

LfV

Energiministeriets ForskningsProgram  
Energianvendelse i Bygninger

# Kuldebroers indflydelse på bygningers varmetab

225

DTH

Danmarks Tekniske Højskole

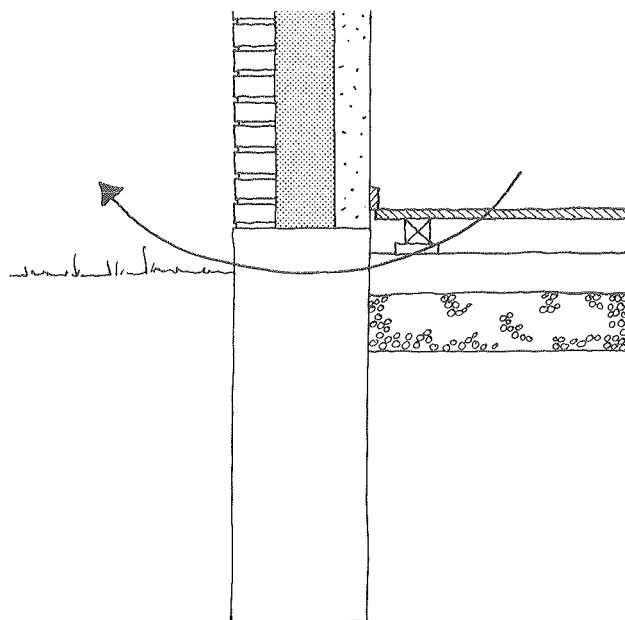
Laboratoriet for Varmeisolering





# Kuldebroers indflydelse på bygningers varmetab

Kirsten Engelund Thomsen



**LAVENERGIGRUPPEN:** Bjarne Saxhof, civ.ing., projektleder  
Mogens R. Byberg, civ.ing., lektor  
Jørgen M. Schultz, civ.ing.  
Kirsten Engelund Thomsen, civ.ing.  
Kim B. Wittchen, civ.ing.

## FORORD

Projektet er gennemført for midler stillet til rådighed af Energiministeriets forskningsprogram (EFP) under delprogrammet Energianvendelse i bygninger. Projektet "Kuldebroers indflydelse på bygningers varmetab" blev igangsat under EFP-85 med ENS j.nr. 501-09-01, programområde 1.2.1, Klimaskærmen.

Rapporten beskriver en række hyppigt forekommende kuldebroer i bygningskonstruktioner samt forbedringsforslag, hvor varmetabet gennem kuldebroen er reduceret. Et EDB-program til beregning af todimensionale temperaturfelter bruges til at analysere de enkelte konstruktioner.

Det må understreges, at rapporten ikke behandler egentlige højisolerede konstruktioner og således ikke anviser løsninger for fx fundamentskonstruktioner til lavenergihuse. De undersøgte konstruktioner er typisk eksempler, som opfylder kravene i bygningsreglementet (BR-82 hhv. BR-S 85) sammenlignet med tidligere anvendte løsninger.

Bjarne Saxhof  
Projektleder

## INDHOLDSFORTEGNELSE

Forord	3
Resumé	5
Summary	6
1. Indledning	7
2. Beregningsmetode	8
3. Udvælgelse af hyppigt forekommende kuldebroer i bygningskonstruktioner	13
4. Resultater - varmetab og temperaturer	15
4.1 Fundamenter og terrændæk	15
4.1.1 Kuldebrovirkningens udstrækning ved forskellige vægtyper	30
4.2 Hjørner	33
4.2.1 Kuldebrovirkningens udstrækning	35
4.3 Vindue/vægsamlinger	40
4.3.1 Kuldebrovirkningens udstrækning	45
5. Konklusioner	48
6. Litteraturliste	50
LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering, DTH	51

## RESUMÉ

Formålet med projektet er at analysere hyppigt forekommende kuldebroer i bygningskonstruktioner med hensyn til temperaturer og varmetab. Til beregning af temperaturfordelingen gennem kuldebroer bruges et EDB-program til beregning af todimensionale varmestrømme. Erfaringer fra Hjortekær-lavenergihusene bekræfter, at der bør gøres en særlig indsats ved fundamentsudformninger samt ved sammenbygning af klimaskærmens forskellige dele.

Der er derfor i denne rapport analyseret en lang række forskellige fundamenter og terrændæk med hensyn til temperaturer og varmetab, både konstruktioner med og uden kuldebroafbrydelser. Ved fundamenter er kuldebrovirkningen mærkbar et par meter ind fra ydervæggen uanset, hvilken type ydervæg der vælges. Kuldebrovirkningen spores godt en halv meter op ad teglvæggen, medens man ved betonvæggen skal ca. 1,5 m op, før man får den endimensionale varmestrøm. Det er meget effektivt at indsætte letbetonblokke i fundamentet, og det er den første afbrydelse, der betyder mest. Ved at indsætte 2 skifter letbeton i forhold til et almindelig betonfundament spares ca. 11% af det totale varmetab gennem gulvet, medens der spares 13% med 4 skifter letbeton.

Ydervægshjørner kan betragtes som kuldebroer, hvis man sammenligner med en lige væg af samme længde som hjørnets indvendige mål. Tre forskellige vægkonstruktioner er gennemregnet, og varmestrømme samt indvendige overfladetemperaturer er vist. Ved en betonvæg ses kuldebrovirkningen ca. 0,6-0,7 m hen langs væggen, men ved en bedre isolerende væg er virkningen ophørt ca. 0,4 m ude.

Vinduet er den del af bygningens klimaskærm, der har det største varmetab, og ydermere opstår en kuldebro, hvor vinduet monteres i væggen. I rapporten er udvalgt 3 vægtyper, hvor der er isat forskellige typer vinduer. Betydningen af vinduets placering i væggen er desuden undersøgt, og det ekstra varmetab pga. kuldebroen er opgivet i W pr. m omkreds vindue.

## SUMMARY

The aim of the project is to analyse frequently appearing cold bridges in buildings. Analyses has been carried out with regard to surface temperatures and heat loss. For calculation of the temperature dispersion in the cold bridges a Danish computer program for calculation of two-dimensional heat flows is used. Experience gained from dealing with the Hjortekær low energy houses proves that special effort will have to be made when designing the foundation and when joining the various parts of the building envelope and interior walls etc.

Therefore, a great number of different foundations and slab-on-ground constructions has been studied with regard to designs both with and without cold bridges. In foundations the effect of the cold bridges can be traced about 2 meters from the outer wall regardless of what type of outer wall is chosen. The effect of the cold bridge can be traced about half a meter up in a brick wall, but in a concrete wall you will have to go 1.5 meter up before finding the one-dimensional heat flow. An efficient way of breaking the cold bridge is to use lightweight concrete blocks in the foundation, and it is the first break which is most important. When using 2 courses of lightweight blocks (height 0.4 m) compared to an ordinary concrete foundation about 11% of the total heat loss through the floor will be saved, while 13% can be saved by using 4 courses of lightweight blocks.

The outer corners can be considered as cold bridges when compared to a straight wall of the same length as measured along the inner side of the corner. Calculations have been made of three different wall designs, and the heat flows and the inner surface temperatures are shown. In a concrete wall the effect of the cold bridge can be seen about 0,6-0,7 m along the wall but when using a better insulated wall the effect can only be traced about 0,4 m along the wall.

The window is the part of the building envelope which gives the greatest heat loss and a cold bridge will furthermore appear where the window is mounted in the wall. In this report three different designs of walls with different types of windows have been chosen. The effect of how and where the window is placed in the wall has also been studied and the extra heat loss caused by the cold bridge is given in W per meter window perimeter.

## 1. INDLEDNING

Formålet med projektet er at analysere hyppigt forekommende kuldebroer i bygningskonstruktioner med hensyn til overfladetemperaturer og varmetab. En sædvanlig definition på begrebet kuldebro er, at en kuldebro er et område i en varmeisoleret konstruktion, som har væsentlig dårligere isoleringsevne end selve konstruktionen. Det betyder, at der strømmer mere varme pr. fladeenhed gennem kuldebroen end gennem resten af konstruktionen, og jo bedre resten af konstruktionen bliver isoleret, jo mere relativ betydning får kuldebroen.

Kuldebroer forøger transmissionstabet, og alene af den grund bør de gøres så små som muligt eller helt undgåes. Kuldebroer nedsætter yderligere overfladetemperaturerne og kan dermed skabe dårligt indeklima, hurtigere tilsmudsning og risiko for fugtskader. Kondens i lettere grad kan fremkalde vedligeholdelsesproblemer, medens sværere grader kan forårsage mug eller svamp, det sidste i trækonstruktioner.

Varmetabet gennem en kuldebro kan reduceres ved evt. at gøre følgende:

1. Materialet af kuldebroen erstattes helt eller delvis med bedre isolerende materiale
2. Kuldebrotværsnittet mindskes
3. Varmestrømsretningens længde forøges
4. Kuldebroen isoleres ud- og/eller indvendigt

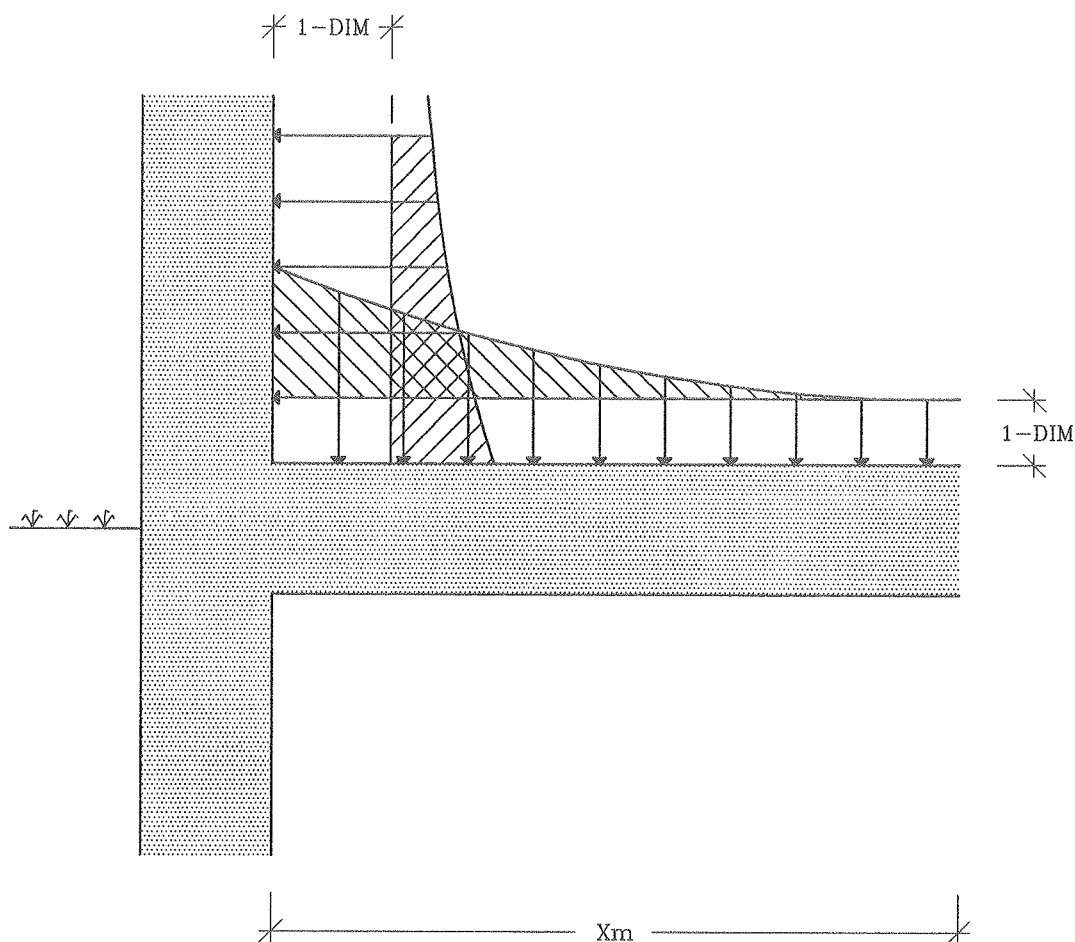
Ved hjælp af et eksisterende EDB-program til beregning af stationære todimensionale temperaturfelter er et større antal kuldebroer blevet analyseret.

I afsnit 2 er beregningsmetoden kort beskrevet med angivelse af hvilke forudsætninger, der er brugt. Kapitel 3 fortæller, hvilke typer kuldebroer, der er medtaget i denne rapport - der er udvalgt nogle, som anses for interessante og aktuelle. I kapitel 4 gives en oversigt over resultaterne fra beregningerne - varmetabet gennem konstruktionen og temperaturfordelingen på de indvendige flader.



## 2. BEREGNINGSMETODE

Et EDB-program til beregning af stationære todimensionale temperaturfelter er brugt til at analysere de enkelte konstruktioner. Programmet udnytter analogien mellem elektriske strømme og varmestrømme. Den følgende figur viser princippet i beregningen af varmestrømme for et fundament.



Figur 1. Illustration af varmestrømme for et fundament.

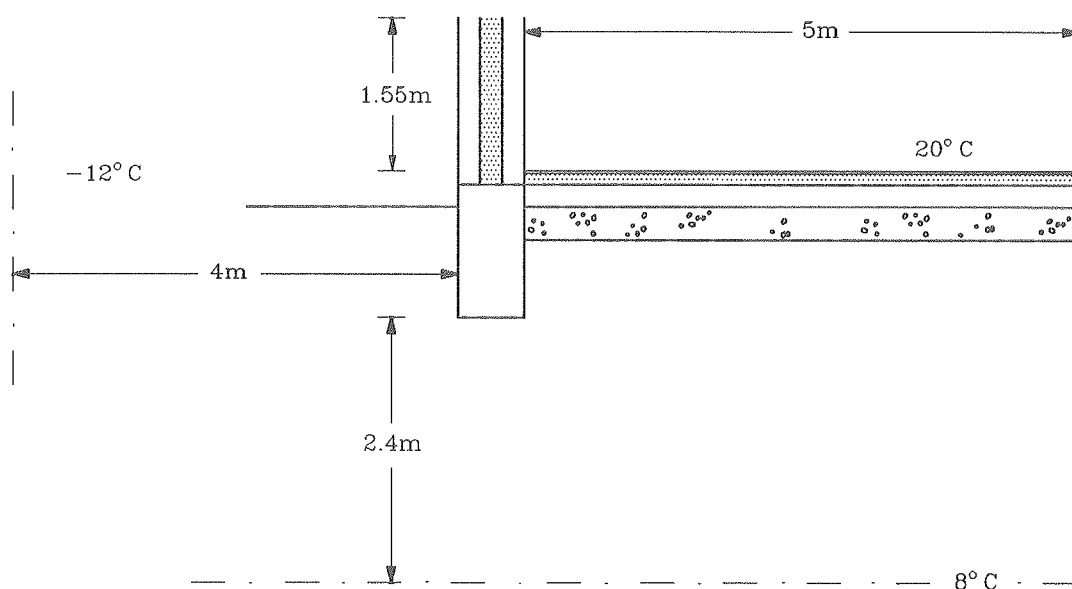
Pilene viser varmestrømmen gennem hver maske i netværket (langs den valgte overflade). De skraverede arealer viser differensen mellem den todimensionale og den endimensionale varmestrøm. Summen af differenserne udgør det ekstra varmetab, kaldet  $\Delta Q(2)$ . Figuren angiver desuden, at den endimensionale varmestrøm gennem gulvet opnås, men meget ofte (i forholdsvis små huse, fx enfamiliehuse med moderat isolerede gulve og fundamenter) gør den det ikke. Situationen bliver da som vist for væggen. Maskebredden kan være af vilkårlig størrelse, og selve konstruktionen kan bestå af vilkårligt mange forskellige materialer. Der benyttes lille maskebredde, hvor de største varmestrømme forekommer. Inddata består bl.a. af materialernes varmeledningsevne, hvor værdierne fra DS 418 [1] er brugt, hvorfra ligeledes overgangs- og jordisolanserne er taget.

I tabellerne med beregningsresultater vil den endimensionale varmestrøm gennem konstruktionen,  $Q-1$  ( $\text{W/m}^2$ ), plus det ovennævnte ekstra varmetab,  $\Delta Q(2)$  ( $\text{W/m}$  indvendig facade) blive angivet. Imidlertid er  $\Delta Q(2)$  også angivet i  $\text{W/mK}$  for at kunne sammenligne og udbygge resultaterne i denne rapport med eksisterende viden. For at kunne udtrykke  $\Delta Q(2)$  i  $\text{W/m}^2$  for fundamenternes vedkommende divideres  $\Delta Q(2)$  i  $\text{W/m}$  med  $x$  meter - se ovenstående figur. Hele det ekstra varmetab gennem såvel gulvet som den nederste del af væggen henføres altså til gulvet.

Omregningen vil kun være korrekt for en meget lang bygning og vil ellers undervurdere det ekstra varmetab - for en lille bygning er det nødvendigt at udregne det ekstra varmetab i  $\text{W}$  og derefter dividere med gulvarealet.

En nærmere analyse af, hvor langt kuldebrovirkningen i de forskellige konstruktioner rækker, er beskrevet i afsnit 4 under de enkelte afsnit.

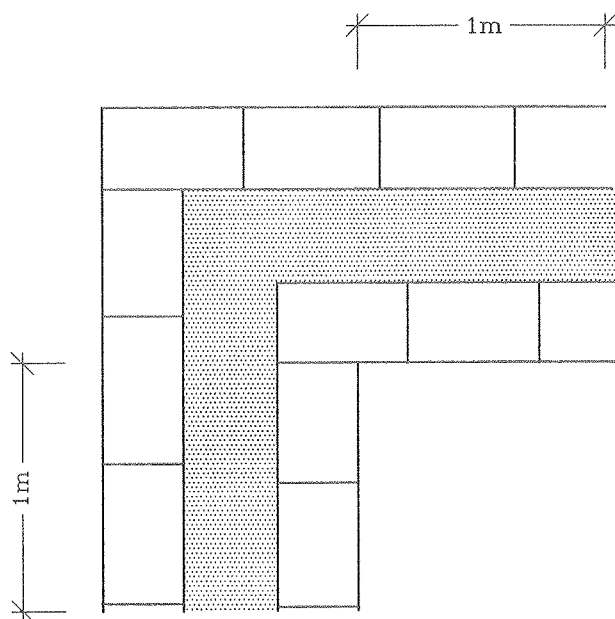
Ved beregning af fundamenter/ydervægssamlinger er nedenstående model valgt:



Figur 2. Grundmodel for fundamentsberegninger.

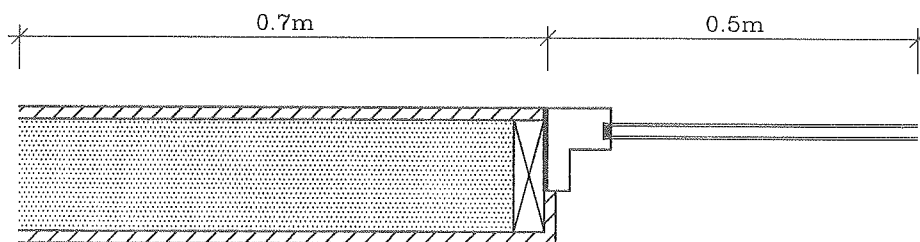
Fastlæggelse af modellens størrelse ned i jorden frembyder det særlige problem: ønskes overensstemmelse mellem  $R_j$  angivet i DS 418 og modellens isolans  $R = \text{jordtykkelsen}/\lambda_{\text{jord}}$  i det endimensionale tilfælde midt under huset, er der ikke tilsvarende overensstemmelse med  $R_j$  i randfeltet. De valgte  $2,4\text{ m}$  under fundament svarer til, at isolansen for jord i midterfeltet er  $1,5\text{ m}^2\text{K/W}$ .

Ved beregning af væghjørnerne er følgende grundmodel valgt, idet kuldebrovirkningen strækker sig 0,4-0,7 m fra hjørnet.



Figur 3. Grundmodel af væghjørne.

Ved vindue/vægsamlinger blev valgt at betragte et 2,4 m modul med et 1 x 1 m vindue og lægge et snit i symmetriplanet:



Figur 4. Grundmodel af vindue/vægsamling.

