co-operation between the Department of Buildings and Energy at the Technical University of Denmark and the Energy Division of the Danish Technological Institute.

Active solar walls utilise solar energy by heating up air that is actively blown into the building. By transferring the heat into the building, the solar wall is consequently cooled and the performance increases. But penetration of the building envelope causes cold bridges when the solar wall is not active, resulting in an additional heat loss. Normally dampers are located in the openings to avoid air movements in periods without solar gains. Dampers are not as well insulated as the rest of the wall, and at the same time they are normally not entirely airtight. Pressure differences on each side of the dampers will cause airflow through a leakage, resulting in a heat loss due to convection as well as conduction.

The objective of this project was to quantify these additional heat losses caused by dampers in solar walls. The change in heat loss coefficient (U-value) was determined by measurements on a solar wall model with different kinds of dampers with varying leakages. The test results were generalised by theoretical investigations to expand the results to other solar wall designs. The aim was to create a set of guidelines for calculating the increase in heat loss for different kinds of dampers in solar walls. An understanding of the influence of dampers is hoped to lead to better design and consequently higher heat savings and better profitability of solar walls.

A series of measurements of heat loss coefficients for solar walls with different damper and leakage sizes were carried out at the Technical University of Denmark. The measurements were carried out in a calibrated guarded hot box in accordance to ISO 8990. The results showed a linear correlation between the area of the cold bridge in relation to the total solar wall area and the resulting U-value, if the dampers were totally airtight. The increase in heat loss is caused by the cold bridge effect of the less insulated dampers. In the case of non-airtight dampers additional heat loss due to convection occurs. The measurements showed a significant increase in U-value, if there were a leakage in more than one level of the wall, e.g. non-airtight dampers in top and bottom. A significant temperature change in the solar wall cavity indicated a downward airflow in the cavity.

Based on the measurement results a simple calculation model was developed. The model can provide a reasonable estimate of the U-value of a solar wall with airtight or non-airtight dampers for a given temperature level. The model is limited to solar walls with damper and leakage geometry close to those investigated in the measurements. The yearly heat loss can be calculated and compared to typical solar wall performances. The additional heat loss due to dampers can be as little as approx. 1% of the yearly performance or as much as 25% depending on the design of the solar wall and of the tightness of the dampers.

The additional heat loss due to dampers can be minimised by using well-insulated covers, small dampers compared to the total solar wall area and by making the dampers as airtight as possible. In this case the additional heat loss is neglectable. But in small solar walls with low insulated covers non-airtight dampers can cause a very significant performance reduction.

# 1. Indledning

## 1.1 Forskellige typer solvægge

Solvægge kan groft inddeles i to hovedgrupper – passive og aktive solvægge.

En passiv solvæg kan f.eks. være et glaslag opsat udenpå en eksisterende væg med et lufthulrum i mellem. Glasset tillader solens stråler at trænge ind til den eksisterende væg, men forhindrer til dels, at varme afgives tilbage til udeluften. Der kan eventuelt opsættes et absorberende materiale på væggen, der kan øge absorptionen af solindfaldet. Derved øges temperaturen på den ydre overflade af den eksisterende væg, hvorved varmetabet gennem væggen mindskes. I nogle tilfælde kan der endda være tale om et lille varmetilskud, hvis den ydre overfladetemperatur overstiger rumtemperaturen indenfor. Ydelsen af en passiv solvæg er ofte mindre end for en aktiv solvæg, men til gengæld er der ingen gennembrydninger af bygningens klimaskærm, og solvæggen kan ikke bidrage negativt til den samlede varmebalance.

Ved aktive solvægge forstås, at den varme, der genereres i solvæggen, aktivt bliver ført ind i bygningen via en luftstrøm. Dette foregår typisk ved hjælp af en ventilator, men luften i solvæggen kan også drives naturligt, idet de termiske drivkræfter i luft med forskellige temperaturer kan udnyttes. Ved at overføre den opsamlede varme til bygningen, køles solvæggen samtidig, hvorved den kan optage mere energi og derved yde mere. Ulempen ved aktive solvægge er, at det er nødvendigt at gennembryde den eksisterende klimaskærm for at skabe kanaler til luften. Oftest placeres spjæld i åbningerne, så luftcirkulation kan forhindres, når der ikke er mulighed for solenergiudnyttelse, men da spjældene sjældent er isolerede, vil de være kuldebroer i klimaskærmen i disse perioder.

Aktive solvægge kan inddeles i en række undergrupper:

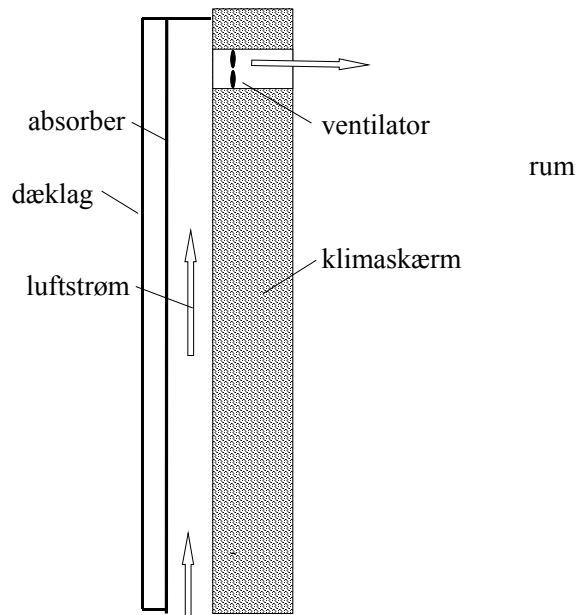
- solvægge til forvarmning af ventilationsluft, hvor udeluft altid suges gennem solvæggen. Der er typisk én gennembrydning af klimaskærmen placeret øverst i solvæggen,
- solvægge til forvarmning af ventilationsluft, hvor der kun suges luft igennem solvæggen, når der er solenergi at udnytte. Disse solvægge har også kun én gennembrydning af klimaskærmen,
- solvægge til opvarmning af recirkuleret indeluft. Disse har gennembrydninger af klimaskærmen både i top og bund af solvæggen. Luften suges kun igennem, når der solenergi at udnytte.

Solvægge til forvarmning af ventilationsluft, hvor der altid suges luft ind gennem solvæggen, har intet varmetab ved gennembrydningen, idet et eventuelt varmetab suges tilbage ind i rummet med den friske luft. Et eksempel på dette princip er solvæggene i Hybenparken (Gramkow, 1996).

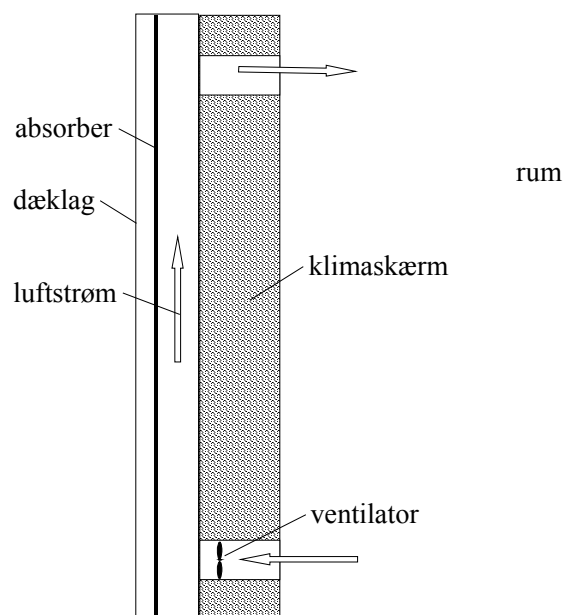
I solvægge til forvarmning af ventilationsluft, hvor der kun suges luft igennem, når solen skinner, vil der være et forøget varmetab som følge af gennembrydningen, når solen ikke skinner. Dette princip er anvendt i solvæggene i Lundegården (Gramkow, 1996).

Forøgelsen af varmetabet er endnu mere udpræget i solvægge med gennembrydninger i top og bund. Disse solvægge anvendes til opvarmning af indeluft, der suges ud gennem solvæggen, når solen skinner. I disse solvægge vil utætte spjæld især give anledning til en betydelig forøgelse af væggenes U-værdi. Solvægge af denne type anvendes bl.a. i Egebjerggård, Ballerup (Schmidt og Jensen, 1998) og Naturcenter Vestamager (Jensen, 1999).

Dette projekt omhandler udelukkende aktive solvægge, der kun ventileres, når der er sol, da det er disse typer solvægge, der kan medføre et forøget varmetab. I Figur 1.1 og Figur 1.2 vises principskitser af de to typer solvægge.



Figur 1.1 Principskitse af solvæg til forvarmning af friskluft



Figur 1.2 Principskitse af solvæg til opvarmning af indeluft

## 1.2 Projektets formål

Formålet med projektet er, ved hjælp af målinger i kombination med teoretiske undersøgelser, at skaffe viden om den forøgelse af en solvægs varmetab, som forskellige udformninger af gennembrydninger og spjæld giver anledning til.

Måleresultaterne vil ved hjælp af teoretiske undersøgelser blive generaliseret, så det bliver muligt også at vurdere indflydelsen af gennembrydninger i andre udformninger af solvægge end den, målingerne er udført for.

Målet er at opstille lettilgængelige retningslinier, på baggrund af hvilke, det er muligt at vurdere forøgelsen af varmetabet i konkrete tilfælde.

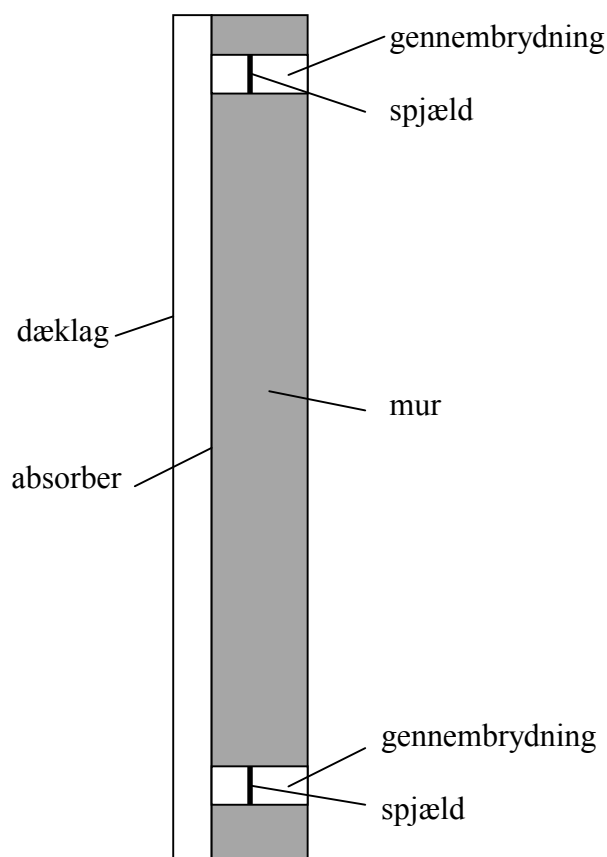
Rentabiliteten af solvægge vil være afhængig af, hvor stort et varmetab gennembrydningerne skaber. En bedre forståelse af gennembrydningers betydning for solvægges varmetransmissionskoefficient (U-værdi) forventes at lede til bedre design med deraf større energibesparelser og dermed bedre rentabilitet. Målgruppen for projektet er dermed i første omgang rådgivere og spjældfabrikanter. I anden omgang bygningsejere.



## 2. Baggrund for projektet

### 2.1 Varmetab forårsaget af spjæld i solvægge

I ventilerede solvægge er der en eller flere gennembrydninger i ydervæggen som vist i Figur 2.1. Disse gennembrydninger giver anledning til termiske kuldebroer, der forøger væggenes U-værdi. I hidtidige undersøgelser er dette varmetab som regel ikke medregnet, når ydelsen for solvæggene bestemmes, da dette varmetab er yderst svært at kvantificere.

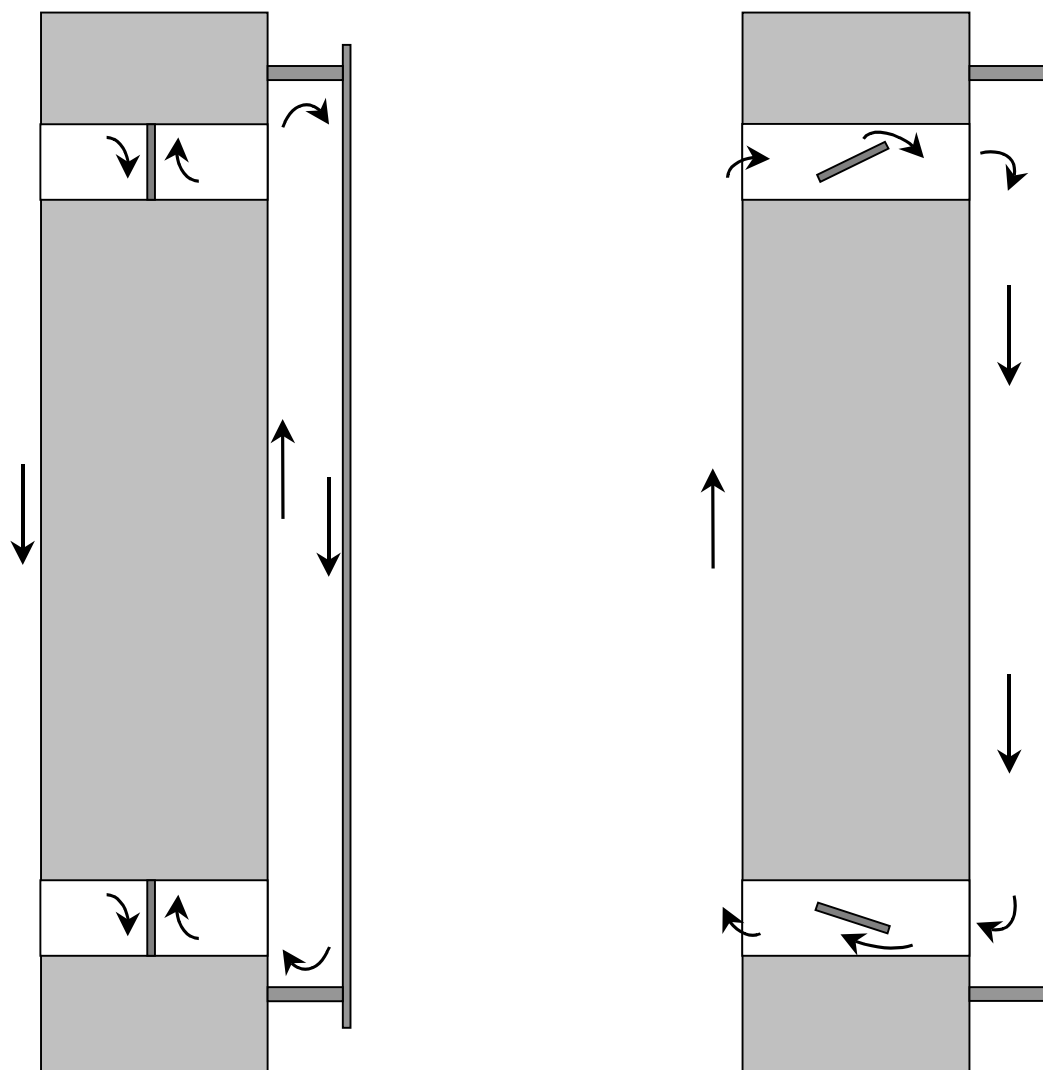


Figur 2.1 Gennembrydninger i en ventileret solvæg, hvor rumluft cirkuleres i solvæggen.

Som regel er der som vist i Figur 2.1 installeret spjæld i gennembrydningerne for at hindre direkte luftcirkulation, når solvæggen ikke er i drift.

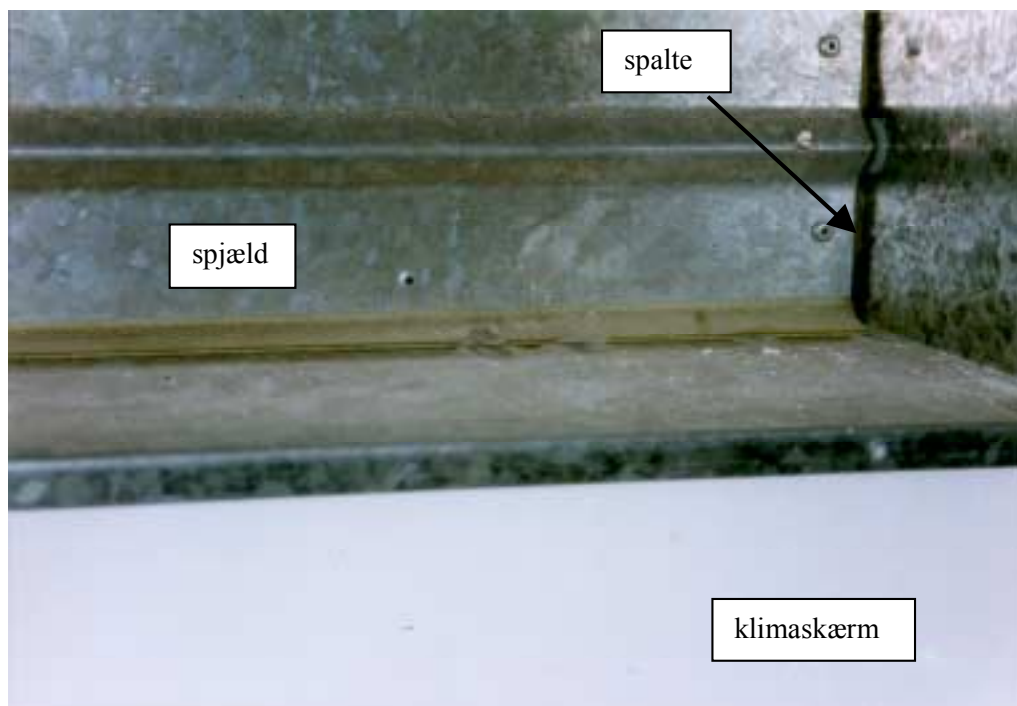
Spjældene forøger ikke alene varmetabet ved øget varmeledning gennem væggen, men bidrager også til forøget konvektion. På grund af temperaturforskellen over spjældet vil der specielt om natten opstå konvektive varmestrømme i gennembrydningerne på begge sider af spjældet, der vil transportere varme fra rummet til omgivelserne. Hvis spjældene ikke slutter helt tæt, vil varmetabet skabt af spjældene forøges drastisk, idet rumluft direkte kan cirkulere

ud i solvæggen og afkøles. De konvektive luftstrømme langs spjæld i solvægge er forsøgt skitseret i Figur 2.2.



Figur 2.2 Konvektion i solvæg med spjæld øverst og nederst og hhv. tætte og utætte spjæld

I praksis vil det være vanskeligt at udforme spjældene, så de slutter helt til. Det er ofte nødvendigt at have en lille frigang i hver side af spjældet, for at det kan åbne og lukke uproblematisk. Et eksempel er vist i Figur 2.3, der er et nærbillede af et spjæld fra en solvæg på Naturcenter Vestamager. Selv om den åbne sprække i spjældets side er lille, vil den bidrage til, at de ovennævnte konvektionsstrømme kan opstå.



Figur 2.3 Billede af den øverste kanal i en af solvæggene fra Naturcenter Vestamager (Jensen, 1999).

## 2.2 Tidligere måleprojekter

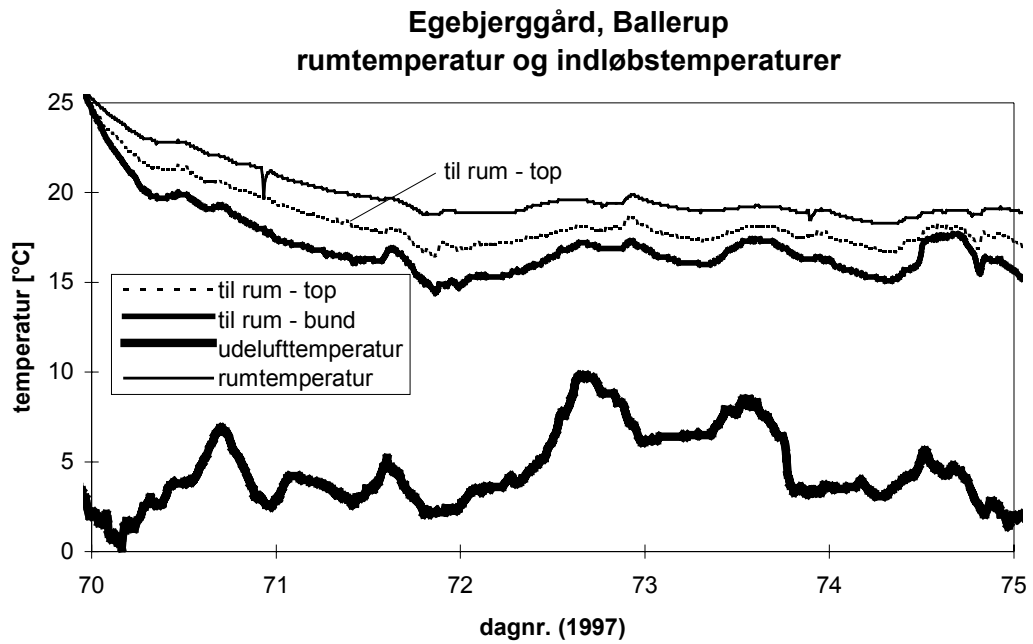
Mistanken om, at spjæld i solvægge kan medføre forøgede varmetab, er bl.a. opstået gennem tidligere måleprojekter. Temperaturmålinger ved spjældene har indikeret luftstrømninger, men det var ikke muligt at kvantificere effekten af konvektionen.

