

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **132**

EGIL BORCHERSEN

**MINERALULDBASEREDE
SANDWICHELEMENTER
HOVEDRAPPORT**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1979

MINERALULDBASEREDE

SANDWICHELEMENTER

HOVEDRAPPORT

EGIL BORCHERSEN

TEKNOLOGIRÅDSPROJEKT 1976 - 1978

Projektdeltagere

Cowiconsult Rådgivende Ingeniører AS

Instituttet for Husbygning DTH

Rockwool A/S

Statens Byggeforskningsinstitut SBI

Superfos Glasuld a/s

Rapport 132 · Instituttet for Husbygning · 1978

OVERSIGT OVER RAPPORTER* UDARBEJDET I FORBINDELSE MED TR-PROJEKTET

HOVEDRAPPORT

IFH-Rapport 132	Egil Borchersen	Mineraluldbaserede sandwichelementer <u>Hovedrapport. 1978</u>
-----------------	-----------------	---

DELRAPPORTER

IFH-Rapport 126	Lauritz Rasmussen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Vægelementer under brandpåvirkning. 1978.
IFH-Rapport 127	Lauritz Rasmussen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Materialeprøvning af krydsfinér. 1978.
IFH-Rapport 128	Lauritz Rasmussen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Materialeprøvning af mineraluld. 1978.
IFH-Rapport 129	Lauritz Rasmussen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Bøjningsforsøg med korttidslast og langtidslast. 1978.
IFH-Rapport 130	Egil Borchersen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Korttids-bøjningsforsøg med dækele- menter med kantskot. 1978.
IFH-Rapport 131	Egil Borchersen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Afstivende vægelementer. 1978.
SBI-Rapport 114	Asta Nicolajsen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Laboratorieforsøg til bedømmelse af de fugttekniske egenskaber. 1978.
SBI-Rapport 115	Uwe Lohse	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Fugtophobning i væg- og tagelementer udsat for det naturlige klima. 1978.
Cowi-publ. 314	Tommy Bunch-Nielsen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. k-værdimålinger. 1978.
Cowi-publ. 315	Tommy Bunch-Nielsen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Produktionsteknik. 1978.
Cowi-publ. 316	Leif B. Jørgensen Tommy Bunch-Nielsen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Økonomiundersøgelser. 1978.
Cowi-publ. 317	Tommy Bunch-Nielsen Knud Prebensen	Mineraluldbaserede sandwichelementer. Byggeteknik. 1978.

IFH-Rapporter kan rekvireres fra:

Instituttet for Husbygning, Bygning 118
Danmarks tekniske Højskole, DK-2800 Lyngby (02)88 35 11

SBI-Rapporter kan rekvireres fra:

Statens Byggeforskningsinstitut, Postboks 119,
DK-2970 Hørsholm (02) 86 55 33.

COWI-publikationer kan rekvireres fra:

Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører A/S,
Teknikerbyen 45, DK-2830 Virum (02) 85 73 11

*Udover de i denne oversigt nævnte delrapporter er der ved udarbejdelsen af hovedrapporten gjort brug af andre referencer, som er omtalt i hovedrapportens referenceliste.

FORORD

Denne rapport sammenfatter resultaterne af en række undersøgelser af mineraluld-baserede sandwichelementer specielt med henblik på opnåelse af en godkendelse fra Boligministeriet som bærende væg-, tag- og dækelement (mk-godkendelse).

Disse undersøgelser er nødvendiggjort af, at der er tale om en ny konstruktionstype, som ikke er omfattet af gældende konstruktionsnormer (jvf. [1] §5.2, stk. 3).

Rapporten henvender sig primært til projekterende og udførende teknikere samt producenter, og det er søgt så kortfattet som muligt at omtale alle relevante forhold, der skal tages i betragtning ved anvendelse af disse elementer i byggeriet.

De enkelte undersøgelser er nærmere beskrevet i en række delrapporter (jfr. oversigten på forrige side), hvortil særligt interesserede henvises.

Undersøgelserne har været forestået af en gruppe bestående af repræsentanter fra:

Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører AS
Institutet for Husbygning, DTH
A/S Rockwool
Statens Byggeforskningsinstitut
Superfos Glasuld a/s

Projektet er blevet støttet af Teknologirådet med en bevilling på kr. 725.000 fordelt over perioden 1976-1978.

Desuden har nedenstående firmaer bidraget til projektet med leverancer og teknisk bistand:

Tåsinge Træ A/S
Oversøisk Træimport A/S
Dansk Eternit-Fabrik A/S

Endelig har en række bygherrer, som et led i undersøgelserne, ladet mineraluld-baserede sandwichelementer indgå i en del bygninger. Dette har muliggjort, at elementernes opførsel uden for laboratorierne også har kunnet undersøges.

Lyngby, september 1979

Egil Borchersen

R E S U M É

Mineraluldbaserede sandwichelementer er sandwichelementer med en kerne af tværstillede mineraluldlameller.

Under projekteringen af DTH's Nulenergi-hus viste forsøg, at mineraluldbaserede sandwichelementer med limede krydsfinér- og spånpladeflanger tilsyneladende havde tilstrækkelig styrke og stivhed til at kunne anvendes som bærende konstruktion i 1- og 2-etagers huse.

I denne rapport sammenfattes resultaterne af et Teknologirådsstøttet projekt, som havde til formål at gennemføre undersøgelser tilstrækkelig omfattende til at opnå en boligministeriel godkendelse af mineraluldbaserede sandwichelementer som bærende væg-, tag- og dækelementer.

Projektet har bl.a. omfattet styrke- og stivhedsundersøgelser af mineraluld under varierende klimaforhold, styrkeforsøg med dækelementer, krybningsforsøg med mineraluld og med dækelementer, brandtekniske forsøg med vægelementer og byggetekniske undersøgelser. De enkelte undersøgelser er beskrevet i en række delrapporter og resumeret i kapitel 4 i denne rapport. På grundlag af disse delundersøgelser er der opstillet beregningsprincipper i kapitel 5. Rapportens øvrige indhold er en beskrivelse af sandwichelementet i kapitel 2, en kortfattet oversigt over geometri, materialer og ydeevne i kapitel 3 og lidt om byggeteknik i kapitel 6.

Projektet er gennemført i samarbejde mellem Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører AS, Instituttet for Husbygning, DTH, A/S Rockwool, Statens Byggeforskningsinstitut og Superfos Glasuld a/s.

S U M M A R Y

Mineral-wool sandwich-elements are sandwich-elements with a core of mineral-wool lamellae. In the lamellae the fibre direction is perpendicular to the plane of the faces.

During the preliminary work on the Zero-Energy-House at the Technical University of Denmark tests showed that sandwich-elements based on mineral-wool with glued plywood- and chipboard-flanges apparently possessed sufficient strength and rigidity for the load-bearing construction in 1- and 2-storey houses.

This report summarizes the results from a research project granted by The Council of Technology (Teknologirådet). The aim of the project was to carry out investigations extensive enough to obtain approval from The Ministry of Housing. This approval is necessary when using the elements as bearing elements.

The investigations have included durability, strength and rigidity of mineral wool, deck-elements and wall-elements. Several parameters have been varied, e.g. geometry, climatic conditions, loading level and duration. Furthermore, fire-tests have been carried out and design aspects and building techniques investigated.

As a result of this a series of reports have been published. These reports are summarized in Chapter 4. The remaining contents of this report is a description of the sandwich element (Chapter 2), a brief outline of geometry, materials and performance (Chapter 3), calculation of load-carrying capacity (Chapter 5) and design aspects (Chapter 6).

The project has been carried out in a co-operation among Cowiconsult, Consulting Engineers Ltd., The Institute of Building Design, Technical University of Denmark, Rockwool Ltd., The Danish Building Research Institute, and Superfos Glasuld Ltd.

INDHOLDSFORTEGNELSE

Side

FORORD	2
RESUMÉ	3
SUMMARY	4
INDHOLDSFORTEGNELSE	5
SYMBOLLISTE	8
<u>1. INDLEDNING</u>	9
<u>1.1 Mineraluldbaserede sandwichelementer</u>	9
<u>1.2 Baggrund</u>	10
<u>1.3 Projektsamarbejdet</u>	10
<u>1.4 Rapportens indhold</u>	12
<u>2. SANDWICHELEMENTET</u>	13
<u>2.1 Det rene sandwichelement</u>	13
2.1.1 Kernemateriale	15
2.1.2 Flangemateriale	16
2.1.3 Limforbindelsen	17
2.1.4 Produktion af elementer	18
<u>2.2 Varianter</u>	19
2.2.1 Dækelement-varianter	20
2.2.2 Vægelement-varianter	22
<u>3. GENEREL OVERSIGT</u>	24
<u>3.1 Elementgeometri og materialer</u>	24
<u>3.2 Ydeevne</u>	24
3.2.1 Styrke og stivhed	24
3.2.2 Brand	25
3.2.3 Fugt	25
3.2.4 Lyd	25
3.2.5 Varmeisolering	25
<u>3.3 Økonomi</u>	26
<u>3.4 Godkendelser</u>	26

	Side
<u>4. DOKUMENTATION FOR YDEEVNE</u>	27
<u>4.1 Styrke- og stivhedsegenskaber</u>	27
4.1.1 Flangematerialer	27
4.1.2 Mineraluld	27
4.1.2.1 Korttidsbelastet ved 20°C og 65%RF	30
4.1.2.2 Langtidsbelastet ved 20°C og 65%RF	32
4.1.2.3 Vekslede belastet ved 20°C og 65%RF	32
4.1.2.4 Korttidsbelastet efter variation af temperatur og fugtighed	33
4.1.2.5 Sammenfatning af mineraluldens styrke- og stivhedsegenskaber	38
4.1.3 Limforbindelsen	38
4.1.4 Dækelementer	39
4.1.4.1 Korttidsforsøg	40
4.1.4.2 Langtidsforsøg	48
4.1.4.3 Bøjningsforsøg med dækelementer med kantafstivning	51
4.1.5 Vægelementer	54
4.1.5.1 Bærende vægelementer	54
4.1.5.2 Afstivende vægelementer	61
4.1.6 Samlinger	64
<u>4.2 Brandtekniske egenskaber</u>	66
4.2.1 Overfladekrav	67
4.2.2 Brandmodstandsevne	67
4.2.2.1 Dækelementer	68
4.2.2.2 Ikke-bærende vægelementer	69
4.2.2.3 Bærende vægelementer	70
<u>4.3 Fugttekniske egenskaber</u>	71
4.3.1 Fugtphobning	72
4.3.2 Fugtbetingede deformationer	73
4.3.3 Konklusion af fugttekniske undersøgelser	75
<u>4.4 Lydtekniske egenskaber</u>	77
<u>4.5 Varmeisolerende egenskaber</u>	78
<u>5. BEREKNING AF MINERALULDBASEREDE SANDWICHVÆGELEMENTER</u>	80
<u>5.1 Sikkerhedsmetode</u>	80
<u>5.2 Konstruktionsmineraluld</u>	82
5.2.1 Regningsmæssige materialeleværdier	82
<u>5.3 Dimensioneringsdiagrammer</u>	87
5.3.1 Dækelementer med endeskot	87
5.3.1.1 Eksempler på brug af diagrammer	91
5.3.2 Dækelementer med kantafstivning	93
5.3.3 Bærende vægelementer uden kant- og endeskot	93
5.3.4 Bærende vægelementer med kantskot	95

<u>6.</u>	<u>BYGGETEKNIK</u>	96
<u>6.1</u>	<u>Anvendelsesmuligheder</u>	96
<u>6.2</u>	<u>Elementudformning</u>	97
6.2.1	Præferencemål	97
6.2.2	Kantdetaljer	98
6.2.3	Overflader	98
<u>6.3</u>	<u>Samlingsdetaljer</u>	98
6.3.1	Væg-væg-samlinger	99
6.3.2	Væg-fundament-samling	100
<u>7.</u>	<u>REFERENCER</u>	102

SYMBOLLISTE

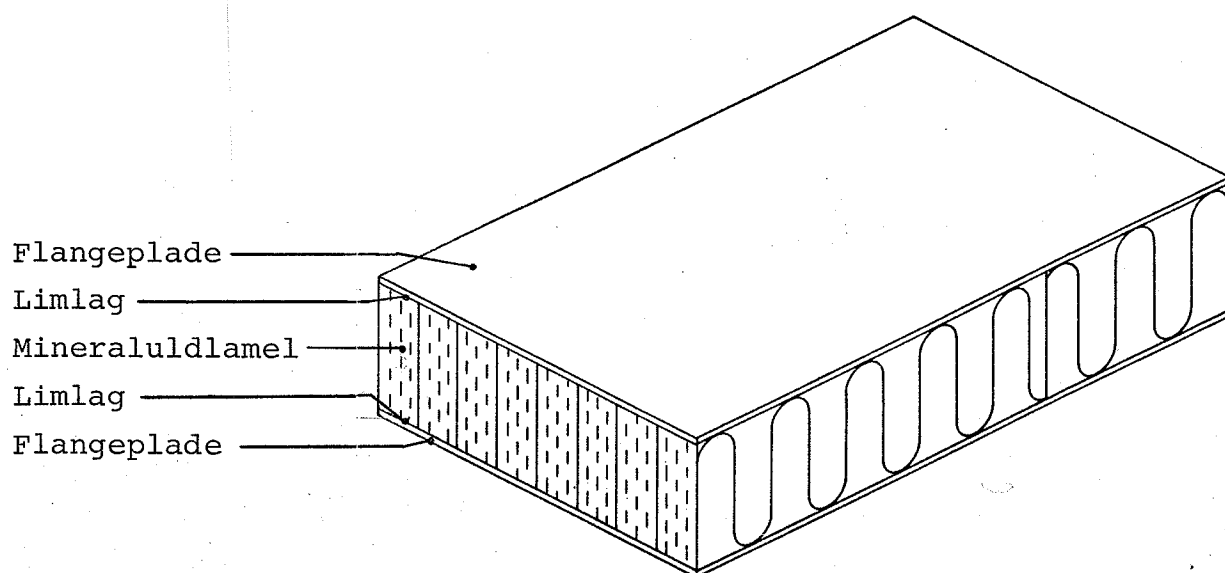
Nedenfor er angivet betydningen af symboler, der er anvendt flere steder i rapporten. For enkelte størrelser er desuden definitionslingens nummer.

A	: Kropsareal	(4-4)
B	: Bøjningsstivhed	(4-5)
b	: Elementbredde	
d	: Afstand fra flangemidte til flangemidte	(4-3)
e	: Lastexcentricitet	
E	: Elasticitetsmodul	
E _c	: Elasticitetsmodul ved trykpåvirkning	
E ₁	: Elasticitetsmodul for flange 1	
E ₂	: Elasticitetsmodul for flange 2	
E _r	: Regningsmæssig elasticitetsmodul	
E _f	: Elasticitetsmodul for flangematerialet	
E _k	: Elasticitetsmodul for kernematerialet	
E _t	: Elasticitetsmodul ved trækpåvirkning	
f _c	: Trykstyrke	
f _{cc}	: Kritisk foldespænding	(4-11)
f _t	: Trækstyrke	
f _v	: Forskydningsstyrke	
f _{tr}	: Regningsmæssig trækstyrke	
G	: Forkortelse for Glasuld	
G	: Forskydningsmodul	
G _r	: Regningsmæssig forskydningsmodul	
k	: Kernetykkelse	
KM	: Konstruktionsmineraluld	
L	: Spændvidde	
M	: 100 mm (Byggemodul)	
p	: Fladelast	
p _u	: Bæreevne	
p _{ur}	: Regningsmæssig bæreevne	
P	: Last (enkeltkraft)	
P _{EG}	: Søjlebæreevne	(4-8)
P _E	: Søjlebæreevne (Euler)	
P _σ	: Søjlebæreevne	(4-9)
P _τ	: Søjlebæreevne	(4-10)
q	: Tværlast (fladelast)	
R	: Forkortelse for Rockwool	
t	: Flangetykkelse	
t ₁	: Tykkelse af flange 1	
t ₂	: Tykkelse af flange 2	
u	: Udbøjning, nedbøjning	

1. INDLEDNING

1.1 MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.

Elementtypen, der behandles i denne rapport, er i princippet opbygget som vist på figur 1.1.

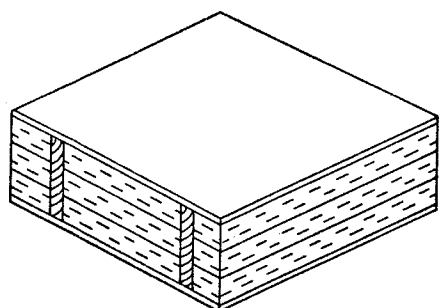


Figur 1.1:

Sandwichelementets opbygning.

Elementet er et plant 15-30 cm tykt sandwichelement med en kerne af mineraluld, hvorpå de to flangeplader er limet.

Flangematerialet kan f.eks. være krydsfinér, men andre flangematerialer kan også anvendes og vil blive omtalt senere. Kernen er opbygget af lameller, udskåret af stive mineraluldplader og tværstillet, hvorved fiberorienteringen bliver vinkleret på flangeplanerne. Ved denne orientering af mineraluldfibre er opnået, at mineralulden udover at isolere også indgår i den bærende konstruktion.



Sammenlignet med et traditionelt stressed-skin-element er kropsafstivningerne af træ erstattet af den mineraluld, der alligevel skal være mellem de to flanger. De øgede krav til isoleringstykkelser (jfr. BR-77 [1]) bevirker, at elementerne får en "kropstykkelse" tilstrækkelig til at opnå fornøden bæreevne.

Elementernes opbygning omtales detaljeret i kapitel 2.

1.2 BAGGRUND

Nul-energihus

Sandwichelementer med denne opbygning blev for første gang anvendt som bærende konstruktion i Nul-energihuset, der blev opført på Danmarks tekniske Højskole i 1974.

Forarbejde

Forarbejdet til det såkaldte "Nul-energi-huselement" var udført af civilingeniørerne Knud Prebensen og Hans Nielsen, Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører AS, som gennem Træfonden havde fået stillet midler til rådighed til udvikling af et let, træbesparende ydervægselement [2].

Sammen med Nul-energihusets projekteringsgruppe fik de gennemført en række forsøg til belysning af elementtypens styrkemæssige og fugttekniske egenskaber og nåede herved frem til en elementopbygning, der kunne anvendes som Nul-energihusets bærende konstruktioner [3] og [35].

Nedsættelse af projektgruppe til videreudvikling af elementtypen

Disse undersøgelser havde dog langt fra været udtømmende, hvorfor der i 1976 på initiativ af Superfos Glasuld og Cowiconsult blev nedsat en projektgruppe med henblik på en videreudvikling af elementtypen.

Teknologirådsbevilling

Med initiativtagerne som ansøgere blev der opnået en bevilling på kr. 725.000 over 2 år fra Teknologirådet til at gennemføre en række undersøgelser tilstrækkeligt omfattende til, at de kunne danne basis for en mk-godkendelse af mineraluld-baserede sandwichelementer som bærende væg-, tag- og dækelementer.

1.3 PROJEKTSAMARBEJDET

Teknisk styregruppe

Projektsamarbejdet er blevet styret af en teknisk og en administrativ styregruppe.

Projektets tekniske styregruppe fik følgende sammensætning:

- Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører AS repræsenteret ved:

Civilingeniør Knud Prebensen
Civilingeniør Tommy Bunch-Nielsen

- Instituttet for Husbygning, DTH repræsenteret ved:

Lektor, lic.techn., civilingeniør
Egil Borchersen
Stud.lic.techn., civilingeniør
Lauritz Rasmussen.

- A/S Rockwool
repræsenteret ved:
Afdelingschef, ingeniør J. Skjold Petersen
- Statens Byggeforskningsinstitut
repræsenteret ved:
Afdelingsleder, civilingeniør
Georg Christensen.
Lic.techn., civilingeniør Asta Nicolajsen.
Ingeniør Uwe Lohse.
- Superfos Glasuld a/s
repræsenteret ved:
Udviklingschef, lic.techn., civilingeniør
H.C. Sørensen.
Laboratorieforsker, civilingeniør E.V. Tind.

Desuden har civilingeniør Hans Nielsen, Tåsinge Træ A/S deltaget i den tekniske styregruppes møder.

Administrativ styregruppe

Den administrative styring er blevet varetaget af en styregruppe bestående af:

- Egil Borchersen,
Institut for Husbygning.
- Erling D. Brask, direktør, cand.merc.
Superfos Glasuld.
- Georg Christensen,
Statens Byggeforskningsinstitut
- Knud Prebensen,
Cowiconsult.

Egil Borchersen har fungeret som projektkoordinator, og Tommy Bunch-Nielsen har været projektgruppens sekretær.

Undersøgelser

Undersøgelserne af elementernes egenskaber har været fordelt således:

- Institut for Husbygning:
Styrke- og stivhedsegenskaber.
Materialeforsøg.
- Statens Byggeforskningsinstitut:
Fugttekniske egenskaber.
Materialeforsøg.
- Cowiconsult:
Byggetekniske egenskaber.
- Superfos Glasuld og Rockwool:
Materiale- og brandforsøg.

Desuden er der udført brandforsøg på Statsprøveanstalten, og k-værdi-målinger på Teknologisk Institut, Tåstrup.

1.4 RAPPORTENS INDHOLD

I kapitel 2 gives en detaljeret beskrivelse af mineraluldbaserede sandwichelementer, de indgående materialer, og hvordan elementerne kan produceres.

I kapitel 3 gives en kortfattet, skematisk oversigt over elementernes ydeevne specielt vedrørende styrke, stivhed, brand, fugt, lyd og varmeisolering.

Dette kapitel uddybes i kapitel 4, hvor forhold i forbindelse med ydeevnen på enkeltområder dokumenteres ved gennemgang af projektets delundersøgelser. Desuden gøres der rede for de beregningsprincipper for mineraluldbaserede sandwichelementer, som undersøgelserne er resulteret i.

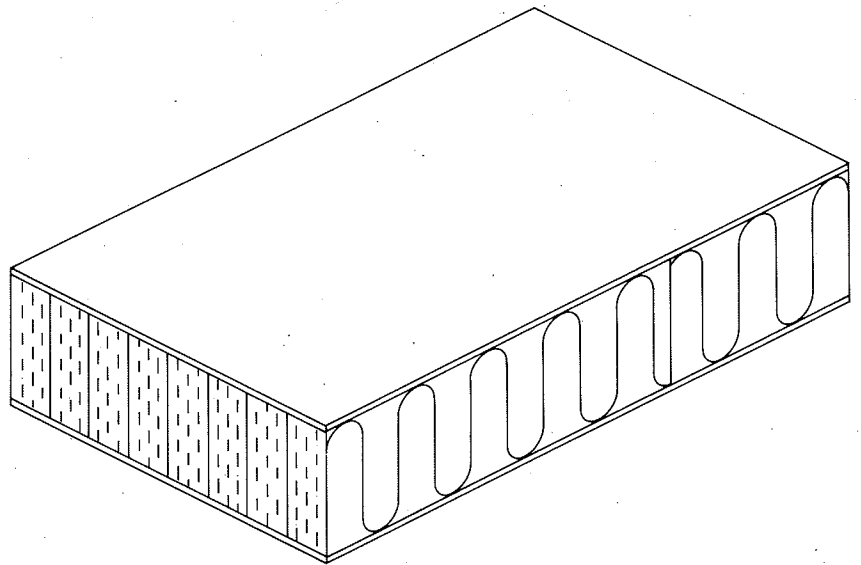
I kapitel 5 gennemgås dimensioneringsprincipperne for mineraluldbaserede sandwich-elementer, og der vises en række dimensioneringsdiagrammer.

Sammenbygningsmulighederne belyses i kapitel 6. Der er udvalgt en række typiske detaljer med en beskrivelse af, hvordan de opfylder de væsentligste funktionskrav.

2. SANDWICHELEMENTET

I dette kapitel beskrives elementets opbygning, de forskellige varianter og produktionsteknikken.

Sandwichelementet er i sin grundudformning opbygget af en kerne af mineraluld, hvorpå der er limet to flangeplader (figur 2.1).



Figur 2.1:

Det rene sandwichelement.

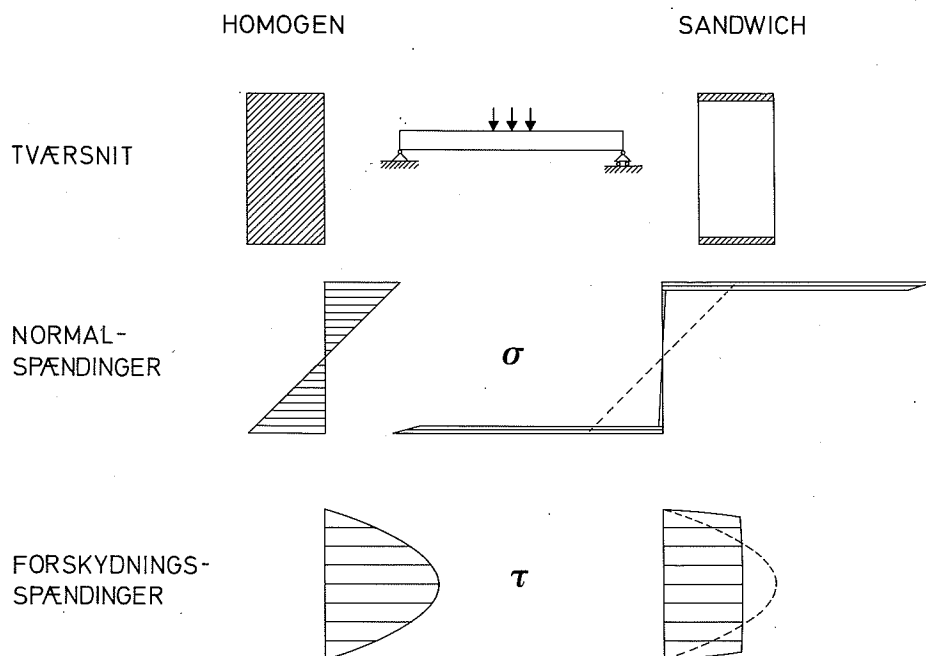
Lokal kraftoverførsel, andre styrkekrav og en lang række byggetekniske krav vil normalt forårsage, at elementet yderligere forsynes med forstærkninger i form af kantlister og skot. Disse varianter bliver omtalt i afsnit 2.2, medens det rene sandwichelement (uden disse forstærkninger) omtales i det følgende.

2.1 DET RENE SANDWICHELEMENT

Konstruktiv
virkemåde

Som bærende bygningskomponent har et sandwichelement en udformning, der økonomiserer med materialeforbruget. En bøjningspåvirkning vil sandwichelementet optage ved træk-

og trykkræfter i flangernes planer, medens kernen overfører forskydningskræfterne mellem de to flanger (se figur 2.2).



Figur 2.2:

Bøjningspåvirket sandwichelement. Spændingsfordelingen afhænger af forholdet mellem flangestivhed E_f og kernens stivhed E_k . Til venstre er vist spændingsfordelingen i et homogent tværsnit og til højre i et sandwich-tværsnit. Normalspændingerne koncentrerer sig i flangerne, medens forskydningspændingerne fordeles mere jævnt over kernen.

En aksial påvirkning vil blive optaget ved tryk- eller trækkræfter i flangerne, medens kernen i denne situation primært stabiliserer flangerne mod foldning.

De primære styrke- og stivhedskrav, der derfor vil blive stillet til et flangemateriale, vil være evne til at optage kræfter i flangeplanet, medens kravene til kernematerialet vil være evne til at overføre forskydningspåvirkninger.

De undersøgelser, der omtales i denne rapport, har primært haft til formål at undersøge, om mineraluld har tilstrækkelige styrke- og stivhedsegenskaber, der gør det egnet som kernemateriale i bærende sandwichelementer.

De varmeisoleringsstekniske forhold gør kernetykkelser på 15-30 cm mest aktuelle.

En kombination af tilstrækkelige konstruktive egenskaber og kernematerialets gode varmeisolerende egenskaber vil gøre det mineraluldbaserede sandwichelement velegnet som en del af klimaskærmen.

2.1.1 Kernemateriale

Mineraluld

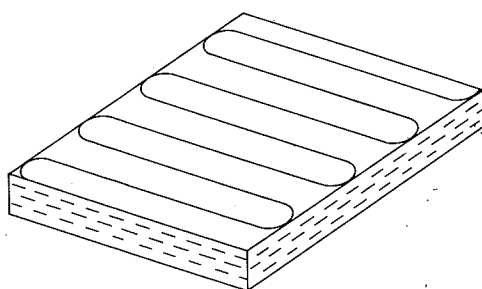
Mineraluld er en fællesbetegnelse for isoleringsprodukter, der består af uorganiske fibre forbundet med et bindemiddel. Afhængig af især komprimeringsgrad fremstår det færdige produkt som mere eller mindre formfast (hårde eller bløde plader).

De bløde mineraluldprodukter, anvendes typisk som udfyldning ved bygningsisolering, medens de hårde produkter typisk anvendes til specialformål med krav om visse selv bærende egenskaber (rørskåle, akustikplader, støbeplader, o.s.v.).

De mineraluldplader, der er anvendt til sandwichelementerne i denne undersøgelse, er taget ud af den løbende produktion af hårde plader (rumvægt 50-120 kg/m³).

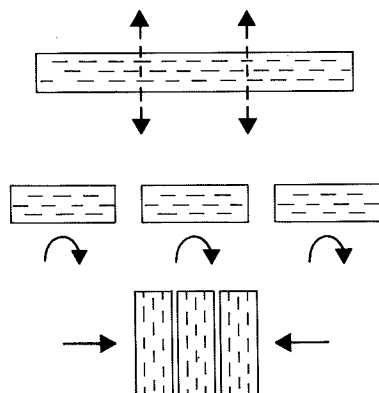
Mineralulden vil i det følgende kun blive karakteriseret ved en rumvægtsangivelse og en producentbetegnelse.

Konstruktions-mineraluld



Mineraluld fremstillet til brug i bærende sandwichelementer vil blive anbefalet betegnet konstruktionsmineraluld med angivelse af styrkeniveau.

