BETONELEMENTER MED BEDRE ISOLERING OG MINDRE KULDEBROER

DK 0001316

MASTER

HENRIK MONEFELDT TOMMERUP

RAPPORT
R-038

2000

ISSN: 1396-4011
ISBN: 87-7877-040-8

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED
FOREIGN SALES PROHIBITED

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI

DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

IBE

DISCLAIMER

Portions of this document may be illegible in electronic image products. Images are produced from the best available original document.

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med EFP99-projektet: Betonelementer med bedre isolering og mindre kuldebroer (ENS j. nr. 1213/98-0001). Formålet med projektet er at stimulere en udvikling af betonelementer med bedre isolering og mindre kuldebroer ved at udvikle eksempler på betonelementer med bedre varmetekniske egenskaber.

Projektet er udført af DTU og SBI i samarbejde med Betonelement-Foreningen, betonelementproducenter, én arkitekt og én vinduesproducent.

Projektgruppen har været sammensat af følgende personer:

RECEIVED
NOV 30 2000
OSTI

Birthe Rørbæk, Arkitektfirmaet Rørbæk & Møller
Mogens Hansen, Jægerspris-Vinduet A/S
Svend Röttig, Betonelement-Foreningen
Henrik Lyng, Betonelement-Foreningen
Ole Stilling, Betonelement A/S
Jens Westh, Spæncom A/S
Jørgen Munch-Andersen, SBI
Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI
Henning Larsen, Institut for Bygninger og Energi, DTU
Henrik Monefeldt Tommerup, Institut for Bygninger og Energi, DTU
Svend Svendsen, Institut for Bygninger og Energi, DTU

Professor Svend Svendsen, DTU, har været projektleder.

Danmarks Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, September 2000.

Indholdsfortegnelse

Forord 1

Indholdsfortegnelse 2

Sammenfatning 4

Summary 8

1 Indtroduktion 12

1.1 Baggrund 12
1.2 Formål 12

2 Grundlag for bestemmelse af samlet varmetabskoefficient for betonelementer 13

2.1 Generelt 13
2.2 Beregningsforudsætninger 13
2.3 Flade-, linie- og punkttab 15
2.3.1 U-værdi for den fuldt isolerede del og for ribber 15
2.3.2 Linietab for ribber 16
2.3.3 Linietab for samlingen omkring vinduer 18
2.3.4 Kuldebroernes betydning for det samlede varmetab 20
2.3.5 Punkttab som følge af bindere/strittere og bærebøjler 21

3 Fremgangsmåde ved udvikling af betonelementer med bedre varmetekniske egenskaber 24

3.1 Typiske betonelementer 24
3.2 Udvikling af nye og bedre løsninger 24

4 Betonelementer med ribber omkring åbninger 26

4.1 Typisk sandwichelement til bolig- og kontorbyggeri 26
4.2 Forøgelse af isoleringstykkelsen 28
4.3 Forslag til elementudformninger med bedre varmetekniske egenskaber 30
4.3.1 Affasning af ribber omkring vindues- og døråbninger 30
4.3.2 Anvendelse af superisolering ved ribber 32
4.3.3 Varmeteknisk vurdering af forskellige varmebesparende tiltag 36
4.3.4 Vinduesplacering i elementtykkelsen 37

5 Betonelementer med konstruktive ribber 42

5.1 Typisk højt betonsandwichelement til haller 42
5.2 Forøgelse af isoleringstykkelsen 43
5.3 Forslag til elementudformninger med bedre varmetekniske egenskaber 44
5.3.1 Anvendelse af superisolering ved ribber 44
5.3.2 Varmeteknisk vurdering af forskellige varmebesparende tiltag 46
5.3.3 Alternative muligheder for bærende konstruktion 46

6 Andre løsninger **49**

6.1 Bærende betonbagvæg / formur i tegl *49*
6.2 Vinterforanstaltning – nyudviklet intermistisk vindue *49*

7 Samlinger mellem elementer **50**

7.1 Etagekryds (hæl-tå-løsning) *50*
7.2 Fundament *54*

8 Udvælgelse af de bedste løsningsforslag - grundig undersøgelse og dokumentation **56**

8.1 Bolig- og kontorelement *56*
8.1.1 Vinduesløsninger til betonsandwichelementer uden betonribber ved vinduesåbninger 56
8.1.2 Alternativ udformning af vandret fuge mellem betonsandwichelementer 60
8.1.3 Økonomisk vurdering af nye forslag til elementudformning 67
8.2 Industri-element *68*
8.2.1 Alternative muligheder for bærende konstruktion 68

9 Konklusion / forslag til videre produktudvikling **69**

10 Referencer **70**

Bilag:

Bilag A: Betydningen af forskellige placeringer af superisolerende materiale ved og omkring ribber - de enkelte varmetabsbidrag.

Bilag B: Traditionel udformning af vandrette fuger mellem betonsandwichelementer.

Bilag C: Vandpåvirkninger af vandrette fuger mellem betonsandwichelementer.

Sammenfatning

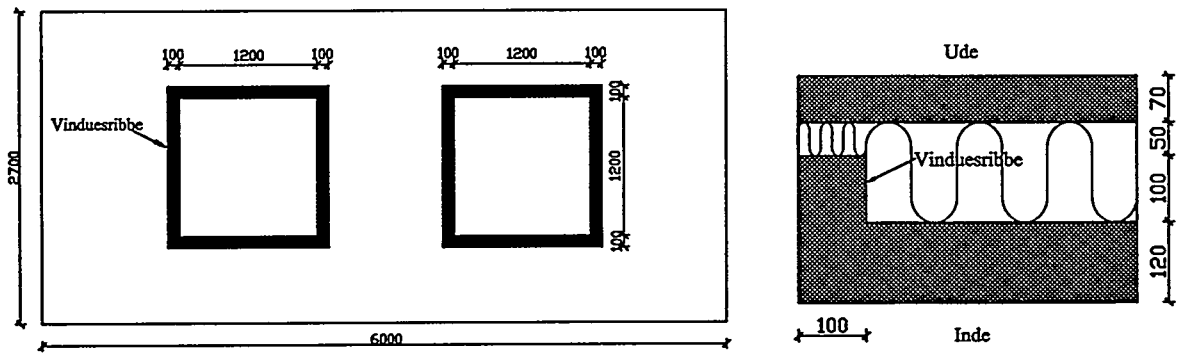
I projektet er der udviklet nye betonsandwichelement-løsninger med bedre varmetekniske egenskaber, der modsvare de behov der opstår når kravene til energiforbrug skærpes yderligere, som det forventes at ske i 2005. De bedre egenskaber er opnået uden at omkostningerne stiger mere end hvad den forøgede isoleringstykkelse betinger. Specielt kan man fjerne ribber ved vinduer og vandrette samlinger og derved opnå både en varmeteknisk forbedring og en prisreduktion, der skyldes at fremstillingsprocessen forenkles.

Der er arbejdet ud fra en naturlig opdeling af betonsandwich-elementer i to kategorier. Den ene drejer sig om elementer med afdækningsribber omkring vindues- og dørhuller i elementer, der typisk anvendes i bolig- og kontorbyggeri. Den anden omhandler elementer med konstruktive ribber, der fungere som søjler og som typisk anvendes i erhvervs- og industribyggeri. Der findes naturligvis også elementer der er en kombination af de to kategorier, men det har ikke været afgørende for analyserne.

Betonsandwichelementer med ribber omkring åbninger

Ribbernes betydning:
Betonribber ved vindues- og døråbninger udgør en betydelig kuldebro, da isoleringstykkelsen normalt er væsentligt reduceret ud for disse ribber. En kraftig reduktion af U-værdien kan realistisk set ikke ske uden at forøge kuldebroisoleringen eller helt fjerne ribberne.

For at opnå en halvering af U-værdien for eksempelvis et element med ribber omkring to vinduesåbninger (vist i figur 1), dvs. en reduktion af U-værdien fra 0,30 til 0,15 W/m^{2}K, skal isoleringstykkelsen øges fra 150 mm til 650 mm, hvis den nuværende kuldebroisolering (50 mm) ud for ribberne bibeholdes. Hvis betonribberne omkring vinduerne helt fjernes, kan man nøjes med 300 mm isolering. Varmetabet forårsaget af samlingen mellem vinduets karm og væggen er inkluderet i U-værdien, og er fortsat af betydelig størrelse.



Figur 1. Opstalt og vandret snit ved vindue i element med samlet U-værdi på 0,30 W/m^{2}K (for en traditionel vinduesplacering). Mål er i mm.

Anvendelse af superisolering:
Analyser af om det kan betale sig at anvende et superisolerende phenolskum-produkt (λ=0,026 W/mK) lokalt omkring vinduesribber frem for almindelig isolering (λ=0,039 W/mK) viser, at dette ikke er attraktivt med det nuværende prisforhold. Prisen på superisolering er for samme isoleringsværdi ca. en faktor 3 større end almindelig isolering. Dette prisforhold skal ned på omkring en faktor 2 før anvendelse af superisolering er interessant.

Fjernelse af vinduesribber:
På baggrund af undersøgelser vedr. varmebesparende tiltag ved vinduesribber kan konkluderes, at der bør satses på udvikling af vinduesløsninger uden betonribber ved vindueshuller frem for tiltag som affasning af ribberne og placering af superisolering ud for og omkring ribberne. Med fjernelse af betonribber ved vindueshuller elimineres en meget væsentlig kuldebro og fremstillingsprocessen forenkles.

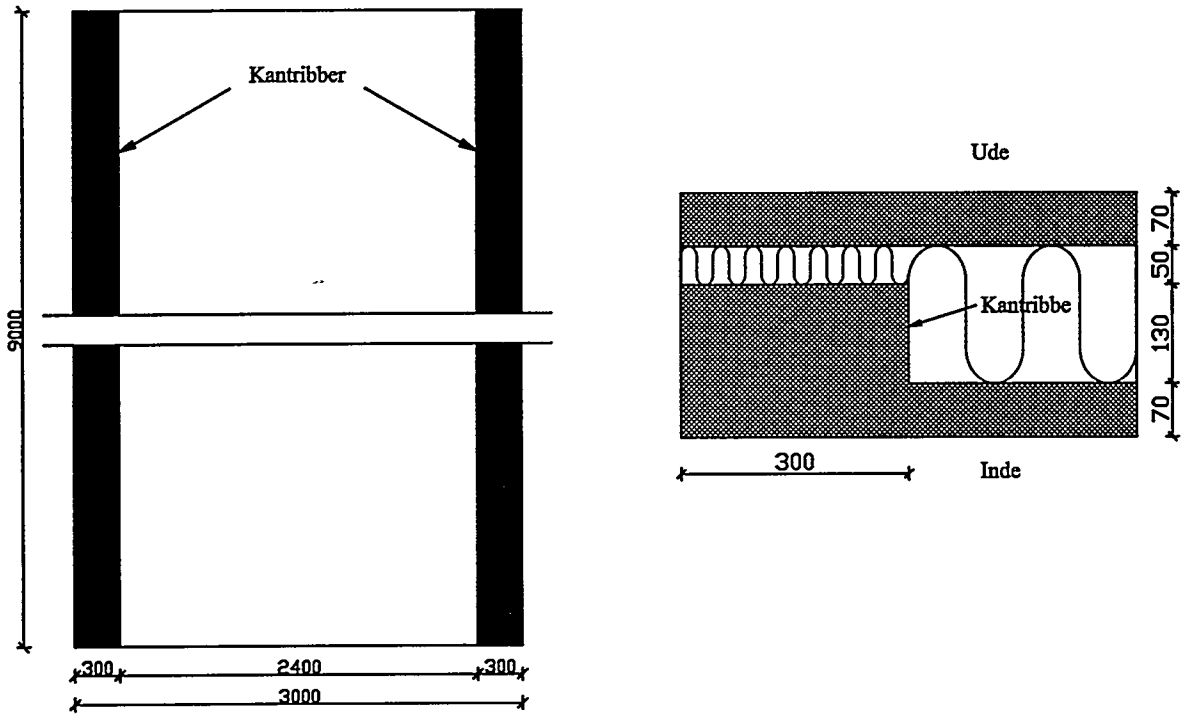
Optimal vinduesplacering:
Den optimale vinduesplacering varmetabsmæssigt set er omkring midten af isoleringslaget i et element uden vinduesribber – det vil sige trukket relativt langt tilbage i facaden ift. typisk anvendte vinduesplaceringer. En sådan placering kræver komplicerede (dyre) udvendige inddækninger og varmetabsbesparelsen "ædes" i betydelig grad op af en reduktion i solindfaldet. Denne løsning har ligeledes betydelige arkitektoniske og æstetiske konsekvenser. Det kan derfor konkluderes, at der er meget der taler for at fastholde den traditionelle vinduesplacering i fremtidens betonelementer med væsentligt større isoleringstykkelse. Fjernelse af ribberne sikre at fordelene ved fremtidige vinduestyper med større afstand mellem glaslagene vil kunne udnyttes fuldt ud ved udskiftning.

Vandret fuge mellem sandwichelementer:
Den traditionelle "hæl-tå-løsning" ved etagekrydset, der skaber overlap mellem to facadeelementer og derved forhindrer vandindtrængen gennem den vandrette fuge, er uegnet til fremtidens højisolerede betonelementer, idet isoleringstykkelsen er væsentligt reduceret på det nedre element for at skabe plads til overlappet mellem forstøbningerne. Der er gennemført analyser og forsøg, der viser, at et mindre overlap, som kan opnås uden reduktion af isoleringstykkelsen, vil være tilstrækkeligt. Forsøgene viser, at kun meget små mængder vand vil kunne blæses op på udstopningsisoleringen.

Betonsandwichelementer med konstruktive ribber

Ribbernes betydning:
Elementer med ribber, der udgør den bærende konstruktion, er meget almindelige i dagens byggeri, og disse ribber kan naturligvis ikke uden videre fjernes. Varmeteknisk set er en ribbekonstruktion uhensigtsmæssig sammenlignet med en konstruktion med plane lag, idet der kræves væsentlig mere isolering i et ribbeelement for at opnå samme U-værdi.

Et beregningseksempel viser, at for at opnå en halvering af U-værdien for det viste ribbeelement i figur 2, dvs. en reduktion af U-værdien fra 0,30 til 0,15 W/m^{2}K, skal isoleringstykkelsen øges fra 180 mm til 300 mm. Varmetabet forårsaget af kantribberne reduceres med ca. 80 %, mens det samlede varmetab altså reduceres med 50 %. Erstattes ribberne i bagstøbningen med et plant lag, kan man nøjes med 250 mm isolering.



Figur 2. Opstalt og vandret snit ved kantribbe for element med samlet U-værdi på 0,30 W/m^{2}K. Mål er i mm.

Anvendelse af superisolering:
Der gælder samme konklusion som for betonelementer med ribber omkring åbninger (se ovenfor).

Alternative muligheder for bærende konstruktion:
Der er foretaget sammenlignende beregninger af de varmetekniske egenskaber og økonomiske forhold vedr. alternative muligheder for bærende konstruktion i et 12 m højt facadeelement. Plane bagstøbninger med forspændt armering bliver betydeligt tungere og noget dyrere end ribbeløsningen. Den traditionelle slapt armerede ribbeløsning er derfor den økonomisk og montagemæssigt mest optimale løsning.

Andre konstruktioner

Fundamentets betydning:
Varmetabet gennem et traditionelt fundament til betonsandwich-elementer er af betydelig størrelse, hvilket primært skyldes, at fundamentet af styrkemæssige hensyn udføres i massiv beton, som har en relativt høj varmeledningsevne. Linietabet for et sådant fundament er beregnet til 0,37 W/mK. Til sammenligning er linietabet 0,21 W/mK for et typisk fundament til enfamilieshuse, hvor de øverste 40 cm af fundamentet består af massive letklinkerblokke.

Fundamentets bidrag til det samlede varmetab stiger, når isoleringstykkelsen øges i vægge og gulv. Det er derfor vigtigt, at der anvendes varmeteknisk gode fundamentsløsninger (god kuldebroafbrydelse) i form af f.eks. et midterisoleret fundament. Udvikling af materialer / komponenter med lav varmeledningsevne og stor styrke til den øvre del af fundamentet vil være ønskelig.

Nyudviklet intermistisk vindue til vinterbyggeri
Vinduet er udviklet uden for rammerne af dette projekt (nærmere indformation inde i rapporten). Det består af et polyethylén-profil påmonteret en klar plastfilm, og fås som et 1-lags plastvindue og i en thermoudgave med en 2-lags plastmembran med en beregnet U-værdi på ca. 3 W/m^{2}K (30-35 mm luft), hvilket kun er ca. det dobbelte af U-værdien for et typisk permanent vindue. Specielt sidstnævnte vindue vil i væsentlig grad kunne begrænse varmetabet i byggerier under opførelse, og derved spare bygherrer for en økonomisk tung post til opvarmning og udtørring af vinterbyggeri.

Summary

Report R-038: Concrete elements with better insulation and less thermal bridge effect.

In this project new concrete sandwich panel solutions with better thermal properties have been developed, usable for highly-insulated buildings, responding to the needs that occur when the demands to the permissible energy consumption for heating is further increased. This is expected to happen in 2005. The improved thermal properties have been obtained without increasing the costs more than of the extra insulation. Removing concrete ribs at window reveals and at horizontal joints enables a thermal improvement as well as reduced costs due to simpler manufacturing of the panel.

A natural grouping of concrete sandwich panels into two categories formed the basis of the work. One is panels with covering concrete reveals as typically used in residential housing and office buildings. The other is about panels with load bearing ribs serving as columns, typically used in industrial and commercial building. Of course there are panels that are a combination of the two categories, but this fact has not been crucial for the analyses.

Concrete sandwich panels with concrete ribs around openings

The significance of the ribs:
Concrete ribs at window and door openings constitute a significant thermal bridge as the insulation thickness is considerably reduced there. In reality a significant reduction of the U-value cannot be obtained without increasing the insulation thickness there or by removing the concrete reveal completely.

As an example, to obtain a halving of the thermal transmission coefficient (the U-value) for a panel with ribs around two window openings shown in Figure 1, i.e. a reduction of the U-value from the present demand 0.30 to 0.15 W/m^2K, the insulation thickness must be increased from 150 mm to 650 mm if the present thermal bridge insulation (50 mm) at the window reveal is retained. If the concrete ribs around the windows are removed, however, 300 mm insulation will be sufficient. The heat loss caused by the jointing between window and wall is included in the U-value and remains to be of considerable extent.

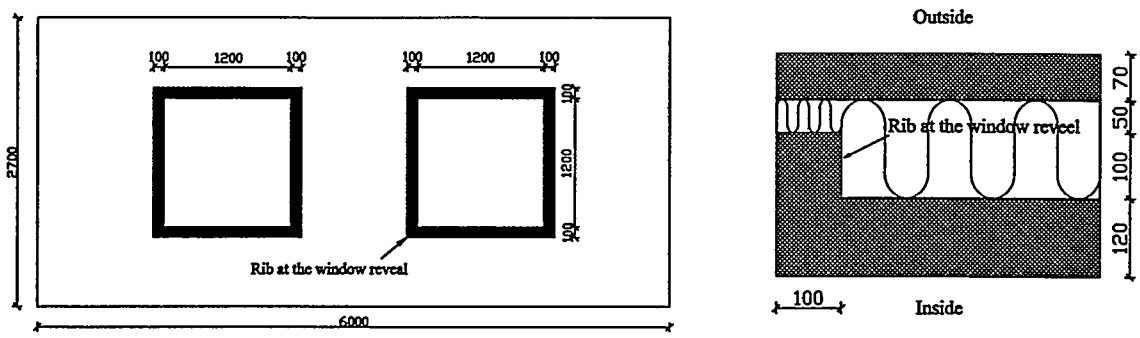


Figure 1. Elevation and horizontal section of a window in a panel with total U-value of 0.30 W/m²K (for a traditional placing of window). The unit of measurement is mm.

Use of super insulation:
Analyses whether it pays to use superinsulation[1] (λ=0.026 W/mK) locally around window ribs rather than ordinary insulation (λ=0.039 W/mK) show that this is not attractive with the present prices. The price of superinsulation is for the same insulation value about a factor 3 larger than the price of ordinary insulation. This price relation must down to about a factor 2 before the use of superinsulation is interesting.

Removal of ribs at the window reveals:
In the light of investigations concerning heat-saving measures at the window reveal it can be conclude that efforts should be concentrated on the development of window solutions without concrete ribs at window openings instead of initiatives like bevelling of the ribs and placing superinsulation at the window reveal. By removing concrete ribs at window openings, a very essential thermal bridge is eliminated and the production process is simplified.

Optimal placing of windows:
The optimal placing of windows with regard to heat loss is about the middle of the insulation layer in a panel without concrete ribs around openings – i.e. placed relatively far back in the façade compared with the placing of windows typically used. Such a placing demands complicated (expensive) outside coverings and the heat loss saving is "eaten up" to a considerable extent by a reduction in solar energy transmission through the window. Equally, this solution involves significant architectural and aesthetic consequences. The conclusion is therefore that many things call for maintaining the traditional placing of windows in the future concrete panels with considerably larger insulation thickness. Removal of the ribs ensures that advantages of future window types with bigger distance between the glass-layers can be fully used when windows have to be replaced.

[1] I.e. phenol foam with a declared thermal conductivity of 0.019 W/mK and a calculation thermal conductivity of 0.026 W/mK (according to the Danish Lambda Calculation Regulations). This superinsulation is produced by Sitek, the building insulation division in the world-wide Morgan-group.

Horizontal joint between sandwich panels:
The traditional "heel-toe-solution" at the horizontal joint between panels, which creates overlapping between two façade panels and thereby prevents percolation of water through the horizontal joint, is unsuitable for the future highly-insulated concrete panels as the insulation thickness of the lower panel is considerably reduced in order to make room for the overlapping between the facings. Analyses and tests have been carried out showing that a minor overlap, which can be obtained without a reduction of the insulation thickness, will be sufficient. Tests show that only very small amounts of water can be blown onto the stuffing insulation.

Concrete sandwich panels with load bearing ribs

The significance of the ribs:
Panels with ribs that constitute the bearing construction are very common in buildings today, and of course these ribs cannot be removed. Thermally a rib-construction is inappropriate compared to a construction with flat layers as much more insulation is required to get the same U-value.

A calculation example shows that to obtain a halving of the U-value for the shown rib-panel in Figure 2, i.e. a reduction of the U-value from 0.30 to 0.15 W/m^{2}K, the insulation thickness must be increased from 180 mm to 300 mm. The heat loss caused by the load bearing ribs is reduced by about 80%, whereas consequently the total heat loss is reduced by 50%. If a flat layer replaces the ribs in the back wall, 250 mm of insulation will be sufficient.

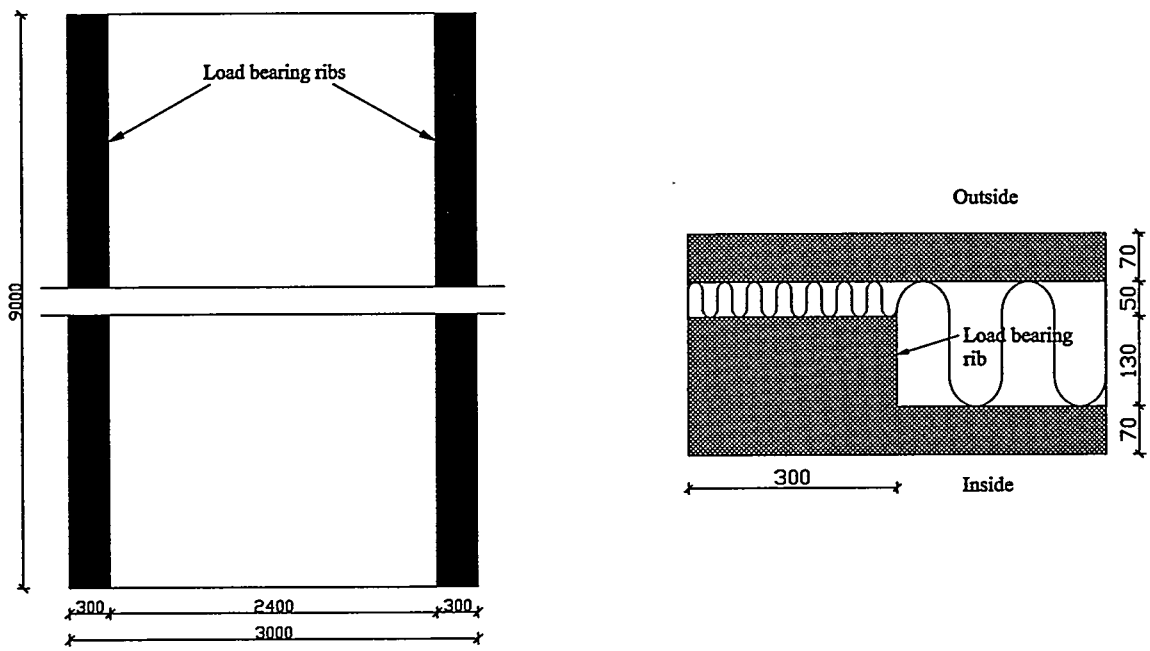


Figure 2. Elevation and horizontal section at a load bearing rib for a panel with a total U-value of 0.30 W/m^{2}K. The unit of measurement is mm.

Use of superinsulation:
The same conclusion applies as for sandwich panels with concrete ribs around openings (see above).

Alternative options for bearing construction:
Comparative calculations have been made of the thermal properties and economic conditions as regards alternative options for bearing construction in a 12 m high facade panel. A reinforced back wall with one flat layer becomes significantly heavy and a little more expensive than the rib-solution. The traditional slackly reinforced rib-solution is the optimum solution with regard to economy and mounting.

Other constructions

The significance of the foundation:
The heat loss through a traditional foundation for concrete sandwich panels is of a considerable magnitude, primarily owing to the fact that the foundation for the sake of strength is made of massive concrete that has a relatively high thermal conductivity. The linear thermal transmittance for such a foundation is calculated to be 0.37 W/mK. By comparison, the linear thermal transmittance is 0.21 W/mK for a typical foundation for single-family houses with the uppermost 40 cm of the foundation consisting of lightweight aggregate concrete blocks.

The contribution of the foundation to the total heat loss rises when the insulation thickness in walls and floors is increased. It is therefore important to use thermally good foundation solutions (good thermal bridge intermission) in the form of e.g. a central insulated foundation. Development of materials/components with low thermal conductivity and great strength for the upper part of the foundation would be desirable.

Newly developed temporary window for winter building
The window is developed outside the framework of this project (further information in the report). It consists of a polyethylene profile with a transparent plastic film mounted on it. The window is available as a one-layer plastic window and in a thermo-version with a two-layer plastic membrane, with a calculated U-value of ca. $3W/m^2K$ (30-35 mm air) which is only about double the U-value of a typical permanent window. Especially the latter window will be able to limit the heat loss of buildings during the construction considerably and thus save building owners an economically heavy entry for heating and drying of winter building.

1 Indtroduktion

1.1 Baggrund

Betonelementer har mange gode byggetekniske egenskaber og er prismæssigt konkurrencedygtigt i større bygninger. Derfor anvendes betonelementer i stor udstrækning i bolig-, erhvervs- og industribyggeri. Hovedvægten i udviklingen af betonelementer har imidlertid ligget på deres funktion som den bærende og stabiliserende del af bygninger.

Isoleringslagets tykkelse, der af produktionsmæssige grunde holdes på et minimum bliver typisk reduceret pga. afstivende og afsluttende ribber, hvorved den samlede U-værdi for elementet bliver betydeligt større end ønsket fra et energimæssigt synspunkt. Samlingerne mellem elementerne giver desuden anledning til ekstra varmetab.

Med det nuværende og kommende behov for bedre isolerede ydervægge er det nødvendigt at udvikle betonelementer til ydervægge med fokus på deres varmeisolerende egenskaber.

1.2 Formål

Projektets overordnede formål er at stimulere en udvikling af betonelementer med bedre isolering og mindre kuldebroer. Målet er at udvikle eksempler på betonelementer med bedre varmetekniske egenskaber. Der lægges stor vægt på en helhedsvurdering af løsnings-forslagene, idet anvendelsen af de bedre isolerede elementer i høj grad vil afhænge af elementernes samlede egenskaber.

Projektet indgår i rammeprogrammet vedrørende Bygningsreglement 2005 og vil dermed være med til at udgøre beslutningsgrundlaget for hvor meget de nye energikrav til nybyggeriet skal skærpes. Med projektets forventede resultater vil der være banet vej for at betonelementbyggeri kan udføres med lige så gode energimæssige egenskaber som andet byggeri.

2 Grundlag for bestemmelse af samlet varmetabskoefficient for betonelementer

2.1 Generelt

Bygningers klimaskærm bliver i dag og vil fremover blive isoleret meget bedre end tidligere. Derved kommer kuldebroer i konstruktioner og konstruktionssamlinger til at få en relativt større betydning for det samlede varmetab end de tidligere har haft. Der er derfor behov for at foretage detaljerede beregninger af kuldebrovirkninger i typiske klimaskærmskonstruktioner.

De eksisterende europæiske standarder om beregning af bygningers varmetab, som vil træde i kraft i løbet af få år, opdeler det samlede varmetab gennem en bygningsdel i 3 forskellige bidrag; fladetab (U-værdier), linietab (ψ-værdier) og punkttab (χ-værdier), svarende til hhv. 1-, 2- og 3-dimensionale varmestrømme. Opdelingen giver et generelt bedre overblik over konstruktioner og samlinger, men stiller samtidig krav om at der anvendes detaljerede beregninger ved bestemmelsen af 2- og 3-dimensionale effekter.

For at imødekomme de nye krav, og som et led i overgangen til de nye regler, er der udarbejdet et tillæg 3 til DS418 om beregning af betonsandwichelementers U-værdi [7] samt et program baseret på dette tillæg til beregning af U-værdien. Forudsætningerne for dette tillæg følges stort set i det følgende, idet der dog tages højde for gennembrydende armering (hængebøjler og bindere) vha. 3-dimensionale edb-beregninger (punkttabsberegninger), og ikke ved arealvægtning af λ-værdierne for armering og isolering.

Der skal i følge omtalte tillæg 3 tages højde for linietabet for samlingen omkring vinduer og døre efter reglerne i tillæg 4 til DS418 om kuldebroer [3]. Men da dette ikke forelå ved projektets start, er der i stedet for foretaget detaljerede beregninger vha. HEAT2 [4].