I de efterfølgende afsnit gennemgås kort nogle resultater fra tidligere projekter, hvori der har indgået målinger på ventilerede solvægge.

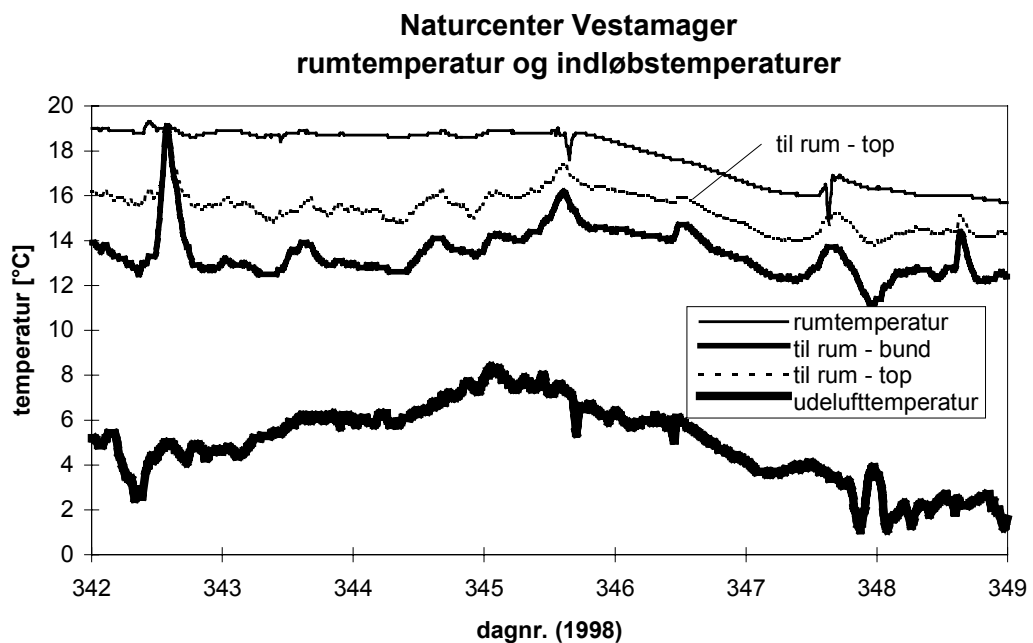
### 2.2.1 In situ målinger på solvægge – Egebjerggård og Naturcenter Vestamager

Figur 2.4 og Figur 2.5 viser temperaturmålinger på ventilerede solvægge fra måleprojekterne i Egebjerggård og Naturcenter Vestamager (Schmidt og Jensen, 1998 og Jensen, 1999). Begge steder blev der målt på solvægge af samme type som vist i Figur 2.1.

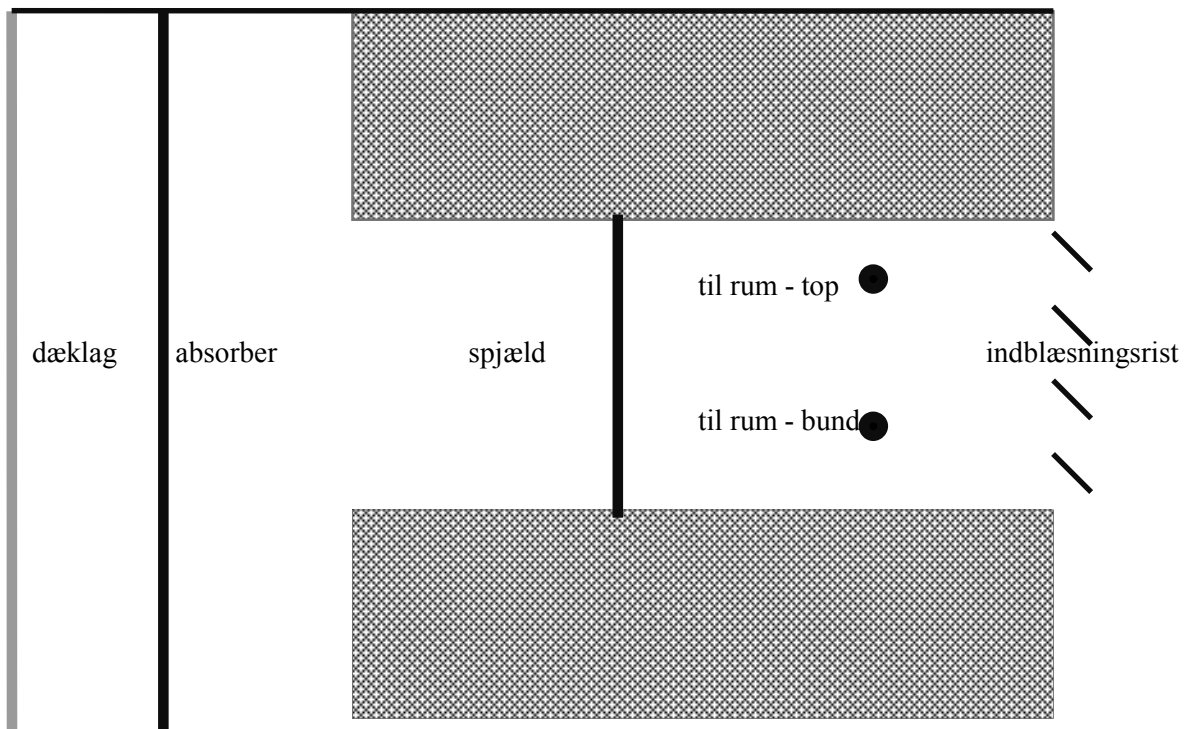
Figureerne viser en periode med ringe solindfald - for Egebjerggård 11.-15 marts 1997 og Naturcenter Vestamager 8.-15. december 1997. Placeringen af målepunkterne i solvæggene er vist i Figur 2.6.



Figur 2.4 Rum- og udelufttemperatur samt temperaturer i indløbet fra solvæggen til rummet i Egebjerggård.



Figur 2.5 Rum- og udelufttemperatur samt temperaturer i indløbet fra solvæggen til rummet i Naturcenter Vestamager.



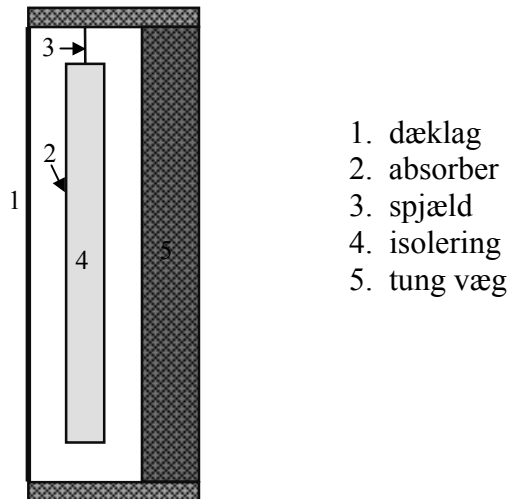
Figur 2.6 Placering af temperaturfølerne i Egebjerggård og Naturcenter Vestamager.

Det kan ses af Figur 2.4 og Figur 2.5, at forskellen mellem rumluften og temperaturen i bunden af indløbet ofte er mellem 4 og 5°C. Temperaturen i toppen af indløbet er mellem 1 og 2°C højere end i bunden af det samme indløb. Dette indikerer, at der foregår konvektion omkring spjældet. Rumluft strømmer ned langs spjældet og bliver afkølet. Spjældet medfører en forøgelse af væggenes U-værdi, men det ekstra varmetab kan ikke kvantificeres ud fra målingerne.

### 2.2.2 Solvægsmålinger i PASSYS testcelle

Et andet eksempel på spjælds betydning for varmetabet fra en solvæg, stammer fra en solvæg, der blev konstrueret til de danske PASSYS testceller – en internt ventileret solvæg (Guy, 1993). Solvæggen bestod - som vist på Figur 2.7 - af:

- en tung væg inderst - 114 mm
- en luftspalte på 93 mm
- et isolerende panel med en sortmalet absorber af 1 mm stålplade yderst, 100 mm mineraluld og 6,5 mm krydsfiner
- en luftspalte på 93 mm
- et dæklag af 5 mm floatglas



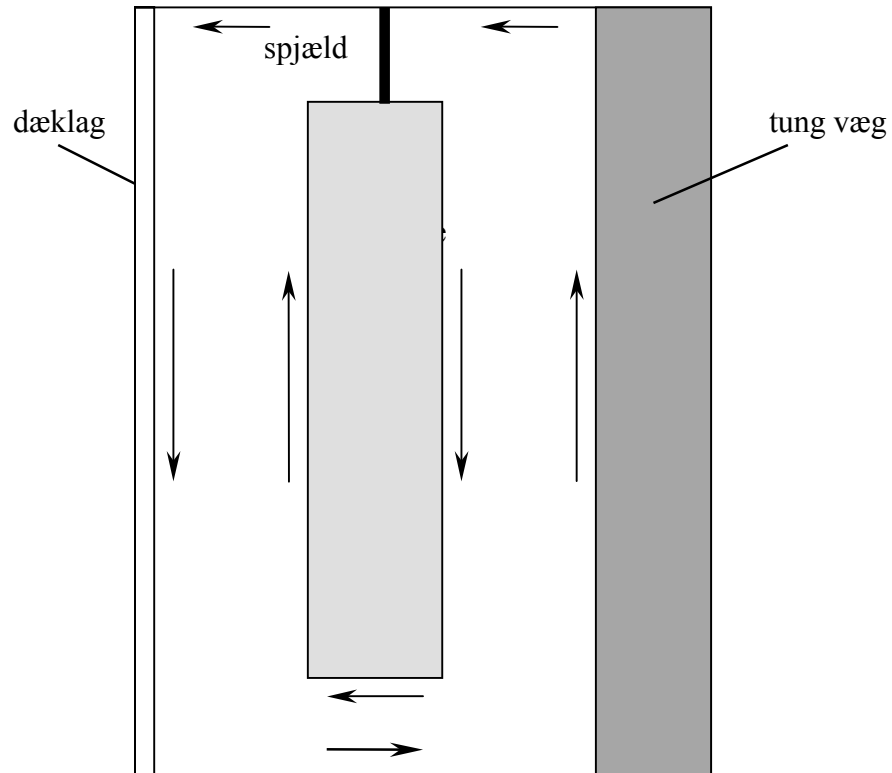
Figur 2.7 Principskitse af den internt ventilerede PASSSYS solvæg.

De to luftspalter var i top og bund forbundet med 100 mm høje gennembrydninger af det isolerende panel, hvor der var placeret et motordrevet spjæld i den øverste luftspalte. U-værdien for væggen uden hensyntagen til spjældet og den nederste gennembrydning blev beregnet til  $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Guy, 1993).

En afprøvning af solvæggen blev gennemført i foråret 1992 (Jensen, 1993). Under afprøvningen blev spjældet åbnet, når temperaturen i toppen af den yderste luftspalte var  $5^\circ\text{C}$  højere end temperaturen i bunden af den inderste spalte. Ellers var spjældet lukket for at hindre "baglæns" selvcirkulation, der ville forøge varmetabet fra væggen.

Afprøvningen viste, at U-værdien for væggen med lukket spjæld ikke som forventet var omkring  $0,32 \text{ W/m}^2\text{K}$ , men blev på baggrund af målingerne estimeret til  $2 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Denne ekstreme forøgelse af varmetabet kan forklares med, at der med lukket spjæld var en utilsigtet luftstrømning som vist (i fortegnet form) i Figur 2.8. Problemet kunne til dels være afhjulpet med et spjæld i den nederste gennembrydning. Men utætte spjæld kan skabe utilsigtede luftstrømninger som i PASSSYS solvæggen, der vil forøge varmetabet fra væggen.

Det skal retfærdigvis siges, at formålet med PASSSYS solvæggen ikke var at konstruere en meget effektiv væg, men at konstruere en væg, hvor alle data var kendt med stor nøjagtighed, idet formålet var at producere et datasæt af høj kvalitet til validering af simuleringer.



Figur 2.8 Den utilsigtede luftstrømning i PASSYS solvæggen.

Selv om ovenstående er et ekstremt eksempel, illustrerer det, at det er nødvendigt at tage hensyn til forøgelsen af vægges U-værdi, når der etableres gennembrydninger (også med spjæld) i forbindelse med installation af solvægge. Det er vigtigt af tage højde for denne forøgelse af solvæggens varmetab, idet en forkert udformning af gennembrydninger og spjæld kan medføre en kraftig reduktion af den besparelse i varmebehovet, solvæggen vil medføre.

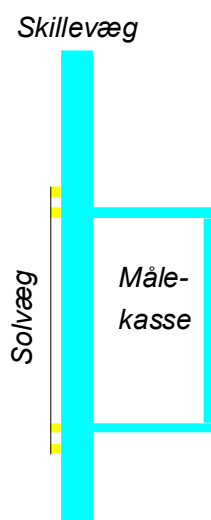
## 3. Forsøgsopstilling

### 3.1 Beskrivelse af målemetode

En væg med en typisk U-værdi for danske forhold (omkring  $0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) blev opbygget og installeret i en guarded hot box på Institut for Bygninger og Energi, DTU. I hot box'en er det muligt at foretage præcise U-værdibestemmelser for vægge op til ca.  $1,8 \times 1,2 \text{ m}$ , hvilket er tilstrækkeligt til at skabe en realistisk temperaturfordeling og realistiske luftstrømninger.

Måling af varmetransmissionskoefficienten for solvæggen alene (nulprøven) og for solvæggen forsynet med forskellige typer spjæld er foretaget i overensstemmelse med (ISO 8990, 1997).

Princippet i målingen er følgende: Den undersøgte solvæg monteres som en skillevæg mellem en varm ( $20^\circ\text{C}$ ) og en kold sektion ( $0^\circ\text{C}$ ) i hot box'en. På et udsnit af solvæggens varme side er monteret en målekasse, der sikrer entydig bestemmelse af væmestrommen gennem solvæggen fra varm til kold side. Skillevæggen mellem varm og kold side er  $2,85 \text{ m}$  høj og  $1,85 \text{ m}$  bred og målekassens indvendige dimensioner er  $1,78 \text{ m} \times 1,18 \text{ m}$ . Målekassens dimensioner er afgørende for dimensionerne af den undersøgte solvæg. På Figur 3.1 ses et snit gennem skillevæg/solvæg og målekasse samt et billede af IBE's guarded hot box. Som det fremgår af billedet på Figur 3.1 består hot box-en af tre sektioner. Sektionen til venstre er den kolde side, i midtersektionen monteres skillevæggen/solvæggen og den højre sektion er den varme side (guardkassen). Målekassen kan anes på billedet mellem midtersektionen og guardkassen.



Figur 3.1 Skitse af solvæg samt billede af IBE's guarded hot box

I målekassen tilføres elektrisk effekt via en computerstyret regulering, så der opretholdes en konstant temperatur på  $20^\circ\text{C}$  og via naturlig konvektion opnås en varmeovergangsmodstand fra solvæggen til omgivelserne svarende til standardforhold (ISO 8990, 1997). I guardkassen



reguleres temperaturen, så temperaturdifferensen over målekassens sider er 0 K, svarende til at der ikke sker varmetransport gennem målekassens vægge. På den kolde side reguleres temperaturen så den konstant er ca. 0°C og via et system af blæsere skabes en samlet varmeovergangsmodstand for varm og kold side på ca. 0,17 m<sup>2</sup>K/W.

### 3.2 Udformning af solvæg til forsøgsopstilling

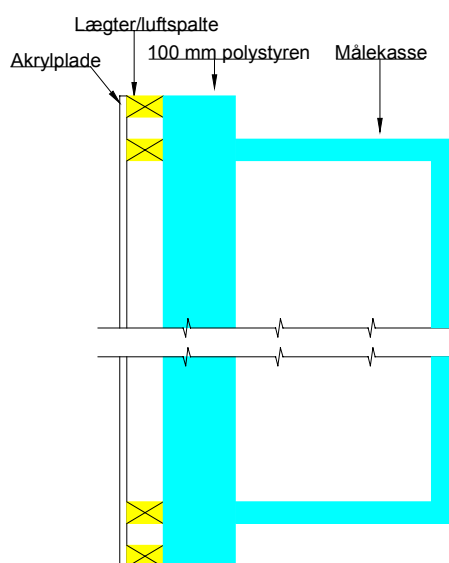
Den anvendte solvægsmodel er opbygget af 100 mm polystyrenskum med et akryldæklag på væggen kolde side. Skumisuleringen gør det relativt let at lave gennembrydninger, og U-værdien for væggen kan derved bestemmes med forskellige konfigurationer af spjæld. Der indgår ingen termisk tunge elementer i den undersøgte solvæg, men det har ingen betydning for de fundne resultater, da alle målinger er gennemført under stationære forhold.

Væggen skal repræsentere både solvægge til forvarmning af friskluft som Figur 1.1, og solvægge med gennembrydninger i både top og bund som Figur 1.2. I solvægge til forvarmning af friskluft vil hulrummet mellem dæklag og bagvæg normalt være åbent ud mod udeklimaet nederst i solvæggen. En solvæg til opvarmning af recirkuleret indeluft vil derimod have et lukket hulrum mellem dæklag og bagvæg. Den opbyggede solvægsmodel til målingerne har et lukket hulrum. Derved vil konvektion ske internt i hulrummet og eventuelt med indeluften, men ikke direkte med udeluften.

Akrylpladen er skruet fast i trælægter, og der er overalt anvendt tætningslister for at sikre, at luftspalten mellem akrylplade og polystyren er lufttæt. Luftspalten er trykprøvet og fundet tæt. Som det fremgår af nedenstående Figur 3.2 er målekassens anlægspunkt ud for den inderste trælægte. Det betyder, at der i målingerne forekommer 2-dimensionale varmestrømme omkring trælægterne og disse varmestrømme er målt med i alle målingerne. Effekten er beskeden, og da disse 2-D varmestrømme er tilnærmelsesvis ens i alle de udførte målinger, vurderes dette ikke at have betydning for resultaternes gyldighed.