Programmet forudsætter som nævnt stationære tilstande, og i rapporten er brugt  $20^{\circ}\text{C}$  som indetemperatur og  $-12^{\circ}\text{C}$  som udetemperatur i næsten alle beregninger. Ved fundamentsberegning er endvidere brugt  $8^{\circ}\text{C}$  som jordtemperatur. De valgte temperaturer svarer altså til dimensioneringstilstanden i DS 418 [1]. I tabel 1 gives et par eksempler på varmemestrømsberegninger ved forskellige ude- og indetemperature. Der er brugt et betonfundament med 50 mm isolering i gulv plus 50 mm indvendig kantisolering,  $Q-1$  er det endimensionale varmetab gennem gulvet og  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab på grund af den todimensionale varmemestrøm omkring fundamentet.

Tabel 1. Eksempler på varmestrømsberegninger for gulv/fundament under forskellige temperaturforhold. Udetemperaturen 0°C svarer ganske godt til gennemsnitsværdien i fyringssæsonen for et velisoleret hus.

$t_i$	$t_u$	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$
°C	°C	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/mK
18	0	2,4	1,0	5,1	0,3
20	0	2,8	1,1	5,5	0,3
22	0	3,3	1,2	6,0	0,3
20	-5	2,8	1,5	7,3	0,3
21	-5	3,1	1,8	9,1	0,3
20	-12	2,8	1,9	9,7	0,3
21	-12	3,1	2,0	10,1	0,3

Tabellen viser, at resultaterne i denne rapport med god nøjagtighed kan benyttes ved forskellige temperaturforhold.

Faste indvendige og udvendige temperaturer er som nævnt forudsat (-12°C ude og +20°C inde), men man kan ifølge litteratur [2] og [3] let omregne de under denne forudsætning beregnede temperaturer til andre forudsætninger for inde- og udetemperatur efter følgende formel:

$$t^* = t_i^* - \frac{(20 - t_i^*)}{32} (t_i^* - t_u^*)$$

hvor

- t = temperatur i et givet punkt med -12/20°C som forudsætning, og
- \* ved en temperatur betegner temperaturen ved de aktuelle inde- og udetemperaturer.

Tabel 2 illustrerer et par eksempler.

Det ses, at ved konstruktioner, hvor der kun er en udvendig- og indvendig side (fx hjørnet), er ovenstående formel gyldig. Ved samlingerne fundament/væg/gulv, hvor der også forekommer en jordtemperatur, bliver overfladetemperaturerne, når de beregnes med formlen, op til 0,3°C højere end de EDB-beregnete.

Tabel 2. Indvendige overfladetemperaturer ved forskellige inde- og udetemperaturer beregnet dels vha. omstående formel og del vha. EDB-program.  $\Delta t$  betegner forskellen på overfladetemperaturer beregnet efter de to metoder. Der er anvendt 2 decimaler for at anskueliggøre de små forskelle.

<b>FUNDAMENT</b>			
Indvendige overfladetemperaturer i hjørne (temperatur i °C):			
Ude- og indetemp.	Formel	EDB	$\Delta t$
-12/20	14,72	14,72	0
-12/21	15,56	15,32	0,24
0/18	15,03	14,82	0,21
0/22	18,37	18,06	0,31
-5/20	15,88	15,64	0,24
Indvendige overfladetemperaturer (°C) 5 meter ude:			
-12/20	19,57	19,57	0
-12/21	20,56	20,55	0,01
0/18	17,76	17,67	0,09
0/22	21,70	21,54	0,16
-5/20	19,66	19,60	0,06

<b>HJØRNE</b>			
Indvendige overfladetemperaturer (°C) i hjørne:			
-12/20	17,64	17,64	0
-12/21	18,57	18,57	0
0/18	16,67	16,67	0
0/22	20,38	20,38	0
-5/20	18,16	18,16	0
Indvendige overfladetemperaturer (°C) 1 meter ude:			
-12/20	18,87	18,87	0
-12/21	19,84	19,83	0,01
0/18	17,36	17,36	0
10/22	21,22	21,22	0
-5/20	19,12	19,12	0



### 3. UDVÆLGELSE AF HYPPIGT FOREKOMMENDE KULDEBROER I BYGNINGSKONSTRUKTIONER

Erfaringer fra lavenergihusene i Hjortekær har vist, at der bør gøres en særlig indsats ved fundamentsudformninger, [4]. I de sidste 10 til 20 år er de fleste enfamiliehuse i Danmark bygget i én etage uden kælder og flertallet af disse med terrændæk. Fra et termisk synspunkt er fundamentet traditionelt et svagt punkt, især i forbindelse med terrændæk. Samlinger mellem vægge og underbygning resulterer ofte i alvorlige kuldebroer, og om vinteren er det almindeligt at se sne, der ligger tæt ved huset, smelte hurtigt også på nordvægge. Da denne form for kuldebro er sparsomt beskrevet i eksisterende litteratur, er den i nærværende rapport udførligt undersøgt med diverse forskellige udformninger af gulv/væg/fundamentsamlinger.

Adskillige vindue-/vægsamlinger er desuden undersøgt, idet vinduerne i sig selv er den svageste del af klimaskærmen, og ved indbygning i vægge opstår der en kuldebro.

Ydervægshjørner må, hvis der beregnes efter indvendige mål (som det fx sker i DS 418, [1]), betegnes som kuldebroer, og tre forskellige vægtyper er gennemregnet.

Til sammenligning er beregningsresultater fra andre rapporter inddraget, så vidt det er muligt.

Der kunne nævnes adskillige andre former for kuldebroer, men en udvælgelse har måttet finde sted. Grunden til, at kuldebroer i ydervægge, f.eks. tilslutninger til indervægge, altaner og lign., ikke er medtaget her, er, at disse er udførligt beskrevet i adskillig litteratur f.eks. [2], [3], [5] og [6].

For hver konstruktion er det endimensionale varmetab plus det ekstra varmetab på grund af kuldebroen blevet beregnet. Desuden er der angivet minimumtemperaturer og grænse for evt. kondensrisiko. Kondensation på en overflade indtræffer, når temperaturer bliver lavere end luftens dugpunkt, [7].

I omstående tabel angives dugpunktet for forskellige luftfugtigheder ved en lufttemperatur på 20°C.

Tabel 3. Dugpunkt ved forskellige luftfugtigheder, hvor indetemperaturen er 20°C.

Luftens relative fugtighed	Dugpunkt
%	°C
30	1,9
40	6,0
50	9,5
60	12,2
70	14,4
80	16,5

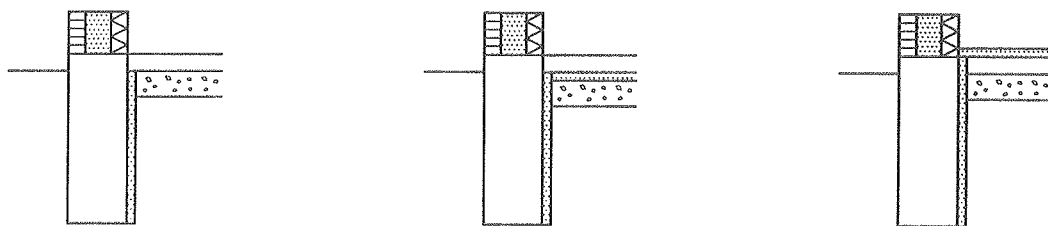
I huse med normal opvarmning varierer luftens relative fugtighed med udetemperaturen og afhænger desuden af ventilationens størrelse og beboervaner. Normalt er luftfugtigheden indendørs ret lav om vinteren (30%-50%), og det vil være rimeligt at forlange, at konstruktionen er kondensfri op til 40-45 % RH i indeluften.

## 4. RESULTATER - VARMETAB OG TEMPERATURER

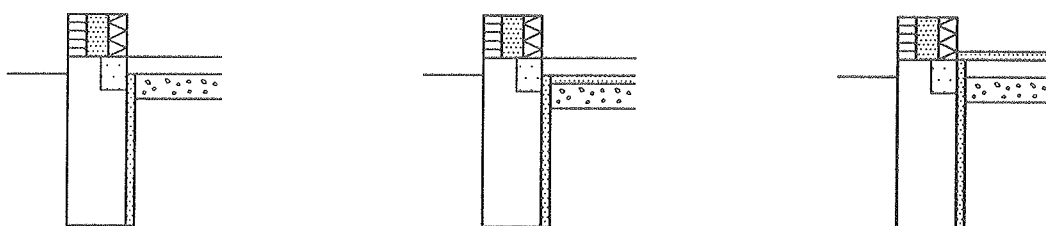
### 4.1 Fundamenter og terrændæk

En undersøgelse af følgende hovedeksempler er valgt: et betonfundament, et betonfundament med en smal letbeton blok ( $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$ ) og et betonfundament med 2 skifter letbeton blokke i fuld bredde ( $\lambda = 0,38 \text{ W/mK}$ ). Alle tre eksempler er gennemregnet med forskellige tykkelser af indvendig, lodret kantisolering (hhv. 0, 25, 50 og 75 mm;  $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$ ) og med vandret isolering hhv. over og under gulv ( $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$ ). Analyser er gennemført således, at den indvendige kantisolering dels afbryder betondækket, dels stopper lige under betonlaget. Væggen består i alle eksempler af 110 mm tegl udvendig ( $\lambda = 0,78 \text{ W/mK}$ ) og 110 mm gasbeton indvendig ( $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$ ) - derimellem 125 mm isolering ( $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$ ). Gulvkonstruktionen består af 100 mm beton ( $\lambda = 1,6 \text{ W/mK}$ ) og 150 mm singels ( $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$ ). Øverst er en 25 mm gulvbelægning ( $\lambda = 0,106 \text{ W/mK}$ ) svarende til en modstand på  $0,236 \text{ m}^2\text{K/W}$ . På figur 5 og 6 ses en oversigt over de gennemregnede modeller.

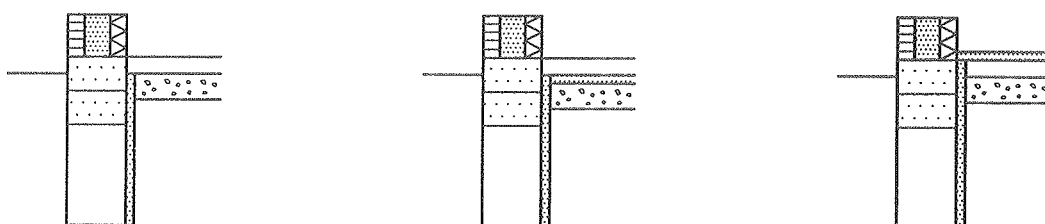
På grund af kuldebrovirkninger opnås lavere overfladetemperaturer, jo tættere man kommer til hjørnet mellem gulv og væg. Med fastholdt indvendig overgangsisolans kan overfladetemperaturerne omsættes til varmestrømsintensiteter. En fastholdt overgangsisolans er valgt for at kunne sammenligne de enkelte eksempler, selv om litteraturen beskriver øget isolans i hjørner med tilsvarende lavere indvendige overfladetemperaturer. Beregningsresultaterne ses på de efterfølgende tabeller (tabel 4-tabel 8 incl.). Til hver tabel hører en figur, der viser de gennemregnede eksempler.



Model 1-21 (Tabel 4)

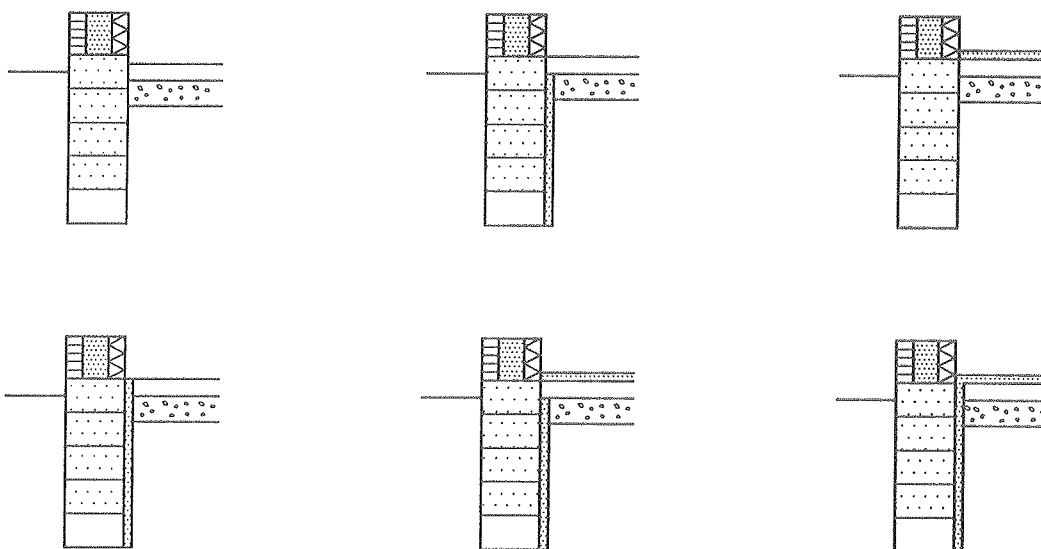


Model 22-42 (Tabel 5)

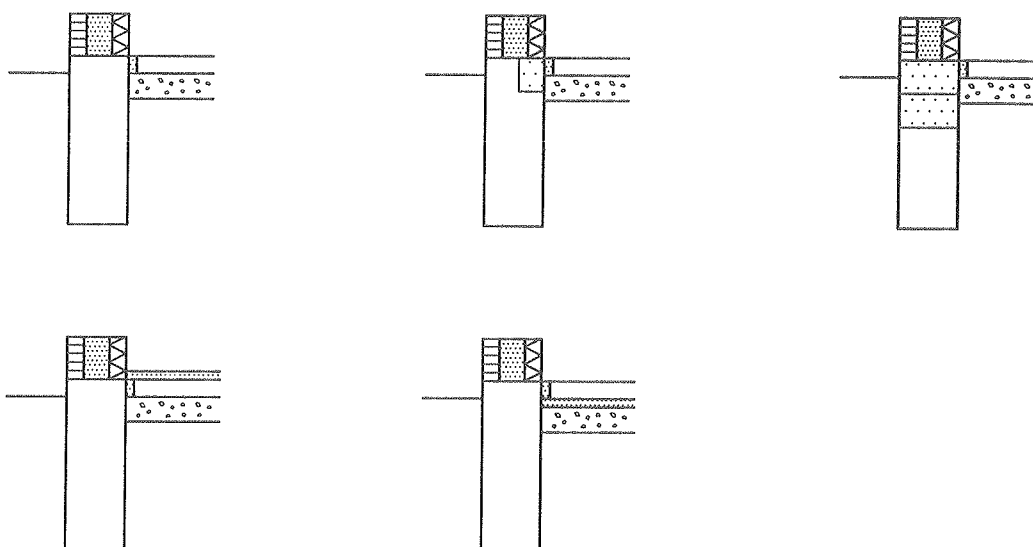


Model 43-63 (Tabel 6)

Figur 5. Gulv- og fundamentkonstruktioner. Alle modeller er gennemregnet med hhv. 0, 25, 50 og 75 mm bred indvendig kantisolering plus med varierende højde af denne.



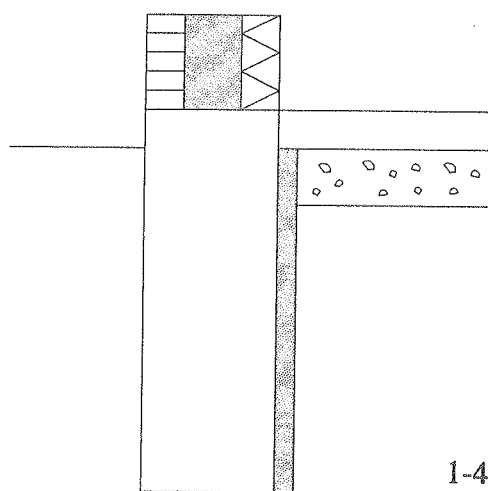
Model 64-69 (Tabel 7)



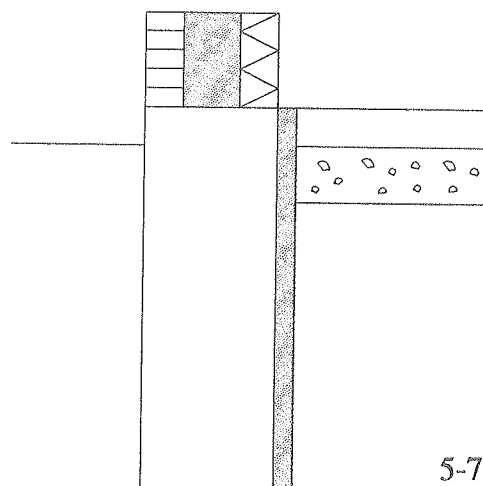
Model 70-84 (Tabel 8)

Figur 6. Gulv- og fundamentkonstruktioner. Model 70-84 er alle gennemregne med hhv. 25, 50 og 75 mm bred indvendig afbrydelse af betondækket.

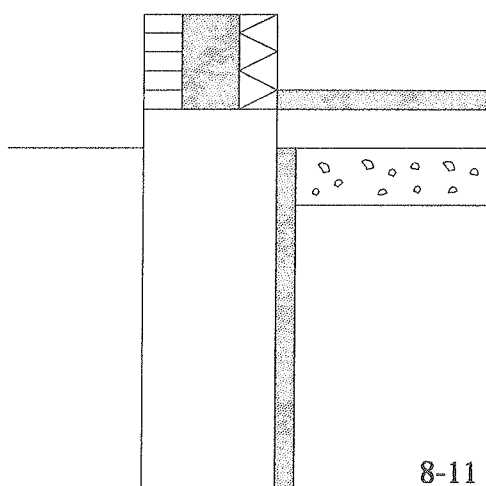




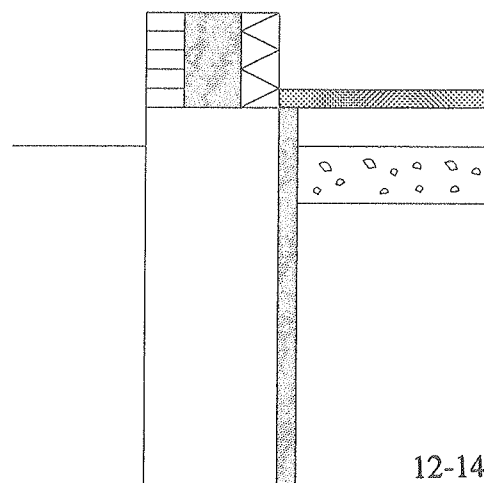
1-4



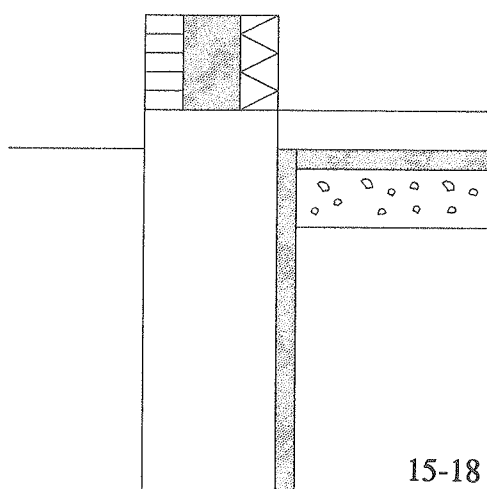
5-7



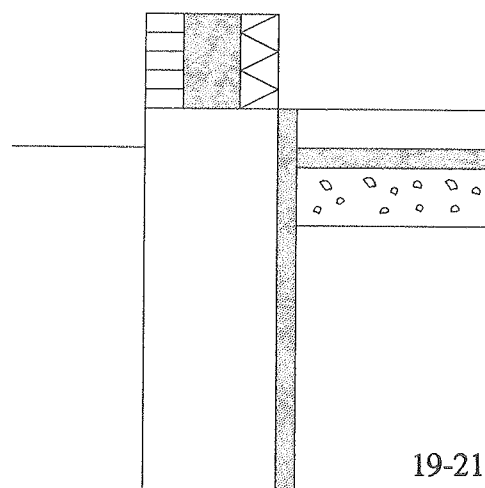
8-11



12-14



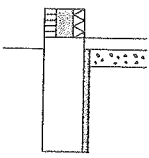
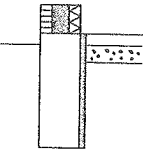
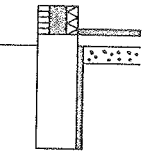
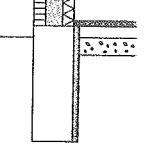
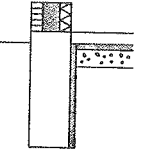
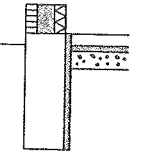
15-18