2.2 Beregningsforudsætninger

Følgende forudsætninger ligger til grund for beregning af flade-, linie- og punkttab:

- Varmestrømme i tre dimensioner ved ribber tilnærmes med to-dimensionale varmestrømme.
- Linietabet regnes uafhængigt af ribbebredden (se analyse nedenfor).
- Varmetabsberegningerne foretages vha. 2- og 3-dimensionale beregningsprogrammer (primært HEAT2 og HEAT3 [4]). Desuden anvendes det 2-dimensionale program THERM [5], der især er velegnet til beregning af komplicerede geometrier. Netinddelingen, dvs. afstanden mellem punkter hvor temperaturen beregnes, er valgt tættest mulig, dog tilpasset således at uforholdsmæssige lange beregningstider undgås.
- Isoleringsmaterialet er som udgangspunkt kl.39 isolering.

- Varmeledningsevnen for beton sættes til 1,6 W/mK - dette gælder også for armerede ribber der pga. armeringsbøjler kan have en noget højere ækvivalent varmeledningsevne (se nedenfor).
- Linietabet pga. spring i isoleringstykkelse ved ribber er bestemt ud fra figur 3 i DS418-tillæg 3 samt ved beregning iht. DS418-tillæg 4 om kuldebroer (anneks A).
- Linietabet for samlinger omkring vinduer og døre beregnes iht. DS418-tillæg 4 om kuldebroer (anneks B).
- I varmeledningsevnen for isoleringen medtages ikke effekten af strittere/bindere, idet denne effekt bestemmes særskilt vha. 3-dimensionale beregninger. Dette er i modstrid med ovennævnte tillæg 3 til DS418, som foreskriver at der tages højde for gennembrydende hængestropper og bindere ved arealvægtning af λ-værdierne for armering og isolering. Beregninger viser imidlertid, at fejlen ved at arealvægte er betydelig, og der benyttes derfor punkttabsmetoder.

Linietabet som følge af spring i isoleringstykkelse kan antages ikke at afhænge af ribbebredden. Denne tilnærmelse er undersøgt ved at beregne ψ-værdien for 50, 100, 200, 300 og 500 mm bredde ribber ved ribbeisoleringstykkelser på 50, 75 og 100 mm ved en isoleringstykkelse på 200 mm. Resultatet af beregningerne ses i tabel 1.Værdierne bekræfter, at linietabet med god tilnærmelse kan regnes uafhængigt af ribbebredden. Ved meget små ribbebredder er tilnærmelsen dog lidt på den sikre side, hvilket beregningen af 50 mm ribbebredde indikerer.

Tabel 1. Linietabet størrelse pga. ribber [W/mK] som funktion af ribbebredde og ribbeisoleringstykkelse ved et isoleringsniveau på 200 mm.

Ribbebredde	Ribbeisoleringstykkelse [mm]		
[mm]	50	75	100
50	0,0165	0,0112	0,0071
100	0,0171	0,0115	0,0073
200	0,0173	0,0115	0,0073
300	0,0173	0,0115	0,0073
500	0,0173	0,0115	0,0073

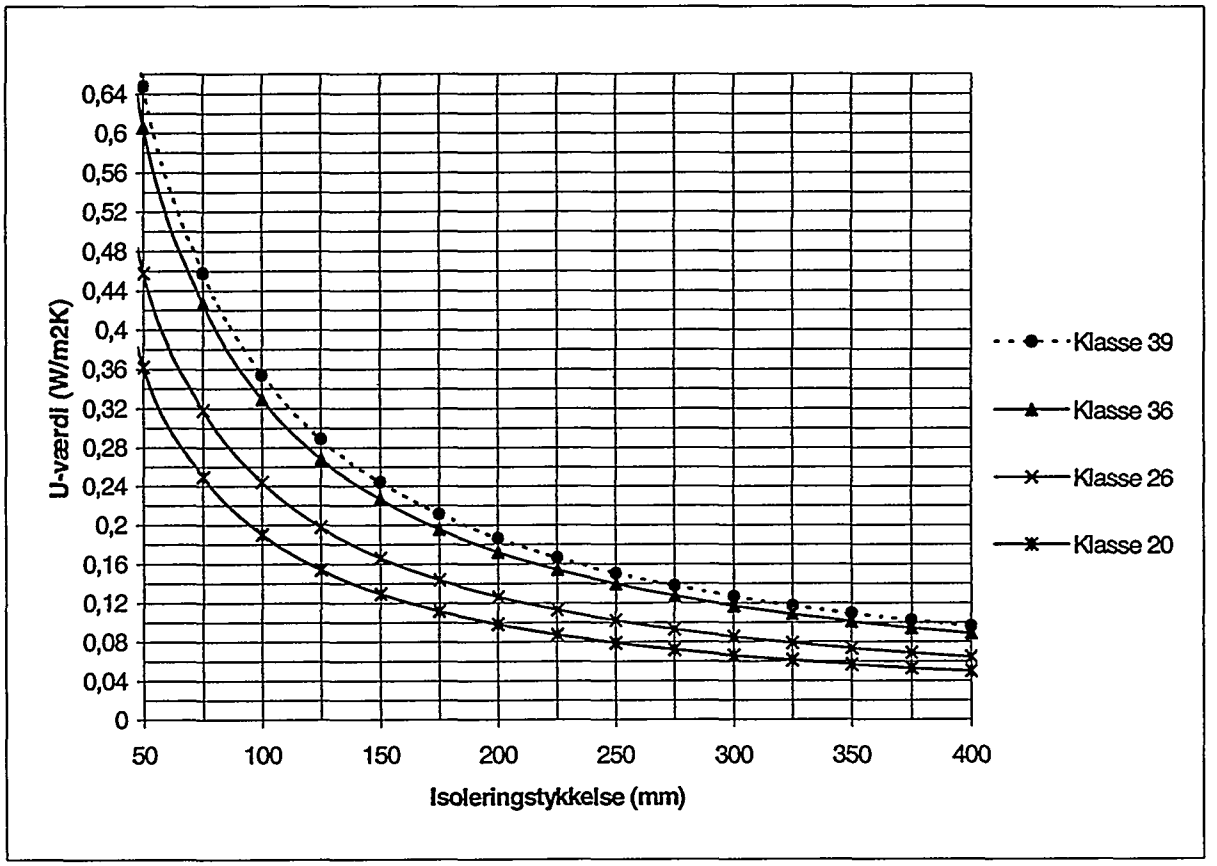
Der regnes som nævnt ovenfor med en varmeledningsevne for beton på 1,6 W/mK. Denne værdi gælder strengt taget kun for uarmeret beton, idet armeringen vil give anledning til et vis ekstra varmetab. Bidraget fra pladearmering og hovedarmering i ribber er minimal, mens bøjlerne i konstruktive ribber vil have en større indflydelse (på både fladetab ved ribbe og linietab pga. spring i isoleringstykkelse). Beregninger viser at for en typisk armeret ribbe fås en ækvivalent varmeledningsevne for betonen på omkring 2,0 W/mK. Da betonens varmeledningsevne i forvejen er relativt høj, vil det være af mindre betydning hvilken varmeledningsevne (1,6 eller 2,0) der bruges for betonen. For typiske elementer med konstruktive ribber vil brug af 2,0 for disse betyde et ekstra varmetab på ca. 1 %. Man vil derfor med rimelighed kunne se bort fra armeringsbøjlernes effekt på varmetabet.

2.3 Flade-, linie- og punkttab

I det følgende redegøres der for grundlaget for bestemmelse af en samlet U-værdi for betonsandwich-elementer. Det vil med andre ord sige, at flade-, linie- og punkttab bestemmes for forskellige isoleringsniveauer og isoleringsklasser.

2.3.1 U-værdi for den fuldt isolerede del og for ribber

Figur 3 viser kurver for U-værdien som funktion af isoleringstykkelsen, beregnet for en samlet tykkelse af for- og bagstøbning på 150 mm. Der er beregnet værdier for fire isoleringsklasser (39, 36, 26 og 20).

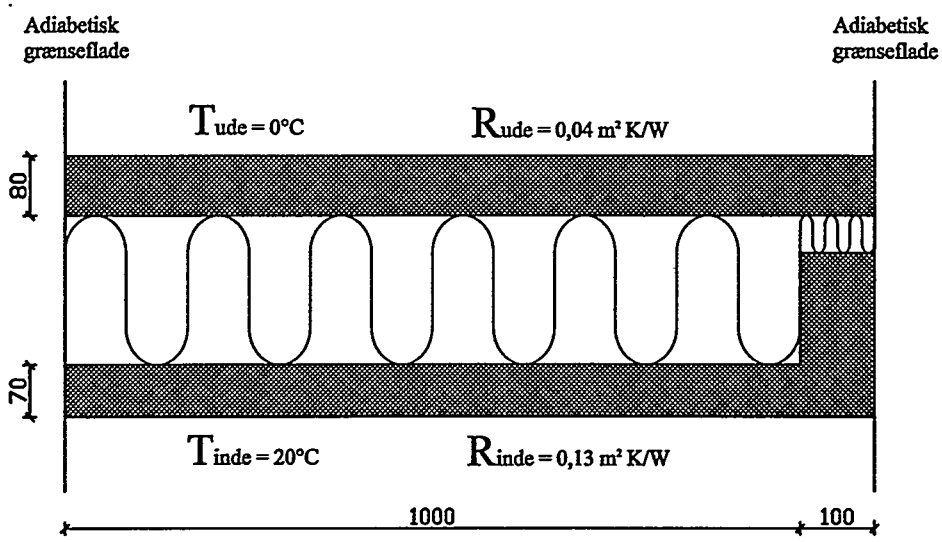


Figur 3. U-værdi som funktion af isoleringstykkelsen for betonsandwichelement med en samlet tykkelse af for- og bagstøbning på 150 mm.

Traditionel klasse 39 isolering har en isolerende effekt, der er ca. 40 gange bedre end beton. Derfor har betontykkelsen almindeligvis meget lille betydning for U-værdien. For eksempelvis et typisk bolig- og kontorelement, hvor den fuldt isolerede del består af 150 mm isolering, reduceres U-værdien ca. 2 %, hvis for- og bagstøbningstykkelsen samlet er 300 mm fremfor 150 mm. Ved små isoleringstykkelser, f.eks. ved vinduesfalsen, hvor isoleringstykkelsen typisk reduceres til 50 mm, er betydningen dog ikke helt uvæsentlig. Hvis U-værdien i dette tilfælde bestemmes ud fra de 150 mm betontykkelse, vil det 1-dimensionale varmetab ved ribberne for et element med 120 mm bagstøbning og 70 mm forstøbning (altså i alt 290 mm betontykkelse) blive overvurderet med ca. 6 %. Betontykkelsens betydning aftager naturligvis ved større isoleringstykkelse og ved brug af isolering i lavere isoleringsklasser.

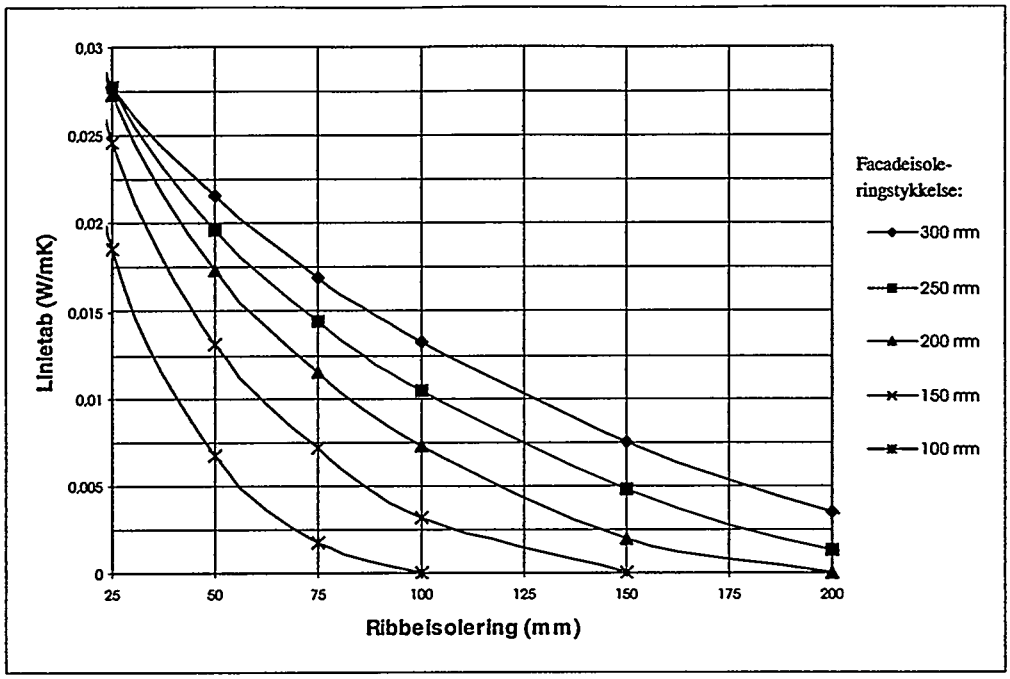
2.3.2 Linietab for ribber

Linietabet ψ er bestemt for en ribbebredde på 100 mm (se figur 4), men kan tilnærmelsesvis regnes uafhængig af ribbebredden (jvf. ovenstående analyser). Beregningerne er foretaget iht. Anneks A til DS418, tillæg 4.



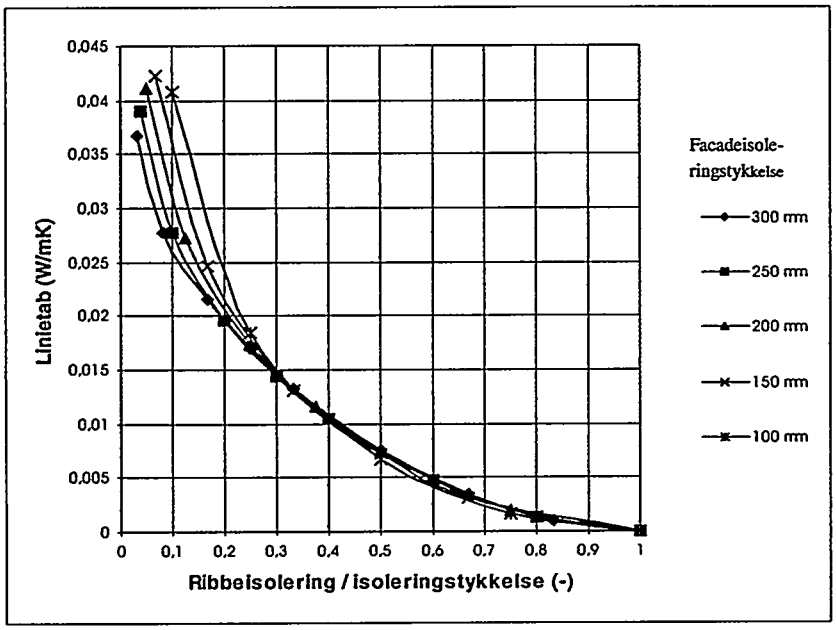
Figur 4. Beregningsmodel ved bestemmelse af linietab for kuldebro i form af en betonribbe. Angivne mål er mm.

Figur 5 viser typiske linietab for betonelementer med isolering i klasse 39, som funktion af ribbeisoleringstykkelsen.



Figur 5. Typiske linietab (ψ-værdier) for et element med hhv. 100, 150, 200, 250 og 300 mm isolering i klasse 39 i den fuldt isolerede del, og en samlet tykkelse af for- og bagstøbning på 150 mm. Værdierne kan også anvendes for andre tykkelser af for- og bagstøbning.

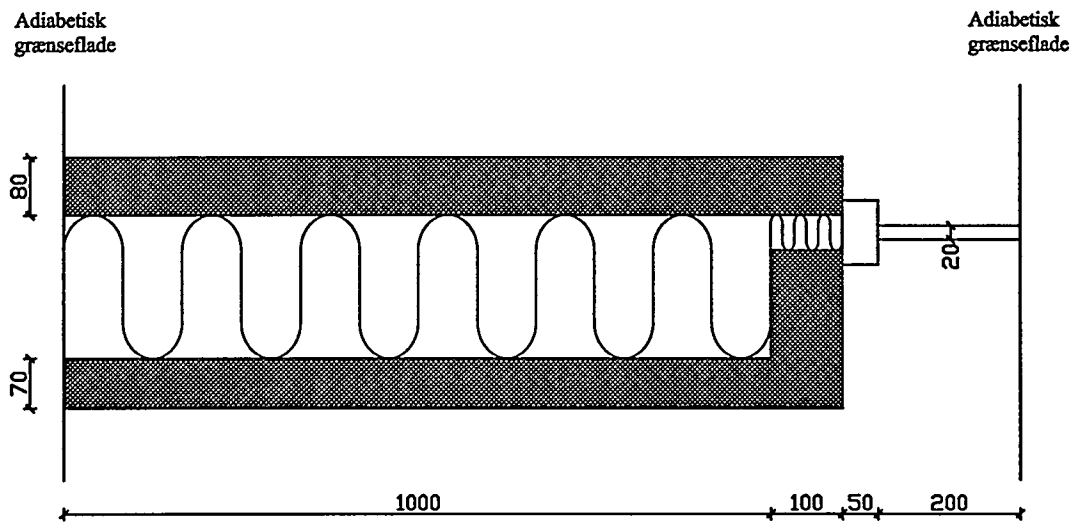
Hvis man anvender ribbeisoleringstykkelse divideret med isoleringstykkelse som x-akse, vil kurverne omtrent falde sammen for de relevante ribbeisoleringstykkelser, hvilket fremgår af figur 6. Det betyder at linietabet er konstant for en given procentvis reduktion af isoleringen ved ribben, f.eks. ca. 0,007 W/mK ved 50 % reduktion.



Figur 6. Linietabet som funktion af forholdet mellem ribbeisoleringstykkelse og isoleringstykkelsen af den fuldt isolerede del.

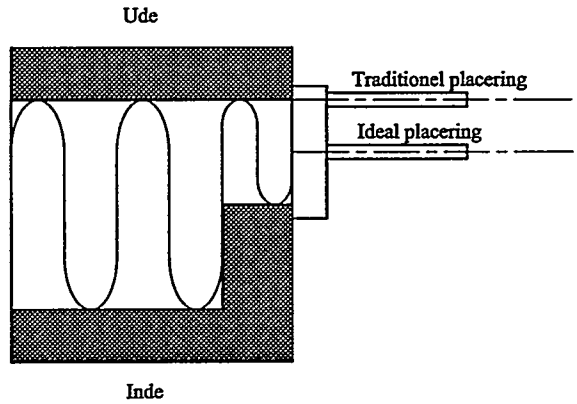
2.3.3 Linietab for samlingen omkring vinduer

Linietabet for samlingen omkring vinduer er beregnet for et konstruktionsudsnit, som vist i figur 7. En ramme-karm-konstruktion af træ er undersøgt. Beregningerne er foretaget for 100, 200 og 300 mm isoleringstykkelse og ved forskellige ribbeisoleringstykkelser. Der er regnet med 2 cm karm-overlap til for- og bagstøbning, og med isolering overalt i klasse 39. Vinduesruden modelleres med en tykkelse på to cm og en beregningsteknisk varmeledningsevne på 0,030 W/mK, som giver den typiske U-værdi 1,5 W/m^{2}K.

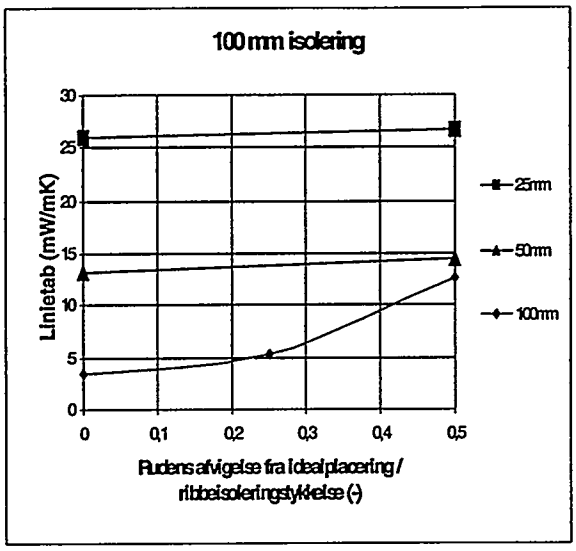


Figur 7. Beregningsmodel ved bestemmelse af linietab for samlinger omkring vinduer. Randbetingelser er de samme som ved beregning af linietab for ribber (se figur 4).

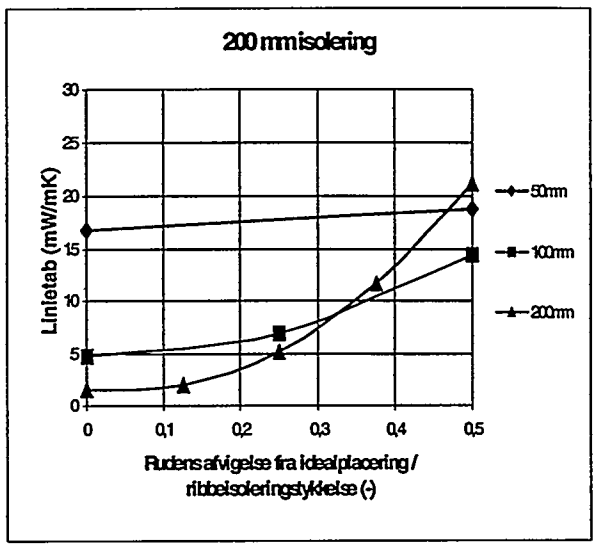
Der er undersøgt vindueplaceringer svarende til at vinduesruden er placeret midt i ribbeisoleringen eller længere ude i facaden. En placering midt i ribbeisoleringen er ideel, da de 2-dimensionale varmestrømme er reduceret til et minimum. Den mest yderlige placering der er undersøgt, svarer til at midten af ruden flugter med forstøbningens bagkant, hvilket svarer til en traditionel placering (se figur 8). Der er generelt anvendt spring på 25 mm. Beregningsresultaterne fremgår af figur 9a-c nedenfor.



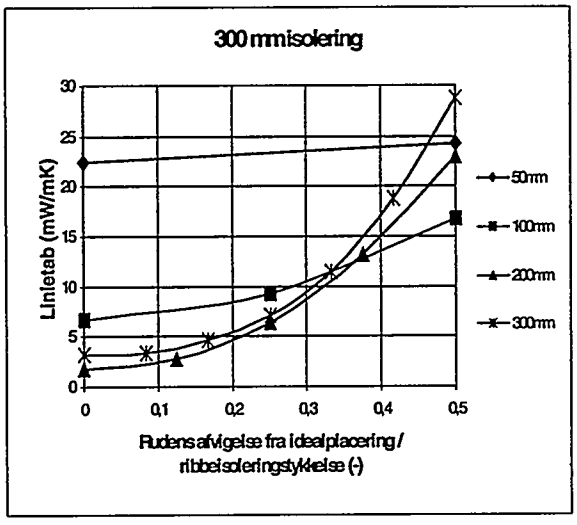
Figur 8. Principskitse af vinduesplaceringer svarende til traditionel og ideal placering.



Figur 9a



Figur 9b



Figur 9c

Figur 9a-c. Linietab for samlingen omkring vinduer som funktion af rudens afvigelse fra idealplaceringen i midten af ribbeisoleringen i retning mod udeluften. For hver af de tre facadeisoleringstykkelser er der undersøgt forskellige ribbeisoleringstykkelser (anført yderst til højre på figurerne).

Det ses af ovenstående figur 9a-c at linietabet, for fastholdt ribbeisoleringstykkelse og vinduesplacering, naturligvis øges når isoleringstykkelsen øges. Det ses også, at der kan opnås en kraftig reduktion af linietabet ved blot at flytte vinduet få cm ind i facaden (ift. en traditionel placering), især ved store isoleringstykkelser.

2.3.4 Kuldebroernes betydning for det samlede varmetab

I tabel 2 er vist en opgørelse af de to beregnede linietab (spring i isoleringstykkelse og vindues-samling) sammenholdt med det ekstra 1-dimensionale varmetab ved ribber.

Tabel 2. Linietab for ribbe og samling omkring vinduer samt ekstra 1-dimensional varmetab (opgjort som linietab) for 100 mm bred betonribbe ved hhv. 100, 200 og 300 mm isoleringstykkelse.

Ribbe-isolerings-tykkelse	Linietab [W/mK]			Ekstra 1-dimens. tab	Samlet varmetab ved ribbe	Procentandel af det saml. varmetab [%]	
	Ribbe	Vindues-samling*	I alt	[W/mK]	[W/mK]	Linietab	Ekstra 1-dims.
100 mm isolering							
50	0,007	0,014	0,021	0,028	0,049	43	57
100	0	0,013	0,013	0	0,013	100	0
200 mm isolering							
50	0,017	0,019	0,036	0,042	0,078	46	54
100	0,007	0,014	0,022	0,016	0,038	57	43
200	0	0,021	0,021	0	0,021	100	0
300 mm isolering							
50	0,022	0,024	0,046	0,046	0,092	50	50
100	0,013	0,017	0,030	0,021	0,051	58	42
150	0,008	0,019	0,027	0,011	0,038	70	30
200	0,004	0,023	0,027	0,006	0,032	82	18
300	0	0,029	0,029	0	0,029	100	0

*Som eksempel er anført linietab for en traditionel vinduesplacering.

Det ses af tabel 2 at det samlede ekstra varmetab ved en 100 mm ribbe (inkl. vinduessamling) for en typisk kuldebroisolering på 50 mm er 0,049, 0,078 og 0,092 W/mK ved hhv. 100, 200 og 300 mm isoleringstykkelse. Kendes forholdet mellem længden af vinduestilslutninger og arealet af ydervæggene i et betonelementbyggeri, kan beregnes et tillæg til U-værdien for et tværsnit uden reduceret isoleringstykkelse. En typisk værdi for dette forhold er 0,75 m vinduestilslutning pr. m^2 ydervæg. Herefter kan kuldebroernes andel af det samlede varmetabet beregnes (der ses bort fra bindere). Denne andel fremgår af tabel 3.

Tabel 3. Kuldebroernes andel af det samlede ydervægs-varmetab ved forskellige isoleringsniveauer. Ribberisoleringstykkelsen er 50 mm og der er regnet med 0,75 m vinduestilslutning pr. m^2 ydervæg.

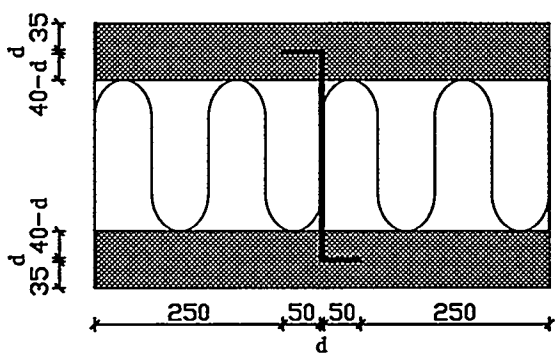
Isolerings-tykkelse [mm]	U-værdi ydervæg [W/m^2K]	Tillæg pga. vindues-ribber og -tilslutning [W/m^2K]	Andel af det samlede varmetab [%]
100	0,354	0,037	10
200	0,185	0,059	24
300	0,126	0,069	36

Det fremgår tydeligt af tabel 3 at kuldebroernes andel af det samlede varmetab forøges betydeligt, hvis man øger isoleringstykkelsen uden at øge isoleringstykkelse ved vinduesfalsen.

2.3.5 Punkttab som følge af bindere/strittere og bærebøjler

Usikkerheden ved at anvende en vægtet varmeisoleringsevne når isoleringen gennembrydes af bindere etc. er stor (jvf. beregningsforudsætninger). Derfor anvendes denne tilnærmelse ikke i det følgende. De varmetabsmæssige effekter af bindere og bærebøjler medtages i stedet for direkte ved anvendelse af punkttabsmetoder. Disse effekter bestemmes ud fra en 3-dimensional model af en binder/hængebøjle og en passende del af den øvrige vægkonstruktion. Beregningen gennemføres hhv. med og uden forbindelsesjern, hvorved punkttabskoefficienten χ for gennembrydningen kan bestemmes ud fra differencen mellem de to beregninger. Punkttabet χ dækker altså den samlede forøgelse af varmetabet på grund af binderen/hængebøjlen inklusiv den 1-dimensionale varmestrøm.

Binderne modelleres kvadratiske med en ækvivalent kantlængde, da modellering af en rund form vil være for tidskrævende. Beregningsmodellen er vist i figur 10. Bindere udføres oftest i rustfrit stål eller tinbronze (mere smidigt materiale, men dyrere), som en enkelt "pind" med diameteren 3 eller 4 mm. Tinbronze anvendes aldrig i sandwichelementer, men dog nogle gange i murede facadebagvægge til skalmuring. Bindere i sandwich-elementer bukkes omkring pladearmeringen, idet længden af ombukningen afhænger af elementtykkelsen (pga. standard-binderlængder). Minimums forankringslængder m.v. fremgår bl.a. af SBI-anvisning 157 [8] (Trådbindere til forankring af skalmure og hule mure).



Figur 10. Beregningsmodel af binder/sandwichelement (vandret snit). I beregningerne medtages 50 cm konstruktion i højden.

Punkttabskoefficienter beregnes for 3 og 4 mm rustfrit stål hhv. tinbronze. Varmeledningsevnen for de to materialer er hhv. 17 W/mK og 65 W/mK. Resultatet af beregningerne er vist i tabel 4, og det skal bemærkes at punkttabene er angivet i mW/K, dvs. 10^{-3} W/K.

Tabel 4. Punkttabskoefficienter χ [x 10^{-3} W/K pr. binder] for bindere af rustfrit stål/tinbronze ved forskellige isoleringstykkelser.