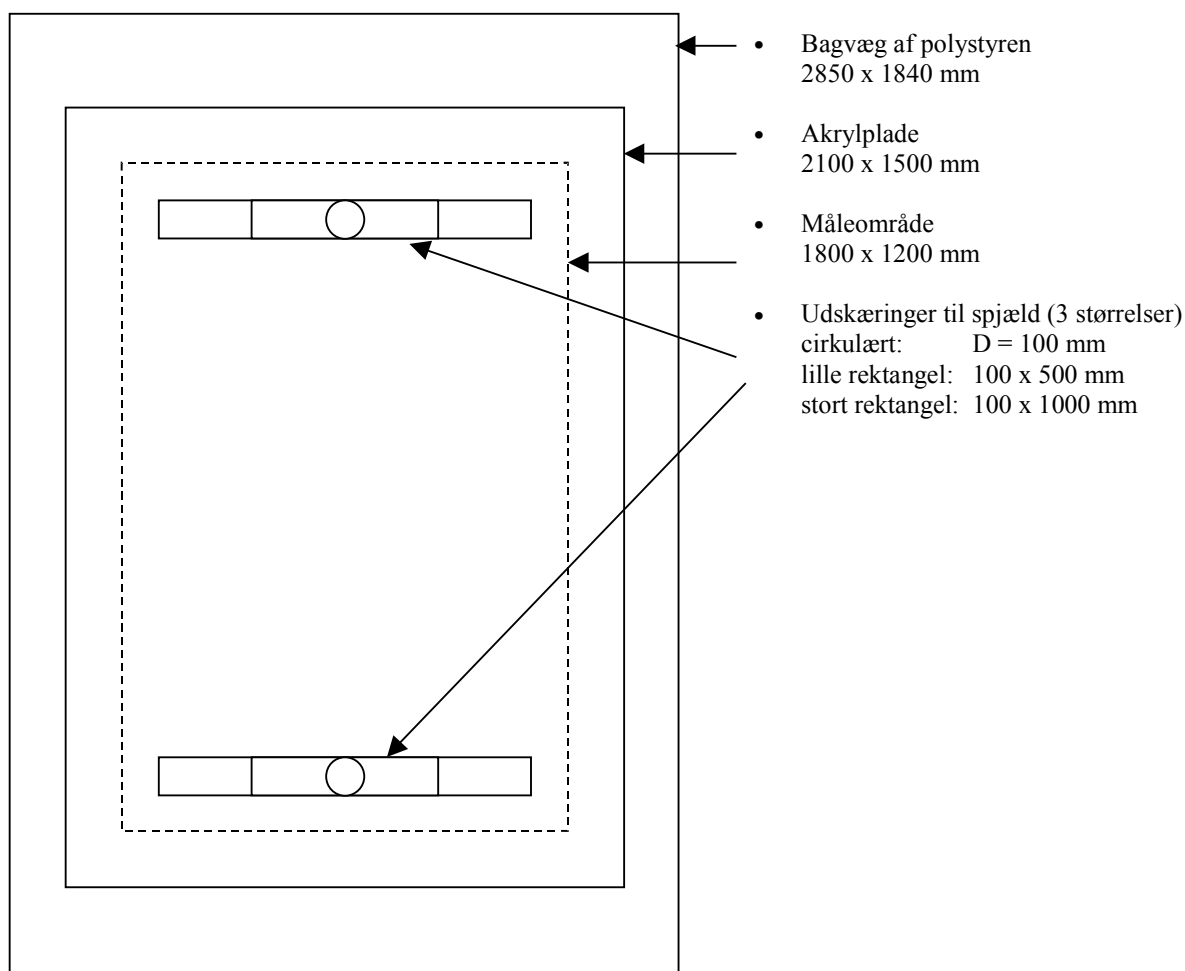
Solvæggen er opbygget som følger:

Yderst	5 mm akrylplade
	50 mm luftspalte
Inderst	100 mm polystyrenskum
Højde:	1780 mm
Bredde:	1180 mm



Figur 3.2 Beskrivelse og skitse af solvægsmodel i Hot Box

Figur 3.3 viser placeringen af de forskellige størrelser spjæld i solvæggen. Gennembrydningerne blev etableret successivt i den samme væg. Først blev der målt på en lille cirkulær gennembrydning i toppen af væggen, derefter på to forskellige størrelser af rektangulære gennembrydninger i toppen af væggen, og derefter på tilsvarende gennembrydninger af samme størrelse i bunden af solvæggen. Målingerne blev desuden foretaget med tætte spjæld og forskellige størrelser af kontrollerede utætheder.



Figur 3.3 Skitse af forsøgssolvæg

En del typer solvægge har to dæklag eller både dæklag og absorber. Flere dæklag eller hulrum mellem dæklag og en absorber, vil medføre en større isolans mellem det hulrum, hvor luften kan transporteres og udeklimaet. Det mindsker det ledningsmæssige varmetab, men en højere temperatur i hulrummet betyder også, at det termiske drivtryk bliver mindre, hvorved det konvektive varmetab også mindskes. Spjældene vil derfor ikke have så stor betydning i disse typer solvægge.

Den anvendte solvægsmode til målingerne er udformet med kun ét dæklag og ingen absorber. Her vil spjældene betyde forholdsvis meget, hvilket vil gøre det lettere at opnå entydige måleresultater. Effekten af en større isolans mod udeklimaet er beskrevet i kapitel 6.

### 3.3 Udformning af spjæld

Gennembrydningerne i solvægsmodellen blev fremstillet ved at udskære et eller flere huller i bagvæggen (polystyrenpladen). Åbningerne blev foret med ventilationskanaler af galvaniseret stål gennem bagvæggen. Kanalerne blev forsynet med ventilationsriste mod indeklimaet, så trykfaldet over åbningerne er repræsentativt for rigtige spjæld.

Selve spjældet blev udført som en tallerkenventil eller med en fastmonteret spjældplade af stål i midten af kanalen. Spjældpladerne kan ikke åbnes og lukkes som rigtige spjæld, men er fastholdt i en lukket position. Alle eventuelle sprækker mellem den udskårne åbning og ventilationskanalen er tætnet. Spjældpladen er tætnet med vandrette gummilæber langs hhv. over og underkant og tape langs de lodrette kanter.

Der er anvendt tre forskellige ristudformninger, som vist i Figur 3.4.

- Tallerkenventil  $\varnothing$  100 mm
- Smalt rektangulært spjæld (500 x 100mm)
- Bredt rektangulært spjæld (1000 x 100 mm)

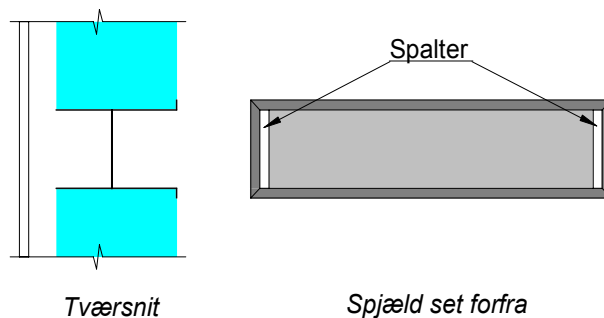


Figur 3.4 Beskrivelse af de tre undersøgte spjældtyper

Kanaler og spjæld er fremstillet af firmaet JRV Ventilation A/S, der har erfaringer med fremstilling af rigtige solvægsspjæld, bl.a. fra Naturcenter Vestamager. Der er produceret i alt 5 spjæld – 1 cirkulært spjæld, 2 rektangulære spjæld med tværsnitsarealet  $0,05 \text{ m}^2$  og 2 rektangulære spjæld med tværsnitsarealet  $0,1 \text{ m}^2$ . Tallerkenventil og ventilationsriste er fra Lindab. Utæthederne havde form af kontrollerede spalter i hver side af spjældene, se Figur 3.5.

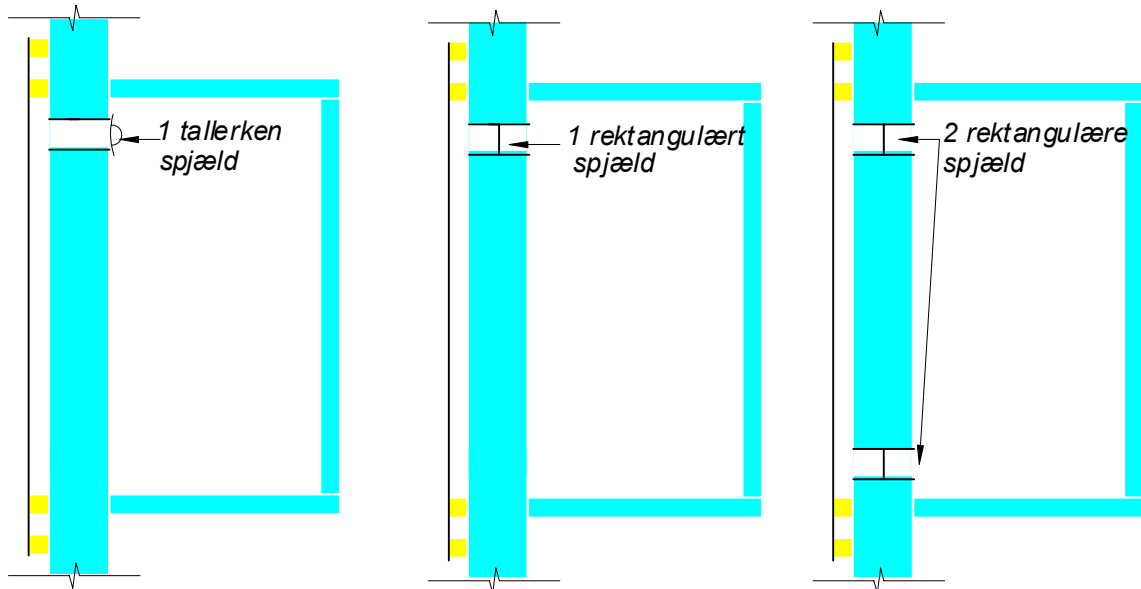
Tværsnit gennem solvæg og spjæld viser placeringen af tætningspladen.

Opstalten af spjældet viser placeringen af de varierede utætheder i form af kontrollerede spalter i hver side af spjældet.



Figur 3.5 Skitse af rektangulære spjæld

Tallerkenventilen var monteret øverst i solvæggen med varierende åbning. Hvert af de to rektangulære spjældtyper blev først testet for en montering øverst i solvæggen og med varierende åbning. Dernæst blev der for hver af de to rektangulære spjældtyper monteret et spjæld både øverst og nederst i solvæggen og igen blev der foretaget målinger ved varierende spjældåbninger, se Figur 3.6.

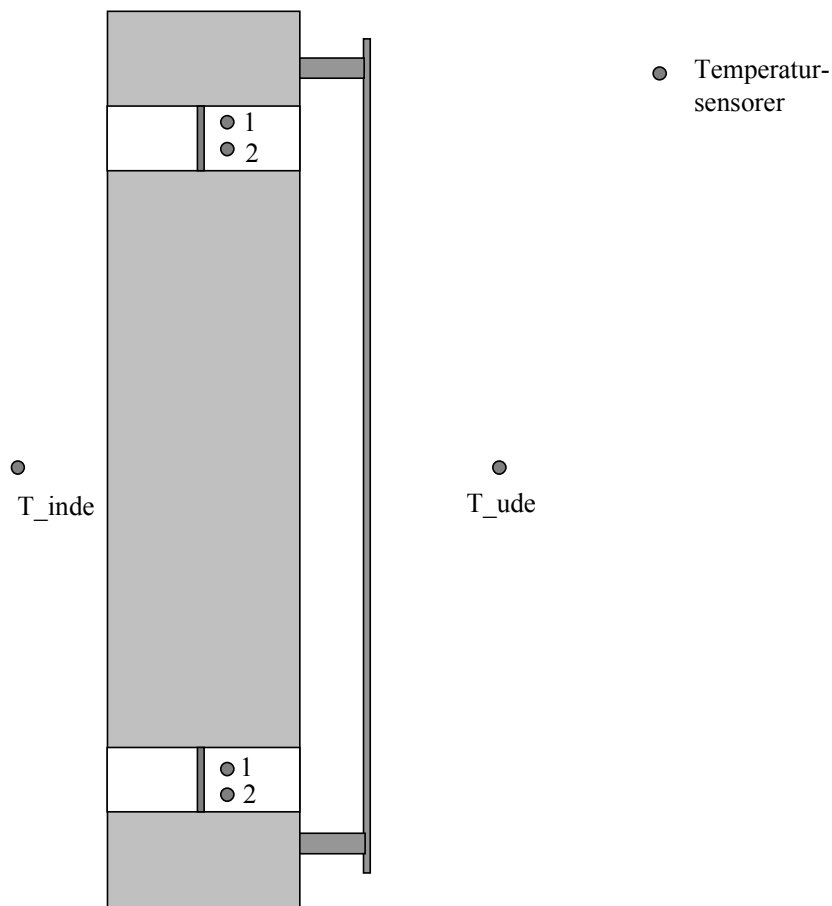


Figur 3.6 Placering af spjæld i solvæg

### 3.4 Instrumentering

Ved forsøgene ønskes det samlede varmetab gennem måleområdet bestemt. Dette sker ved måling af den elektriske effekt, der afgives i målekassen på den varme side af væggen, samt med temperaturmålinger på hhv. den varme og den kolde side af forsøgsvæggen.

Derudover ønskes det undersøgt, om der forekommer konvektion gennem hulrummet og ved spjældene. Dette kan fastlægges ved målinger af temperaturer forskellige steder i opstillingen. Placering af temperatursensorer er vist i Figur 3.7. Udover de viste sensorer er der målt overfladetemperaturer i ni punkter på hhv. den kolde side af akrylpladen og den varme side af bagvæggen (polystyrenpladen). Der er overalt anvendt kobber-konstantan tråde type T til temperaturmålingerne.



Figur 3.7 Skitse af placeringen af termofølere i forsøgsopstillingen

### 3.5 Forsøgsplan

Der er udført i alt 23 forsøg i hot boksen. Disse er inddelt i 6 forsøgsrækker, som listet i tabellen nedenfor.

Forsøgsrække	forsøg nr.	Beskrivelse af forsøg	Hvilken type solvægge skal simuleres
1	1	referencemåling	-
2	2,3,4	cirkulær åbning i top	forvarmning af friskluft
3	5,6,7	lille sprække i top	forvarmning af friskluft
4	8,9,10, 11,12,13	lille sprække i top og bund	opvarmning og recirkulering af indeluft
5	14,15,16	stor sprække i top	forvarmning af friskluft
6	17,18,19,20, 21,22,23	stor sprække i top og bund	opvarmning og recirkulering af indeluft

Tabel 3.1 Beskrivelse af forsøgsrækker

## 4. Behandling af måleresultater

### 4.1 Måleresultater

Under forsøgene blev varmetabet gennem forsøgsvæggen, temperaturer ved øverste og nederste spjæld, samt spjældenes reelle utæthed målt. I nedenstående **Tabel 4.1** er listet de samlede U-værdier for væggene, mens de målte temperaturer ud for spjældene er listet i Tabel 4.2.

Test nr.	Beskrivelse	spjæld areal [m <sup>2</sup> ]	utæthed		U-værdi [W/m <sup>2</sup> K]
			spalte i hver side [mm]	samlet åbningsareal [10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> ]	
1	Referencemåling, uden spjæld	-	-	-	0,31
2	cirkulært spjæld i top, tæt	0,0079	0	0,00	0,34
3	cirkulært spjæld i top, lille utæthed	0,0079	2	0,63	0,34
4	cirkulært spjæld i top, større utæthed	0,0079	5	1,57	0,36
5	smalt spjæld i top, tæt	0,05	0	0,00	0,39
6	smalt spjæld i top, lille utæthed	0,05	2	0,40	0,40
7	smalt spjæld i top, større utæthed	0,05	5	1,00	0,41
8	smalle spjæld i top og bund, tæt	2 x 0,05	0	0,00	0,47
9	smalle spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,05	0,8	0,16	0,49
10	smalle spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,05	1,7	0,34	0,53
11	smalle spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,05	2,5	0,50	0,55
12	smalle spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,05	3,3	0,66	0,58
13	smalle spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,05	7	1,40	0,73
14	bredt spjæld i top, ingen utæthed	0,10	0	0,00	0,43
15	bredt spjæld i top, med utæthed	0,10	2	0,40	0,44
16	bredt spjæld i top, med utæthed	0,10	5	1,00	0,44
17	brede spjæld i top og bund, tæt	2 x 0,10	0	0,00	0,58
18	brede spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,10	1	0,20	0,63
19	brede spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,10	1,7	0,34	0,64
20	brede spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,10	2,5	0,50	0,66
21	brede spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,10	3,3	0,66	0,68
22	brede spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,10	4,2	0,84	0,70
23	brede spjæld i top og bund, med utæthed	2 x 0,10	7	1,40	0,79

Tabel 4.1 Forsøgsresultater – U-værdier

Test nr.	T-øverst, 1	T-øverst, 2	T-nederst, 1	T-nederst, 2	Bemærkninger
1	-	-	-	-	temperaturer ikke målt
2	-	-	-	-	temperaturer ikke målt
3	-	-	-	-	temperaturer ikke målt
4	-	-	-	-	temperaturer ikke målt
5*	7,6	6,5	-	-	temperatur kun målt øverst
6*	7,6	6,5	-	-	temperatur kun målt øverst
7*	9,0	9,6	-	-	temperatur kun målt øverst
8*	7,8	5,6	4,0	3,6	
9*	9,5	7,0	3,6	3,5	
10*	10,2	8,9	3,4	3,2	
11*	10,6	9,3	3,2	3,0	
12	8,6	8,3	1,7	1,8	
13	10,4	10,4	1,3	1,4	
14	6,2	5,8	-	-	temperatur kun målt øverst
15	6,3	5,8	-	-	temperatur kun målt øverst
16	6,3	5,7	-	-	temperatur kun målt øverst
17	6,6	6,0	2,8	2,8	
18	8,1	7,6	2,9	2,8	
19	8,4	8,1	2,7	2,7	
20	8,6	8,3	2,7	2,7	
21	9,2	8,9	2,5	2,5	
22	9,5	9,2	2,5	2,5	
23	10,6	10,3	2,5	2,4	

Tabel 4.2 Forsøgsresultater – Temperaturer i hulrum

Ved de med \* mærkede forsøg er der en målefejl forbundet med temperaturmålingerne, idet temperaturfølerne var monteret forkert i forsøgsopstillingen. Disse målinger er derfor ikke anvendt ved de efterfølgende beregninger.

## 4.2 Måleusikkerheder

U-værdien udregnes på basis af følgende udtryk:

$$U = \frac{\Phi}{A \cdot \Delta T_n}$$

hvor  $\Phi$  er varmestrømmen gennem solvæggen [W]

A er solvæggens (målekassens) areal [m<sup>2</sup>]

$\Delta T_n$  er differensen mellem operativ temperatur på hhv. varm og kold side [K]

I (Rose, J., 1998) er der foretaget en gennemgribende analyse af nøjagtigheden af U-værdimålinger i IBE's guarded hot box.

For de aktuelle målinger er der foretaget nogle overordnede betragtninger vedrørende usikkerheder på de tre elementer i ligningen. Varmestrømmen gennem solvæggen er bestemt som den elektriske effekt, der afsættes i målekassens varmelegeme fratrukket en evt. varmem strøm gennem målekassens sider. Varmestrømmen gennem solvæggen kan måles uden nævneværdig usikkerhed. I (Rose, J., 1998) er usikkerheden på varmemstrømmen  $\Phi$  fundet til max. 0,04 W, eller i størrelsesordenen max. 0,1% af den aktuelle energistrøm. Usikkerheden på A er opgivet til 0,015 m<sup>2</sup> svarende til 5 mm usikkerhed på højde- og breddemål, eller 0,7% af det aktuelle areal.

Usikkerheden på  $\Delta T_n$  er væsentlig mere kompleks og er også den dominerende usikkerhed. De operative temperaturer  $T_{n, \text{varm}}$  og  $T_{n, \text{kold}}$  beregnes på basis af varmemstrømmen gennem solvæggen, lufttemperaturer, temperaturer af overflader ”set” af solvæggen og overfladetemperaturer på solvæggen. De tre førstnævnte er de mest sikre og måles i øvrigt med samme nøjagtighed i alle målingerne.

Størst usikkerhed opstår ved måling af solvæggens overfladetemperatur på varm side. Den resulterende overfladetemperatur beregnes som en vægtet middelværdi af målinger fra ni temperaturfølere. For nulprøven (ren Polystyrenskum) er usikkerheden mindst, da væggen jo er homogen og alle følere stort set måler samme temperatur. Jo større kuldebroer der via spjældene etableres i solvæggen, jo mindre ensartet bliver overfladetemperaturen på solvæggens varme side og jo større bliver usikkerheden på den resulterende overfladetemperatur. (På solvæggens kolde side måles overfladetemperaturen på akrylpladen og overfladetemperaturen afhænger kun svagt af kuldebroernes tilstedeværelse).

Heldigvis har en forkert vægtning af overfladetemperaturen på varm side en relativ beskeden indflydelse med den udregnede U-værdi. Ved en fejl i overfladetemperaturen på varm side på 2 °C er fejlen på den udregnede  $\Delta T_n$  mindre end 0,5 K. En fejl i overfladetemperaturen på 2 °C vurderes at være et pessimistisk skøn, men for en vurdering af den samlede usikkerhed antages en usikkerhed på  $\Delta T_n$  på 0,5 K. Den absolutte usikkerhed er størst for målingerne med store kuldebroer (to brede spjæld) og er altså mindre end 0,5 K for de fleste målinger.