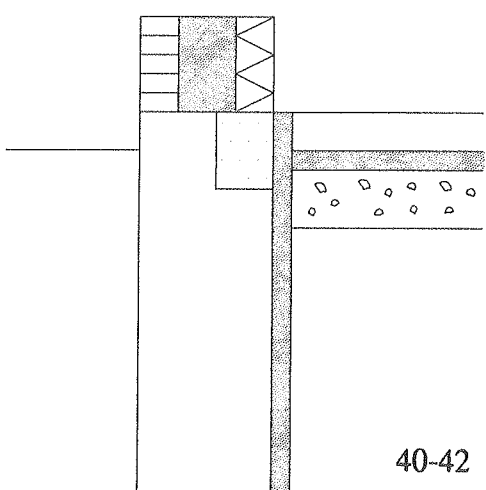
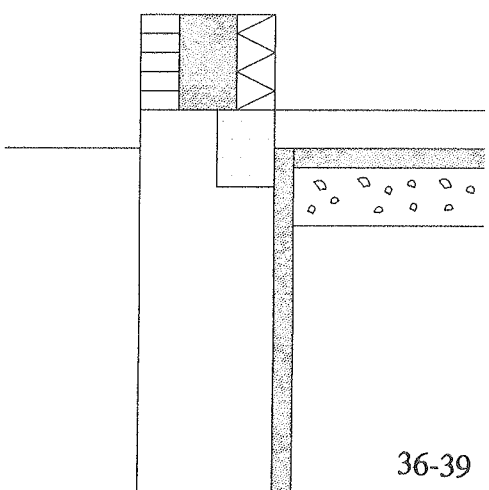
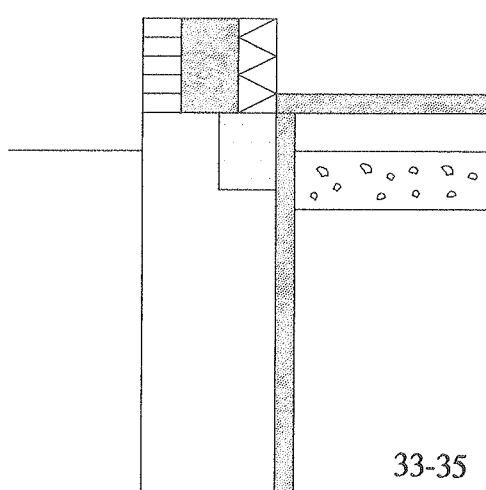
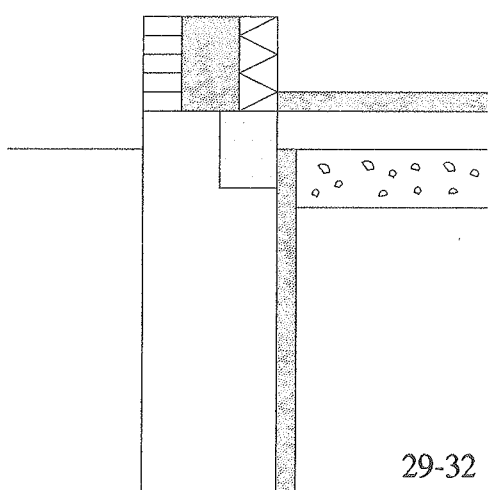
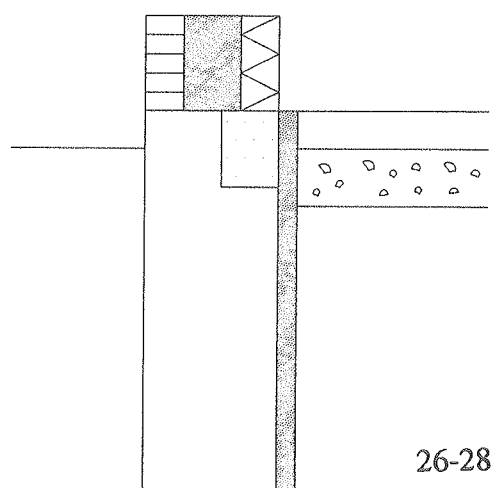
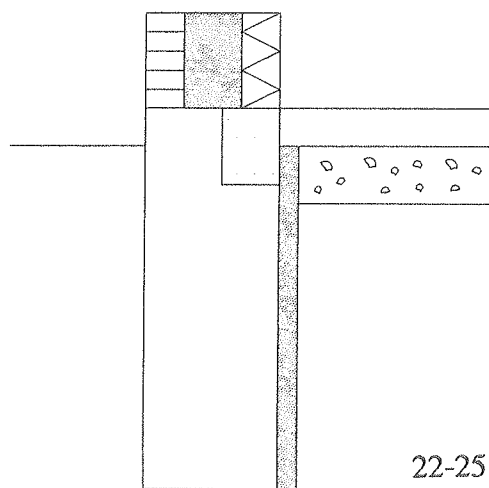


19-21

Figur 7. Betonfundamenter.

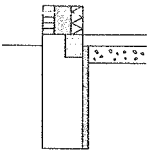
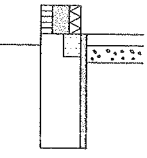
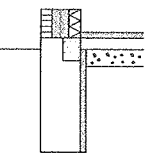
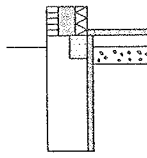
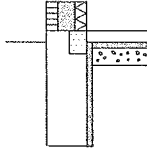
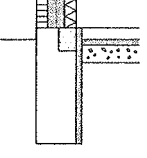
Tabel 4. Varmestrømme gennem gulv og betonfundament, Q-1 er endimensional varme-strøm gennem gulvet,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab grundet fundamentet,  $t_{\min}$  er den mindste, indvendige overfladetemperatur.

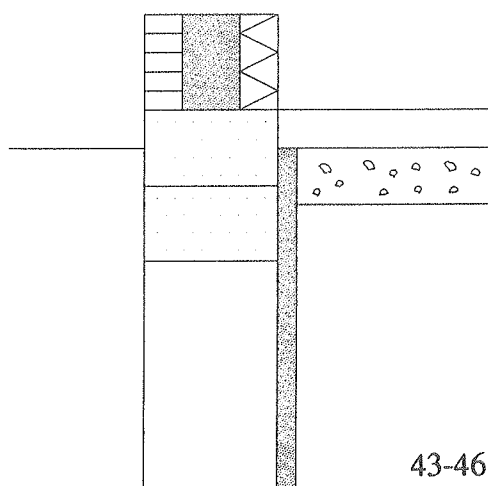
Nr.	Model	Kant-isolering	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
		mm	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/m <sup>2</sup>	W/mK	°C
1		0	4,07	20,63	4,13	0,64	12,7
2		25	4,07	19,70	3,94	0,62	12,6
3		50	4,07	19,26	3,85	0,60	12,5
4		75	4,07	19,01	3,80	0,59	12,5
5		25	4,07	16,19	3,24	0,51	11,3
6		50	4,07	15,15	3,03	0,47	10,9
7		75	4,07	14,49	2,09	0,45	10,7
8		0	2,83	12,11	2,42	0,38	15,0
9		25	2,83	11,46	2,29	0,36	14,9
10		50	2,83	11,24	2,25	0,35	14,8
11		75	2,83	11,07	2,21	0,35	14,8
12		25	2,83	10,35	2,07	0,32	14,7
13		50	2,83	9,71	1,94	0,30	14,5
14		75	2,83	9,47	1,89	0,30	14,4
15		0	2,83	17,87	3,57	0,56	12,7
16		25	2,83	17,39	3,48	0,54	12,6
17		50	2,83	17,24	3,45	0,54	12,5
18		75	2,83	17,16	3,43	0,54	12,5
19		25	2,83	13,65	2,73	0,43	11,2
20		50	2,83	12,57	2,51	0,39	10,8
21		75	2,83	11,97	2,39	0,37	10,6



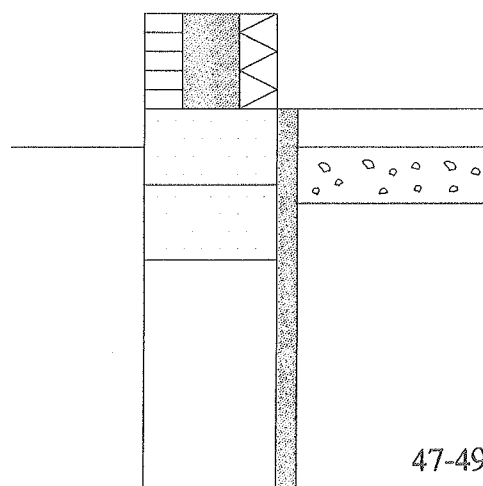
Figur 8. Betonfundamenter med en smal blok af letbeton.

Tabel 5. Varmestrømme gennem gulv og betonfundament med en smal blok letbeton. Q-1 er endimensional varmemstrøm gennem gulvet,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab grundet fundamentet,  $t_{\min}$  er den mindste, indvendige overfladetemperatur.

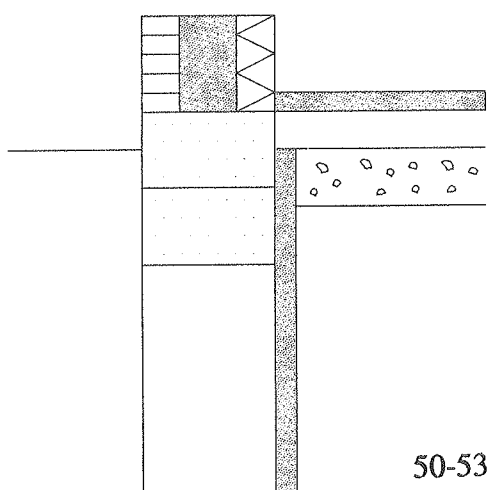
Nr.	Model	Kant-isolering	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
		mm	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/m <sup>2</sup>	W/mK	°C
22		0	4,07	15,61	3,12	0,49	15,5
23		25	4,07	14,13	2,83	0,44	15,6
24		50	4,07	13,49	2,70	0,42	15,6
25		75	4,07	13,11	2,62	0,41	15,6
26		25	4,07	13,28	2,66	0,41	15,1
27		50	4,07	12,25	2,45	0,38	14,9
28		75	4,07	11,67	2,33	0,36	14,7
29		0	2,83	9,94	1,99	0,31	16,0
30		25	2,83	9,15	1,83	0,29	16,0
31		50	2,83	8,83	1,77	0,28	16,0
32		75	2,83	8,67	1,73	0,27	16,0
33		25	2,83	8,86	1,68	0,26	15,9
34		50	2,83	8,38	1,62	0,25	15,8
35		75	2,83	8,12	1,62	0,25	15,8
36		0	2,83	11,96	2,39	0,37	15,8
37		25	2,83	11,28	2,26	0,35	15,7
38		50	2,83	11,06	2,21	0,35	15,7
39		75	2,83	10,85	2,17	0,34	15,7
40		25	2,83	10,20	2,04	0,32	15,2
41		50	2,83	9,58	1,92	0,30	14,9
42		75	2,83	9,07	1,81	0,28	14,7



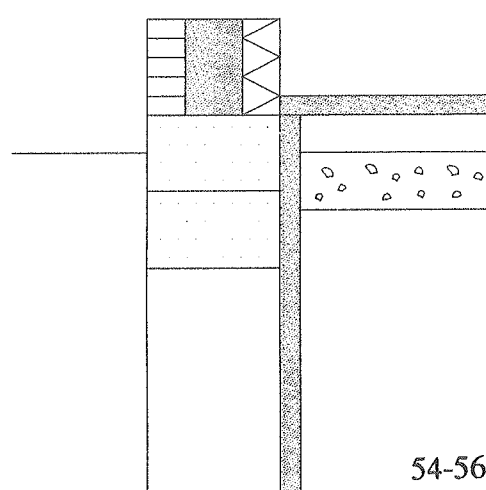
43-46



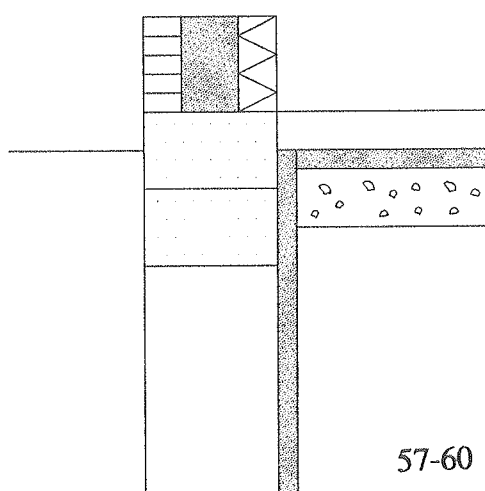
47-49



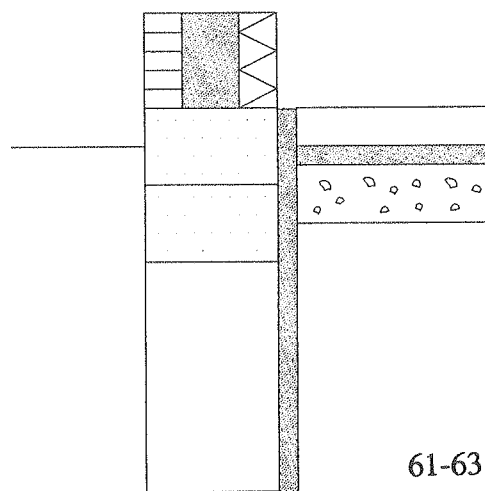
50-53



54-56



57-60

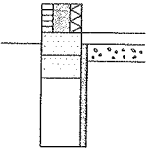
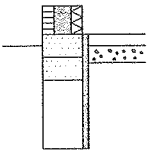
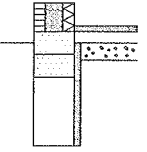
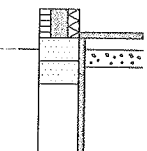
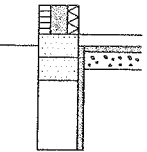
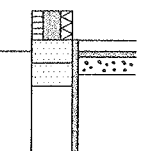


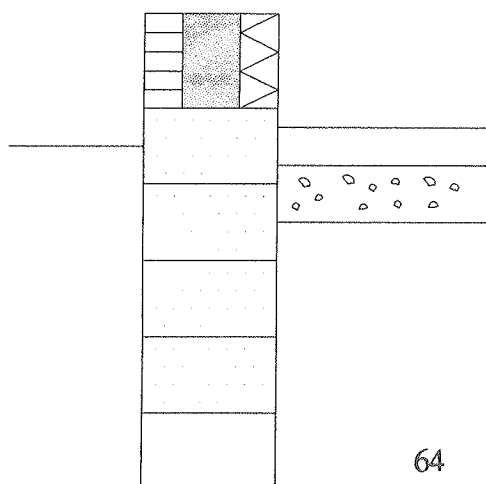
61-63

Figur 9. Betonfundamenter med 2 skifter af letbeton.

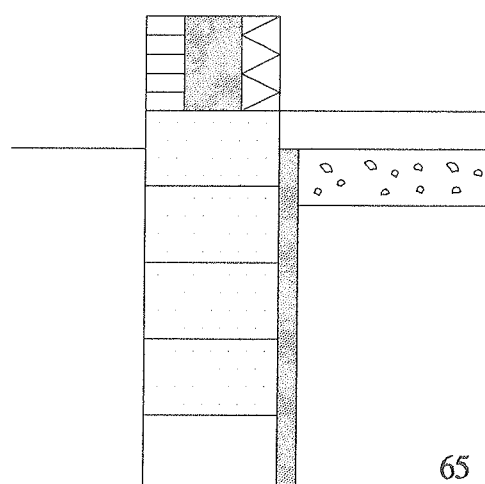


Tabel 6. Varmestrømme gennem gulv og betonfundament med 2 skifter letbeton. Q-1 er endimensional varmemstrøm gennem gulvet,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab grundet fundamentet,  $t_{\min}$  er den mindste, indvendige overfladetemperatur.

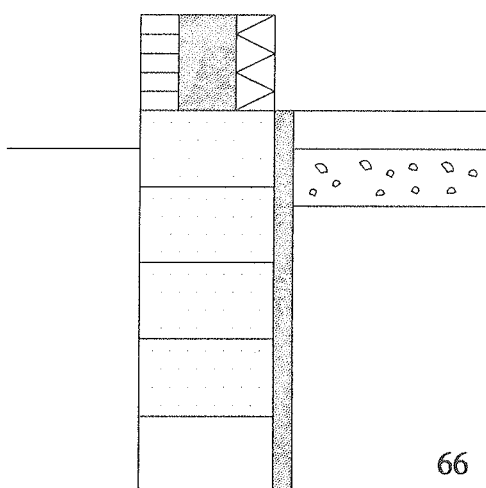
Nr.	Model	Kant-isolering	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
		mm	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/m <sup>2</sup>	W/mK	°C
43		0	4,07	14,18	2,84	0,44	15,8
44		25	4,07	13,15	2,63	0,41	15,8
45		50	4,07	12,79	2,56	0,40	15,8
46		75	4,07	12,46	2,49	0,39	15,8
47		25	4,07	12,30	2,46	0,38	15,1
48		50	4,07	11,65	2,33	0,36	14,8
49		75	4,07	11,06	2,21	0,35	14,6
50		0	2,83	9,15	1,83	0,29	16,2
51		25	2,83	8,48	1,70	0,27	16,2
52		50	2,83	8,33	1,67	0,26	16,2
53		75	2,83	8,12	1,62	0,25	16,2
54		25	2,83	8,36	1,67	0,26	16,1
55		50	2,83	7,82	1,56	0,24	16,0
56		75	2,83	7,65	1,53	0,24	15,9
57		0	2,83	11,16	2,23	0,35	15,9
58		25	2,83	10,66	2,13	0,33	15,9
59		50	2,83	10,45	2,09	0,33	15,9
60		75	2,83	10,38	2,08	0,32	15,9
61		25	2,83	9,55	1,91	0,30	15,1
62		50	2,83	9,03	1,81	0,28	14,8
63		75	2,83	8,76	1,75	0,27	14,6



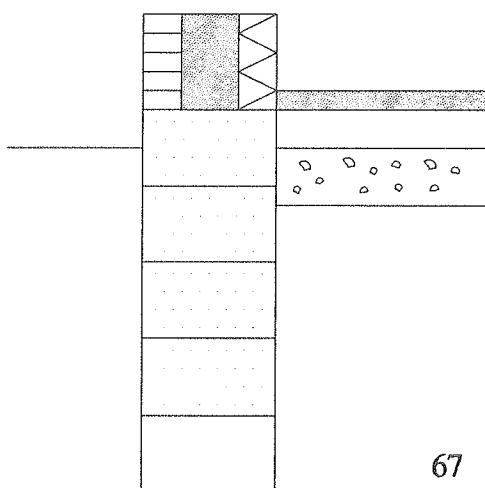
64



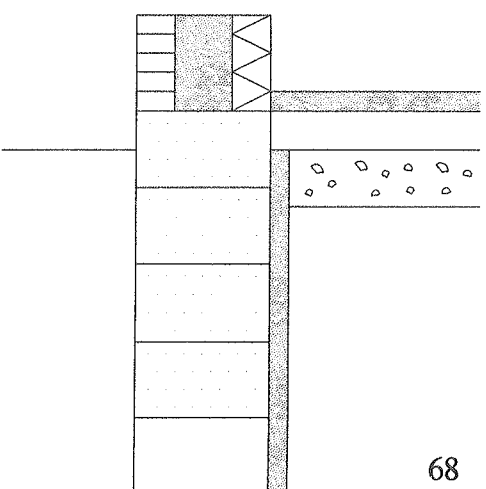
65



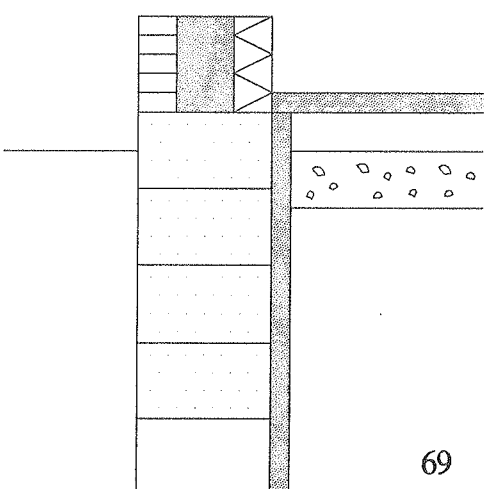
66



67



68

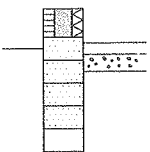
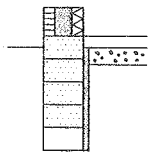
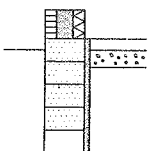
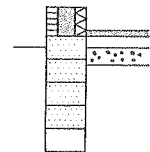
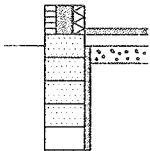
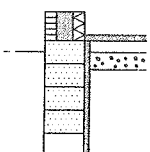