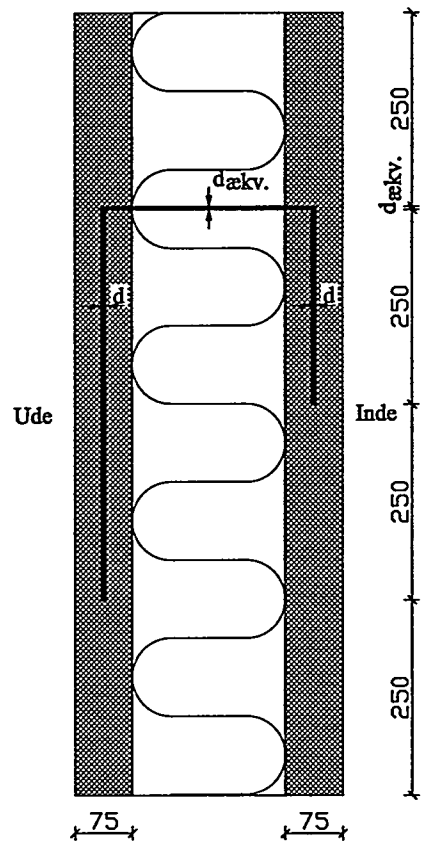
Isolerings-tykkelse [mm]	Binderdiameter 3 mm		4 mm	
	Rustfrit stål	Tinbronze	Rustfrit stål	Tinbronze
100	0,9	2,9	1,5	4,9
150	0,7	2,2	1,2	3,8
200	0,6	1,8	0,9	3,1
250	0,5	1,5	0,8	2,7
300	0,4	1,3	0,6	2,3

Man bruger normalt 4 eller 8 stk. bindere pr. m^2. Der kan derfor angives en "ΔU", dvs. et samlet varmetabsbidrag for bindere i W/m^2K (se tabel 5). Der er kun angivet værdier for 4 stk. bindere pr. m^2. Varmetabsbidraget for det dobbelte antal bindere fås simpelt ved at multiplicere tabelværdierne med en faktor to.

Tabel 5. Varmetabsbidrag [x 10^{-3} W/m^2K] for 4 bindere pr. m^2 ved forskellige isoleringstykkelser.

Isolerings-tykkelse [mm]	Binderdiameter 3 mm		4 mm	
	Rustfrit stål	Tinbronze	Rustfrit stål	Tinbronze
100	3,6	11,6	6,0	19,6
150	2,8	8,8	4,8	15,2
200	2,4	7,2	3,6	12,4
250	2,0	6,0	3,2	10,8
300	1,6	5,2	2,4	9,2

Den varmetabsmæssige effekt af bærebøjler medtages ved beregning af en typisk udformning af en sådan anordning. I sandwichelementer udføres bærebøjler typisk som 7 mm bukkede jern, der gennembryder isoleringen i en vinkel på ca. 30° ift. lodret. Bøjlerne udføres af sikkerhedsmæssige årsager i rustfrit stål. Bøjlen forankres ca. 50 cm i forstøbningen og bukkes rundt om længdearmeringen i bagstøbningen. Som for bindere er bærebøjlerne modelleret kvadratiske og den skrå gennembrydning er for enkelthedens skyld modelleret som en vandret gennembrydning med et ækvivalent areal (jvf. figur 11). Det ækvivalente areal er valgt halvt så stort som det virkelige areal, da den skrå gennembrydning er dobbelt så lang som den vandrette.



Figur 11. Beregningsmodel af bærebøjle/sandwichelement (lodret snit). I beregningerne medtages 25 cm konstruktion på hver side af bøjlen.

Der er foretaget beregninger for 6, 8 og 10 mm hængejern og resultaterne fremgår af tabel 6.

Tabel 6. Punktvarmetab [x 10^{-3} W/K pr. bærebøjle] for bærebøjler i rustfrit stål ved forskellige isoleringstykkelser.

Isoleringstykkelse [mm]	Bøjlediameter 6 mm	8 mm	10 mm
100	2,6	2,8	4,3
150	1,9	2,1	3,4
200	1,4	1,7	2,7
250	1,2	1,4	2,3
300	1,0	1,2	2,0

3 Fremgangsmåde ved udvikling af betonelementer med bedre varmetekniske egenskaber

Betonsandwich-elementer kan naturligt opdeles i to kategorier. Den ene drejer sig om elementer med ribber omkring åbninger og den anden omhandler elementer med konstruktive ribber. Der findes naturligvis elementer, der er en kombination af de to kategorier, men det er ikke afgørende for analyserne.

3.1 Typiske betonelementer

Der redegøres for ribbernes funktion, og der gives et eksempel på en varmeteknisk beregning af et typisk element inden for hver af de to kategorier. Eksemplerne omhandler et element til bolig- og kontorbyggeri med ribber omkring to vinduesåbninger samt et højt sandwich-facadeelement til haller med konstruktive ribber.

U-værdien for den fuldt isolerede del og ribberne angives. De forskellige linietabs størrelser gøres op og den samlede U-værdi beregnes. Summen af varmetabet forårsaget af ribber (dvs. spring i isoleringstykkelse og ekstra 1-dimensionale varmetab) og nogle gange samlingen mellem vindue og ydervæg benævnes ribbetab i det følgende. Det skal bemærkes, at det ekstra 1-dimensionale varmetab er angivet som et linietab. Derved kan alle bidrag til varmetabet ved ribber opgøres som linietab. Sammenligning af forskellige ribbeudformninger er derved nemmere. De fladetab, der er anført, angiver varmetabet fra hele den "ideelle" vægflade (uden ribber).

3.2 Udvikling af nye og bedre løsninger

Udvikling af betonelementer med bedre varmetekniske egenskaber indebærer, at en helhedsvurdering er nødvendig, da anvendelsen af bedre isolerede elementer i høj grad vil afhænge af elementernes samlede egenskaber. Det tilstræbes i relevant omfang, at de forslag til ændringer i udformningen, der opstilles i det følgende - med henblik på at øge isoleringstykkelsen og mindske effekten af kuldebroer - analyseres og vurderes ud fra følgende model:

I. Beskrivelse
1. Beskrivelse af de enkelte konstruktionlag/-dele
2. Samlinger til andre bygningsdele
3. Fremstillingsproces: opbygning/montage

II. Egenskaber/vurdering
1. Varmeteknik (fladetab, linietab, punkttab, effektiv varmekapacitet)
2. Øvrige funktionskrav: Statik, brand, lyd, regn- og vindtæthed
3. Holdbarhed (vedligeholdelse, isolering m.m.)
4. Arkitektoniske forhold
5. Produktions- og montagemæssige forhold
6. Totaløkonomi

Fremgangsmåden i udviklingen er først at se på, hvad det indebærer at komme mere isolering i elementerne uden at ændre væsentligt på udformningen. Der foretages beregninger af hvilken isoleringstykkelse der cirka svarer til det isoleringsniveau man må forvente vil gælde for tunge (og lette) ydervægskonstruktioner i et kommende bygningsreglement (år 2005). Dette niveau er i den nuværende energiplan, Energi 21 [1], anført som BR95-niveauet reduceret med omkring 33 %. Dette betyder, at U-værdien skal ned på omkring 0,13-0,14 W/m^{2}K, idet der tages udgangspunkt i det nuværende U-værdi-krav til lette ydervægskonstruktioner, som er 0,20 W/m^{2}K. Der er hermed set bort fra, at kravet til betonsandwichelementer - der hører under kategorien tunge vægge - faktisk er 0,30 W/m^{2}K. Denne betydelige forskel begrundes officielt med de tunge ydervægges gode varmelagringsegenskaber. Der er dog meget der tyder på, at varmekapacitetens betydning derved bliver væsentligt overvurderet, hvilket bl.a. er vist i en rapport vedrørende udvikling af fremtidens klimaskærmskonstruktioner [9]. En U-værdi for tunge ydervægge på 0,21-0,22 ville mere passende udtrykke den reelle effekt af den bedre varmekapacitet. På denne baggrund er det rimeligt, at tage udgangspunkt i det nugældende U-værdi-krav for lette ydervægge. På trods af dette, er det valgt at benytte U-værdien 0,15 som mål for et forventeligt kommende U-værdi-krav til betonsandwichelementer, da denne nok er mere realistisk end 0,13 og samtidig netop er en halvering af det nugældende krav.

Der tages ikke stilling til om en helt anden udformning vil kunne opfylde de kommende krav på en bedre måde og betyde mindre isoleringstykkelser m.v. Denne analyse foretages efterfølgende.

Der opstilles og analyseres en række forslag til udformning af betonsandwich-elementer med bedre varmetekniske egenskaber. Andre betonelementløsninger samt samlinger til andre bygningsdele hvor der også er kuldebroer behandles ligeledes. Til sidst udvælges de bedste løsningsforslag baseret på de nævnte helhedsvurderinger, og en grundig undersøgelse / dokumentation foretages.

4 Betonelementer med ribber omkring åbninger

Ribber omkring vindues- og døråbninger fungerer primært som en lukning af elementet og til fastgørelse af vinduets karm og reduktion af karm-dybden. Varmeteknisk set er sådanne ribber meget uheldige, idet de giver anledning til betydelige ekstra varmetab ift. en ideel konstruktion med en bagstøbning uden spring i isoleringstykkelsen. Ribberne har ingen statisk funktion og man kan derfor reducere både bredde og tykkelse til gavn for de varmetekniske forhold.

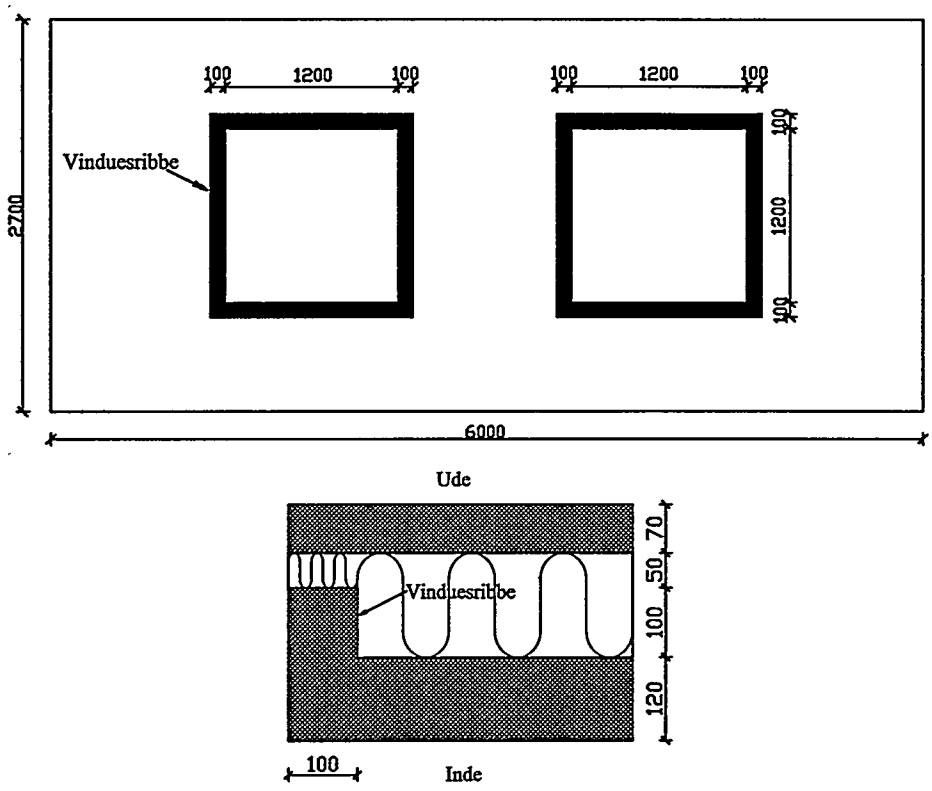
Det forholder sig dog anderledes for elementer med konstruktive ribber, hvor ribberne ikke bare kan fjernes uden at bagstøbningen gøres større eller andre tiltag foretages.

4.1 Typisk sandwichelement til bolig- og kontorbyggeri

Elementet er 2,7 m højt og 6 m bredt og har to vinduesåbninger på 1,2 m · 1,2 m (se figur 12).

Der gøres følgende forudsætninger:

- Vinduesribber/-false er udformet som vist på figur 12 i hele vinduets omkreds.
- Vinduesruden er placeret så midten af vinduesruden flugter med forstøbningens bagkant.
- For- og bagstøbning er holdt sammen af 6 stk. ø4 mm rustfri bindere pr. m^2 svarende til ca. 75 mm^2/m^2.
- Forstøbningen er ophængt i bagstøbningen i 4 stk. ø8 mm hængebøjler.



Figur 12. Opstalt og vandret snit ved vinduesribber i typisk sandwichelement med to vinduesåbninger.

Elementets geometri kan beskrives ved følgende:
Samlet areal: 13,3 m^2
Ribbeareal: 1,04 m^2.
Ribbelængde: 11,2 m
(Det forudsættes at der ikke er ribber ved periferien af elementet)
Omkreds af vinduesåbninger: 9,6 m
Bagstøbning: 120 mm
Forstøbning: 70 mm
Isoleringstykkelse: 150 mm
Ribbeisoleringstykkelse: 50 mm

Typisk element: 150 mm isolering (U=0,30)

$U_{væg} = 0{,}242\ W/m^2K$
$U_{ribbe} = 0{,}612\ W/m^2K$
$\Psi_{ribbe} = 0{,}013\ W/mK$
$\Psi_{vindue} = 0{,}016\ W/mK$
$\chi_{binder} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ W/K$
$\chi_{hængebjl.} = 2{,}1 \cdot 10^{-3}\ W/K$

Tabel 7. Varmetabet ved vinduesribber (ribbetab). Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede ribbetab.

Bidrag	Ψ [W/mK]	- [W/mK]	l [m]	Ribbetab [W/K]
Spring i isoleringstykkelse	0,013	-	11,2	0,15 (22)
Samling omkring vinduer	0,016	-	9,6	0,15 (22)
Ekstra 1-dims. varmetab		0,034[1)]	11,2	0,39 (56)
I alt				0,69 (100)

1) $(U_{ribbe} - U_{væg}) \cdot (A_{ribbe} / l_{ribbe}) = (0{,}612 - 0{,}242) \cdot (1{,}04 / 11{,}2) = 0{,}034\ W/mK$

Tabel 8. Oversigt over flade-, ribbe- og punkttab samt U-værdi. Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede varmetab.

Fladetab [W/K]	3,23 (80)
Ribbetab [W/K]	0,69 (17)
Punkttab [W/K]	0,10[2)] (3)
Varmetab i alt [W/K]	4,02 (100)
U-værdi [W/m^2K]	**0,30**

2) $(1{,}2 \cdot 10^{-3}$ W/K pr. stk. $\cdot$ 6 stk. bindere pr. $m^2 \cdot 12{,}3\ m^2) + (2{,}1 \cdot 10^{-3}$ W/K $\cdot$ 4 stk. bøjler) = $0{,}09 + 0{,}01 = 0{,}10$ W/K

Det fremgår af ovenstående eksempel, at med en isoleringstykkelse på 150 mm og en ribbeisoleringstykkelse på 50 mm fås en U-værdi på 0,30 W/m^2K. I tabel 8 er andelen af de for-

skellige varmetab opgjort. Det bør bemærkes, at ribbe- og punkttabene udgør 20 % af det samlede varmetab.

4.2 Forøgelse af isoleringstykkelsen

Ved forøgelse af isoleringstykkelsen kan man umiddelbart vælge at gøre følgende ved ribber omkring vinduesåbninger:

1. Øge ribbetykkelsen svarende til merisoleringen - dvs. samme kuldebroisolering.
2. Bibeholde ribbedimensionen.
3. Fjerne ribberne.

Den nævnte løsning under punkt 1 er den nemmeste løsning, idet den ikke giver anledning til problemer omkring fastgørelse af vindue og afdækning af ribbeisoleringen. Løsningen er imidlertid varmeteknisk dårlig pga. den forholdsvis lille kuldebroisolering i vinduesfalsen. Løsningerne under punkt 2 og 3 er varmeteknisk gode, men kræver specielle karmprofiler og/eller særlige vinduesfastgørelsesbeslag samt vinduestilsætninger til afdækning af den større isoleringstykkelse i vinduesfalsen.

1. Samme kuldebroisolering (50 mm): 650 mm isolering (U =0,15).

$U_{væg} = 0{,}059$ W/m^{2}K

$U_{ribbe} = 0{,}514$ W/m^{2}K

$\Psi_{ribbe} \sim 0{,}024$ W/mK

$\Psi_{vindue} \sim 0{,}045$ W/mK

$\chi_{binder} \sim 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ W/K

$\chi_{hængebjl.} \sim 0{,}7 \cdot 10^{-3}$ W/K

Tabel 9. Varmetabet ved vinduesribber (ribbetab). Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede ribbetab.

Bidrag	Ψ [W/mK]	- [W/mK]	l [m]	Ribbetab [W/K]
Spring i isoleringstykkelse	0,024	-	11,2	0,27 (23)
Samling omkring vinduer	0,045	-	9,6	0,43 (37)
Ekstra 1-dims. varmetab		0,042	11,2	0,47 (40)
I alt				1,17 (100)

Tabel 10. Oversigt over flade-, ribbe- og punkttab samt U-værdi.

		Pct.-andel af samlet varmetab	Pct.-andel af varmetab for typisk element (U=0,30)
Fladetab [W/K]	0,79	40	24
Ribbetab [W/K]	1,17	59	170
Punkttab [W/K]	0,03	1	30
Varmetab i alt [W/K]	1,99	100	50
U-værdi [W/m^{2}K]	**0,15**		

2. Ribberne bibeholdes (210 mm ribbeisolering): 310 mm isolering (U = 0,15).

$U_{væg} = 0{,}121\ W/m^2K$

$U_{ribbe} = 0{,}174\ W/m^2K$

$\Psi_{ribbe} = 0{,}003\ W/mK$

$\Psi_{vindue} \sim 0{,}023\ W/mK$

$\chi_{binder} = 0{,}6 \cdot 10^{-3}\ W/K$

$\chi_{hængebjl.} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ W/K$

Tabel 11. Varmetabet ved vinduesribber (ribbetab). Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede ribbetab.

Bidrag	Ψ [W/mK]	- [W/mK]	l [m]	Ribbetab [W/K]
Spring i isoleringstykkelse	0,003	-	11,2	0,034 (11)
Samling omkring vinduer	0,023	-	9,6	0,22 (71)
Ekstra 1-dims. varmetab		0,0049	11,2	0,055 (18)
I alt				0,309 (100)

Tabel 12. Oversigt over flade-, ribbe- og punkttab samt U-værdi.

		Pct.-andel af samlet varmetab	Pct.-andel af varmetab for typisk element (U=0,30)
Fladetab [W/K]	1,61	82	50
Ribbetab [W/K]	0,31	16	45
Punkttab [W/K]	0,05	2	50
Varmetab i alt [W/K]	1,97	100	49
U-værdi [W/m²K]	**0,15**		

3. Ribberne fjernes: 300 mm isolering (U = 0,15)

$U_{væg} = 0{,}125\ W/m^2K$

$\chi_{binder} \sim 0{,}6 \cdot 10^{-3}\ W/K$

$\chi_{hængebjl.} \sim 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ W/K$

$\Psi_{vindue} \sim 0{,}028\ W/mK = 0{,}028 \cdot 9{,}6 = 0{,}27\ W/K$

Vinduestilslutningen kan i dette og ovennævnte løsning 2 foretages via en pladetilsætning.

Tabel 13. Oversigt over flade-, ribbe- og punkttab samt U-værdi.

		Pct.-andel af samlet varmetab	Pct.-andel af varmetab for typisk element (U=0,30)
Fladetab [W/K]	1,67	84	52
Ribbetab [W/K]	0,27	14	39
Punkttab [W/K]	0,05	2	50
Varmetab i alt [W/K]	1,99	100	50
U-værdi [W/m^{2}K]	**0,15**		

Det fremgår af beregningerne ovenfor, at hvis samme kuldebroisolering (50 mm) bibeholdes er det nødvendigt at isolere med ca. 650 mm, hvis forventede kommende krav i bygningsreglementet skal opfyldes. I de to sidste tilfælde, hvor ribbetykkelsen ikke ændres (210 mm ribbeisolering) og ribberne fjernes helt, skal der hhv. ca. 310 mm og 300 mm isolering til at opfylde kravet.

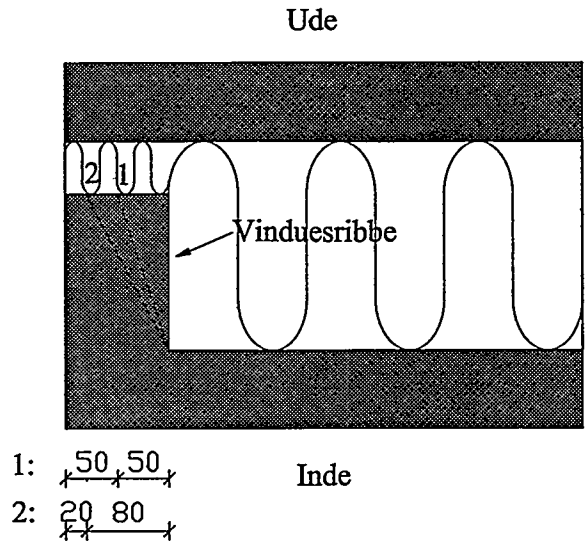
Det kan konkluderes, at det er nødvendigt at øge isoleringstykkelsen i vinduesfalsen væsentligt, hvis krav i et kommende bygningsreglement skal kunne opfyldes med et rimeligt og realistisk isoleringsniveau. En forøgelse af isoleringstykkelsen i vinduesfalsen kræver, at der udvikles vinduesløsninger, der er velegnet til afdækning af den større isoleringstykkelse.

4.3 Forslag til elementudformninger med bedre varmetekniske egenskaber

4.3.1 Affasning af ribber omkring vindues- og døråbninger

En måde at reducere varmetabet på i forhold til den nuværende praksis, er at fjerne noget af ribberne omkring vindues- og døråbninger, hvilket er muligt da ribberne ikke har en statisk funktion. Ribbebredden ud for ribbeisoleringen bør være minimum ca. 20 mm for at undgå afskalling af ribbekanten.

Beregninger er foretaget for to affasninger, svarende til at ribbebredden ved affasning reduceres til 50 mm hhv. 20 mm (se figur 13). Beregningerne er foretaget med beregningsprogrammet THERM [5].



Figur 13. De to ribbe-affasninger der er undersøgt.

Den samlede reduktion som følge af affasningen fremgår af tabel 14. Det ses, at den procentvise reduktion stort set er uafhængig af både isolerings- og ribbeisoleringstykkelse. Den største affasning resulterer i at varmetabet (ekskl. samling omkring vinduer) reduceres med omkring 45-50 %, mens reduktionen kun er 25-30 % ved den mindste affasning. Hvis man anvendte den største affasning på vindueribberne for det typiske sandwichelement til bolig- og kontorbyggeri beskrevet tidligere, ville dette resultere i en besparelse på ca. 0,022 W/mK eller svarende til en reduktion af elementets U-værdi med ca. 6 %. Linietabet for samlingen omkring vinduer påvirkes ikke nævneværdigt af en ribbeaffasning.

Tabel 14. Oversigt over betydningen af at fjerne en del af vinduesribber.

Ribbeisoleringstykkelse mm	Ribbetab (Uden affasning) W/mK	Besparelse ved affasning til 50 mm ribbebredde W/mK	Reduktion %	Besparelse ved affasning til 20 mm ribbebredde W/mK	Reduktion %
		100 mm isolering			
25	0,088	0,029	30	0,047	53
50	0,035	0,011	28	0,017	49
100	0	0	0	0	0
		200 mm isolering			
50	0,060	0,017	28	0,028	47
100	0,023	0,007	30	0,011	48
150	0,008	0,002	25	0,004	50
200	0	0	0	0	0
		300 mm isolering			
50	0,068	0,019	28	0,030	44
100	0,035	0,009	26	0,014	40
200	0,009	0,002	22	0,004	44
300	0	0	0	0	0

For at kunne afgøre om affasning af vinduesribber er et fordelagtigt tiltag, skal besparelsen i varmetabet sammenholdes med de materiale- og produktionsmæssige konsekvenser. En affasning betyder at formarbejdet på fabrikken og tilskæring af isolering kompliceres en del. Da disse produktionsændringer giver betydelige øgede omkostninger, må den umiddelbare konklusion blive at affasning af vinduesribber ikke er særlig interessant som varmebesparende tiltag.

4.3.2 Anvendelse af superisolering ved ribber

4.3.2.1 Beskrivelse af et superisoleringsprodukt

Det er i dag muligt at få isoleringsmaterialer med betydeligt lavere varmeledningsevne end den normalt anvendte klasse 39-isolering. Et af de få firmaer der fremstiller superisoleringsmaterialer er Sitek, der er en del af den verdensomspændende Morgan-koncern. Sitek har afdelinger i flere store europæiske lande, men ikke i Danmark.

Sitek fremstiller et produkt der hedder Ultragard-150, der specielt er egnet til brug i betonsandwich-elementer. Dette produkt består af et isoleringsmateriale (phenol-skum) pakket ind i et tyndt lag glasfiber og PE-folie til beskyttelse af materialet generelt og især imod fugt og vand. Materialet skulle i følge producenten være nemt at skære i og håndtere pga. materialets faste struktur og lethed.
Den karakteristiske varmeledningsevnen er på 0,019 W/mK. Den praktiske/regningsmæssige varmeledningsevne, beregnet efter de danske regler, bliver 0,026 W/mK (klasse 26). Det skal dog bemærkes, at firmaet forventer, at kommende europæiske regler på området vil resultere i en regningsmæssige værdi på 0,021 - 0,022 W/mK.

Et eksempel på prisen kan være følgende:
Isoleringsplader på 3000 x 1200 x 120 mm kan fås til *159 kr./m^2 ekskl. moms*, svarende til 1325 kr/m^3. Prisen er baseret på levering i Danmark (fra Holland) af en mængde på 60 m^3 eller mere. Ved levering af en mængde på 1200 m^3 (10000 m^2) kan opnås en rabat på omkring 10 %.

Til sammenligning koster en ækvivalent tykkelse isolering (180 mm) i form af betonelementsbatts/polystyrenskum i klasse 39 - leveret i en mængde svarende cirka til ovenstående mængde - omkring *68 kr./m^2 ekskl. moms* (svarende til 380 kr/m^3 - oplyst af Betonelement A/S). Superisoleringen er altså omkring 130 % dyrere end almindelig isolering i ækvivalent tykkelse. Superisoleringen koster, i samme mængde, omkring 3 gange så meget som almindelig isolering.

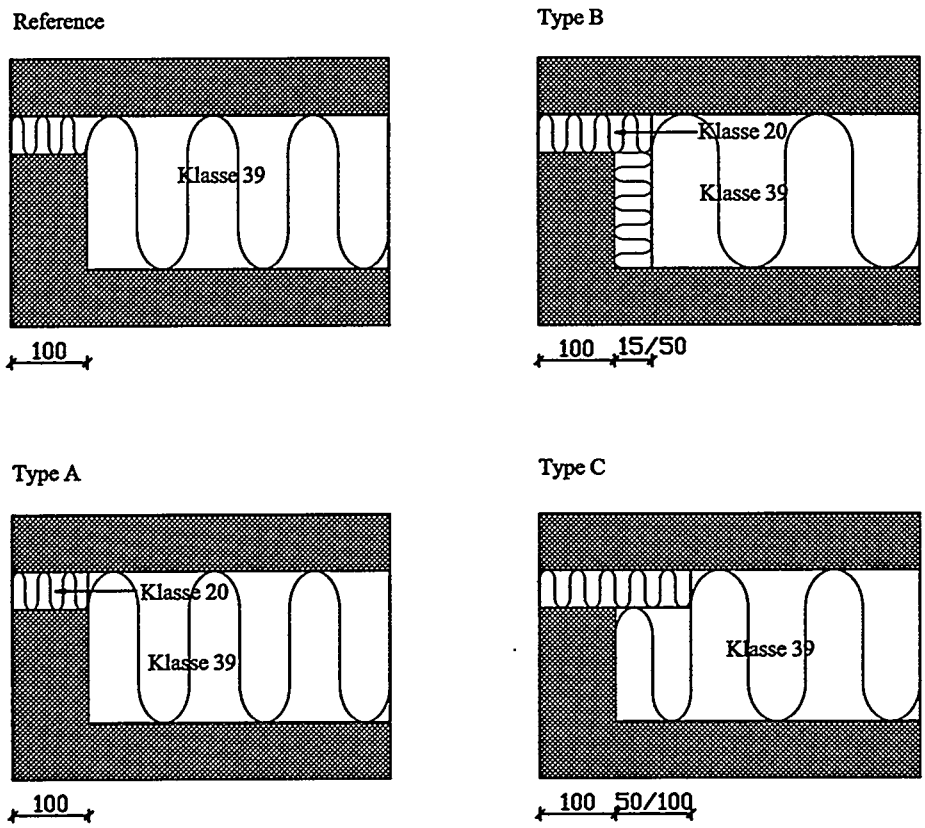
4.3.2.2 Superisolering ved ribber

Der er foretaget analyser til vurdering af besparelsespotentialet ved at anvende ovennævnte isoleringsmateriale ud for og omkring ribber.

Der er undersøgt forskellige placeringer af superisolering ved ribber. Analyserne er foretaget for en 100 mm bred ribbe. Som reference er anvendt det typiske tilfælde med klasse 39 isolering overalt. Beregningerne er foretaget for en superisolering med varmeledningsevnen 0,020 W/mK (klasse 20). Dette svarer cirka til den regningsmæssige værdi, som ovennævnte isoleringsprodukt må forventes at få iht. kommende europæiske regler.

Følgende placeringer er undersøgt (øvrig isolering er klasse 39) - Se i øvrigt figur 14:

- Type A: Klasse 20 isolering ud for ribbe
- Type B: Klasse 20 isolering ud for ribbe og langs den indvendige ribbekant i bredde på 1,5 cm hhv. 5 cm.
- Type C: Klasse 20 isolering ud for ribbe og 5 cm hhv. 10 cm ud i fuldt isolerede del af væg.



Figur 14. Forskellige muligheder for placering af superisolering ud for og omkring vinduesribber.

Der er foretaget beregninger for de 3 facadeisolerings-niveauer: 100, 200 og 300 mm. For hver af disse isoleringstykkelser er undersøgt forskellige ribbeisoleringstykkelser.

I bilag A er vist varmetabsbidragene ved de forskellige isolerings- og ribbeisoleringstykkelser for referencetilfældet og de tre placeringstyper. Bidragene til varmetabet kommer fra spring i isoleringstykkelse og det ekstra 1-dimensionelle tab. På baggrund af bilag A er i tabel 15 opgjort den samlede linietabsbesparelse ift. referencen.

Tabel 15. Betydningen af at anvende superisolering (klasse 20) ud for og omkring ribber. De angivne værdier er linietabsbesparelsen i W/mK ift. reference-tilfældet hvor isoleringen overalt er alm. klasse 39.