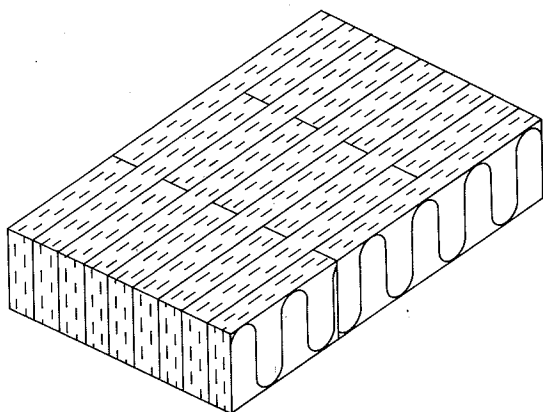
En mineraluldplade er tydeligt lagdelt, idet fibrene hovedsagelig er orienteret i parallelle planer vinkelret på pladens tykkelse. Allerede de indledende undersøgelser [2] afslørede, at mineraluldens evne til at overføre en forskydningspåvirkning er bedst i fiberretningen. I sandwichelementet er det derfor nødvendigt at kunne orientere mineraluldens fiberplaner vinkelret på de to flanger, hvorimellem forskydningspåvirkningen skal overføres.



Pladerne skæres op i lameller, hvis bredde er lig med kernetykkelsen. Lamellerne stilles derefter på højkant (kantstilles) og skubbes sammen.

Opskæringen skal ske med en tilpas lille tolerance, således at der ikke forekommer højdeforskelle af betydning mellem to nabolameller.

Lamellernes længde vil af håndteringsmæssige årsager som regel være mindre end sandwichelementes længde, hvorfor to eller flere lameller må anbringes i forlængelse af hinanden. Stødene mellem disse lameller er styrkemæssigt lokale svækkelser og bør som sådan fordeles ved, at lamellerne lægges i forbandt.



Samles lamellerne, som beskrevet, vil de kunne overføre forskydningspåvirkninger i planer parallelle med lamellerne, medens forskydningspåvirkninger på tværs af lamellerne kun i begrænset omfang vil kunne overføres.

Hvor store forskydningspåvirkninger, der kan overføres igennem en mineraluldkerne, opbygget af tværstillede lameller, omtales i afsnit 4.1.2.

Da mineraluldens stivhed overfor træk og tryk også er størst parallelt med fiberplanerne, giver lamelopbygningen af kerne- også den bedste udnyttelse af kernematerialet med hensyn til stabilisering af trykpåvirkede flanger.

Præferencemål

For at minimere spildet ved opskæring af mineralulden bør følgende kernetykkelser have præference:

145, 195, 220, 235, 250 og 295 mm.

Som nærmere omtalt i afsnit 4.5, vil dette svare til k-værdier på:

0,26 0,20 0,18 0,17 0,16 og 0,14 W/m²°C

når flangematerialet er 12 mm krydsfinér.

2.1.2 Flangemateriale

Som flangemateriale er i disse undersøgelser primært undersøgt konstruktionskrydsfinér. I enkelte af delundersøgelserne er andre mulige materialer også undersøgt. Det drejer sig om eternitplader og spånplader.

Udover de styrkemæssige krav til flangematerialet, som primært omfatter fornøden styrke og stivhed overfor kræfter i flangens plan, skal det kunne opfylde visse brandtekniske krav og have en fornøden holdbarhed overfor hygrotermiske påvirkninger.

Om alle disse krav kan tilfredsstilles, er kun undersøgt for krydsfinérens vedkommende, medens undersøgelserne viser, at spånplader i de nuværende kvaliteter ikke tåler vekslende opfugtning og udtørring.

Krydsfinéren, der er anvendt som flange-materiale i undersøgelserne, er primært 5-lags amerikansk krydsfinér i kvalitet C-D interior, exterior glue. Pladetykkelserne har været 6-16 mm med 12 mm som den mest anvendte.

Fiberorientering

I sandwichelementet bør krydsfinéren anbringes, således at yderfinéren har samme orientering som spændretningen.

Hvor elementlængden er længere end den produktionsbestemte pladelængde (f.eks. 2,44 m), er det nødvendigt at etablere kraftoverførende stød mellem to eller flere plader. I forsøgselementerne er anvendt skråskarringer 1:8 eller 1:10, og disses reduktion af styrken er også undersøgt.

Modulmål

Krydsfinérens standardbredde er typisk ca. 120 cm, hvorfor et modulmål på bredden af sandwichelementet bør være 12 M. Anvendes andre flangematerialer end amerikansk krydsfinér, kan andre modulmål dog også komme på tale, afhængig af standardbredden.

En yderligere beskrivelse af mulige flangematerialer findes i [9].

De styrkemæssige og fugttekniske egenskaber af den i laboratorieforsøgene anvendte amerikanske krydsfinér er detaljeret beskrevet i [4] og [8] og bliver kort refereret i afsnit 4.1.1 og 4.3.

2.1.3 Limforbindelsen

Primære krav

Limforbindelsen skal sikre, at flangerne og kernematerialet kan samvirke. Specielt mineraluldens overflade og struktur stiller det særlige krav til limen, at den skal kunne trænge ind i ulden for at sikre en god vedhæftning. Dertil kommer, at den skal være termohærdende og selvfølgelig økonomisk i brug.

Forskellige lime undersøgt

For at finde frem til en egnet lim er en række forskellige lime undersøgt. Dette er bl.a. omtalt i [9].

Polyurethanlim

Valget faldt på en eenkomponent fugtigheds-hærdende polyurethanlim (enkeltlim nr. 84-3678 fra Sadofoss A/S). Limen hærdet ved hjælp af luftens og/eller materialernes fugtindhold, men det kan dog være nødvendigt at befugte materialerne inden limpåførslen.

Under udhærdningen sker der en opskumning, hvorved limen kan udfylde eventuelle hulrum og trænge ind i mineralulden. Sandwichelementerne skal være under pres ($3-4 \text{ kN/m}^2$) under limens udhærdning, som kan vare $1/4 - 18$ timer, afhængig af bl.a. temperaturen.

Limen hærdner til en kemikalie-, vand- og kogefast polyurethan, og der skal anvendes $300-400 \text{ g/m}^2$.

Erfaringer

Limen har været anvendt til de fleste af forsøgselementerne, hvorfor der er indhøstet en del erfaringer, som omtales nærmere i afsnit 4.1.3. Stort set må limen siges at være egnet til limning af mineraluldbaserede sandwichelementer. Der er dog konstateret mange mangelfulde limforbindelser, men de kan ikke tilskrives limen alene og skyldes i højere grad begyndervanskeligheder i produktionsleddet.

Kontrol nødvendig

Det er imidlertid altafgørende for elementernes anvendelse som bærende konstruktions-elementer, at limforbindelsen er effektiv, og der må derfor ved en elementproduktion ske en kontrol af, om det også er tilfældet. Denne kontrol har det vist sig vanskeligt at udføre, men der er i [32] beskrevet en metode til ikke-destruktiv kontrol af limforbindelsen, som synes velegnet til stikprøvekontrol.

Endelig skal nævnes, at Arbejdstilsynet i oktober 1978 har fastlagt forholdsregler, der skal gælde for arbejdspladser, hvor man benytter epoxy og polyurethan.

2.1.4 Produktion af elementer

De mineraluldbaserede sandwichelementer er hidtil fremstillet ved håndværksmæssig produktion. De produktionstekniske erfaringer stammer derfor fra denne fremstillingsform, men kommer en løbende produktion af elementer på tale, må det forventes, at en maskinel produktionsform vil blive etableret.

De produktionstekniske forhold er nærmere beskrevet i [9]. Her skal som illustration omtales en produktionsproces' forløb for et rent sandwichelement.

Eksempel

Det forudsættes, at lamellerne på forhånd er udskåret svarende til den rette tykkelse, og at flangepladerne er tilskåret i det rette format.

De enkelte trin er da:

1. Lamellerne anbringes kantstillede, og den øverste flade rengøres ved støvsugning.
2. Med en tandspartel fordeles limen på den 1. flangeplade.
3. Lamellerne befugtes f.eks. med en vandforstøver og anbringes med det fornødne forbandt på den 1. flangeplade med den rensede og vandede flade mod limfladen. I det omfang, det er nødvendigt af afkorte lamellerne, skal dette ske på en måde, der sikrer, at savstøvet ikke havner på limfladen.
4. Den anden lamelflade renses nu med støvsugning og vandes, samtidig med at den 2. flangeplade påføres lim.
5. Den 2. flangeplade anbringes så på lamellerne og et pressetryk påføres.
6. Når udhærdningen er sket, kan eventuelt udragende dele af lamellerne bortskæres.

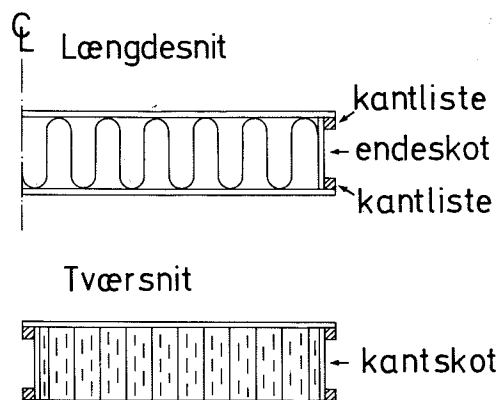
Processen lyder umiddelbart enkel, men er dog forbundet med visse problemer. Der kan være tykkelsesforskelle mellem mineraluld-lamellerne, hvorved der dannes hulrum, som limen ved sin opskumning måske ikke kan udfylde. Limens åbentid kan blive overskredet, inden pressetrykket påføres, hvorved limen ikke trænger tilstrækkeligt ind i ulden. Pressetrykket skal være jævnt fordelt. De to flangeplader kan være forskudt indbyrdes, således at elementet fra starten har indbygget en skævhed.

Disse problemer kan selvfølgelig løses ved en omhyggeligt tilrettelagt produktionsproces.

2.2 VARIANTER

Brandtekniske, byggetekniske og styrkemæssige årsager bevirker i mange tilfælde, at sandwichelementet må forsynes med yderligere forstærkninger i form af skot og/eller kantlister.

Disse kantlister og skot søm-limes sammen med flangerne, således at der sikres en samvirken. Skottene kan udføres af krydsfinér og lignende, og kantlisterne af 35×45 mm trælister. Som det fremgår af de byggetekniske detaljer i kapitel 6, forsynes kantlisterne i mange tilfælde med en udfræset not til brug i en fer-not-samling.



Figur 2.3:

Forstærkning af sandwichelement.

Kantforstærkningerne øger materialeomkostningerne, men kan dog styrkemæssigt og produktionsmæssigt give fordele, der opvejer disse meromkostninger.

2.2.1 Dækelement-varianter

Uden
sideskot

På figur 2.4 er vist 4 forskellige dækelementudformninger med kerner af tværstillede mineraluldlameller. Figur 2.4.a viser en opbygning som det rene sandwich-element, medens figur 2.4.b viser en variant, der er forstærket med skot i de to ender. Disse endeskot kan bl.a. sikre, at lokale understøtningskræfter fordeles jævnt til kernen, hvorved en bæreevneforringelse hidrørende fra lokalknusning af kernematerialet kan undgås.

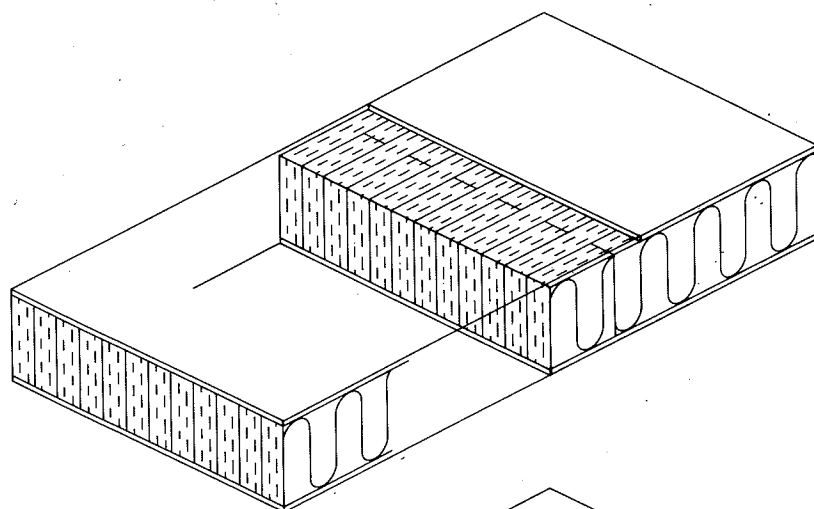
Dækelementer udformet som figur 2.4.b har været anvendt til de fleste af de dækelementforsøg, der er gennemført som led i projektet.

I brandteknisk henseende har de to varianter (figur 2.4.a og .b) imidlertid den svaghed, at en bortbrænding af underflangen reducerer bæreevnen til nul. Selvom et ubrændbart materiale anvendes til flangerne, vil det næppe forbedre restbæreevnen efter en brandpåvirkning. De anvendte mineraluldkvaliteter kan kun tåle temperaturer på 250-300°C, førend styrken reduceres, og der vil indenfor en brandpåvirket flange derfor ske en nedbrydning af mineralulden, hvorved flange og kerne ikke længere samvirker.

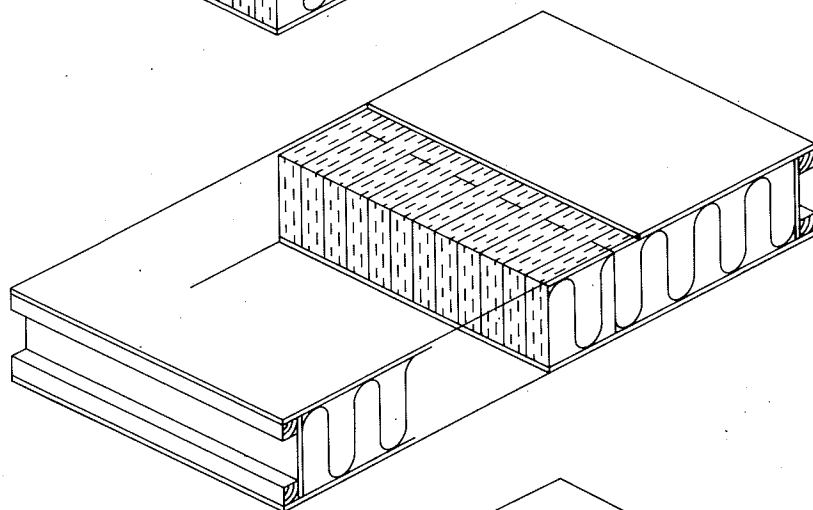
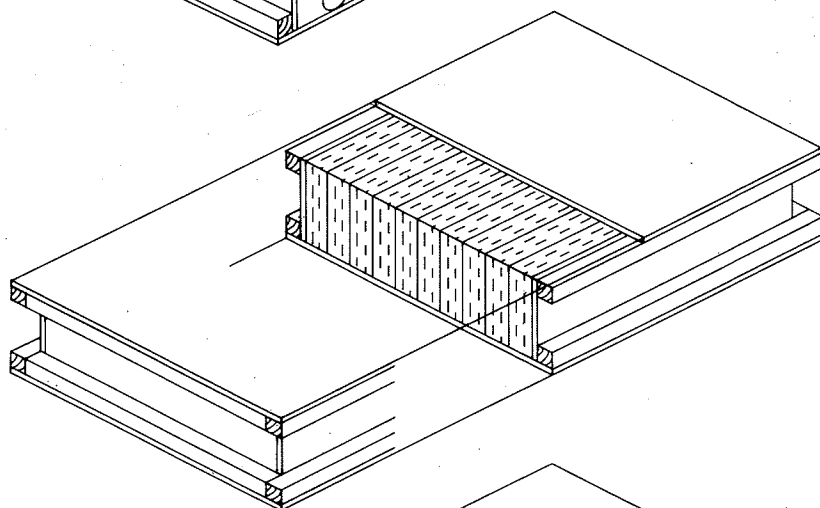
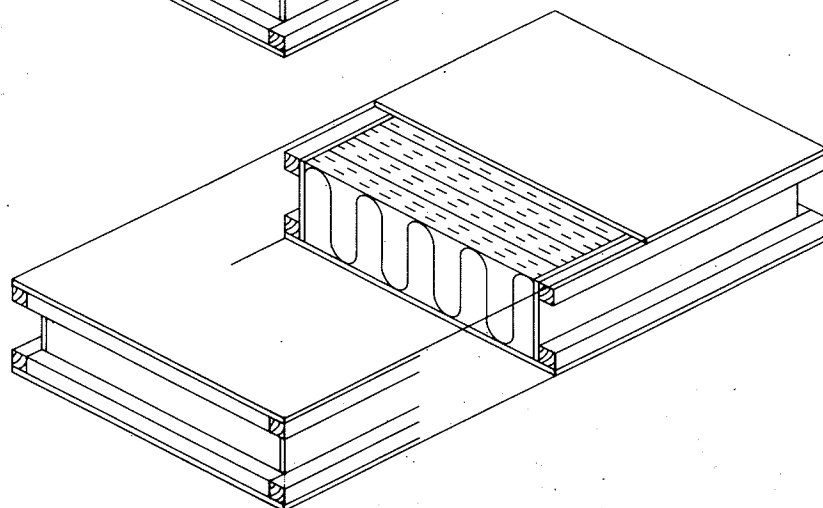
Figur 2.4:

Dækelementvarianter

a) Rent sandwichelement



b) Element med endeskot

c) Element med ende- og
kantskot.
Lameller på langs.d) Element med ende- og
kantskot.
Lameller på tværs.

Dækelementer uden kantskot, opbygget af de i rapporten beskrevne materialer, kan derfor kun anvendes, hvor der ikke stilles krav til brandmodstandsevnen. (F.eks. visse tagkonstruktioner og dækkonstruktioner over krybekælder.)

Med
kantskot

De to andre varianter (figur 2.4.c og .d) er begge forsynet med kantskot (kantafstivning) udover endeskottene. Forskellen mellem disse to er udelukkende lamellernes orientering.

Sideskottene medfører en væsentlig forøgelse af elementernes bøjningsbæreevne, og reducerer derfor mineraluldkernens betydning fra at være eneste forskydningskraftfordelende konstruktionsdel til stort set kun at have betydning for den lokale kraftfordeling og afstivningen af flangen mod foldning.

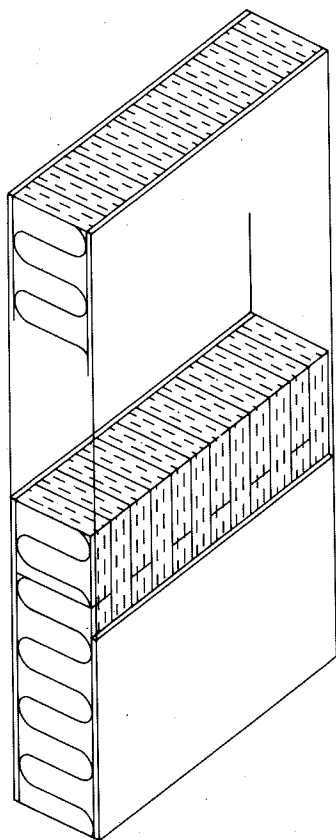
Brandteknisk
forbedring

Brandteknisk betyder kantskottene, at et dækelement også vil have en restbæreevne, selvom en flange brænder bort eller mister sin forbindelse med kernematerialet. Undersøgelsen, som omtales i afsnit 4.2.2, viser, at dækelementer med kantskot sandsynligvis kan opnå BD-30 eller BD-60. Klassifikation ved passende udformning af element og samlinger.

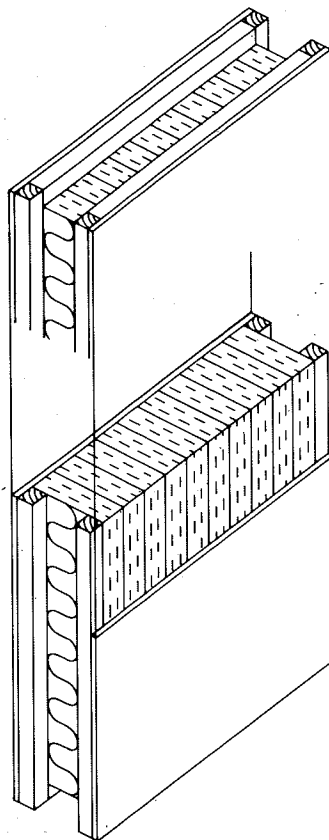
2.2.2 Vægelement-varianter

På figur 2.5 er vist 4 forskellige vægelementudformninger. Det rene element (figur 2.5.a) har udvist forbavsende store bæreevner, men brandtekniske krav påvirker også som for dækelementerne, at de må forsynes med forstærkninger.

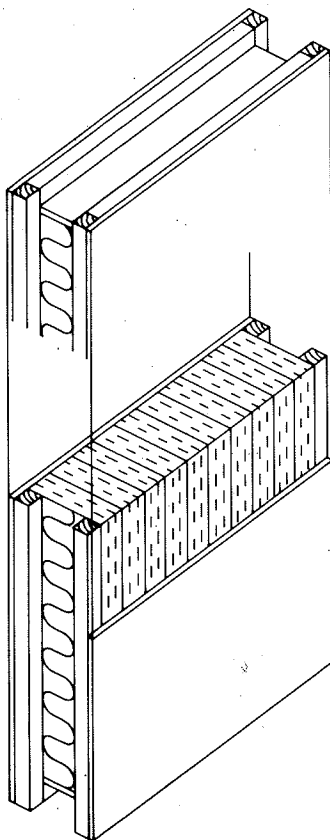
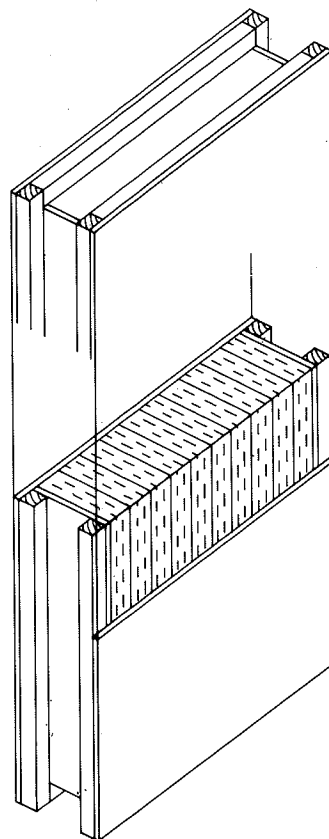
Forsøg har vist, at forstærkninger i form af lodrette kantlister, som på figur 2.5.b, er tilstrækkelige til at opnå en BD30 klassifikation (se afsnit 4.2.2). Varianten på figur 2.5.c blev anvendt i DTH's Nulenergihus [3], medens varianten på figur 2.5.d vil have en endnu større restbæreevne end varianten på figur 2.5.b.



a) Rent sandwichelement



b) Element med kantlister

c) Element med kantlister
og endeskot

d) Element med kant- og endeskot

Figur 2.5: Vægelementvarianter.

3. GENEREL OVERSIGT

I dette kapitel gives der en kortfattet oversigt over elementerne og deres ydeevne. Oversigten tager udgangspunkt i de elementtyper og elementmål, der har været inddraget i undersøgelserne. I næste kapitel gøres der mere detaljeret rede for ydeevnen på en række delområder og undersøgelserne, der ligger til grund herfor.

3.1 ELEMENTGEOMETRI OG MATERIALER

Flangemateriale: Konstruktionskrydsfinér. (Andre flangematerialer kan også anvendes, se nærmere herom i kapitel 4).

Flangetykkelse: 9 mm eller derover. (Gælder for konstruktionskrydsfinér.)

Kernemateriale: Mineraluld med en regningsmæssig trækstyrke bedre end 30 kN/m^2 (se afsnit 5.2.1).

Kernetykkelse: 145 - 295 mm.

Lim: Der kan anvendes forskellige limtyper, der primært skal være fugtbestandig termostabil og have fornøden styrke. I projektet er anvendt en én-komponent fugtigheds-hærdende polyurethanlim.

Elementbredde: I projektet er hovedsagelig anvendt 0,6 - 1,2 m brede elementer.

Dakelementlængde: Afhænger af anvendelsen. Se kapitel 5.

Vægelementhøjde: Afhænger af anvendelsen, se kapitel 5.

3.2 YDEEVNE

3.2.1 Styrke og stivhed

Vægelementer: Kan anvendes som bærende yder- eller indervægge i én- og to-etagers huse eller haller.

Dakelementer: Kan anvendes som tagelementer og etageadskillelser, dog afhængig af de brandmæssige krav.

3.2.2 Brand

For 2,44 m høje vægelementer med 12 mm krydsfinérflanger, 145 mm kernetykkelse og forstærket med 35×45 mm kantlister er på Statsprøveanstalten opnået en klassifikation som adskillende bærende BD-bygningsdel 30.

I tilfælde, hvor der kræves en klasse 1 overflade, kan visse trykbrandimprægnerede krydsfinérer anvendes som flangemateriale.

For dækelementerne er der ikke foretaget en klassifikationsprøvning, men ud fra vejledende forsøg og beregninger skønnes, at en klassifikation som BD-30 eller BD-60 for 20-30 cm tykke dækelementer med kantskot kan opnås.

3.2.3 Fugt

Vægelementer kan normalt udføres uden dampspærre og regnskærm, men skal dog sikres mod fugtindtrængning fra slagregnspåvirkning; flader ved overfladebehandling, fuger ved udformning.

Tagelementerne kræver fugtteknisk særlig bevågenhed. Ud fra de udførte undersøgelser kan det anbefales, at tagelementer udføres uden dampspærre, men med en udluftet regnskærm. Muligheden for at afvige fra disse krav er nærmere omtalt i kapitel 4. Styrkereduktioner i materialerne grundet fugt er indregnet i de angivne bæreevner i kapitel 5.

Flangematerialernes fugtfølsomhed skal vurderes, da elementernes stivhed er koncentreret i flangerne.

3.2.4 Lyd

Elementernes luftlydisolation er målt til $I_a = 25 - 33 \text{ dB}$, [10].

3.2.5 Varmeisolering

Elementernes transmissionstal (k-værdi) kan beregnes i henhold til DS 418. Sammenlignende målinger (Guarded Hot Box) viser, at mineraluld af type A i fiberretningen har en isoleringsevne svarende til mineraluld af type B på tværs af fiberretningen.

3.3 ØKONOMI

En sammenligning med andre konstruktioner med samme isoleringsevne viser, at mineraluldbaserede sandwichelementer vil være konkurrencedygtige, både som bærende vægelementer og som tagelementer. Sammenligningen er foretaget for k-værdier, der opfylder Bygningsreglementets krav pr. 1. februar 1979 for bygninger opvarmet til 18°C eller derover [11].

3.4 GODKENDELSE

Der vil, når denne rapport foreligger, af projektgruppen blive søgt en principiel mk-godkendelse af mineraluldbaserede sandwichelementer som bærende væg-, tag- og dækelementer. Når denne godkendelse foreligger, forventes producenterne at søge mk-godkendelse for deres specifikke elementer.

4. DOKUMENTATION FOR YDEEVNE

I dette kapitel omtales resultaterne fra delundersøgelserne af elementernes ydeevne. Vedrørende detaljer fra de enkelte undersøgelser (forsøg) henvises der til de respektive delrapporter.

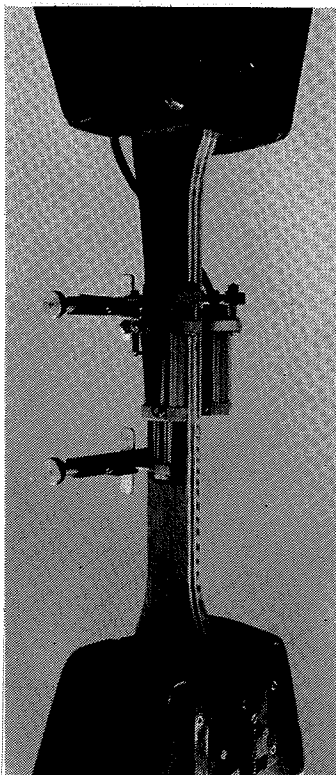
4.1 STYRKE- OG STIVHEDSEGENSKABER

Undersøgelsen af disse egenskaber omfatter

- a. flangematerialernes styrke- og stivhedsegenskaber,
- b. mineralulds styrke- og stivhedsegenskaber,
- c. limforbindelsens styrke- og stivhedsegenskaber,
- d. dakelementers styrke- og stivhedsegenskaber,
- e. vægelementers styrke- og stivhedsegenskaber,
- f. enkelte samlingers styrke- og stivhedsegenskaber.

Ved valget af varierende parametre i forsøgene blev det fra starten tilstræbt at få belyst betydningen af de væsentligste, men for overhovedet at kunne nå igennem undersøgelserne har variantantallet måttet begrænses.

4.1.1 Flangemateriale



Forskellige pladematerialer har været på tale som flangematerialer. Der kan nævnes krydsfinér og spånplade, som blev anvendt i Nul-energihuset på DTH [3], og Eternit, som Dansk Eternit-Fabrik A/S har lanceret som flangemateriale for deres sandwichelement [12].

Da de fleste pladematerialers mekaniske egenskaber er velkendte eller relativt nemt kan bestemmes, har gruppen valgt kun at lade et plademateriale være gennemgående i alle undersøgelserne. Valget faldt på konstruktionskrydsfinér. Kun i de fugt-tekniske undersøgelser er også andre pladematerialer inddraget.

I beregningsmetoderne for sandwichelementernes styrke og stivhed indgår flangematerialernes styrke-stivhedstal direkte, hvorfor styrke-stivhedsbestemmelse ved beregning for sandwichelementer også vil kunne foretages med andet flangemateriale end krydsfinér, når blot de relevante parameterverdier kendes.

Materialeprøvningen af krydsfinér er beskrevet i [4].

De egenskaber, der er undersøgt, er primært krydsfinérens egenskaber overfor tryk- og trækpåvirkning i pladens plan parallelt med yderfinérens fiberretning og herunder svækkelser hidrørende fra eventuelle skråskarringer. Desuden er en række egenskaber overfor forskellige forskydningspåvirkninger undersøgt.

Undersøgelsen af krydsfinérens mekaniske egenskaber har primært haft til formål at bestemme de aktuelle værdier for de parametre, der indgår i beregningsformlerne for sandwichelementer.

De væsentligste resultater fra disse undersøgelser fremgår af nedenstående skema.