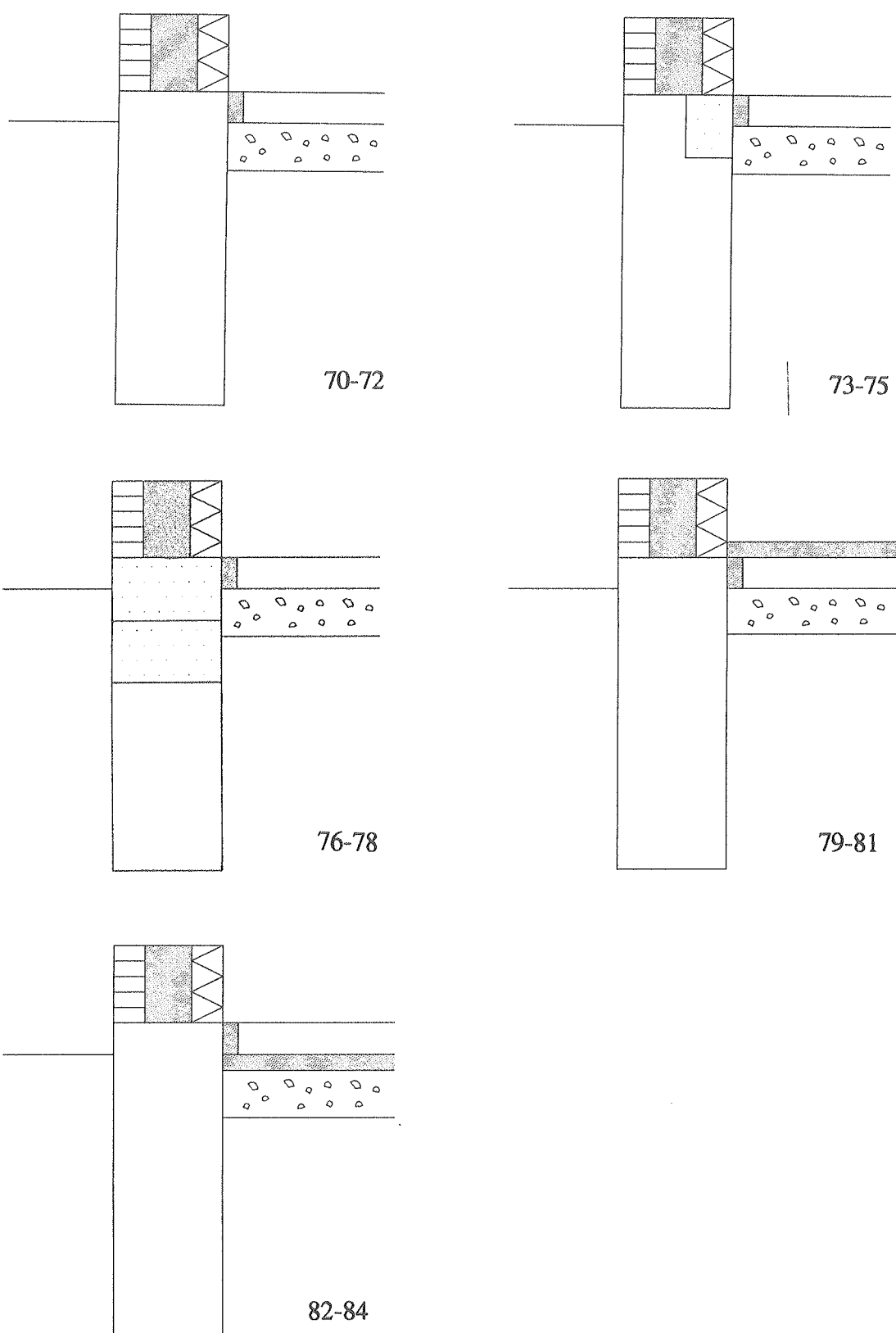
69

Figur 10. Fundamenter med fire skifter letbeton.

I tabel 7 er varmemstrømmen gennem gulv og fundament med fire skifter letbeton beregnet med forskellig gulvisolering og forskellige længder af kantisolering (tykkelse 50 mm).

Tabel 7. Varmestrømme gennem gulv og fundament med fire skifter letbeton. Q-1 er endimensional varmestrøm gennem gulvet,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab grundet fundamentet,  $t_{\min}$  er den mindste, indvendige overfladetemperatur.

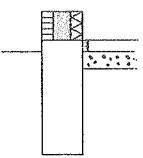
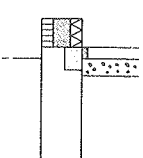
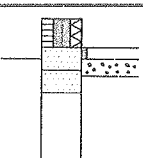
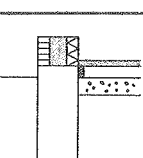
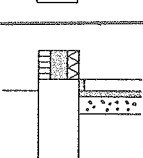
Nr.	Model	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
		W/m <sup>2</sup>	W/m	W/m <sup>2</sup>	W/mK	°C
64		4,07	13,02	2,61	0,41	15,9
65		4,70	12,15	2,43	0,38	15,9
66		4,70	11,02	2,21	0,35	14,8
67		2,83	8,37	1,68	0,26	16,3
68		2,83	7,97	1,60	0,25	16,3
69		2,83	7,62	1,52	0,24	16,0



Figur 11. Afbrydelse af betonlaget ved forskellige fundamentskonstruktioner.

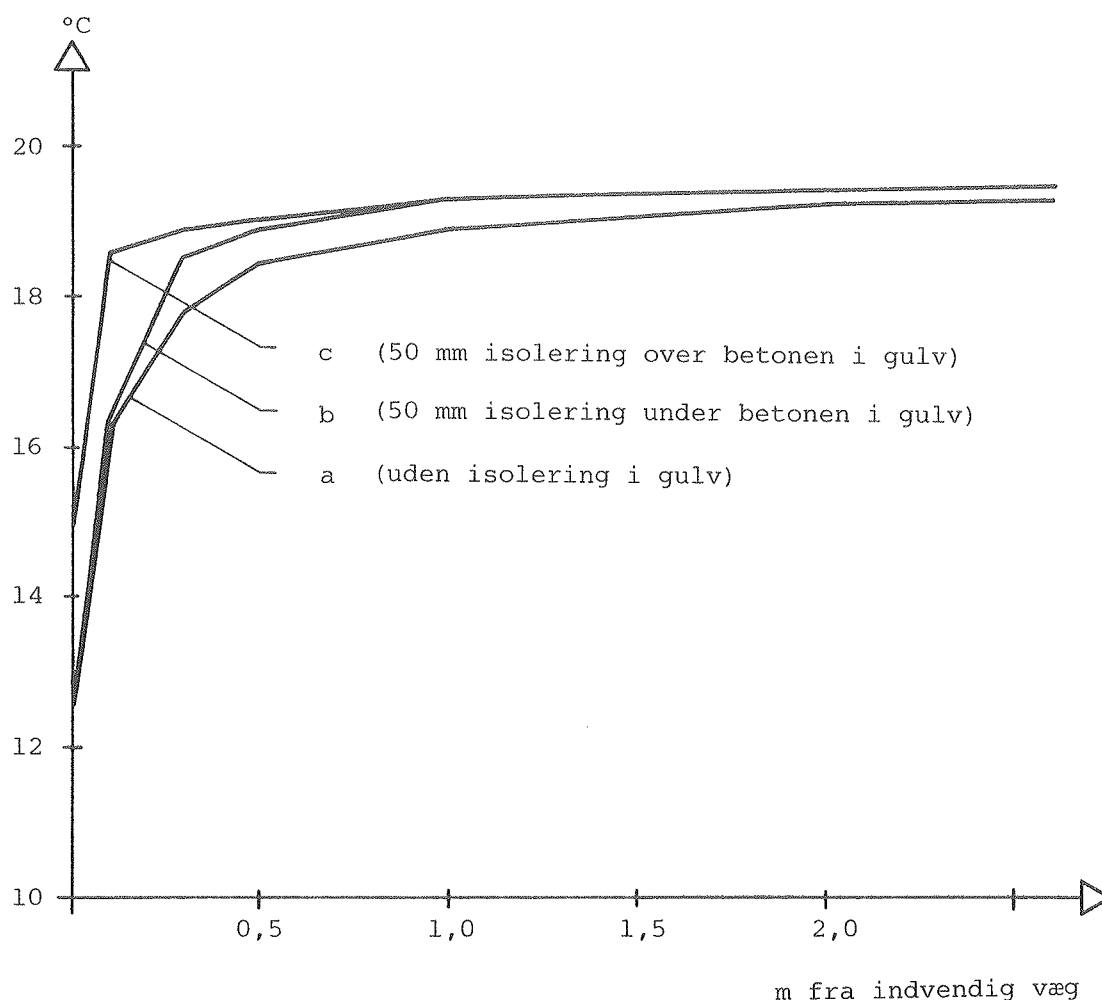
I tabel 8 er varmestrømmen beregnet, når der er en afbrydelse af betonlaget ved fundament/gulvsamling.

Tabel 8. Varmestrømme gennem gulv og fundament ved en afbrydelse af betonlaget ved fundament/gulvsamling. Q-1 er endimensional varmestrøm gennem gulvet,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab grundet fundamentet,  $t_{\min}$  er den mindste, indvendige overfladetemperatur.

Nr.	Model	Kant-isolering	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
		mm	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/m <sup>2</sup>	W/mK	°C
70		25	4,07	18,17	3,63	0,57	11,7
71		50	4,07	17,49	3,50	0,55	11,4
72		75	4,07	16,93	3,29	0,53	11,3
73		25	4,07	14,95	2,99	0,47	15,2
74		50	4,07	14,63	2,93	0,46	15,1
75		75	4,07	14,48	2,90	0,45	15,0
76		25	4,07	13,55	2,71	0,42	15,2
77		50	4,07	13,24	2,65	0,41	15,0
78		75	4,07	13,00	2,60	0,41	14,9
79		25	2,83	11,28	2,26	0,35	14,8
80		50	2,83	11,00	2,20	0,34	14,7
81		75	2,83	10,88	2,18	0,34	14,7
82		25	2,83	14,18	2,84	0,44	11,5
83		50	2,83	13,44	2,69	0,42	11,1
84		75	2,83	12,87	2,57	0,40	11,0

På figur 12 ses gulvets indvendige overfladetemperaturer optegnet under forudsætning af et betonfundament hhv. uden isolering i gulvet, med 50 mm øverst og med 50 mm nederst (model 1, 8 og 15).





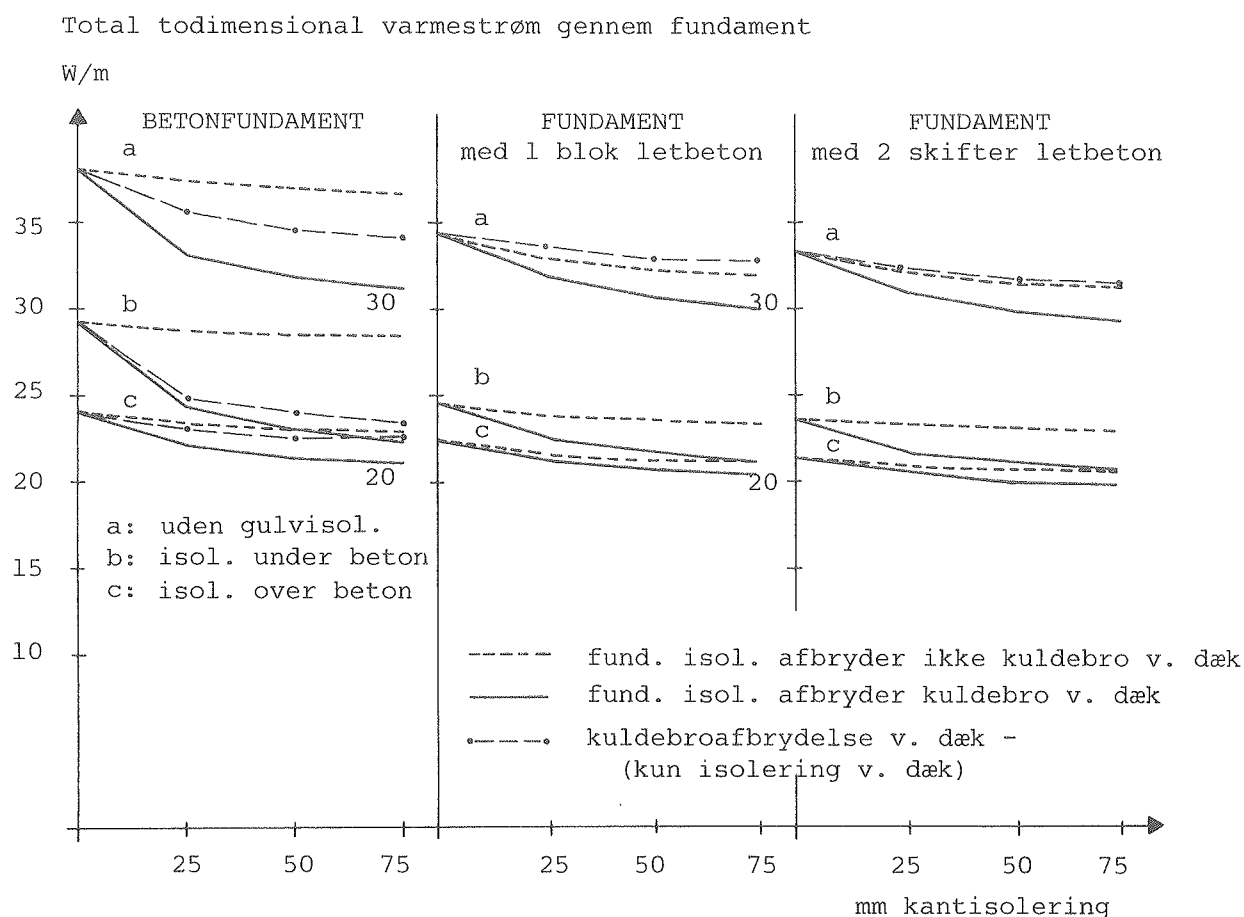
Figur 12. Gulvets indvendige overfladetemperaturer ved et betonfundament uden kantisolering. ( $t_i = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_u = -12^\circ\text{C}$ ).

Ved betragtning af de indvendige overfladetemperaturer i tabel 4 ses, at ved betonfundamenter med gulvisoleringen placeret under betonlaget, når temperaturen ned på  $10-11^\circ\text{C}$  i hjørnet, når der benyttes indvendig kantisolering. Dette betyder, at når den indvendige relative fugtighed er ca. 50% og derover, vil der opstå kondensproblemer. Jo bredere kantisoleringen bliver, jo lavere bliver temperaturen i hjørnet. Temperaturen bliver endnu lavere, hvis kantisoleringen også afbryder betonlaget i gulvet.

Ved fundamenter med letbetonblokke er der ingen problemer, da den laveste indvendige temperatur ligger på ca.  $15^\circ\text{C}$ , så den relative fugtighed skal over 70%, før der bliver kondens.

Det ses, at det er den første afbrydelse, der giver mest. Om der er to eller fire letbetonblokke giver ikke den store forskel i varmetabet.

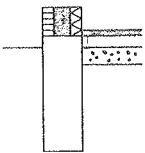
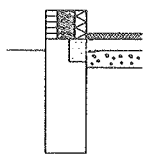
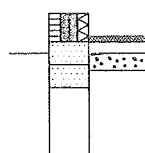
På figur 13 ses beregningsresultaterne illustreret grafisk. Det todimensionale varmetab gennem gulvet i W/m er afbildet mod antal mm kantisolering for hhv. et betonfundament, et fundament med 1 smal blok af letbeton og med 2 skifter letbeton.



Figur 13. Det todimensionale varmetab gennem gulvet versus antal mm kantisolering illustreret grafisk.

Der er yderligere beregnet tre eksempler, hvor udetemperaturen er sat til 4°C (20°C inde), som er middeludetemperaturen for den traditionelle fyringssæson.

Tabel 9. Varmestrøm gennem gulv og fundament beregnet med  $t_u = 4^\circ\text{C}$ ,  $t_i = 20^\circ\text{C}$  og  $t_{\text{jord}} = 8^\circ\text{C}$ .

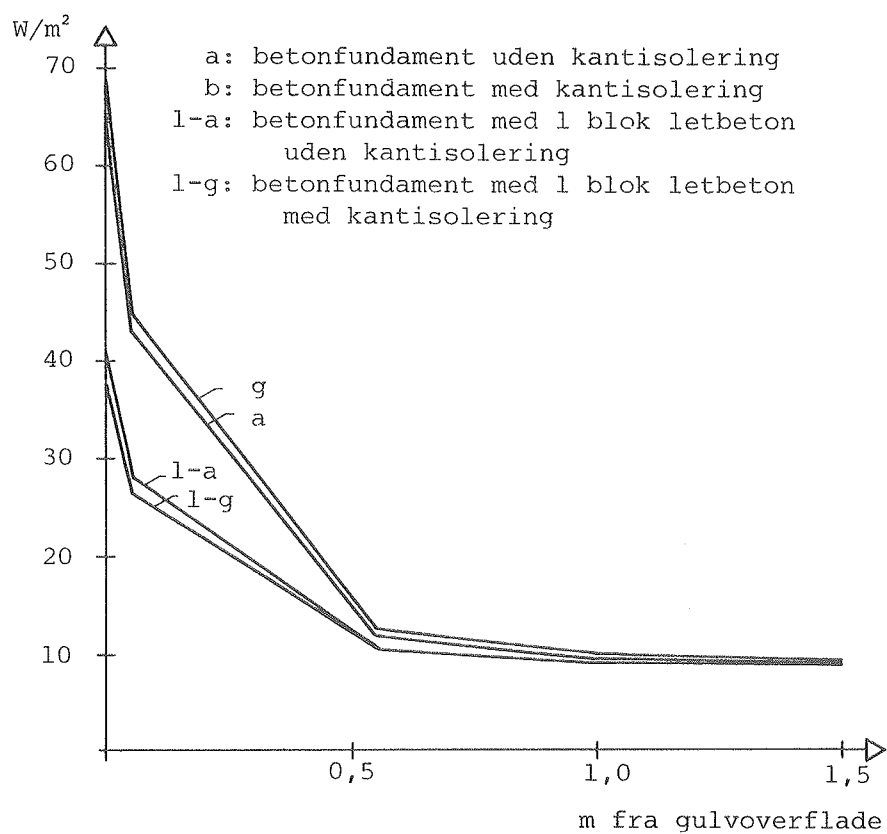
Model	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$
	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/m <sup>2</sup>	W/mK
	2,83	4,95	0,99	0,31
	2,83	3,91	0,78	0,25
	2,83	3,69	0,74	0,23

#### 4.1.1 Kuldebrovirkningens udstrækning ved forskellige vægtyper

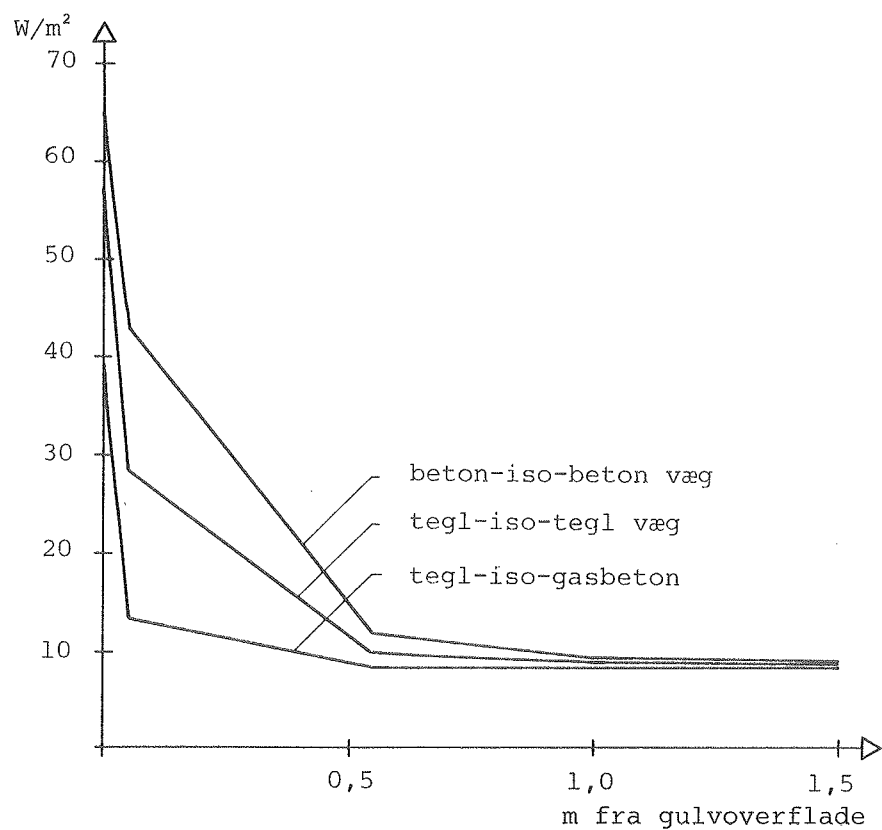
Det er ikke muligt at finde en enkelt størrelse, som karakteriserer en kuldebro. Det er altid en kombination af kuldebroen og de tilstødende konstruktioner, som må betragtes samlet. Der er derfor lavet en undersøgelse af, hvor langt virkningen af kuldebroen når ind i hhv. væg og gulv ved en fundamentskonstruktion med forskellige vægtyper. På de efterfølgende figurer er varmemstrømmen optegnet med hhv. en tegl-isolering-gasbeton væg (110 mm tegl, 125 mm isolering og indv. 110 mm gasbeton), en tegl-isolering-tegl væg (110 mm tegl, 125 mm isolering og 110 mm tegl) og en beton-isolering-beton væg (80 mm beton, 125 mm isolering og indv. 120 mm beton). Væggene er optegnet på figur 17-19. I alle beregningerne er gulvet isoleret med 50 mm isolering placeret oven på betonen. I de beregninger, hvor der er indvendig kantisolering, afbrydes betonlaget. I nedenstående tabel er varmemstrømmene angivet, og det ekstra varmetab er delt op i 2 dele hidrørende dels fra væggen, dels fra gulvet.