Ribbeisole-ringstykkelse	Reference-linietab	Forbedrings/-placeringstype				
		A	B (15 mm)	B (50 mm)	C (50 mm)	C (100 mm)
100 mm isolering						
25	0,088	0,044	0,051	0,058	0,052	0,056
50	0,035	0,028	0,033	0,039	0,036	0,042
100	0	0,017	0,019	0,025	0,025	0,033
200 mm isolering						
50	0,060	0,025	0,031	0,036	0,032	0,036
100	0,023	0,016	0,019	0,023	0,021	0,025
150	0,008	0,011	0,013	0,016	0,016	0,020
200	0	0,009	0,010	0,013	0,013	0,018
300 mm isolering						
50	0,068	0,023	0,028	0,034	0,029	0,032
100	0,035	0,015	0,018	0,022	0,020	0,023
150	0,019	0,011	0,013	0,016	0,015	0,018
200	0,009	0,009	0,010	0,013	0,012	0,015
300	0	0,006	0,007	0,009	0,009	0,012

4.3.2.3 Økonomisk vurdering ud fra dagens isoleringsniveau

Der foretages en økonomisk overslagsberegning for hvor lang tid der går før merudgiften til superisolering er tjent hjem (simpel tilbagebetalingstid) for forskellige typer placeringer. Det typiske bolig- og kontorelement benyttes som eksempel. Det undersøges hvor meget U-værdien og dermed varmeudgiften kan reduceres, og denne sammenholdes med merudgiften.

Prisforskellen på almindelig isolering og superisolering i samme mængde kan ud fra oplysninger ovenfor bestemmes til 945 kr/m^3. Der ses i beregningerne bort fra eventuelle andre prisforskelle som følge af ændrede produktionstekniske forhold m.v. (kun materialemerprisen betragtes).

Det er i denne analyse valgt at forenkle forholdene, idet det antages at varmetabet gennem elementet (transmissionstabet) kan beregnes på basis af temperaturforskellen i form af gradtimer baseret på en indetemperatur på 20°C. Data for udetemperaturen i fyringssæsonen er hentet fra det danske design reference år, DRY. Gradtimetallet for Danmark er på ca. 90.000 Kh pr. år. Det antages at transmissionstab og energiforbrug til dækning af opvarmningsbehovet reduceres lige meget, når U-værdien reduceres. Energibesparelsen (kWh/m^2 pr. år) fås ved at multiplicere gradtimetallet med reduktionen i U-værdien og den gennemsnitlige pris på energi til opvarmning (ca. 0,60 kr/kWh). Reduktionen af U-værdien findes ud fra tabel 15.

Tabel 16. Oversigt over meranlægspris, energibesparelse og simpel tilbagebetalingstid ved anvendelse af superisolering (kl.20) ved ribber i bolig- og kontorelement (13,3 m²) med 50 mm ribbeisolering.

Placeringstype	Isol.-mængde [m³]	Mer anlægs-pris [kr/m²]	Reduktion af U-værdi [W/m²K]	Energi-besparelse [kr/m² pr. år]	**Simpel tilbage-betalingstid [år]**
Type A	0,052	3,7	0,022	1,19	**3,1**
Type B (1,5 cm)	0,077	5,5	0,027	1,46	**3,8**
Type B (5 cm)	0,136	9,6	0,032	1,73	**5,6**
Type C (5 cm)	0,080	5,7	0,029	1,57	**3,6**
Type C (10 cm)	0,108	7,7	0,033	1,78	**4,3**

Det fremgår af tabel 16, at investeringen i bedre isolering omkring ribber i et typisk element, med isoleringstykkelse svarende til BR95, er betalt tilbage allerede efter ca. 3-6 år, hvilket må siges at være særdeles acceptabelt i betragtning af betonelementers levetid. Den mest fordelagtige placering af superisolering omkring ribber giver den mindste tilbagebetalingstid. Det ses at type A er mest fordelagtig. Reduktionen i U-værdien er ca. 7-11 %. U-værdien kan altså reduceres forholdsvis meget ved brug af superisolering ved ribber, og dette uden at isoleringstykkelsen øges.

I tabel 17 er der foretaget en sammenligning med almindelig isolering i større tykkelser (samme ribbedimension). Der tages ikke hensyn til at en forøgelse af isoleringstykkelsen vil kræve bredere vindueskarm/-tilsætninger. Denne omkostning skønnes at være minimal sammenlignet med materiale-merprisen.

Tabel 17. Oversigt over mulig forøgelse af isoleringstykkelsen svarende til merpris for superisolering ved anvendelse af almindelig kl.39 isolering ved ribber, resulterende reduktion i U-værdi og simpel tilbagebetalingstid for bolig- og kontorelement (13,3 m²).

Placeringstype	Mer-anlægs-pris [kr/m²]	Forøgelse af isol. tyk. (kl.39) svarende til meranlægspris [mm]	Reduktion af U-værdi [W/m²K]	Energi-besparelse [kr/m² pr. år]	**Simpel til-bage-betalingstid [år]**
Type A	3,7	10	0,021	1,13	**3,3**
Type B (1,5 cm)	5,5	14,5	0,030	1,62	**3,4**
Type B (5 cm)	9,6	25	0,047	2,54	**3,8**
Type C (5 cm)	5,7	15	0,031	1,67	**3,4**
Type C (10 cm)	7,7	20	0,039	2,11	**3,7**

Det ses at en forøgelse af isoleringstykkelsen, svarende til merprisen for superisolering for de forskellige tiltag, generelt resulterer i en større reduktion af U-værdien og dermed en kortere tilbagebetalingstid. Anvendelse af superisolering umiddelbart foran ribber (type A) vil dog iht. beregningerne være lidt mere fordelagtig end brug af almindelig isolering.

På denne baggrund og i betragtning af at anvendelse af et nyt isoleringsmateriale i produktionen utvivlsomt vil forøge omkostningerne (udover materiale-merprisen), kan det konkluderes, at brug af superisolering fremfor almindelig klasse39 isolering ved ribber ikke er attraktivt med det nuværende prisniveau for superisolering.

4.3.3 Varmeteknisk vurdering af forskellige varmebesparende tiltag

Det undersøges, hvor meget U-værdien kan reduceres ved de ovenfor beskrevne tiltag (affasning og superisolering). Der er også set på, hvilken betydning en tykkere ribbeisolering samt fjernelse af ribberne har for varmetabet. Der er undersøgt to isoleringsniveauer svarende til en center-U-værdi (U-værdi for den fuldt isolerede del) på 0,125 og 0,15 W/m^2K.

Det er forudsat, at midten af vinduesruden er placeret så den flugter med forstøbningens bagkant. Det kan antages, at affasning af ribber og placering af superisolering ved ribber ikke har betydning for linietabet for samlingen omkring vinduer.

I tabel 18 nedenfor er resultatet af undersøgelserne vist. Det skal i denne forbindelse bemærkes, at alle bidrag til det samlede varmetab er opgjort for hele det aktuelle betonelement (W/K). De forskellige tiltag er anført i første kolonne. Referencetilfældet svarer til en udformning som i dag, dvs. med klasse 39 isolering overalt og 50 mm ribbe-/kuldebroisolering. Isoleringstykkelsen er dog øget svarende til de to undersøgte isoleringsniveauer. I sidste kolonne er anført de resulterende U-værdier og varmetabsbesparelsen i procent ift. referencen. Bemærk at tilfældet med affasning sammen med en type A-placering af superisolering betyder, at superisoleringen placeres i hele den oprindelige ribbebredde (10 cm).

Tabel 18. Oversigt over forskellige varmebesparende tiltag ved udformningen af vinduesfalsen for et typisk bolig- og kontorelement.

Bolig- og kontorelement (13,3 m²)	Isolerings-tykkelse væg/ribbe [mm]	Flade-tab [W/K]	Ribbetab [W/K]				Punkt-tab [W/K]	Varme-tab i alt [W/K]	U-værdi [W/m²K]
			Ribbe	Vindue	Ekstra 1-dims.	I alt			
Center-U-værdi: 0,15									
Reference	250/50	2,00	0,220	0,202	0,457	0,88	0,065	2,94	**0,221**
Type A	250/50	2,00	0,228	0,202	0,201	0,63	0,065	2,70	**0,203 (-8%)**
Type B (5cm)	250/50	2,00	0,149	0,202	0,172	0,52	0,065	2,59	**0,195 (-12)**
Affasn. (2cm)	250/50	2,00	0,188	0,202	0,191	0,58	0,065	2,65	**0,199 (-10)**
Affasn.(2cm)+Type A	250/50	2,00	0,128	0,202	0,012	0,34	0,065	2,41	**0,181 (-18)**
100 mm kuldebroisol.	250/100	2,00	0,116	0,155	0,197	0,47	0,065	2,53	**0,190 (-14)**
Ribber fjernes	250/250	2,00	-	0,235	-	0,24	0,065	2,30	**0,173 (-22)**
Center-U-værdi: 0,125									
Reference	300/50	1,67	0,241	0,202	0,472	0,92	0,049	2,63	**0,198**
Type A	300/50	1,67	0,260	0,202	0,215	0,68	0,049	2,40	**0,180 (-9%)**
Type B (5cm)	300/50	1,67	0,174	0,202	0,181	0,56	0,049	2,28	**0,171 (-14)**
Affasn. (2cm)	300/50	1,67	0,217	0,202	0,189	0,61	0,049	2,33	**0,175 (-12)**
Affasn. (2cm)+Type A	300/50	1,67	0,153	0,202	0,024	0,38	0,049	2,10	**0,158 (-20)**
100 mm kuldebroisol.	300/100	1,67	0,147	0,163	0,219	0,53	0,049	2,25	**0,169 (-15)**
Ribber fjernes	300/300	1,67	-	0,269	-	0,27	0,049	1,99	**0,150 (-26)**

Beregningerne viser, at det tiltag der virkelig betyder noget er at fjerne ribberne. Samtidig affasning og en type A-placering af superisolering er dog også en god løsning, da vinduesmonteringen er billigere end for et element uden ribber. Det ses at den samlede U-værdi reduceres med ca. 20-25 %. Hvis man samtidig forestillede sig at linietabet for samlingen omkring vinduerne blev reduceret til det mindst mulige (bl.a. ved at placere vinduet længere inde i facaden) ville U-værdien kunne reduceres med i størrelsesordenen 30-35 %.

Det kan på denne baggrund konkluderes, at man for fremtiden bør satse på udvikling af betonelementer uden betonribber ved vindueshuller. Merprisen for vinduestilsætninger er i den forbindelse en afgørende parameter.

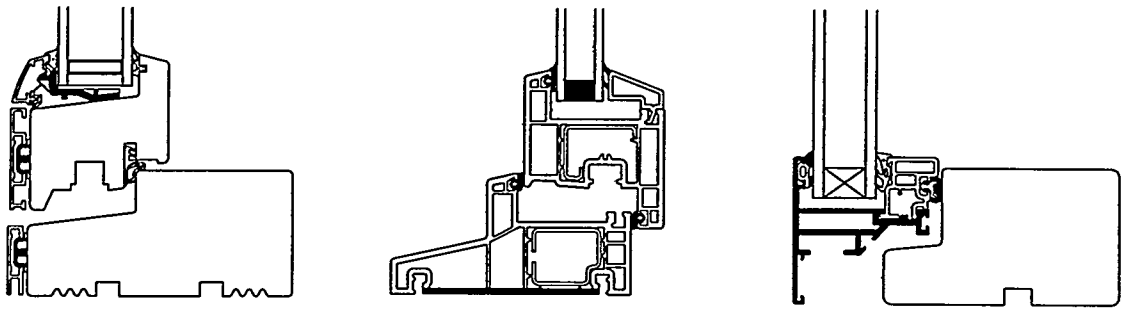
4.3.4 Vinduesplacering i elementtykkelsen

Varmetab

Linietabet ved en vinduesfalsen afhænger dels af hvor god kuldebroafbrydelsen er dels af vinduets placering i forhold til isoleringen i vinduesfalsen. Ovenstående undersøgelser har vist, at vinduesribber bør fjernes, idet de giver anledning til meget store ekstra varmetab. Interessen bør derfor rettes på linietabet ved samlingen mellem vindue og væg, som for en typisk vinduesplacering i forstøbningen ikke er uden betydning. For at kunne afgøre hvor meget vinduesplaceringen betyder, er der foretaget beregninger af linietabet for forskellige placeringer af 3 typer vinduer:

Type 1.: Ramme-karm af træ beklædt med aluminium.
Type 2.: Ramme-karm af plast (pvc). Indadgående.
Type 3.: Ramme-karm af blandede materialer - ramme af aluminium og plast og karm af træ.

De tre typer vinduer er vist i nedenstående figur 15.



Type 1. Type 2. Type 3.

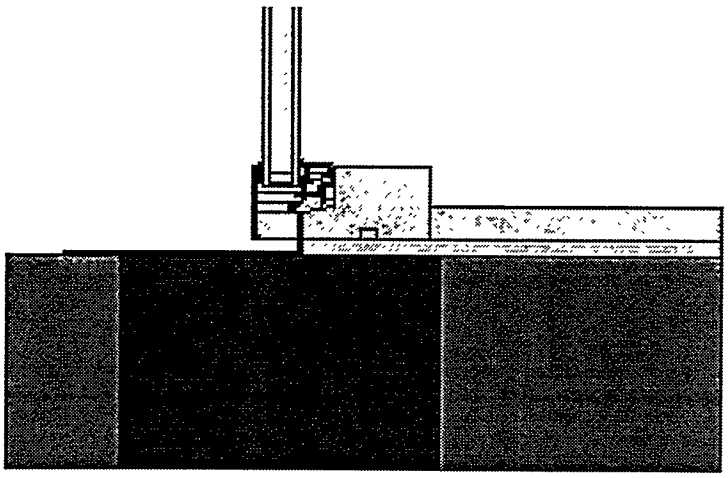
Figur 15. De tre vinduestyper, der er undersøgt (ventre side er udvendig side).

I tabel 19 nedenfor er de enkelte vinduestyper beskrevet ud fra glasafstand, center U-værdi, U-værdi for ramme-karm og total U-værdi.

Tabel 19. Oversigt over de undersøgte vinduestypers varmetekniske egenskaber [Kilde: Ruder og vinduers energimæssige egenskaber. Kompendium 3: Detaljerede metoder til bestemmelse af energimærknings-data. IBE, DTU, 1999].

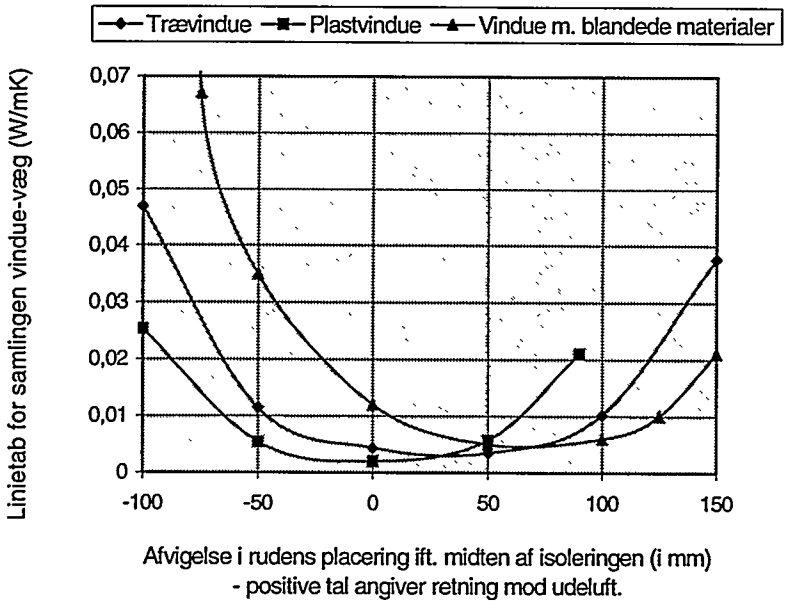
Vindue Beskrivelse	Type 1. Trævindue beklædt med aluminium	Type 2. Plast-vindue	Type 3. Vindue med blandede materialer
Glasafstand [mm]	24	15	16
Center U-værdi [W/m^{2}K]	1,18	1,13	1,13
$U_{ramme\text{-}karm}$ [W/m^{2}K]	1,42	1,72	3,00
U_{total} [W/m^{2}K]	1,46	1,46	1,56

De forskellige vinduer er sat sammen med en sandwichfacade, bestående af 200 mm massiv bagstøbning, 225 mm isolering og 80 mm forstøbning, svarende til en samlet U-værdi på ca. 0,175 W/m^{2}K. Der er regnet med en 12 mm fuge mellem vindue og væg. Desuden er der anvendt indvendige vinduestilsætninger af 22 mm træ og en udvendig inddækning (hvor det er nødvendigt) af 2 mm aluminiumsprofil, se figur 16. Der er ved modelleringen ikke taget stilling til, hvordan vinduet fastgøres til væggen. Beregningerne er foretaget med beregningsprogrammet THERM [5].



Figur 16. Eksempel på beregningmodel af facade-vindue-samling (type 3 vindue). Vinduesruden er placeret i midten af isoleringen. Der medtages 500 mm facadekonstruktion og ca. 200 mm vinduesrude i beregningerne af linietabet.

I figur 17 er vist resultatet af beregningerne, hvor linietabet som funktion af vinduets placering i elementtykkelsen er anført. Som identifikation er anvendt midten af rudens afvigelse fra midten af isoleringslaget. Positive afvigelser angiver retning mod udeluft og negative afvigelser angiver retning mod indeluften.



Figur 17. Linietab for samlingen vindue-væg som funktion af vinduets placering i elementtykkelsen. Beregningerne er foretaget for en sandwichfacade med 225 mm isolering.

Det ses, at der er forholdsvis stor forskel på linietabet for de enkelt vinduestyper ved ens rudeplaceringer. For et almindeligt trævindue med en traditionel placering af vinduet (20 mm karmoverlap ift. forstøbning) er linietabet ca. 0,015 W/mK, hvilket svarer til 0,015 W/m^{2}K,

hvis det antages, at der er 1 m vinduesfals pr. m^2 ydervæg. Set i forhold til det samlede varmetab udgør linietabet altså ca. 10 %.

På baggrund af kurverne i figur 17 kan overordnet konkluderes, at en vinduesplacering svarende til at rudens udvendige overflade er placeret omkring blot 50 mm fra forstøbningens indvendige kant, er tæt på at være varmetabsmæssig optimal for alle tre undersøgte vinduestyper. Det skal bemærkes, at en sådan placering for vinduestype 1 og 3 vil betyde, at det er nødvendigt med udvendige inddækninger.

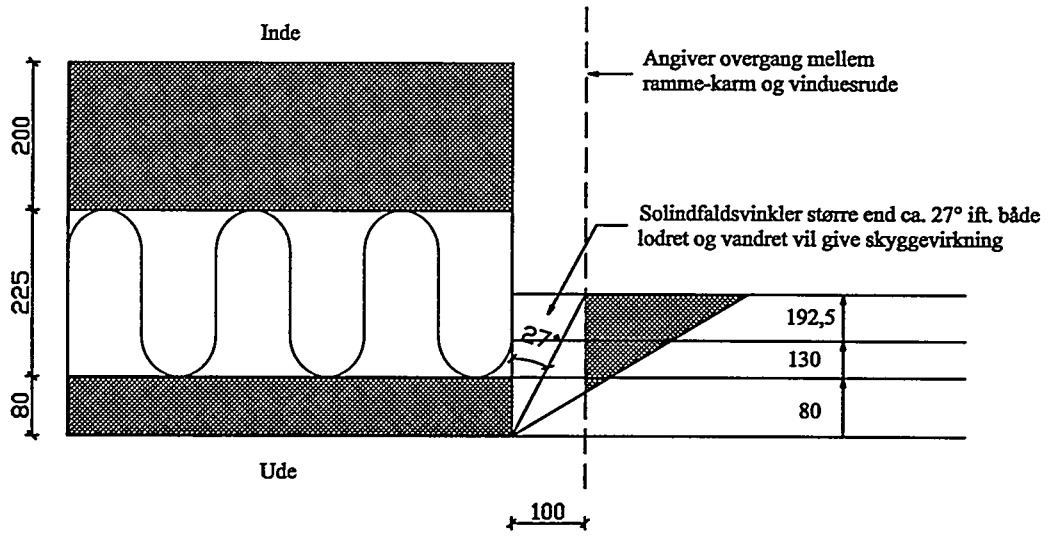
Vinduets placering i facaden indvirker også på den varmemængde, der kan tilføres en bygning via solindfald. Dette redegøres der for i det følgende afsnit, og der sammenlignes med vinduesplaceringens betydning for varmetabet i samlingen vindue-væg.

Solindfald

Solindfaldet mindskes alt andet lige jo længere inde i facaden et vindue placeres. Betydningen af dette er undersøgt ved beregninger i tsbi3 [6], der er et computerprogram til termisk simulering af bygninger. Solindfaldet beregnes for fyringssæsonen.

Beregningerne er foretaget for et 1,25 m højt og 1,50 m bredt vindue med en 100 mm bred ramme-karm, og for to tilfælde mht. den totale solenergitransmittans g for ruden (g = 0,7 eller 0,5).

Der er undersøgt fire vinduesplaceringer (se figur 18), svarende til hhv. en placering helt ude i facaden, en placering hvor ruden flugter med forstøbningens bagkant, en placering 50 mm fra forstøbningens bagkant og en placering midt i isoleringen. Et betonsandwichelement med 200 mm bagstøbning, 225 mm isolering og 80 mm forstøbning betragtes.



Figur 18. Oversigt over de undersøgte vinduesplaceringer samt skyggevirkning (vandret snit). Mål er i mm.

I tabel 20 er vinduesplaceringen ud for forstøbningens bagkant valgt som reference, da dette er den typisk anvendte vinduesplacering.

Tabel 20. Ændringer i solindfaldet for forskellige vindueplaceringer [kWh pr. m^2 vindue pr. år] – den typisk anvendte placering er reference. Negative værdier angiver en reduktion af solindfaldet. De to værdier adskilt af en streg angiver ændringen af solindfaldet for g = 0,7 hhv. g = 0,5.

Rudens placering i vægtykkelsen	Rudens afstand fra væggens udvendige overflade [mm]	Forøgelse af solindfaldet [kWh/år] Vinduesorientering				
		Syd	Øst	Vest	Nord	Middel
I facadens plan	0	1,6/1,1	1,1/1,1	1,1/1,1	0/0	1,0/0,8
Ud for forstøbn. bagkant	80	**0/0**	**0/0**	**0/0**	**0/0**	**0/0**
5 cm fra forstøbn. bagkant	130	-3,2/-2,1	-2,1/-1,6	-2,1/-1,6	-0,5/-0,5	-2,0/-1,5
Midt i isoleringen	192,5	-9,6/-6,9	-5,9/-4,3	-5,3/-3,7	-1,6/-1,1	-5,6/-4,0

Det antages, at størrelsen / udformningen af ovennævnte undersøgte vindue er repræsentativt for byggeri i almindelighed. Hvis det samtidigt antages, at vinduesarealet er ligeligt fordelt på de fire verdenshjørner, kan der beregnes en gennemsnitlig reduktion i solindfaldet på 2,0 og 5,6 kWh/m^2/år ift. referencen for en vinduesplacering hhv. 50 og ca. 110 mm fra forstøbningens bagkant (g = 0,7). For en g-værdi på 0,5 er reduktionen 1,5 og 4,0 kWh/m^2/år.

Resulterende energiforbrug

En placering af ruden 50 mm fra forstøbningens bagkant er ideel i varmetabsmæssig henseende. Linietabetsbesparelsen ved denne placering ift. en placering ud for forstøbningens bagkant er ca. 0,01 W/mK for eksempelvis et typisk trævindue. Denne varmetabsbesparelse multipliceret med hhv. forholdet mellem linietabslængde og vinduesareal (3 m/m^2) og gradtimetallet for fyringssæsonen i DK (90.000 Kh/år) giver en besparelse i transmissionstabet på 2,7 kWh/m^2/år. Det ses, at denne besparelse kun er lidt større end reduktionen i solindfaldet (2,0 kWh/m^2/år) for en rude med en g-værdi på 0,7.

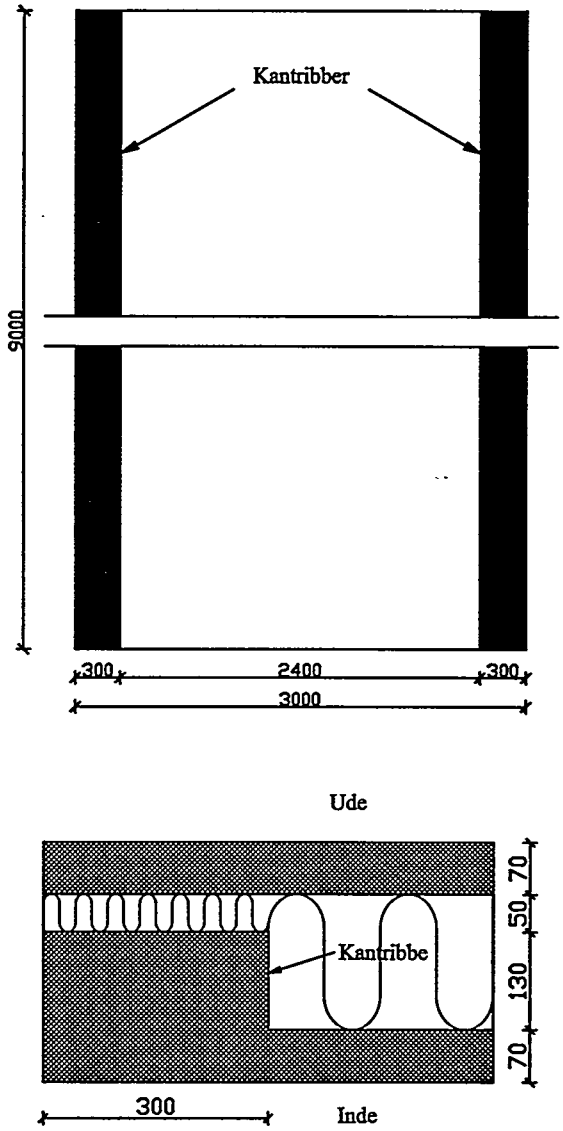
Konklusion: Varmetabsbesparelsen ved at placere et vindue mere varmeteknisk optimalt "ædes" i betydelig grad op af reduktionen i solindfaldet. En placering af ruden 50 mm fra forstøbningens bagkant er derfor ikke umiddelbart attraktivt, idet der også kræves "nye" vinduesløsninger - ikke mindst i form af udvendige inddækninger.

5 Betonelementer med konstruktive ribber

Høje betonsandwich-facadeelementer udføres i dag oftest med en bagstøbning udformet som en ribbekonstruktion med søjler og bjælker indfældet i isoleringen, og med en forholdsvis tynd bagplade. Ved denne udformning kan udsparinger frit placeres mellem ribberne, og der kan opnås lavere elementvægt (materialebesparelse) end med en massiv bagplade.

5.1 Typisk højt betonsandwichelement til haller

Elementet antages ikke at skulle optage taglast og har derfor ingen top-/tværribbe. Elementet er 9 m højt og 3 m bredt, og har i hver side i hele elementets højde en forstærkningsribbe med bredden 300 mm samt højden 200 mm (se figur 19). Der forudsættes anvendt 4 stk. ø10 mm hængebøjler og ø3 mm rustfri bindere i et antal svarende til 50 mm^2/m^2.



Figur 19. Opstalt og vandret snit i typisk sandwichelement med to sidderibber.

Elementets geometri kan beskrives ved følgende:

Samlet areal:	27 m^2
Ribbeareal:	5,4 m^2
Ribbelængde:	18 m
Bagstøbning:	70 mm
Forstøbning:	70 mm
Isoleringstykkelse:	180 mm
Ribbeisoleringstykkelse:	50 mm

Typisk element, 180 mm isolering (U = 0,30)

$U_{væg} = 0{,}205\ W/m^2K$

$U_{ribbe} = 0{,}617\ W/m^2K$

$\Psi_{ribbe} = 0{,}016\ W/mK$

$\chi_{binder} = 0{,}6 \cdot 10^{-3}\ W/K$

$\chi_{hængebjl.} = 2{,}6 \cdot 10^{-3}\ W/K$

Tabel 21. Varmetabet ved ribber (ribbetab). Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede ribbetab.

	Ψ [W/mK]	- [W/mK]	l [m]	Ribbetab [W/K]
Spring i isoleringstykkelse	0,016		18	0,29 (12)
Ekstra 1-dims. Varmetab		0,124	18	2,22 (88)
I alt				2,51 (100)

Tabel 22. Oversigt over flade-, ribbe- og punkttab samt U-værdi. Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede varmetab.

Fladetab [W/K]	5,54 (68)
Ribbetab [W/K]	2,51 (31)
Punkttab [W/K]	0,11 (1)
Varmetab i alt [W/K]	8,16 (100)
U-værdi [W/m^2K]	**0,30**

Det fremgår af ovenstående eksempel, at med en isoleringstykkelse på 180 mm og en ribbeisoleringstykkelse på 50 mm fås en U-værdi på 0,30 W/m^2K. I tabel 22 er andelen af de forskellige varmetab opgjort. Det bør bemærkes, at ribbe- og punkttabene har en andel på ca. 32 % af det samlede varmetab.

5.2 Forøgelse af isoleringstykkelsen

Ved en simpel forøgelse af isoleringstykkelsen med 120 mm på såvel fladen som ved ribberne vil reducere U-værdien til 0,15. Ribbetabets andel reduceres herved betydeligt.

Fremtidigt element (170 mm ribbeisolering), 300 mm isolering (U =0,15).

$U_{væg} = 0{,}126\ W/m^2K$

$U_{ribbe} = 0{,}213\ W/m^2K$

$\Psi_{ribbe} = 0{,}006\ W/mK$

$\chi_{binder} \sim 0{,}4 \cdot 10^{-3}\ W/K$

$\chi_{hængebjl.} \sim 2{,}0 \cdot 10^{-3}\ W/K$

Tabel 23. Varmetabet ved ribber (ribbetab). Angivelsen i parentes er pct.-andel af det samlede ribbetab.

	Ψ [W/mK]	- [W/mK]	l [m]	Ribbetab [W/K]
Spring i isoleringstykkelse	0,006		18	0,11 (19)
Ekstra 1-dims. Varmetab		0,023	18	0,47 (81)
I alt				0,58 (100)

Tabel 24. Oversigt over flade-, ribbe- og punkttab samt U-værdi.