Med udgangspunkt i målingen på solvæggen monteret med to brede lukkede spjæld kan målenøjagtigheden estimeres:

$$\begin{aligned} \Phi &= 25,83 \text{ W} \pm 0,04 \text{ W} \\ A &= 2,13 \text{ m}^2 \pm 0,015 \text{ m}^2 \\ \Delta T_n &= 20,84 \text{ K} \pm 0,5 \text{ K} \end{aligned}$$

Hvis usikkerhederne antages at være uafhængige bliver den resulterende unøjagtighed på 2,5%, eller udtrykt i absolutte tal:

$$U_{\text{måling}} = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K} \pm 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Udover ovenstående måleusikkerheder er der en usikkerhed vedrørende grænsebetingelserne under målingerne. (Varmeovergangsmodstandene fra solvæggens overflader til hhv. varm og kold side). Overgangsmodstandene på kold side reguleres af målesystemet vha. et blæsesystem og lå i alle målinger i intervallet 0,047 – 0,06 m<sup>2</sup>K/W, svarende til en usikkerhed på max. 1,4% (for målingen med højeste U-værdi). På varm side reguleres overgangsmodstanden



ikke, idet der i måleboksen foregår fri konvektion drevet af varmelegemet og det kolde nedfald ved solvæggen. For nulprøven var den resulterende overgangsmodstand på varm side  $0,12 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

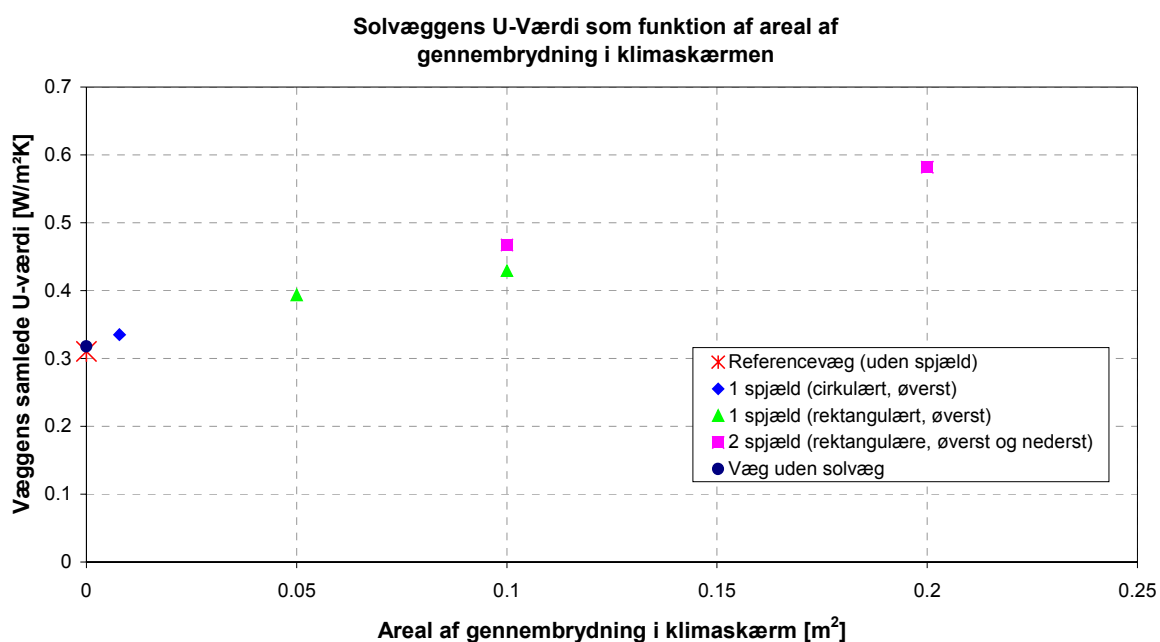
Effekten af kuldebroer i solvæggen på den frie konvektion i målekassen er dermed regnet som værende en del af den resulterende U-værdi for solvæggen. Usikkerheden hidrørende fra grænsebetingelserne er således mindre end unøjagtigheden hidrørende fra vægtningen af overfladetemperaturen på solvæggens varme side.

På basis af ovenstående estimeres den maksimale unøjagtighed på målingerne til 3%.

### 4.3 Sammenhæng mellem spjældudformning og U-værdier

Gennembrydning af solvæggens klimaskærm med et spjæld vil medføre en kuldebro, idet spjældet har en væsentlig dårligere isolans end solvæggen som helhed. Det gælder også, selvom spjældene slutter helt til, så der ikke kan forekomme konvektiv varmetransport gennem spjældet.

De spjæld, der blev anvendt til målingerne, bestod af en uisolereet stålplade. De udgør derfor en væsentlig kuldebro i forhold til resten af solvæggen. Den målte U-værdi for solvæggen gælder over et samlet areal på  $2,16 \text{ m}^2$ . Heraf udgør spjældene fra ca.  $0,4 - 10\%$  af arealet. I Figur 4.1 er vist resultater for måling af U-værdier for solvægge med helt tætte spjæld.



Figur 4.1 Sammenhæng mellem spjældarealer og U-værdi for solvæggen (tætte spjæld)

De målte resultater er ikke helt sammenlignelige, idet der er målt på vægge med hhv. 1 eller 2 spjæld, samt på hhv. cirkulære og rektangulære spjæld. Placering af spjæld hhv. øverst og nederst kan bevirke et naturligt drivtryk, der kan give konvektion langs overfladerne. På

grund af 2-dimensionale varmestrømme ved overgangen fra væg til kuldebro, vil kuldebroens udformning f.eks. cirkulær/rektangulær også have betydning.

Resultaterne tyder på en stort set lineær sammenhæng mellem arealet af gennembrydningen og solvæggens samlede U-værdi. Det tyder på, at konvektion og 2-dimensionale varmestrømme kun har mindre betydning i forhold til arealet af gennembrydningen. Der er dog en lille forskel på U-værdien for solvægge med hhv. ét stort spjæld, eller 2 små spjæld, der er placeret hhv. øverst og nederst i væggen, selvom det samlede spjæld-areal er det samme. Det kan både skyldes konvektion på hver side af spjældene eller forøgede 2-dimensionale varmestrømme langs spjældenes kanter.

Med en kuldebro på ca.  $0,2 \text{ m}^2$ , der svarer til ca. 10% af solvæggens areal, er den samlede U-værdi forøget til næsten det dobbelte (stigning på 87%). Kuldebroen har derfor væsentlig betydning for den samlede vægs termiske egenskaber.

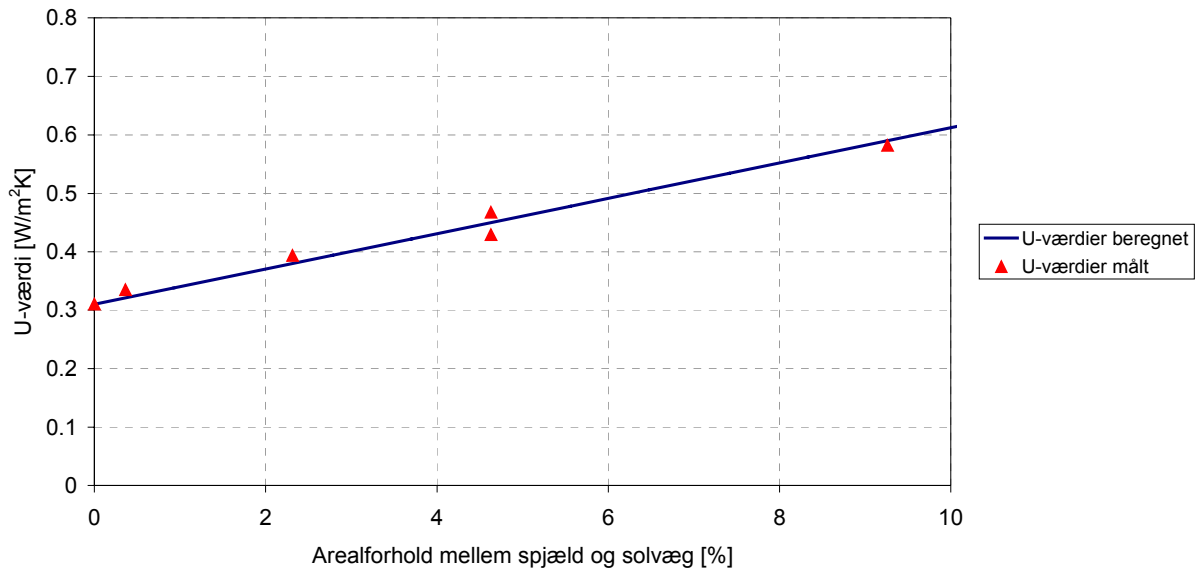
Spjældene består her af uisolerede stålplader med en tykkelse på 1 mm. Stålpladen har i sig selv ingen isolans af betydning. Til gengæld vil luften i hulrummene på hver side af stålpladen være forholdsvist stillestående, også på ydersiden, hvor solvæggens dæklag beskytter hulrummet mod vindpåvirkninger mm. På grund af temperaturdifferensen over hulrummet, vil der dog være strømninger internt i hulrummet. Isolansen for hulrummet skal derfor tage en vis intern konvektion med i betragtning. Ifølge (DS 418, 1986) kan isolansen for et ventileret hulrum med en stålplade sættes til  $0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$ . En tilnærmet værdi for U-værdien for spjældet alene kan dermed beregnes af:

Indre overgangsisolans:	$0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$
Stålplade + hulrum:	$0,10 \text{ m}^2\text{K/W}$
Dæklag (5 mm akrylplade):	$0,03 \text{ m}^2\text{K/W}$
Ydre overgangsisolans:	$0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$

Det giver en U-værdi for spjældet på ca.  $3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Hvis der ses bort fra både konvektion og 2-dimensionale varmestrømme, kan betydningen af en kuldebro for en vægs samlede U-værdi beregnes som et vægtet gennemsnit mellem den ubrudte vægs U-værdi og kuldebroens U-værdi. I Figur 4.2 er den beregnede sammenhæng mellem spjæld-areal og U-værdi optegnet sammen med de målte resultater.

#### U-værdi forøgelse pga. genembrydninger i klimaskærm



Figur 4.2 Forøgelse af solvæggens U-værdi som funktion af arealet af spjældene – målt og beregnet

Det ses, at den meget forsimplede model stemmer godt overens med de målte værdier. Hvis spjældene i solvæggen slutter helt tæt, og der derfor ikke kan sive luft og dermed varme ud gennem dem, kan den samlede U-værdi derfor med rimelig nøjagtighed beregnes som et vægtet gennemsnit af hhv. den ubrudte solvægs og genembrydningens U-værdi. Generelt vil denne simple beregningsmetode dog have tendens til at undervurdere varmetabet, fordi den ikke kan tage højde for randeffekter. Nøjagtigheden af beregningen vil derfor afhænge af den betragtede geometri.

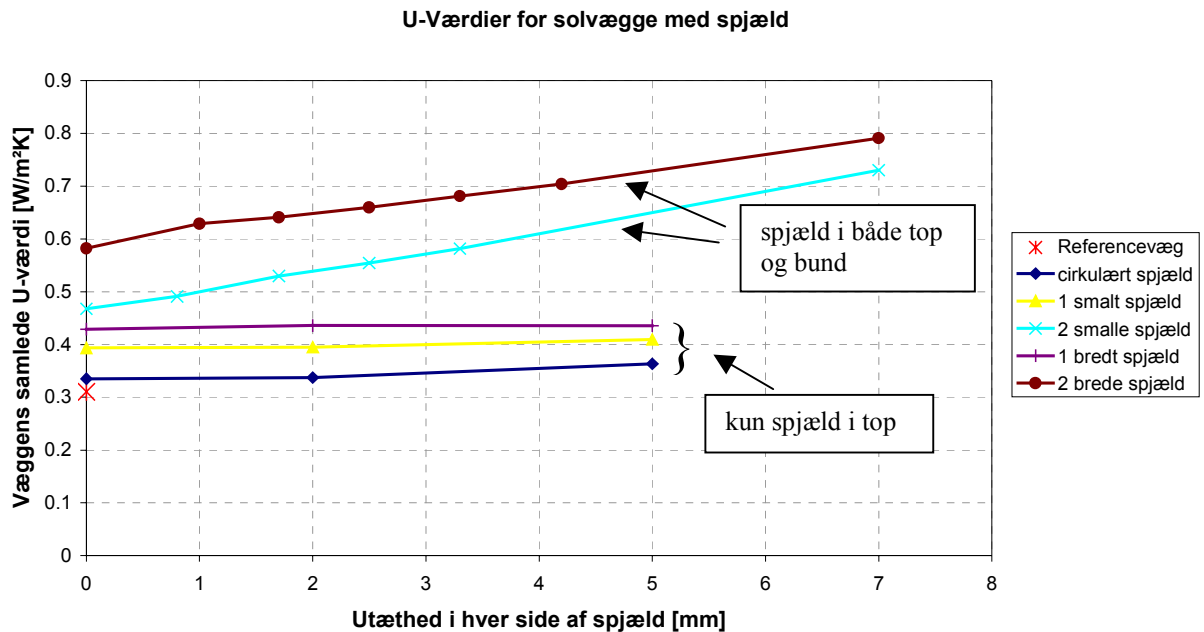
## 4.4 Utætheder i spjældene

Som beskrevet ovenfor, betyder konvektive varmemstrømme ikke så meget for solvæggens U-værdi, hvis spjældene er helt lufttætte i deres lukkede position. I virkeligheden vil spjældene ofte ikke slutte helt til, idet der typisk vil være lodrette sprækker langs spjældenes endeflader, for at disse lettere kan åbnes og lukkes. Et eksempel på en sådan sprække er vist i Figur 2.3.

Der er derfor foretaget målinger af U-værdier for solvægge med spjæld med varierende grader af utætheder. Utæthederne er udført som lodrette sprækker langs endefladerne, hvor spaltebredden måles. Der er foretaget målinger for i alt 5 forskellige spjældkonfigurationer:

- et lille cirkulært spjæld placeret øverst i væggen
- et smalt rektangulært spjæld placeret øverst i væggen
- et bredt rektangulært spjæld placeret øverst i væggen
- to smalle rektangulære spjæld placeret hhv. øverst og nederst i væggen
- to brede rektangulære spjæld placeret hhv. øverst og nederst i væggen

Resultaterne fra målingerne er vist i Figur 4.3 nedenfor sammen med den målte U-værdi for en tilsvarende solvæg uden spjæld (referencevæg).



Figur 4.3 Sammenhæng mellem gennembrydninger og solvæggens samlede U-værdi

Ved de målinger, hvor der kun er ét spjæld i væggen, betyder utætheder ikke ret meget for væggens samlede U-værdi. Det skyldes, at alle øvrige dele af test-solvæggen er helt tætte. Selvom spjældet tillader luft at strømme igennem, kan der ikke opstå luftbevægelser af betydning, hvis alle andre dele af solvæggen er helt tætte. Der kan ikke ske trykudligning andre steder i solvæggen, hvilket bremser luftbevægelser gennem spjældet.

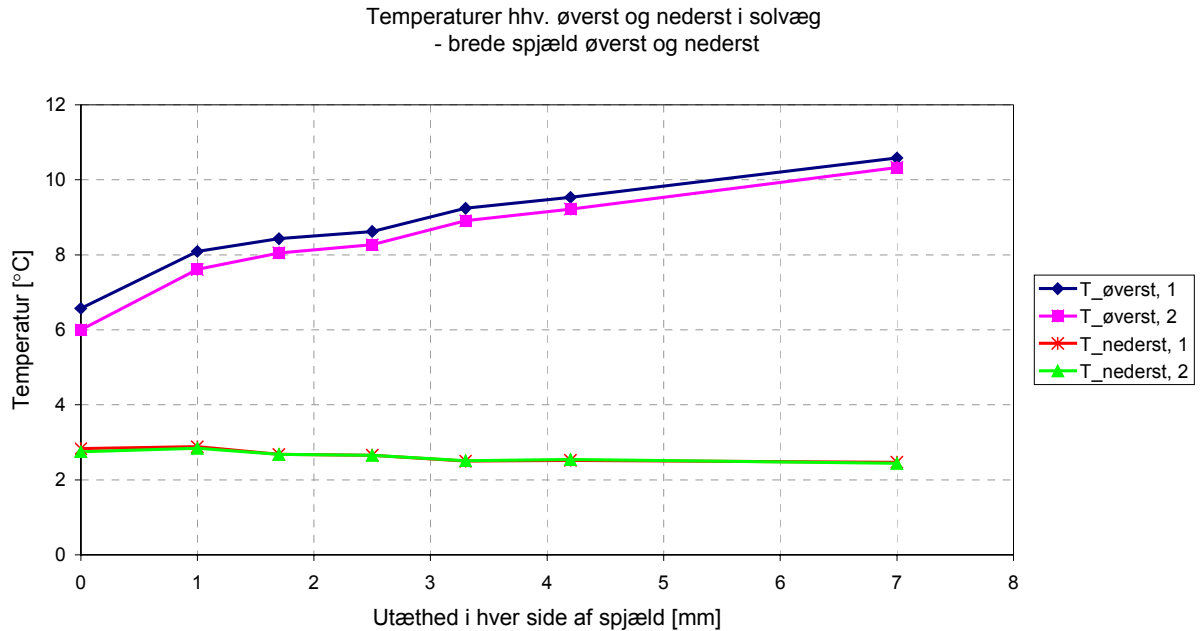
Solvægge med kun ét spjæld anvendes ofte i forbindelse med forvarmning af kold udeluft til ventilation. Sådanne solvægge er typisk åbne ud mod udeklimaet, også i perioder uden sol. Derved er der mulighed for trykudligning med udeluft, og der kan opstå luftstrømme gennem spjældet, hvilket kan medføre et væsentlig varmetab. Desuden er sådanne solvægge følsomme overfor vindpåvirkninger, der kan skabe store trykforskelle. For solvægge, der er åbne mod udeklimaet, vil væggens samlede U-værdi derfor være afhængig af utætheder i spjældet..

U-værdien for solvægge med to spjæld er tydeligt afhængig af graden af utætheder i spjældene. To spjæld giver mulighed for en væsentlig luftstrøm gennem spjældene, som vist skematisk på Figur 2.2. Også selv om spjældene er helt lukket til, vil et spjæld hhv. øverst og nederst give anledning til en forøgelse af solvæggens samlede U-værdi.

## 4.5 Temperaturforhold omkring spjæld

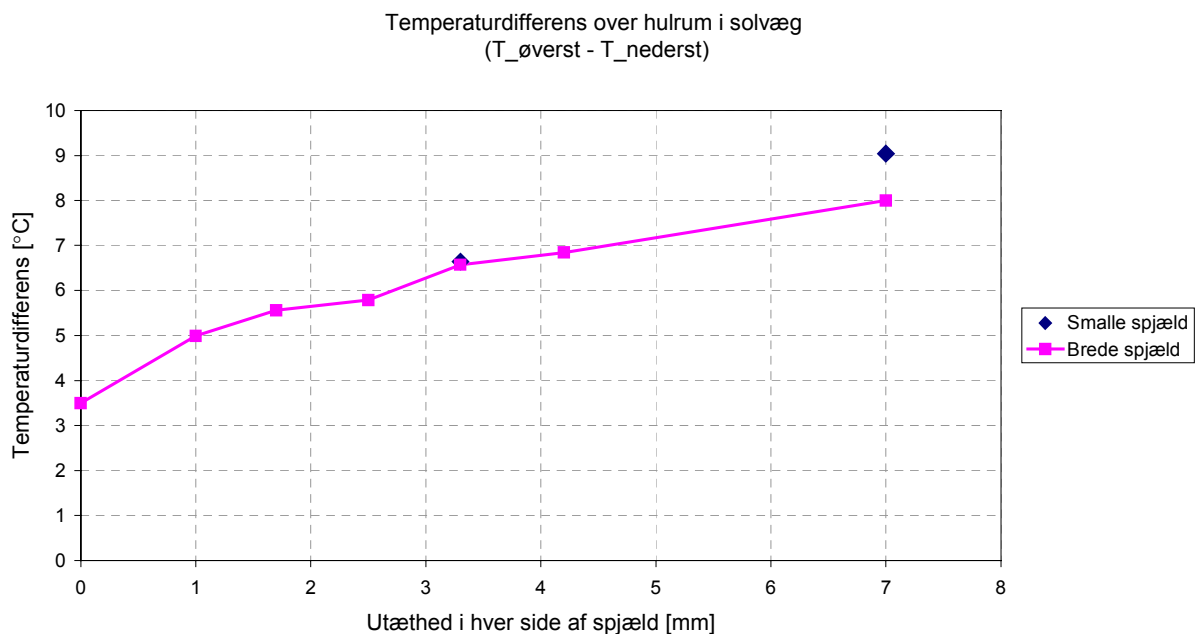
Temperaturforskelle mellem luften i solvæggen og luften i indeklimaet giver en trykforskel, der kan drive luftbevægelsen gennem spjældene. Målinger på solvægge med spjæld både øverst og nederst i væggen har vist, at der opstår en væsentlig temperaturforskel for luften i solvæggen. Det termiske drivtryk vil bevirke en nedadgående luftstrøm i solvæggen, hvor den varme luft fra indeklimaet vil blive afkølet.