Tabel 10. Varmestrømme gennem væg/gulv/fundamentsamling med forskellige væg- og fundamentstyper, relateret til gulvarealet eller m fundament. Q-1 er det endimensionale varmetab dels gennem væggen og dels gennem gulvet.  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab grundet fundamentet hidrørende dels fra væggen og dels fra gulvet.

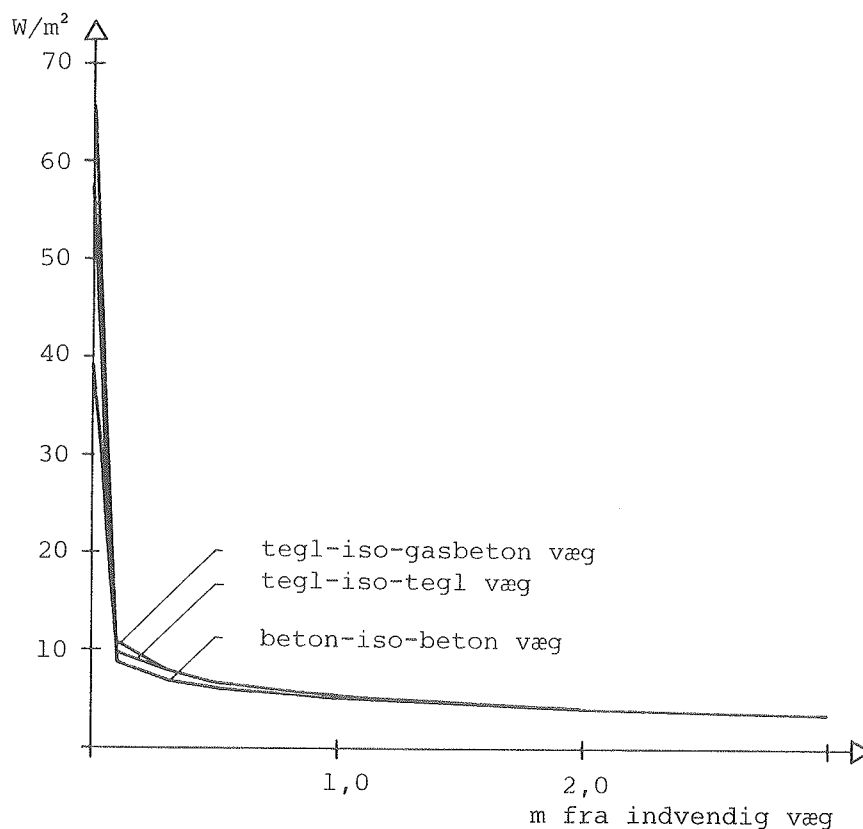
Kant- isolering	Fundament	Q-1 væg	Q-1 gulv	$\Delta Q(2)$ væg	$\Delta Q(2)$ gulv
		W/m <sup>2</sup> W/m	W/m <sup>2</sup> W/m	W/m <sup>2</sup> W/m	W/m <sup>2</sup> W/m
Tegl-isolering-gasbeton					
0 mm	beton	7,7 12,0	2,8 14,2	1,6 2,5	1,9 9,6
0 mm	do+1 blok letbeton	7,7 12,0	2,8 14,2	1,2 1,9	1,6 8,1
50 mm	beton	7,7 12,0	2,8 14,2	1,7 2,7	1,4 7,0
50 mm	do+1 blok letbeton	7,7 12,0	2,8 14,2	1,3 2,0	1,3 6,4
Tegl-isolering-tegl					
0 mm	beton	8,7 13,5	2,8 14,2	4,6 7,1	1,8 9,0
0 mm	do+1 blok letbeton	8,7 13,5	2,8 14,2	2,9 4,6	1,5 7,6
50 mm	beton	8,7 13,5	2,8 14,2	5,0 7,7	1,4 7,0
50 mm	do+1 blok letbeton	8,7 13,5	2,8 14,2	2,8 4,4	1,2 6,1
Beton-isolering-beton					
0 mm	beton	9,2 14,2	2,8 14,2	8,0 12,4	1,7 8,5
0 mm	do+1 blok letbeton	9,2 14,2	2,8 14,2	4,5 7,0	1,4 7,1
50 mm	beton	9,2 14,2	2,8 14,2	8,4 13,1	1,4 6,8
50 mm	do+1 blok letbeton	9,2 14,2	2,8 14,2	4,1 6,4	1,2 6,0



Figur 14. Varmestrøm gennem beton-isolering-beton væg.



Figur 15. Varmestrøm gennem forskellige ydervægge med et betonfundament uden kantisolering og 50 mm isolering over betonlaget i gulvet.



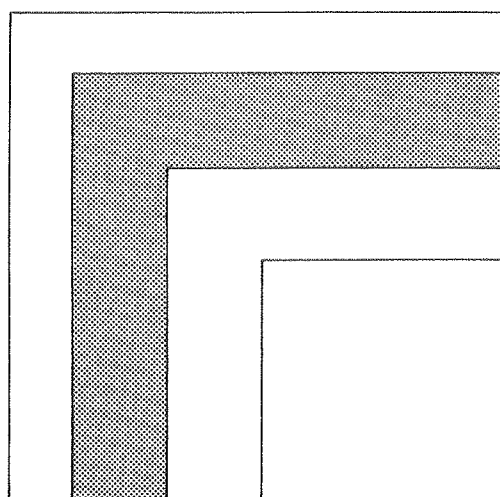
Figur 16. Varmestrøm gennem terrændæk med et betonfundament uden kantisolering og 50 mm isolering over betonlaget i gulvet.

Som det kan ses af figurerne, er kuldebrovirkningen mærkbar mindst et par meter ind fra ydervæggen uanset hvilken type ydervæg, der vælges. Kuldebrovirkningen op langs væggen spores godt en halv meter op ved teglvægge, men ved betonvæggen skal man ca. 1,5 meter op, før man får den endimensionale varmetrøm. Af tallene ses, at ved indvendig kantisolering går noget af den varme gennem gulv og fundament, man sparer, ud gennem væggen i stedet. Det er i stedet meget mere effektivt at indsætte blokke af letbeton i fundamentet, hvilket ses af tabelresultaterne.

## 4.2 Hjørner

Ydervægshjørner betragtes som kuldebroer, hvis man sammenligner med en lige væg af samme længde som hjørnets indvendige mål, hvilket er gjort i det følgende. Ved beregninger udført efter DS 418, [1], benyttes også indvendige mål. Sammenligner man varmetrømmen med hjørnets udvendige mål, vil hjørnet virke som ekstra isolering, men i begge tilfælde opnås lavere overfladetemperatur end for det lige vægstykke.

Som eksempler er de tre vægkonstruktioner, som blev brugt ved fundamentsanalysen, valgt.

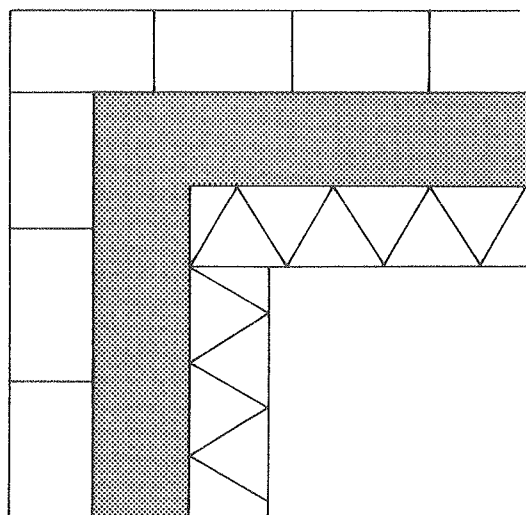


80 mm BETON ( $\lambda = 1,6 \text{ W/mK}$ )

125 mm ISOLERING ( $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$ )

120 mm BETON ( $\lambda = 1,6 \text{ W/mK}$ )

Figur 17. Vandret snit i væg af beton.

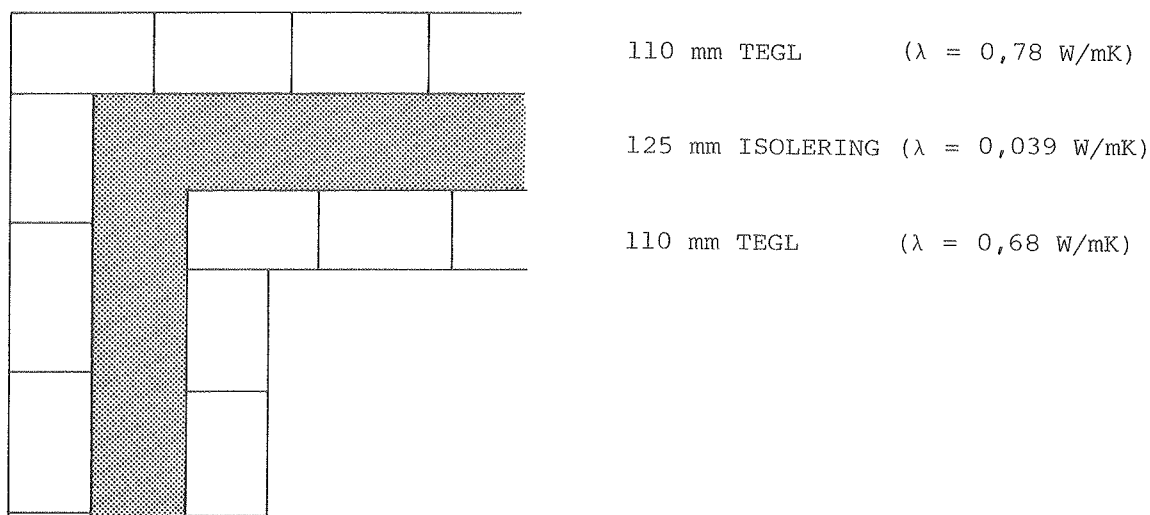


110 mm TEGL ( $\lambda = 0,78 \text{ W/mK}$ )

125 mm ISOLERING ( $\lambda = 0,039 \text{ W/mK}$ )

110 mm GASBETON ( $\lambda = 0,18 \text{ W/mK}$ )

Figur 18. Vandret snit i skalmursvæg med gasbeton inderst.



Figur 19. Vandret snit i isoleret hulmur af tegl.

Varmetabene bliver følgende, når 1 m væg fra indvendigt hjørne betragtes:

Tabel 11. Varmestrømme gennem hjørner.  $Q-1$  er det endimensionale varmetab gennem væggen.  $\Delta Q(2)$  er forskellen mellem det todimensionale og det endimensionale varmetab.

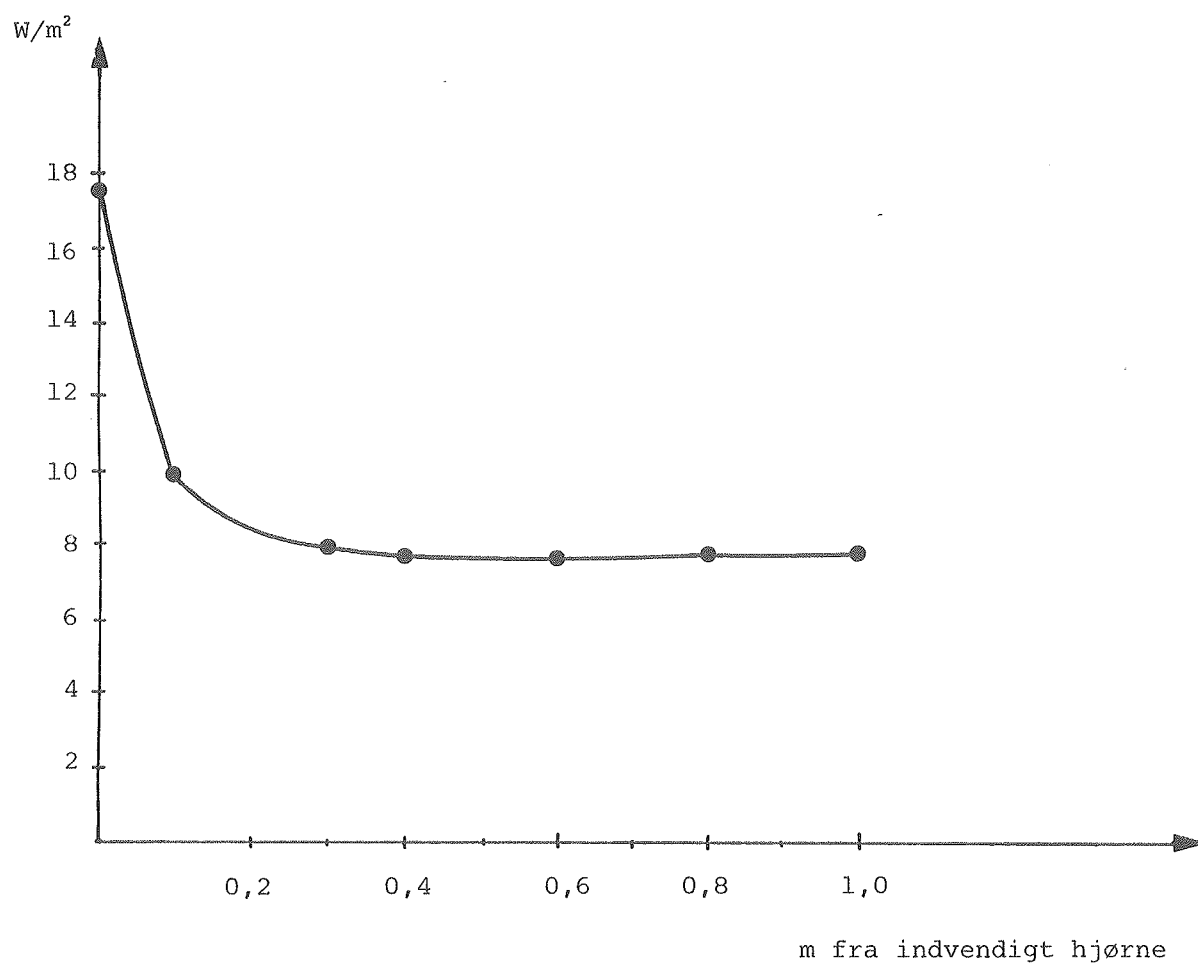
Vægtype	Q-1	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$
	W/m <sup>2</sup>	W/m	W/mK
Tegl-isolering-gasbeton	7,74	1,66	0,052
Tegl-isolering-tegl	8,70	2,21	0,069
Beton-isolering-beton	9,14	2,61	0,082

Sammenlignes med litteratur [2] og [3] ses, at tillægget for tilsvarende væghjørner ligger i intervallet 0,03 til 0,08 W/mK, medens nærværende beregninger giver 0,05 til 0,08 W/mK.

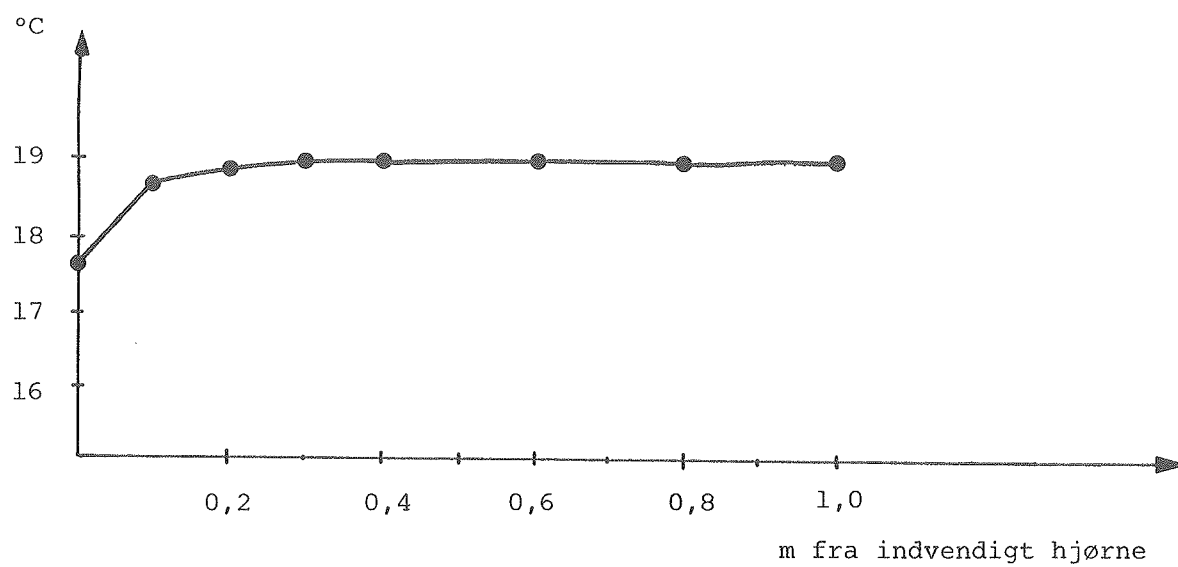
#### 4.2.1 Kuldebrovirkningens udstrækning

På de efterfølgende figurer ses varmemstrømme og indvendige overfladetemperaturer gennem de forskelligt opbyggede hjørnekonstruktioner optegnet.