		Pct.-andel af samlet varmetab	Pct.-andel af varmetab for typisk element (U=0,30)
Fladetab [W/K]	3,40	84	61
Ribbetab [W/K]	0,58	14	23
Punkttab [W/K]	0,08	2	73
Varmetab i alt [W/K]	4,06	100	50
U-værdi [W/m²K]	**0,15**		

Forestiller man sig at de armerede ribber kan erstattes af en anden anordning (f.eks. forspændt bagvæg eller ribber vendt indad mod rum), så et spring i isoleringstykkelsen undgås, viser beregninger at der kun skal bruges ca. 250 mm isolering mod 300 mm ved en simpel forøgelse af isoleringstykkelsen.

5.3 Forslag til elementudformninger med bedre varmetekniske egenskaber

5.3.1 Anvendelse af superisolering ved ribber

Der foretages en beregning af den simple tilbagebetalingstid af investeringen i forskellige superisoleringstiltag. Beregningsforudsætningerne er de samme som for bolig- og kontorelementet - jvf. afsnit 4.3.2.3.

Det fremgår af tabel 25, at investeringen i bedre isolering omkring ribber i typiske elementer med isoleringstykkelse svarende til BR95 er betalt tilbage allerede efter ca. 3-5 år, hvilket må siges at være særdeles acceptabelt i betragtning af betonelementers levetid. Den mest fordelagtige placering af superisolering ved ribber er type A.

Tabel 25. Oversigt over meranlægspris, energibesparelse og simpel tilbagebetalingstid ved anvendelse af superisolering (kl.20) ved ribber i halelement (27 m²).

Placeringstype	Isol.-mængde [m³]	Mer anlægs-pris [kr/m²]	Reduktion af U-værdi [W/m²K]	Energi-besparelse [kr/m² pr. år]	**Simpel tilbage-betalingstid [år]**
Type A	0,270	9,5	0,051	2,75	**3,4**
Type B (1,5 cm)	0,319	11,2	0,056	3,02	**3,7**
Type B (5 cm)	0,432	15,1	0,059	3,19	**4,7**
Type C (5 cm)	0,315	11,0	0,057	3,08	**3,6**
Type C (10 cm)	0,360	12,6	0,060	3,24	**3,9**

Reduktionen i U-værdien er på mellem 17-20 %. U-værdien kan altså reduceres forholdsvis meget ved brug af superisolering ved ribber, og dette uden at isoleringstykkelsen øges.

I tabel 26 er der foretaget en sammenligning med almindelig isolering i større tykkelser (samme ribbedimension).

Tabel 26. Oversigt over mulig forøgelse af isoleringstykkelsen svarende til merpris for superisolering ved anvendelse af almindelig kl.39 isolering ved ribber, resulterende reduktion i U-værdi og simpel tilbagebetalingstid for halelement (27 m²).

Placeringstype	Mer-anlægs-pris [kr/m²]	Forøgelse af isol. tyk. (kl.39) svarende til meranlægspris [mm]	Reduktion af U-værdi [W/m²K]	Energi-besparelse [kr/m² pr. år]	**Simpel til-bage-betalingstid [år]**
Type A	9,5	25	0,057	3,08	**3,1**
Type B (1,5 cm)	11,2	29	0,063	3,40	**3,3**
Type B (5 cm)	15,1	40	0,081	4,37	**3,5**
Type C (5 cm)	11,0	29	0,063	3,40	**3,2**
Type C (10 cm)	12,6	33	0,071	3,83	**3,3**

Det ses at en forøgelse af isoleringstykkelsen, svarende til merprisen for superisolering for de forskellige tiltag, generelt giver større reduktioner i U-værdien og dermed kortere tilbagebetalingstider.

Det kan som for bolig- og kontorelementet generelt konkluderes, at anvendelse af superisolering ikke er attraktivt med det nuværende prisniveau.

5.3.2 Varmeteknisk vurdering af forskellige varmebesparende tiltag

Forudsætninger for bestemmelse af U-værdierne i tabel 27 er de samme som for bolig- og kontorelementet - jvf. afsnit 4.3.3.

Tabel 27. Oversigt over forskellige varmebesparende tiltag for et typisk halelement/industrifacade.

Halelement (27 m²)	Isolerings-tykkelse: væg/ribbe [mm]	Flade-tab [W/K]	Ribbetab [W/K]				Punkt-tab [W/K]	Varme-tab i alt [W/K]	U-værdi [W/m²K]
			Ribbe	Vindue	Ekstra 1-dims.	I alt			
Center-U-værdi: 0,15									
Reference	250/120	4,05	0,144	-	0,771	0,92	0,096	5,06	**0,187**
Type A	250/120	4,05	0,150	-	0,042	0,19	0,096	4,34	**0,161 (-14%)**
Type B (5 cm)	250/120	4,05	0,099	-	-0,025	0,07	0,096	4,22	**0,156 (-17%)**
Plan bagstøb. *	250/250	4,05	-	-	-	-	0,096	4,15	**0,154 (-18%)**
Center-U-værdi: 0,125									
Reference	300/170	3,40	0,099	-	0,470	0,57	0,077	4,05	**0,150**
Type A	300/170	3,40	0,108	-	-0,064	0,04	0,077	3,52	**0,130 (-13%)**
Type B (5 cm)	300/170	3,40	0,072	-	-0,118	-0,05	0,077	3,43	**0,127 (-15%)**
Plan bagstøb. *	300/300	3,40	-	-	-	-	0,077	3,48	**0,129 (-14%)**

*Ved beregning af varmetabet ses der bort fra at bagpladen vil være tykkere når ribberne fjernes.

Det fremgår af tabellen, at U-værdien for et element uden ribber og med 250 mm klasse 39 isolering er ca. 0,15, mens U-værdien for et element med ribber og med 300 mm isolering samt 170 mm ribbeisolering ligeledes er 0,15. Ribbernes betydning for varmetabet modsvares altså af ca. 50 mm ekstra isolering ved den givne ribbeisoleringstykkelse.

5.3.3 Alternative muligheder for bærende konstruktion

Sandwichelementer består typisk af en tynd forstøbning, et isoleringslag og en bærende plan, slapt armeret bagstøbning eller bagstøbning med slapt armeret ribber. En bagstøbning med ribber anvendes sædvanligvis til høje facadeelementer, hvor der ofte kan opnås en lavere elementvægt end med en plan plade, hvilket er vigtigt især af hensyn til transport og montering.

Varmeteknisk set er en ribbekonstruktion dog en dårlig idé, da den reducerede isoleringstykkelse ved ribberne giver anledning til et betydeligt ekstra varmetab. Ved at forspænde armeringen vil man kunne reducere dimensionen af ribberne og dermed varmetabet og elementvægten. Forspænding kan reducere en plan bagstøbnings tykkelse, hvilket reducere vægtykkelsen og vægten, men det vil ikke reducere varmetabet. En lokal anvendelse af et superisolerende materiale ud for ribberne vil kunne medvirke til at reducere varmetabet yderligere, men det er tidligere vist at dette ikke økonomisk rentabelt; dertil er superisolering for dyrt.

I det følgende foretages en undersøgelse af forskellige forslag til den bærende konstruktion. De varmetekniske egenskaber sammenholdes med de økonomisk forhold for hver af de enkelte løsninger.

Der foretaget undersøgelser af et 12 m højt og 2,4 m bredt facadeelement med forskellige bagvægsløsninger:

- Bagstøbning med slapt armeret ribber (traditionel løsning).
- Bagstøbning med forspændte ribber.
- Plan forspændt bagstøbning.

Alle undersøgte element-løsninger har samme U-værdi, der er fastsat til 0,175 W/m^{2}K, hvilket må antages at være et sandsynligt bud på et fremtidigt isoleringsniveau. De beregningsmæssige forudsætninger vedrørende bæreevne fremgår af [10]. I tabel 28 er vist en oversigt over geometri, hovedarmeringsmængde og elementvægt for de undersøgte elementer. De tre førstnævnte løsninger har 70 mm bagstøbning og 80 mm forstøbning, mens den sidstnævnte løsning afviger ved at bagvæggen er plan og 160 mm tyk og den karakteristisk betontrykstyrke er 50 MPa fremfor 40 MPa for de andre løsninger. Det kan umiddelbart se forbavsende ud, at der ikke er gevinst i form af en mindre ribbedimension ved at gå over til forspændte elementer. Men i begge tilfælde (slapt armeret / forspændt) er udgangspunktet den nye betonnorm.

Tabel 28. Alternative muligheder for bærende konstruktion i 12 m højt og 2,4 m bredt element med U-værdien 0,175 W/m^{2}K.

Bærende konstruktion	Isoleringstykkelse [mm]	Kantisoleringstykkelse [mm]	Ribbedimension Bredde x højde [mm]	Total tykkelse [mm]	Samlet elementvægt [ton]
Slapt armeret ribbeelement[1)]	340	140	292 x 270	490	14
Forspændt ribbeelement[2)]	340	140	292 x 270	490	14
Forspændt ribbeelement[3)]	350	130	292 x 290	500	14,5
Forspændt element m. plane lag[4)]	225	-	-	465	17

1) Hovedarmering: I alt for 2 ribber: 12 stk. Y 16 mm.
2) Hovedarmering: I alt for 2 ribber: 8 L 12,5 mm + 4 L 9,3 mm.
3) Hovedarmering: I alt for 2 ribber: 8 L 12,5 mm.
4) Hovedarmering: I alt 24 L 12,5 mm.

De nugældende krav (U=0,3 W/m^{2}K) kan opfyldes med et traditionelt slapt armeret ribbeelement med 260 mm isolering og 60 mm kantisolering og med samme ribbedimension som i tabel 28.

På baggrund af de ovenfor skitserede muligheder for bærende konstruktion i et element med U-værdi på 0,175, er der beregnet hvad det samlet koster at forbedre U-værdien fra 0,30 til 0,175 (se tabel 29).

Tabel 29. Merpris ved at gå fra U = 0,3 W/m²K til 0,175 W/m²K. Det slapt armerede ribbeelement er referencekonstruktion. Priser er ekskl. moms.

Bærende konstruktion	Tillægspris Kr/m²
Slapt armeret ribbeelement	80
Forspændt ribbeelement	81
Forspændt ribbeelement	82
Forspændt element m. plane lag	104

Der er ikke taget højde for omkostninger til nyetablering af anlæg til forspænding af facadeelementer. Et bud på udgifter til afskrivning og forrentning af denne investering er 75 kr/m² (+- 30-40 kr/m²).

Kalkulationen viser meget klart at forspænding af bagvæggen ikke kan betale sig, idet disse konstruktioner er dyrere end referencen, selvom udgifter til etablering af anlæg til forspænding ikke er medregnet. Merprisen udgør ca. 10 % af den samlede elementpris.

6 Andre løsninger

6.1 Bærende betonbagvæg / formur i tegl

En ofte anvendt ydervægsløsning ved bolig- og kontorbyggeri består af en bærende betonbagvæg, et isoleringslag og en formur af teglsten (forbundet til bagvæg via bindere). Denne løsning kræver i modsætning til betonsandwichelementer at formuren understøttes af et fundament, hvilket normalt betyder at dette udføres massivt med samme tykkelse som den samlede vægtykkelse. Varmetabet gennem fundamentet vil derfor være betydeligt, idet der ikke er plads til udvendig isolering. Varmetabet kan reduceres en del ved at midterisolere fundamentet.

6.2 Vinterforanstaltning – nyudviklet intermistisk vindue

I forbindelse med udførelsen af dette projekt er vi blevet gjort bekendt med, at der er udviklet et nyt vindue til vinterforanstaltning (kaldet Screen), der angiveligt mere effektiv forhindrer træk- og vandgéner end et traditionelt interimsvindue af trælægter.

Screen består af et polyethylén-profil påmonteret en klar plastfilm og fås som et 1-lags plastvindue og i en thermoudgave med 2-lags plastmembran, med en beregnet U-værdi på ca. 3 W/m^2K (30-35 mm luft), hvilket kun er ca. det dobbelte af U-værdien for et typisk permanent vindue. Specielt sidstnævnte vindue vil i væsentlig grad kunne begrænse varmetabet i byggerier under opførelse, og derved spare bygherrer for en økonomisk tung post til opvarmning og udtørring af vinterbyggeri.

Producenten anfører følgende fordele:
- Lav vægt (35 % af trælægtevinduers).
- Hurtig levering af færdige vinduer – sparer tid og ressourcer på byggepladsen.
- Montagevenlig – kan monteres både udefra og indefra.
- Forhindrer uønsket vandindtrængen.
- Nedsætter/eliminerer udgifter til reparationer som følge af vandskader.
- Nedsætter/eliminerer udgifter til udtørring af bygninger.
- Nedsætter udgifter til opvarmning i byggeperioden.
- Nedsætter/eliminerer géner fra træk, til gavn for arbejdsmiljøet.
- Bortskafffes som almindeligt brændbart affald, uden miljøgéner. Lav vægt = lav lossepladsafgift.
- Rammer vil kunne efterlades i facadekonstruktion – reduceret udgift til affaldsbortskaf.

Nærmere information kan fås ved at kontakte Mads Blom pr. e-mail:
Mads.Blom@ Skanska.dk eller pr. tlf.: 20 45 40 01, eller ved skriftlig henvendelse til: B&B Raven Trade I/S, Birkebakken 29, 3460 Birkerød.

7 Samlinger mellem elementer

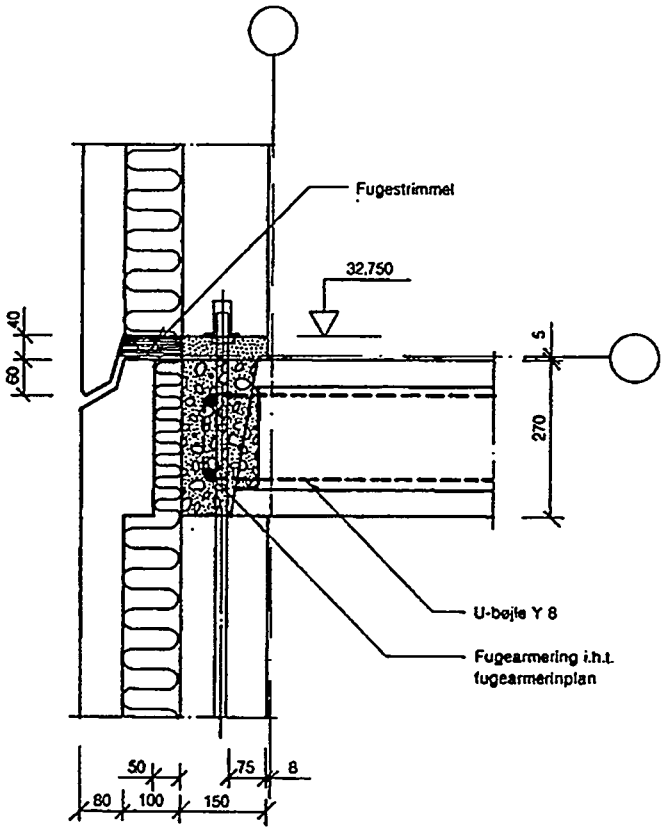
Samlingen mellem sandwichfacade og terrændæk (fundamentet) og samlingen mellem to facadeelementer ("hæl-tå-løsningen") ved etagekryds-samlingen indeholder væsentlige kuldebroer. I det følgende undersøges betydningen heraf, og der gives eksempler på løsninger med bedre varmetekniske egenskaber.

7.1 Etagekryds (hæl-tå-løsning)

I etagekryds-samlingen samles to facadeelementer med et etagedæk. Samlingen mellem facadeelementerne skaber en vandret fuge, som skal sikres mod vandindtrængen. Denne fuge udformes typisk med "tå" i det øverste facadeelements forstøbning og "hæl" ved bagsiden af det nederste facadeelements forstøbning, så der er et overlap på minimum 60 mm, som sikrer vandtætheden. Der henvises i øvrigt til SBI-anvisning 177 om facadefuger [11].

"Hælen" vil i normal udformning reducere isoleringstykkelsen med omkring 50 mm i det meste af etagekryds-højden, hvilket giver en betydelige kuldebro, der har en størrelsesorden på ca. 0,035 W/mK for et typisk element med 150 mm facadeisolering. Til sammenligning kan nævnes, at det ekstra varmetab for en typisk vinduesribbe med 50 mm kuldebroisolering er 0,047 W/mK (jf. tabel 7, side 27).

I figur 20 er vist en etagekrydssamling, som den typisk er udformet i dag. Det skal bemærkes, at der i bilag B er redegjort for baggrunden for traditionel udformning af vandrette fuger.



Figur 20. Bærende sandwich gavlvæg [kilde: Betonelementer – håndbog i 4 bind. Bind 4, side 98].

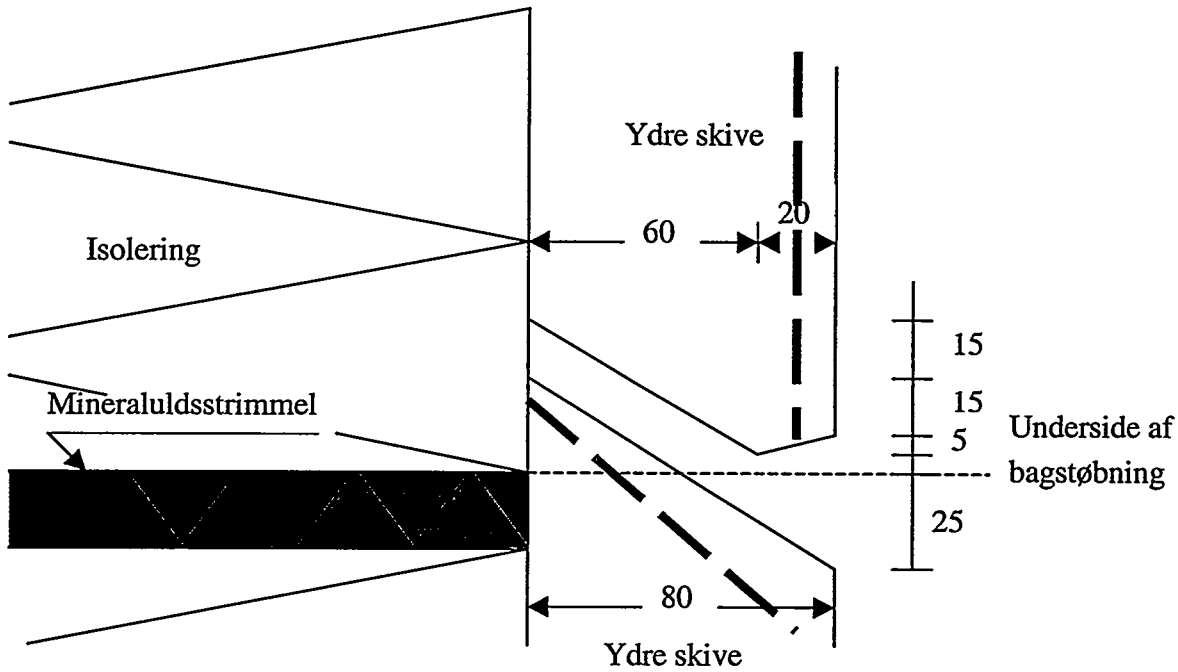
Ved udformningen af betonsandwichelementet er der taget højde for temperatur-relaterede deformationer. Den bærende konstruktion er placeret inden for isoleringen, for derved at undgå større temperaturbevægelser. Fugen er åben, ventilerer isoleringen og forhindrer vandindtrængning til isoleringen, da der er overlap mellem forstøbningen på det øvre og det nedre facadeelement. Isoleringstykkelsen er reduceret på det nedre element for at give plads til overlappet mellem forstøbningerne. Hælen komplicerer formarbejdet og der er risiko for beskadigelse af hælen på det nedre element under monteringen.

Der skulle umiddelbart ikke være de store problemer i at erstatte denne hæl med en anden løsning, hvor princippet med overlap mellem facadeelementernes forstøbning er bevaret. En løsning kunne være, at placere en kappe, eventuelt af PVC, i fugen mellem facadeelementerne. Vandtætheden er sikret pga. overlap mellem forstøbningen på det øverste facadeelement og kappen. Kappen kan forsynes med overlap med drypnæse på den nederste facadeplade, eller den kan evt. indstøbes i den nederste forstøbning.

De faktiske påvirkninger af vandrette fuger mellem betonsandwichelementer er omtalt i bilag C, hvor der er redegjort for, at det anvendte overlap er baseret på meget konservative

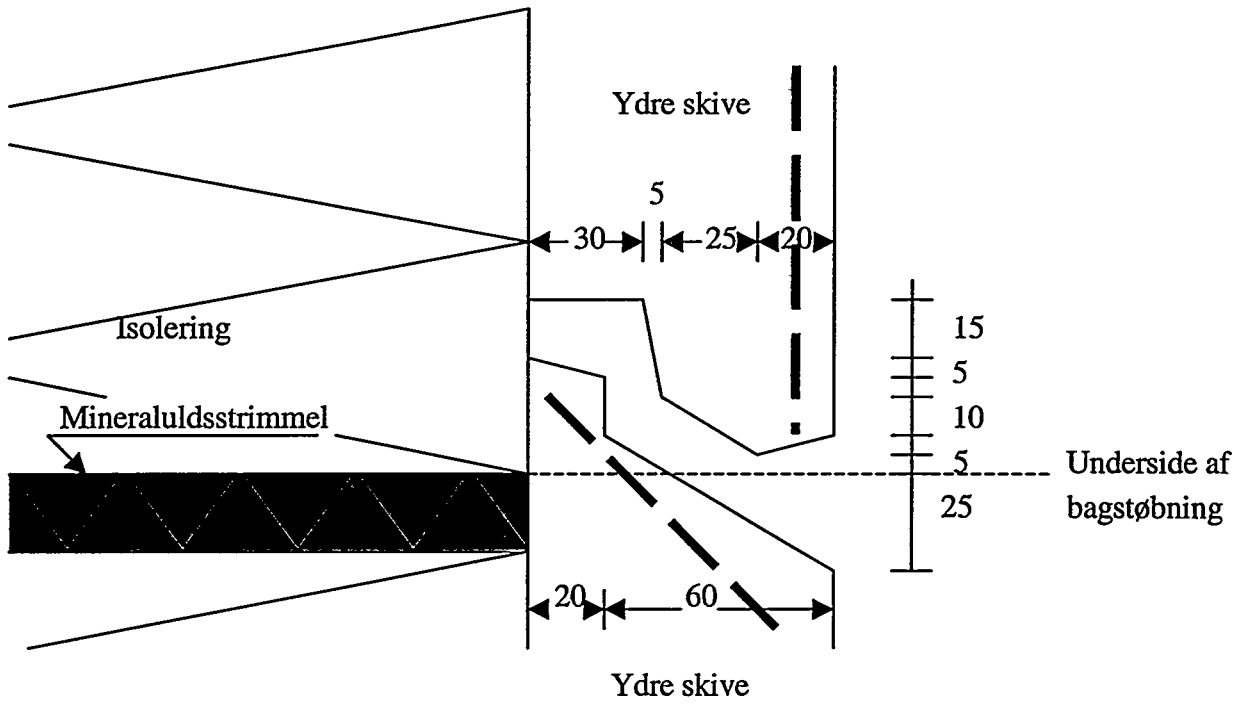
betragtninger, og at udformningen af den vandrette fuge derfor ikke nødvendigvis skal have en hæl-tå-løsning med 60-70 mm overlap mellem forstøbningerne. Der er herved skabt mulighed for, at udforme betonsandwichelementer uden at isoleringstykkelsen er reduceret.

Figur 21 og figur 22 angiver forslag til to principielt forskellige udformninger af den vandrette samling mellem to betonsandwichelementer. De mindre overlap mellem elementerne giver også mindre risiko for beskadigelse af kanterne under monteringen. Af samme grund er den nedre kant af den ydre skive løftet ift. bagvæggens underside. Traditionelt er forstøbningen ført forbi bagstøbningen for at passe ved fundamentet.



Figur 21. Overlappende, vandret fuge mellem betonfacadeelementer. De stiplede linier viser placeringen af fugebånd i de lodrette samlinger.

Fugen vist på figur 21 er vandtæt pga. overlappet mellem forstøbningen på øverste og nederste facadeelement.



Figur 22. Tandet overlap mellem to ydre skiver i den vandrette fuge mellem to betonfacadeelementer.

En tandet overlapning, som vist på figur 22, har til formål at sikre yderligere mod vandindtrængning til isoleringen.

En vindbelastning - på et betonsandwichelement som udgør facaden på et hus - vil resultere i en vindstrøm gennem fugerne. Om denne vindstrøm under visse omstændigheder kan presse vand gennem fugen og derved opfugte den bagved liggende isolering er undersøgt. Der er opstillet modeller for dels den udadgående vandstrømning i en vandfilm med en given tykkelse forårsaget af tyngdekraften, dels den indadgående vandstrømning forårsaget af luftstrømningen langs vandfilmens overflade. Beregningerne indikerer, at det ikke er muligt for den indtrængende luft gennem den vandrette fuge at vende en eventuel udadgående vandstrøm. Der henvises til afsnit om delvist vandfyldt fuge i bilag C.

Ovennævnte beregninger har dannet udgangspunkt for et første indledende forsøg der har bekræftet, at der ikke er risiko for at en vandfilm kan presses over bagkanten, men at det er de vindbårne vanddråber, der er kritiske.

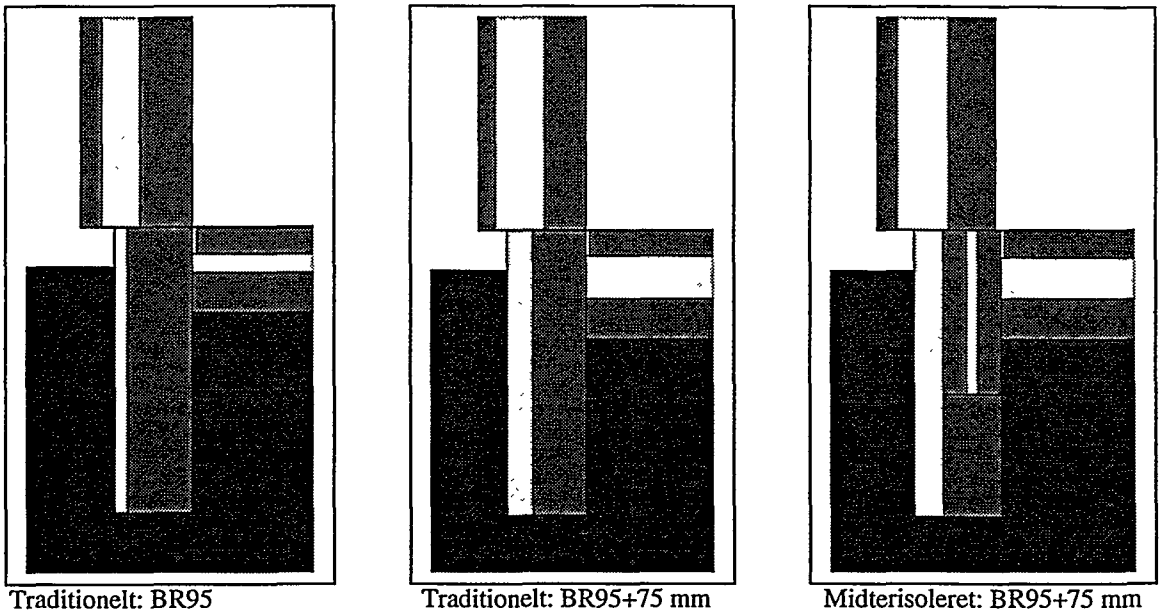
For at sikre at de nye løsninger er anvendelige i praksis, er der udført regntæthedsforsøg, hvor en fuge som skitseret i figur 21 udsættes for en realistisk kombination af regn- og vindbelastning. Der er i den forbindelse indhentet data, som kombinerer samtidig vindbelastning med nedbør, for derved at kunne tage stilling til en dimensionsgivende påvirkning af en facade. I kapitel 8 er der redegjort for disse data og for forsøgsbetingelser og –resultater.

7.2 Fundament

Varmetabet ved fundamentet er oftest den mest betydelige kuldebro i en bygning. Fundamentetssoklen i betonelementbyggeri udføres af styrkehensyn ofte i beton fremfor letklinkerbeton, der ellers normalt anvendes til andre bygninger (specielt enfamilieshuse). Dette er varmeteknisk uhensigtsmæssigt, da beton har en varmeledningsevne, der er omkring 6 gange så stor som letklinkerbeton. Linietabet for et traditionelt udformet betonfundament er ca. 50 % større end linietabet for et fundament med 40 cm letklinkerbeton i den øverste del af fundamentet, hvilket fremgår af DS418 tillæg 4 (afsnit om ydervægsfundamenter).

Et traditionelt fundament til betonelementer udføres ofte med 50 mm udvendig isolering og sokkelplade samt 15 mm kantisolering mellem fundament og terrændæk. Fundamentet kan også udføres som et betonfundament med 50 mm midterisolering ført 60 cm ned regnet fra soklens overkant og med 50 mm udvendig isolering, hvilket naturligvis er en varmeteknisk bedre løsning (se figur 23).

I nogle af ovenstående afsnit er det undersøgt, hvor meget isoleringstykkelsen skal øges for at opnå en samlet U-værdi for sandwichelementer på 0,175 W/m^{2}K. Det er bestemt, at hvis der etableres en optimal vinduesfals-løsning (dvs. ingen betonribber omkring vinduer og en god vinduesplacering), skal isoleringstykkelsen øges fra 150 mm (U = 0,3) til ca. 225 mm. En given merisolering af ydervæggene vil naturligt betyde, at den udvendige fundamentsisolering øges tilsvarende. Det antages, at terrændækket merisoleres lige så meget som ydervæggen. Men hvad betyder denne merisolering af ydervægge, fundament og terrændæk for linietabet ved fundamentet?



Traditionelt: BR95
50 mm udv.

Traditionelt: BR95+75 mm
125 mm udv.

Midterisoleret: BR95+75 mm
125 mm udv. + 50 mm midt

Figur 23. De tre undersøgte fundamenter (kapillarbrydende lag er 150 mm letklinker).

I tabel 30 er anført linietab for et traditionelt fundament med 50 mm udvendig isolering. Desuden er linietabet for de to ovennævnte fundamentstyper beregnet ved en merisolering af fundamentet svarende til U = 0,175 i ydervæggen - altså en 75 mm merisolering af ydervægge, fundament og terrændæk (se figur 23).

Tabel 30. Oversigt over sammenhæng mellem fundamentstype, isoleringsniveau og fundamentslinietab.