I Figur 4.4 er vist temperaturer øverst og nederst i solvæggens hulrum, målt på den kolde side af spjældene. Temperaturen i den øverste del af hulrummet i solvæggen stiger signifikant, når åbningerne i spjældene øges. Det skyldes, at den varme indeluft strømmer ind gennem det øverste spjæld. Til gengæld ændrer temperaturen i den nederste del af hulrummet sig næsten ikke – dog med en svagt faldende tendens.



Figur 4.4 Målte temperaturer i hulrum øverst og nederst i solvæg med utætte spjæld

Af Figur 4.5 kan ses, at der er en væsentlig lodret temperaturdifferens i solvæggens hulrum, selv i det tilfælde, hvor spjældene i solvæggen er helt tætte. Dette tyder på, at der foregår en ikke uvæsentlig konvektion internt i hulrummet.



Figur 4.5 Lodret temperaturdifferens over hulrum i solvæg med utætte spjæld

## 4.6 Flow gennem åbninger

Det samlede varmetab består af en kombination af varmeledning, stråling og konvektion. Det kan i første omgang antages, at det kun er det konvektive bidrag, der ændres ved øgede utætheder. Dette er ikke helt korrekt, idet konvektionen bl.a. vil medføre, at temperaturerne i hulrummet ændrer sig, hvorved de lednings- og strålingsmæssige bidrag også vil ændre sig. Det vurderes dog, at det hovedsageligt er det konvektive varmetab, der øges, hvorfor denne antagelse kan anvendes til at give et godt bud på massestrømmen igennem hulrummet.

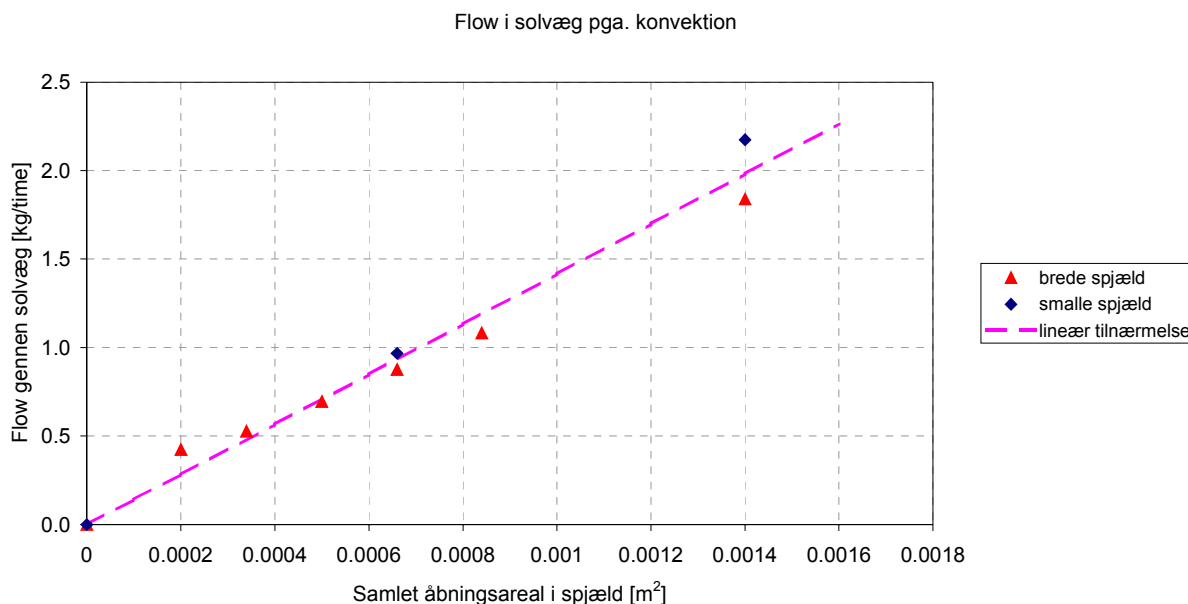
Måleresultaterne viser, at der er en rimelig lineær sammenhæng mellem åbningsarealet og forøgelsen af det samlede varmetab. Da den energimængde, som luft kan transportere, er proportional med masseflowet, tyder dette på, at der også vil være en lineær sammenhæng mellem åbningsarealet og masseflowet gennem åbningerne.

Forøgelsen af varmetabet skyldes, at luft ved 20°C strømmer ind i hulrummet, mens luft ved temperaturen  $T_{\text{nederst}}$  strømmer tilbage til indeklimaet, eller i dette tilfælde hot box'en. Denne luft skal så varmes op igen til 20°C. Derved kan masseflowet gennem solvæggens åbninger beregnes ud fra:

$$Q_{\text{konvektion}} = (U_{\text{utæt}} - U_{\text{tæt}}) \cdot A \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{ude}})$$

$$\dot{m} = \frac{Q_{\text{konvektion}}}{c_p \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{hulrum, nederst}})}$$

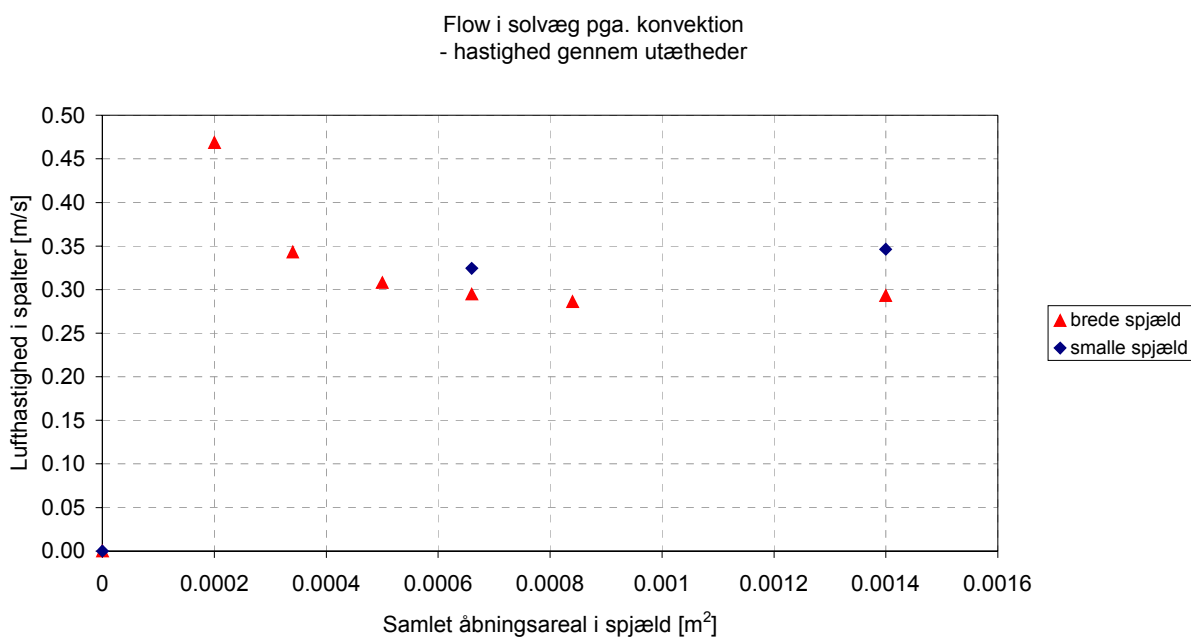
Luften strømmer gennem åbningerne i begge sider af spjældet, hvorfor det er lettest at sammenholde flowet med det samlede åbningsareal i spjældet. Som det ses af Figur 4.6 er sammenhængen mellem åbningsareal og flow tilnærmelsesvis lineær. Dog ser det ud til at der er et lidt større flow gennem de smalle spjæld end gennem de brede, selv om utæthederne er de samme.



Figur 4.6 Flow i solvæggens hulrum som funktion af graden af utæthed i spjæld

Lufthastigheden vil variere i systemet, og den højeste hastighed vil opstå gennem de små spalter, der udgør utæthederne i spjældet, fordi luften her skal igennem det mindste tværnsnitsareal. Som det ses af Figur 4.7 falder hastigheden i spalterne i de brede spjæld meget i starten, mens den efterhånden flader ud ved større utætheder.

For de smalle spjæld er det sværere at analysere resultaterne pga. de få målepunkter, men det tyder på, at flowet er lidt højere gennem utæthederne i de små spjæld, selv om åbningsarealerne er de samme. Det kan skyldes, at det totale varmetab er lavere i tilfældet med de små spjæld, hvorved temperaturen i hulrummet er lavere, og det termiske drivtryk derfor højere. Dette kan drive mere luft igennem de samme utætheder.



Figur 4.7 lufthastighed i solvæg beregnet i spalterne

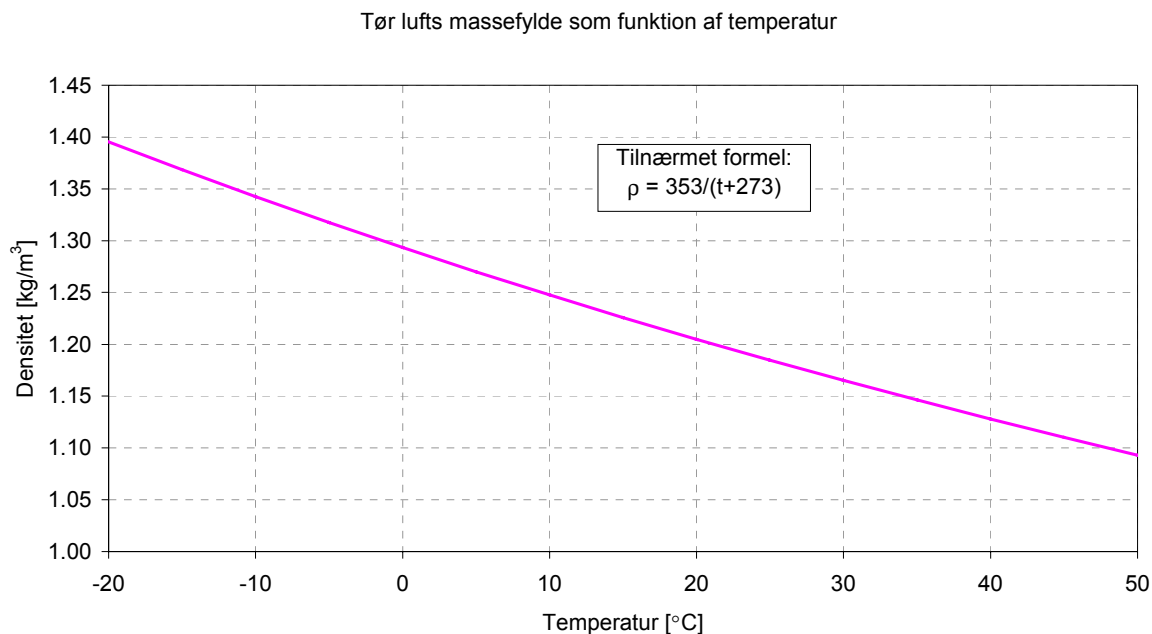
Det maksimale Reynold's tal for strømmingen kan beregnes ud fra flowhastigheden og spaltebredden. Dette ligger på max. 135-160, hvilket betyder, at strømmingen er udpræget laminar.

## 4.7 Termisk drivtryk

Det konvektive varmetab skyldes luftstrømme i systemet. Disse luftstrømme opstår pga. trykforskelle, der driver strømmingen. Trykforskelle mellem indeklima og luften i et hulrum i en solvæg kan være forårsaget af rent termiske forhold, men også vindforhold, der påvirker dæklaget på ydersiden, eller eventuelle ventilationssystemer i bygningen, vil ofte bidrage til at skabe trykforskelle, der kan drive en luftstrøm gennem solvæggen.

Ved målingerne er der kun tale om rent termiske drivkræfter, og derfor er det muligt at beregne det drivtryk, der forårsager luftstrømmingen gennem utæthederne i spjældene. Et termisk drivtryk dannes, fordi der er forskellige temperaturer på hver side af solvæggen. Varm og kold luft har forskellige vægtylde, og derfor har en luftsøjle i indeklimaet ikke samme

tryk, som en tilsvarende luftsøjle i solvæggens hulrum. Figur 4.8 viser ændringen i luftens massefylde som funktion af temperaturen.



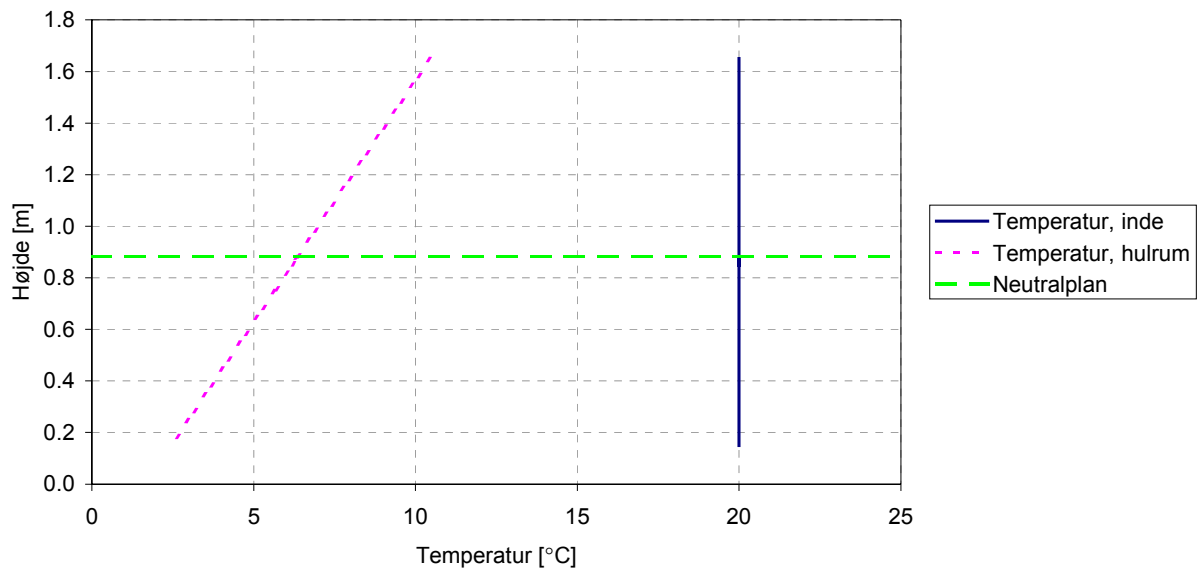
Figur 4.8 Tør lufts massefylde som funktion af temperatur

Ved målingerne i den guardede hot box var der en beskeden temperaturlagdeling på den varme side. Ved disse beregninger er det dog valgt at se bort fra denne lagdeling. Temperaturen på den varme side af solvæggen regnes konstant lig 20°C. I hulrummet mellem væggen og akrylpladen antages en lineær lodret temperaturlagdeling, idet målingerne har vist en væsentlig højere temperatur i den øverste del af hulrummet end i den nederste del.

Solvæggen har en samlet højde på 1,8 m, mens der er 1,5 m fra midten af nederste spjæld til midten af øverste spjæld, hvor temperaturerne er målt. Temperaturfordelingen i indeklime og hulrum er vist i Figur 4.9 for målingen på en solvæg med brede spjæld med 7 mm utætheder.



Temperaturforhold i solvæggens hulrum og i indeklima



Figur 4.9 Luftens temperatur i varierende højder i indeklima og i hulrum i solvæg med brede spjæld og utætheder på 7 mm i hver side

Mellem de to luftøjler er der åbninger i form af utætheder i spjældene. Utæthederne er placeret i hver side af spjældene i samme højde, og har samme form og størrelse. Der kan deraf beregnes et neutralplan – en højde mellem de to åbninger, hvor trykket er ens i de to luftøjler. Dette neutralplan er ifølge (Andersen, 1998) givet ved:

$$H_{neutral} = \frac{H}{1 + \left(\frac{T_i}{T_u}\right) \cdot \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2}$$

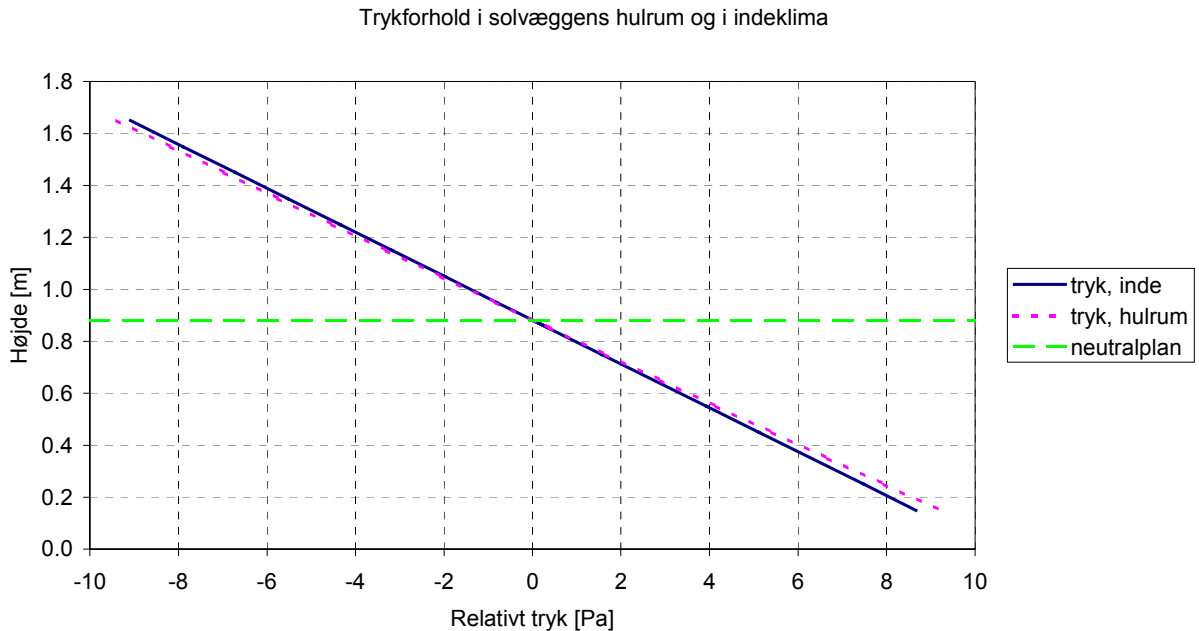
Hvor H er den fulde højde mellem de to åbningsniveau,  $A_1$  og  $A_2$  er åbningsarealerne og  $C_1$  og  $C_2$  er åbningskoefficienter, der karakteriserer tryktabet over åbningerne. I dette tilfælde er åbningerne ens, hvorfor neutralplanet kan findes alene som funktion af den fulde højde og de absolutte temperaturer inde og i hulrummet. Da temperaturen ikke er konstant i hulrummet anvendes en middeltemperatur som en god tilnærmelse ifølge (Andersen, 1998). Neutralplanet er ligeledes indtegnet i Figur 4.9. Det ses, at man med god tilnærmelse kan betragte midtpunktet mellem de to åbningsniveauer som neutralplanet.