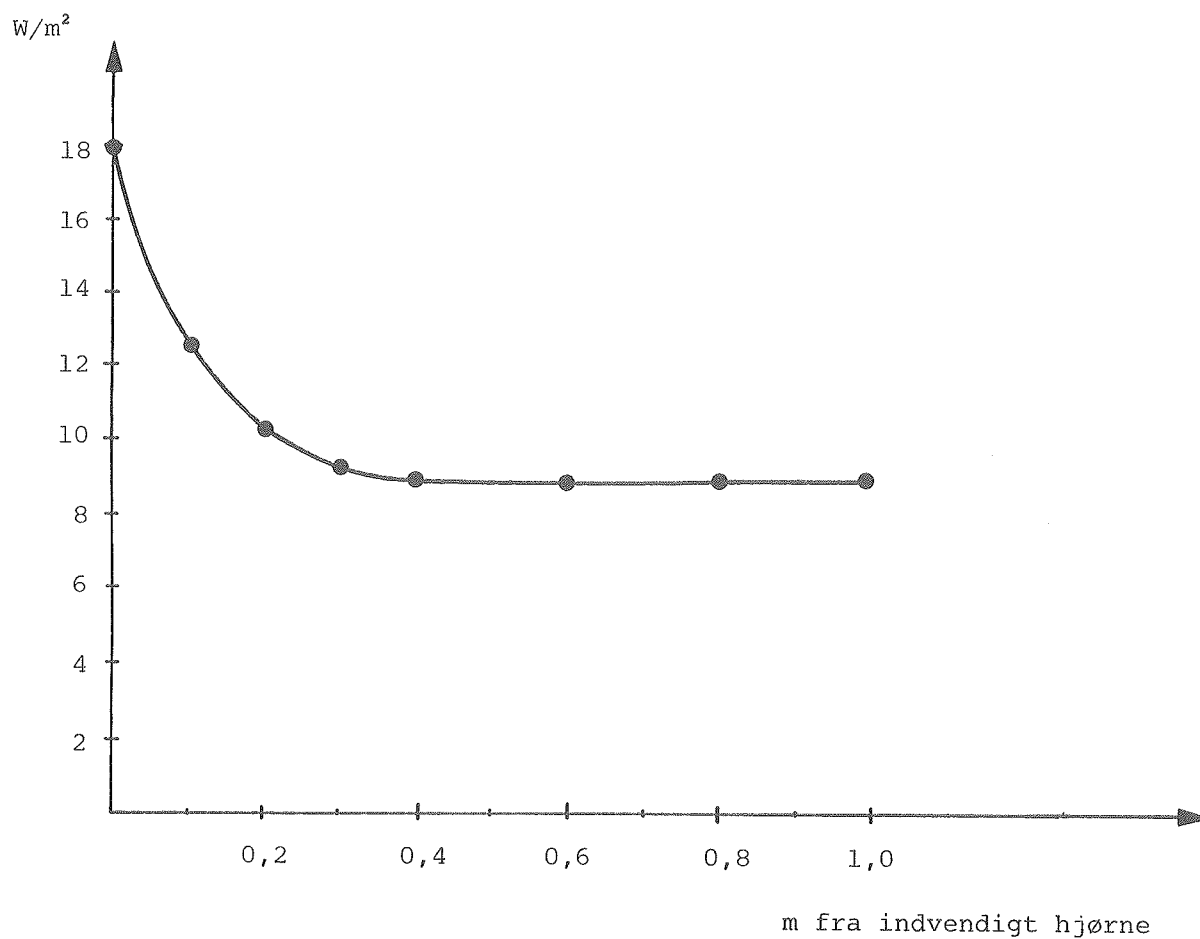




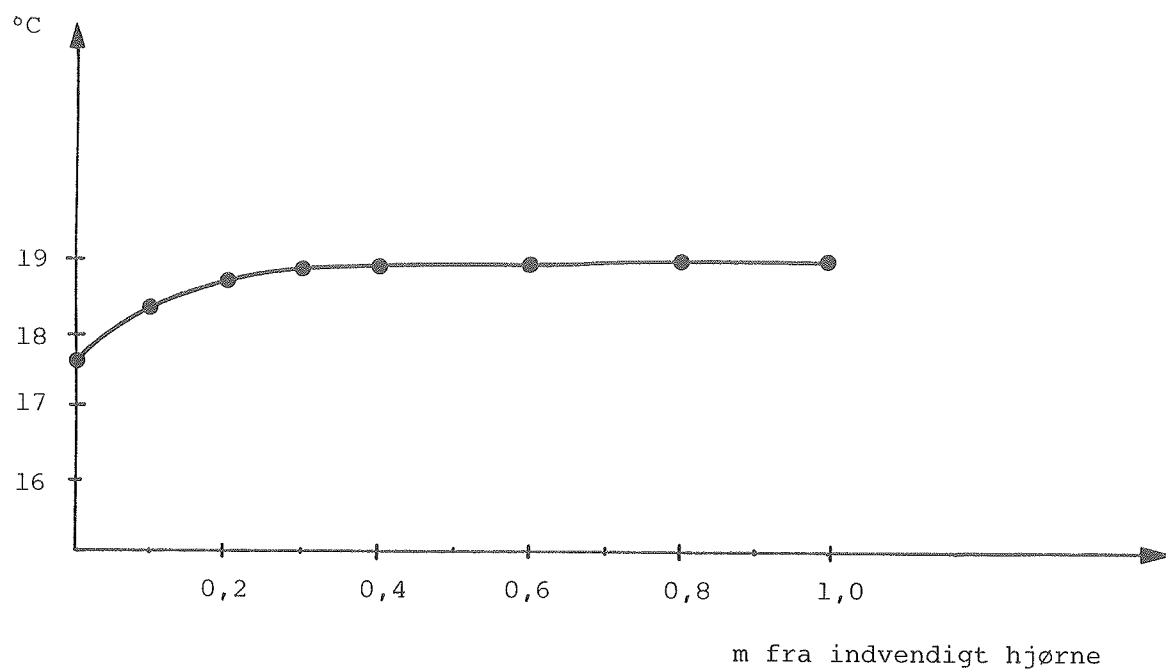
Figur 20. Varmestrøm gennem hjørne - tegl-isolering-gasbetonvæg.



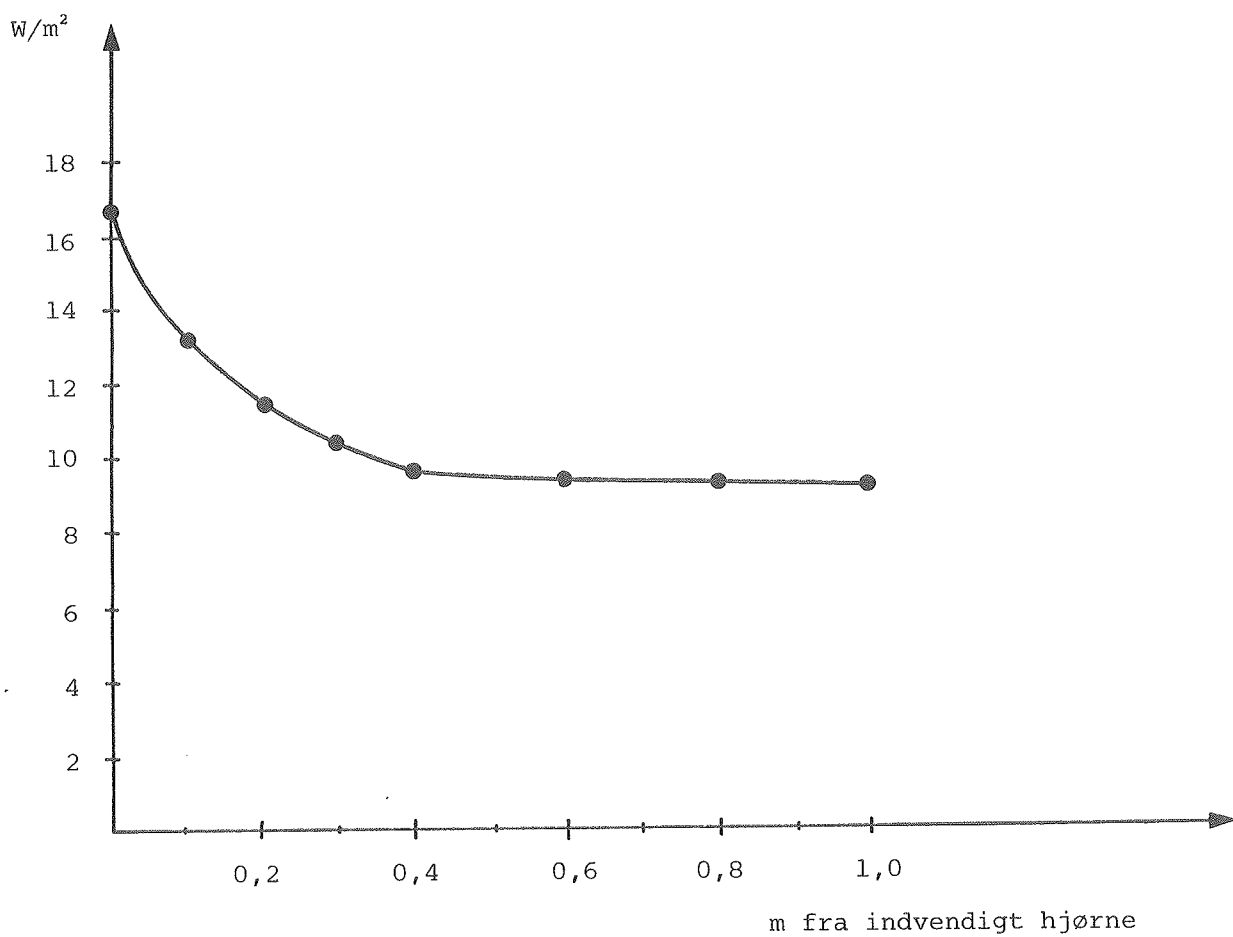
Figur 21. Indvendig overfladetemperatur - tegl-isolering-gasbetonvæg.



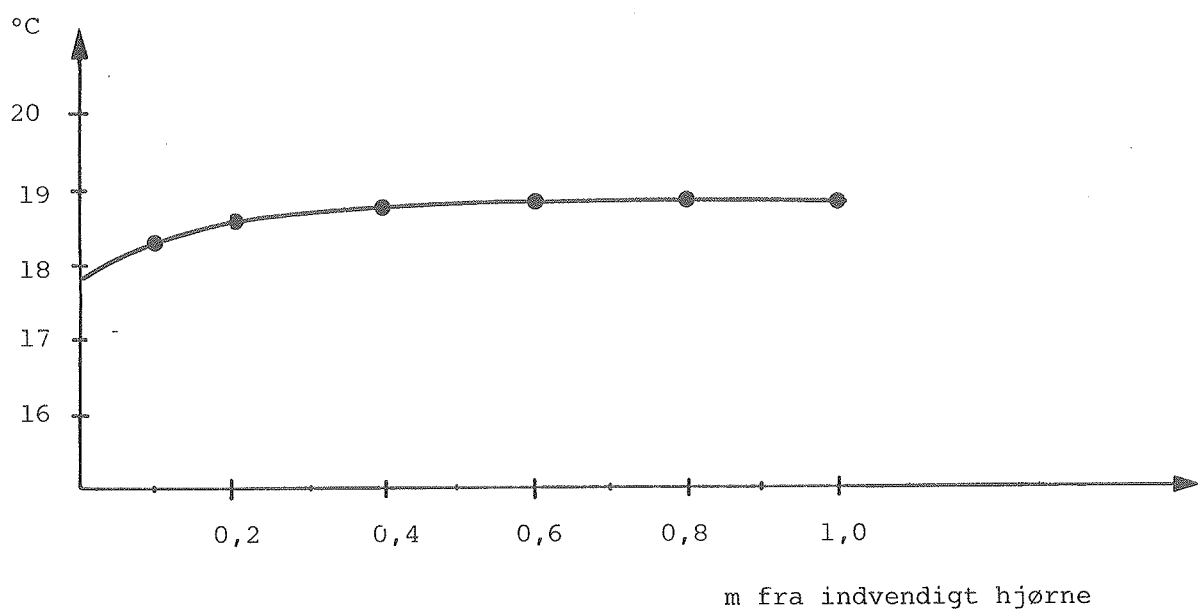
Figur 22. Varmestrøm gennem hjørne - tegl-isolering-teglvæg.



Figur 23. Indvendig overfladetemperatur - tegl-isolering-teglvæg.



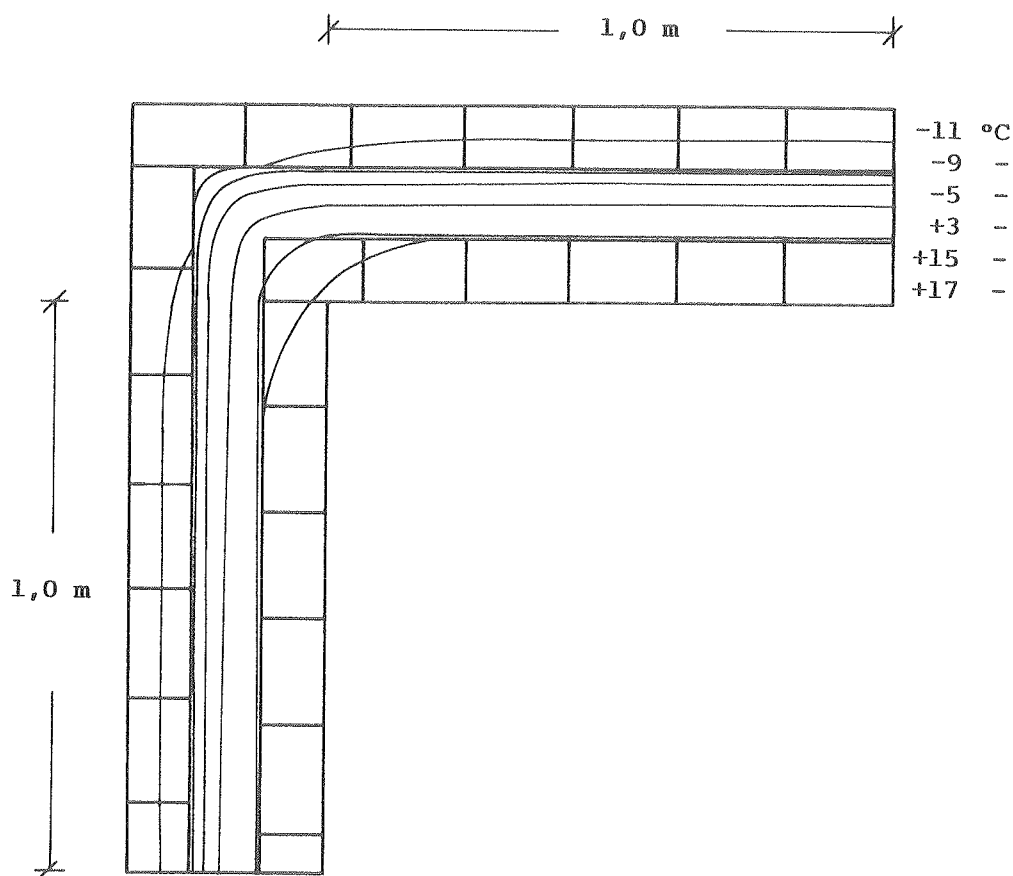
Figur 24. Varmestrøm gennem hjørne - beton-isolering-betovæg.



Figur 25. Indvendig overfladetemperatur - beton-isolering-betovæg.

Som det kan ses af tabellen og figurerne, afhænger kuldebroens udstrækning af konstruktionsudformningen. Ved betonvæggen ses kuldebrovirkningen ca. 0,6-0,7 m hen langs væggen, men ved en bedre isolerende væg er virkningen ophørt ca. 0,4 m henne. Temperaturkurverne viser, at minimumoverfladetemperaturen ligger på 17,6°C for teglvæggen, 17,7°C for tegl/gasbetonvæggen og på 17,8°C for betonvæggen. Der er således overhovedet ingen kondensproblemer.

På efterfølgende figur ses isotermerne for et hjørne med tegl både ind- og udvendigt.



Figur 26. Isothermer for et hjørne med tegl både ind- og udvendigt. ( $t_u = -12^\circ\text{C}$ ,  $t_i = 20^\circ\text{C}$ ).

### 4.3 Vindue/vægsamlinger

Vinduerne er den del af bygningens klimaskærm, der har det største varmetab pr.  $\text{m}^2$ , og ydermere opstår der som regel en kuldebro, hvor vinduet monteres i væggen. Der er udvalgt tre vægtyper, som kan ses på de efterfølgende figurer. I disse vægge er isat hhv. en tolagsrude ( $U = 2,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), en trelagsrude ( $U = 2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ ), en to- + enlagsrude ( $U = 1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) og en tolagsrude med skodder ( $U = 0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Betydningen af vinduets placering er undersøgt ved at placere vinduet hhv. inderst i vinduesåbningen, i midten og yderst, og endelig er vinduet sat helt uden på væggen. Den første type væg er en såkaldt let facade med 150 mm isolering med en træbeklædning på begge sider, den anden er en væg med gasbeton indvendig og træbeklædning yderst med 150 mm imellem og endelig den tredje type en teglvæg med 125 mm isolering. Skodden består af to lag isolering à 25 mm ( $\lambda = 0,040 \text{ W/mK}$ ) uden om en 6 mm masonitplade ( $\lambda = 0,12 \text{ W/mK}$ ).

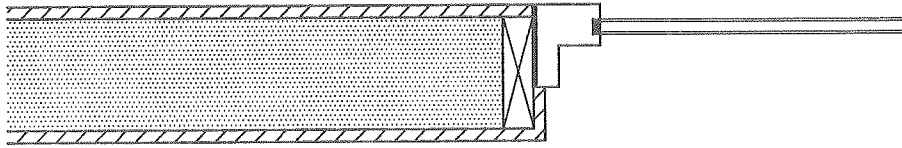
Til de følgende beregninger er der valgt at betragte et 2,4 m modul med et 1 x 1 m vindue og lægge et snit i symmetriplanet (se figur 4).

Tillægget i varmetabet udregnes som forskellen mellem det todimensionale varmetab og summen af de endimensionale bidrag fra hhv. væg og vindue, hvor vinduet igen er delt op i træ- og glasdel. For at kunne sammenligne med anden litteratur opgives tillægget både i  $\text{W/m}$  omkreds vindue og i  $\text{W/mK}$  ( $20^\circ\text{C}$  inde og  $-12^\circ\text{C}$  ude).

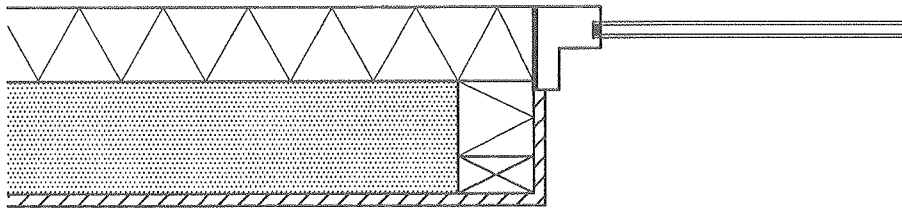
Der er regnet med en indvendig overgangsisolans på  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  langs hele den indvendige side, derfor må resultaterne (de absolutte talstørrelser) tages med et vist forbehold på grund af de ukendte strålings- og konvektionsforhold. Andre isolanser og  $\lambda$ -værdier er også taget fra DS 418 [1].

Yderligere er der lavet en undersøgelse af, hvor langt ind i væggen vinduet influerer på varmetabet, og dette afhænger naturligvis af væggenes opbygning og antal glaslag i vinduet. Ved murstensvæggen får vinduet indflydelse ca. 0,6 m hen i væggen, medens virkningen af vinduet for en let facade er ophørt ca. 0,4 m inde.

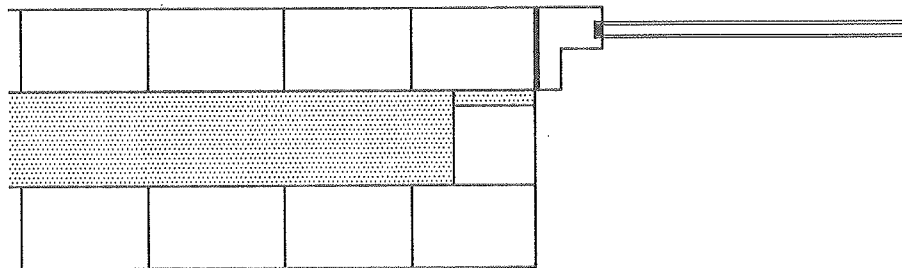
De laveste temperaturer optræder i hjørnet glas/karm, og de er meget afhængig af overgangsisolanserne. Temperaturerne er noteret i tabel 12, 13 og 14 sammen med varmestromstillæggene. Ved to lag glas forekommer kondens ved knap 30% relativ fugtighed, ved tre lag ved ca. 35% og for to+et lag glas skal man over 50% RH. Det er forholdsvis sjældent, at den relative fugtighed kommer over 40% om vinteren i almindelig bebyggelse, så det vil "kun" være ved tolagsruder, der kan opstå alvorlige kondensproblemer.