Fundamentstype	Isoleringsniveau	U-værdi ydervæg	U-værdi terrændæk	Linietabet Ψ_f (W/mK)
Traditionel	BR95	0,30	0,20	0,374
Traditionel	BR95 +75 mm	0,175	0,14	0,304 (-19%)
Midterisoleret	BR95 +75 mm	0,175	0,14	0,207 (-45%)

Det ses af tabel 30, at varmetabet fra fundamenter til betonsandwich-elementer generelt er af betydelig størrelse. Linietabet kan reduceres med ca. 20 %, når gulv, vægge og fundament merisoleres. En samtidig midterisolering af fundamentet har betydelig virkning, da linietabet reduceres med 45%.

8 Udvælgelse af de bedste løsningsforslag - grundig undersøgelse og dokumentation

8.1 Bolig- og kontorelement

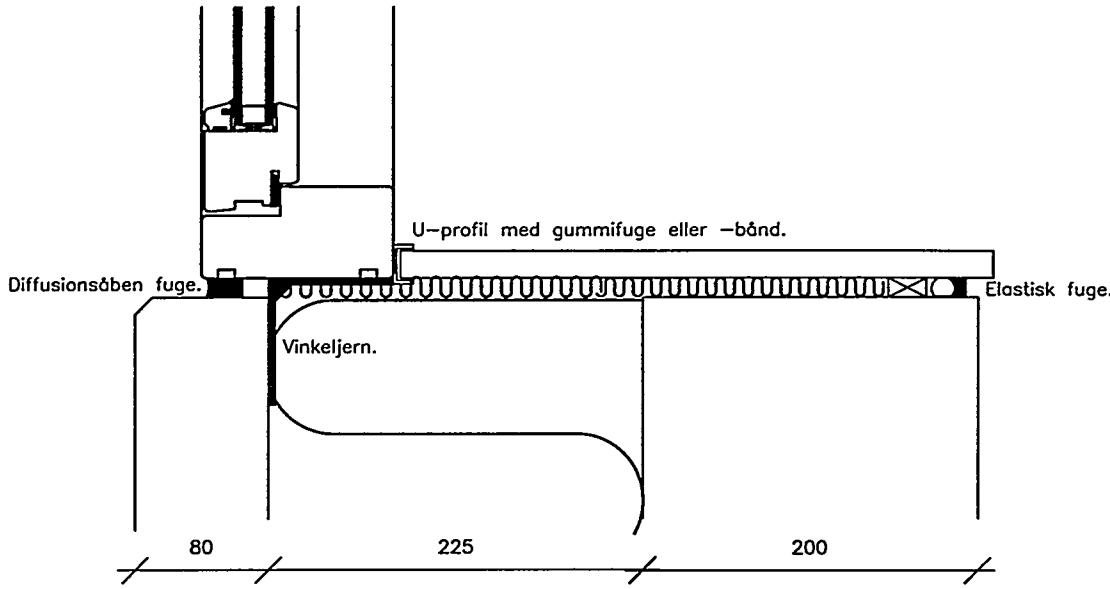
8.1.1 Vinduesløsninger til betonsandwichelementer uden betonribber ved vinduesåbninger

Fjernelse af betonribber ved vinduesåbninger betyder, at den optimale vinduesplacering varmetabsmæssigt set ligger længere inde i facaden, som vist i afsnit 4.3. En sådan vinduesplacering i en facade uden betonribber ved vindueshuller og med stor isoleringstykkelse vil for de fleste vinduestyper kræve udvendige inddækninger og have væsentlige arkitektoniske og æstetiske virkninger i forhold til en traditionel vinduesplacering.

Imidlertid er der varmetabsmæssigt ikke den store forskel på en optimal vinduesplacering og en traditionel placering, hvor vindueskarmen overlapper forstøbningen med 2-3 cm. Da en placering længere inde i facaden samtidig vil betyde at solindfaldet mindskes (se afsnit 4.3), vil det umiddelbart være fornuftigt at satse på udvikling af løsninger, hvor vinduet indsættes traditionelt (fuge mod forstøbning) - båret enten ved for- eller bagstøbning. Derved undgås også bekymringer omkring tæthed af den udvendige inddækning.

Ved en fastholdelse og bæring af vinduet via beslag fastgjort til bagstøbningen kræves lange og kraftige beslag (specialbeslag), der i øvrigt vil give en vis kuldebrovirkning. Det vil derfor være ønskeligt, at foretage fastgørelsen i forstøbningen. Dette betyder imidlertid, at fugt- og temperaturbetingede forskydninger mellem for- og bagstøbning skal kunne optages af samlingerne mellem vindue og vinduesindfatninger, så lufttætheden kan bevares. Disse forskydninger ligger i størrelsesordenen 1-2 mm.

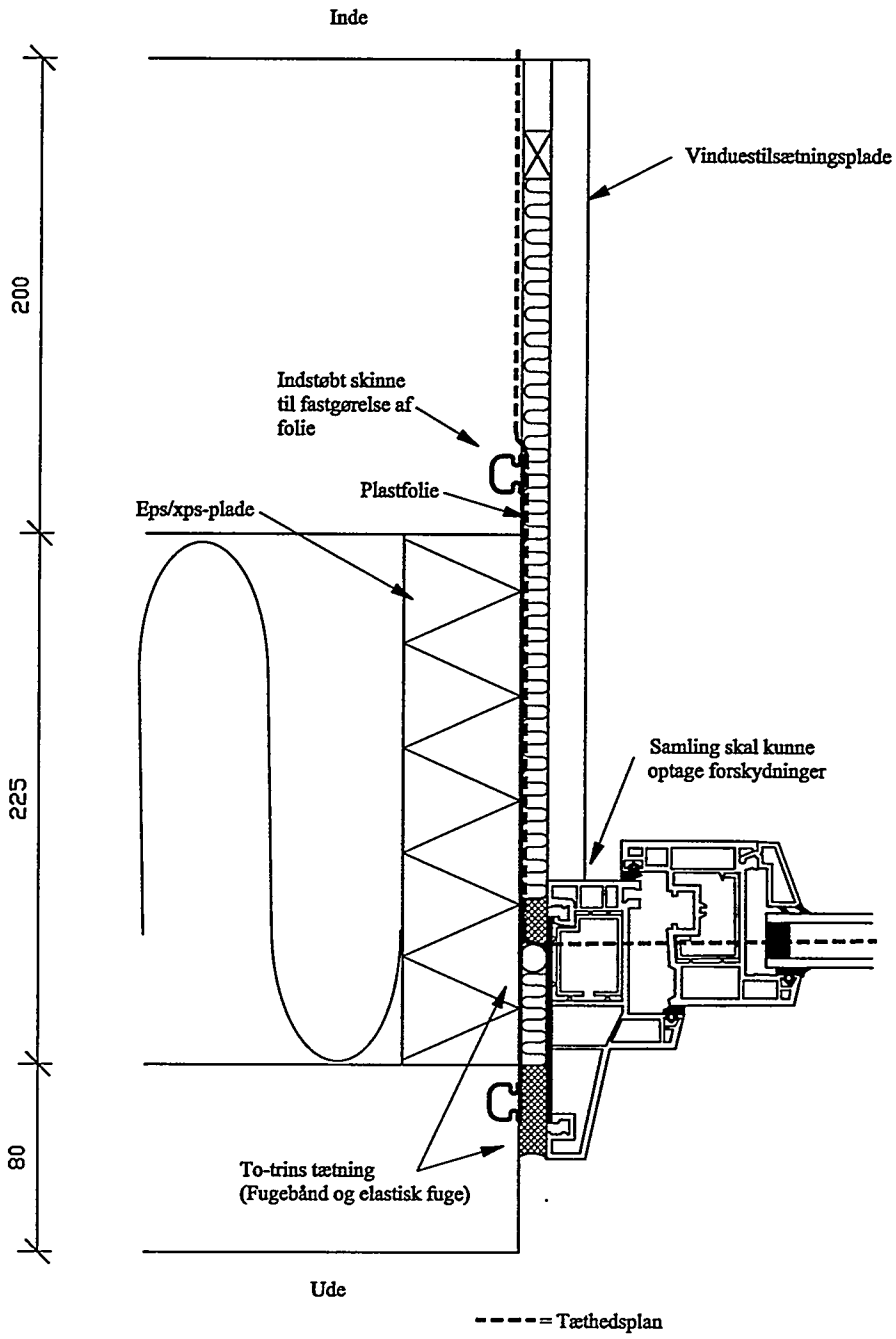
I figur 24 er vist et eksempel på en vinduesløsning, hvor vinduet er placeret ved og fastgjort til forstøbningen med vinkelbeslag. Optagelse af forskydninger mellem yder- og indervæg og lufttætheden sikres eksempelvis via et U-profil med tætningsbånd eller fugemasse.



Figur 24. Forslag til vinduesløsning (snit i side- og overkarm). Forskydninger og lufttæthed sikres via et U-profil med tætningsbånd eller fugemasse. Mål er i mm.

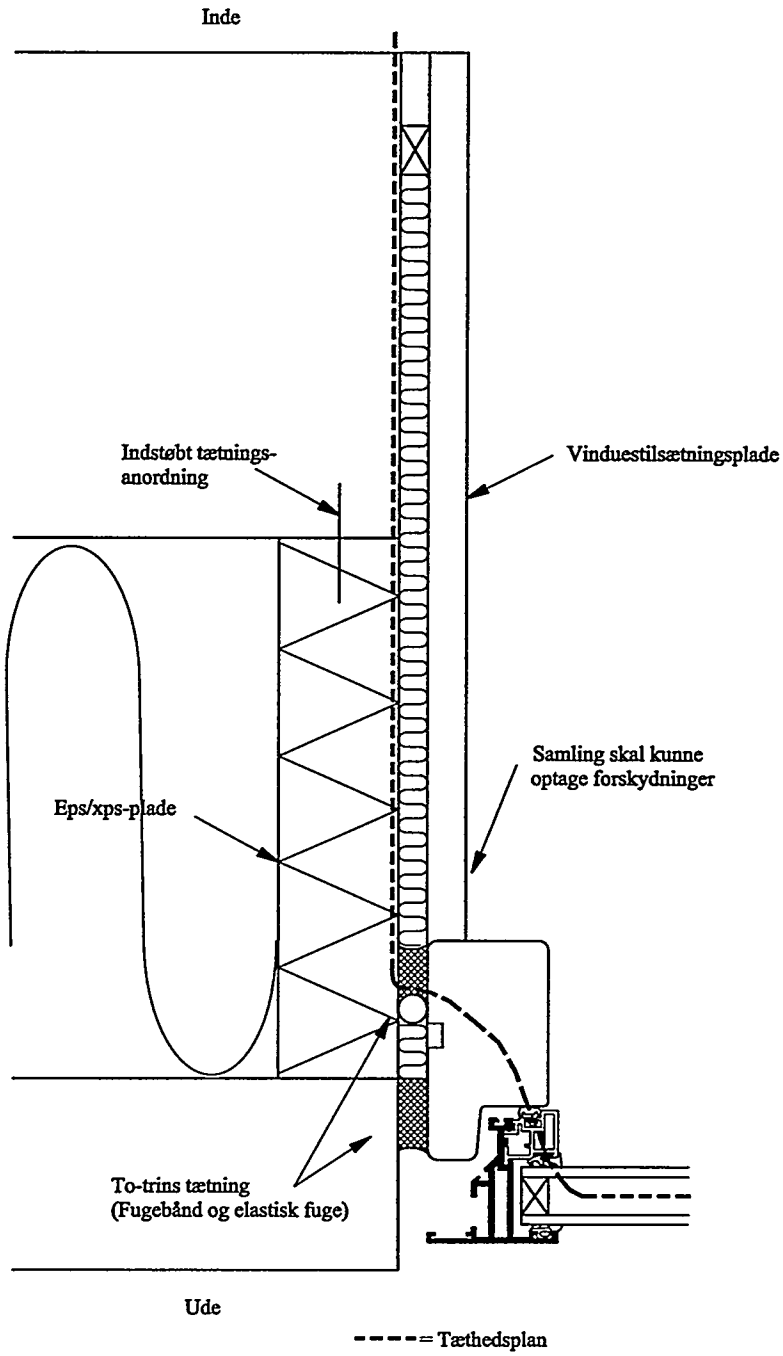
Hvis lufttætheden kunne sikres uafhængigt af vinduets tilslutning til indfatninger m.v., ville man have en god løsning. Der er skitseret eksempler på to sådanne løsninger. Vinduesindfatninger vil kunne udføres uden hensyntagen til og bekymring for om tilslutninger til vindue / facadeelement er lufttætte. Et problem ved disse løsninger er dog, at lufttætheden ligger skjult, hvilket betyder, at revner ikke umiddelbart kan opdages og tætnes.

Det er ikke vist, hvordan vinduet fastgøres til forstøbningen. Dette må der tages stilling til i forbindelse med den videre udvikling af typeløsninger. En alternativ løsning til en fastgørelse ved forstøbning (eller bagstøbning) kunne være, at vinduets vægt bæres ved bundkarm via en opklodsning, og at vindlasten optages via relativt spinkle beslag fastgjort til bagstøbningen uden naturligvis at ødelægge lufttætheden.



Figur 25. Forslag til vinduesløsning hvor lufttætheden er sikret uafhængigt af vinduestilslutningernes udformning. Som eksempel er vist et plastvindue. Mål er i mm.

Den ene løsning (figur 25) viser et sandwichelement med en indstøbt skinne i for- og bagstøbningen til fastgørelse af en elastisk folie (dampspærre), der afdækker isoleringslaget i hele vinduets omkreds. Folien kan f.eks. fastgøres i skinnen vha. en massiv "plastpølse" som trykkes på plads sammen med folien.



Figur 26. Forslag til vinduesløsning hvor lufttætheden er sikret uafhængigt af vinduestilslutningernes udformning. Som eksempel er vist et vindue med ramme-karm af blandede materialer (Aluminium, plast og træ). Mål er i mm.

Den anden løsning (figur 26) består af en polystyrenplade inkl. indstøbt tæthedsanordning mod bagstøbningen, der sikre lufttætheden på samme måde som en folie.

8.1.2 Alternativ udformning af vandret fuge mellem betonsandwichelementer

Som redegjort for tidligere, er der udviklet alternative løsningsprincipper for udformning af den vandrette fuge mellem betonfacadeelementer, der betyder, at isoleringstykkelsen i etagekrydset ikke reduceres. Det er sandsynliggjort, at der ikke vil kunne presses en vandfilm over forstøbningens bagkant, men at der muligvis vil kunne opstå problemer pga. gennemslag at vindbårne regndråber. For at verificere at vandpåvirkningen af isoleringen i praksis er begrænset og acceptabel, er der udført realistiske regntæthedsforsøg for en løsning som skitseret i figur 21, side 52. Forsøget er udført på et 2,4 m bredt ca. 1 m højt udsnit af en facade, der antages stort nok til med rimelighed at kunne simulere dynamikken omkring vind- og regnpåvirkning af en bygningsfacade.

Vandindtrængningen i en bygning under et stormfuldt regnvejr afhænger af hovedsageligt differenstrykket over regnskærmen samt hastigheden, retningen og mængden af vand som rammer facaden. I det følgende redegøres for hvordan der er nået frem til en dimensioneringsgivende påvirkning mht. til ovennævnte faktorer.

Vind og nedbør

I forbindelse med et Ph.d.-projekt vedr. de lokale udeklimaparametres betydning for varme- og fugttransport ved overfladen af klimaskærmskonstruktioner (udført af Mikkel K. Kragh, IBE-DTU) er der indsamlet vejrdata vedrørende bl.a. nedbør og vind for år 1991-1993. Disse data er opsamlet i det nordkøbenhavnske område og stillet til rådighed af Danmarks Meterologiske Institut. I bilag C (figur C1) er der på baggrund af ovennævnte data vist sammenhængen mellem nedbør og vind. Diagrammerne viser overordnet, at når det regner kraftigt, blæser det stort set ikke. Desuden viser vejrdataene, at den maksimale middel-vindhastighed er ca. 15 m/s, og at den største nedbørsintensitet der forekommer er 10 mm/h.

Samtidig påvirkning af kraftig vind og regn er en ekstrem situation, idet denne altså faktisk aldrig forekommer. Derfor må forsøget betragtes som værende på den sikre side, hvis vind- og vandpåvirkningen bestemmes ud fra ovennævnte maksimale værdier.

Forsøget foretages altså for en vindhastighed på højst 15 m/s og en slagregns-vandmængde på 10 mm/h, der rammer en facade under 45°. Sidstnævnte svarer til 1 liter/min/m fuge, idet det antages at der befinder sig to facadeelementer ovenover med en højde hver på 3 m.

Der anvendes en kraftig aksialventilator med en diameter på ca. 60 cm til at generere den anførte vindhastighed.

Trykdifferens over regnskærmen / infiltration

Utætheder i klimaskærmen vil aldrig helt kunne undgås. Derfor vil der være en vis infiltration af luft, som naturligvis er størst under en kraftig storm. For at simulere denne infiltration var der etableret sug fra en ca. 1 mm spalte på ca. 1 m af forsøgsopstillingen svarende til en luftstrøm på 5,6 l/s. Denne luftmængde er bestemt ved at regne på en 1 mm høj og 0,15 m bred

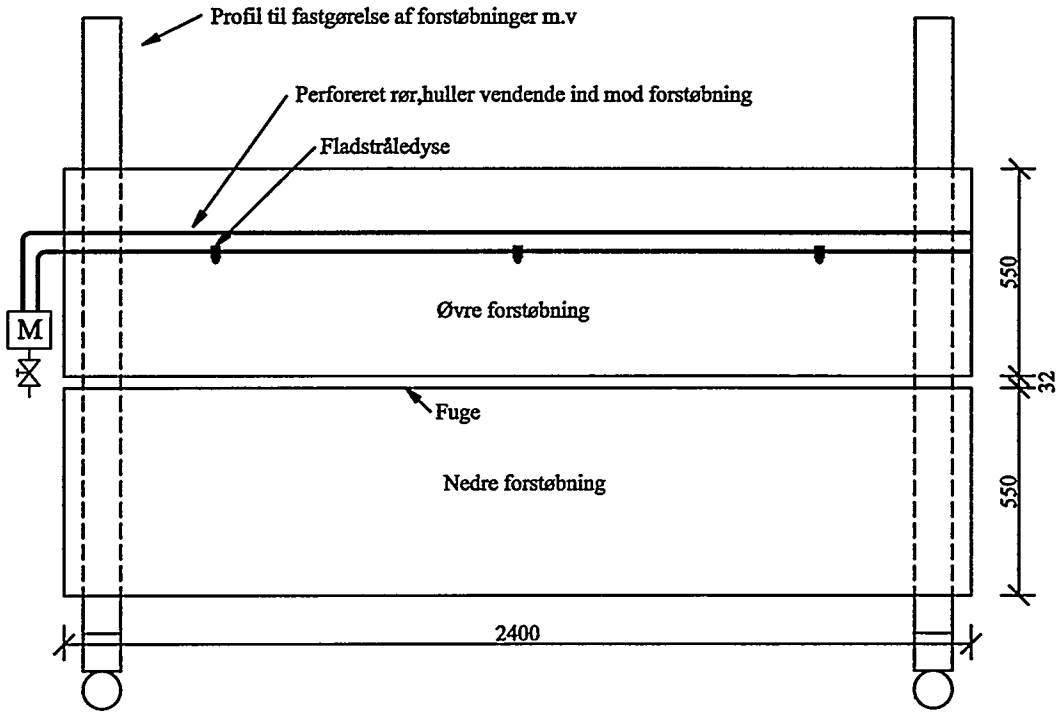
kanal (som model for revne i fugerne i bagvæggen) samt en trykdifferens mellem ude og inde på 300 Pa. Luftmængden svarer ca. til et luftskifte på 0,2 gange i timen - baseret på infiltration gennem 0,5 m fuge pr. m^2 boligareal og en rumhøjde på 2,5 m. Et typisk (og acceptabelt) gennemsnitligt årligt luftskifte ved infiltration ligger på omkring 0,1 gange i timen.

Regndråbestørrelse

Regndråbernes størrelse har betydning for hvor nemt de kan "bæres" af vinden og videre ind gennem den vandrette fuge til isoleringen. Dråbestørrelsen afhænger af regnintensiteten, og i litteraturen på området angives middeldråbediameteren 1,9 mm at svarer ca. til en regnintensitet på 10 mm/time, mens middeldråbediameteren er 1,4 mm ved 2 mm/h. For at simulere frie regndråber er anvendt fladstråledyser, for hvilke fabrikanten angiver at 32 % af dråberne har en diameter på 1,2 mm og at de største dråber er 3-3,5 mm ved normalt vandtryk. Disse dyser antages at sprede vanddråber med realistisk størrelse.

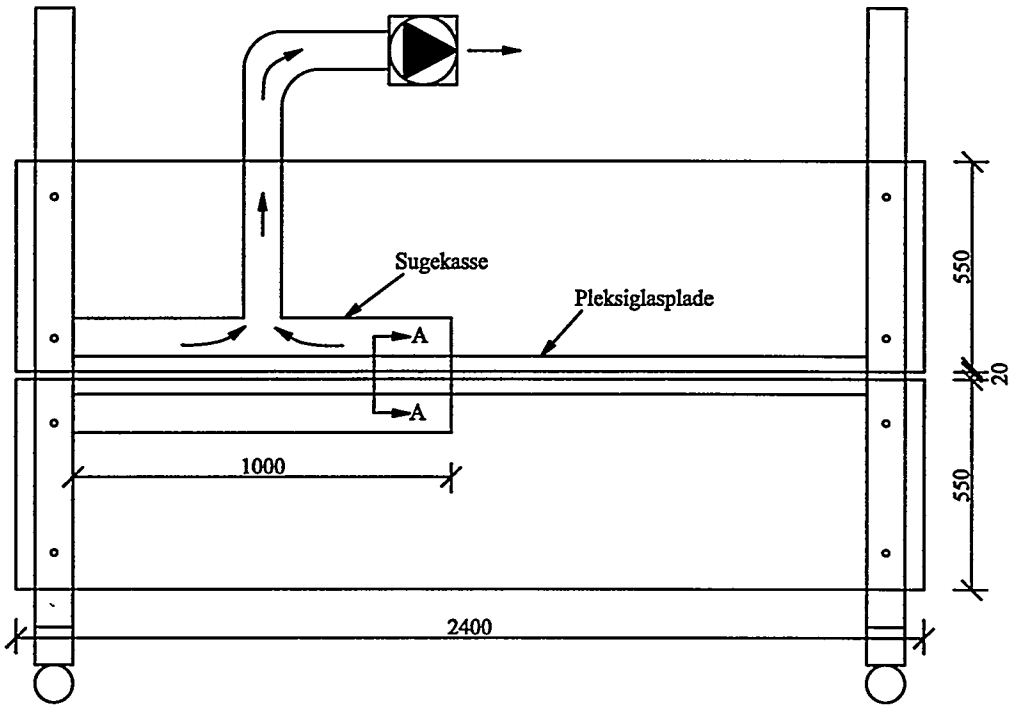
Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen er skitseret i figur 27 og figur 28. De to figurer viser hhv. forsiden og bagsiden af opstillingen. Figur 27 viser de to forstøbningselementer, fugen og to vandrør. Det ene rør har huller der vender mod elementet til simulering af slagregn. På det andet rør er påmonteret fladstråledyser, der skal levere frie regndråber.

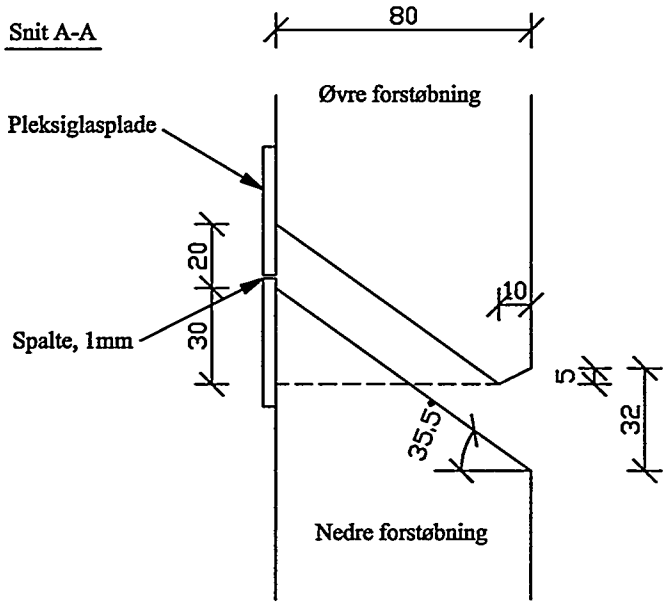


Figur 27. Forside af opstilling til regntæthedsprøvning af vandret fuge mellem facadeelementer. Mål er i mm.

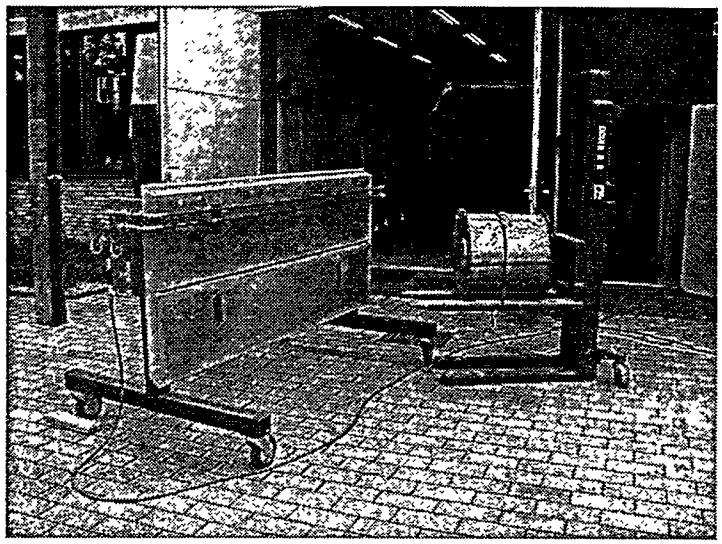
På figur 28 er bagsiden af opstillingen vist, hvor det ses, at fugen er lukket til vha. en pleksiglasplade undtagen i den del, hvor der er etableret sug via en ventilator. Snit A-A fremgår af figur 29. Det ses, at fugens lodrette højde er 20 mm, hvilket er typisk for betonelementbyggeri, og at den effektive højde er 30 mm. Desuden ses det, at den udvendige nedre kant af den øvre forstøbning er affaset, hvilket bidrager til at reducere dråbedannelsen som følge af den slagregn, der løber ned af facaden. I figur 30 er vist diverse billeder af forsøgsopstillingen.

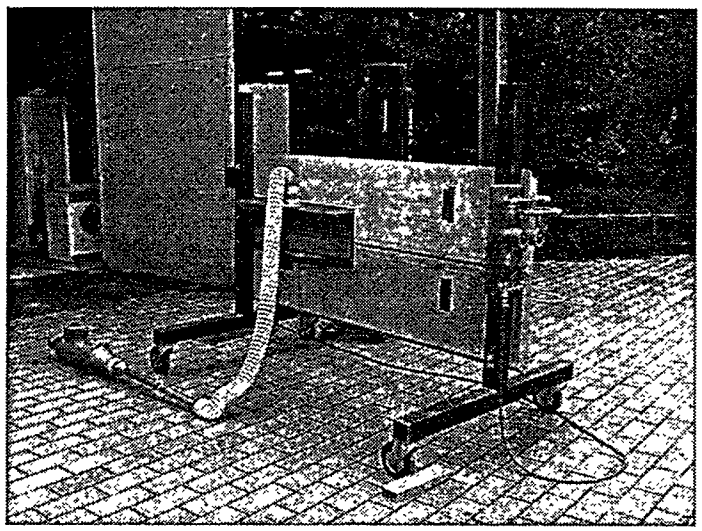


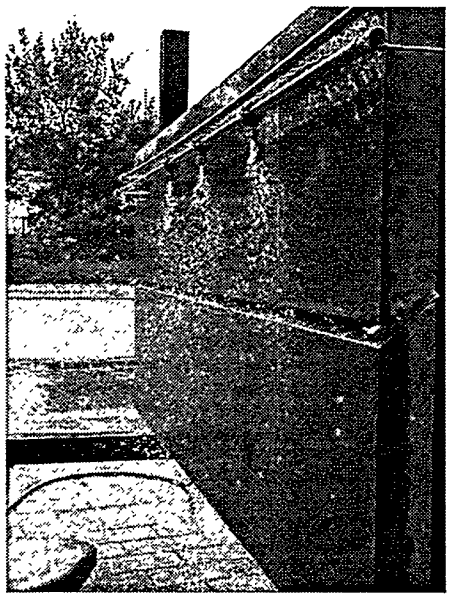
Figur 28. Forside af forsøgsopstilling.