Ud fra temperaturer og højder i forhold til neutralplanet kan trykdifferenserne over hhv. de øvre og nedre åbninger beregnes. Kaldes trykdifferensen over det øverste spjæld for  $\Delta P_1$  og differensen over det nederste for  $\Delta P_2$  fås ifølge (Andersen, 1998):

$$\Delta P_1 = \rho_{hulrum, \theta} \cdot g \cdot H_1 - \rho_{inde} \cdot g \cdot H_1$$

$$\Delta P_2 = \rho_{inde} \cdot g \cdot H_2 - \rho_{hulrum, n} \cdot g \cdot H_2$$

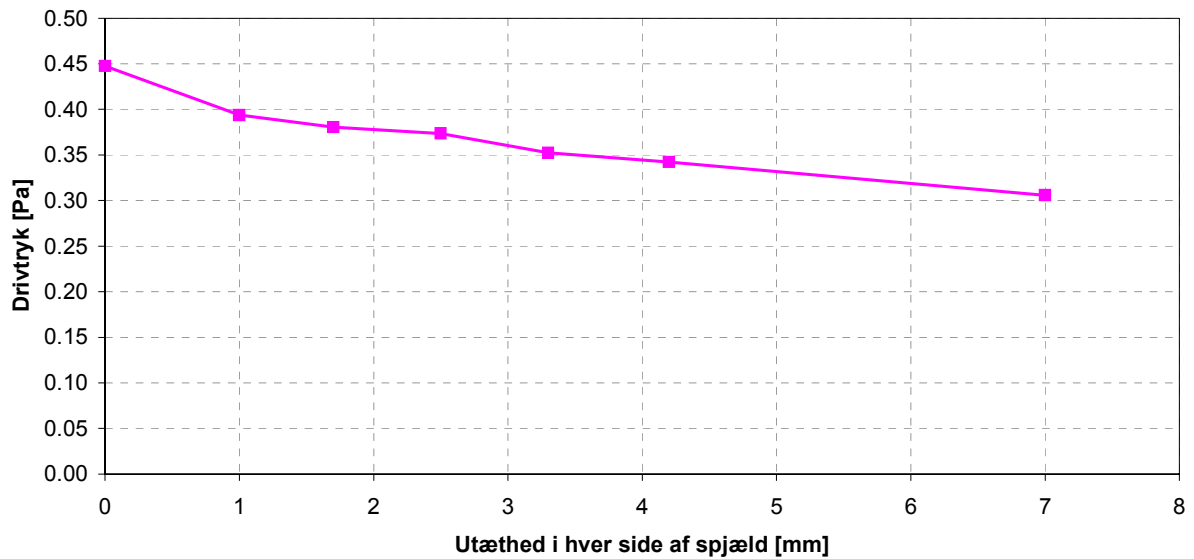
Trykket er størst indvendigt i den øverste del, og mindst i den nederste del. Luft vil derfor strømme ud til hulrummet gennem det øverste spjæld og ind fra hulrummet fra det nederste spjæld. Et eksempel på trykforholdene er vist i Figur 4.10 for en solvæg med brede spjæld og 7 mm utætheder i hver side. Trykket ændrer sig ca. 20 Pa op gennem luftsøjlen, men trykdifferensen mellem de to luftsøjler og dermed drivtrykket er meget mindre. Der er maksimalt kun ca. 0,5 Pa forskel på trykket inde og i hulrummet.



Figur 4.10 Trykforhold omkring solvæg med brede spjæld og 7 mm utætheder i hver side

På denne måde kan det termiske drivtryk beregnes for hver af de målinger, hvor der er åbninger i både top og bund, og hvor der er tilhørende temperaturmålinger. For målingerne på de brede spjæld er det termiske drivtryk som vist i Figur 4.11. Ved stigende grad af utæthed falder drivtrykket, fordi luften i hulrummet bliver varmet op. For målingen på de helt tætte spjæld, kan der pga. temperaturdifferensen også beregnes et drivtryk, men dette har ingen reel betydning, da der ikke er nogle åbninger i væggen, som luften kan drives igennem.

### Termisk drivtryk over brede spjæld



Figur 4.11 Drivtrykket over det øverste spjæld som funktion af graden af utæthed ( $\Delta P_{\text{drivtryk}}$ )

## 4.8 Tryktab i systemet

Det termiske drivtryk skal dels overvinde de flowmodstande, der findes i systemet og dels skabe det dynamiske tryk, der bestemmer flowet gennem solvæggen. Systemets flowmodstande består af tryktab over spjældkanaler, ventilationsriste, tryktab over spalterne i spjældene samt tryktab gennem selve hulrummet. Der kan opstilles en samlet energibalance /trykbalance for systemet:

$$\Delta P_{\text{drivtryk}} = \Delta P_{\text{dynamisk}} + \Delta P_{\text{spjældkanal}} + \Delta P_{\text{hulrum}} + \Delta P_{\text{spalter}}$$

Under forudsætning af, at flowet i solvæggen er laminart, hvilket er vist i kapitel 4.6, kan der gives et overslag over størrelsen af de enkelte tryktabs bidrag.

Det dynamiske tryk er varierende i systemet, fordi luften skal passere områder med forskellige tværsnitsarealer og dermed får varierende hastighed forskellige steder i systemet. Drivtrykket repræsenterer trykforskellen mellem indeluft og luften i hulrummet, hvorfor den dynamiske trykforskel ligeledes skal beregnes ud fra forskellen i luftens hastighed i disse to punkter. Da lufthastigheden er tilnærmelsesvis nul i indeklimaet, kan det dynamiske trykfald beregnes ud fra (Fox & McDonald, 1985):

$$\Delta P_{\text{dynamisk}} = \frac{\rho \cdot u_{\text{hulrum}}^2}{2}$$

Tryktabet i selve hulrummet ( $\Delta P_{\text{hulrum}}$ ) kan beregnes ved tilnærmelse til et laminart flow mellem to uendeligt store parallelle planer (Poiseuille flow drevet af trykgradient). Her gælder ifølge (Fox & McDonald, 1985):

$$u_{\text{hulrum}} = \frac{1}{12\mu} \cdot \left( \frac{\partial p}{\partial x} \right) \cdot d^2$$

hvor  $d$  er hulrumstykkelser og  $\mu$  er den dynamiske viskositet. Middelhastigheden i hulrummet  $u_{\text{hulrum}}$  kan beregnes ud fra det tidligere beregnede masseflow, samt geometrien for hulrummet.

Spjældkanalerne består af en meget aflang rektangulær kanal ( $h \times b$ : 100 x 1000 mm) og længden 100 mm, med en ventilationsrist på den indvendige side. For ventilationsriste findes tryktabsdiagrammer, der angiver sammenhængen mellem volumenflow og tryktab over risten. For riste af den type, der er anvendt her, er der dog ikke angivet værdier for så lave flow, som der her er tale om. Der angives et tryktab på 2 Pa ved et flow på 80 l/s, hvilket er mange størrelsesordener større. Det vurderes derfor, at der kan ses bort fra dette tryktab.

Tværsnitsarealet for kanalen er i tilfældet med de brede spjæld større end tværsnitsarealet i hulrummet, og det har stort set samme form, idet  $b \gg h$ . Det antages derfor, at tryktabet kan beregnes ud fra samme formel, som trykfaldet over hulrummet. Trykfaldet over ind- og udløb fra spjældkanalen kan ifølge (Fox & McDonald, 1985) udtrykkes ved:

$$\Delta P_{\text{spjældkanal}} = K_{\text{spjæld}} \cdot \frac{\rho \cdot u_{\text{spjæld}}^2}{2}$$

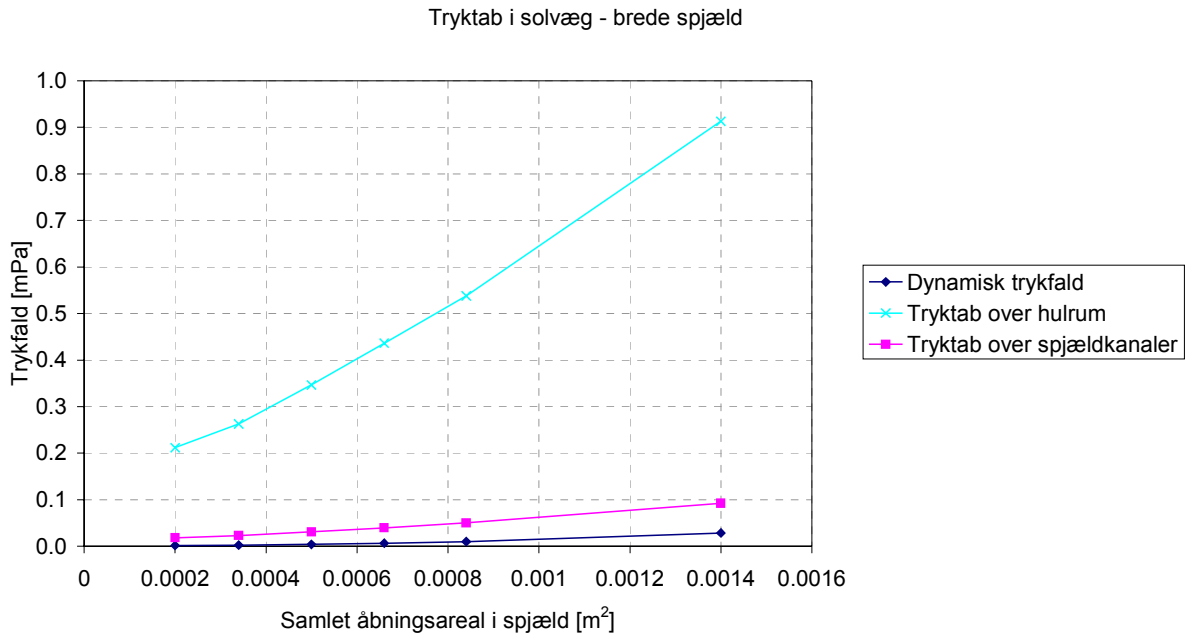
hvor  $K$  er en tryktabskoefficient gældende for den enkelte modstand, og  $u_{\text{spjæld}}$  angiver lufthastigheden gennem spjældkanalen. Tryktabskoefficienten  $K$  for arealændringer varierer i forhold til arealforholdet. Koefficienter, der svarer til arealforholdene i den betragtede solvæg, er listet i Tabel 4.3.

Enkeltmodstand	K	Bemærkninger
indløb fra indeklime til øverste spjældkanal	0,5	$A_{\text{inde}} \gg A_{\text{kanal}}$
udløb fra øverste spjældkanal til hulrum	0,2	$A_{\text{hulrum}} / A_{\text{kanal}} \approx 0,6$
indløb til nederste spjældkanal fra hulrum	0,2	$A_{\text{kanal}} / A_{\text{hulrum}} \approx 0,6$
udløb fra nederste spjældkanal til indeklime	1,0	$A_{\text{inde}} \gg A_{\text{kanal}}$

Tabel 4.3 Tryktabskoefficienter for arealændringer (Fox & McDonald, 1985)

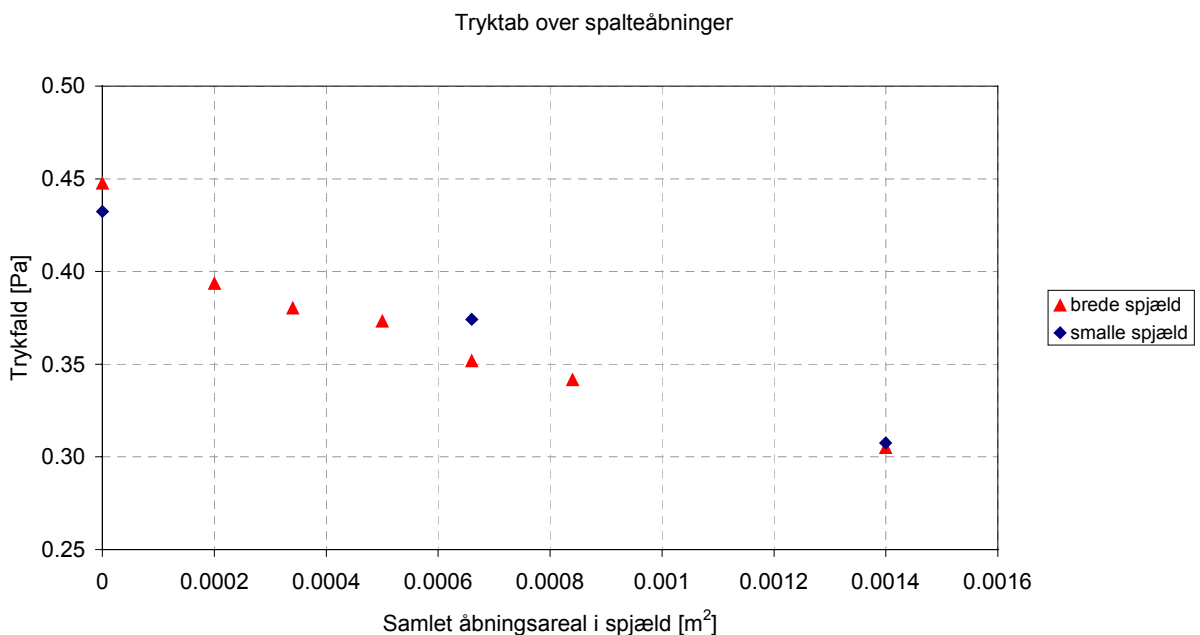
Luften skal passere gennem begge spjældkanaler og gennemløber derfor i alt 4 arealændringer forårsaget af spjældkanalerne. Trykfaldet over spjældene beregnes på baggrund af middelhastigheden i spjældene. Beregningen er behæftet med stor usikkerhed, idet den er baseret på, at luften bevæger sig jævnt gennem spjældkanalen. I virkeligheden vil flowet være meget ulige fordelt, idet utæthederne er placeret i hver side, hvorfor flowet i spjældkanalerne også vil være koncentreret i kanalernes sider. Samlet giver beregningen dog, at trykfaldet i kanalerne er helt ubetydeligt.

Figur 4.12 viser tryktabene over hulrum og spjæld, samt det dynamiske tryktab i systemet (i milliPa). Af disse trykfald er det tryktabet over hulrummet, der udgør det væsentligste tab, men sammenlignes med det samlede drivtryk ses, at ingen af disse trykfald har betydning. Årsagen til, at tryktabet stiger ved stigende spalteåbninger er, at flowet er stigende.



Figur 4.12 Trykfald i solvæg opgivet i milli-Pa.

Tilbage er kun trykfaldet over spalteåbningerne ( $\Delta P_{\text{spalter}}$ ), der kan beregnes ud fra den samlede energibalace, som det samlede drivtryk fratrukket alle de øvrige tryktab. Trykfaldet over disse bliver tilnærmelsesvist lig med det totale drivtryk, hvilket betyder, at spalteåbningerne er de eneste betydende modstande i systemet. Tryktabet over spalteåbningerne er optegnet i Figur 4.13. Det skal bemærkes, at det beregnede tryktab over spjældåbningerne gælder samlet for to parallelle åbninger i hvert spjæld, ligesom åbningsarealet er det samlede areal i hvert spjæld, dvs. det tværsnitsareal, som luften kan strømme igennem.



Figur 4.13 Samlet tryktab over spalteåbningerne

Figur 4.13 angiver en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem åbningsarealet og trykfaldet, og der er omtrent samme hældning for åbningerne i hhv. de brede og smalle spjæld.

Tryktabet over en flowmodstand som f.eks. en spalteåbning er afhængig af det flow, der skal strømme igennem den. En generel sammenhæng mellem en given åbning og tryktabet over åbningen kan udtrykkes ved hjælp af en tryktabskoefficient  $K$ , idet det antages, at tryktabet er proportionalt med det dynamiske trykfald, dvs. med kvadratet på flowhastigheden i åbningen (Fox & McDonald, 1985):

$$\Delta P_{spalte} = K_{spalte} \cdot \frac{\rho \cdot u_{spalte}^2}{2}$$

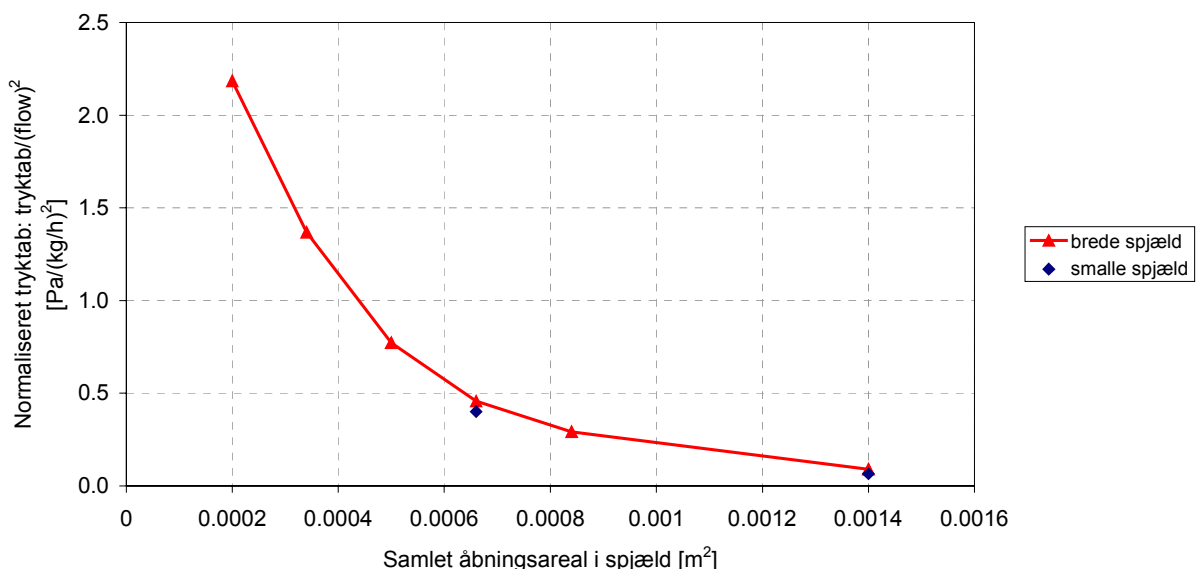
Middelhastigheden i spalten er omvendt proportional med tværsnitsarealet, hvilket betyder, at tryktabet bliver omvendt proportional med kvadratet på arealet. For at finde sammenhængen skal tryktabet normaliseres i forhold til flowet i åbningen, da der ved målingerne både varieres areal og flowmængde, hvorved der ikke direkte kan opnås en entydig sammenhæng

$$\Delta P_{spalte} = \frac{K_{spalte}}{2\rho} \cdot \dot{m}^2 \cdot \frac{1}{A^2}$$

$$\text{Normaliseret tryktab} = \frac{\Delta P_{spalte}}{\dot{m}^2} = \frac{K_{spalte}}{2\rho} \cdot \frac{1}{A^2}$$

Sammenhængen mellem spalternes åbningsareal og det normaliserede tryktab er vist på Figur 4.14, hvor det ses, at der er en omvendt proportional sammenhæng. Det ses ligeledes, at tryktabene for de brede og smalle spjæld stemmer godt overens, hvilket var forventet, idet geometrien af spalteåbningerne er ens i de to tilfælde.

Sammenhæng mellem åbningsareal og tryktab for spalteåbninger i spjæld



Figur 4.14 Sammenhæng mellem spalternes tværsnitsareal og det normaliserede tryktab over spalterne

## 5. Model for beregning af varmetab i solvægge

### 5.1 Beregning af U-værdi for solvægge

Ud fra de opnåede erfaringer fra målingerne og de teoretiske overvejelser i kapitel 4 kan der opstilles en beregningsmodel til estimering af U-værdien for en solvæg. Beregningsmodellen bygger på en række forenklinger og antagelser og bør derfor kun anvendes som et overslag. Til gengæld kan der hurtigt gives en tilnærmelse til solvæggens samlede U-værdi for et givet temperaturniveau.

Til beregning af solvæggens U-værdi forudsættes, at følgende fysiske størrelser er kendte for systemet:

- solvæggens samlede areal
- spjældenes areal
- isolanser for hver del af solvæggen, dvs. bagvæg, spjæld, hulrum og dæklag
- den lodrette afstand mellem øverste og nederste spjæld
- arealet af eventuelle spalteåbninger i spjældene
- temperaturer på hver side af solvæggen (inde og ude)

Modellen bygger på den forudsætning, at varmetabet ved hhv. ledning og konvektion kan beregnes uafhængigt af hinanden. Desuden er modellen begrænset til at gælde for solvægge med spjæld og evt. utætheder af sammenlignelig geometri og størrelse som de spjæld, der er blevet målt på. Især er de beregnede tryktabskoefficienter meget geometri-afhængige, og altså ikke repræsentative for åbninger i andre udformninger eller størrelser. Også nøjagtigheden af det varmeledningsmæssige varmetab er geometri-afhængig. I det følgende ses bort fra fler-dimensionale varmestrømme.

Solvæggens U-værdi beregnes i flere trin. Først beregnes en U-værdi under den forudsætning, at der ikke er åbninger nogle steder i solvæggen, der kan bevirke konvektion. Ud fra arealforholdet mellem spjæld og resten af solvæggen, samt isolanser for de forskellige dele af solvæggen, kan U-værdien beregnes som et vægtet gennemsnit mellem U-værdien for solvæggen uden spjæld, og U-værdien for spjældene (begge inklusiv hulrummet og dæklagets isolans). Det er vist i kapitel 4.3, at dette giver en rimelig god tilnærmelse til solvæggens U-værdi, når der ikke forekommer konvektion pga. utætheder i spjæld i solvæggen. Da der ikke tages hensyn til fler-dimensionale varmestrømme vil denne model dog generelt give lidt for lave U-værdier.

Hvis der ikke er utætheder i solvæggens spjæld, kan denne beregning anvendes som et rimeligt estimat for U-værdien for solvæggen. Hvis det derimod vurderes, at der er risiko for utætheder, er det nødvendigt at beregne et tillæg til U-værdien forårsaget af et konvektivt varmetab. Det skal understreges, at dette konvektive tillæg kun gælder ved et bestemt temperaturniveau. Tillægget kan kun beregnes iterativt, på basis af de ovenfor nævnte kendte størrelser. Den samlede beregning kan inddeles i 7 trin.