Krydsfinértype - kvalitet	Aktuel tykkelse mm	Konditio- nering 20°C	Træk $\neq$		Tryk $\neq$		Forskydning (skive/ gn.tykkelse)		Forskydning (plade/ rullende)	
			σ_{t0} N/mm ²	E_{t0} N/mm ²	σ_{c0} N/mm ²	E_{c0} N/mm ²	τ_0 N/mm ²	G_0 N/mm ²	τ_{90} N/mm ²	G_{90} N/mm ²
Amerikansk krydsfinér C-D BRAND S	12,0 12,0	65%RF 50%RF	27,1 28,0	9880 11200	33,3	8300				
Amerikansk krydsfinér C-D BRAND S <u>m.skråskarring 1:10</u>	12,0 12,0	65%RF 50%RF	16,2 17,0		30,8					
Amerikansk krydsfinér C-D	12,0	50%RF	21,2	8460	33,4	10200	7,4	875	1,6	650
Amerikansk krydsfinér C-D <u>m.skråskarring 1:8</u>	12,0	50%RF	19,7							
Amerikansk krydsfinér A-C	12,6	50%RF			33,3	7830				
Canadisk krydsfinér CSP Sheating	12,6	50%RF			36,4	8330				

Tabel 4.1: Styrke- og stivhedstal (middelværdier) for de anvendte krydsfinértyper. Tabellen er hentet fra [4], hvor en fyldestgørende beskrivelse af krydsfinérskvaliteterne også er at finde.

Middelværdierne er beregnet ud fra 10 prøver af hver variant, og der er tale om variationskoefficienter på omkring 20%.

4.1.2 Mineraluld

I modsætning til flangematerialet konstruktionskrydsfinér var de anvendte mineralulddtypers mekaniske egenskaber ved undersøgelse start relativt ukendte. Der var tale om et materiale, hvis egenskaber primært var optimeret med henblik på isolerende virkning, og hvor der ikke fandtes anerkendte prøvningsmetoder til bestemmelse af mekaniske egenskaber.

Materialeprøvningen af mineralulden er omtalt i [5], hvor de undersøgte prøvningsmetoder også er detaljeret beskrevet.

De undersøgte materialeparametre er afgrænset til de, der er nødvendige for en teoretisk vurdering af sandwichelementernes styrke- og deformationsegenskaber i forbindelse med verifikation af relevante beregningsmodeller.

Der er kun undersøgt træk-, tryk- og forskydningsegenskaber i fiberplanet, og det har været nødvendigt at udvikle prøvningsmetoder specielt til mineraluld, der skal indgå som kernemateriale i bærende sandwichkonstruktioner.

Undersøgte typer:

G50
G70
G90
R80
R100
R120

I undersøgelserne er tilstræbt en parallel analyse af de to mineraluldprodukter Glasuld og Rockwool, idet der er undersøgt tre typer af hvert produkt. Disse betegnes G50, G70, G90 henholdsvis R80, R100 og R120. Tallene efter G(lasuld) og R(ockwool) angiver mineraluldens rumvægt i kg/m^3 , og disse er de eneste karakteristika, der er anvendt til at skelne mellem de undersøgte typer.

De undersøgte mineralulddtyper er ikke specielt udviklet til brug i sandwichelementer. Der er tale om typer, som er udviklet til andre formål, men som gennem pilotforsøg viste sig anvendelige til sandwichelementer.

På baggrund af foreliggende resultater må det forventes, at nye typer med konstruktive egenskaber tilpasset til brug i sandwichelementer vil blive udviklet.

De talværdier, der præsenteres i det følgende, kan derfor kun anses for repræsentative for de specielle mineralulddtyper, der er indgået i undersøgelserne, medens tilsvarende værdier for andre typer må søges oplyst hos producenterne.

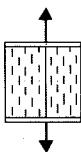
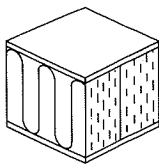
4.1.2.1 Korttidsegenskaber ved 20°C og 65%RF

De væsentligste korttidsegenskaber ved træk, tryk og forskydning i fiberplanet, med prøvelegemer, der var konditioneret til 20°C og 65%RF fremgår af nedenstående skema:

Mineraluld	Træk		Tryk		Forskydning	
	Styrke σ_t (f_t) kN/m ²	E-modul E_t kN/m ²	Styrke σ_c (f_c) kN/m ²	E-modul E_c kN/m ²	Styrke τ (f_v) kN/m ²	G-modul G kN/m ²
R80	68 (18%)	5890 (38%)	32 (22%)	3390 (33%)	32 (20%)	2130 (23%)
R100	83 (11%)	8130 (14%)	51 (12%)	5090 (18%)	41 (24%)	2410 (41%)
R120	164 (28%)	18490 (24%)	71 (13%)	7930 (28%)	66 (11%)	5170 (14%)
R	$\sigma_t = 0,018\gamma^{1,84}$	$E_t = 0,064\gamma^{2,54}$	$\sigma_c = 0,0044\gamma^{1,99}$	$E_c = 0,31\gamma^{2,07}$	$\tau = 0,020\gamma^{1,66}$	$G = 0,20\gamma^{2,07}$
G50	135 (12%)	13850 (12%)	54 (17%)	5250 (19%)	62 (6%)	4740 (12%)
G70	196 (22%)	22960 (29%)	82 (17%)	5840 (12%)	82 (10%)	7500 (21%)
G90	300 (16%)	35700 (17%)	156 (35%)	16650 (33%)	124 (14%)	11920 (14%)
G	$\sigma_t = 0,45\gamma^{1,42}$	$E_t = 15,0\gamma^{1,70}$	$\sigma_c = 0,030\gamma^{1,87}$	$E_c = 1,62\gamma^{1,99}$	$\tau = 0,63\gamma^{1,15}$	$G = 10,16\gamma^{1,54}$

Tabel 4.2: Styrke- og stivhedstal for de anvendte mineraluldtyper. De angivne værdier er middelværdier af 10 prøver af hver, og ulden har været påvirket i fiberplanet. Variationskoefficient er angivet i parentes. Kilde [5].

en i kg/m³.



Træk- og trykprøvelegemerne havde ternin-geform med sidelængde 100 mm. På to modstående flader var limet 12 mm krydsfinér-plader, hvorigennem træk- og trykpåvirkningen blev påført.

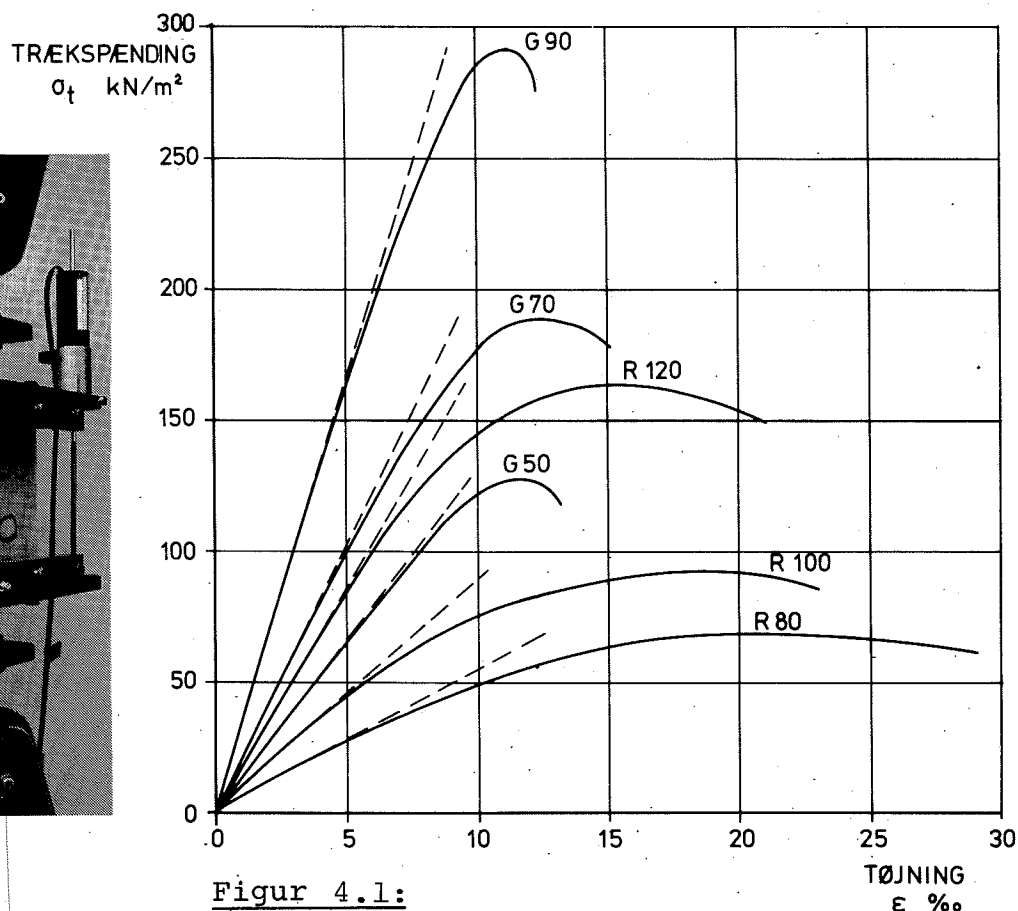
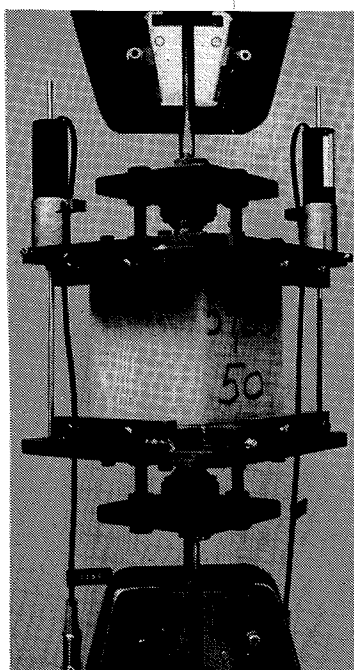
Deformationerne under prøvningen blev bestemt ved at måle afstandsændringen mellem de to plader.

På figur 4.1 er vist typiske trækarbejds-linier for de 6 undersøgte mineraluldtyper.

For alle typer gælder, at arbejdslinien er lineær op til en værdi, der er omkring 50-60% af trækbrudspændingen.

En alternativ og relativt hurtigere trækstyrkebestemmelse med timeglasformede prøvelegemer, gav samme trækstyrkeværdier.

De i tabel 4.2 angivne forskydningsstyrker og -stivheder er baseret på prøvelegemer udskåret af 100 mm tykke sandwichelementer med 12 mm krydsfinérflanger. Prøvelegemer-nes længde er 800 mm og bredden 100 mm.



Figur 4.1:

Typiske arbejdslinier for enakset træk af de 6 undersøgte mineraluldtyper: Kilde [5].

Prøvningen skete ved at påføre en diagonal belastning ved hjælp af en til formålet udviklet ramme.

Det skal her bemærkes, at der i [5] er omtalt flere andre prøvningsmetoder til forskydningsprøvning af mineraluld. Metoderne kan give forskellige styrke- og stivhedstal, hvorfor man må være opmærksom på, hvilken prøvningsmetode der har været anvendt i forbindelse med forskydningsstyrke/stivhed angivelser.

Relativ stor
spredning

Det fremgår af tabel 4.2, at de angivne middelværdier for styrke og stivhed har variationskoefficienter på op til 40%. Den store spredning skyldes bl.a. mineraluldens struktur. Som det senere vil fremgå (se kapitel 5), er spredningen dog ikke større, end at mineraluldens styrke- og stivhedsegenskaber kan udnyttes i bærende konstruktioner inden for visse nærmere angivne områder.

Forskel på træk
og tryk egenskaber

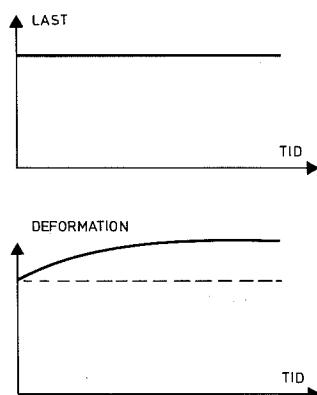
Der er betydelig forskel mellem egenskaberne overfor træk og tryk, således at såvel styrke som stivhed ved trækpåvirkning

er ca. dobbelt så store som ved trykpåvirkning.

Afhængighed
af rumvægt

Endelig er der i tabel 4.2 angivet en eksponentiel sammenhæng mellem de enkelte styrke-stivhedstal og rumvægten for hvert produkt. Som det fremgår, er der tale om forskellige konstanter for de forskellige funktioner, og disse er udelukkende bestemt ved estimering ud fra de her refererede undersøgelser. De angivne udtryk kan derfor ikke forventes at have gyldighed for andre mineraluldtyper.

4.1.2.2 Langtidsegenskaber ved 20°C og 65%RF



Mineraluldens krybning, d.v.s. tidsafhængig deformation ved konstant belastning, er undersøgt dels ved hjælp af diagonal-belastede rhombeformede prøvelegemer, dels ud fra nedbøjningsmålinger på langtidsbelastede dækelementer (se afsnit 4.1.4.2).

Ved en belastning af dækelementerne op til 60% af brudstyrken viser forsøgene, at der i løbet af det første belastningsår sker en deformationstilvækst på op til 20% af initialdeformationen. I løbet af det første år skønnes over 90% af krybningen at have fundet sted.

Bestemmelse af dækelementernes korttidsstyrke og -stivhed efter 1 år med en belastning på op til 60% af brudstyrken synes at indicere, at der ikke sker en ændring af korttidsegenskaberne, efter at krybning har fundet sted.

4.1.2.3 Vekslede belastet ved 20°C og 65%RF

Da mineraluldens styrke baserer sig på mineraluldfibre, indbyrdes forbundet med et bindemiddel, kan en svaghed over for vekslende belastninger synes umiddelbar. Der kunne være tale om enten udmattelsesbrud i de enkelte fibre, eller at forbindelsen mellem fibre og bindemiddel blev løsnet.

Til belysning af dette forhold skal omtales to delundersøgelser.

"Snelastvariation"

Blandt de tidligere omtalte langtidsbelastede dækelementer (omtalt i [6]) blev 8 af elementerne belastet med en vekslende last, der skulle simulere snelastens variation på et tagelement. Dækelementerne blev i det år, forsøgene stod på, belastet i belastningscykler á 8 uger, hvor lasten i de 7 uger svarede til "snefri", medens den sidste uge var med fuld snelast. Disse elementers krybning, korttidsstyrke og -stivhed

viste sig ikke at afvige signifikant fra de andre elementer, der havde været udsat for en konstant last i hele året.

Udmattelsesforsøg

Den anden delundersøgelse har omfattet en direkte udmattelsespåvirkning af prøvelegemer og er omtalt i [5]. Prøvelegemer bestående af mineraluld (100×100×800 mm) limet til 12 mm krydsfinérflanger (100×800 mm) blev via en belastningsramme udsat for en forskydningspåvirkning, der vekslede mellem 0% og 60 eller 80% af forskydningsstyrken. Frekvensen var ca. 300 cykler pr.time, og der er kun udført forsøg med 4 prøvelegemer. Disse brød ved henholdsvis ca. 209200, 1800, 86100 og 13900 cykler, hvor de to laveste tal svarer til en 80% belastning.

Konklusion

Det er begrænset, hvad der kan uddrages af kun 4 forsøg, men eftersom mineralulden i dækelementer næppe vil blive belastet til mere end 20% af forskydningsstyrken grundet det valgte sikkerhedsniveau, synes der ikke at være grund til bekymring om udmattelsesbrud ved normale belastningstilfælde.

4.1.2.4 Korttidsbelastet efter variation af temperatur og fugtighed

De hidtil omtalte mekaniske prøvninger af mineralulden er alle foregået ved $20 \pm 2^\circ\text{C}$ og $65\% \pm 3\%\text{RF}$, svarende til den øvre grænse i "Klimaklasse 1" (se [7]). For også at få et indtryk af elementernes ydeevne ved andre fugtpåvirkninger er der gennemført en række fugttekniske undersøgelser.

Her skal specielt omtales de fugttekniske delundersøgelser, der berører elementernes styrke- og stivhedsegenskaber, og som detaljeret er beskrevet i [8].

Hvilke fugt-temperatur-kombinationer

Medens de belastninger, et konstruktionselement kan forventes udsat for i sin levetid, er relativt velkendte, gør det tilsvarende sig ikke gældende for fugt- og temperaturpåvirkningerne. Det har således været nødvendigt at fastlægge fugt-temperatur-tid-forløb, som prøvelegemerne skulle igennem, og disse skulle så vidt muligt simulere forløb, som kan forekomme i de færdige konstruktioner.

Undersøgte fugt-temperatur-kombinationer

For at begrænse variantantallet er følgende to forløb valgt.

Det første er en skiftevis opfugtning og udtørring, som f.eks. et tagelement kan tænkes udsat for; opfugtning om vinteren grundet

kondens og udtørring om sommeren grundet solpåvirkning.

Det andet er gentagne frysepunktpassager, som også kan forekomme i et tagelement med kondensvand, der fryser om natten, og som igen tøes op om dagen.

Som det tidsrum, prøvelegemerne skulle befinde sig i hver tilstand, blev valgt 1 døgn.

Prøvelegemer

De anvendte prøvelegemer svarede til de, der blev anvendt til træk- og trykprøvning (afsnit 4.1.2.1), d.v.s. mineralulldterninger med sidelængde 100 mm med flanger limet på to modstående flader.

I disse undersøgelser indgik følgende mineralulldtyper:

G50, G70, R80 og R100

med følgende flangematerialer:

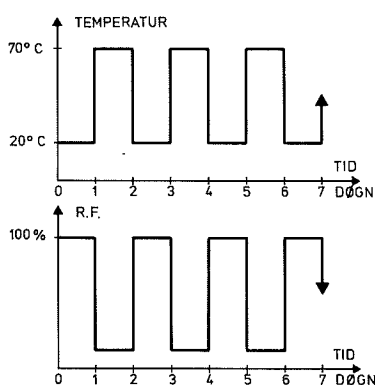
12 mm krydsfinér (Amerikansk Douglas Fir Plywood, C-D Exterior, limet 5 lag)

12 mm spånplade (spåndex/Melanin V313/SR)

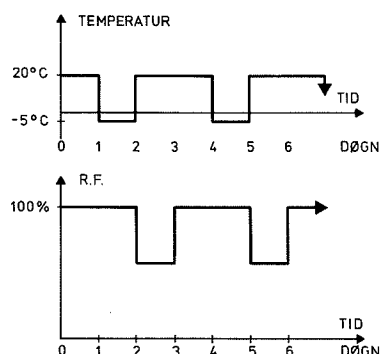
8 mm eternit (autoklaveret Eternitplade)

Kombinationerne fremgår af tabel 4.3 og 4.4.

Opfugtning- udtørring-cyklus



Fryse-tø-cyklus



Opfugtning-udtørring-cyklerne havde følgende forløb. Terningerne blev anbragt i et vandkar med den ene flange under vand og således, at ca. 10 mm af mineralulden også var under vand. Derved kom den ene limfuge også samme cyklus igennem. Efter et døgn i vandbad ved 20°C blev terningerne anbragt i varmeskab ved 70°C, og efter et døgn der igen tilbage i vandbadet. Denne cyklus blev gentaget op til 50 gange, idet der efter 10, 25 og 50 cykler blev udtaget 3 prøvelegemer af hver type, som så blev trækprøvet for at få et indtryk af betydningen af antallet af cykler, som prøvelegemerne havde været igennem.

Frysepunktpassage-cyklerne havde følgende forløb. Terningerne blev som ovenfor først anbragt i vandbad ved 20°C i et døgn, derefter i et fryserum ved -5°C i et døgn og så endelig et døgn i luften ved 20°C. Næste cyklus startede så i vandbadet igen, og dette blev gentaget op til 50 gange med udtagning af prøver efter 10, 25 og 50 cykler til trækprøvning.

Resultater

Resultaterne fra de to forsøgsserier er angivet i tabel 4.3 og 4.4.

Flange	Kerne	Relativ* trækstyrke efter		
		10 cykler	25 cykler	50 cykler
Krydsfinér	G50	0,5 - 0,6	0,4 - 0,5	0,0 - 0,1
Krydsfinér	G50**	0,8 - 0,9	0,6 - 0,7	0,1 - 0,2
Krydsfinér	G70	0,4 - 0,5	0,2 - 0,3	0,0 - 0,1
Krydsfinér	R80	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7
Krydsfinér	R100	0,5 - 0,6	0,3 - 0,4	0,2 - 0,3
Spånplade	G50	0,3 - 0,4	0,0	0,0
Spånplade	R80	0,6 - 0,7	0,4 - 0,5	0,2 - 0,3
Eternit	G50	0,7 - 0,8	0,5 - 0,6	0,1 - 0,2
Eternit	R80	0,5 - 0,6	0,8 - 0,9	0,8 - 0,9

* Sammenlignet med trækstyrken af tilsvarende terninger, der konstant havde 20°C og 50%RF.

** Disse terninger var limet med 600 g lim/m², medens alle andre var med 300 g/m².

Tabel 4.3: Trækstyrke af terninger, der har været igennem cykler á 1 døgn i vandbad v.20°C + 1 døgn i varmeskab v.70°C.

Det må straks anføres, at der var en relativ stor spredning på resultaterne, hvorfor man skal være forsigtig med at drage for kategoriske slutninger alene ud fra disse målinger, som også er behæftet med usikkerheden på limforbindelsens styrke. En vis tendens tegner sig dog.

Effekt af opfugtning-udtørring-cykler

Opfugtning-udtørring-cyklerne synes at give anledning til den største styrkereduktion. Således er G50 og G70 kombinationen med krydsfinér efter 50 cykler nede omkring 10% af udgangsstyrken, medens R80 kombineret med krydsfinér kun reduceres til omkring 60% af udgangsstyrken.

Da G50 og G70 har højere udgangsstyrke end R80, medfører reduktionen, at alle tre ender på stort set samme styrkeniveau. Det samme billede tegner sig i de tilfælde, hvor der er Eternitflanger.

Tilfældene med spånpladeflangerne tegner sig, uanset mineraluldtypepen, for betydelige reduktioner med flere eksempler på total-svigt.

Flange	Kerne	Relativ* trækstyrke efter		
		10 cykler	25 cykler	50 cykler
Krydsfinér	G50	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7	0,5 - 0,6
Krydsfinér	G50**	0,8 - 0,9	0,9 - 1,0	0,5 - 0,6
Krydsfinér	G70	0,8 - 0,9	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7
Krydsfinér	R80	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,5 - 0,6
Krydsfinér	R100	0,7 - 0,8	0,6 - 0,7	0,6 - 0,7
Spånplade	G50	0,3 - 0,4	0,6 - 0,7	0,8 - 0,9
Spånplade	R80	1,0 - 1,1	0,8 - 0,9	0,4 - 0,5
Eternit	G50	0,5 - 0,6	0,6 - 0,7	0,5 - 0,6
Eternit	R80	1,5 - 1,6	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3

* Sammenlignet med trækstyrken af tilsvarende terninger, der konstant havde 20°C og 50%RF.

** Disse terninger var limet med 600 g lim/m², medens alle andre var med 300 g/m².

Tabel 4.4: Trækstyrke af terninger, der har været igennem cykler á 1 døgn i vandbad v. 20°C + 1 døgn frysning v. -5°C + 1 døgn luft.

Effekt af
fryse-tø-cykler

Som det fremgår af tabel 4.4 er der ikke ved frysepunktpassagerne sket helt så drastiske styrkereduktioner, idet der efter 50 cykler er tale om reduktion til ca. 50% af udgangsstyrken.

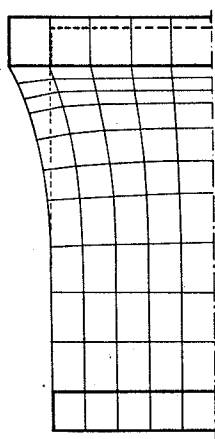
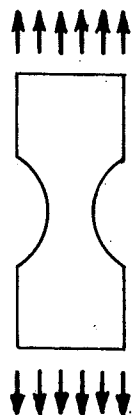
Diskussion af
prøvningsmetode

De betydelige styrkereduktioner, som opfugtning-udtørring-cyklerne gav anledning til, har medført en nøjere vurdering af prøvningsmetodens relevans. Der er bl.a. spørgsmålet om antallet af cykler, der i disse forsøg ret vilkårligt er valgt til max. 50. Analoge ASTM-standards (C481) arbejder med højst 6 cykler.

Et andet væsentligt spørgsmål er, om rent mekaniske påvirkninger under cyklerne også bidrager til styrkereduktionen. Der sker bl.a. en længdeændring af flangematerialet, når tilstanden ændres fra fuld opfugtning til udtørring, som for krydsfinéren andrager ca. 0,2%, for spånpladerne ca. 0,5% og for eternitten ca. 0,2%. Dertil kommer, at spånpladeflangerne i visse tilfælde delaminerede.

Supplerende
undersøgelser

Til belysning af disse forhold er de fugt-tekniske undersøgelser blevet suppleret med følgende to delundersøgelser.



Styrkereduktion
under vekslende
fugtforhold bør
undersøges yder-
ligere

Konklusion

Den første er omtalt i [5] og omhandler en forsøgsserie med timeglasformede prøvelegemer, der udelukkende bestod af mineraluld (R80). Disse blev udsat for følgende cyklus:

- 1 time i vanddamp ved 70°C
- og
- 2 timer nedfrysning ved -18°C.

Disse prøvelegemer blev trækprøvet og viste følgende styrkereduktioner:

- efter 20 cykler ca. 0,7×udgangsstyrken
- efter 40 cykler ca. 0,4×udgangsstyrken.

Den anden supplerende undersøgelse har bestået i en spændingsberegning ved brug af finite-element-metoden af terningerne. Disse beregninger har vist, at fugtdeformationerne i flangerne forårsager betydelige forskydningsspændinger i mineralulden. Størrelsen afhænger dels af fugtdeformationernes størrelse, dels af forholdet mellem flangens og mineraluldens stivhed.

Terningerne med spånpladeflanger får forskydningsspændinger stort set lig med mineraluldens forskydningsstyrke, medens krydsfinér og G50/70 kombinationerne når op på forskydningsspændinger på 30%-40% af mineraluldens udgangsstyrke. Hvis mineraluldens trækstyrke gennem gentagen opfugtning og udtørring reduceres til samme størrelsesorden, kan dette forklare, at de tilsvarende terninger stort set ingen trækstyrke havde tilbage efter 50 cykler.

Der har ikke inden for projektperioden været yderligere tid og kapacitet til at få problematikken yderligere belyst. Problemerne omkring styrkereduktion forårsaget af vekslende fugtforhold forventes taget op af producenterne. Disse vil kunne oplyse om, hvilken styrkereduktion man bør regne med i en given sag.

Med den her beskrevne viden in mente vil gruppen anbefale:

1. I konstruktioner, hvor der kan forekomme vekslende opfugtning-udtørring, bør der ikke af de undersøgte materialer anvendes spånplader i de nuværende kvaliteter som flanger i mineraluldbaserede sandwichelementer.
2. I konstruktioner, hvor der kan forekomme vekslende opfugtning-udtørring, bør der ved dimensionering af sandwichelementer tages hensyn til den styrkereduktion i mineralulden, som dette kan forårsage. (Se nærmere herom i afsnit 5.2.)

4.1.2.5 Sammenfatning af mineraluldens styrke- og stivhedsegenskaber

De undersøgte mineraluldtyper har korttidsstyrker i følgende intervaller:

Trækstyrke	70 - 300 kN/m ²
Trykstyrke	30 - 150 kN/m ²
Forskydningsstyrke	30 - 120 kN/m ²

og stivheder i følgende intervaller

E-modul (træk)	5800 - 36000 kN/m ²
E-modul (tryk)	3400 - 16000 kN/m ²
G-modul	2100 - 12000 kN/m ²

Mineralulden kryber ved et belastningsniveau på 60% af styrken, 12-18% på et år, og over 90% af krybningen synes at have fundet sted i løbet af det første år.

Ved vekslende belastninger på op til 20-30% af styrken synes der ikke at ske styrkereduktion.

Udsættes mineralulden for et fugtigt miljø, vil der ske en styrkereduktion, der afhænger af fugtpåvirkningens størrelse, varighed og hyppighed.

4.1.3 Limforbindelsen

Limforbindelsens styrke er indirekte undersøgt, dels i forbindelse med prøvningen af mineralulden, dels ved prøvningen af dækelementerne.

En korrekt udført limforbindelse har en styrke større end mineralulden. Ved fremstilling af sandwichelementer med den i projektet anvendte produktionsteknik synes det imidlertid vanskeligt at undgå, at limforbindelsen er svagere end mineralulden i dele af elementet.

Konstateret
forringet styrke

I [5] er beskrevet trækprøvning af 11 terninger med hver mineraluldtype, hvor terningerne er udskåret af et 120 cm bredt sandwichelement med 12 mm krydsfinérflanger. Trækstyrken for disse prøvelegemer viser en gennemsnitsværdi, der er 55-85% af den anvendte mineralulds trækstyrke, hvilket også ytrer sig i en væsentlig større variationskoefficient. Den relativt store spredning i de trækforsøg, der er omtalt i afsnit 4.1.2.4, kan derfor også i nogen grad tilskrives dårlige limforbindelser.

Årsager til
forringet styrke

Bøjningsforsøgene med dakelementer, som omtales i afsnit 4.1.4, viser tilsvarende en gennemsnitlig forskydningsstyrke i limforbindelsen på 60-70% af mineraluldens forskydningsstyrke.

En undersøgelse af dårlige limforbindelser i nogle af dakelementerne viser, at bl.a. følgende forhold kan være årsager til svækkelserne:

- Højdeforskelle mellem lameller
- Højdeforskelle mellem lameller og skot
- Manglende opskumning af lim

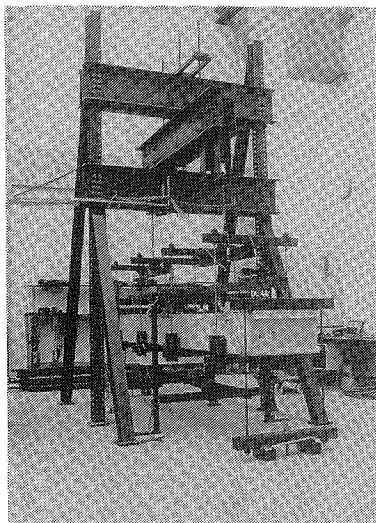
Disse er alle af produktionsteknisk karakter og må kunne begrænses ved arbejde med tilstrækkelig små tolerancer på de pågældende mål. Den manglende opskumning af limen kan skyldes utilstrækkelig fugt, eller at limens åbentid er overskredet, eller at den opskummende lim er sunket sammen igen uden at have fået fat i mineralulden.

Som tidligere nævnt i afsnit 2.1.3 gør disse forhold en produktionskontrol nødvendig.

Limsvigt ytrer
sig ikke i
forringet stivhed

De ringere limforbindelser ytrer sig generelt ikke ved en forringet stivhed, førend belastningen nærmer sig brudlasten, hvilket tyder på, at svækkelserne i limforbindelsen er fordelt ud over elementet og kun i få tilfælde koncentrerer sig i større sammenhængende områder.