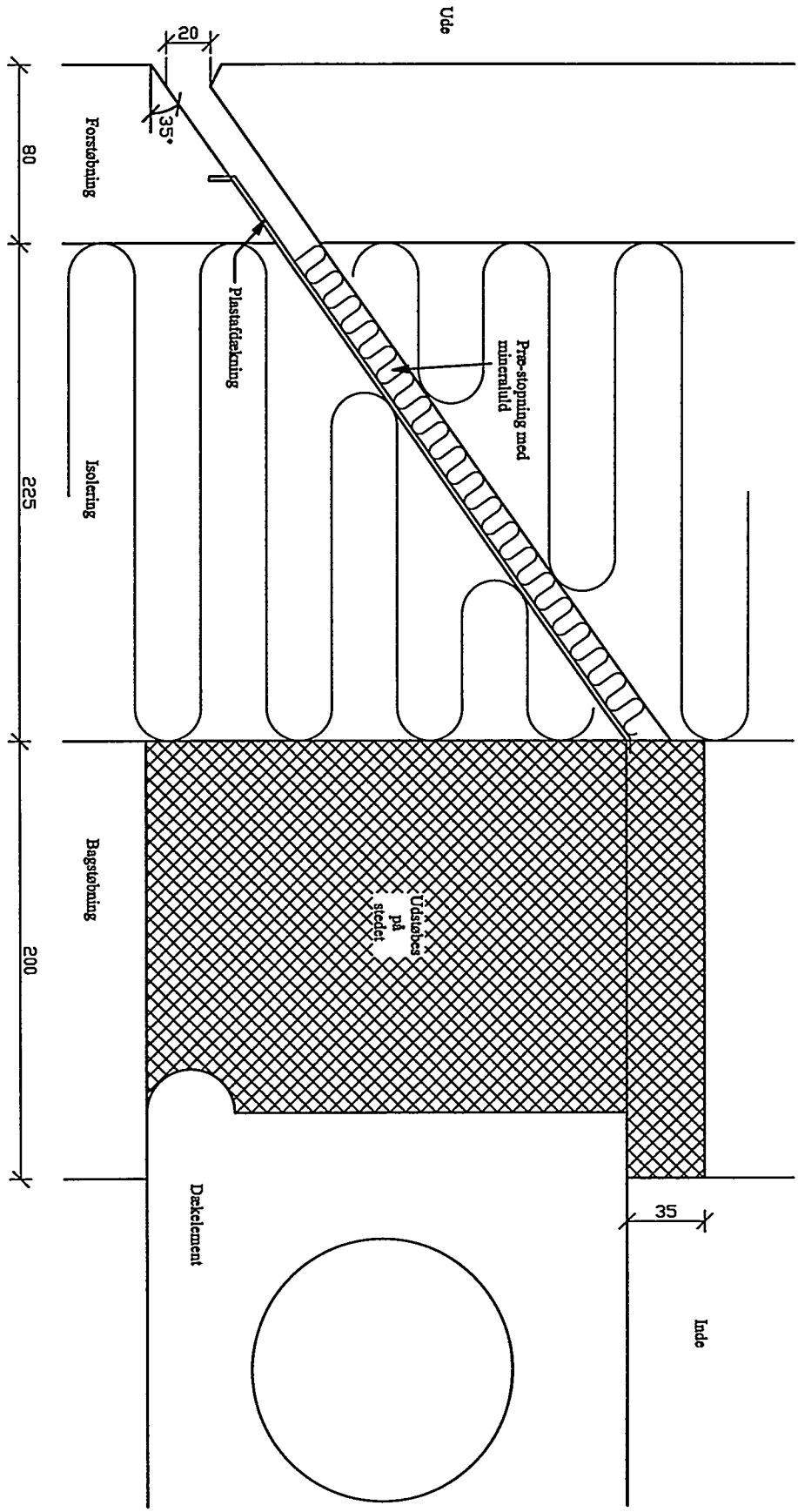
Figur 29. Lodret snit i forstøbninger ved fuge og sugekasse.







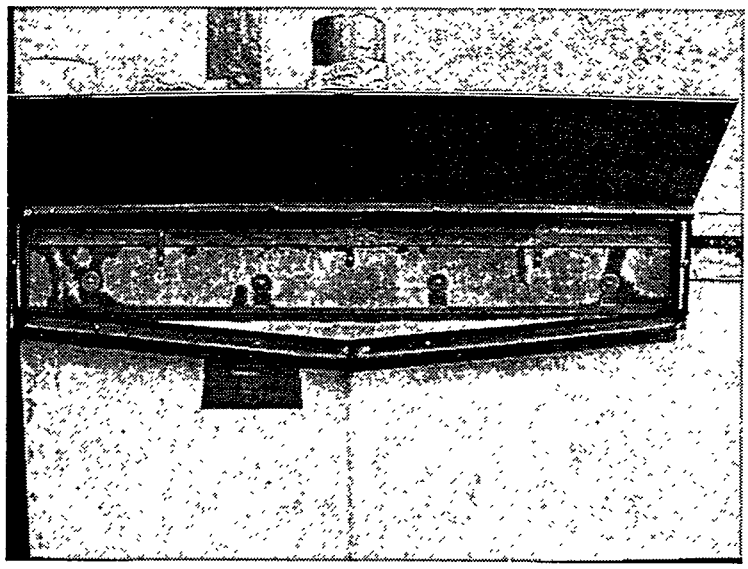
Figur 30. Diverse billeder af forsøgsopstilling.



Figur 32. Forslag til alternativ udformning af vandret fuge mellem betonsandwichelementer. Mål er i mm.

Det vand, der trænger ind gennem fugen og rammer understopnings-isoleringen, vil opfugte denne. Det er svært at udtale sig om omfanget af opfugtningen og dermed hvor langt op det er nødvendigt at placere plastafdækningen. Derfor er der udført forsøg, hvor der blev placeret en ca. 2 cm bred isoleringsstrimmel i den øverste del af fugen (helt op mod pleksiglaspladen) i den fugedel med sug. Forsøget viste at selv efter 30 min. påvirkning var kun den yderste cm. af isoleringen våd, og der var kun trængt lidt vand ind i den nedre del af fugen i sugekassens to ender (se figur 33). Denne indtrængen kan skyldes sugning af vand i små ujævnheder i den nedre forstøbnings afskårede flade.

På baggrund af dette forsøg kan det konkluderes, at plastafdækningen ikke behøver at afdække hele isoleringslaget men kun den yderste del.

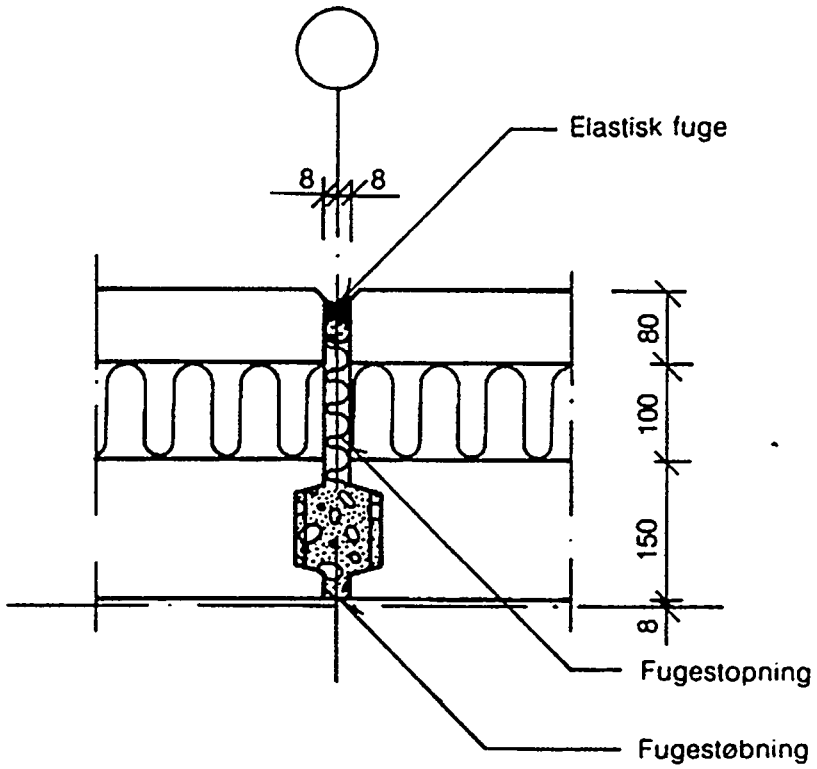


Figur 33. Bagsiden af fuge med isoleringsstopning efter 30 min påvirkning. Bemærk de små vandskjolder i sugekassens to ender.

Set i lyset af de udførte forsøg bør det stærkt overvejes, at revidere den tidligere omtalte SBI-anvisning 177 (facadefuger).

Lodret fuge mellem betonsandwichelementer

I forbindelse med udvikling af en ny løsning vedr. den vandrette fuge, er der overvejet alternative udformninger af den lodrette fuge mellem betonsandwichelementer, baseret på en element-integreret vandtætning lige bag forstøbningerne og en åben fuge. Der er dog mange problemer forbundet hermed, især med hensyn til facadens udseende. Derfor er det blot vist, hvordan den lodrette fuge traditionelt udformes (se figur 34). I stedet for en elastisk fuge kan der udvendigt lukkes med fugebånd.



Figur 34. Eksempel på udformning af lodret fuge mellem sandwichelementer (vandret snit). [Kilde: Betonelementer – håndbog i 4 bind. Bind 4, side 104].

8.1.3 Økonomisk vurdering af nye forslag til elementudformning

Der foretages en overslagsmæssig beregning af, hvad det koster at forbedre isoleringsniveauet fra 0,30 til 0,175 W/m^{2}K ved brug af de viste forbedrede varmetekniske løsninger, dvs. fjernelse af betonribber og fortykkelser ved hæl-tå-løsningen. Det tidligere anvendte bolig- og kontorelement med to vinduesåbninger benyttes som eksempel. Det skal bemærkes, at der i modsætning til tidligere beregninger tages hensyn til fortykkelser ved den vandrette fuge ved beregning af den isoleringstykkelse, som svarer til U-værdien 0,30. Alle angivne priser er inkl. arbejdsløn og ekskl. moms, hvis ikke andet er angivet. Der ses bort fra merpris til længere bindere og hængebøjler som følge af den forøgede isoleringstykkelse. Ved samlingen omkring vinduer prissættes kun ekstra tilsætninger.

Beregninger viser, at der opnås en besparelse på 16,50 kr. pr. m. ved bortfald af ribber og samme besparelse ved bortfald af hælen i den traditionelle hæl-tå-løsning. Forbedringen af U-værdien fra 0,30 til 0,175 betyder, at isoleringstykkelsen skal øges fra ca. 160 mm til 250 mm (for en traditionel vinduesplacering). Det vil sige at isoleringstykkelsen skal øges med 90 mm, hvilket koster 90 kr/m^2, idet prisen for almindelig isolering er ca. 1 kr/m^2/mm (1000 kr/m^3). Vinduestilsætninger kan f.eks. være MDF-plader, som koster 80 kr/m^2 svarende til 7,2 kr/m for 90 mm brede plader. Dette er dog kun materialeprisen. På baggrund af prisbøger skønnes monteringen at koster 40 % af den samlede pris, hvorved der kan beregnes en samlet pris på 12 kr/m.

Den samlede merpris kan herefter på baggrund af de angivne forudsætninger beregnes som følger:

Merisolering:			+ 90 kr/m^2
Fradrag, ribber:	16,5 kr/m · (9,6 m/13,3 m^2)	=	- 11,9 kr/m^2
Fradrag, hæl-tå:	16,5 kr/m · (6,0 m/13,3 m^2)	=	- 7,4 kr/m^2
Tillæg, vinduestilsætninger:	12,0 kr/m · (9,6 m/13,3 m^2)	=	+ 8,7 kr/m^2
Samlet merpris (ekskl. moms):			+ 79,4 kr/m^2
Inkl. moms:			+ 99,3 kr/m^2

Udgifter til forbedring af isoleringsniveauet (0,3 til 0,175) vil altså til dels kunne udlignes af besparelser ved fjernelse af ribber og hæl. Den samlede pris for facadeelementer ligger mellem 650 og 1300 kr/m^2, hvoraf boligfacader hører til i den dyre ende. Merudgiften beløber sig altså til under 10 % af den samlede råhus-udgift, som udgør ca. 25 % af den samlede byggeudgift, svarende til et par procent af den samlede byggeudgift. Energibesparelsen ved reduktion af U-værdien fra 0,30 til 0,175 kan på baggrund af U-værdi-ændringen og gradtimetallet for DK (90000 Kh) beregnes til ca. 11 kWh/m^2/år. Den gennemsnitlige energipris til opvarmning er ca. 0,60 kr/kWh, hvilket resulterer i en simpel tilbagebetalingstid på omkring 15 år, som naturligvis vil falde, hvis energiprisen stiger, hvilket kan forventes i fremtiden. Der er altså samlet set tale om en beskeden merudgift i betragtning af den energibesparelse, der kan opnås.

8.2 Industri-element

8.2.1 Alternative muligheder for bærende konstruktion

Beregninger i denne rapport har vist, at det traditionelle ribbeelement er den mest optimale af de undersøgte konstruktioner. Da man umiddelbart uden væsentlige problemer kan øge isoleringstykkelsen for denne løsning, er der ikke grundlag for en grundig undersøgelse og dokumentation.

9 Konklusion / forslag til videre produktudvikling

Der er udviklet nye betonsandwichelement-løsninger med væsentligt bedre varmetekniske egenskaber, der er anvendelige til højisolereret byggeri. Samtidig er der via disse løsninger opnået effektivitetsforbedringer, idet de byggeteknisk er forbedret.

Beregninger har vist, at en kraftig reduktion af U-værdien ikke kan ske uden at forøge kuldebroisoleringen betydeligt eller helt fjerne ribberne i betonsandwichelementer. De mest betydningsfulde ændringer i udformningen omhandler fjernelse af ribber omkring vinduesåbninger og fjernelse af den opkant/fortykkelse, der er en del af den traditionelle vandrette fuge mellem to facadelelementer.

Implementeres disse løsninger for f.eks. et typisk element med to vinduesåbninger, vil man kunne reducere U-værdien fra 0,30 til 0,175 W/m^2K ved blot at øge isoleringstykkelsen med 90 mm. Merprisen for denne forbedring af U-værdien udgør under 10 % af elementets pris og blot et par procent af den samlede byggeudgift. Sammenholdes den opnåede energibesparelse med merprisen, fås en simple tilbagebetalingstid på ca. 15 år ud fra den nuværende energipris.

I forbindelse med fjernelse af vinduesribber er det vigtigt at der sker en videreudvikling af vinduesløsninger for vinduesåbninger uden betonribber, der er velegnet til elementer med stor isoleringstykkelse. Løsningerne bør udvikles med henblik på at vinduet placeres og bæres ved forstøbningen, da dette er fugt- og varmeteknisk optimalt.

Forsøg med regntæthedsprøvning af vandret fuge mellem facadeelementer hvor isoleringstykkelsen i etagekrydset ikke er reduceret, har vist, at der kun forekommer gennemslag af vindbårne vanddråber. Udlægning af en simpel plastafdækning kan helt sikre mod vandindtrængen. På baggrund af de udførte forsøg bør det stærkt overvejes at revidere SBI-anvisning 177 (facadefuger), der er det anvisningsmæsige grundlag for udformning af fuger mellem betonelementer.

Fælles for rapportens anførte løsningsforslag til forbedret isoleringsstandard gælder, at de er forbundet med en lille merudgift og sandsynligvis en god totaløkonomi. Der er i forbindelse med fjernelse af kuldebroer i form af ribber også anvist muligheder for at opnå produktivitetsforbedrende løsninger. Der er således flere grunde til at fremme udviklingen af de nye typer betonelementløsninger, f.eks. i forbindelse med forsøgsbyggeri. Totaløkonomiske betragtninger/-beregninger kunne også blive udarbejdet og dokumenteret i denne forbindelse, og dermed bruges til at styrke interessen for de nye løsninger.

10 Referencer

[1] Energi 21. Regeringens energihandlingsplan 1996. Miljø- og energiministeriet 1996.

[2] Dansk Standard DS418: Regler for beregning af bygningers varmetab. Dansk Ingeniørforening. København, 1986.

[3] DS418 tillæg 4 omhandlende kuldebroer. Høringsudkast, version 1.00. Dansk Standard. København, 1999.

[4] HEAT2 (version 3.01, 1999) og HEAT3 (verion 3.00, 1998). PC-programmer til beregning af to- og tre-dimensionale varmestrømme. Blomberg, Afdelingen for Bygningsfysik, Universitetet i Lund.

[5] THERM (version 2.0, 1996). PC-program til beregning af to-dimensionale varmestrømme. E. Finlayson m.fl. Vindues- og dagslysgruppen, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA.

[6] Tsbi3-brugervejledning. Computerprogram til termisk simulering af bygninger. Johnsen og Grau, Statens Byggeforskningsinstitut, 1994.

[7] Tillæg 3 til DS418, 1.udg., sept. 1998: Beregning af bygningers varmetab - tillæg omhandlende betonsandwichelementer samt kileformet isolering.

[8] SBI-anvisning 157, SBI 1989: Trådbindere til forankring af skalmure og hule mure.

[9] Tommerup, H. M., J. Munch-Andersen, P.K. Esbensen (2000). Udvikling af klimaskærmskonstruktioner. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Rapport R-042.

[10] Larsen, H. (2000). Bæreevne af betonfacadeelementer til industrihaller. Institut for Bygninger og Energi, Danmarks Tekniske Universitet. Rapport SR0027.

[11] SBI-anvisning 177, SBI 1993: Facadefuger – udformning og materialer.

Bilag A: Betydningen af forskellige placeringer af superisolerende materiale ved og omkring ribber - de enkelte varmetabsbidrag (bidragene er anført i W/mK).

Type A - placering

Ribbeisole-ringstykkelse	Spring Reference	kl.20 i ribbe	Ekstra 1 dim. Reference	kl.20 i ribbe	Samlet Reference	kl.20 i ribbe
			100 mm isolering			
25	0,0186	0,016	0,0697	0,0287	0,0883	0,0447
50	0,007	0,0067	0,028	0,0004	0,035	0,0071
75	0,0018	0,002	0,01	-0,0105	0,0118	-0,0085
100	0	0	0	-0,0165	0	-0,0165
			200 mm isolering			
25	0,0264	0,026	0,08	0,0431	0,1064	0,0691
50	0,0171	0,0176	0,0424	0,0165	0,0595	0,0341
75	0,0115	0,0118	0,0256	0,0059	0,0371	0,0177
100	0,0073	0,0075	0,0161	0,0003	0,0234	0,0078
150	0,002	0,002	0,0056	-0,0057	0,0076	-0,0037
200	0	0	0	-0,0088	0	-0,0088
			300 mm isolering			
25	0,0278	0,0293	0,0803	0,0468	0,1081	0,0761
50	0,0215	0,0232	0,0462	0,0217	0,0677	0,0449
75	0,017	0,0181	0,0304	0,0115	0,0474	0,0296
100	0,0132	0,0139	0,0213	0,006	0,0345	0,0199
150	0,0075	0,0077	0,0112	0,0002	0,0187	0,0079
200	0,0035	0,0035	0,0058	-0,0029	0,0093	0,0006
250	0,001	0,001	0,0023	-0,0048	0,0033	-0,0038
300	0	0	0	-0,006	0	-0,006

Type B - placering

Ribbeisole-ringstykkelse	Spring Reference	1,5 cm	5 cm	Ekstra 1-dim. Reference	1,5 cm		5 cm		Samlet Reference	1,5 cm	5 cm
					ribbe	væg	ribbe	væg			
					100 mm isolering						
25	0,0186	0,0114	0,0103	0,0697	0,0287	-0,0025	0,0287	-0,0082	0,0883	0,0376	0,0308
50	0,007	0,0046	0,0041	0,028	0,0004	-0,0025	0,0004	-0,0082	0,035	0,0025	-0,0037
75	0,0018	0,0014	0,0013	0,01	-0,0105	-0,0025	-0,0105	-0,0082	0,0118	-0,0116	-0,0174
100	0	0	0	0	-0,0165	-0,0025	-0,0165	-0,0082	0	-0,019	-0,0247
					200 mm isolering						
25	0,0264	0,0199	0,0169	0,08	0,0431	-0,0013	0,0431	-0,0044	0,1064	0,0617	0,0556
50	0,0171	0,0136	0,0111	0,0424	0,0165	-0,0013	0,0165	-0,0044	0,0595	0,0288	0,0232
75	0,0115	0,0092	0,0074	0,0256	0,0059	-0,0013	0,0059	-0,0044	0,0371	0,0138	0,0089
100	0,0073	0,0058	0,0047	0,0161	0,0003	-0,0013	0,0003	-0,0044	0,0234	0,0048	0,0006
150	0,002	0,0015	0,0013	0,0056	-0,0057	-0,0013	-0,0057	-0,0044	0,0076	-0,0055	-0,0088
200	0	0	0	0	-0,0088	-0,0013	-0,0088	-0,0044	0	-0,0101	-0,0132
					300 mm isolering						
25	0,0278	0,0234	0,0198	0,0803	0,0468	-0,0009	0,0468	-0,003	0,1081	0,0693	0,0636
50	0,0215	0,0189	0,0155	0,0462	0,0217	-0,0009	0,0217	-0,003	0,0677	0,0397	0,0342
75	0,017	0,0149	0,0121	0,0304	0,0115	-0,0009	0,0115	-0,003	0,0474	0,0255	0,0206
100	0,0132	0,0115	0,0093	0,0213	0,006	-0,0009	0,006	-0,003	0,0345	0,0166	0,0123
150	0,0075	0,0063	0,0051	0,0112	0,0002	-0,0009	0,0002	-0,003	0,0187	0,0056	0,0023
200	0,0035	0,0028	0,0023	0,0058	-0,0029	-0,0009	-0,0029	-0,003	0,0093	-0,001	-0,0036
250	0,001	0,0007	0,0006	0,0023	-0,0048	-0,0009	-0,0048	-0,003	0,0033	-0,005	-0,0072
300	0	0	0	0	-0,006	-0,0009	-0,006	-0,003	0	-0,0069	-0,009

Type C - placering

Ribbeisole-ringstykkelse	Spring Reference	1,5 cm	5 cm	Ekstra 1-dim. Reference	1,5 cm		5 cm		Samlet Reference	1,5 cm	5 cm
					ribbe	væg	ribbe	væg			
					100 mm isolering						
25	0,0186	0,0104	0,0096	0,0697	0,0287	-0,0031	0,0287	-0,0063	0,0883	0,036	0,032
50	0,007	0,0036	0,0032	0,028	0,0004	-0,0053	0,0004	-0,0106	0,035	-0,0013	-0,007
75	0,0018	0,001	0	0,01	-0,0105	-0,0069	-0,0105	-0,0139	0,0118	-0,0164	-0,0244
100	0	0	0	0	-0,0165	-0,0082	-0,0165	-0,0164	0	-0,0247	-0,0329
					200 mm isolering						
25	0,0264	0,0195	0,0183	0,08	0,0431	-0,0009	0,0431	-0,0019	0,1064	0,0617	0,0595
50	0,0171	0,0123	0,0108	0,0424	0,0165	-0,0017	0,0165	-0,0034	0,0595	0,0271	0,0239
75	0,0115	0,0078	0,0066	0,0256	0,0059	-0,0023	0,0059	-0,0047	0,0371	0,0114	0,0078
100	0,0073	0,0047	0,0039	0,0161	0,0003	-0,0029	0,0003	-0,0058	0,0234	0,0021	-0,0016
150	0,002	0,0011	0,0009	0,0056	-0,0057	-0,0037	-0,0057	-0,0075	0,0076	-0,0083	-0,0123
200	0	0	0	0	-0,0088	-0,0044	-0,0088	-0,0088	0	-0,0132	-0,0176
					300 mm isolering						
25	0,0278	0,0235	0,0222	0,0803	0,0468	-0,0004	0,0468	-0,0008	0,1081	0,0699	0,0682
50	0,0215	0,0178	0,016	0,0462	0,0217	-0,0008	0,0217	-0,0016	0,0677	0,0387	0,0361
75	0,017	0,0136	0,0119	0,0304	0,0115	-0,0012	0,0115	-0,0024	0,0474	0,0239	0,021
100	0,0132	0,0103	0,0087	0,0213	0,006	-0,0015	0,006	-0,003	0,0345	0,0148	0,0117
150	0,0075	0,0054	0,0045	0,0112	0,0002	-0,002	0,0002	-0,004	0,0187	0,0036	0,0007
200	0,0035	0,0023	0,0019	0,0058	-0,0029	-0,0024	-0,0029	-0,0048	0,0093	-0,003	-0,0058
250	0,001	0,0006	0,0005	0,0023	-0,0048	-0,0027	-0,0048	-0,0054	0,0033	-0,0069	-0,0097
300	0	0	0	0	-0,006	-0,003	-0,006	-0,006	0	-0,009	-0,012

Bilag B

Traditionel udformning af vandrette fuger mellem betonsandwich-elementer.

Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI

Historisk udvikling

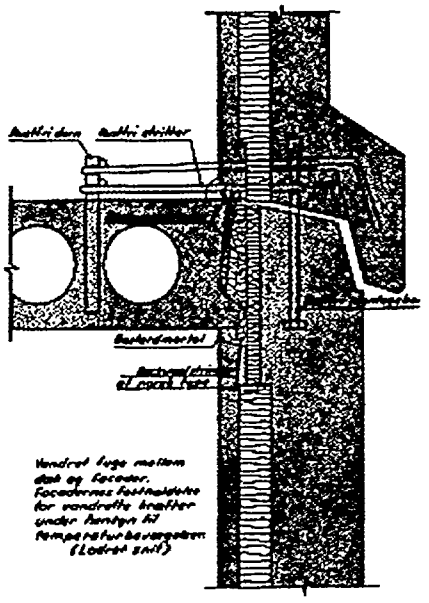
J. F. Munch-Petersen udfærdigede i 1960 SBI-rapport 38 "Samlingsproblemer i Montagebyggeri". Dengang blev fugearbejdet betragtet som en beklagelig stor del af omkostningen ved etableringen af et råhus. Derfor sigtede Munch-Petersen i sit udviklingsarbejde på at nå så nær som muligt til den teoretisk rigtige fuge, der "automatisk" kunne lukke uden fugemateriale.

Munch-Petersen lagde ved udviklingen af betonsandwichelementer vægt på vind- og vandtætning samt en simpel kraftoverførsel i konstruktionen. Den ydre skive sammen med det udvendige fugemateriale skulle være vandtæt. Den indre skive sammen med det indvendige fugemateriale skulle være vindtæt. Luftlækager ville bidrage til termisk diskomfort, men de ville ikke direkte forringer bygningens levetid.

Betonsandwichelementernes varmeisolerende egenskaber blev dengang tillagt mindre betydning. Varmeisoleringskravene blev opfyldt ved et tyndt isoleringslag. For at sikre blandt andet kraftoverførelsen i konstruktionen blev isoleringstykkelsen yderligere reduceret i store områder. De herved fremkomne kuldebroer kunne give anledning til misfavninger af den indvendige overfladebehandling. Da de to betonskiver har nogenlunde samme damptæthed, kunne der være en vis fare for kondens på den ydre skives inderside, hvorfor det ansås for nødvendigt at ventilere isolationslaget udad gennem den vandrette fuge. Den ydre skive blev fastholdes til den indre skive ved korrosionsfaste forbindelser.

Forholdene omkring brand- og lydisolering for betonsandwichelementer blev opfattet som værende "automatisk" opfyldt. For at imødekomme sikkerhedsproblemer under brand skulle typen af den anvendte isolering overvejes. I visse tilfælde blev det anbefalet at benytte en ubrandbar isoleringskvalitet langs et betonelements kant som en billig foranstaltning mod spredning af brand. Facaden blev anset for at være lydtæt sammenlignet med vinduerne, og da den indvendige skive var tung, ville flangetransmissionen nok ikke være større end den, andre vægge ville give.

Ved montage og fugning mente Munch-Petersen, at fugen måtte udformes således at en simpel og hurtig anbringelse af elementet kunne foretages med en simpel udførelse af fugning samt udstøbning. Fuger skulle udformes således at de kunne repareres, da visse fugematerialer skal vedligeholdes eller udskiftes efter en årrække. Da enhver samlingsdetalje er baseret på korrekt udførelse er udførelsesfejl altid en mulighed, der må tages i betragtning.
Figur B1 viser samlingsdetalje af Munch-Petersen. For os i dag er det bemærkelsesværdigt at det er forstøbningen der er bærende og at samlingen har store arealer med en reduceret isoleringstykkelse.



Figur B1. *Lodret snit i facade af J. F. Munch-Petersen (1960).*

Rockwool-strimlerne sikrer vindtætheden og vandtætheden sikres af overlapning mellem forstøbningerne. En vandret fuge med "overlapning" er kun vandtæt, hvis sprækken mellem de to forstøbninger er bred nok til, at kapillarsugning ikke kan forekomme, samtidig med at den er høj nok til at vand, som løber ind i fugen, ikke kan presses ind i konstruktionen.

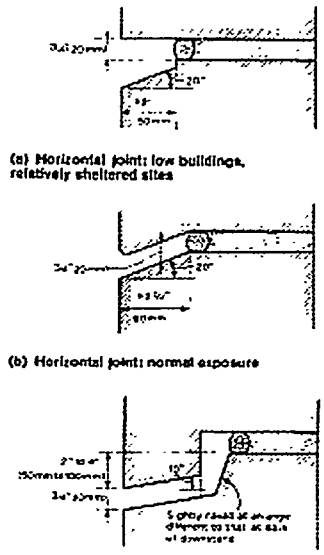
Ved CIB-symposiet med titlen "Weathertight joints for walls", afholdt i Oslo september 1967, fremhævede G. K. Garden i "The problem of achieving weathertight joints" at indtrængende vand resulterede i store problemer. Antallet af samlingsdetaljer som var forsøgt anvendt for at forhindre eller minimere indtrængningen af vand afspejlede problemets størrelse. I 1967 ansås der i praksis at være to muligheder for at udforme vægge og samlinger som kunne kontrollere indtrængningen af vand. Den ene mulighed var at lade facadematerialerne overlappe hinanden, den anden var at forsøge at eliminere alle åbninger som kunne lade vand trænge ind i konstrukionen. I forsøget på at forhindre indtrængningen af vand blev anvendelsen af overlappende facadeløsninger foretrukket. Systemer med overlappende facader løste dog ikke problemer med luftlækager hvorfor det ansås for nødvendigt at tilføje yderligere et luftspærrende lag.

Regns indtrængningsmekanismer blev på samme konference ligeledes diskuteret af Ø. Birkeland. Kapilarkræfter, diffusion, tyngdekraft og vind blev nævnt som de hovedkræfter og mekanismer der var i stand til at transporterer vand i form af regn ind i vore konstruktioner. Under forudsætning af at differenstrykket over ydrevæggen var nul antog Birkeland at kapilarkræfter var uden betydning i det tilfælde hvor åbningen af en samling var større end 0,5 mm. Birkeland fremhævede ligeledes at tyngdekraften uden påvirkning fra et differenstryk over ydrevæggen kunne resultere i, at vand løb ind bag facadebeklædningen. Vand der løb ned ad facaden kunne således ramme den nedre del af fugen og derpå trænge ind eller gennem samlingen hvis åbningen var tilstrækkelig. Man kunne nok også forestille sig at mekanismen kunne forekomme for fuger i lodret plan. For samlinger med mindre åbning var tyngdekraftens indflydelse på vandindtrængningen af mindre betydning. Derimod anså Birkeland vindtryk for den hyppigste årsag til vandindtrængning gennem en facadebeklædning. Vand som løb ned over en facade ville være i stand til at danne en vandfilm over samlinger. Et lufttryk introducerede derpå et differenstryk over facadebeklædningen og pressede derved vand fra vandfilmen på ydersiden gennem samlingen. Hvis åbningen af samlingen var

tilstrækkelig stor i forhold til mængden af det nedløbende vand ville vandfilmen brydes og differenstrykket udlignes. Derpå ville differenstrykket bygges op på ny. Hvis samlingen var tilstrækkelig snæver, var det muligt at vandtilstrømningen kunne danne en konstant vandstrøm ind i fugen. Hvis facadebeklædningen var ventileret således at åbningen ikke kunne lukkes med vandfilm, ville der ikke opstå et differenstryk over facadebeklædningen og vand kunne ikke presses gennem ydervæggen. Laboratorieafprøvninger af Birkeland viste at hvis et vindtryk kunne påvirke en vandfilm over en samling, var vindtrykket den væsentligste årsag til vandindtrængningen. Disse overvejelser omkring en vandstrøm langs facaden har resulteret i at overlapningens højde tidligt blev sat lig vindtrykket, 0,8 kN/m^2 = 80 mm vandsøjle, ud fra den betragtningen at vindtrykket kunne presse en sammenhængende vandfilm 80 mm op i en fuge.