## 1. Beregning af den teoretiske U-værdi ud fra arealforhold og isolanser

Først beregnes et første bud på væggenes U-værdi på baggrund af varmeledning alene. Denne beregnes ud fra U-værdierne for solvæggen uden spjæld og for spjældområdet. Ved beregning af begge U-værdier skal hulrummet og dæklagets isolans medregnes, såvel som indre og ydre overgangsisolanser:

$$U_{\text{ledning}} = \frac{1}{A_{\text{total}}} \cdot (A_{\text{uforstyrret væg}} \cdot U_{\text{uforstyrret væg}} + A_{\text{spjæld}} \cdot U_{\text{spjæld}})$$

Denne tilnærmelse medregner ikke flerdimensionale varmestrømme i randområder, og nøjagtigheden af tilnærmelsen vil derfor afhænge af den betragtede geometri. Generelt vil modellen give en lidt for lav U-værdi. Modellen kan forbedres ved at tilføje et bidrag fra et lineært varmetab, der repræsenterer randeffekterne langs kanten af spjældene.

## 2. Beregning af middeltemperatur i hulrum

På baggrund af den beregnede U-værdi og de omgivende temperaturforhold kan varmetabet gennem væggen beregnes. Derved kan der også beregnes en teoretisk temperatur i solvæggens hulrum, under forudsætning af 1-dimensionale varmestrømme i dæklaget, samt at der kun transporteres varme gennem dæklaget ved varmeledning.

$$Q = A_{\text{total}} \cdot U_{\text{ledning}} \cdot (T_{\text{inde}} - T_{\text{ude}})$$

$$T_{\text{hulrum}} = \frac{Q \cdot (0,5 \cdot R_{\text{hulrum}} + R_{\text{dæklag}} + R_{\text{ude}})}{A} + T_{\text{ude}}$$

## 3. Beregning af det termiske drivtryk

Det termiske drivtryk kan beregnes ud fra forskellen på luftens densitet hhv. inde og i hulrummet efter sammenhængen:

$$\Delta P_1 = (\rho_{\text{hulrum}} - \rho_{\text{inde}}) \cdot g \cdot H_1$$

hvor  $\rho_{\text{hulrum}}$  beregnes ud fra middeltemperaturen i hulrummet (se Figur 4.8), og  $H_1$  er højden fra neutralplan til øverste åbning. Hvis åbningerne er ens øverst og nederst, vil neutralplanet ligge stort set midt mellem åbningerne. Denne model tager ikke højde for en temperaturlagdeling i hulrummet, der vil bevirke, at temperaturen i den øverste del af lageret vil være højere end middeltemperaturen. Det betyder, at det beregnede drivtryk vil blive lidt for højt.

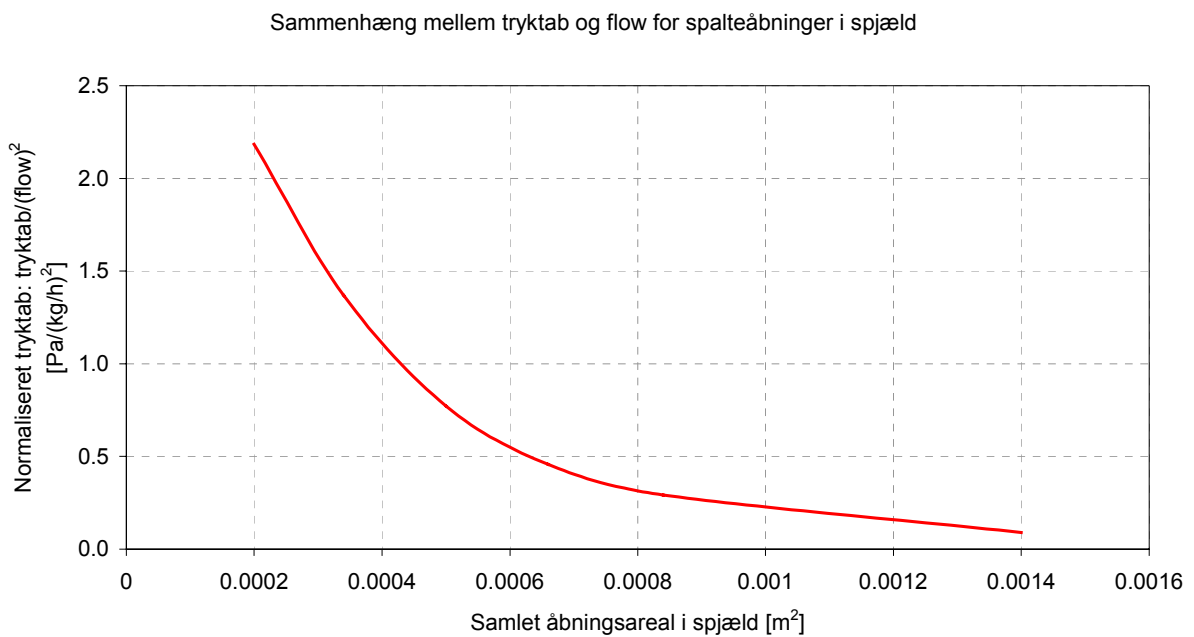
## 4. Sammenhæng mellem tryktab og masseflow

Det beregnede drivtryk skal overvinde systemets tryktab, der afhænger af flowet igennem systemet. Denne model er opbygget under den forudsætning, at det kun er spalteåbningerne,



der giver væsentlige tryktab. Hvis det vurderes, at andre komponenter i systemet kan medføre væsentlige tryktab, må disse beregnes særskilt, f.eks. ved hjælp af tryktabdiagrammer eller lignende. Hvis der er flere led i systemet med betydende tryktab vil det være nødvendigt at iterere sig frem til flowet i systemet.

For spalter af samme størrelsesorden som de betragtede ved målingerne, dvs. en spaltehøjde på 10 mm og spaltebredder mellem 1-7 mm er der i kapitel 4.8 fundet en sammenhæng mellem åbningsareal, tryktab og flow. For en given spalteåbning kan der af Figur 5.1 aflæses et normaliseret tryktab. Det anvendte tværsnitsareal skal være for den samlede utæthed i hvert spjæld, dvs. for begge sider af spjældet, hvis der er åbninger i begge sider.



Figur 5.1 Normaliseret tryktab ( $\Delta P/m^2$ ) for spalteåbninger (som Figur 4.14)

## 5. Beregning af masseflow

Hvis spalteåbningerne udgør de eneste betydende tryktab i systemet, kan tryktabet over disse sættes lig med det samlede termiske drivtryk. Herved kan masseflowet beregnes af:

$$\dot{m} = \sqrt{\frac{\Delta P_{termisk}}{(\Delta P / \dot{m}^2)_{aflæst}}}$$

## 6. Beregning af konvektiv varmetab

Luftbevægelserne i solvæggen medfører et forøget varmetab, idet varm luft strømmer ind i hulrummet, og kold luft fra hulrummet strømmer tilbage til indeklimaet, hvor den skal opvarmes igen. Dvs.:

$$Q_{konvektion} = \dot{m} \cdot c_{p,luft} \cdot (T_{inde} - T_{hulrum})$$

Her tages der igen ikke hensyn til temperaturlagdeling pga. afkøling af luften gennem hulrummet, hvorved temperaturen i den nederste del vil være lavere end middeltemperaturen.

## 7. Bestemmelse af en ny U-værdi, der dækker både ledning og konvektion

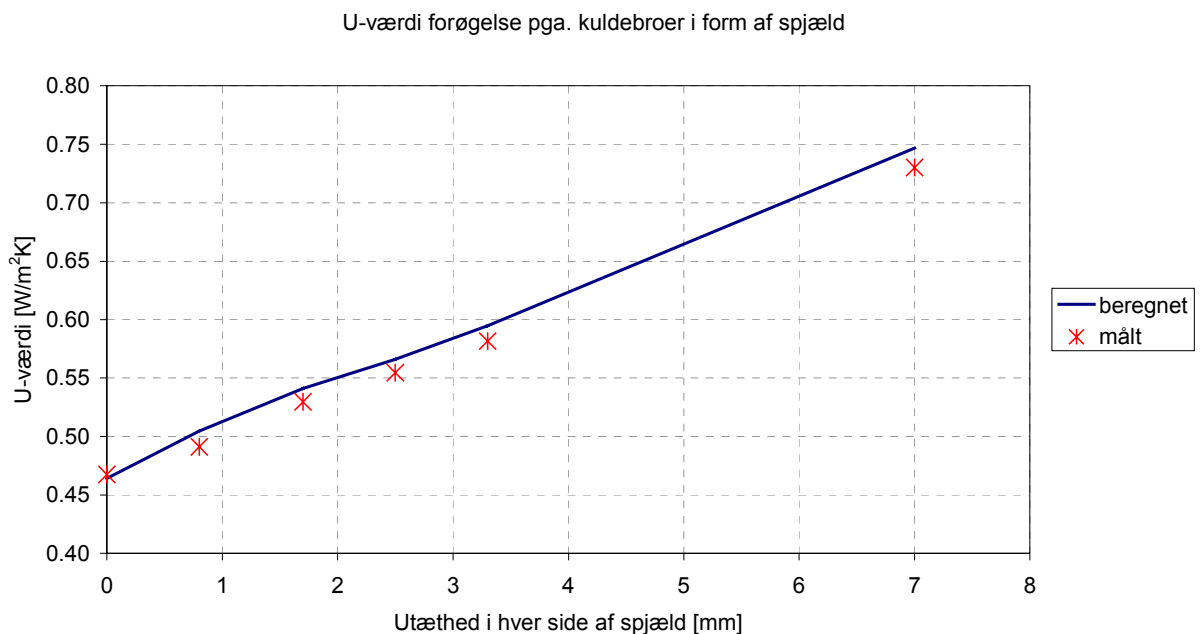
Det samlede varmetab estimeres som en sum af det ledningsmæssige og det konvektive varmetab, idet det antages, at varmetabet ved ledning ikke påvirkes af et konvektivt varmetab. Heraf beregnes en ny samlet U-værdi for væggen:

$$U_{ny} = \frac{Q_{ledning} + Q_{konvektion}}{A \cdot (T_{inde} - T_{ude})}$$

Derefter kan der beregnes en ny middeltemperatur i hulrummet, hvorefter der kan itereres til en endelig U-værdi for solvæggen. Under normale forhold vil det ikke være nødvendigt at iterere mere end et par gange for at opnå en tilstrækkelig nøjagtighed.

## 5.2 Sammenligning af model og måldata

Den simple model er anvendt til at beregne de effektive U-værdier for solvæggene med de smalle spjæld, så modellen kan sammenlignes med de målte data. Sammenligning mellem model og målte data er vist i figur 5.2. Det ses, at modellen kan give et godt estimat for den samlede U-værdi for solvæggen.



Figur 5.2 Simple model sammenlignet med måldata for smalle spjæld

Den simple model er en grov model, der bl.a. ikke tager hensyn til, at der er temperaturlagdeling i hulrummet. Temperaturen i den øverste del af hulrummet vil normalt være højere end middel-hulrumstemperaturen, hvilket vil give et lavere termisk drivtryk. Modellen vil

derfor beregne et lidt for højt termisk drivtryk, og dermed et lidt for højt konvektivt varmetab og en for høj U-værdi.

Modellen kan forfines til også at tage hensyn til temperaturlagdelingen i hulrummet. Det vil kræve, at den konvektive varmeoverføringskoefficient fra luft til dæklag kendes, hvorved luftens afkøling over hulrummet kan beregnes. Den konvektive varmeoverføringskoefficient kan beregnes ud fra empiriske formler for konvektion langs en lodret flade. Det er dog vurderet her, at der ikke vil være baggrund for en så detaljeret beregning, da den simple model giver en rimelig god tilnærmelse til den totale U-værdi. De ekstra beregninger vil give en mere detaljeret iterationsprocs og tilføje nye usikkerheder i en i forvejen grov model.

## 6. Forøgelse af varmetab som følge af spjæld

Ved hjælp af den simple model, der er beskrevet i kapitel 5, kan de opnåede resultater generaliseres således, at det bliver muligt at vurdere, hvad spjæld betyder for ydelsen af aktuelle solvægge.

### 6.1 Forøgelsen i U-værdien ved andre dæklag

Målingerne beskrevet i kapitel 3 og 4 blev gennemført for en solvæg med ét dæklag. Det blev gjort for at sikre en tilstrækkelig høj ændring i solvæggens U-værdi som følge af de undersøgte spjæld, for derved at opnå en tilfredsstillende målenøjagtighed. Men solvægge er ofte ikke opbygget som den undersøgte solvæg. Solvægge har ofte to dæklag, eller der er en absorber evt. med selektiv belægning placeret mellem dæklaget og luftstrømmen i solvæggen. Dette vil reducere betydningen af spjældene i solvæggen.

Ved hjælp af den udviklede model fra kapitel 5 kan forøgelsen i U-værdien beregnes også for solvægge med andre typer dæklag. Dette er vist i figur 6.1 og 6.2 for tre forskellige dæklags-typer:

- 1 dæklag af almindeligt 4 mm glas
- 2 dæklag af almindeligt 4 mm glas med luftmellemrum
- termorude bestående af 2 dæklag af glas med gasfyldning (argon), hvor det ene glas har en lavemissiv belægning (dvs. den repræsenterer også 1 dæklag + en absorber med selektiv belægning).

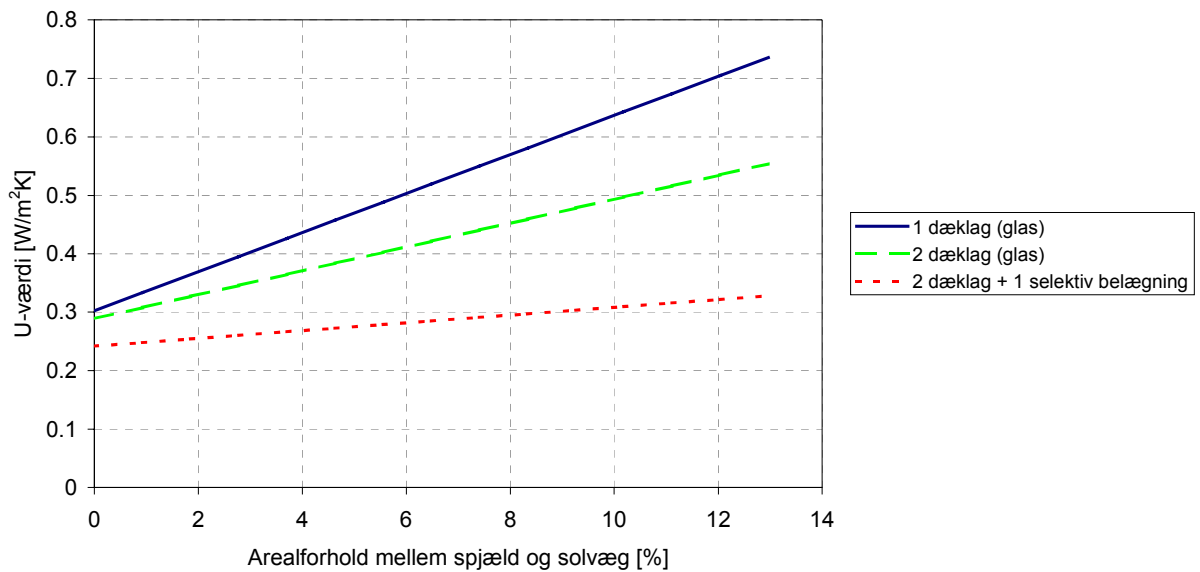
Forskellen på dæklagenes isolans, samt de resulterede U-værdier er listet i Tabel 6.1. Til sammenligning er isolansen af det dæklag, der blev anvendt ved målingerne,  $0,026 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  (akrylplade med tykkelsen 5 mm). Det svarer til en mellemting mellem variant nr. 1 og 2.

Dæklagstype:	Isolans for dæklag [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ]	U-værdi for solvæg uden spjæld [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]	U-værdi for spjæld-område [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]
1 dæklag af alm. 4 mm glas	0,004	0,30	3,64
2 dæklag af almindeligt glas	0,159	0,29	2,33
2 dæklag af glas + en lavemissionsbelægning	0,833	0,24	0,91

Tabel 6.1 Isolans for forskellige dæklag, samt U-værdier for hhv. uforstyrret solvæg og spjældområde

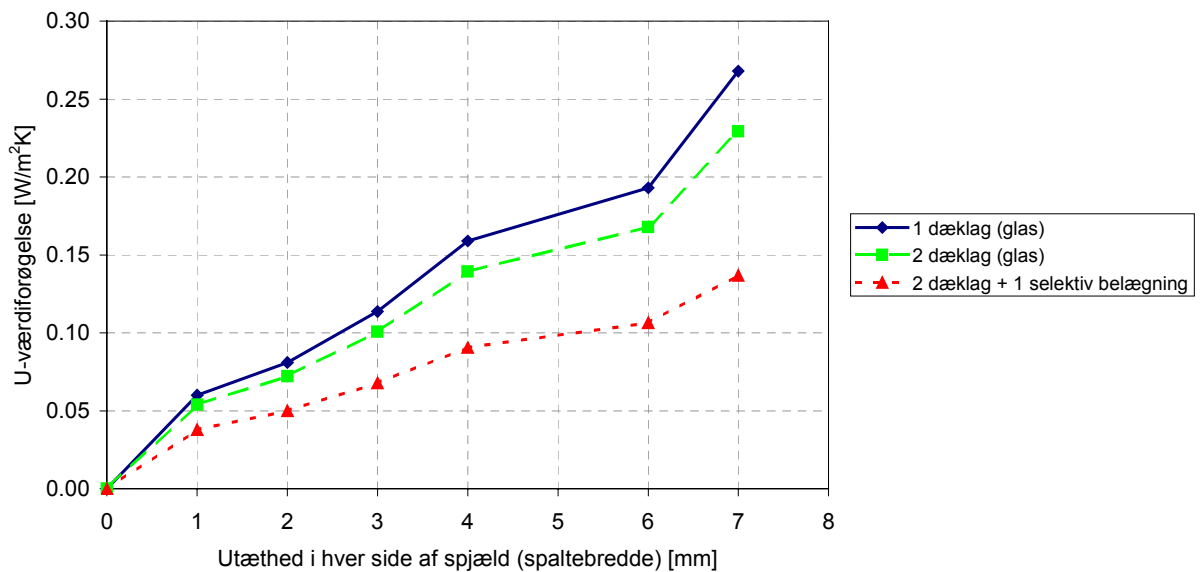
Figur 6.1 viser betydningen af dæklaget for tætte spjæld, mens figur 6.2 viser betydningen af dæklaget for utætte spjæld. Solvæggens samlede U-værdi bliver summen af U-værdien fra figur 6.1 + den yderligere forøgelse fra figur 6.2.

U-værdier for solvægge med kuldebroer i form af spjæld



Figur 6.1 Dæklagets betydning for forøgelsen i solvæggens U-værdi ved tætte spjæld

Forøgelse af U-værdien pga. konvektion i solvæg



Figur 6.2 Dæklagets betydning for forøgelsen i solvæggens U-værdi ved (store) utætheder i top og bund af solvæggen

Af figurerne ses bl.a., at dæklagets isolans har betydning for både det ledningsmæssige og det konvektive varmetab. Dels giver en øget isolans direkte et lavere tab ved varmeledning, men det bevirker også, at der på trods af utætheder ikke bliver så stort et konvektivt varmetab. Det skyldes, at et dæklag med høj isolans giver højere temperaturer i hulrummet, og dermed et lavere drivtryk. Kurverne for forøgelsen af det konvektive varmetab er ikke retlinede, da beregningerne bl.a. er baserede på aflæsning af graf baseret på måledata (Figur 5.1).

## 6.2 Beregning af varmetabet som følge af spjæld

For at kunne beregne, hvor stort et varmetab spjæld i solvægge giver anledning til, er det nødvendigt at kende den drivende kraft for varmetabet – dvs. temperaturforskellen mellem rummet og hulrummet i solvæggen. Da temperaturen i hulrummet er afhængig af solindfaldet, vil varmetabet som følge af spjældene være væsentligt mindre end den gennemsnitlige temperaturforskel i fyringssæsonen mellem udeluften og rummet. Der er ikke noget varmetab, når temperaturen i solvæggen er højere end rumtemperaturen, når udelufttemperaturen er højere end 17°C (hvor der normalt ikke opvarmningsbehov), og hvis der ikke er opvarmningsbehov i bygningen bag solvæggen (f.eks. som følge af solindfald, el-forbrugende apparater og personer).