4.1.4 Dakelementer

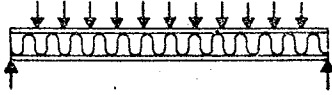


Dakelementernes styrke- og stivhedsegenskaber er undersøgt gennem en omfattende forsøgsserie, der skulle belyse betydningen af følgende parametre:

- mineraluldens styrke og stivhed
- kernetykkelsen
- flangestivheden
- spændvidden
- mineraluldens krybning
- belastningsniveauet
- langtidsbelastning
- kantafstivninger.

I det følgende resumeres disse undersøgelser, og resultaterne sammenlignes med teorien for sandwichelementer.

4.1.4.1 Korttidsforsøg



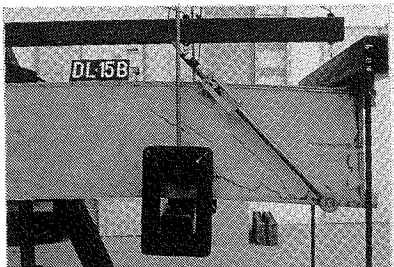
I [6] er beskrevet en serie bøjningsforsøg med simpelt understøttede dækelementer, der blev belastet med en tilnærmet jævnt fordelt fladelast voksende i trin fra nul indtil brud.

Dækelementerne havde en opbygning som et rent sandwichelement med endeskot (se figur 2.3.b). Elementerne blev forsynet med endeskot for at undgå en lokal knusning af mineraluldkernen ved understøtningerne.

Variant nr.	Kerne-materiale	Kerne-tykkelse mm	Flangetykkelse		Element længde m
			Over mm	under mm	
DK- 1	R80	300	12	12	4,00
DK- 2	G50	300	12	12	4,00
DK- 3	G70	300	12	12	4,00
DK- 4	G90	300	12	12	4,00
DK- 5	R100	300	12	12	4,00
DK- 6	R120	300	12	12	4,00
DK- 7	G50	200	12	12	4,00
DK- 8	G50	400	12	12	4,00
DK- 9	G50	300	16	16	4,00
DK-10	G50	300	16	12	4,00
DK-11	G50	300	12	12	2,67
DK-12	R80	300	12	12	2,67

Tabel 4.5: Oversigt over varianter.

Alle elementer var 60 cm brede, og som flangemateriale blev anvendt amerikansk krydsfinér, C-D interior, exterior glue - fabrikat BRAND S.

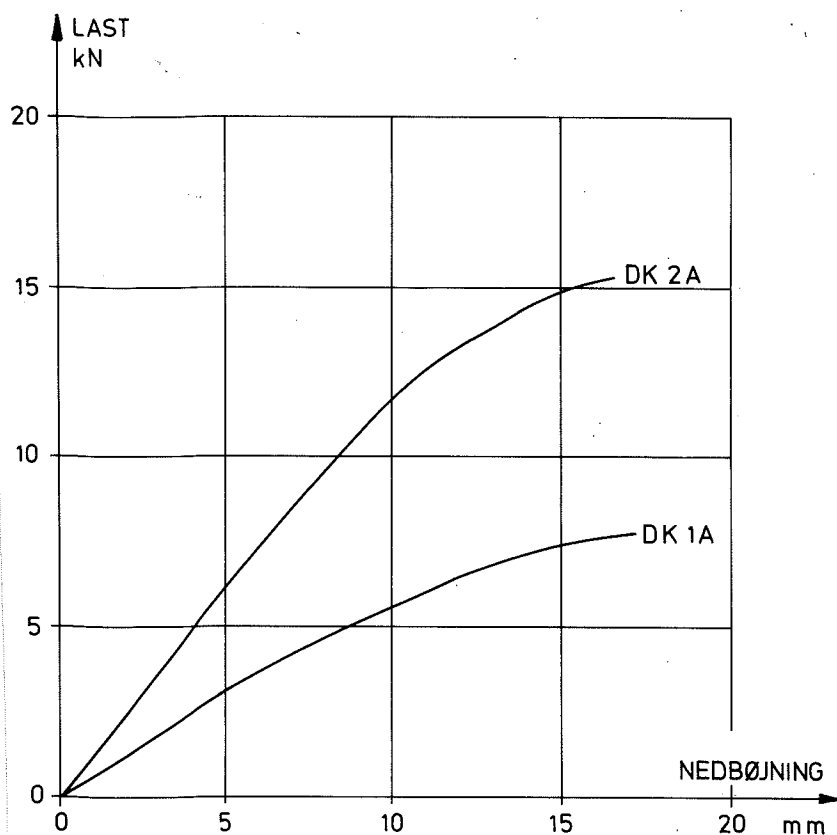


Der blev udført brudforsøg med 4 elementer af hver variant. Af hensyn til langtidstidsforsøgene blev der udført yderligere brudforsøg med variantnumrene 14 og 16, der er identiske med nr. 1 og med nr. 13 og 15, der er identisk med nr. 2.

Udover brudlasten blev nedbøjningerne målt, således at elementernes stivhed kunne bestemmes.

Arbejdslinier

På figur 4.2 er vist et par arbejdslinier fra forsøgene. Disse er lineære op til 50-60% af brudlasten og er analoge til de på figur 4.1 viste arbejdslinier for mineralulden.



Figur 4.2:

Typisk arbejdslinie for to forskellige varianter.

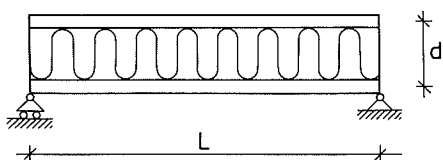
Brudårsager

Bruddene i alle forsøg skete som forskydningsbrud i de hårdest påvirkede snit ved understøtninger enten som brud i mineralulden, eller som brud i limforbindelsen.

Kernematerialets betydning

I de 6 første varianter er kernematerialet den eneste varierede parameter.

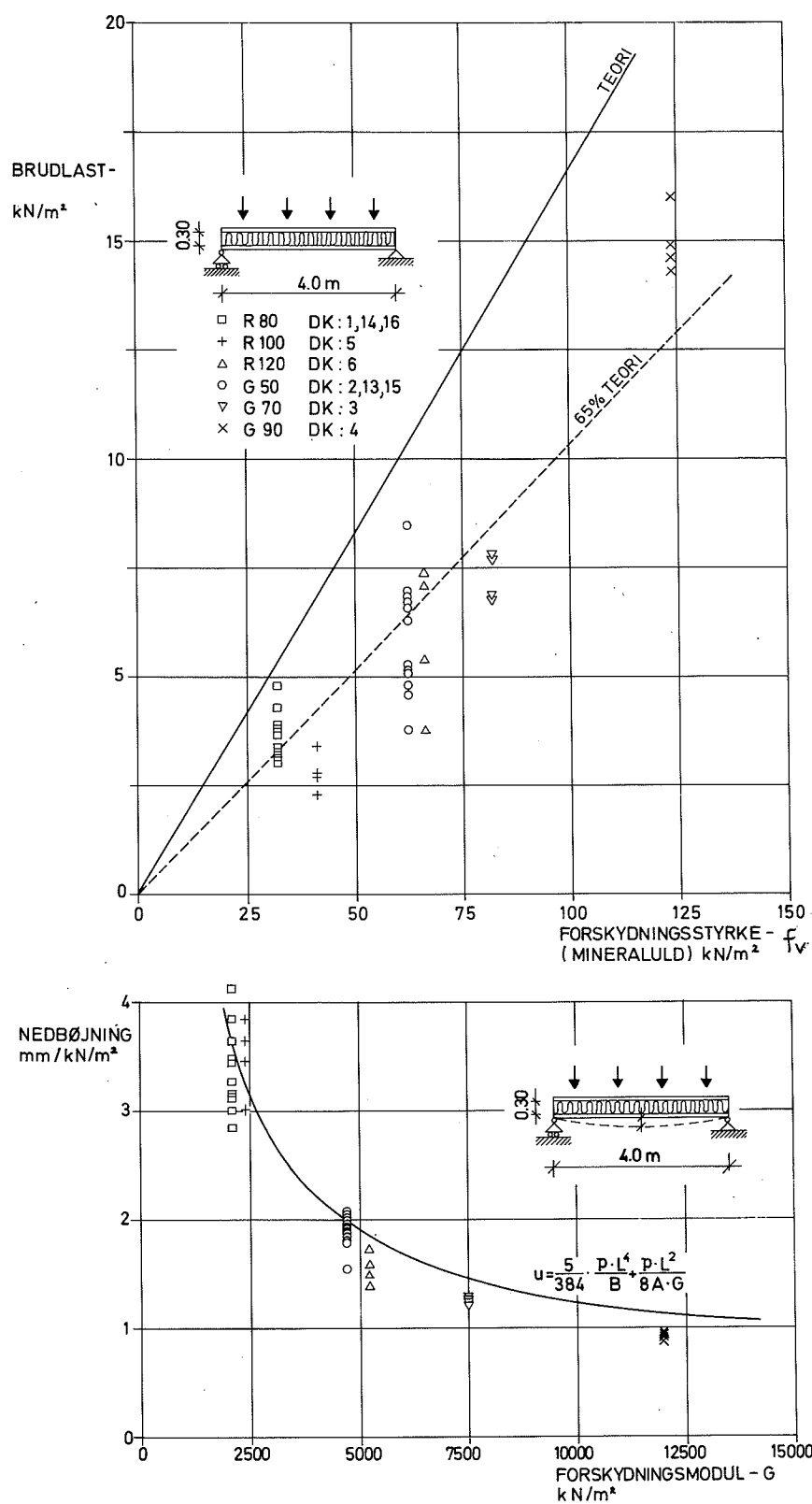
På figur 4.3 er vist de målte brudlaste og nedbøjninger som funktion af kernematerialets forskydningsstyrke, henholdsvis forskydningsstivhed.



(4-1)

I henhold til teorien for sandwichelementer, der er resumeret i [15], er brudlasten ved forskydningsbrud givet ved

$$p_u = f_v \frac{2d}{L}$$



Figur 4.3:

Mineraluldens indflydelse på elementernes styrke og stivhed.

Materialeparametrene for mineralulden er hentet fra [5] og for krydsfinéren fra [4].

hvor

P_u = brudlast, jævnt fordelt fladelast

f_v = forskydningsstyrken af kerne-
materialet

d = afstanden fra flangemidte til
flangemidte.

L = spændvidden.

Denne retlinede sammenhæng er indtegnet på figur 4.3.a. Desuden er indtegnet en punkteret linie bestemt ved lineær regression af de målte brudlaste. Denne linies hældning er ca. 65% af den teoretiske brudkurves. Der ville altså være bedre overensstemmelse mellem teori og målinger, hvis forskydningsstyrken i kernen kun skulle regnes lig med 65% af mineraluldens forskydningsstyrke, som det er bestemt i [5].

En undersøgelse af dakelementernes limforbindelser synes at vise, at denne reducerede forskydningsstyrke kan tilskrives dårlige limforbindelser, hvorfor disse i gennemsnit regnes at have en forskydningsstyrke på ca. 65% af mineraluldens.

Nedbøjningerne på midten kan ud fra teorien i [15] skrives:

(4-2)

$$u = \frac{5}{384} \frac{p b L^4}{B} + \frac{p b L^2}{8 A G}$$

hvor det første led benævnes bøjningsbidraget, medens det andet benævnes forskydningsbidraget.

p = fladelast

b = elementbredde

B = bøjningsstivhed (formel 4-5)

A = kropsareal (formel 4-4)

G = forskydningsstivhed af kerne.

På figur 4.3.b er denne sammenhæng indtegnet, og der ses at være en god overensstemmelse med de målte nedbøjninger (fra den lineære del af arbejdslinierne).

Kernetykkelsens
indflydelse

Afhængigheden af kernetykkelsen er vist på figur 4.4., hvor målte brudlaste og nedbøjninger fra tre varianter er vist.

Fra [15] haves:

(4-3)

$$d = k + 0,5(t_1 + t_2)$$

og

(4-4)

$$A \approx \frac{b d^2}{k}$$

hvor

k = kernetykkelse

$\left. \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \end{matrix} \right\}$ = flangetykkelserne

Indsættes (4-3) i (4-1) fås en næsten retlinet sammenhæng mellem brudlast og kernetykkelse.

Anvendes antagelsen om, at limforbindelsens forskydningsstyrke kun er 65% i gennemsnit af mineraluldens, ses der, at være en rimelig god overensstemmelse for tykkelserne 20 og 30 cm, medens elementerne med kernetykkelser på 40 cm har en væsentlig mindre brudlast end teorien giver.

Den enkle brudhypotese (4-1) kan således ikke anvendes på elementer med denne kernetykkelse. I [6] er der angivet en række årsager, der kan forklare den ringere bæreevne for disse relativt tykke elementer.

Indsættes (4-4) i (4-2) fås stivhedens afhængighed af kernetykkelsen, som vist på figur 4.4.b, og der ses at være en god overensstemmelse for alle tre kernetykkelser.

Flangestivhedens betydning

Flangetykkelsen og dermed flangestivhedens indflydelse er vist på figur 4.5, idet der som abscisse er anvendt elementernes bøjningsstivhed B . Denne er givet ved:

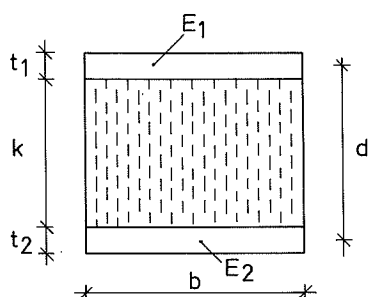
(4-5)

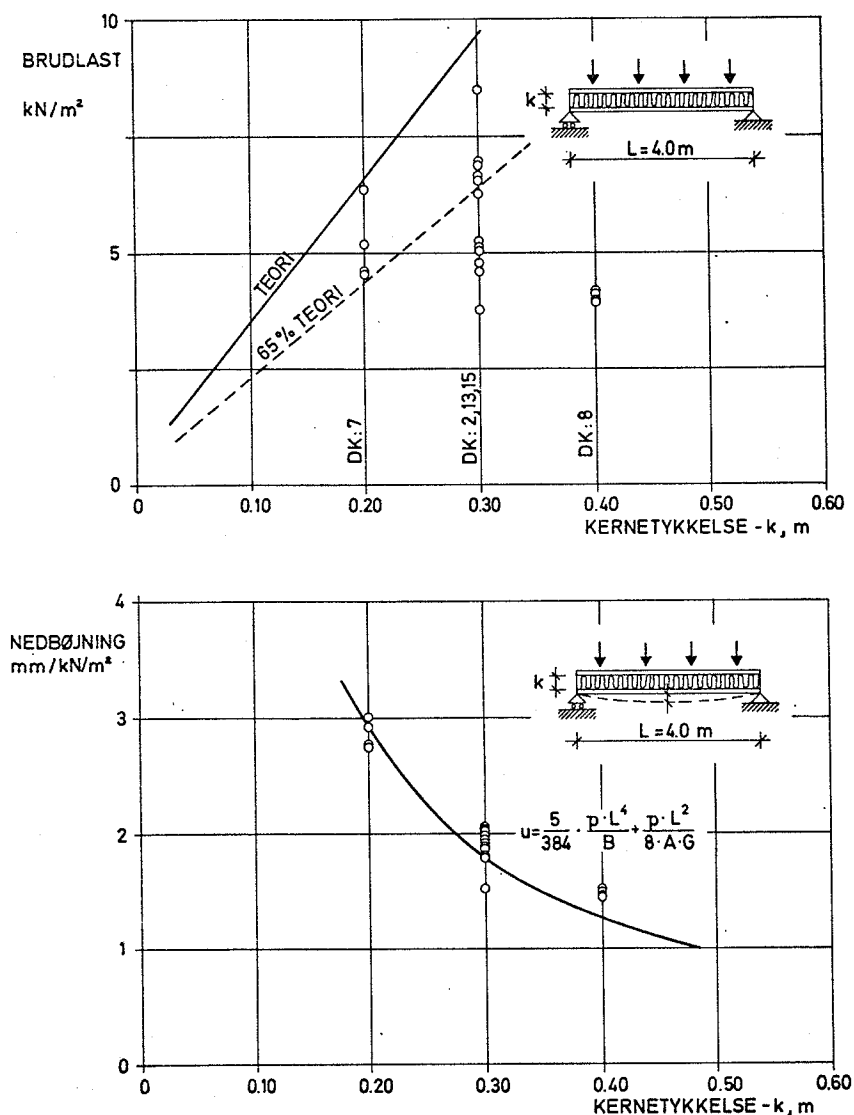
$$B \approx b \frac{E_1 t_1 E_2 t_2}{E_1 t_1 + E_2 t_2} d^2$$

hvor

$\left. \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \end{matrix} \right\}$ = Flangematerialernes E-moduler

Mellem variant nr. 2, nr. 9 og nr. 10 er flangetykkelserne, den eneste ændrede parameter (med den tilhørende ændring af flange-E-modulen).





Figur 4.4:

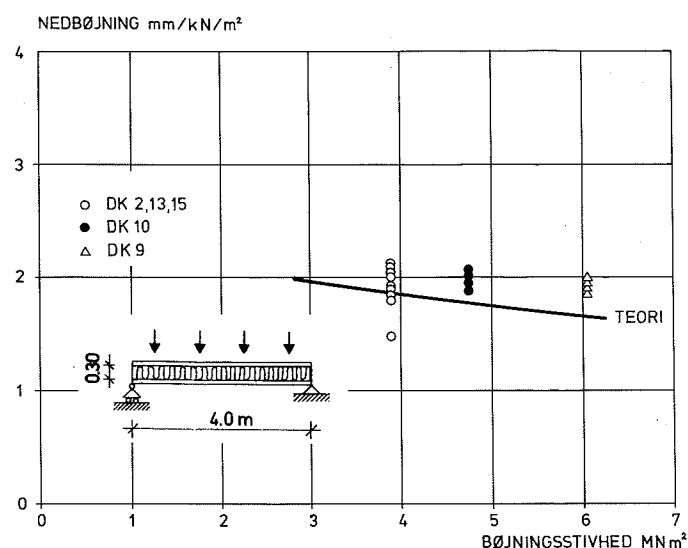
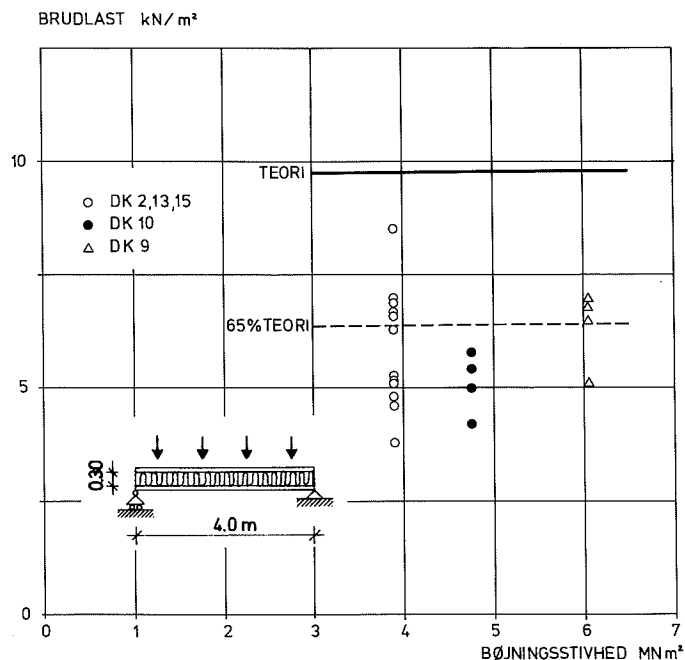
Kernetykkelsens indflydelse på elementernes styrke/stivhed.

Disse ændringer ses stort set at være uden betydning for brudlasten og stivheden i de betragtede intervaller for bøjningsstivheden B .

For stivheden ses der fortsat at være en god overensstemmelse, medens den målte brudlast ligger på 50-70% af den beregnede.

Spændviddens betydning

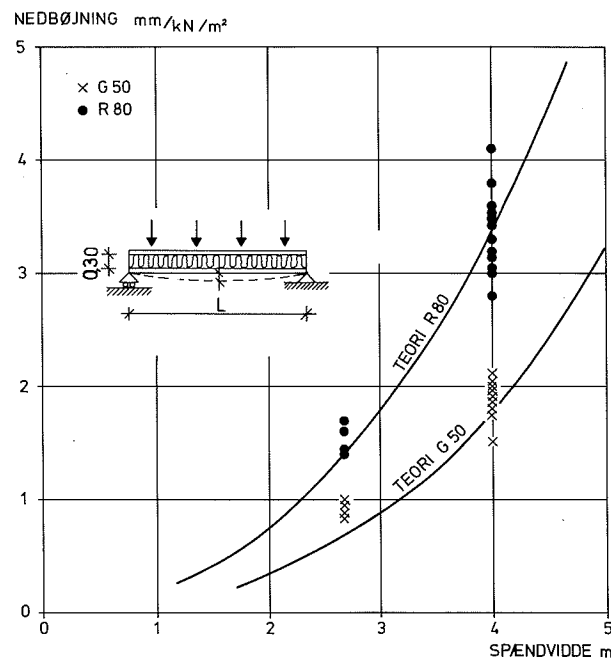
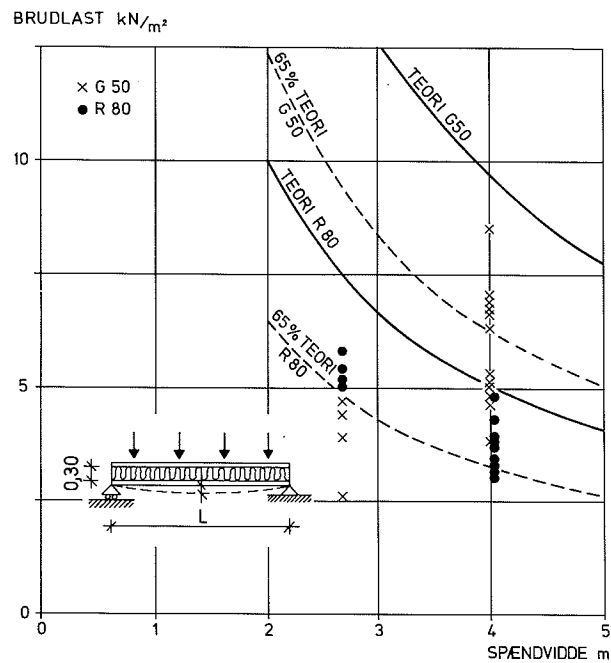
Spændviddens betydning er mere mærkbar, som vist på figur 4.6. Der er igen rimelig god overensstemmelse mellem målt og beregnet stivhed. Styrkemæssigt ses det atter, at målte brudlaste er 50-70% af



Figur 4.5:

Flangestivhedens indflydelse på elementernes styrke/stivhed.

de beregnede, på nær DK11-elementerne, hvor den målte brudlast kun er 20-40% af den beregnede. En adskillelse af disse elementer efter forsøgene viste, at limforbindelserne var markant dårligere end gennemsnittet, hvorfor den betydelige afvigelse fra den beregnede brudlast sandsynligvis kan tilskrives dette forhold alene.



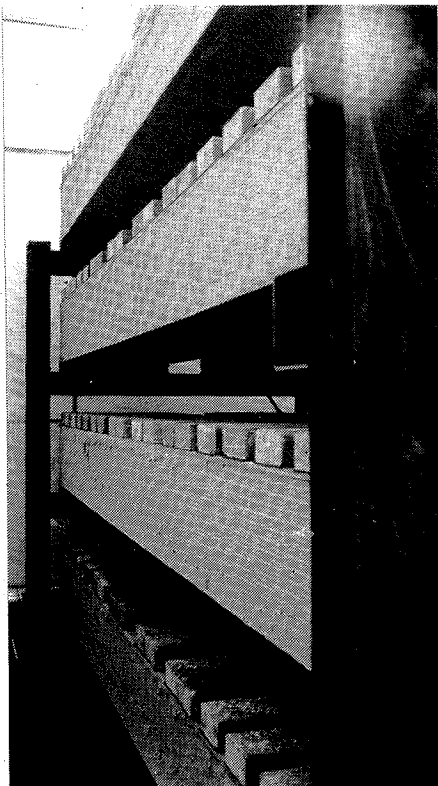
Figur 4.6:

Spændviddens indflydelse på elementernes styrke/stivhed.

Konklusion

Sammenligninger mellem beregnede og målte størrelser viser, at der er en rimelig god overensstemmelse for stivhedens vedkommende. Styrkemæssigt vil der være overensstemmelse, hvis limforbindelsen kan regnes at have en forskydningsstyrke, der er ca. 65% af kernematerialets forskydningsstyrke.

4.1.4.2 Langtidsforsøg



Parallelt med de i forrige afsnit omtalte korttidsforsøg blev der udført forsøg med dækelementer, der blev udsat for konstant eller vekslende belastning i et år, hvorefter de blev bøjningsbelastet til brud (se [6]).

De langtidsbelastede elementer havde samme geometri og opbygning som korttidsvarianterne nr. 1, nr. 2, nr. 4 og nr. 6, d.v.s. at alle var 4 m lange, 0,6 m brede, med kernetykkelse 30 cm og med 12 mm flanger. Det eneste, der er varieret, er kernematerialet.

Elementerne blev belastet, som vist i oversigten i tabel 4.6. Der er tale om enten statisk belastning i to forskellige niveauer eller om en statisk belastning overlejret med en vekslende belastning.

Det lave statiske niveau (egenlast + $1,00 \text{ kN/m}^2$) svarer til den typiske, karakteristiske belastning på et dækelement i en bolig.

Nr.	Kernemateriale	Langtidsbelastning
DL-1	R80	egenlast + $1,00 \text{ kN/m}^2$ (statisk)
DL-2	G50	
DL-4	R90	
DL-6	R120	
DL-13	G50	egenlast + $0,25 \text{ kN/m}^2$ (statisk) + $0,75 \text{ kN/m}^2$ (vekslende)
DL-14	R80	
DL-15	G50	egenlast + $2,20 \text{ kN/m}^2$ (statisk)
DL-16	R80	

Tabel 4.6:

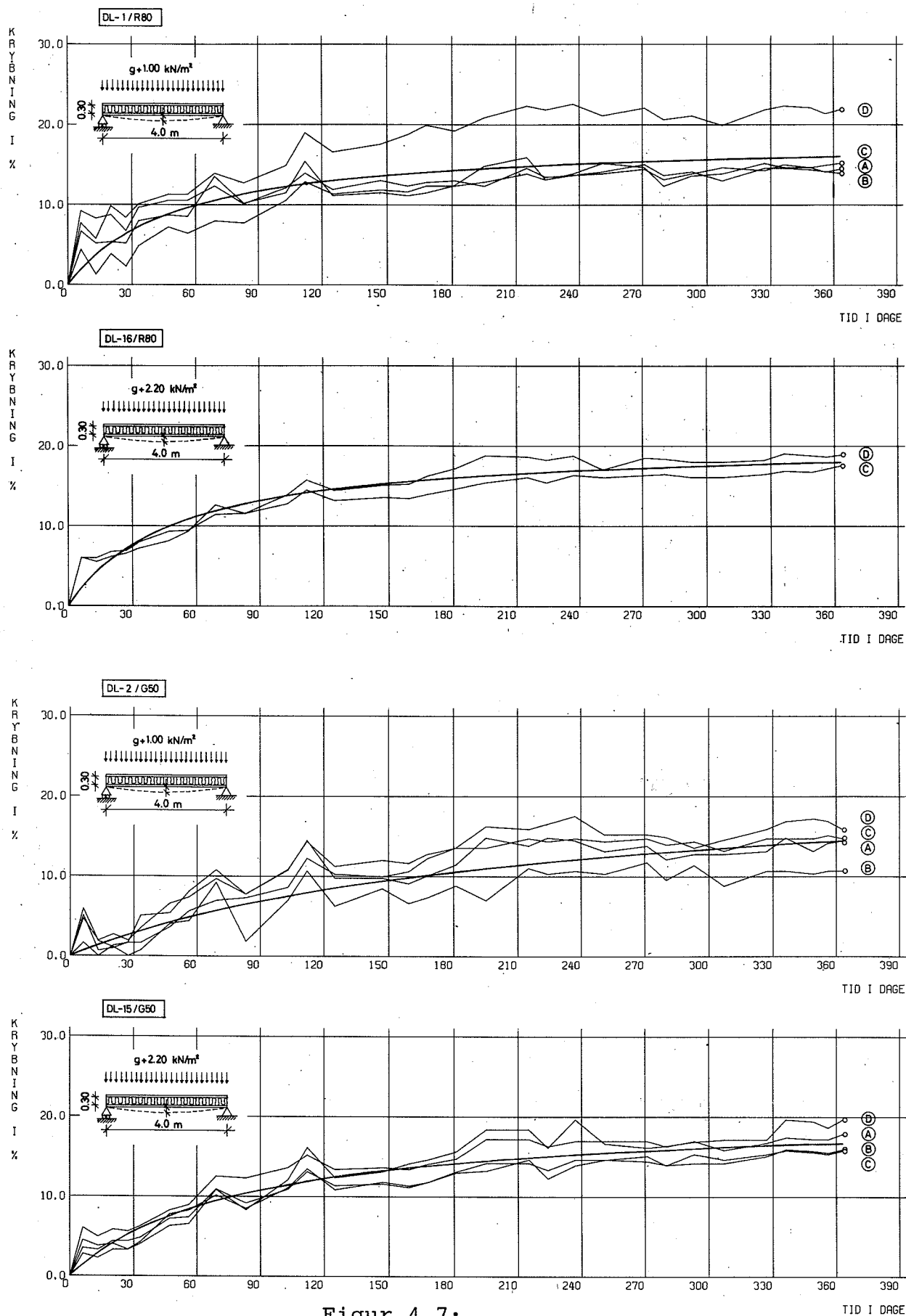
Oversigt over langtidsbelastede varianter.

Den vekslende belastning påføres efter følgende cyklus:

7 uger: egenlast + $0,25 \text{ kN/m}^2$

1 uge : egenlast + $1,00 \text{ kN/m}^2$

og skal simulere snelastens variation på tagelement.



Figur 4.7:

Krybeforløbet ved to forskellige lastniveauer med to forskellige kernematerialer. Kilde: [6].

I lighed med korttidsforsøgene blev der udført forsøg med 4 elementer af hver variant.

Forsøgene fandt sted i et klimarum med $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og en relativ fugtighed på $65\% \pm 3\%$.