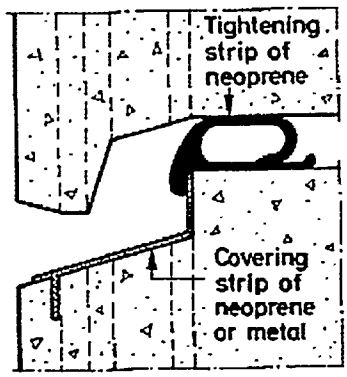
Imidlertid mener Munch-Petersen at en vandret fuge er lang i forhold til sin bredde, og da den er ventileret, er der ingen betydende trykdifferens (med mindre hele fugen er dækket af vandfilm, hvad der forekommer mindre sandsynligt på en normal facade). Erfaringerne synes at vise, at en højde på 5 cm er tilstrækkelig, (Munch-Petersen. "Facadeelementer" 1979).

Building Research Station, digest 85 (second series) 1967 har ligeledes beskrevet vandrette samlinger. Samlingerne er vist på figur B2. Her har målinger af mængden af vand som kommer gennem vandrette samlinger tydeligt vist behovet for opadhældende fuger mod isolering og fugebånd for at forhindre vandindtrængning. Placeringen af lufttætte fugebånd i vandrette fuger mod isolering er vist. Tre forskellige løsninger foreslås. Forsøg viste at kun en lille forbedring blev opnået ved at lade fugen have en effektiv højde over 50 mm. undtagen hvis fugebåndet ikke var effektivt eller var udsat for hård påvirkning. I sådanne tilfælde var det nødvendigt med en effektiv fugehøjde på op til 100 mm.



Figur B2. *Vandrette samlinger, Building Research Station, digest 85 (second series), (1967).*

Forslag fra 1967 til samling af vægge under norske klimaforhold er vist på figur B3.



Figur B3. *Vandret samling, A. S. Byggtjeneste (The Norwegian Building Center) in connection with the CIB Symposium on Weathertight joints for walls, September 1967 in Oslo.*

Hæl-tå løsning som den anvendes i dag

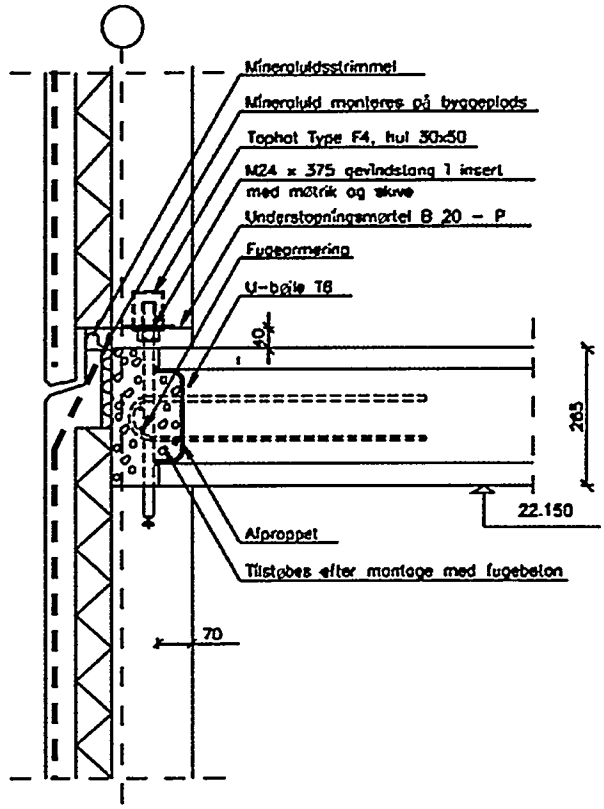
En stor del af de overvejelser, der blev foretaget ved udviklingen af de første sandwich-elementer førte til løsninger, der stadig anvendes selvom baggrunden efterhånden har fortabt sig. De anvendte løsninger bærer præg af at være meget konservative og mindre tilpasset det enkelte byggeri. Det er stort set kun armeringsmængden der er forskellig i et 3-etagers og et 20-etagers hus, selvom klimapåvirkningerne også er meget forskellige.

Figur B4 viser en vandret samling som den typisk er udformet i dag (*Betonelement bog bind 4*). Ved udformningen af betonsandwichelementet er der taget højde for temperaturrelaterede deformationer. Den bærende konstruktion er placeret inden for isoleringen for derved at undgå større temperaturbevægelser. Fugen er åben, ventilerer isoleringen og forhindrer vandindtrængning til isoleringen. Da der er overlap mellem forstøbningen på det øvre facadeelement (tå) og det nedre facadeelement (hæl). Isoleringens tykkelsen er reduceret på det nedre element for at give plads til hælen. Samlingen vanskeliggør udstøbningen mellem det øvre og det nedre element og giver risiko for beskadigelse af især hælen under montagen.

Fugen er vandtæt på grund af overlap mellem forstøbningen på øverste og nederste facade-element. Neoprenstrimlen i den lodrette fuge er vist punkteret. Fugen er åben, ventilerer isoleringen, forhindrer vandindtrængning til isoleringen og eliminerer vindtrykdifferensen over neoprenen i den lodrette fuge. Samlingen har en svaghed i og med at neoprenstrimlen i de lodrette fuger ikke umiddelbart kan sikres overlap ved de vandrette fuger.

Det er ikke nødvendigt at udføre de vandrette fuger med hæl-tå løsningen med 70 – 80 mm overlap, se bilag C og afsnit 8.1.2 vedrørende forsøg.

To forbedrede løsninger er skitseret i figur 21 og figur 22 i nærværende rapport. Her er princippet med overlap mellem facadeelementernes forstøbning bevaret. Den vandrette fuge er åben og kan benyttes til ventilation af isoleringen og af fugens indre hulrum. Fugen må være så bred, at der ikke kan opstå kapillarsugning, men dette krav opfyldes normalt af sig selv på grund af, at fugen også skal være bred nok til at optage produktions- og montageunøjagtigheder i facader og råhus. Samlingen mellem elementerne giver således mindre risiko for beskadigelse af det nedre element under monteringen. Ligeledes er den nedre kant af den ydre skive løftet i forhold til bagvæggens underside.



Figur B4. *Bærende sandwich gavlvæg. Den indre betonskive er beskyttet mod temperatur-svingninger. Den ydre skive er ophængt således i rustfri forankringer, at den frit kan følge temperaturbevægelserne. Betonelement bog bind 4.*

Litteratur

Munch-Petersen J. F., "Samlingsproblemer i Montagebyggeri", SBI-rapport 38, 1960.

Munch-Petersen J. F., "Facadeelementer", 3. Reviderede udgave, Forelæsningsnotet nr. 55, Instituttet for Husbygning, 1979.

CIB International Council for Building Research, Studies and Documentation, Symposium on "Weathertight joints for walls", Oslo, september 1967.

Byggtjeneste A. S., "Weathertight joints for walls under Norwegian climatic conditions", (The Norwegian Building Center) in connection with the CIB Symposium on Weathertight joints for walls, Oslo, September 1967.

Building Research Station, digest 85 (second series), " Joints between concrete wall panels: Open drained joints", 1967.

Nissen H., "Modul og Montagebyggeri", 3. udgave, Polyteknisk Forlag, 1975.

Bilag C

Vandpåvirkninger af vandrette fuger mellem betonsandwichelementer

Jørgen Munch-Andersen & Torben Valdbjørn Rasmussen, SBI

Højden af det hidtil anvendte overlap i vandrette fuger er baseret på nogle særdeles konservative betragtninger som det vil fremgå af det følgende.

Betingelsen for at der kan løbe vand ind i en åben, vandret fuge mellem to betonsandwich-elementers forstøbninger er at

1. der er et drivtryk i form af en trykdifferens mellem fugens udvendige og indvendige del
2. der er tilstrækkeligt vand til at fylde fugen

(Det forudsættes at fugen er tilstrækkelig bred til at der ikke kan ske kapillarsugning)

Hidtil er tætheden sikret ved at gøre overlappet i hæl-tå samlingen så højt at det ydre vindtryk ikke kan presse vand gennem samlingen Det normale overlap på 70 mm svarer til en tryk-difference på 0,7 kN/m^2, en værdi som det ydre vindtryk kun sjældent overstiger.

Hvis vindtrykket er konstant vil der ikke kunne dannes differenstryk over en åben fuge, når den indvendige og den udvendige del er ventileret til samme facade. (Hvis bunden af fugen ikke er vindtæt vil der kunne dannes et differenstryk, men det vil være meget beskedent sammenlignet med det ydre vindtryk).

Ved vindstød kan man forestille sig at der kan opbygges et differenstryk hvis der er tilstrækkeligt med vand til stede i fugen til at afbryde forbindelsen mellem den indvendige og den udvendige del af fugen over en længere strækning, f.eks. i form af en vandfilm foran fugen.

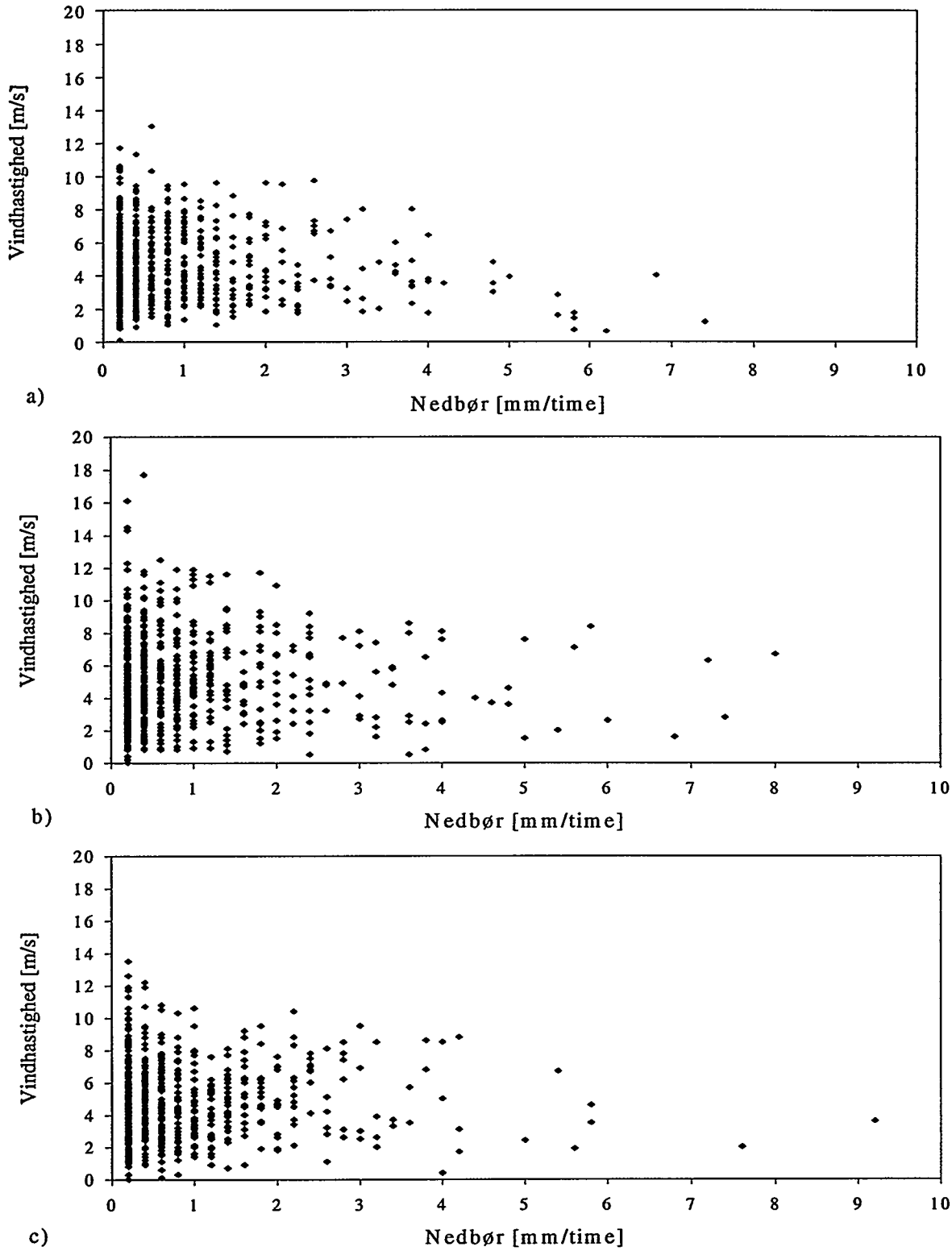
Trykket i den indvendige del vil da nærme sig middelvindtrykket og drivtrykket vil da højst kunne blive forskellen på middelvindtrykket og trykket i vindstødet. Da fugen har et betydeligt volumen skal vindstødet virke i en vis tid for at kunne fylde fugen med vand. Hvis man forudsætter at der er tilstrækkelig vand til rådighed kan man opstille en differentialligning til bestemmelse af vandsøjlehøjden i fugen som funktion af tiden. Det viser sig at vandhøjden praktisk taget vil være propertional med trykdifferencen, selv for meget hurtige variationer i trykket. Inertien af vandsøjlen er altså uden betydning.

Målte vind- og vandpåvirkninger

Den faktiske vandpåvirkning afhænger betydeligt af den vindhastighed, der optræder under et regnvejr. Data for sammenhørende værdier af nedbør og vindhastighed er etableret i forbindelse med etablering af data til vurdering af slagregn. Arbejdet er beskrevet i Krag (1997).

Dataene består af timeværdier for nedbøren målt i Virum og middelværdien af vindhastigheden de sidste 10 minutter af hver time målt i Sjælsmark, ca 10 km nord for Virum. Datasættet dækker årene 1991-1993.

Figur C1 a) - c) viser sammenhørende værdier for nedbør og vindhastighed for hvert af de tre år. Det ses dels at nedbørsintensiteten kun overstiger 7 mm/time nogle få gange pr år og aldrig 10 mm/time. Samtidig ses at intensiteten er meget lille når høje vindhastigheder forekommer.

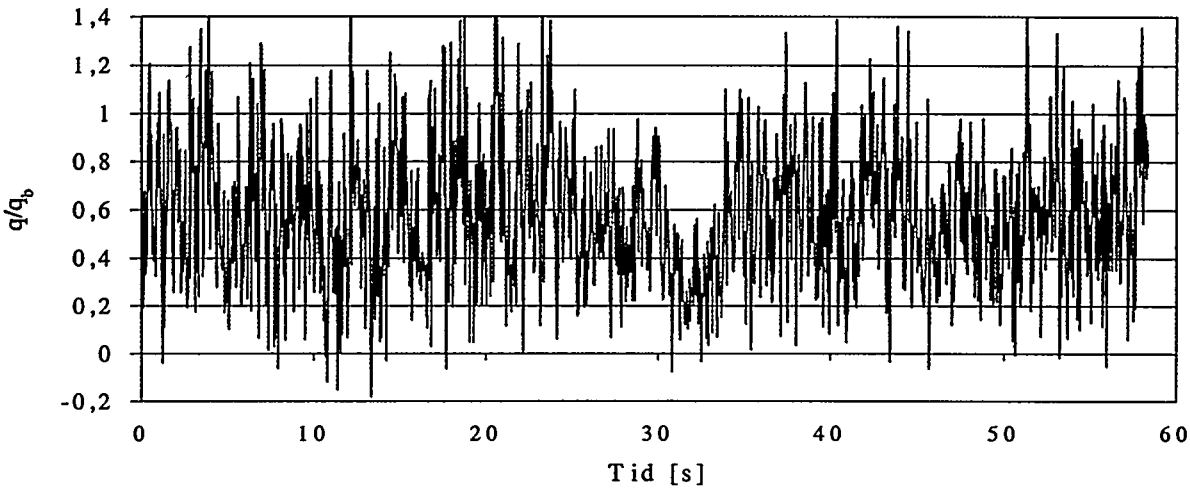


Figur C1. *Sammenhæng mellem nedbørsintensiteten og middelvindhastigheden for 1991, 1992 og 1993.*

Disse maksimale vindhastigheder er lidt lavere end de maksimale vindhastigheder der er registreret ved Risø og på Sprogø de pågældende år, når der korrigeres til sammenlignelige terrænforhold (10 m over terræn med ruheden 0,05 m). Vindhastigheden på mere udsatte steder vil derfor være lidt højere, men det vil fortsat gælde at nedbørsintensiteten er lille når vindhastigheden er høj.

Ifølge Brixen (1964) viser norske målinger at vandstrømmen nederst på et højhus kan komme op på 60 – 70 l/m/time.

Det faktiske vindtryk q på facaden kan bestemmes som produktet af basisvindtrykket q_b og en faktor, der beskriver fluktuationerne i vinden og indflydelsen af huset på vinden. Basisvindtrykket bestemmes af middelvindhastigheden. Fluktuationerne kan bestemmes ved vindtunnelforsøg. Et eksempel på fluktuationerne i et minut er vist i figur C2. Det ses at trykket fluktuere ganske kraftigt. Specielt ses at det flere gange i løbet af et minut er nær nul.

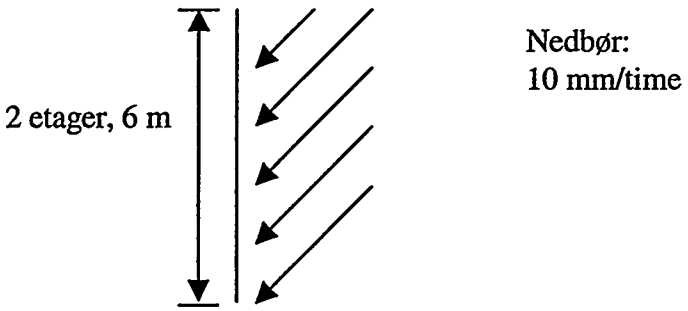


Figur C2. *Typisk forløb af vindlastens fluktuation nær en bygnings øvre hjørne. Vindlasten q er normeret med basisvindtrykket q_b. (DS 410, 1998, s. 42).*

Kriterier for forsøg med vandindtrængning i facader er behandlet af E. C. C. Choi i "Criteria for water penetration testing" 1998. I disse undersøgelser er sandsynligheden for kombinationer af nedbør og vind i Sidney, Australien vist. Artiklen indeholder ligeledes målinger af hvorledes vind og regn påvirker en bygning. Chois model beregner intensiteten af den vindbårne regn på en facade som funktion af den opstrømmende vindhastighed og regnens intensitet. Efterfølgende beregnes den aktuelle vindbårne regn på en facade og den statistiske sandsynlighed for en gentagelse. Målinger af vindbårne regn på en facade har vist at øverste etage ved hjørner er mest udsat medens vandpåvirkningen på resten af bygningen er beskeden. Bygninger som er smalle i relation til højde/længdeforhold er mest påvirkede. Choi fremhæver vandindtrængning som et vedligeholdelseskriterium og skal ikke tolkes så konsekvent som kriteriet for vindbelastningen på en bygning. Til forsøg foreslås en hvert 10. år gentagelsesperiode med en regnbelastning på 2,43 liter pr. minut pr. kvadratmeter 145,8 mm/time og et differens tryk på 410 Pa (4,1 mb). Dette er meget højt for danske forhold, hvor en nedbørsmængde på 10 - 20 mm/time er mere sandsynlig og dog at betragte som et kraftigt regnskyl.

Realistisk vandpåvirkning af facade

Hvilken vandmængde der strømmer ned over en facade kan estimeres ved at antage at en nedbørsmængde på 10 mm/time, svarende til et ret kraftigt regnvejr, rammer en facade under 45°. Der betragtes en fuge i en facade med to 3 m høje facade-elementer ovenover. Regneeksemplet er vist i figur C3.



Figur C3. *Regnpåvirkning af facade.*

Mængden af vand der passerer fugen pr. længdeenhed er:

$$(6000 \text{ mm} * 10 \text{ mm})/3600 \text{ s} = 16{,}67 \text{ mm}^2/\text{s}.$$

Dette er det samme som 60 l/m/time og svarer derfor til de nordiske målinger for et højhus. Med denne vandmængde er det usandsynligt at fugen kan fyldes med vand idet fugens tværsnitsareal i en 80 mm forstøbning er mindst $(15 * 80)$ mm^2 = 1200 mm^2 således at tiden der medgår til at fylde fugen med vand bliver 1200 mm^2/16,678 mm^2/s = 72 s.

For at fylde en fuge med vand skal der altså over ca. 1 minut opbygges en trykdifferens der er større end overlappet. Den trykdifferens der kan opretholdes i så lang tid er helt forsvindende, alene fordi det ydre tryk med små mellemrum vil nærme sig nul, se figur C2, således at vandsøjlehøjden også er omtrent nul jf. ovenstående.

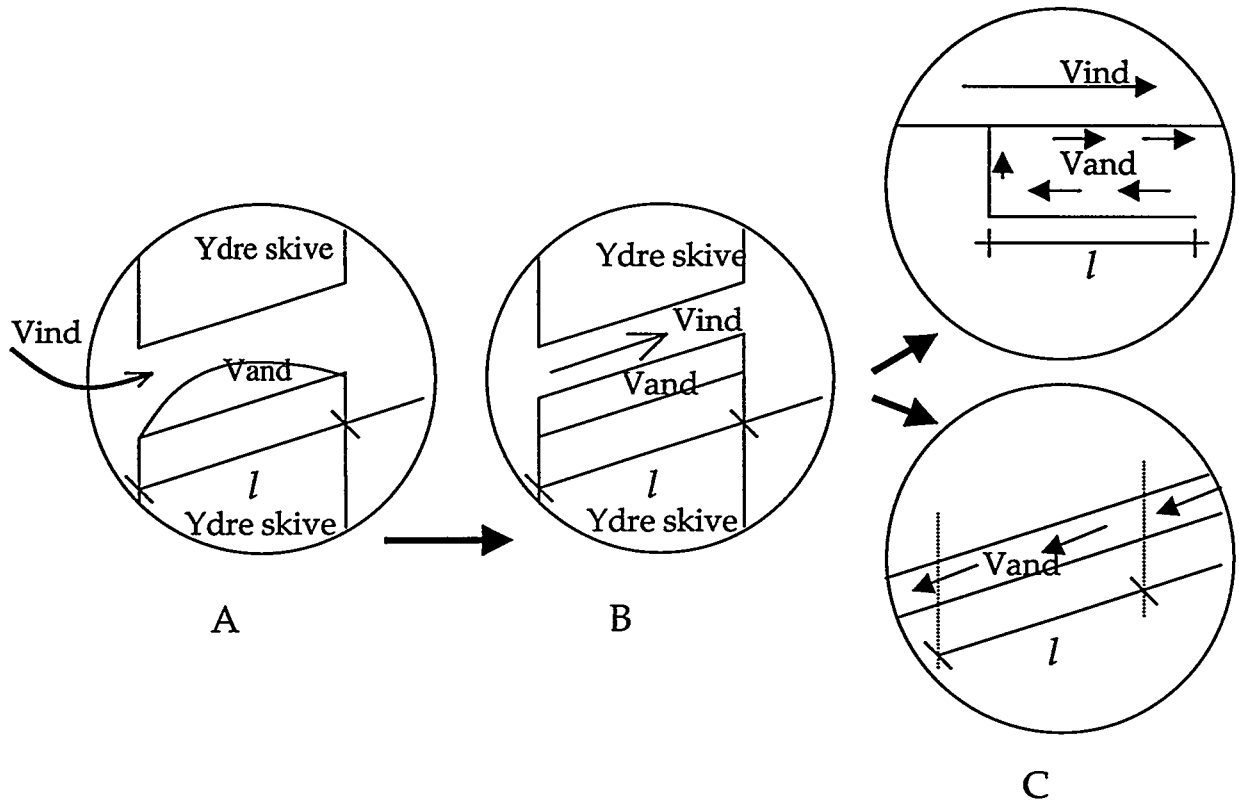
Delvist vandfyldt fuge

En anden mulighed for en vandstrøm ind i isoleringen er at et vandlag i bunden af fugen trækkes ind i isoleringen af vinden der strømmer langs den frie overflade som vist på figur C4. Vindstrømmen gennem fugen afhænger af den trykdifferens vindpåvirkningen kan skabe over fugen.

For at få en fornemmelse af risikoen for vandindtrængning i isoleringen er der foretaget en række beregninger. Disse indeholder dels den udadgående vandstrømning i en vandfilm med en given tykkelse forårsaget af tyngdekraften, dels den indadgående vandstrømning forårsaget af luftstrømningen langs vandfilmens overflade. Kun hvis den indadgående vandstrøm bliver større end den udadgående vil der være risiko for at vand kan drives ind i isoleringen.

For beregningerne antages en kanalstrømning langs en ru bund med konstant hældning. Vandfilmen antages at have en konstant tykkelse, der er mindre end den vandrette fuges højde (vandfilmen fylder ikke fugen ud). Beregningerne er foretaget for et betondsandwichelement med bredden 2,4 meter og højden 3,0 meter. Højden af den vandrette fuge mellem to betonsandwichelementer er sat til 15 mm.

Simplificering af problemstillingen
Det opstillede strømningsproblem er meget komplekst og er derfor simplificeret. I det konkrete tilfælde er problemstillingen om en opstuvet vandmængde i en fuge kan opretholdes og føres over den øvre kant med en given vindbelastning vist i figur C4 (A). Problemstillingen simplificeres i to trin. I første trin simplificeres vandopstuvningen til at have en geometrisk udformning hvor vandspejlet betragtes som værende plant og vandlagets tykkelse som værende konstant over forstøbningen. Ligeledes antages vindpåvirkningen at være konstant og orienteret parallelt med vandoverfladen, figur C4 (B). I andet trin opdeles problemstillingen i to tilfælde henholdsvis som vindpåvirkningen af vandoverfladen og vandets strømning forårsaget af bundhældningen. De to tilfælde betragtes hver for sig. For vindpåvirkningen bestemmes hastigheden af vandpartiklerne i en vandoverflade påvirket af en parallel vindstrøm. For vandets strømningsprofil som funktion af bundhældningen og ruheden bestemmes hastigheden af vandpartiklerne i vandoverfladen, figur C4 (C).



Figur C4. *Skematisk simplificering af problemstilling.*

Beregnet vandindtrængning i vandret fuge
Bundens ruhed k er sat til 1 mm. Luftens massefylde er sat lig 1,28 kg/m^3 og formfaktoren, c for tangential vind er som for en jævn overflade lig 0,006, se DS 410 side 59 (1998). Beregningerne er udført efter teori af Pedersen (1988) og Fredsøe (1988). Tabel C1 viser resultaterne fra de gennemførte beregninger. Resultaterne er opdelt i de to beregnede tilfælde. Tabellen viser hastigheden af øvre vandlag påvirket af henholdsvis kanalstrømning og vind. Hastigheden af øvre vandlag for forskellige hældninger af forstøbningen forårsaget af kanalstrømningen er udadgående. Hastigheden af øvre vandlag forårsaget af vind for forskellige hældninger af forstøbningen er indadgående.

Med de anvendte forudsætninger ses det af tabel C1, at det ikke er muligt for den indtrængende luft gennem den vandrette fuge at vende en eventuel udadgående vandstrøm. Selv for et luftskifte på 200 l/s vil den udadgående vandhastighed af øvre vandlag være betydelig større end den indadgående. Tilsvarende forhold ses i de øvrige resultater. Disse beregninger med de anførte forudsætninger viser således at vand ikke kan løbe over forstøbningen alene drevet af vind.

Tykkelse af vandlag [m]	Hastighed i [m/s] af øvre vandlag med hældningen, k = 1 mm			Max hastighed i [m/s] af øverste vandlag for luftskifte på, c = 0,006		
	30°	26,5°	15°	200 l/s	100 l/s	50 l/s
0,001	0,65	0,60	0,44	0,19	0,10	0,05
0,002	1,10	1,02	0,75	0,19	0,09	0,05
0,003	1,48	1,38	1,01	0,19	0,09	0,05
0,004	1,82	1,69	1,24	0,19	0,10	0,05
0,005	2,13	1,98	1,45	0,20	0,10	0,05
0,006	2,41	2,25	1,64	0,22	0,11	0,05
0,007	2,68	2,50	1,83	0,24	0,12	0,06
0,008	2,94	2,73	2,00	0,26	0,13	0,07
0,009	3,18	2,96	2,17	0,30	0,15	0,07
0,01	3,42	3,18	2,33	0,35	0,17	0,09

Tabel C1. *Vind og vand hastigheder til forskellige vandlagstykkelser.*

Resultaterne i tabel C1 skal ses i forhold til de simplificeringer der er foretaget. Specielt er simplificeringen af vandlagets geometriske udformning og ensartede strømningsprofil langs bunden en relativ grov simplificering. Umiddelbart virker den betragtede hastighed af øvre vandlag højere end forventet, hvilket stemmer overens med at randbetingelsen for ensformig kanalstrømning omkring den øvre kant ikke er opfyldt for det betragtede strømningsproblem. Det vides dog ikke hvor god en sådan tilnærmelse er, da forholdet mellem vandlagets tykkelse, bundens hældning samt ruhed og afstand fra øvre kant ikke kendes, førend forudsætningen for ensformig kanalstrømning er opfyldt. Endvidere vil vandlagets overflade sjældent være plan og uden krusninger.

Litteratur

Brixen J., "Fugeløsninger", Arkitekten nr. 25, 1964.

Choi E. C. C., "Criteria for water penetration testing", Water Leakage Through Building Facades ASTM STP 1314, R. J. Kudder and J. L. Erdly, Eds., American Society for Testing and Materials, 1998.

Pedersen, F. Bo, (1988), "Hydraulik for bygningsingeniører", Den private ingeniørfond, Danmarks Tekniske Højskole.

Fredsøe J., (1988), "Hydrodynamik for bygningsingeniører", Noter til strømningsmekanik 2, 5705, ISVA, Danmarks Tekniske Højskole.

Krag M., "Test Reference Case – Copenhagen, Department of Building and Energy, Technical University of Denmark, (1997).