For at bestemme varmetabet som følge af spjæld er det således nødvendigt at gennemføre en simulering for en solvæg for at finde temperaturen i solvæggen og sammenholde dette med opvarmningsbehovet i bygningen.

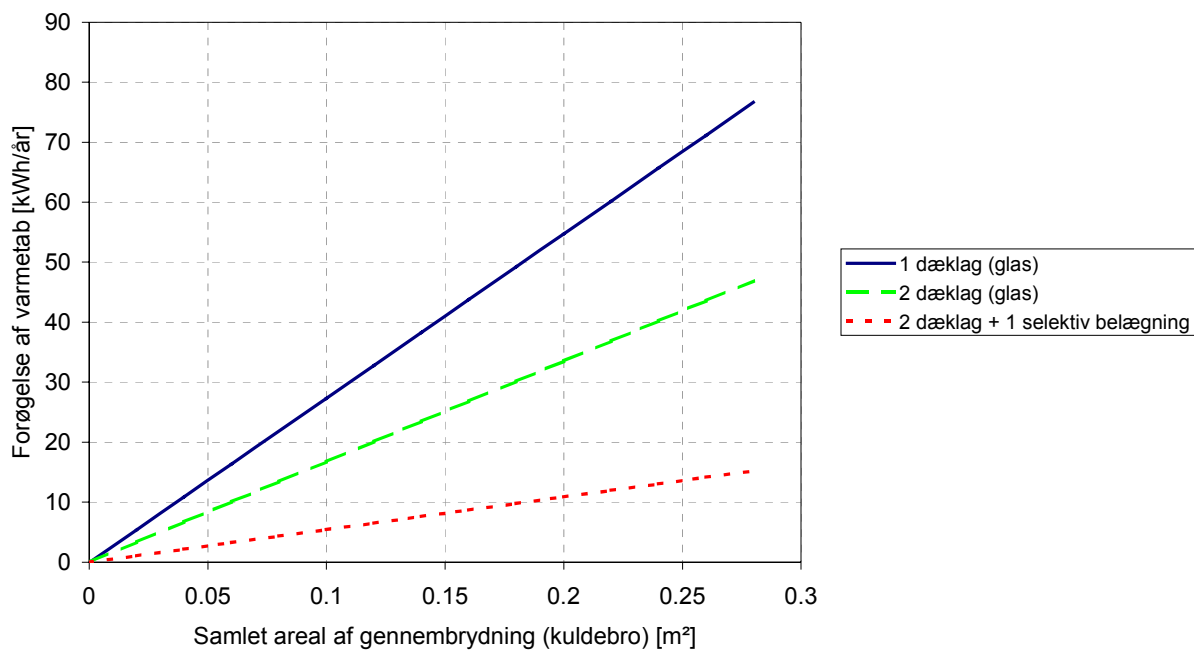
Der er derfor gennemført en simulering af temperaturforholdene i en solvæg time for time udsat for det danske referenceår TRY (Statens Byggeforskningsinstitut, 1982). Solvæggen er på 2,16 m<sup>2</sup> (som forsøgssolvæggen). Volumenstrømmen af luft gennem solvæggen er 100 m<sup>3</sup>/h, og effektiviteten antages at være 50%. Solvæggen er placeret lodret og vender mod syd. Der regnes ikke med varmeakkumulation i solvæggen og intet varmetab gennem solvæggen, hvilket betyder, at temperaturniveauet i solvæggen i gennemsnit er lavere end i en rigtig solvæg. Dette modsvares dog af, at der heller ikke regnes med randtab i solvæggen, hvilket der vil være i en rigtig solvæg. Det skal desuden erindres, at solvægge kan opbygges meget forskelligt bl.a. have et bedre dæklagssystem og dermed et højere temperaturniveau end beregnet her. Det vurderes derfor, at de efterfølgende varmetab ligger i den høje ende af, hvad kan forventes.

Som opvarmningsbehov anvendes opvarmningsbehovet for et enfamiliehus svarende til BR82 (Lawaetz og Jørgensen, 1977). Dette høje opvarmningsbehov er anvendt for ikke at give et for positivt skøn over spjældenes indflydelse på solvæggenes ydelse – de fundne varmetab ligger i den høje ende. Der regnes med en rumtemperatur på 21°C.

Der regnes desuden ikke med, at det forøgede varmetab fra spjældene påvirker temperaturniveauet i solvæggen. Varmetabet fra spjældene vil i en rigtig solvæg øge temperaturniveauet i solvæggen, hvilket igen vil påvirke det samlede varmetab.

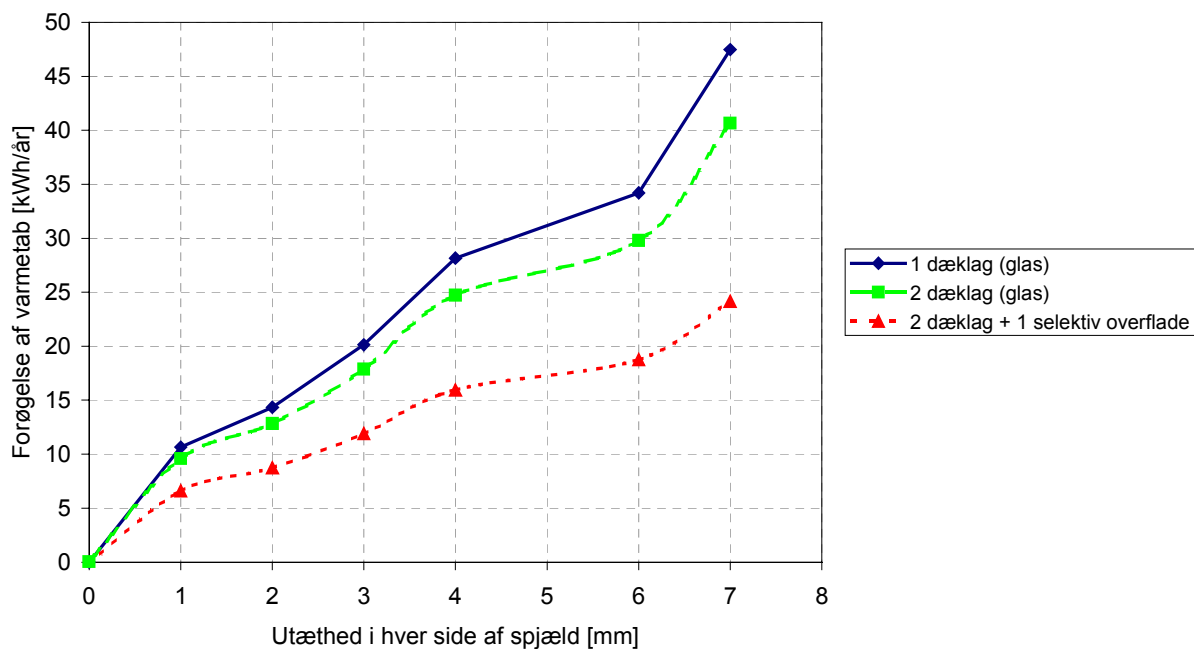
Beregningerne viser, at en forøgelse i U-værdien for solvæggen på 1 W/K giver anledning til et forøget varmetab for solvæggen på 82 kWh/år. Ud fra de ovenstående antagelser kan det tilnærmelsesvis antages, at varmetabet er lineær afhængig af forøgelsen af U-værdien som følge af spjældene. Figur 6.1 og 6.2 kan derfor omformes til figur 6.3 og 6.4, der viser, hvordan det ekstra varmetab afhænger af størrelse af spjæld, dæklag og tæthed. Det antages her, at forøgelsen af varmetabet udelukkende er afhængig af arealet af spjældet og ikke af solvæggenes areal. Da forøgelsen af det konvektive varmetab for utætte spjæld næsten er uafhængig af størrelsen af spjældene – se figur 4.3, hvor hældningen af kurverne for spjæld både oppe og nede er næsten ens – gælder figur 6.4 uafhængig af størrelsen af spjældene og udelukkende af størrelsen af utæthederne. Dog er beregningerne baseret på tryktabsberegninger for spalter af højden 10 mm, hvorfor kurven kun er gyldig for spalter af sammenlignelig geometri.

Varmetab som følge af spjæld



Figur 6.3 Forøget varmetab som følge af tætte spjæld i solvægge

Varmetab som følge af utætheder i spjæld



Figur 6.4 Yderligere forøgelse af varmetabet som følge af utætte spjæld i solvægge (gælder for spalter med spaltehøjde: 10 mm)

Figur 6.3-4 anvendes på følgende måde. Først bestemmes arealet af spjældene samt dæklagstype. Derefter findes varmetabet for tætte spjæld i figur 6.3. Hvis der kun er spjæld i toppen af solvæggen, er det resultatet. Hvis der er spjæld både i top og bund, vurderes det, om spjældene kan forventes at være tætte. Hvis ikke vurderes hvor stort et areal utæthederne vil udgøre. Herefter anvendes figur 6.4 til at finde forøgelsen af varmetabet som følge af utætte spjæld. Denne værdi lægges til værdien fundet i figur 6.3, hvorved det samlede varmetab som følge af utætte spjæld findes.

Ovenstående metode må kun benyttes til at skabe et første indtryk af spjældenes betydning for en solvægs ydelse. Metoden bygger som nævnt på for mange antagelser og forsimplinger til, at den kan bruges til en præcis fastlæggelse af spjældenes indflydelse. I stedet kan den udviklede teori i kapitel 5 eller figur 6.1-2 anvendes sammen med en simulering af temperaturoverholdene i den aktuelle solvæg.

### 6.3 Varmetab som følge af spjæld i forhold til solvægsydelse

Varmetabene der findes i figur 6.3-4 skal sættes i forhold til den forventede ydelse af solvæggene. I (Gramkow et al, 1999) er ydelsen for forskellige solvægge beregnet uden hensyntagen til varmetabet fra eventuelle spjæld. Disse ydelser vil i det følgende blive benyttet til at illustrere betydningen af spjældenes varmetab.

I (Gramkow et al. 1999) angives, at ydelsen for solvæggen med et dæklag af to 4 mm glas med en luftspalte på 15 mm imellem og ingen lavemissiv belægning vil ligge mellem 60 og 270 kWh/m<sup>2</sup> pr. år afhængig af solvægstype og solvægsareal. Den årlige ydelse for en solvæg med et areal på 2 m<sup>2</sup> ligger mellem 120 og 540 kWh, mens ydelsen for en solvæg på 10 m<sup>2</sup> ligger mellem 600 og 2000 kWh. Et spjæld i toppen eller to tætte spjæld i top og bund på i alt 0,1 m<sup>2</sup> (f.eks. 1 x 0,1 m<sup>2</sup> el 2 x 0,5 x 0,1 m<sup>2</sup>) betyder således en reduktion i ydelsen for solvæggen på mellem 1 og 14% for hhv. den store og lille solvæg, idet det ekstra varmetab som følge af spjældet ifølge figur 6,3 er 17 kWh/år. Hvis solvæggen er udstyret med utætte spjæld i top og bund med en utæthed på 2 mm i hver side, vil der være et yderligere varmetab på 13 kWh/år. Den samlede reduktion i solvæggens ydelse forøges dermed til mellem 1,5 og 25%.

Generelt kan siges, at spjæld betyder mindst for ydelsen af solvægge, der opfylder en eller flere af følgende krav: de er store, de har et velisolerende dæklag og de har en høj ydelse. Det er således muligt næsten fuldstændigt at eliminere effekten af varmetabet som følge af spjæld i solvægge. Til gengæld kan varmetabet som følge af utætte spjæld i små solvægge med dæklag med lav isolans betyde en markant forringelse af solvæggens ydelse.

Det skal desuden erindres, at i solvægge til forvarmning af friskluft, hvor frisk luft altid suges gennem solvæggen, vil spjæld ikke medføre en forringelse af ydelsen, idet varme tabt gennem spjældet vil blive suget tilbage til bygningen sammen med den friske luft.



## 6.4 Vindpåvirkning

Forøgelsen af solvæggenes U-værdi og effekten af det heraf følgende ekstra varmetab er i det forrige afsnit fundet uden hensyntagen til de trykdifferenser, der normalt optræder i og omkring en bygning. Ved utætte spjæld er der kun taget hensyn til det drivtryk, der skabes af temperaturforskellen mellem solvæg og rum. Der er således ikke taget hensyn til drivtryk skabt af vindgenererede trykforskelle i og omkring bygningen eller undertryk skabt af et eventuelt ventilationsanlæg.

Afhængig af vindretning i forhold til placeringen af solvæggen, vil vinden enten skabe undertryk eller overtryk ved solvæggen. Ved varierende vindtryk vil vinden desuden ”pumpe” med dæklaget.

### 6.4.1 Solvægge til forvarmning af ventilationsluft

Luften i solvæggen er i direkte kontakt med udeklimaet. Ved vindskabt overtryk ved solvæggen vil der blive presset luft ind i bygningen gennem et utæt spjæld. Ved undertryk vil luft fra bygningen blive suget ud gennem et utæt spjæld. Om dette giver et forøget varmetab for bygningen afhænger af, hvor tæt den resterende klimaskærm er. Hvis denne er mere tæt end det utætte spjæld, vil vinden give anledning til et forøget varmetab, mens det ikke vil influere nævneværdigt på bygningens varmetab, hvis den resterende del af klimaskærmen er mere utæt end det utætte spjæld.

### 6.4.2 Solvægge med recirkulation

Luften i solvæggen er ikke i direkte kontakt med udeklimaet. Effekten af vindskabt over- eller undertryk ved solvæggen er derfor afhængig af, hvor tæt solvæggens dæklag er. Ved varierende vindtryk vil luft fra bygningen skiftevis blive suget ud i solvæggen og presset ind i bygningen igen gennem et utæt spjæld. Når luften befinder sig ude i solvæggen, bliver den afkølet. Størrelsen af varmetabet er derfor afhængig af, hvor meget dæklaget kan give sig – dvs. hvor meget luft der løber gennem det utætte spjæld ved hvert vindstød.

### 6.4.3 Effekten af vinden på varmetabet

Det er ikke umiddelbart muligt at kvantificere effekten af vinden på varmetabet gennem utætte spjæld. Hvis luftstrømningen gennem et utæt spjæld blot erstatter en anden del af et nødvendigt luftskifte i en bygningen, vil vinden ikke bidrage til et øget varmetab for bygningen.

## 7. Konklusion

I ventilerede solvægge vil der være en eller flere gennembrydninger, som vil medføre termiske kuldebroer, der forøger væggenes U-værdi. Som regel er der installeret spjæld i gennembrydningerne for at hindre direkte luftcirkulation, når solvæggen ikke kan tilføre bygningen varm luft.

Spjældene forøger varmetabet ved varmeledning gennem væggen og bidrager også til forøget konvektion. På grund af temperaturforskelle over spjældet vil der specielt om natten opstå konvektive varmestrømme på begge sider af spjældet, der vil transportere varme fra rummet til omgivelserne. Hvis spjældene ikke slutter helt tæt, vil varmetabet gennem spjældene forøges drastisk, idet rumluft direkte kan cirkulere ud i solvæggen. I praksis vil det være vanskeligt at udforme spjældene, så de slutter helt til. Det er ofte nødvendigt at have en lille frigang i hver side af spjældet, for at det kan åbne og lukke uproblematisk.

I hidtidige undersøgelser er dette varmetab som regel ikke medregnet, når ydelsen for solvægge bestemmes, da dette varmetab har været svært at kvantificere. Tidligere måleprojekter har indikeret, at der kunne være tale om forøgede varmetab pga. luftstrømninger, men det var ikke muligt at kvantificere effekten af disse luftbevægelser.

Formålet med dette projekt har derfor været at undersøge effekten af disse forhold og dermed at skaffe viden om den forøgelse af en solvægs varmetab, som gennembrydninger og spjæld giver anledning til. Målet har været at opstille lettilgængelige retningslinier, på baggrund af hvilke, det er muligt at vurdere forøgelsen af varmetabet i konkrete tilfælde.

Der er foretaget en række målinger på en solvægsmodel ved hjælp af en guarded hot box, og disse målinger er ved hjælp af teoretiske undersøgelser blevet generaliseret, så det er blevet muligt at opstille en simpel beregningsmodel til vurdering af effekten af gennembrydninger i forskellige typer solvægge.

Ved hjælp af den simple beregningsmodel er det muligt at beregne et rimeligt nøjagtigt bud på forøgelsen af solvægge U-værdi, f.eks. for solvægge af varierende størrelse, med forskellige størrelser spjæld, forskellige typer dæklag osv. Den væsentligste begrænsning for modellen er, at den er udledt for en bestemt type utæthed, nemlig små lodrette spalteåbninger i hver side af et spjæld. Tryktabsberegningerne kan ikke umiddelbart generaliseres til andre typer utætheder. Det er dog vurderet, at netop sådanne spalteåbninger vil være forholdsvis typiske i forbindelse med ventilerede solvægge med spjæld.

Generelt kan det konkluderes, at det forøgede varmetab forårsaget af spjæld betyder mindst for solvægge, hvor:

- det samlede areal af solvæggen er stort i forhold til spjældarealet
- dæklaget er velisoleret
- solvægsydelsen er høj.

Et velisoleret dæklag medfører en mindre temperaturdifferens over spjældet, hvilket giver et mindre termisk drivtryk og dermed også et mindre konvektivt varmetab. Til gengæld medfører isolering af selve spjældet en større temperaturdifferens over spjældet, hvorved det

termiske drivtryk forøges. Dette kan medføre et forøget konvektivt varmetab. Det er derfor af hensyn til eliminering af det konvektive varmetab mere fordelagtigt at sørge for et velisoleret dæklag end at isolere selve spjældet.

Det er muligt næsten fuldstændigt at eliminere effekten af varmetabet som følge af spjæld i solvægge. Til gengæld kan varmetabet som følge af utætte spjæld i små solvægge med dæklag med lav isolans betyde en markant forringelse af solvæggens ydelse. Det er derfor væsentligt, at effekten af varmetab forårsaget af spjæld tages med i betragtning ved designet af solvæggen. Det er muligt med et rigtigt design at forbedre solvæggens ydelse og dermed give større energibesparelser og bedre rentabilitet.

Det skal desuden erindres, at solvægge til forvarmning af friskluft, hvor frisk luft altid suges gennem solvæggen, ikke vil opleve en forringelse af ydelsen, idet varme tabt gennem spjældet vil blive suget tilbage til bygningen sammen med den friske luft.

## 8. Referencer

- Andersen, K. T., 1998. Dimensionering af naturlig ventilation med termisk opdrift. Statens Byggeforskningsinstitut. SBI-rapport 301. ISBN 87-563-0996-1-
- DS 418, 1986. Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af bygningers varmetab. 5. udgave, Teknisk Forlag, Normstyrelsens publikationer, NP-186-S
- Fox, R. W. & McDonald, A. T., 1985. Introduction to Fluid Mechanics. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Gramkow, L. (ed), 1996. Solvægge til betonreovering - Del 3. Måleresultater og anbefalinger. Slutrapport. COWI.
- Gramkow et al, 1999. 2. generations solvægge: Bygningsintegreret solenergi. COWI.
- Gue, A. (ed), 1993. PASSYS Test Components Descriptions. Commission of the European Communities, DG XII, Brussels. EUR 15121 EN.
- ISO 8990, 1997. DS/EN/ISO 8990 Termisk isolering – Bestemmelse af isolans ved brug af kalibreret og beskyttet varmekasse (hot box). 1. udgave, godkendt marts 1997.
- Jensen, S.Ø. (ed), 1993. Validation of Building Energy Simulation Programs - Part II, Research Report PASSYS Subgroup Model Validation and Development. Commission of the European Communities - DGXII. EUR 15115 EN.
- Jensen, S. Ø., 1999. Måling på solvægge til rumopvarmning – Naturcenter Vestamager, SolEnergiCenter Danmark, Teknologisk Institut.
- Lawaetz, H. og Jørgensen, L.S., 1977. Vidensbank – 3 huses opvarmningsbehov. Laboratoriet for varmeisolering, Danmarks Tekniske Højskole.
- Rose, J., 1998. Analyse af målenøjagtighed for guarded hot box opstilling, IBE, DTU
- Schmidt, T. P. og Jensen, S. Ø, 1998. Præfabrikerede ventilerede solvægge i byggeriet, fase 2. - Design og opbygning af solvægge på Thermologica-huset, Egebjerggård samt efterfølgende målinger. Carl Bro og SolEnergiCenter Danmark.
- Schmidt, T. P., 1999. Ventilerede solvægge – Naturcenter Danmark, Carl Bro
- Statens Byggeforskningsinstitut, 1982. Vejrdata for VVS og energi – Dansk referenceår TRY. SBI rapport nr. 135.