Nedbøjninger, tykkelsesændringer og flangetøjninger blev løbende registreret i det år, elementerne var belastede, hvorved krybeforløbet kunne optegnes og analyseres.

Krybning

På figur 4.7 er vist krybeforløbet for to forskellige dakelementvarianter med de to lastniveauer. Som det fremgår, synes den væsentligste del af krybningen (ca. 90%) at have fundet sted i løbet af det første år. Endvidere synes krybningens størrelse at være uafhængig af lastniveauet for belastninger op til ca. 50% af brudlasten.

Nedbøjningstilvæksten efter 1 år er 14-19% af initialnedbøjningen.

Vekslende last

Krybeforløbet ved vekslende last viste, at det stort set var uafhængig af belastningens vekslende karakter.

Da forskydningsbidraget udgør den væsentligste del af nedbøjningen, og da træs krybning ved konstant fugtighed udgør nogle få procent, kan dakelementernes krybning stort set tilskrives mineraluldens krybning alene.

Efter at langtidsbelastningen var blevet fjernet igen, blev dakelementerne bøjningsprøvet til brud i lighed med de i afsnit 4.1.4.1 omtalte elementer. En sammenligning af brudlaste og stivheder fra de to serier viser, at der stort set ingen ændring er sket, ved at elementer har været udsat for langtidslast.

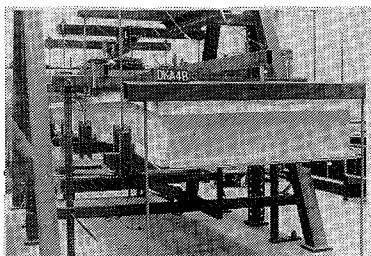
4.1.4.3 Bøjningsforsøg med dakelementer med kantafstivning

Bøjningsforsøgene med dakelementer i form af tilnærmelsesvis rene sandwichelementer er i mindre omfang blevet suppleret med forsøg med dakelementer med sideskot.

Nr.	Bredde mm	Kerne- materiale	Bemærkninger
DKA-1	600	luft	
DKA-2	600	G50	
DKA-3	119	luft	
DKA-4	1200	G50	
DKA-5	1200	G30	
DKA-6	1200	G50	Lameller på tværs
DKA-7	1200	G50	Også skot i midten
DKA-8	1200	luft	

Tabel 4.7:

Oversigt over varianter. DKA-2, -4 og -5 er opbygget som figur 2.4.c. DKA-6 som figur 2.4.d.

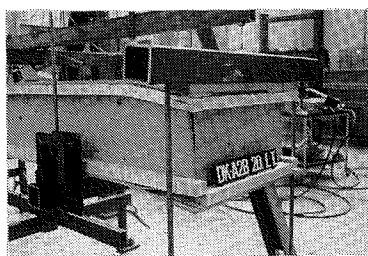


Alle elementer var 4 m lange, kernetykkelsen var 295 mm, og der er til såvel flanger som side- og endeskot anvendt 12,0 mm tykt 5-lags amerikansk krydsfinér, C-D interior, exterior glue. Som kantlister blev anvendt 35×45 mm lister af uklassificeret konstruktionstræ.

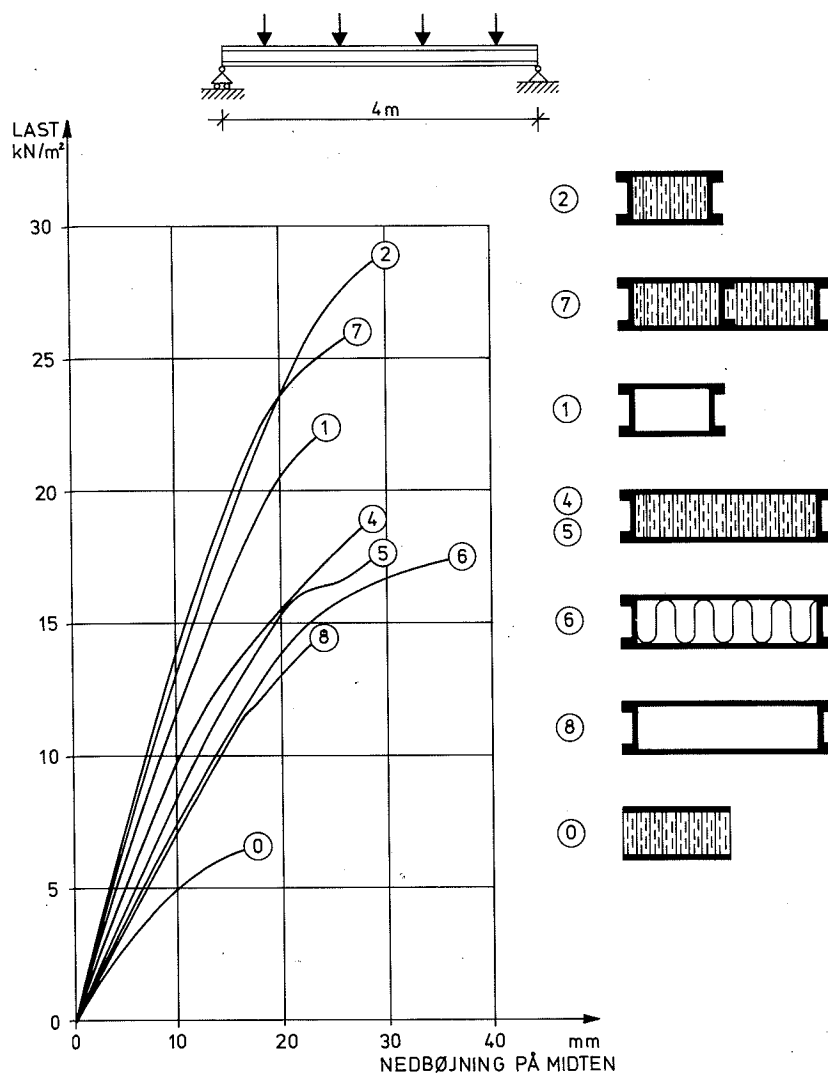
Forsøgene er nærmere beskrevet i [14] og skulle bl.a. belyse virkningen af at forsyne sandwichelementerne med kantafstivninger eller stressed-skin elementer med en kerne limet til flangerne.

Der er derfor prøvet elementer med og uden mineraluldkerne i to forskellige bredder (DKA-1, -2, -4, -5, -6 og -8). I de brede elementer er også kernematerialets stivhed varieret (DKA-4 og -5) og ligeledes dets orientering (DKA-4 og -6).

De to sidste varianter DKA-3 og -7 skulle belyse, dels det rene kantbjælkebidrag, dels virkningen af et indre langsgående skot i de brede elementer.



På figur 4.8 er optegnet typiske arbejds-linier for hver variant, idet lasten er omregnet til en ækvivalent fladelast. DKA-3 er udeladt, og til gengæld er arbejds-linien for et rent sandwichelement (DK-2) medtaget til sammenligning.



Figur 4.8:

Arbejdslinier for dækelementerne med kantskot. Numrene svarer til elementernes DKA-numre. Nr. 0 er et rent sandwichelement med kerne G50 (DK-2, se tabel 4.5). Belastningen er omregnet til ækvivalent fladelast.

Som det fremgår, har mineraluldkernen en mærkbar virkning på såvel stivhed som brudlast.

I tabel 4.8 er angivet de målte brudlaste og begyndelsesstivheder, suppleret med beregnede værdier.

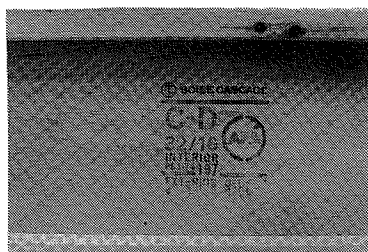
Beregningsmodel

Som beregningsmodel er anvendt den i Trænormen (DS 413) angivne model, der kun tillader $L/14 \approx 29$ cm af flangen medregnet som effektiv på hver side af kroppen. I beregningsmodellen er der ikke medtaget en foldningsundersøgelse, hvilket i Trænormen fordres for flanger med en afstand mellem kroppene på mere end 30×12 mm = 360 mm.

Variant	Brudlast kN/m ²		Stivhed mm/kN/m ²	
	Målt	Beregnet	Målt	Beregnet
DKA-1	27	35	0,95	0,69
DKA-2	32	35	0,85	0,69
DKA-3	173	106	0,29	0,38
DKA-4	19	18	1,04	1,32
DKA-5	17	18	1,22	1,32
DKA-6	18	18	1,32	1,32
DKA-7	24	31	0,75	0,80
DKA-8	14	18	1,46	1,32

Tabel 4.8:

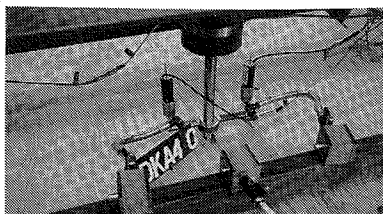
Målte og beregnede brudlaste og stivheder (middel af tre forsøg med hver variant). Brudlasten er for sammenligningens skyld omregnet til en ækvi-valent fladelast. Stivheden angiver hældningen på arbejdsliniens første retlinede stykke.



De materialeleværdier, der er anvendt i beregningerne, er hentet i [4], hvor en undersøgelse af den anvendte krydsfinér er beskrevet.

Det fremgår af tabel 4.8, at der er en rimelig god overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier for brudlastens vedkommende, medens der for stivhederne er en knapt så god overensstemmelse. Tages der hensyn til variationen på de indgående materialeparametre, kan der næppe ud fra disse relativt få forsøg uddrages en markant forskel mellem varianter med og uden mineraluldkerne.

Koncentreret last



Konklusion

Forsøg med en koncentreret enkeltkraft i overensstemmelse med de i [7] angivne retningslinier er udført med enkelte elementvarianter og er beskrevet i [14]. Disse undersøgelser viser, at varianterne uden mineraluld (DKA-1 og -8) og varianten (DKA-5) med G30-kerne ikke kan opfylde stivhedskravet over koncentreret last.

Sammenfattende kan der derfor konkluderes, at sandwichdækelementer med kantafstivning og med mineraluldkerne svarende til G50 eller stivere kan beregnes efter Trænormen, idet der ses bort fra normens krav til flangetykkelsen med tilhørende foldnings-

undersøgelse. Normens styrke- og stivhedskrav overfor koncentreret enkeltkraft kan ligeledes opfyldes med 12 mm krydsfinér-flanger, når kernen er af G50 eller tilsvarende.

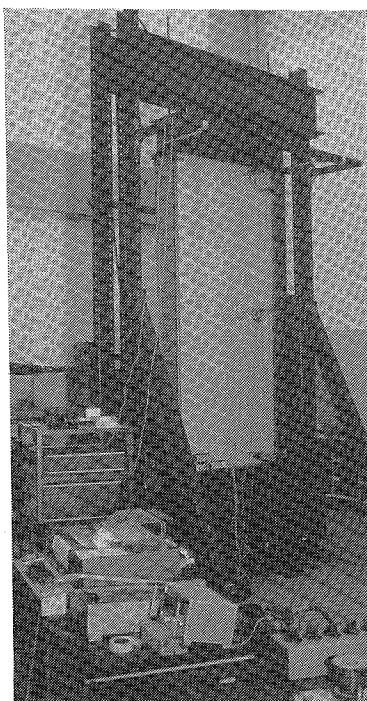
4.1.5 Vægelementer

Vægelementernes styrke- og stivhedsegenskaber er kun i begrænset omfang undersøgt inden for TR-projektets rammer. Imidlertid blev der før projektets start udført en række bæreevneforsøg med vægelementer udformet som rene sandwichelementer, som er beskrevet i [13].

Disse forsøg viste, at mineraluldbaserede vægelementer har en bæreevne, der er rigtig til de bygningstyper, som kunne komme på tale. Som led i TR-projektet er disse undersøgelser blevet suppleret med en teoretisk analyse af vægelementernes styrke og stivhed samt med en brandteknisk undersøgelse. Dertil kommer, at vægelementernes afstivende virkning er blevet undersøgt i et eksamensprojekt ved Instituttet for Husbygning.

I det følgende sammenfattes resultaterne af disse undersøgelser.

4.1.5.1 Bærende vægelementer



Bæreevneforsøgene blev udført med 2,4 m høje og 1,2 m brede, rene sandwichelementer. Elementerne var tilnærmelsesvis simpelt understøttede foroven og forneden, og blev belastet med en jævnt fordelt linielast.

Forsøgene skulle belyse betydningen af følgende parametre:

- kernetykkelsen
- mineraluldens styrke og stivhed
- flangestivheden
- forskel i flangestivhed
- belastningens excentricitet

og der blev udført korttidsbrudforsøg med 11 forskellige varianter, som specificeret i tabel 4.9. Der blev udført 3 forsøg med hver variant.

Flangerne var af amerikansk krydsfinér, A-C Group 1, exterior glue.

Udover brudlasten blev sammentrykningen af flangerne og udbøjningen ud af planet målt.

Variant nr.	Kerne-materiale	Kerne-tykkelse mm	Flangetykkelse		Belastning
			mm	mm	
V- 1	R80	100	12,6	12,6	Central
V- 2	R80	200	12,6	12,6	Central
V- 3	R80	300	12,6	12,6	Central
V- 4	R60	200	12,6	12,6	Central
V- 5	R100	200	12,6	12,6	Central
V- 6	R80	200	6,2	6,2	Central
V- 7	R80	200	15,6	15,6	Central
V- 8	R80	200	12,6	6,2	Central
V- 9	R80	200	15,6	6,2	Central
V-10	R80	200	12,6	12,6	Excentrisk
V-11	R80	200	12,6	6,2	Excentrisk

Tabel 4.9:

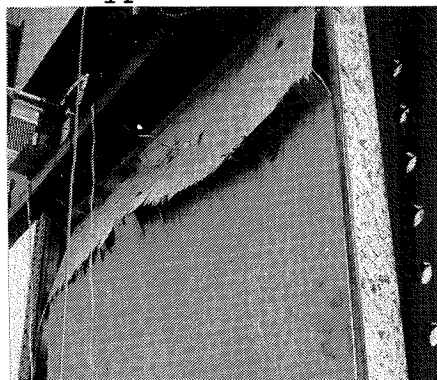
Oversigt over varianter

Arbejdslinier

På figur 4.9 er vist tre typiske arbejds-
linier fra forsøgene. Det er flangerens
sammentrykning i middel for de to flanger,
og de tre eksempler svarer til tre for-
skellige flangetykkelser (flangestivheder).
Arbejdslinierne for sammentrykning ses at
være lineære helt op til brud.

Arbejdslinierne for udbøjningen ud af pla-
net (se figur 4.10) er derimod ikke-lineære.

Brudtyper

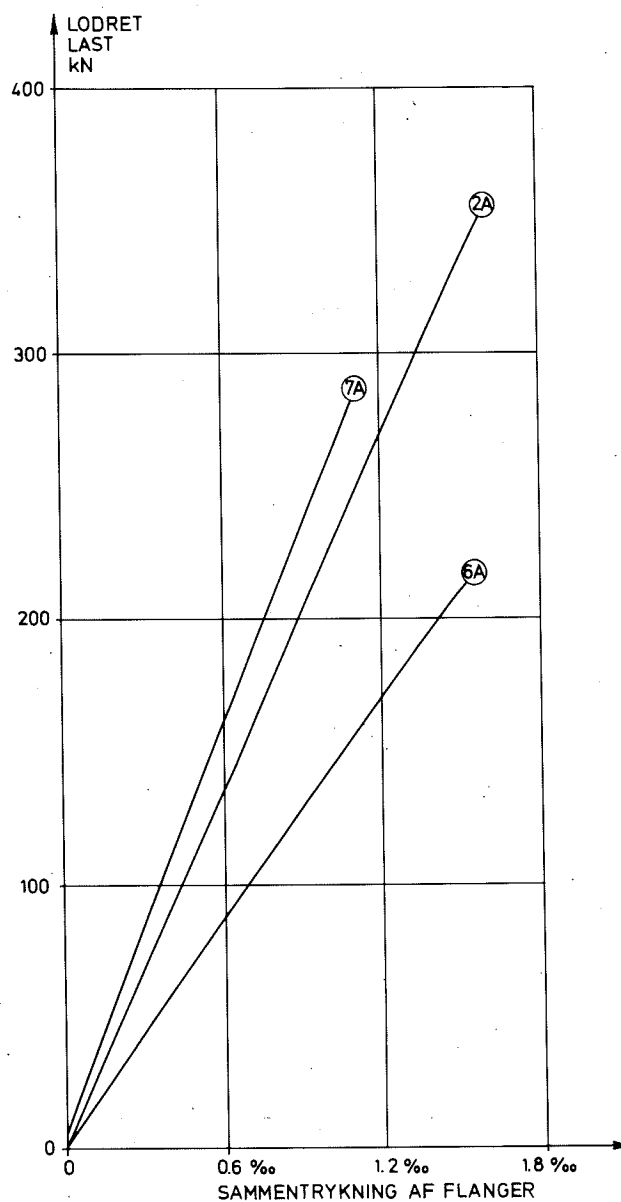


De typiske brud, der kan komme på tale, er
stabilitetsbrud for hele vægelementet, sta-
bilitetsbrud i flangerne, trykbrud i flan-
gematerialet og forskydningsbrud i kerne-
materialet. Det kan i mange tilfælde være
vanskeligt at fastlægge, hvilken brudtype
et givet brud hører til, men der er i [13]
angivet det bedste skøn for hvert enkelt
vægelement.

I det følgende sammenlignes nogle af for-
søgsresultaterne med den i [15] beskrevne
teori for sandwichvægelementer.

Flangesammen-
trykning

I de fem første varianter er der anvendt
12,6 mm tykke flanger, som under forsøget
er udsat for rent tryk, hver belastet med
halvdelen af den samlede vægbelastning,
idet kernen antages ikke at overføre lod-
ret last. Sammentrykningen af flangerne
giver derfor mulighed for at beregne flan-
gernes E-modul for tryk. Resultatet er
vist i tabel 4.10.



Figur 4.9:

Arbejdslinier for flangesammentrykning variant V2, V6 og V7.

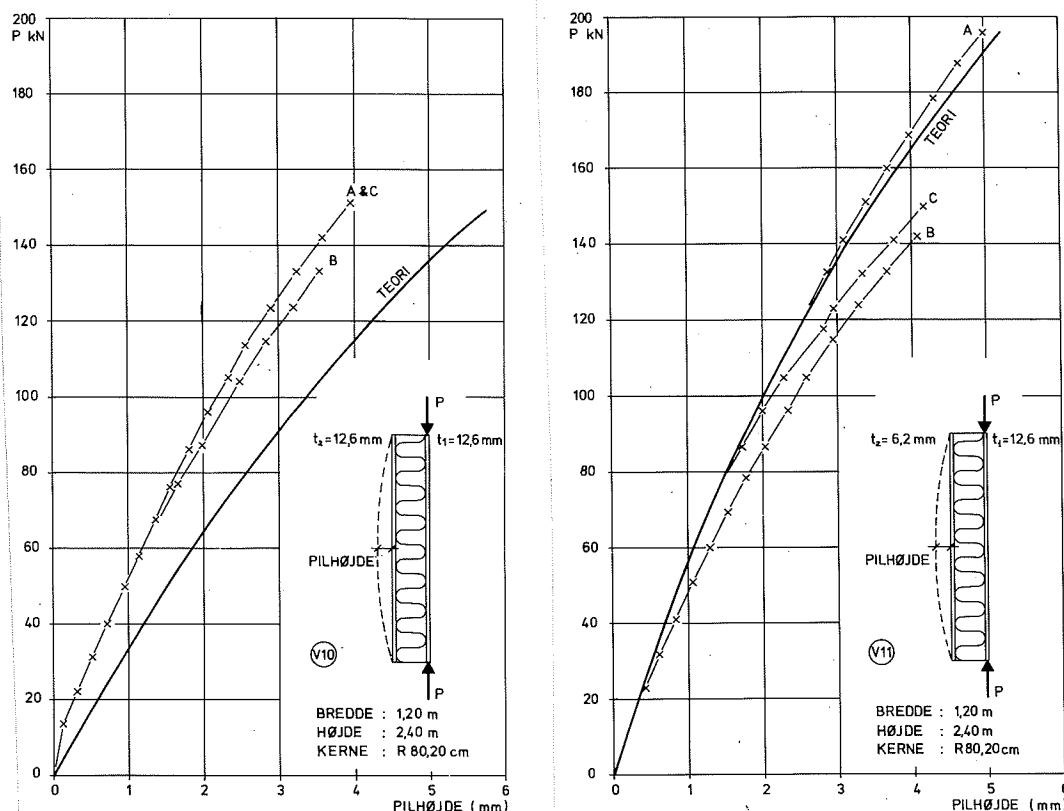
Variant nr.	E_{co} N/mm ²	Middel-værdi
V-1	7950	8330
V-2	7520	
V-3	6990	
V-4	8860	
V-5	10330	

Tabel 4.10:

E-modul for 12,6 mm flanger bestemt ud fra vægelementforsøg.

I [4] er beskrevet trykprøvning af prøvelegemer fra den samme krydsfinérleverance, og der er fundet $E_{co} = 7830 \text{ N/mm}^2$ med en variationskoefficient på 11%.

En anden stivhedssammenligning er vist på figur 4.10.



Figur 4.10:

Målt og beregnet pilhøjde for excentrisk belastede vægelementer

Det drejer sig om vægelementernes udbøjning ud af planet. I næsten alle forsøg skete der en udbøjning ud af planet, idet det forsøgsteknisk ikke var muligt at etablere en perfekt centreret belastning, men i forsøgene med de to sidste varianter blev belastningen kun påført den ene flange, hvorfor lastexcentriciteten var rimelig veldefineret. På figur 4.10 er dels vist beregnede udbøjninger, dels målte fra variant V10 og V11.

Udbøjningen midt på vægelementet kan i henhold til den i [15] beskrevne teori skrives:

$$(4-6) \quad u_{\max} = e \frac{1 - \cos \beta \frac{L}{2}}{\cos \beta \frac{L}{2}}$$

hvor

$$(4-7) \quad \beta^2 = \frac{P}{B(1 - \frac{P}{AG})}$$

og

e = lastexcentricitet

L = elementhøjde (søjlelængde)

P = lasten,

medens de resterende størrelser tidligere er defineret.

Under hensyntagen til spredningen på de indgående materialeparametre må der siges at være en rimelig god overensstemmelse mellem teorien og målingerne.

I henhold til teorien vil vægelementernes brudlast være bestemt ved

$$(4-8) \quad P_{EG} = \frac{P_E}{1 + \frac{P_E}{AG}}$$

eller

$$(4-9) \quad P_{\sigma} = t b f_{cc} \frac{2 \cos \beta \frac{L}{2}}{\cos \beta \frac{L}{2} + \frac{2e}{d}}$$

eller

$$(4-10) \quad P_{\tau} = f_v \frac{b d}{e \beta} \cot \beta \frac{L}{2}$$

hvor

P_E = Eulerlasten = $\left(\frac{\pi}{L}\right)^2 B$

f_{cc} = flangens kritiske trykspænding

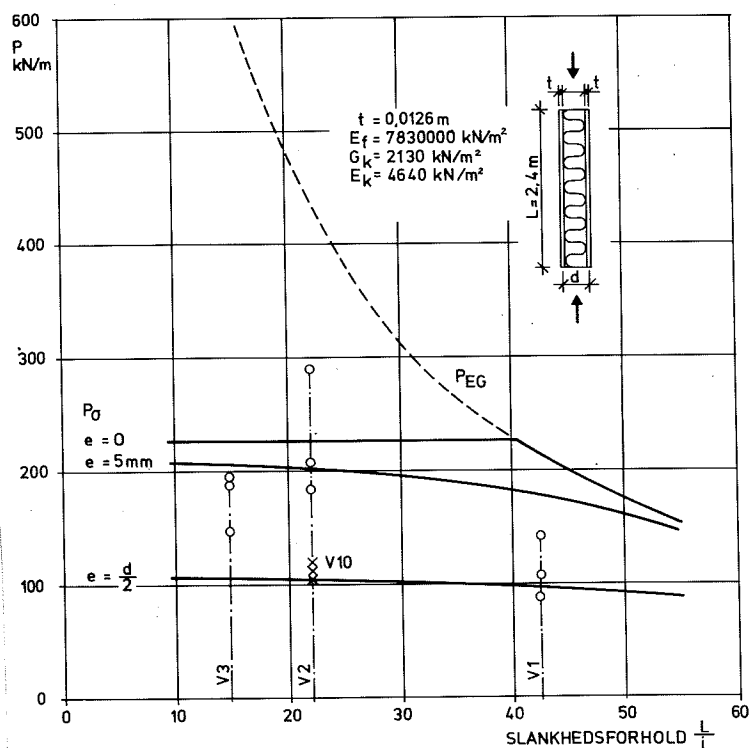
f_v = kernens forskydningsstyrke

P_{EG} angiver stabilitetslasten for elementet som helhed, når forskydningsdeformationerne også tages i regning.

P_0 angiver den belastning, der svarer til, at flangespændingen i den hårdest påvirkede flange er lig med f_{cc} . Brudårsagerne i dette tilfælde kan enten være, at der opstår trykbrud i flangen, eller at flangens stabilitetslast (foldelast) er nået. Den angivne formel gælder kun for elementer med ens flanger.

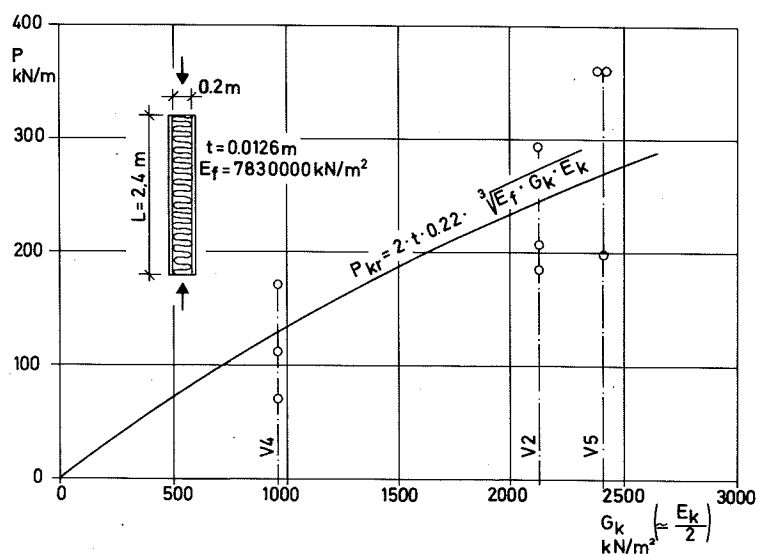
P_T angiver den belastning, der svarer til, at kernens maksimale forskydningsspænding er lig med kernens eller limforbindelsens forskydningsstyrke f_v .

På figur 4.11 er vist bæreevnens afhængighed af kernetykkelse, mineraluldens forskydningsstivhed, flangetykkelsen og belastningens excentricitet.



Figur 4.11.a:

Målt og beregnet bæreevne for vægelementer. V1, V2 og V3 var tilstræbt centralt belastede, medens V10 blev belastet på den ene flange. Herudover er kun kernetykkelsen varieret.

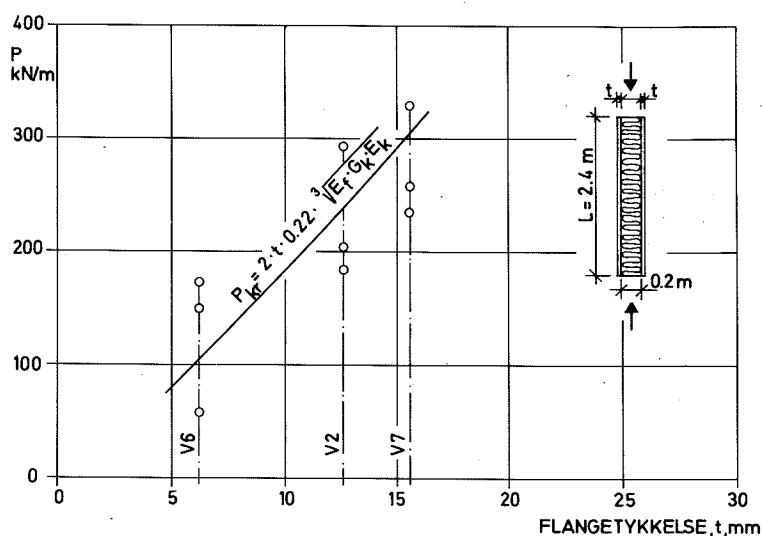


Figur 4.11.b:

Bæreevnens afhængighed af kernens stivhed.

Den indtegnede kurve er fastlagt ved en regressionsanalyse af hele forsøgsmaterialet og svarer til P_{σ} med $e = 0$, d.v.s.

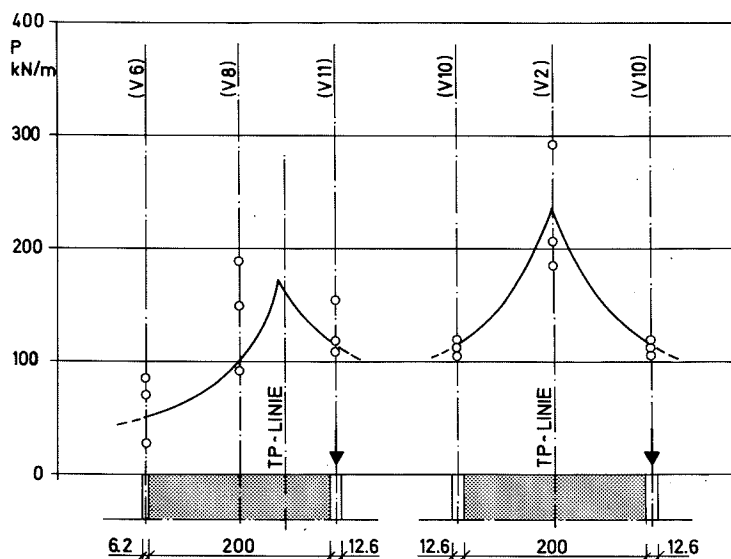
$$P_{\sigma} = 2 f_{cc} b t$$



Figur 4.11.c:

Bæreevnens afhængighed af flangetykkelsen.

Se i øvrigt tekst til figur 4.11.b.



Figur 4.11.d:

Bæreevnens afhængighed af belastningens ekscentricitet. Kurverne svarer til P_{σ} .

Det har vist sig, at i de omtalte forsøg kan kun P_{EG} og P_{σ} komme på tale, og den første endda kun for relativt slanke elementer.