Let facade med 150 mm isolering.



Letbetonfacade med 150 mm isolering.



Murfacade med 125 mm isolering.

Figur 27. Tre vægtyper med tolagsvindue monteret inderst i vindueshullet.

Tabel 12. Varmestrømstillæg for vindue i en let facade,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab i W/m omkreds vindue,  $t_{\min}$  er den mindste indvendige overfladetemperatur.

$$Q_{-1_{\text{væg}}} = 7,5 \text{ W/m}^2.$$

	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
	W/m	W/mK	°C
<b>2 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	3,55	0,11	0,74
- - mellem	3,77	0,12	1,1
- - ude	3,85	0,12	1,4
- - helt ude	6,40	0,20	0,31
<b>2+1 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	1,86	0,06	10,1
- - mellem	2,03	0,06	10,1
- - ude	2,29	0,07	9,9
- - helt ude	5,62	0,17	8,7
<b>3 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	4,67	0,15	3,2
- - mellem	3,19	0,10	3,5
- - ude	4,91	0,15	3,7
- - helt ude	8,18	0,26	3,0
<b>2 lag glas+skodde</b>			
vindue, placeret inde	0,69	0,02	16,1
- - mellem	1,18	0,04	16,0
- - ude	1,52	0,05	16,1
- - helt ude	4,12	0,13	14,5

Tabel 13. Varmestrømstillæg for vinduer i en letbeton facade,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab i W/m omkreds vindue,  $t_{\min}$  er den mindste indvendige overfladetemperatur.

$$Q \cdot l_{\text{væg}} = 6,9 \text{ W/m}^2.$$

	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
	W/m	W/mK	°C
<b>2 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	5,98	0,19	1,2
- - mellem	3,29	0,10	1,2
- - ude	4,57	0,14	0,98
- - helt ude	11,19	0,35	0,33
<b>2+1 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	3,74	0,12	10,1
- - mellem	2,85	0,09	10,1
- - ude	2,58	0,08	9,9
- - helt ude	5,99	0,19	8,6
<b>3 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	6,95	0,22	3,8
- - mellem	5,79	0,18	3,7
- - ude	5,40	0,17	3,0
- - helt ude	8,65	0,27	3,0
<b>2 lag glas+skodde</b>			
vindue, placeret inde	0,78	0,02	16,2
- - mellem	1,08	0,03	16,0
- - ude	1,90	0,06	16,0
- - helt ude	5,06	0,16	14,5

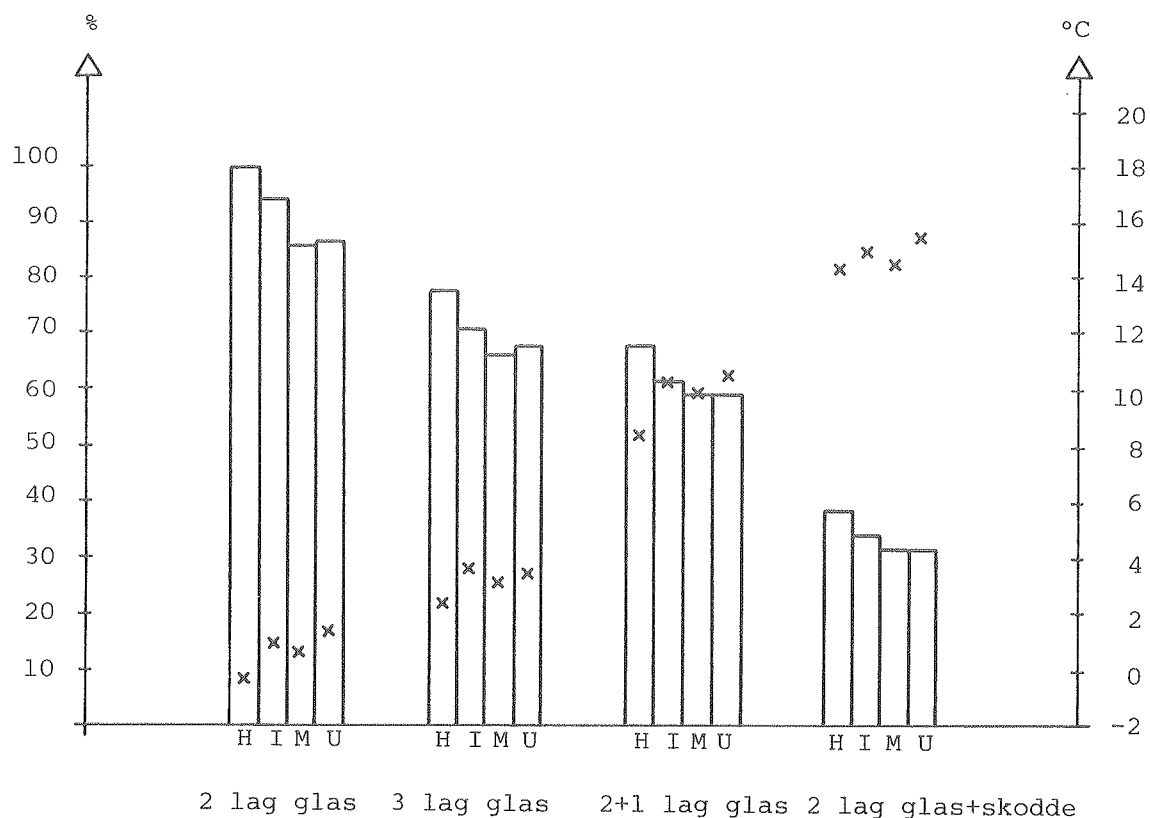


Tabel 14. Varmestrømstillæg for vinduer i murfacade,  $\Delta Q(2)$  er det ekstra varmetab i W/m omkreds vindue,  $t_{\min}$  er den mindste indvendige overfladetemperatur.

$$Q-1_{\text{væg}} = 8,6 \text{ W/m}^2.$$

	$\Delta Q(2)$	$\Delta Q(2)$	$t_{\min}$
	W/m	W/mK	°C
<b>2 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	12,25	0,38	1,2
- - mellem	6,85	0,21	0,59
- - ude	7,67	0,24	0,93
- - helt ude	13,83	0,43	-0,37
<b>2+1 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	5,47	0,17	10,2
- - mellem	3,11	0,10	9,9
- - ude	3,15	0,10	9,7
- - helt ude	9,97	0,31	8,2
<b>3 lag glas</b>			
vindue, placeret inde	10,04	0,31	3,8
- - mellem	6,75	0,21	3,1
- - ude	8,51	0,27	3,3
- - helt ude	15,33	0,48	2,3
<b>2 lag glas+skodde</b>			
vindue, placeret inde	6,98	0,22	14,8
- - mellem	6,11	0,19	14,1
- - ude	6,10	0,19	15,4
- - helt ude	12,79	0,40	14,1

På figur 28 er de totale todimensionale varmetab optegnet for alle tilfældene for vinduesplaceringer i murfacaden. Varmetabene er angivet i procent af det maksimale varmetab - 71 W/m - som forekommer med to lag glas placeret helt ude i en murfacade. Desuden er angivet minimum indvendige overfladetemperaturer for hvert tilfælde.

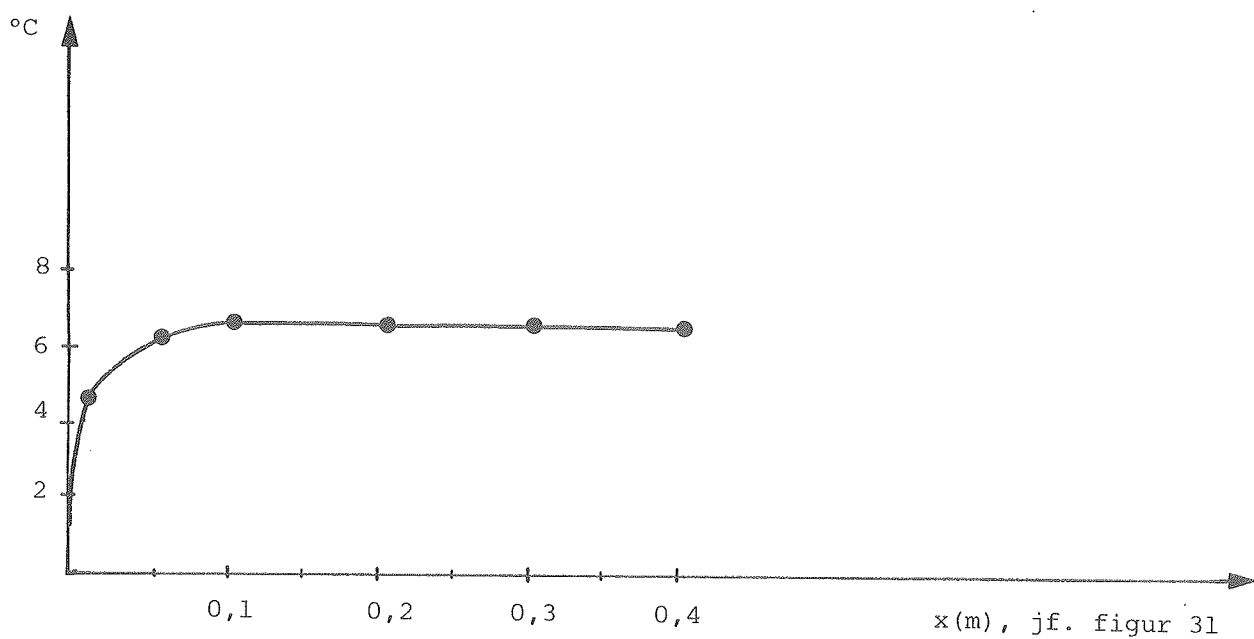


Figur 28. Total todimensionalt varmetab i % af det største - 71 W/m - ved forskellige vinduestyper og placeringer (søjler). Minimum indvendige overfladetemperaturer i °C (x'er).

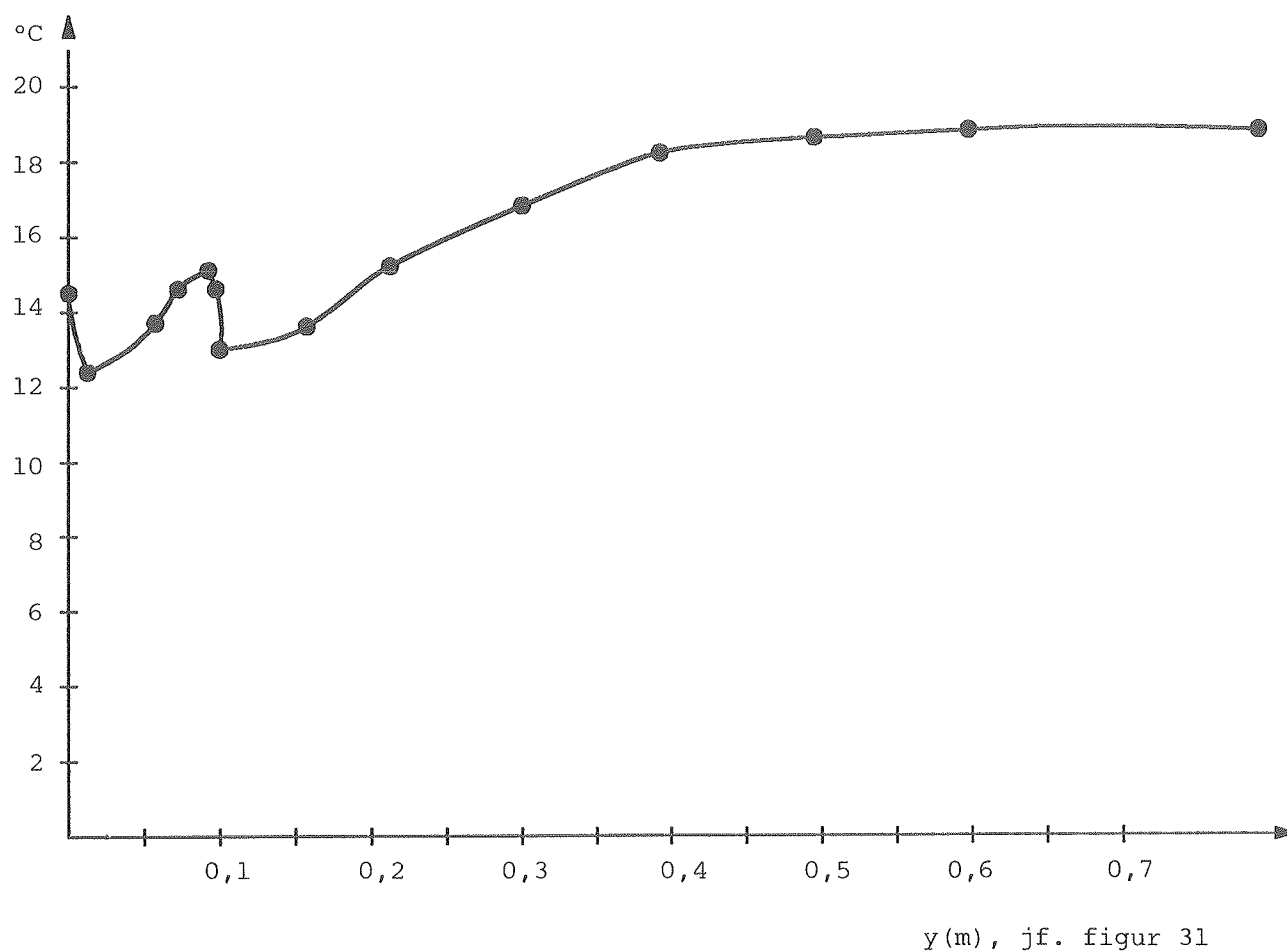
H: Vindue placeret helt ude i vinduesåbningen  
 I: Vindue placeret inderst i vinduesåbningen  
 M: Vindue placeret midt i vinduesåbningen  
 U: Vindue placeret yderst i vinduesåbningen

#### 4.3.1 Kuldebrovirkningens udstrækning

På figur 29 og 30 ses de indvendige overfladetemperaturer af dels glasset og dels karm og væg, når en to-lags rude er placeret inderst i en murfacade med -12° ude og 20°C inde.

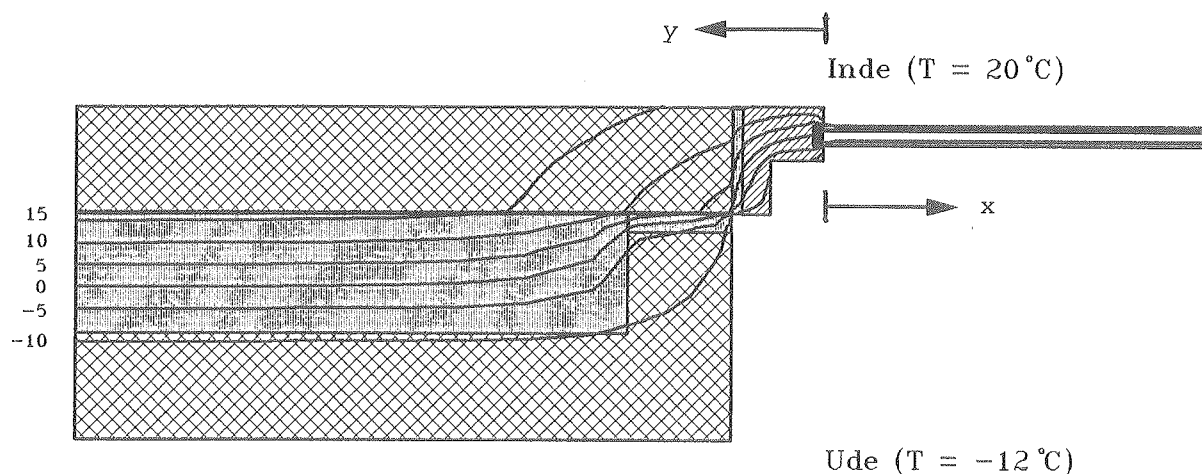


Figur 29. Indvendige overfladetemperaturer på en tolags rude placeret inderst i en murfacade.



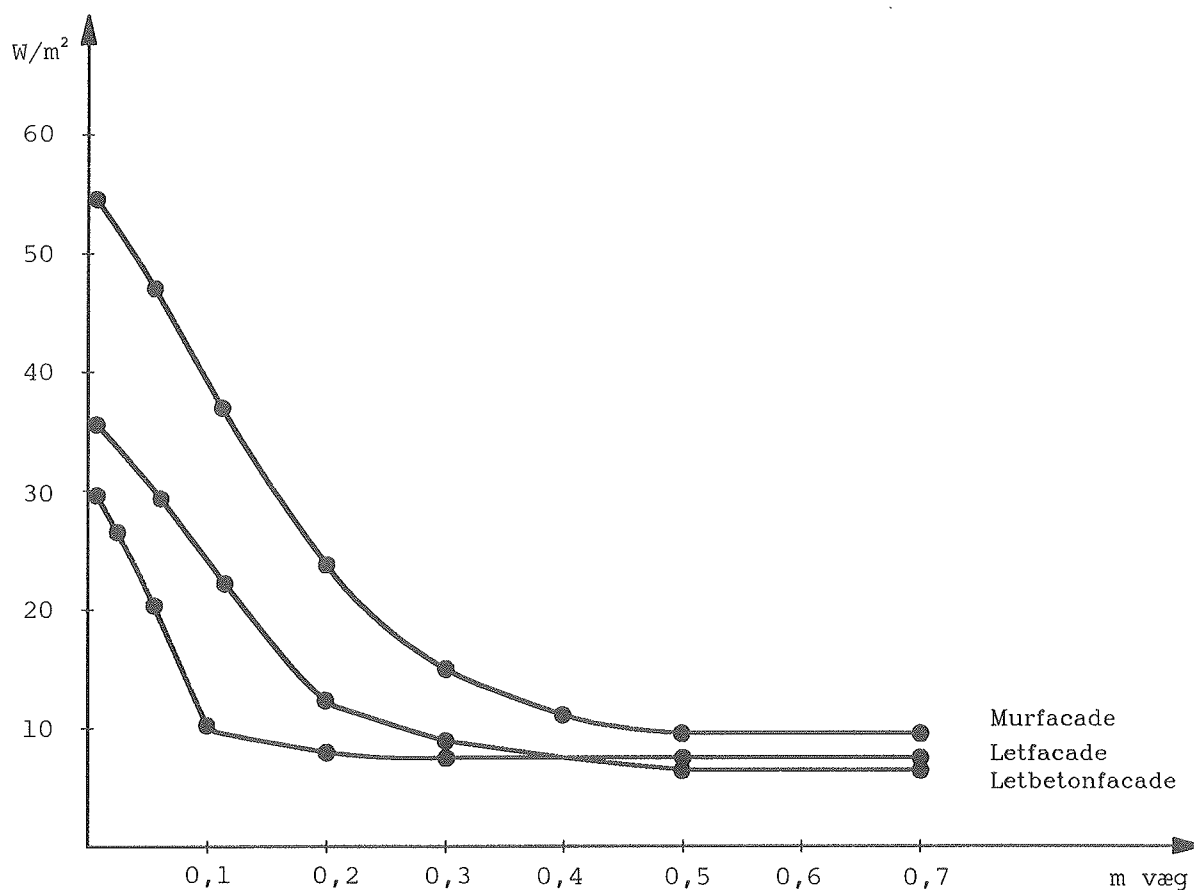
Figur 30. Karm og vægs indvendige overfladetemperaturer, tolagsvindue.

På figur 31 er isotermerne optegnet for et vandret snit i en murfacade med tolagsvindue.



Figur 31. Isotermier for 2 lag glas monteret i murfacade.

På figur 32 er varmestrømmen hen langs væggen optegnet for en murfacade, en letbetonfacade og en let facade monteret med et tolagsvindue placeret inderst i væggen. Ved murstensvæggen får vinduet indflydelse ca. 0,6 m hen langs væggen, medens virkningen af vinduet for en let facade er ophørt ca. 0,4 m henne.