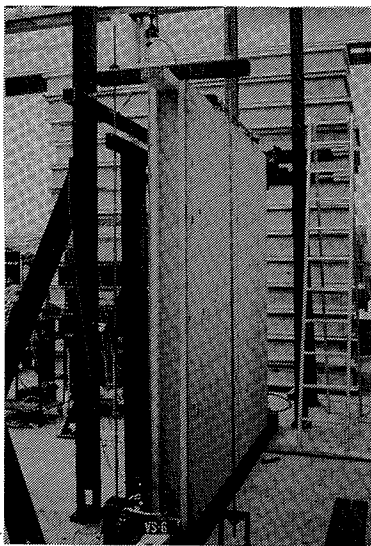
Den kritiske foldespænding σ_u for flangerne kan vises at afhænge af flangematerialets stivheder E_f og af kernematerialets stivheder E_k og G_k på følgende måde:

$$(4-11) \quad f_{cc} = \psi \sqrt[3]{E_f E_k G_k},$$

hvor faktoren ψ i disse tilfælde kan betragtes som en konstant. Ved en regressionsanalyse af en udvalgt del af måleresultaterne er faktoren fastlagt til $\psi = 0,22$. P_{σ} 's forløb i figurerne er beregnet ud fra denne værdi af f_{cc} .

Når den spredning, der uvilkaarligt forekommer ved "centrale" søjleforsøg, tages i betragtning, synes den anvendte teori med rimelig tilnærmelse at beskrive elementernes brudforhold.

4.1.5.2 Afstivende vægelementer



Undersøgelsen af sandwichelementernes ydeevne [16] som afstivende konstruktion omfattede dels elementernes styrke ved ren forskydningspåvirkning, dels styrken og stivheden af et par mulige samlingsdetaljer.

To 2,4 m høje og 1,2 m brede rene sandwichelementer med henholdsvis R80 og G50 kerne blev på den ene flange via stålsker udsat for en ren forskydningspåvirkning. Kernetykkelsen var 195 mm, og flangerne af amerikansk krydsfinér, 12,6 mm tykke.

De to sandwichelementer blev belastet med op til 40-45 kN/m langs kanterne, uden at der kunne konstateres tendens til foldning eller anden svigt.

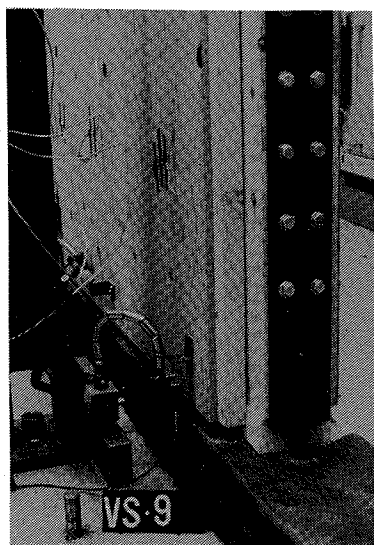
Et kasseelement uden mineraluldkerne blev til sammenligning udsat for en tilsvarende forskydningspåvirkning og viste ved ca. 50 kN/m tydelig tendens til foldning i den ene flange.

Da det således blev konstateret, at elementerne i sig selv havde den fornødne forskydningsstyrke, blev det næste skridt at undersøge, hvordan flere elementer kunne virke sammen.



Der skal ikke her gøres rede for, hvorfor det blev netop de samlinger, der er antydet på tabel 4.10, som blev undersøgt. Alle elementerne blev udført som sandwich-elementer med kantforstærkning (se figur 2.5.d) og afprøvet parvis.

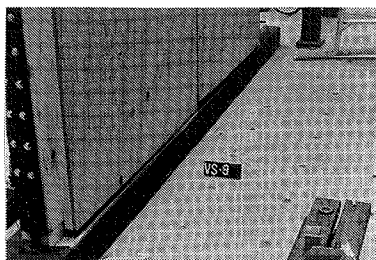
De to elementer blev placeret på en gennemgående fodrem og sømmet til dennes ene side (kamsøm 40/100 pr.45 mm). Tilsvarende blev elementerne foroven sømmet til en toprem i den ene side. Topremmen var i det første forsøg gennemgående, medens den var "afbrudt" ved elementsamlingen i de resterende for at begrænse remmens lodrette forskydningsoverførsel mellem elementerne.



Samlingen mellem elementerne blev i det første forsøg udført uden mulighed for kraftoverførsel. I de resterende kunne flangekræfterne overføres via en sømlimet krydsfinérflaske, eller ved at det ene elements flange overlappede det andets lodrette kantliste, hvorved en sømsamling kunne etableres.

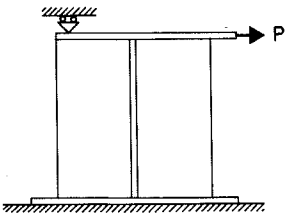
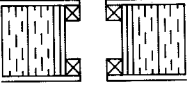
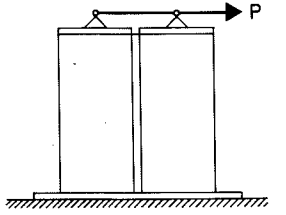
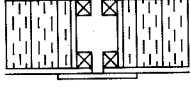
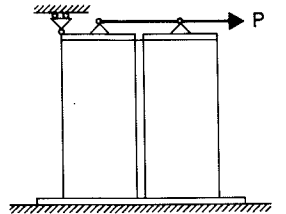
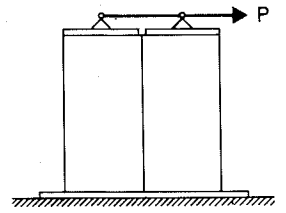
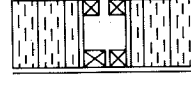
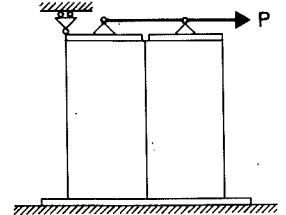
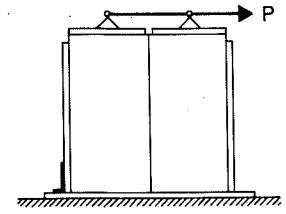
I fire forsøg (1, 3, 5 og 6) er de sammenbyggede elementer understøttet mod lodret bevægelse i den ene ende for at simulere effekten af naboelementer.

Som det fremgår af de angivne maksimallaste i tabel 4.10, vil sandwichelementer kunne udgøre den afstivende konstruktion i en én-etages bygning, hvis samlingerne udføres tilstrækkeligt stærke.



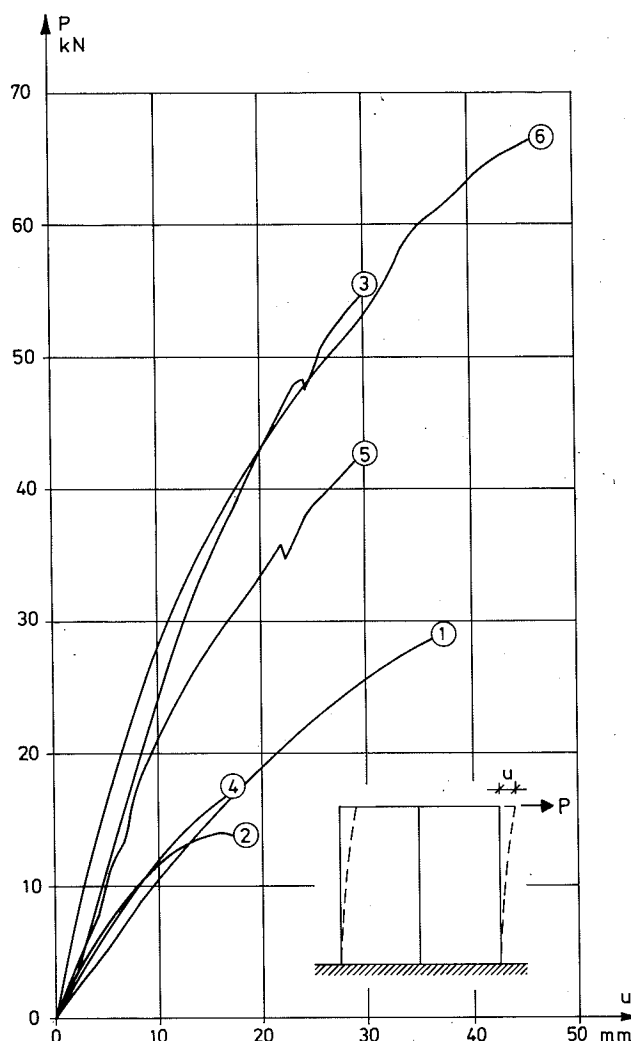
Kombinationen bærende og afstivende væg er ikke undersøgt, men med de moderate lodrette påvirkninger, der kan komme på tale, skønnes kombinationen ikke at blive problematisk for én-etages bygninger.

Til belysning af de prøvede afstivende elements stivhed er på figur 4.11 optegnet sammenhørende værdier af vandret kraft og vandret udbøjning.

NR	OPSTALT	VANDRET SNIT I SAMLING	P _{max} kN	BEMÆRKNING
1			28	STIV TOPREM "TRÆKBRUD" VED FODREM
2		 SØMLIMET LASKE	13	SLAP TOPREM FLEKNING AF FODREM
3		do.	54	SLAP TOPREM OG LODRET UNDERSTØTNING INTET BRUD
4		 OVERLAPPENDE FLANGE	17	SLAP TOPREM FLEKNING AF FODREM
5		do.	49	SLAP TOPREM BRUD I LODRET SAMLING
6		do.	66	SLAP TOPREM STOLPER VED ENDERNE BRUD I LODRET SAMLING

Tabel 4.10:

Skematisk oversigt over de 6 forsøg med afstivende vægpar.



Figur 4.12:

Arbejdslinier for de 6 par afstivende vægge.
Numrene svarer til numrene i tabel 4.10.

4.1.6 Samlinger

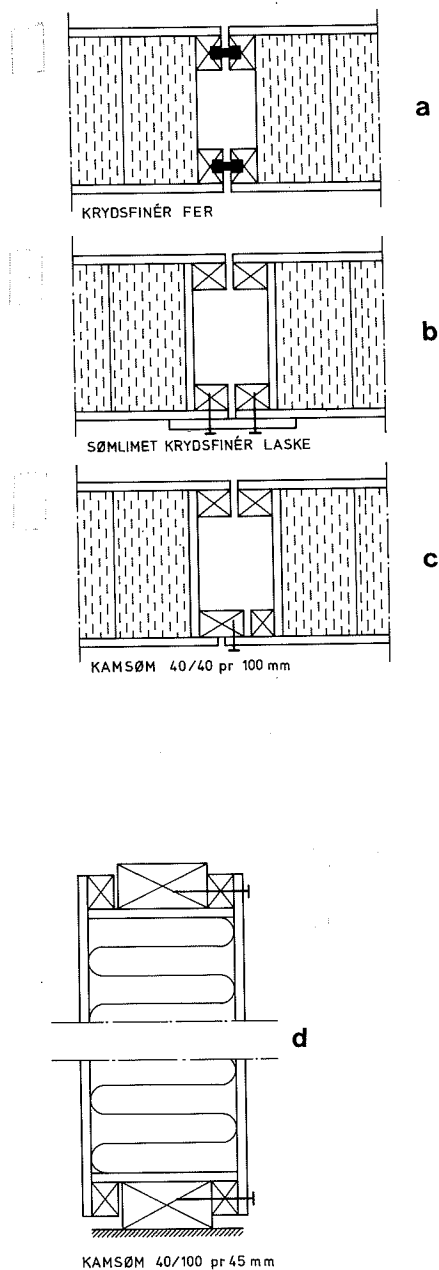
Der er ikke foretaget egentlige styrke- og stivhedsundersøgelser af kraftoverførende samlinger mellem sandwichelementer indbyrdes eller i tilslutning til andre konstruktionselementer.

Der er i [24] udarbejdet en række forslag til mulige udformninger af kraftoverførende samlinger. En vurdering af disse samlingers evne til at overføre træk, tryk og forskydning må ske ved hjælp af Trænormens regler [27].

Her skal dog kort omtales et par samlinger, der indirekte har vist en tilstrækkelig bæreevne. Det drejer sig dels om en fer-

not samling, der blev anvendt ved brandprøvningen (se senere i afsnit 4.2.2), dels om de samlinger, der blev anvendt ved forsøgene med afstivende vægelementer (forrige afsnit).

Snit i samlingerne er vist på figur 4.13.



Figur 4.13:

Samlingsdetaljer mellem vægelementer, som indirekte er styrkeprøvet. De tre øverste figurer er vandrette snit i væg-væg-samlingen, medens den nederste er et lodret snit i samlingen mellem vægelement og rem ..

I den første samling (figur 4.13.a) mellem to vægelementer er kantlisterne forsynet med en not, hvori en krydsfinérsløjfe anbringes som fer. Denne samling sikrer i nogen grad, at de to vægelementer ikke får differensbevægelser ud af planet. Samlingsprincippet er også anvendt i DTH's Nulenergihus. Hvis feren sømmes fast i noten, skulle der også være mulighed for at få overført en vis forskydning i planet. Det er dog højst sandsynligt, at der sker flækning af enten kantlisten eller krydsfinérferen, og da dette er vanskeligt at kontrollere, blev samlingen ikke medtaget i undersøgelsen af afstivende elementer.

Figur 4.13.b og .c viser to samlinger, hvis evne til at overføre forskydningskræfter i de to vægelementers plan blev undersøgt indirekte i [16]. De sammenbyggede elementer havde (jvf. tabel 4.12) betydelige bæreevner, hvorfor samlingerne må anses for anvendelig i mange tilfælde, hvor vægelementer skal sammenbygges til en afstivende konstruktion.

De anvendte samlinger mellem fodrem eller toprem og elementer er vist på figur 4.13.d.

Hvor store forskydnings-, træk- og trykspændinger eller kombinationer af disse, de omtalte samlinger kan overføre, kan ikke uddrages af forsøgene, idet spændingsfordelingen langs samlingerne er ukendt. Det må derfor bero på et kvalificeret valg af skønnet spændingsfordeling, hvis der ud fra forsøgene ønskes fastlagt, hvilke spændingskombinationer samlingerne kan overføre.

4.2 BRANDTEKNISKE EGENSKABER

I et sandwichelement udnyttes primært flangernes styrkeegenskaber, og elementet er derfor særlig følsomt overfor en brandpåvirkning, der nedbryder eller på anden måde ændrer en flanges styrkeegenskaber.

En 12 mm krydsfinérflange vil brænde bort i løbet af ca. 15 minutter, og elementet kan ikke længere fungere som en sandwichkonstruktion. Hvis elementet skal have en restbæreevne, efter at den ene flange er brændt bort, må dette sikres af den anden flange sammen med den intakte del af kerne-materialet og eventuelle kantforstærkninger.

Brandtekniske krav

De specifikke brandtekniske krav, der stilles til en bygningsdel (f.eks. opbygget af sandwichelementer) fremgår af Bygningsreglementet (BR-77) [1] og afhænger af en række parametre.

For eenfamiliehuse er typiske krav, at indvendige overflader skal være mindst som klasse 2 beklædning, og at ydervæggene skal være mindst som BD-bygningsdel 30.

De brandtekniske undersøgelser har derfor været koncentreret om disse to krav. Der er udført en række forsøg hos Superfos Glasuld a/s og Rockwool A/S samt på Statsprøveanstalten. Disse resumeres i det følgende.

4.2.1 Overfladekrav

I BR-77's bilag 4 er angivet en række pladematerialer, som er godkendt som "klasse 2 beklædninger". Det fremgår heraf, at bl.a. 9 mm spånplade (rumvægt $\geq 600 \text{ kg/m}^3$) og 9 mm krydsfinér (rumvægt $\geq 500 \text{ kg/m}^3$) tilhører denne klasse, hvis der er højst 600 mm afstand mellem fastgørelsen til underlaget. Da flangepladerne er fuldklæbet til kernematerialet i et sandwichelement, må afstandskravet anses for at være opfyldt.

De i afsnit 4.1.1 omtalte flangematerialer må derfor anses at opfylde kravet til klasse 2 beklædning.

I en række forsøg med sandwichelementer med uimprægnerede krydsfinérflanger er der imidlertid konstateret overtænding i løbet af 5-10 minutter, og af hensyn til personsikkerheden kan det derfor komme på tale at stille skærpede overfladekrav.

I de tilfælde, hvor en klasse 1 beklædning kræves, kan der blive tale om at anvende gennembrandimprægneret krydsfinérplade som flangemateriale eller at forsyne "klasse 2-flanger" med en beklædning af klasse 1 eller en behandling med brandhæmmende maling.

4.2.2 Brandmodstandsevne

En bygningsdels evne til at modstå et nærmere defineret brandforløb i et specificeret tidsrum kan i henhold til DS 1052 "Brandteknisk klassifikation af bygningsdele (ekskl. døre)" bestemmes ved prøvning.

Der findes p.t. ikke lovhjemmel for at foretage en klassifikation ud fra en teoretisk beregning, hvorfor en klassifikationsattest normalt kun kan opnås efter en autoriseret prøvning.

Det har dog vist sig, at det er muligt ad teoretisk vej at beregne en restbæreevne, som stemmer rimeligt godt overens med den ved forsøg bestemte. Beregningsmodellen vil derfor kunne anvendes ved en foreløbig bedømmelse af et sandwichelements restbæreevne.

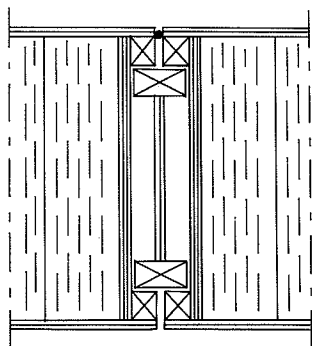
Beregningsmodellen er baseret på en målt indbrændingshastighed i krydsfinér på ca. 1 mm/minut og i mineraluld på 4-6 mm/minut [17] og [18]. Beregnes resttværsnittet f.eks. efter 30 minutters brandpåvirkning, viser forsøgene, at der er en god overensstemmelse mellem målt og beregnet restbæreevne både for væg- og dækelementer.

4.2.2.1 Dækelementer

Der er kun udført ét forsøg med brandpåvirkede dækelementer. Forsøget er beskrevet i [17] og omfattede den dækelementtype og -samling, der er anvendt i DTH's Nulenergihus.

Dækelementerne svarer til den på figur 2.4.c viste variant og deres data er:

Længde	: 5,4 m
Bredde	: 1,2 m
Kernetykkelse	: 400 mm
Kernemateriale	: G50
Overflange	: 12 mm spånplade
Underflange	: 12,6 mm krydsfinér
Kant- og endeskot:	15,6 mm krydsfinér
Kantlister:	: 33×33 mm uklassificeret konstruktions-træ.



Der blev afprøvet et dæk opbygget af to dækelementer og belastet svarende til $3,2 \text{ kN/m}^2$ (inkl. egenvægt). I samlingen mellem de to elementer var der anbragt en I-formet samlebjælke af træ.

Elementerne var indbygget i Statsprøveanstaltens horisontalovn og blev påvirket med en standardbrand. Efter 44 minutters brandpåvirkning blev forsøget afbrudt grundet en fejludførelse af kantstopningen ved den ene ovnside.

Der blev ikke udfærdiget en klassifikationsattest, da der ikke var tale om en egentlig klassifikationsprøvning, men alt tyder på, at en klassifikation svarende til BD-bygningsdel 30 uden videre ville kunne opnås. Den virkelige branddrøjhed svarer sandsynligvis til BD-bygningsdel 60.

En klassifikation som BD-30 eller BD-60 for dakelementer med kernetykkelser på 200-300 mm vil sandsynligvis kunne opnås, hvis der f.eks. er tale om elementer med kortere spændvidde.

4.2.2.2 Ikke-bærende vægelementer

Forud for dette TR-projekt fik Rockwool A/S og Dansk Eternit-Fabrik A/S i 1974 mk-godkendelse for hver sit sandwichelement til anvendelse som ikke bærende BD-bygningsdel 60.

Elementerne svarer til den på figur 2.5.a viste variant og de væsentligste data er:

Højde	2500 mm eller 3050 mm
Bredde	1192 mm eller 1200 mm
Kernetykkelse	80 mm eller 100 mm
Flanger	f.eks. 3,2 mm Glasal

Yderligere oplysninger kan indhentes hos leverandørerne [12] og [19].

Der er i projektperioden udført to orienterende afprøvninger af elementer med følgende data (figur 2.5.d-variant)

Højde	2200 mm
Bredde	1200 mm
Kerne	240 mm G50
Kant-og sidesk.	12 mm krydsfinér
Flange 1	12 mm krydsfinér med fuldklæbet 13 mm gipsplade
Flange 2	12 mm krydsfinér med fuldklæbet 8 mm Eternit.

Elementerne blev i det ene tilfælde eksponeret på flange 1 og i det andet tilfælde på flange 2. De påklæbte plader formåede at forsinke bortbrændingen af krydsfinérflangerne så længe, at elementerne formentlig ville kunne opnå en klassifikation svarende til ikke bærende BD-bygningsdel 90 [20].

4.2.2.3 Bærende vægelementer

Analogt til dækelementforsøget blev der udført tre brandforsøg med vægelementer under projekteringen af DTH-Nulenergi-huset. Data fra disse forsøg er sammenfattet i tabel 4.11 suppleret med et fjerde, der er udført indenfor projektperioden. Da afprøvningsbetingelserne ikke har været i overensstemmelse med de til en klassifikationsprøvning krævede, har der på grundlag af forsøgene kun kunnet angives en sandsynlig klassifikation.

Højde/bredde cm	Kerne	Eksponeret flange	Ueksponeret flange	Rest- bære- evne	Sandsynlig klassifi- kation	Reference
240/120	300 mm G50	12 mm spånplade	9 mm krydsfinér	31 kN/m	BD-30	[21]
240/120*	300 mm G50	12 mm** spånplade	9 mm krydsfinér	23 kN/m	BD-30	[21]
195/120	300 mm R80	12 mm spånplade	9 mm krydsfinér	11 kN/m	BD-30	[22]
220/120	195 mm G50	9 mm krydsfinér trykbrandimprægneret		37 kN/m	BD-60	[23]

* Elementerne var forsynet med kantlister, men ikke med lodrette kantskot, medens de resterende også havde lodrette kantskot.

**Flangen var påført en brandhæmmende maling.

Tabel 4.11:

Oversigt over orienterende forsøg med brandbela-
stede (i 30 min) bærende sandwichvægelementer.

Simulerede brandforløb

Disse forsøg er blevet suppleret med en række bæreevnforsøg med vægelementer med forskellige simulerede brandforløb. Forsøgene er beskrevet i [18], og der blev bortskåret større eller mindre dele af elementerne. Derved kunne virkningen af forskellig reduktion af tværsnittet på bæreevnen overfor lodret last belyses ved forsøg.

Forsøgenes resultater stemte godt overens med en opstillet beregningsmodel, og denne dannede så udgangspunkt for fastlæggelsen af geometrien for de vægelementer, som skulle gennemgå en klassifikationsprøvning med henblik på en BD-30 godkendelse.

Klassifikations- prøvning

Til klassifikationsprøvningen, som er beskrevet i [18], blev anvendt elementer svarende til den på figur 2.5.b viste variant med følgende data:

Højde	2440 mm
Bredde	1190 mm
Kerne	145 mm G50 eller R80
Flanger	12 mm krydsfinér (Douglas Fir)
Kantlister	35×45 mm uklassificeret konstruktionstræ

Elementerne blev parvis indbygget i Statsprøveanstaltens vertikalovn og påført en lodret linielast på 21 kN/m (= $1,5 \times 14$ kN/m), inden brandpåvirkningen startede.

Efter 30 minutters brandpåvirkning af den ene flange havde elementerne stadig tilstrækkelig bæreevne til at bære den påførte belastning, og elementerne har derfor opnået en brandteknisk klassifikation som følger:

Adskillende, bærende BD-bygningsdel 30

når den karakteristiske belastning ikke overstiger 14 kN/m og kan overføres til væggen ikke-brandpåvirkede side.

Konklusion

Med baggrund i den opnåede klassifikation kan der konkluderes, at bærende sandwichvægelementer, hvis resttværsnit efter 30 minutters brand består af den ene flange med tilhørende kantlister og 4-5 cm intakt mineraluld, vil kunne opnå en BD-30 eller bedre klassifikation. Da de 14 kN/m lodret last svarer til den maksimale karakteristiske belastning, som vægelementerne i et énfamiliehus med 1.sal kan forventes udsat for, kan vægelementerne således klare kravene, der stilles til brandmodstandsevnen for ydervægselementer i énfamiliehuse.

4.3 FUGTTEKNISKE EGENSKABER

De fugttekniske undersøgelser har omfattet mineraluldens og limforbindelsens holdbarhed overfor varierende fugtighed og temperatur, fugtophobning i sandwichelementer udsat for varierende klima, fugtbetingede deformationer og en række materialeparametre til brug for en teoretisk analyse af måleresultaterne.

Holdbarhedsundersøgelsen er tidligere refereret i afsnit 4.1.2.4, medens de re-

sterende undersøgelser refereres i det følgende. Undersøgelserne er udført af SBI og er beskrevet i [8] og [25].

4.3.1 Fugtophobning

Ingen
dampspærre

Et for stort fugtindhold i sandwichelementer kan dels nedbryde mineraluldens eller limforbindelsens styrke, dels forårsage svampeangreb i de træbaserede dele (flanger, skot og lignende). Der er derfor foretaget en række målinger af fugtophobningen i sandwichelementer udsat for det naturlige klima, idet elementerne ikke var forsynet med en diffusionstæt dampspærre.

Disse målinger er blevet suppleret med fugtophobningsmålinger under kontrollerede klimaforhold og med måling af flangematerialernes dampdiffusionsmodstandstal.

Fugtophobningen i sandwichelementerne under naturlige klimaforhold er i projektperioden målt med jævne mellemrum i 3 bygninger og yderligere i 5 bygninger på et tidspunkt af året, hvor fugtindholdet erfaringsmæssigt er størst.

Der blev målt fugtindhold i såvel tag- som dækelementer, og bygningernes indeklima varierede fra 40% RF (kontor) til 60% RF (klimastald).

Målingerne viste,

Startbetingelser,
byggefugt

- at et højt fugtindhold hidrørende fra "byggefugt" kan være vanskeligt at få reduceret med tiden, hvis et tagelement lukkes inde bag en tæt tagbeklædning,

Indeklima

- at fugtbelastningen inde fra bygningen kan bringe fugtindholdet i tagelementer op over de kritiske ca. 20%, hvis der i bygningen konstant er 50-60% RF,

Sol-skygge,
tagelementer

- at udtørringen af kondenseret fugt i tagelementer med tæt tagbeklædning er betinget af, at tagfladen ikke konstant ligger i skygge,

Vægelementer

- at fugtophobningen i vægelementer er mindre end i tagelementer, og de udtørres i den varme periode, selvom de konstant ligger i skygge,

Tætte elementer,
ingen konvektion

- at fugtindtrængningen næsten udelukkende foregår ved diffusion, idet elementernes inderflange med de anvendte samlingsmetoder er så tæt, at der ikke sker konvektion.

Limmængder

- at limmængden ingen signifikant betydning har for flangernes dampdiffusionsmodstandstal,

Flanger

- at flangernes dampdiffusionsmodstandstal er 20-50 gange mindre end en normal dampspærres modstandstal uden at give anledning til uacceptabel fugtophobning.

4.3.2 Fugtbetingede deformationer

Ændring af fugtindholdet i den ene flange i et sandwichelement kan bevirke mærkbare deformationer i elementet.

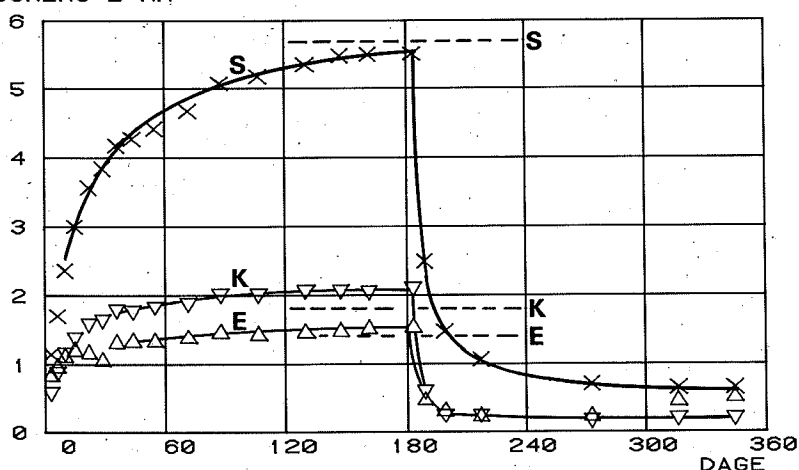
For at få belyst dette forhold blev tre sandwichelementer udsat for en asymmetrisk klimapåvirkning på de to flanger, og deformationerne blev registreret, efterhånden som fugten blev ophobet i flangerne.

Desuden blev der foretaget måling af flangematerialernes deformationer i forbindelse med ændrede fugtforhold.

De tre sandwichelementer var 1,1 m brede og 3,2 m lange med en kernetykkelse på 30 cm og var opbygget som "rene sandwich-elementer" (figur 2.5.a). Kernematerialet var af G70, og flangerne af henholdsvis krydsfinér, Eternit og spånplade. Elementerne var simpelt understøttede i top og bund og indbygget i en klimakasse, hvor de på den ene side blev udsat for 22°C og 24% RF og på den anden 5°C og 80% RF.

Udbøjningsforløbet i måleperioden er vist på figur 4.14.

UDBØJNING I MM



Figur 4.14:

Udbøjningen som funktion af det tidsrum, elementerne er udsat for forskelligt klima på de to sider. 22°C og 24%RF henholdsvis 5°C og 80%RF. Efter 183 dage gøres klimaet ens på de to sider. De punkterede linier svarer til udbøjning beregnet efter formel (4-12) - S = Spånplade, K = Krydsfinér, E = Eternit.

Kurverne viser, hvordan udbøjningen vokser, efterhånden som fugtindholdet ændres i de to flanger. Efter 183 dage ændres klimaet til samme laboratorieklima på begge sider, og elementerne retter sig ud igen.

Udover udbøjningsmålingerne blev der målt længdeændringer af prøvestykker af flangematerialerne, der først havde været i fugtbalance i den tørre kasse og derefter i fugtbalance i den fugtige kasse. Ud fra disse "frie" længdeændringer er den teoretiske værdi for udbøjningerne beregnet af formelen:

(4-12)

$$u = \frac{L^2 \Delta \varepsilon}{8 d}$$

hvor

L = målestrækningen

$\Delta \varepsilon$ = fugttøjningsforskellen mellem de to flanger

d = afstanden fra flangemidte til flangemidte.

Formlen er udledt af den tekniske bjælke-teori med en antagelse om en udbøjningsfigur i form af en cirkelbue. Der synes at være en rimelig god overensstemmelse mellem teori og måling.

Kerne- og flangematerialets stivheder indgår ikke i formlen. Supplerende beregninger viser, at så længe $E_k > E_f/10.000$, synes formelen at have sin gyldighed. Alle de undersøgte materialer opfylder dette krav.

Flangematerialets fugtfølsomhed, udtrykt ved $\Delta \varepsilon$, afhænger bl.a. af den omgivende lufts relative fugtighed og temperatur. I [8] er beskrevet en række målinger af fugtfølsomheden, og der skal blot gengives enkelte af resultaterne, som angivet i tabel 4.12. Der var relativ stor spredning på målte længdeændringer.

Materiale	Længdeændring ved	
	30%RF → 50%RF	30%RF → 90%RF
12 mm krydsfinér	0,6 ‰	1,4 ‰
12 mm spånplade	0,9 ‰	4,4 ‰
8 mm Eternit	0,4 ‰	1,5 ‰
8 mm Glasal	0,2 ‰	0,5 ‰

Tabel 4.12:

Flangematerialernes længdeændring (middelværdi) som følge af ændret luftfugtighed ved 23°C. Der er målt på tre prøvestykker af hvert materiale.

Endelig skal nævnes, at der efter udbøjningsforsøgene blev udskåret prøvelegemer af sandwichelementerne. Disse blev udsat for en forskydningspåvirkning (jvf. afsnit 4.1.2.1), og der blev ikke konstateret en signifikant styrkereduktion.

4.3.3 Konklusion af fugttekniske undersøgelser

Konklusionen står i sin fulde ordlyd i [8] og gengives (med enkelte sproglige ændringer) i det følgende.

I fugtteknisk henseende opdeles elementerne i 4 kategorier:

- Vægelementer uden regnskærm
- Vægelementer med regnskærm
- Tagelementer med regnskærm
- Tagelementer med direkte tagbeklædning.

For de enkelte kategorier er konklusionen følgende, idet det skal fremhæves, at samtlige afprøvede elementer ikke har været forsynet med dampspærre.

Vægelementer uden regnskærm

Der er i denne forsøgsserie ikke konstateret ophobning af uacceptable kondensationsmængder i elementerne i løbet af en simuleret vinterperiode, og de beskedne fugtmængder, som er målt, vil kunne udtørre i løbet af den følgende sommer. Det må derfor konkluderes, at sådanne elementer vil kunne anvendes som ydervægge i rum med normale fugtforhold.

Ved normale fugtforhold skal i denne sammenhæng forstås de fugtforhold, der findes i boliger, kontorer, hvor der ikke er befugtningsanlæg, og i industribygninger,

hvor der hverken er befugtningsanlæg eller anden form for særlig fugtproduktion.

De vekslende fugtpåvirkninger fra kondens, som vægelementerne kommer ud for, er moderate, og der kan derfor ikke risikeres en større styrkereduktion hidrørende derfra. Det må i hvert enkelt tilfælde vurderes, om de valgte flangematerialer har en sådan fugtbevægelse, at der ikke kommer uacceptable udbøjninger.

For at sikre at hele vægkonstruktionen er fugtteknisk i orden, skal samlingerne udføres således, at de bliver lufttætte og dermed også relativt diffusionstætte. Hvis samlingerne ikke er lufttætte, kan der ved konvektion trænge uacceptable, store fugtmængder ind i vægkonstruktionen.

Det skal endelig påpeges, at træbaserede elementer uden regnskærm bør have en vandafvisende diffusionsåben overfladebehandling, f.eks. træbeskyttelsesmiddel, for at forhindre væsentlig fugtindtrængen som følge af slagregnspåvirkning.

Vægelementer med regnskærm

Denne konstruktion er ikke afprøvet, men hvis der sikres ventilation mellem elementerne og regnskærmen, vil forholdene være som for vægelementer uden regnskærm, d.v.s. det er en konstruktion, der kan benyttes under de samme forhold som vægelementer uden regnskærm.

Tagelementer med regnskærm

Hvis sandwichelementerne ønskes anvendt som tagelementer med regnskærm, kan de benyttes ved de samme klimaforhold som vægelementer, hvis der sikres ventilation af hulrummet mellem elementerne og regnskærmen.

Tagelementer med direkte tagbeklædning

På baggrund af de her udførte forsøg er det svært med sikkerhed at konkludere, om elementerne kan anvendes som tagelementer med direkte tagbeklædning. Forsøgene viste ganske vist, at det var små fugtmængder, der blev ophobet i elementerne i en periode, der svarer til en vinter, men denne forsøgsserie gav beklageligvis nogle resultater, som var så vanskelige at forklare rent fysisk, at konklusionen alene på basis heraf ville være uforsvarlig.

Denne type tagelementer bør derfor i første række vurderes ud fra de allerede gennemførte og igangsatte undersøgelser af eksisterende bygninger med en tilsvarende tagkonstruktion.

Styrkereduktion på grund af vekslende opfugtning - udtørring

Den ved disse forsøg fundne styrkereduktion hos små prøvelegemer på grund af vekslende opfugtning - udtørring er af en sådan størrelsesorden, at den heraf følgende reduktion af elementernes bæreevne kan medføre, at vandrette tagelementer kun kan anvendes ved små spændvidder.

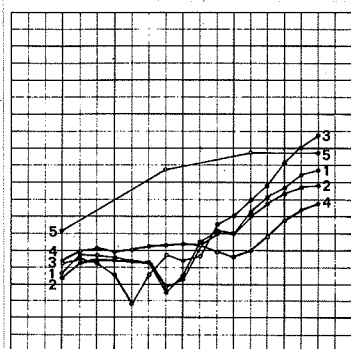
Den store styrkereduktion kan eventuelt reduceres efter en nærmere undersøgelse af de faktiske temperaturforhold i overflangerne i tage, idet det muligvis vil vise sig, at det er det bratte skift fra 23°C til 70°C under forsøgene, der har givet anledning til den betydelige styrkereduktion. Sådanne forsøg kræver imidlertid også en nærmere undersøgelse af, hvor hurtige temperatursving der sker i virkeligheden.

Flangemateriale

Vedrørende flangematerialer kan der konkluderes, at krydsfinér af den undersøgte kvalitet (konstruktionskrydsfinér) eller tilsvarende, og Eternit fugtteknisk set er velegnede.

Spånplade i de nuværende kvaliteter bør ikke anvendes, hvor der er store variationer i fugtniveauet, dels på grund af materialets store fugtbevægelser, dels på grund af den ved disse forsøg konstaterede utilstrækkelige modstandsevne over for fugt.

4.4 LYDTEKNISKE EGENSKABER



Der er ikke indenfor TR-projektets rammer foretaget lydtekniske undersøgelser af elementerne. Dette er begrundet i, at sandwichelementerne primært er tænkt anvendt som klimaskærm, og til denne stilles der p.t. ikke lydmæssige krav.

Det kan dog nævnes, at der foreligger målinger af reduktionstal som funktion af frekvensen for 4 forskellige sandwichelementer med kernetykkelse 30 cm.

Målingerne er beskrevet i [10], og de fire elementer havde følgende karakteristika

Nr.	kerne	kantskot	bredde/længde cm x cm
1	G40	nej	138,3 x 179,3
2	G40	ja	
3	R85	nej	
4	G130	nej	

Elementernes ene flange var af 12 mm krydsfinér, den anden af 12 mm spånplade.

Resultatet af målingerne er, at elementernes luftlydisolation er $I_a = 25 - 33$ dB.

4.5 VARMEISOLERENDE EGENSKABER

Sandwichelementerne afviger også varmeisoleringsmæssigt fra gængse konstruktionsopbygninger ved, at mineraluldens fiberorientering er vinkelret på isoleringslaget. Det blev derfor besluttet at gennemføre en eksperimentel bestemmelse af elementernes isolans og transmissionskoefficient.

Undersøgelsen er beskrevet i [29] og blev udført på Teknologisk Institut i Tåstrup. Varmetransmissionsmålingen skete ved hjælp af "Guarded Hot-Box"-metoden, og der blev målt på tre vægge opbygget i laboratoriet.

To af væggene var opbygget af mineraluldbaserede sandwichelementer med kernetykkelse 195 mm, og kernematerialet var R80 i den ene væg og G50 i den anden.

Den tredje væg var opbygget som en traditionel, let ydervægskonstruktion med træstolpeskelet.

Den tredje væg skulle tjene som reference ved en sammenligning med de i DS 418 [30] angivne beregningsprincipper.

Sandwichelementvæggene var opbygget af tre vægelementer hver, og de to lodrette samlinger blev udformet lidt forskelligt. Da det var muligt at lade dem indgå i hvert sig målefelt, kunne en eventuel forskel i varmetransmissionen således registreres.

Konklusion

Sammenlignet med en beregning i henhold til [30] viste målingerne god overensstemmelse, idet den anvendte mineraluld af Type A ved sin kantstilling dog skal reg-

nes svarende til mineraluld af type B. Endvidere gav de anvendte samlinger en reduktion af isolansen på 5%, hvilket også er i overensstemmelse med [30].

5. BEREGNING AF MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER

Sammenligningerne i kapitel 4 mellem forsøgsresultaterne og beregningsmodellerne tyder på en rimelig god overensstemmelse, når der indføres en korrektion for limforbindelsens styrke.

Dette forhold giver mulighed for at opstille beregningsregler for mineraluldbaserede sandwichelementer, hvor der anvendes andre materialer end de i TR-projektet undersøgte. Disse andre materials egenskaber må ikke afvige signifikant fra tilsvarende hos de undersøgte materialer, og der må også tages fornødent hensyn til, hvilke parametre der er varieret, og inden for hvilke intervaller dette er sket.

I dette kapitel redegøres der for, hvordan de regningsmæssige materialeleværdier foreslås fastlagt, og der angives desuden eksempler på beregning af dæk- og vægelementer.

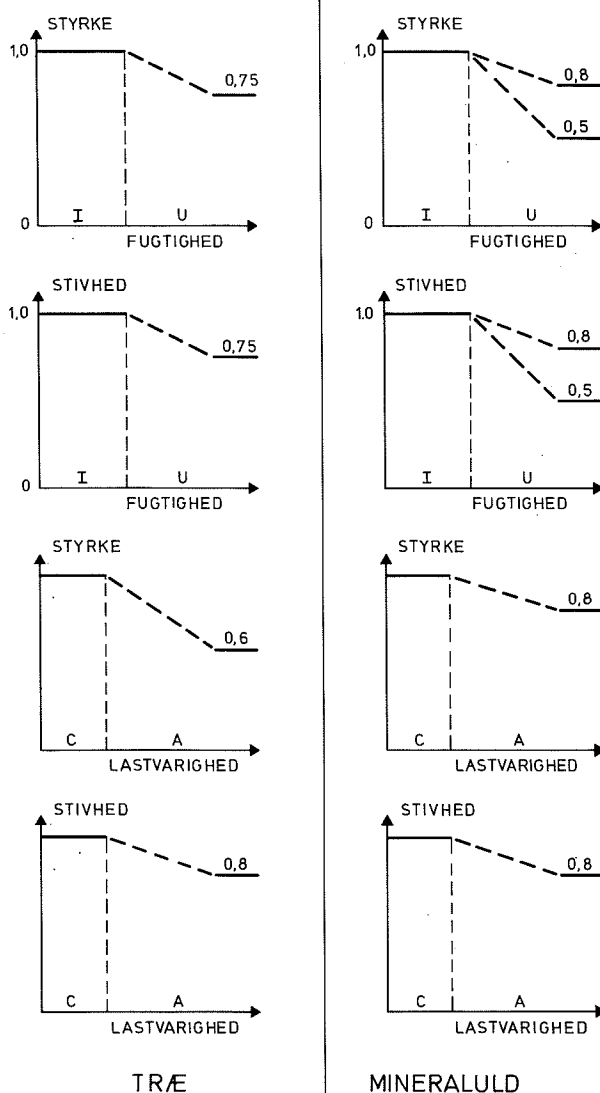
5.1 SIKKERHEDSMETODE

I overensstemmelse med DIF's konstruktionsnormer tænkes partialkoefficientmetoden (DIF's 64-metode) anvendt, således at de regningsmæssige påvirkninger fastlægges i overensstemmelse med Lastnormen, DS 410 [26], og de regningsmæssige materialeleværdier efter samme princip, som er anvendt i Trænormen, DS 413 [27].

Samme som
Trænorm

Trænormen er valgt, dels fordi træbaserede flangematerialer har været dominerende i projektet, dels fordi trænormens opdeling i lastgrupper og fugtklasser også er fundet relevant for mineralulden. Sidstnævnte er illustreret på figur 5.1, hvor de to materials styrke- og stivhedsegenskaber er sammenlignet.

I Trænormen fastsættes de karakteristiske værdier for styrke- og stivhedstal, der indgår i styrkeberegninger, svarende til 5%-fraktilen, og for stivhedstal i øvrigt svarende til 30%-fraktilen. Som partialkoefficient ved styrkeberegning anvendes $\gamma_m = 1,3$ for normale lasttilfælde og $\gamma_m = 1,18$ for ekstraordinære lasttilfælde. Endelig skal nævnes, at det som oftest er de regningsmæssige (nominelle) værdier for lastgruppe A, fugtklasse I og normale lasttilfælde, der er at finde i tabellerne i



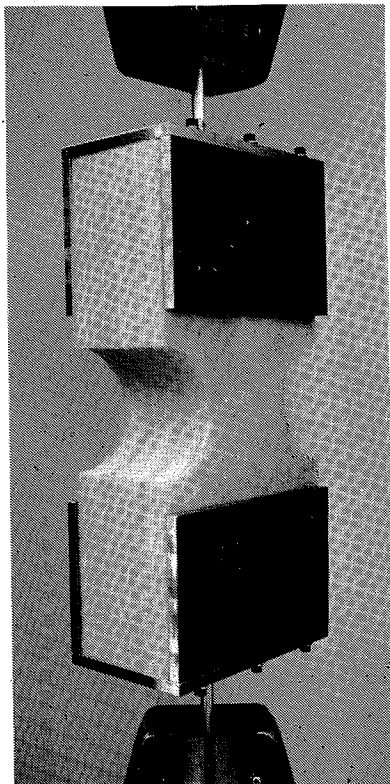
Figur 5.1:

Forenklet illustration af træs og mineralulds styrke- og stivhedsegenskaber af afhængighed af fugtforhold og lastvarighed. I og U er Trænormens to fugtklasser, og C og A analoge lastgrupper. Værdierne for træ stammer fra Trænormen. Værdierne for mineraluld stammer til dels fra kapitel 4, idet stivhedens fugtafhængighed ikke er målt, men sat lig styrkens fugtafhængighed, og styrkens afhængighed af lastvarigheden er sat lig stivhedens afhængighed, selv om der ikke er konstateret signifikant styrkereduktion.

Trænormen og TOP-pjecer, og at værdierne for andre kombinationer kan beregnes ud fra disse tabelværdier ved brug af passende korrektionstal.

Dette princip søges fulgt ved fastlæggelsen af mineraluldens regningsmæssige styrke- og stivhedstal.

5.2 KONSTRUKTIONSMINERALULD



Mineralulden er tidligere i rapporten blevet karakteriseret ved et producentbogatav og en rumvægtsangivelse. I tabel 4.2 er angivet en sammenhæng mellem rumvægten og de enkelte styrke-stivhedsparametre, bestemt ved estimering. Anvendes disse udtryk til at afbilde forskydningsstyrken, forskydningsmodulen og elasticitetsmodulen som funktion af trækstyrken, fås de på figur 5.2.a, b og c viste næsten lineære sammenhænge.

Dette muliggør, at der kan opstilles enkle og entydige relationer for de tre væsentlige styrke-stivhedsparametres afhængighed af trækstyrken. En trækstyrkebestemmelse stiller kun begrænsede krav til prøvningsudstyr og kan desuden udføres med ti-meglasformede prøvelegemer direkte udskåret af en mineraluldplade uden pålignede flangeplader og lignende. Fastlæggelsen af de relevante styrke-stivhedstal for en mineraluld kan således forenkles til kun at omfatte trækprøvning af et passende antal prøvelegemer.

Mineraluld til brug i sandwichelementer kan fra producentens side således karakteriseres ved et enkelt styrketal f.eks. trækstyrken, og foreslås betegnet konstruktionsmineraluld efterfulgt af en trækstyrkeangivelse.

5.2.1 Regningsmæssige materialeleværdier

I lighed med, hvad der blev angivet for trækonstruktioner, fastlægges de karakteristiske styrke- og stivhedstal, der indgår i styrkeberegninger, svarende til 5%-fraktilen, og for stivhedstal i øvrigt svarende til 30%-fraktilen. Desuden anvendes samme partialkoefficienter.

Ved en trækstyrkebestemmelse vil der kun være et begrænset antal prøvninger, hvorfor fraktilværdien kun kan fastlægges skønsmæssigt (med et vist konfidensniveau). Antages, at der er tale om et repræsentativt udvalg af en normalfordeling vil fraktilværdierne kunne bestemmes som

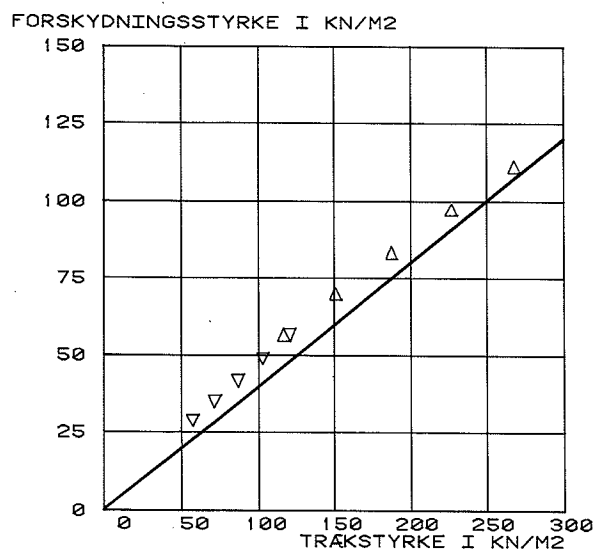
$$(5-1) \quad x_k = \bar{x} - k s_x$$

hvor $\bar{x}$ er middelværdien, og s_x spredningen, medens k er en faktor, der afhænger af prøveantal, fraktil og konfidensniveau.

Figur 5.2.a

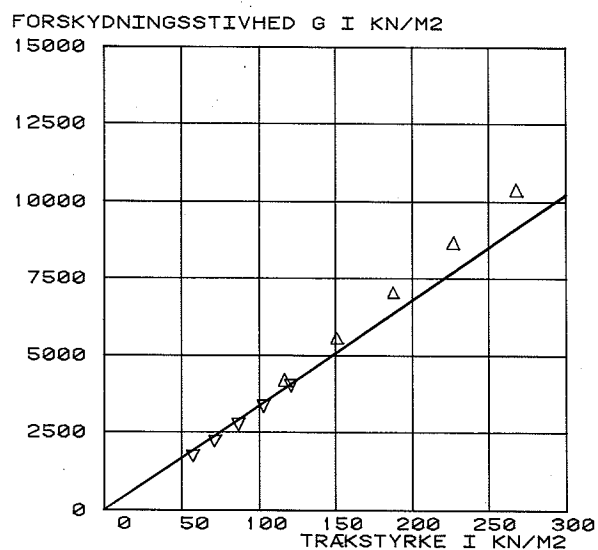
Forskydningsstyrkens
variation med
trækstyrken

$$f_v \approx 0,4 f_t$$

Figur 5.2.b

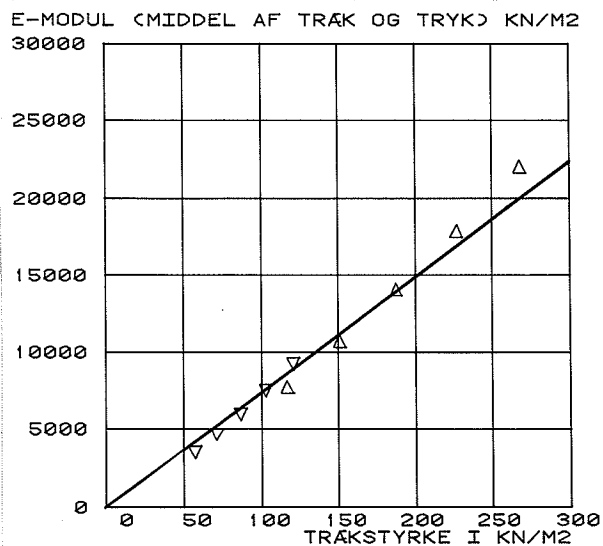
Forskydningsmodulens
variation med
trækstyrken

$$G \approx 34 f_t$$

Figur 5.2.c

Elasticitetsmodulens
variation med
trækstyrken

$$E \approx 75 f_t$$



Ved et konfidensniveau på 75% gælder de i tabel 5.1 angivne værdier for k.

Prøveantal	4	5	10	15	25	∞
5%-fraktil	2,7	2,5	2,1	2,0	1,9	1,7
30%-fraktil	0,95	0,89	0,77	0,72	0,67	0,52

Tabel 5.1:

Værdier for k afhængig af fraktil og prøveantal ved 75% konfidensniveau, kilde [28].

Som karakteriserende trækstyrke for konstruktionsmineraluld vælges den regningsmæssige trækstyrke svarende til 5%-fraktillen bestemt ved korttidsprøvning (lastgruppe C) og i fugtklasse I.

For en mineraluld med middeltrækstyrke 68 kN/m^2 og variationskoefficient 18% bestemt af 10 prøver, fås så

$$f_{tr} = \frac{68(1 - 2,1 \times 0,18)}{1,3} \text{ kN/m}^2 = 32 \text{ kN/m}^2$$

Denne mineraluldstyrke vil blive betegnet med forkortelsen

KM 32

hvor KM er forkortelse for konstruktionsmineraluld, medens tallet angiver den regningsmæssige trækstyrke (f_{tr}) i kN/m^2 .

De øvrige materialeværdier bestemmes ud fra dette tal af følgende udtryk

(5-2)

$$x_r = K_{art} \times K_{lim} \times K_{last} \times K_{fugt} \times f_{tr}$$

hvor x_r er den søgte parameters regningsmæssige værdi, og K-erne korrektionstal, der fremgår af tabel 5.2-5.5 Materialeværdierne til styrkeberegning svarer til partialkoefficienten 1,3 for normale lasttilfælde, medens værdierne til stivhedsberegning er baseret på partialkoefficienten 1,0.

Nogle af værdierne i tabel 5.2-5.5 er baseret på forsigtige skøn, men som formel (5-2) er opbygget, vil det fremover være muligt forholdsvis enkelt at inddrage yderligere viden om enkelte faktorerers indflydelse ved fastsættelse af regningsmæssige værdier.

K_{art}

Parameter	G	E	f_v
Styrkeberegning	22	48	0,4
Stivhedsberegning	59	129	-

Tabel 5.2:

K_{art} . Omregningsfaktor for de enkelte parametre bestemt ud fra de lineære udtryk i figur 5.2 og 5%- og 30%-fraktilerne. Der er regnet med 10 prøver, og variationskoefficient = 20% for f_v og f_t , og 30% for E og G.

 K_{lim}

Styrkeberegning med f_v	0,65
I øvrigt	1,0

Tabel 5.3:

K_{lim} . Korrektionsfaktor for limforbindelsens styrke, bestemt af forsøgsresultaterne i afsnit 4.1.4.1. Fremtidig produktionsteknik og -kontrol vil formentlig sikre en større relativ styrke af limforbindelsen, hvorfor faktoren 0,65 kan bringes nærmere 1,0.

 K_{last}

Lastgruppe	
C : Kortvarig	1,0
A : Langvarig	0,8

Tabel 5.4:

K_{last} . Korrektionsfaktor for lastvarigheden bestemt ud fra bl.a. krybningsforsøg (afsnit 4.1.4.2).

 K_{fugt}

Fugtklasse	
I : "Indendørs"	1,0
U : "Udendørs"	0,5 - 0,8

Tabel 5.5:

K_{fugt} . Korrektionsfaktor for styrkens og stivhedens fugtafhængighed. Da faktorens værdier er baseret på et relativt spinkelt grundlag (afsnit 4.1.2.4), må det forventes, at producenterne vil foranstalte yderligere undersøgelser. Ønskes en bedre dokumenteret korrektionsfaktor, må der derfor henvises til producenterne.

Ud fra de i tabel 4.2 givne oplysninger kan det beregnes, at de undersøgte mineraluldtyper har regningsmæssige trækstyrker fra 30 til 135 kN/m² og svarer således til:

KM 30 - KM 135

Anvendes formel (5-2) på en mineraluld i dette interval, f.eks. KM 100, fås de i tabel 5.6 angivne regningsmæssige værdier.

Regningsmæssige værdier i kN/m ² for KM 100 fugtklasse I	Styrkeberegning				Stivheds beregning	
	Normale lasttilfælde		Ekstraordin. lasttilfælde			
Lastgruppe	C	A	C	A	C	A
Forskydningsstyrke	f _{vr} 26	21	29	23	-	-
Forskydningsstivhed	G _r 2200	1760	2424	1939	5900	4720
Elasticitetsmodul	E _r 4800	3840	5288	4231	12900	10320

Tabel 5.6:

Eksempler på regningsmæssige materialeværdier i kN/m² bestemt af formel (5-2) og tabel 5.2-5.5 for konstruktionsmineraluld med regningsmæssig trækstyrke på 100 kN/m², d.v.s. KM 100. Værdierne svarer til fugtklasse I.

Disse værdier kan nu anvendes direkte sammen med tilsvarende værdier for træbase-rede flangematerialer. For andre flangematerialer skal de regningsmæssige materialeværdier tilsvarende være fastlagt efter Trænormens princip, hvis de anvendes i en beregning sammen med de angivne værdier for mineraluld.

5.3 DIMENSIONERINGSDIAGRAMMER

I dette afsnit omtales en række dimensioneringsdiagrammer baseret på de i forrige afsnit omtalte regningsmæssige materiale-værdier.

5.3.1 Dækelementer med endeskot

Brandtekniske krav er ikke indregnet

Som omtalt i afsnit 4.1.4 kan mineraluld-baserede sandwichdækelementer med endeskot men uden kantskot beregnes i henhold til den gængse teori for sandwichelementer med relativt bøjningsslappe flanger [15].

Der ses her bort fra anvendelse af dækelementerne til tilfælde, der stiller brandtekniske krav til restbæreevne.

Det mest sandsynlige brudkriterium for simpelt understøttede og med jævnt fordelt fladelast belastede dækelementer vil være et forskydningsbrud i limforbindelsen.

Den regningsmæssige bæreevne er da i henhold til formel (4-1) givet ved

(5-3)

$$p_{ur} = f_{vr} \frac{2d}{L}$$

hvor

p_{ur} = regningsmæssig bæreevne, jævnt fordelt fladelast (inklusive egenvægt)

f_{vr} = regningsmæssig forskydningsstyrke af kernemateriale/limforbindelse

d = afstanden fra flangemidte til flangemidte

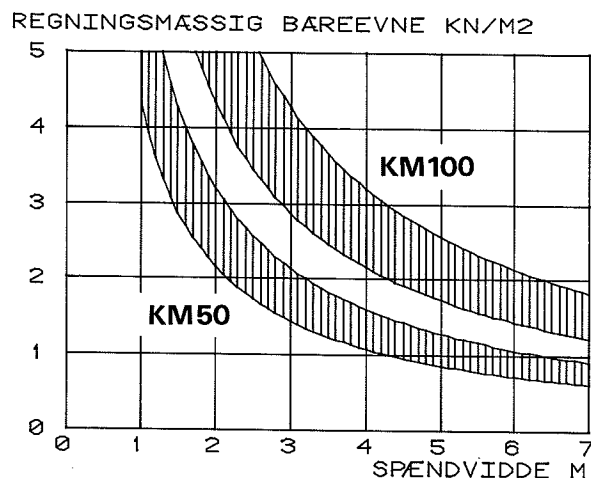
L = spændvidden.

Ud fra dette brudkriterium er de på figur 5.3 viste bæreevnekurver beregnet. Der er vist bæreevnen for to forskellige mineraluldstyrker KM50 og KM100 og for to forskellige kernetykkelser, 19,5 cm og 29,5 cm. Endelig er indflydelsen af forskellig reduktion for fugtafhængigheden vist ($K_{fugt} = 1,0 - 0,8 - 0,5$).

De angivne bæreevner er uafhængige af flangematerialet, som dog antages ikke at bryde. Ved brug af andet flangemateriale, end det i forsøgene anvendte, bør det derfor kontrolleres, at de regningsmæssige tryk- og trækstyrker af flangematerialet ikke overskrides.

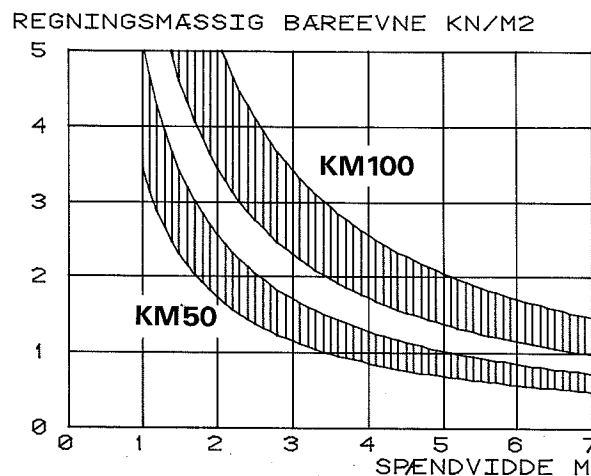
a.

Lastgruppe A.
 Normale lasttilfælde.
 Fugtklasse I.
 $K_{\text{fugt}} = 1,0$.



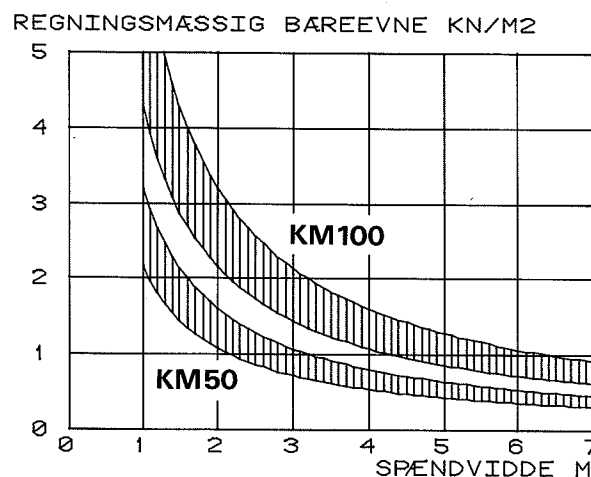
b.