Figur 32. Varmestrøm gennem hhv. en murfacade, en letbetonfacade og en let facade monteret med et tolagsvindue inderst i væggen.

## 5. KONKLUSIONER

I de fleste af de konstruktioner, som udgør klimaskærmen, er det næsten umuligt helt at undgå kuldebroer, men det er muligt at tage problemet alvorligt og prøve at finde den bedste løsning. Kuldebroen kan i uheldige tilfælde være ansvarlig for en meget stor del af varmetabet og jo bedre isoleringen bliver, hvor der ikke er kuldebroer, jo relativ større betydning får kuldebroen. For at spare energi, må kuldebroer derfor undgås.

Ved beregning af energiforbruget for forskellige konstruktioner er det derfor korrekt, foruden de kendte U-værdier, at inddrage kuldebrobidraget. Denne rapport har haft til hensigt - for et udvalg af kuldebroer, som anses for de mest aktuelle, og som samtidig er sparsomt beskrevet i den eksisterende litteratur - at fremskaffe data for varmetabet gennem kuldebroen samt temperaturfordelingen i konstruktionen og på indvendige flader.

Kuldebroernes økonomiske betydning fremkommer dels ved det øgede varmeforbrug og dels ved forbruget til øget vedligeholdelse på grund af tilsmudsning og eventuelle fugtproblemer. Dertil kommer både hygiejniske og æstetiske synspunkter, som ikke umiddelbart kan gøres op i penge.

Ved fundamenter er kuldebrovirkningen på terrændækket mærkbar mindst et par meter ind fra ydervæggen uanset hvilken type ydervæg, der vælges. Kuldebrovirkningen spores godt en halv meter op ad en teglvæg, medens man ved en betonavæg skal ca. 1,5 m op, før man får den endimensionale varmemstrøm.

Det ekstra varmetab pga. fundamentet er for et betonfundament af samme størrelse som den endimensionale varmemstrøm gennem gulvet. Til sammenligning med den todimensionale varmemstrøm er udregnet de varmemstrømme  $Q_{DS}$ , man ville få ved at bruge DS 418 [1] for de udvalgte fundamenter.  $Q_2$  er den totale varmemstrøm, beregnet som  $Q_1$  plus  $\Delta Q(2)$ . Nummeret i parentes henviser til modelnummeret i rapporten.

Tabel 15. Resultater af varmestrømsberegninger.

	Q-DS	Q-1	$\Delta Q(2)$	Q-2
	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Betonfundament (nr. 8)	4,45	2,83	2,42	5,25
Betonfundament med 1 smal blok letbeton (nr. 29)	3,92	2,83	1,99	4,82
Betonfundament med 2 skifter letbeton (nr. 50)	3,83	2,83	1,83	4,66
Betonfundament med 4 skifter letbeton (nr. 67)	3,70	2,83	1,68	4,51

Der er 15-20% forskel mellem varmestrømme beregnet efter DS 418 [1] og den todimensionale varmestrøm, og DS 418 undervurderer i alle tilfældene varmestrømmene.

Det er den første afbrydelse i fundamentet, der betyder mest. Ved at indsætte 2 skifter letbeton i forhold til et almindeligt betonfundament spares ca. 11% af det totale varmetab gennem gulvet, medens der spares ca. 13% med 4 skifter letbeton.

Ydervægshjørner betragtes som kuldebroer, hvis man sammenligner med en lige væg af samme længde som hjørnets indvendige mål. Tre forskellige vægtyper er undersøgt, og ved betonvæggen ses kuldebrovirkningen ca. 0,6-0,7 m hen langs væggen, men ved en bedre isolerende væg er virkningen ophørt ca. 0,4 m henne.

Yderligere er der lavet en undersøgelse af, hvor langt inde i væggen vinduet influerer på varmetabet, og dette afhænger naturligvis af væggenes opbygning og antal glaslag i vinduet. Tre forskellige vægtyper er beregnet monteret med forskellige typer vinduer. Ved en murstensvæg får vinduet indflydelse ca. 0,6 m hen langs væggen, medens virkningen af vinduet for en let facade er ophørt ca. 0,4 m henne.

Det må understreges, at rapporten ikke behandler egentlige højisolerede konstruktioner og således ikke anviser løsninger for fx fundamentskonstruktioner til lavenergihuse. De undersøgte konstruktioner er typisk eksempler, som opfylder kravene i bygningsreglementet (BR-82 hhv. BR-S 85) sammenlignet med tidligere anvendte løsninger.

## 6. LITTERATURLISTE

### Referencer

- [1] Dansk Standard DS 418: Dansk Ingeniørforening's regler for beregning af bygningers varmetab. 5. udgave december 1986.
- [2] Ann-Charlotte Andersson: Köldbryggor i tilläggsisolerade ytterväggar. Byggeforskningen, Stockholm 1978.
- [3] Finn Olav Buø m.fl.: Kuldebroer - Energisparing - Byggskadar, NBI arbeidsrapport nr. 36, Oslo 1981.
- [4] Bjarne Saxhof & Kirsten Engelund Poulsen: Foundations for Energy Conservation Houses. LfV, Meddelelse nr. 130, november 1982.
- [5] Mogens Ensrud m.fl.: Kuldebroer, NBI anvisning nr. 25, Oslo 1982.
- [6] E. Panzhauser: Thermal bridges in building envelopes. Bulletin no. 153, CIB W67, Stockholm 1988.
- [7] Anker Nielsen: Fugt I, internt notat, LfV, 1978.

### Yderligere litteratur

- [8] M. Knapen & P. Standaert: Experimental research on thermal bridges in different outer-wall systems. Katholieke Universiteit, Leuven, september 1985.
- [9] Lars Erik Nevander m.fl.: Köldbryggor i ytterväggar. Kungliga tekniska Högskolan, Meddelande nr. 26, Stockholm 1961.
- [10] Walter Heindl m.fl.: Wärmebrücken. Österreichisches Institut für Bauforschung, Wien, juni 1987.
- [11] Gudni Johannesson & Margareta Andersson: Köldbryggor i byggnadskonstruktioner. Statens råd for byggnadsforskning, Stockholm R34:1989.

## LavEnergi Publikationer fra Laboratoriet for Varmeisolering, DTH

Laboratoriets meddelelsseserie forhandles gennem Byggecentrums Boghandel.

- 1 Bolet, B., Rasmussen, N.H. & Korsgaard, V.: Ressourcebesparende kassettebyggesystem til lavenergi huse. LfV, Meddelelse nr. 197, december 1988.
- 2 Byberg, M.R.: Fremtidens lavenergi huse, XII Nordiske VVS Kongres i København, VVS Vision 82, 2/6-4/6 1982, Særtryk, LfV, Rapport nr. 82-26, juni 1982.
- 3 Byberg, M.R.: Do Conservation Houses Require Sophisticated Technical Installations?, LfV, Meddelelse nr. 127, november 1982.
- 4 Byberg, M.R.: Forbedret bearbejdning af måledata fra nyt lavenergi hus, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 125-133, maj 1984.
- 5 Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær, Kort beskrivelse af husene, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.  
  
Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Low-Energy Houses at Hjortekær - Description of the Houses, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.  
  
Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Niedrigenergiehäuser in Hjortekær, Dänemark - Kurze Beschreibung der Häuser, LfV, Meddelelse nr. 83, maj 1979.
- 6 Byberg, M.R. & Saxhof, B.: 6 Lavenergi huse i Hjortekær, Konstruktioner - arbejdsudførelse og erfaringer, LfV, Meddelelse nr. 120, november 1982.
- 7 Djurtoft, R.G.: Monitoring Energy Conservation Houses, ENERGEX 82, LfV, Rapport nr. 82-28, juni 1982.
- 8 Djurtoft, R.G.: Beregning og måling af mekanisk luftskifte i lavenergieksperimenthuset, LfV, Rapport nr. 82-65, december 1982.
- 9 Djurtoft, R.G.: Nordiske retningslinier for evaluering af byggeeksperimenter - Er noget sådant muligt?, Utvärdering av Experimentbyggnadsprojekt inom Energiområdet, Nordiskt Expertseminarium 6/9-7/9 1983 i Esbo, Finland, Særtryk, LfV, oktober 1983.
- 10 Djurtoft, R.G.: Tidskonstanter for huse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 40-56, maj 1984.



- 11 Djurtoft, R.G.: Tidskonstantens betydning for husets energiforbrug, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 73-82, maj 1984.
- 12 Djurtoft, R.G.: Must Energy Conservation Houses be Designed for Maximum Utilization of Solar Heat Gain?, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 167-173.
- 13 Engelund Poulsen, K.: Isolerende vinduesskodder, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 83-90, maj 1984.
- 14 Engelund Thomsen, K.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Solar heating systems for domestic hot water, LfV, august 1991.
- 15 Engelund Thomsen, K.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Energy Efficient Lights and Appliances, LfV, september 1991.
- 16 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Målinger og beregninger af solindfald gennem glaspartier under hensyntagen til skyggende genstande for lavenergihus G i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 87-24, december 1987.
- 17 Engelund Thomsen, K. & Schultz, J.M.: Optimal vinduesudformning - en varmeteknisk undersøgelse, LfV, Meddelelse nr. 201, december 1990.
- 18 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Design Summaries and Drawings for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991, LfV, februar 1991.
- 19 Engelund Thomsen, K., Wittchen, K.B., Saxhof, B. & Lundgaard, B.: Parametric Studies for Two Danish IEA Task XIII Houses, paper til IEA Task XIII Fourth Experts' Meeting, Toronto 1991, LfV, februar 1991.
- 20 Gullev, J.: Lavenergi huse i Hjortekær, Byggeindustrien nr. 1, 1979, pp. 9-15.
- 21 Huusom, J. & Lund Madsen, T.: The Thermal Indoor Climate in six Low Energy Houses, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print, LfV, 1980.
- 22 Korsgaard, V., Byberg, M.R. & Hendriksen, P.: Experiences and Results from 2 Years Monitoring of the Energy Balance for Six Solar Assisted Low Energy Houses in Denmark, Solar 83 Conference, Palma de Mallorca 2/10-6/10 1983, Off-print, LfV, oktober 1983.

- 23 Kristensen, P.E.: Performance of Hjortekær House D and F - Internal report within the Performance Monitoring Group, LfV, Rapport nr. 83-48, december 1983.
- 24 Rasmussen, N.H.: En analyse af energibesparelser i etageejendom fra 1940 - foranstaltningernes energi- og pengeøkonomiske konsekvenser, LfV, Meddelelse nr. 111, juli 1981.
- 25 Rasmussen, N.H.: Trykprøvning af seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-69, december 1982.
- 26 Rasmussen, N.H.: Simultaneous Testing of Small Heat Pumps Under Actual Climate Conditions, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 6, pp. 147-153.
- 27 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: Experimental Low-Energy House at the Technical University of Denmark, description of a system for simultaneous testing of heating systems for conservation houses under actual climate conditions, LfV, Meddelelse nr. 128, november 1982.
- 28 Rasmussen, N.H. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær, Effektiviteter og tomgangstab for varme- og brugsvandsanlæg, LfV, Meddelelse nr. 152, juni 1984.
- 29 Saxhof, B.: Transmissionskoefficienter og dimensionerende varmetab for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-11, juni 1982.
- 30 Saxhof, B.: Varmetabsramme og isoleringsgrad for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-12, juni 1982.
- 31 Saxhof, B.: Skøn over følsomhed af målte og beregnede transmissionstab for seks lavenergihuse i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-56, oktober 1982.
- 32 Saxhof, B.: External Insulating Shutters in Energy Conservation Houses, LfV, Meddelelse nr. 129, november 1982.
- 33 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Vejrstation, LfV, Rapport nr. 83-5, april 1983.
- 34 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Måling af rum- og jordtemperaturer, LfV, Rapport nr. 83-15, september 1983.
- 35 Saxhof, B.: Målesystemer for seks lavenergihuse i Hjortekær: Målinger i varme- og ventilationsanlæg m.v., LfV, Rapport nr. 83-16, september 1983.

- 36 Saxhof, B.: Skitse til målesystem til lavenergihus G i Hjortekær, LfV, Rapport nr. 83-27, oktober 1983.
- 37 Saxhof, B.: Opstilling af nettoenergiregnskab efter BES-metoden for Lavenergihus G i Hjortekær (skitseprojekt), LfV, Rapport nr. 83-47, december 1983.
- 38 Saxhof, B.: Utsigtede varmetab fra installationer i lavenerjihuse, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 91-102, maj 1984 (optrykt i VVS nr. 9, september 1985, pp. 17-21).
- 39 Saxhof, B.: Installationers betydning for klimaskærmens lufttæthed, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 103-115, maj 1984.
- 40 Saxhof, B.: The Seventh Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 255-262.
- 41 Saxhof, B.: Efficient Heating and Domestic Hot Water Systems: A Must for Low-Energy Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 5, pp. 319-324.
- 42 Saxhof, B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-8, 1987.
- 43 Saxhof, B.: Low-Energy Houses, 1st International Symposium on Energy Savings - Focussing on electricity savings, Copenhagen 1/9-4/9 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-21, september 1987.
- 44 Saxhof, B.: Summary on new materials, components and system concepts - Denmark, Monograph Part 2, IEA Workshop on Advanced Solar Building Design and Analysis, Watsonville, California, February 3-6 1988, LfV, januar 1988.
- 45 Saxhof, B.: Designing Detailed Monitoring Programmes (Questions and some Answers). Off-print af paper til IEA Workshop: Field Monitoring - For a Purpose, Göteborg 2-5 april 1990, LfV, marts 1990.
- 46 Saxhof, B.: Field Monitoring - For a Purpose. IEA Task 13 Summary Report, LfV, august 1991.
- 47 Saxhof, B.: The Thermal Envelope - An Integrated Part of the Heating System? Science and Technology at the Service of Architecture. 2nd European Conference on Architecture (SECA), Paris 1989, LfV, Meddelelse nr. 222, oktober 1991.

- 48 Saxhof, B., Byberg M.R., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Low-Energy House G at Hjortekær, a 2nd Generation House: A Collection of 5 Papers on Monitoring, LfV, Rapport nr. 91-23, november 1991.
- 49 Saxhof, B., Djurtoft, R.G., Byberg, M.R. & Aasbjerg Nielsen, A.: Six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, Description of the Houses and Presentation of Energy Measurements during the first Winter, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning, "CLIMA-2000", Budapest 1980, Off-print, LfV, 1980.
- 50 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Foundations for Energy Conservation Houses, LfV, Meddelelse nr. 130, november 1982.
- 51 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af en række fundamentskonstruktioner, LfV, Rapport nr. 83-45, december 1983.
- 52 Saxhof, B. & Engelund Poulsen, K.: Projektering af lavenergihus G i Hjortekær: Analyse af varmebehov, LfV, Rapport nr. 83-46, december 1983.
- 53 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: Parametric Studies and Monitoring Results from a Danish 2nd Generation Low-Energy House Project, Off-print af paper til CIB W67 Workshop: Low-Energy-Buildings 2nd generation, Heidenheim 31 May-1 June, 1990, LfV, maj 1990.
- 54 Saxhof, B., Engelund Thomsen, K. & Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Heating Systems, LfV, september 1991.
- 55 Saxhof, B., Schultz, J.M. & Wittchen, K.B.: From the Zero Energy House to the 1st and 2nd Generation Houses at Hjortekær, Denmark, LfV, Meddelelse nr. 200, december 1988.
- 56 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Om Energiministeriets lavenergihusprojekter, specielt Hus G i Hjortekær, et 2.-generations lavenergihus, Supplerende materiale til Energiministeriets plakat-vandreudstilling, LfV, 1986.
- 57 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Project Monitor: Low Energy House G, Hjortekaer, Denmark. Commission of the European Communities. Nr. 41. Februar 1989.
- 58 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: A Second Generation Low-Energy House at Hjortekær, Denmark, i Example houses from the Participating Countries, IEA SH&CS Task XIII Working Document, (Proceedings from the 1st Workshop, Hinterzarten, Vesttyskland, 30 jan.-1 febr. 1989), EMPA, Dübendorf, Schweiz, november 1989. Off-print.

- 59 Saxhof, B. & Wittchen, K.B.: Draft Monitoring System for the Danish IEA Task 13 Houses, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz 1991, LfV, september 1991.
- 60 Saxhof, B. & Aasbjerg Nielsen, A.: Insulation and Air Tightness of six Low-Energy Houses at Hjortekær, Denmark, LfV, Meddelelse nr. 121, november 1982.  
  
Kongresbidraget, som dannede grundlaget for Meddelelse nr. 121, er udgivet på engelsk og fransk i Building Research & Practice, May/June 1983, pp. 142-153.
- 61 Schultz, J.M.: Analysis of Insulating Window Shutters, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-9, 1987.
- 62 Schultz, J.M.: Generelt edb-program til beregning af skyggearealer på plane flader, LfV, Rapport nr. 87-26, december 1987.
- 63 Schultz, J.M. & Engelund Thomsen, K.: Thermal Analysis of Window Design, Off-print af paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim 20-22 august 1990, LfV, juni 1990.
- 64 Schultz, J.M.: Isolerende skodder, LfV, Meddelelse nr. 202, december 1990.
- 65 Wittchen, K.B.: Air-Supply in Airtight, Highly Insulated Buildings, Building Physics in the Nordic Countries, Symposium i Lund august 1987, Off-print, LfV, Rapport nr. 87-10, 1987.
- 66 Wittchen, K.B.: Friskluftforsyning til tætte, velisolerede huse, LfV, Meddelelse nr. 192, december 1988.
- 67 Wittchen, K.B.: IEA Task 13 Summary Report of the Technology: Comfort control of heating systems, LfV, august 1991.
- 68 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Dimensioning Heating Systems for Low-Energy Buildings, Considering the Influence of Fluctuating Temperatures, Off-print af paper til symposiet: Building Physics in the Nordic Countries, Trondheim 20-22 august 1990, LfV, juni 1990.
- 69 Wittchen, K.B. & Saxhof, B.: Monitoring Advanced Solar Low-Energy Houses - Introduction for Discussion, paper til IEA Task XIII Fifth Experts' Meeting, Monitoring Workshop, Kandersteg, Schweiz 1991, LfV, september 1991.
- 70 Zachariassen, H.: H&S lavenergihus i Hjortekær, Arkitekten nr. 17, 1982, pp. B5-B8.

- 71 Aasbjerg Nielsen, A.: Energy Consumption in Buildings, Regression Models, Six Low-Energy Houses at Hjortekær, LfV, Rapport nr. 82-68, december 1982.
- 72 Aasbjerg Nielsen, A.: To økonomiprogrammer til TI-59, LfV, Rapport nr. 83-9, maj 1983.
- 73 Aasbjerg Nielsen, A.: En dynamisk test-metode til bestemmelse af småhuses termiske respons, LfV, artikel i Meddelelse nr. 150 (Aktuel energiforskning - Laboratoriet for Varmeisolering 1959-1984), pp. 57-72, maj 1984.
- 74 Aasbjerg Nielsen, A.: A Dynamic Test Method for the Energy Consumption of Small Houses, CLIMA 2000 Copenhagen 1985, Volume 2, pp. 533-541.
- 75 Aasbjerg Nielsen, A.: Dynamisk trykprøvning - En infrasonisk metode til måling af småhuses tæthed, LfV, Rapport nr. 87-1, 1987.
- 76 Aasbjerg Nielsen, A., Byberg, M.R., Djurtoft, R.G. & Saxhof, B.: 6 Lavenergihuse i Hjortekær - Statusrapport 1, LfV, Meddelelse nr. 84, juni 1979.
- 77 Aasbjerg Nielsen, A. & Kjær Nielsen, B.: A Dynamic Test Method for the Thermal Performance of Small Houses, ACEEE Summer Study, Santa Cruz 1984, LfV, Rapport nr. 84-19, juli 1984.
- 78 2.-generations lavenergihus i Hjortekær, folder, LfV, 1984.

Findes også på engelsk: A Second-Generation Low-Energy House at Hjortekær.

---

Yderligere oplysninger kan fås ved henvendelse til:

Laboratoriet for Varmeisolering  
Danmarks Tekniske Højskole  
Bygning 118, DK-2800 Lyngby  
Telefon (+45) 45 93 44 77  
Fax (+45) 45 93 17 55