Lastgruppe A.
 Normale lasttilfælde.
 Fugtklasse U.
 $K_{\text{fugt}} = 0,8$.



c.

Lastgruppe A.
 Normale lasttilfælde.
 Fugtklasse U.
 $K_{\text{fugt}} = 0,5$.



Figur 5.3:

Bæreevnekurver for mineraluldbaserede sandwichdækelementer med endeskot.
 Den regningsmæssige bæreevne er inklusive egenlast.
 Brudkriterium: Forskydningsbrud i kerne/limforbindelse.
 Øverste kurve i hvert kurvepar svarer til kernetykkelsen 295 mm, medens den nederste svarer til 195 mm.
 I beregningerne er regnet med ens flanger med tykkelse 10 mm.

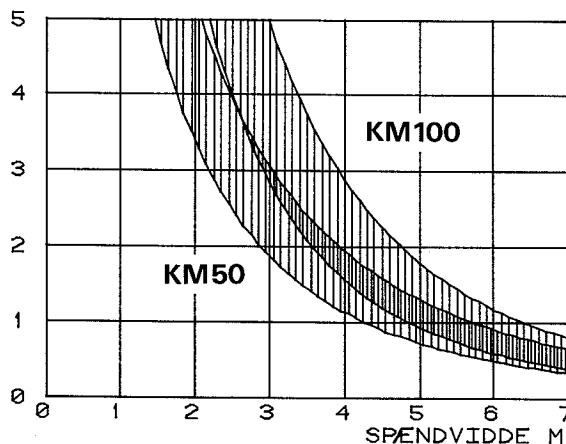
a.

$$E t = 50.000 \text{ kN/m}$$

$$K_{\text{fugt}} = 1,0$$

$$u:L \leq 1:500$$

KARAKTERISTISK LAST KN/M2



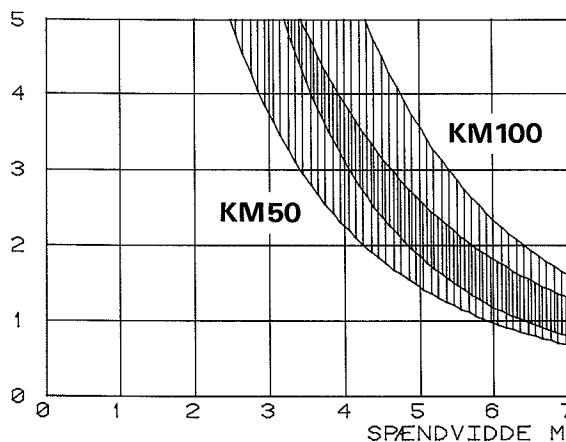
b.

$$E t = 50.000 \text{ kN/m}$$

$$K_{\text{fugt}} = 1,0$$

$$u:L \leq 1:250$$

KARAKTERISTISK LAST KN/M2



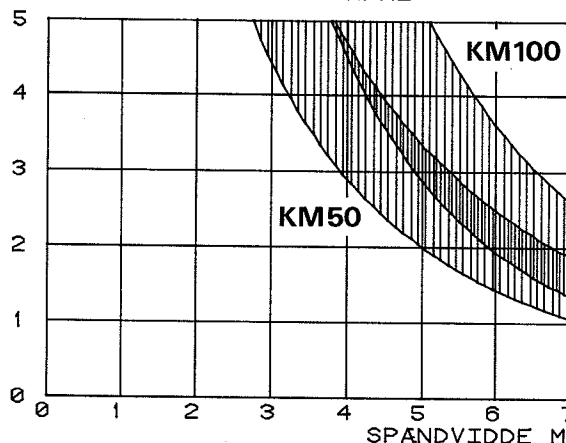
c.

$$E t = 100.000 \text{ kN/m}$$

$$K_{\text{fugt}} = 1,0$$

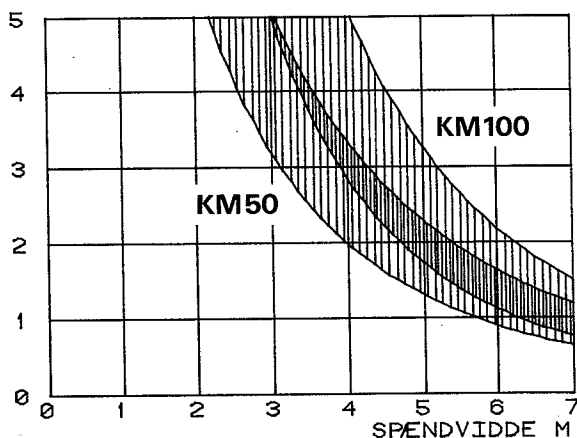
$$u:L \leq 1:250$$

KARAKTERISTISK LAST KN/M2

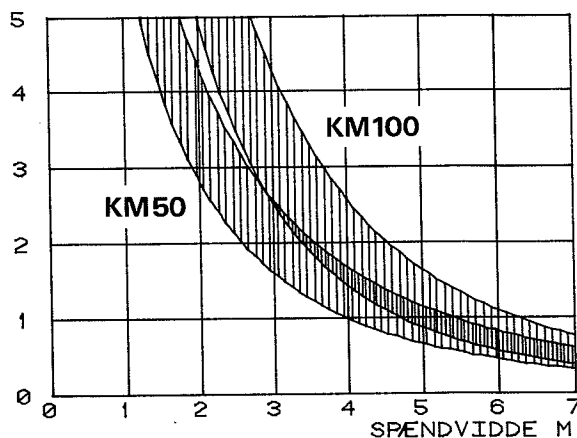


Figur 5.4:

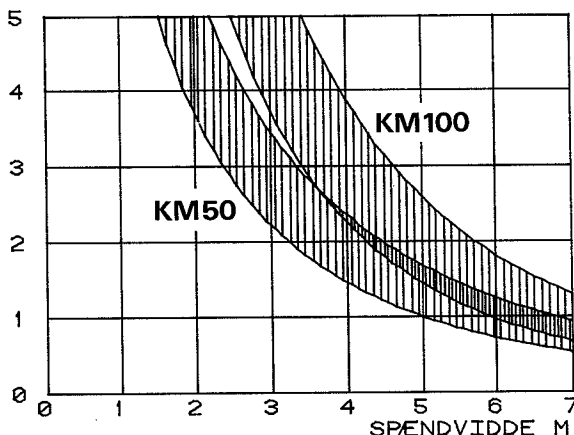
Sammenhørende værdier af karakteristiske last og spændvidder, der sikrer, at de angivne nedbøjningskriterier overholdes. Alle tilfælde svarer til fugt-klasse I, lastgruppe A og normale lasttilfælde. I beregningerne er der regnet med ens flanger og med tykkelse 10 mm. Øverste kurve i hvert kurvepar svarer til kernetykkelsen 295 mm, medens den nederste svarer til 195 mm.

KARAKTERISTISK LAST KN/M²

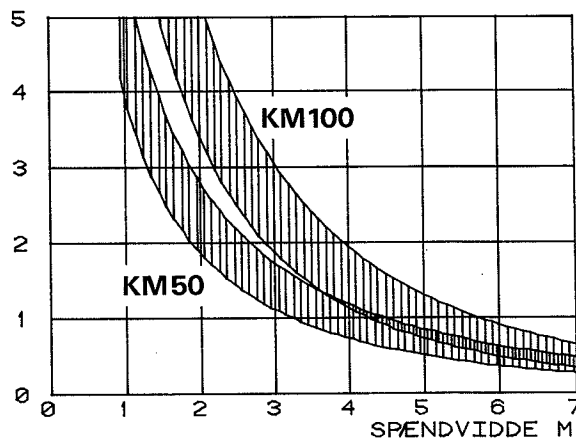
a. $K_{fugt} = 0,8$
 $u:L \leq 1:250$

KARAKTERISTISK LAST KN/M²

b. $K_{fugt} = 0,8$
 $u:L \leq 1:500$

KARAKTERISTISK LAST KN/M²

c. $K_{fugt} = 0,5$
 $u:L \leq 1:250$

KARAKTERISTISK LAST KN/M²

d. $K_{fugt} = 0,5$
 $u:L \leq 1:500$

Figur 5.5:

Sammenhørende værdier af karakteristisk last og spændvidder, der sikrer, at de angivne nedbøjningskriterier overholdes. Alle tilfælde svarer til $E t = 50.000 \text{ kN/m}$, lastgruppe A og normale lasttilfælde. Fugtkorrektionsfaktoren er tillagt værdierne 0,8, henholdsvis 0,5. Øverste kurve i hvert kurvepar svarer til kernetykkelsen 295 mm, medens den nederste svarer til 195 mm.

Desuden kan der blive tale om at kontrollere nedbøjningerne. Disse beregnes af formel (4-2), idet der anvendes karakteristiske materialeleværdier.

På figur 5.4 er optegnet sammenhørende værdier af karakteristisk last og spændvidde, som opfylder kravene om, at maksimalnedbøjning er enten 1:250 eller 1:500 af spændvidden. Der er igen varieret på mineraluldstyrken og kernetykkelsen.

Flangematerialets karakteristiske stivhed er i de to tilfælde sat til 50.000 kN/m og i det tredje til det dobbelte. Ved sammenligning af b og c ses, at den øgede flangestivhed har størst effekt ved de store spændvidder, hvor bøjningsbidragets andel af nedbøjningen er relativt størst.

På figur 5.5 er vist tilsvarende eksempler, hvor der er indregnet forskellige værdier for fugtreduktionen.

5.3.1.1 Eksempler på brug af diagrammerne

Dækelement
med boliglast

Et dækelement antages at skulle beregnes for følgende laste:

- egenlast $g = 0,3 \text{ kN/m}^2$
- ikke-bærende skillevægge og slidlag $p_1 = 0,7 \text{ kN/m}^2$
- nyttelast i øvrigt $p_2 = 1,5 \text{ kN/m}^2$

Den regningsmæssige last i lastkombination 1.1 bliver så:

$$p_r = 1,0g + 1,3p_1 + 1,5p_2 = 3,46 \text{ kN/m}^2$$

Den karakteristiske last i lastkombination 1.1 bliver:

$$p = 1,0g + 1,0p_1 + 1,0p_2 = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

Hvis flangestivheden er større end eller lig med 50.000 kN/m, og nedbøjningen ikke må overstige 1:500 af spændvidden, fås de i tabel 5.7 angivne maksimale spændvidder. Spændvidderne findes af figur 5.3.a og 5.4.a, og i alle tilfælde viser det sig, at bæreevnekriteriet sætter grænsen for spændvidden.

Mineraluld- styrke	Kerne- tykkelse	Maksimal spændvidde
KM100	295 mm 195 mm	3,7 m 2,3 m
KM 50	295 mm 195 mm	1,8 m 1,2 m

Tabel 5.7.

Maksimale spændvidder for dækelement. Fugtklasse I.
Alle spændvidder er bæreevnebestemte.

Tagelement

Betragtes i stedet et tagelement, hvor der
ud over egenlasten er følgende laste:

- Tagbeklædning $p_1 = 0,25 \text{ kN/m}^2$
- Snelast $p_2 = 0,75 \text{ kN/m}^2$

Den regningsmæssige henholdsvis den karak-
teristiske last i lastkombination 1.1 bli-
ver så:

$$p_r = 1,75 \text{ kN/m}^2 \quad \text{og} \quad p_k = 1,30 \text{ kN/m}^2$$

Ved hjælp af figur 5.3, 5.4 og 5.5 kan de
maksimale spændvidder atter findes ud fra
de samme kriterier. Resultatet er vist i
tabel 5.8, hvor indflydelsen af en fugt-
betinget styrkereduktion også er vist.

Det fremgår af disse eksempler, at med
den anvendte flangestivhed, der ligger i
underkanten af, hvad der er typisk for
9-12 mm konstruktionskrydsfinér, vil
bæreevnekriteriet være dimensionsgivende
i alle de betragtede tilfælde.

Mineraluld- styrke	K_{fugt}	Kernetykkelse	Maksimal spændvidde
KM100	1,0 0,8 0,5	195-295 mm	5,0-7,3 m 3,9-5,9 m 2,5-3,7 m
KM 50	1,0 0,8 0,5	195-295 mm	2,5-3,7 m 2,0-2,9 m 1,2-1,9 m

Tabel 5.8:

Maksimale spændvidder for tagelementer. Fugt-
klasse I og U. Alle spændvidder er bæreevnebe-
stemte.

5.3.2 Dækelementer med kantafstivning

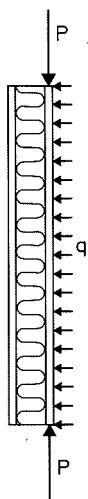
Som anført i afsnit 4.1.4.3 kan mineraluldbaserede sandwichdækelementer med ende- og kantskot beregnes i henhold til Trænormens regler for stressed-skin-elementer. Der kan dog ses bort fra flangens eventuelle foldning, og tilsvarende fra det stivhedsbetingede krav til den indbyrdes kropsafstand, hvis der anvendes et kernemateriale af konstruktionsmineraluld med en styrke på KM 50 eller bedre.

5.3.3 Bærende vægelementer uden kant- og endeskot

I afsnit 4.1.5.1 er omtalt en teori, som giver rimelig god overensstemmelse med forsøgsresultaterne fra bæreevneforsøg med rene sandwichvægelementer.

Teorien vil ikke blive gengivet her, men der er vist nogle bæreevnediagrammer udarbejdet på grundlag af teorien i [15].

Der er i dette afsnit set bort fra tilfælde, hvor der stilles særlige brandtekniske krav til restbæreevne.



I diagrammerne behandles vægelementer med ens flanger. Elementerne forudsættes belastet med en jævnt fordelt, lodret last, der angriber på den ene flange, og elementerne forudsættes understøttet simpelt i begge ender af den belastede flange. Endvidere kan der tages hensyn til en tværlast (vindlast), der i diagrammerne forudsættes at virke i den for vægelementet ugunstigste retning.

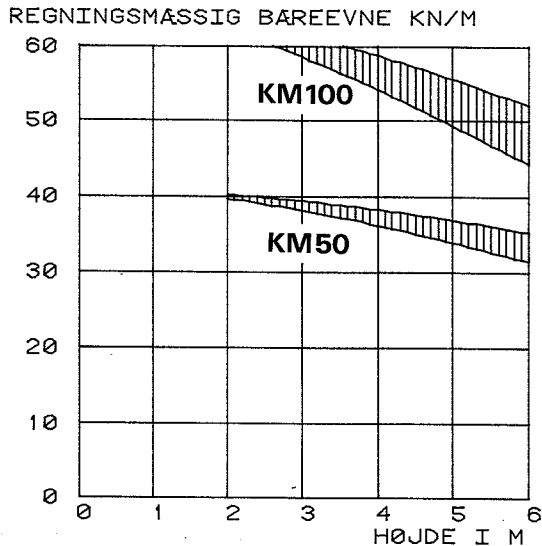
I praksis vil den lodrette lasts excentricitet som oftest være mindre end den i diagrammerne anvendte.

Imidlertid er vægelementernes bæreevne, når den lodrette last angriber i den ene flanges plan, i mange tilfælde større end nødvendigt, og der er derfor ikke medtaget diagrammer for mindre excentriciteter.

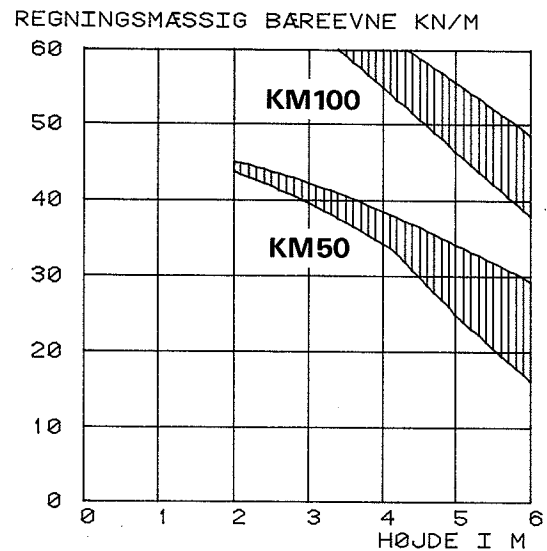
Diagrammerne er beregnet af formlerne (4-9) og (4-10), idet de dog er udvidet til også at indregne tværlast. Ved beregningen af den kritiske foldespænding (formel (4-11)) er faktoren ψ sat lig med 0,2. Flangestivheden i diagrammerne svarer til en typisk 12 mm konstruktionskrydsfinér.

Det har vist sig, at den regningsmæssige brudtilstand ved lille tværlast svarer

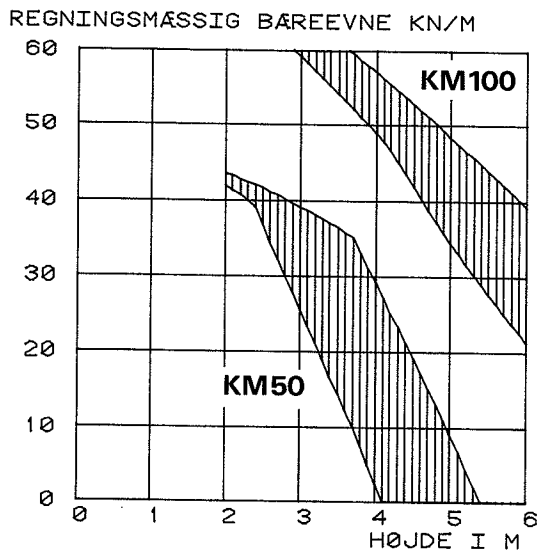
til flangefoldningsbrud (P_{σ}), medens den ved større tværlast svarer til forskydningsbrud i limforbindelsen (P_{τ}).



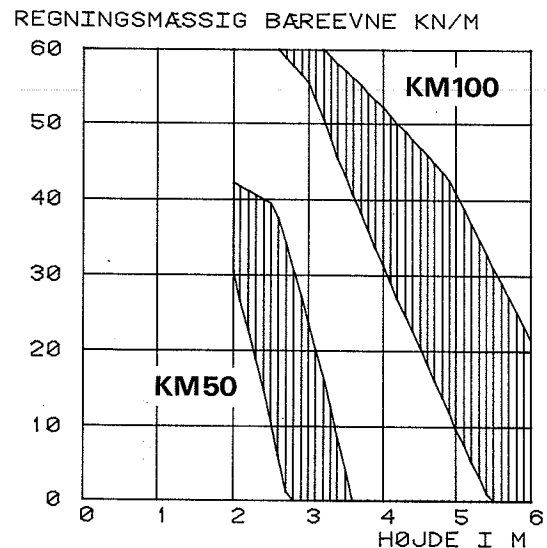
a. Ingen tværlast.
Lastgruppe A



b. Tværlast: $q_r = 0,5 \text{ kN/m}^2$
Lastgruppe C



c. Tværlast $q_r = 1,0 \text{ kN/m}^2$
Lastgruppe C



d. Tværlast: $q_r = 1,5 \text{ kN/m}^2$
Lastgruppe C

Figur 5.6:

Bæreevnekurver for rene sandwichvægelementer med ens flanger. Bæreevnen er udtrykt ved en lodret linielast, der angriber i den ene flanges plan, idet det er forudsat, at elementet samtidig er udsat for en tværlast (fladelast), der angriber i den for elementet ugunstigste retning.

I dette tilfælde er $E t = 30.000 \text{ kN/m}$ og $t = 12 \text{ mm}$, normale lasttilfælde og fugtklasse I.

Øverste kurve i hvert kurvepar svarer til kernetykkelsen 195 mm, medens den nederste svarer til 145 mm.

Da den regningsmæssige last på vægelementer i en- og toetagers bygninger typisk ligger i intervallet 5-20 kN/m, ses af diagrammerne, at uden tværlast har elementerne rigelig bæreevne. Med et regningsmæssigt vindtryk på 1 kN/m², ses, at de tynde KM50-elementer ingen lodret last kan bære, hvis de er over 4,1 m høje, men ved en typisk højde på 2,5 - 3 m har rigelig bæreevne overfor lodret last.

5.3.4 Bærende vægelementer med kantforstærkninger

Vægelementer med kantlister eller med kantlister og kantskot vil have en bæreevne større end bæreevnen af rene sandwichelementer.

En nøjagtigere dimensionering kan eventuelt ske efter trænormens regler, idet kernematerialets afstivning af flangerne mod lokalfoldning kan indregnes i et vist omfang.

Brandteknisk er der opnået en BD-30 godkendelse for vægelementer med kantlister (se afsnit 4.2.2.3), med en restbæreevne på 14 kN/m udtrykt i karakteristisk last.

6. BYGGETEKNIK

De byggetekniske undersøgelser havde til formål at belyse elementernes praktiske anvendelsesmuligheder og de heraf afledte funktionskrav og detailundersøgelser af samlings- og tilslutningsdetaljer og montage metoder. Undersøgelserne er udført af Cowiconsult og beskrevet i [11] og [24].

Resultatet af undersøgelserne er baseret på de i kapitel 4 beskrevne delundersøgelser, og erfaringer fra en række byggerier, hvori der er indgået mineraluldbaserede sandwichelementer, samt en analyse af bygninger som helt eller delvis er tænkt opbygget af sandwichelementer.

I dette kapitel vil de nævnte rapporter ikke blive resumeret i deres helhed, men enkelte dele vil blive trukket frem.

For økonomiundersøgelserne [11] gælder, at dens prissammenligning med andre elementer med tilsvarende ydeevne næppe kan forventes at bevare sin gyldighed. Markedsmekanismer, forbedret produktionsteknik og lignende, vil til stadighed ændre sammenligningsgrundlaget, og resultatet i [11] må derfor kun tages som udtryk for situationen på undersøgelsestidspunktet.

6.1 ANVENDELSESMULIGHEDER

Elementernes force ligger i, at de kombinerer bæreevne med gode varmeisolerende egenskaber, og de kan derfor med fordel anvendes som klimaskærm (tag og ydervægge). I det omfang, der stilles lydtekniske krav, vil de derimod ikke umiddelbart egne sig til adskillende vægge og etageadskillelser.

Af de i kapitel 5 viste eksempler fremgår, at dækelementer uden kantskot vil kunne klare spændvidder på 4-6 m, hvis de anvendes som tagelementer, og 3-4 m, hvis de anvendes som etageadskillelse eller krybekælderdek. Vægelementernes bæreevne er tilstrækkelig til, at de kan anvendes som bærende og afstivende vægge i 1-2 etagers bygninger.

For såvel dæk- som vægelementer gælder, at deres ydeevne som bærende konstruktion forbedres mærkbart, hvis de forsynes med kantlister og kantskot, men også at brandmæssige krav kan begrænse anvendelsesmu-

lighederne, hvis der anvendes brandteknisk uegnede materialer.

Som omtalt i afsnit 4.2 er der opnået en BD-30 klassifikation for visse vægelementudformninger (se afsnit 4.2.2.3 eller [18]). En BD-klassifikation kan muligvis opnås for visse dækelementudformninger (se afsnit 4.2.2.1 eller [17]).

I en udviklingsfase er det ikke muligt at få afklaret alle anvendelsesmulighederne, hvorfor ovennævnte kun er at betragte som eksempler, der umiddelbart falder i øjnene, og det må forventes, at der fremover også vil vise sig andre anvendelsesmuligheder.

Det kan således anbefales at holde sig orienteret via producenterne brochurer, hvori den nyeste viden om anvendelsesmuligheder og samlinger kan forventes præsenteret.

6.2 ELEMENTUDFORMNING

Udover de materialekrav og hovedmål, som en beregning i henhold til kapitel 5 kan give anledning til, skal her omtales enkelte andre forhold vedrørende detailudformningen.

6.2.1 Præferencemål

Tykkelse

Den nuværende produktionsteknik peger på følgende præferencemål for kernetykkelser: 145 - 195 - 220 - 235 - 250 - 295 mm, (tilpasset mineraluldpladernes produktionsbredde), og de vil give de i tabel 6.1 angivne k-værdier.

Kernetykkelse (mm)	k-værdi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
145	0,26
195	0,20
220	0,18
235	0,17
250	0,16
295	0,14

Tabel 6.1:

k-værdier for mineraluldbaserede sandwichelementer med 12 mm krydsfinérflanger og de angivne kernetykkelser. Kilde [24].

Bredde

Som modulmål for elementbredden kan peges på 12M, der er begrundet i, at mange plader til flanger forhandles i bredder på omkring 120 cm, men andre tal kunne dog også komme på tale.

6.2.2 Kantdetaljer

Som det fremgår af styrke- og stivhedsundersøgelserne er kantlister og -skot ikke altid nødvendige for at sikre elementerne en anvendelig bæreevne.

Der er udviklet samlingsdetaljer for rene sandwichelementer, men disse samlingsdetaljer er dog bedst egnede til ikke-bærende vægelementer.

Den mest viste kantudformning i [24] består af kantliste og kantskot, idet kantskottet dog udelades i visse tilfælde langs vægelementernes lodrette ender. D.v.s. samme princip, som blev anvendt i DTH's Nulenergihus [3]. Se desuden [34].

Elementer uden kantskot kan under transport og montage risikere at få beskadiget den fritliggende mineraluld. Hittidig erfaring viser dog, at risikoen er minimal.

Derimod må man ved passende afdækning på byggepladsen sikre sig mod direkte fugtindtrængning i mineralulden.

6.2.3 Overflader

Kravene til elementernes overflader er betinget af æstetiske, brandtekniske og fugt-tekniske hensyn.

Der vil typisk være tale om enten at forsyne flangerne med en ekstra beklædning (f.eks. regnskærm) eller at give flangerne en passende overfladebehandling, f.eks. træbeskyttelsesmiddel (udvendig) eller brandhæmmende maling (indvendig).

6.3 SAMLINGSDETALJER

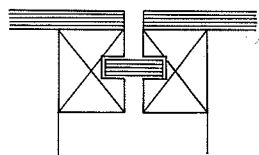
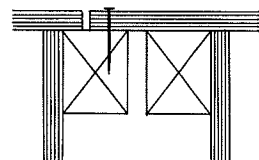
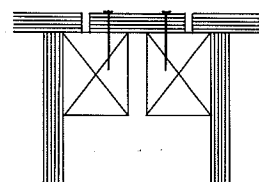
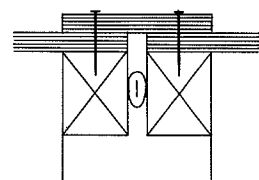
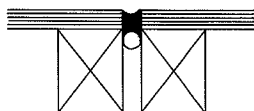
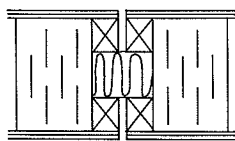
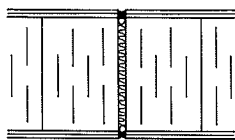
I dette afsnit belyses en del af problematikken i forbindelse med detailudformningen af samlingerne. Specifikke samlingsdetaljer brugt i praksis er beskrevet i [24] og [3].

De væsentligste problemer søges belyst ved en gennemgang af et par samlinger. Da erfaringerne med sandwichelementernes brug i praksis endnu er begrænsede, vil de viste løsninger næppe være optimale, og det må forventes, at der fremover fremkommer bedre løsninger.

Der vil kun blive tale om samlinger mellem to sandwichelementer eller mellem sandwich-

element og fundament. Tilslutning til andre bygningsdelementer byder på så mange varianter, at det vil være urimeligt at medtage dem her.

6.3.1 Væg-væg-samlinger



Samlingen kan ikke udformes med de to vægelementer stødt helt sammen, da bl.a. muligheden for at optage målafvigelser og længdeudvidelser og montagehensyn fordrer en vis fugebredde (5-10 mm). Fugens tætning må så etableres ved hjælp af fugetætningsmateriale, der anbringes samtidig med eller efter elementernes montage.

Mellem elementer med kantlister kan der i hulrummet mellem kantlisterne anbringes blød mineraluld, som sammenpresses under montagen. Derved sikres en passende varmeisolering, og konvektion i fugen begrænses.

Indad skal fugen gøres diffusionstæt. Dette er i flere tilfælde søgt etableret ved hjælp af en fugemasse med bundstopning, men der synes at være problemer med at sikre en god vedhæftning mellem fugemasse og flangeenderne.

En anden løsning kan være at stoppe fugen med et ekspanderende fugebånd, og så eventuelt ydermere at lukke fugen indadtil med en laske (eventuelt sømlimet). Laskesamlingen gør det desuden muligt at få overført kræfter mellem flangerne i de to vægelementer. Laskesamlingen kan etableres med en udvendig laske, eller ved en undersænket laske, hvorved spring i overfladen undgås.

Udvendige lasker anvendes som regel kun i tilfælde, hvor sandwichelementets overflade alligevel skal skjules bag en beklædning.

I stedet for en laskesamling kan den samme funktion opnås ved at lade den ene flange være forskudt i forhold til kantlisterne, således at flangen på det ene element efter montagen overlapper kantlisten på det andet.

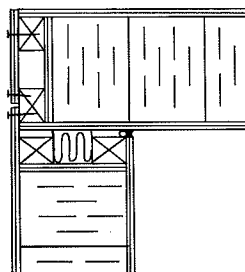
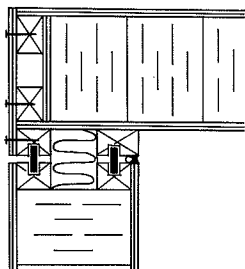
Det kan i disse samlinger volde problemer at overholde afstandskravene for sømmene, men med lidt omhu kan det lade sig gøre.

Laskerne og den overlappende flange sikrer også i en vis grad mod differensbevægelser vinkelret på flangeplanet. Hindring af disse differensbevægelser er i andre tilfælde søgt klaret ved en fer-not løsning.

Fråses der en not i de to kantlister, kan en krydsfinérsløjfe eller lignende anbringes som en form for forskydningslås. Sløjfesamlingen er anvendt i DTH's Nulenergi- hus og i andre forsøgsbyggerier, men det kan volde montagemæssige problemer at få anbragt sløjferne.

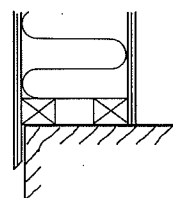
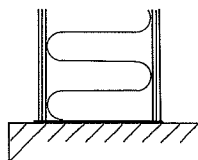
Laskerne, den overlappende flange og sløjfen har også brandteknisk betydning, idet de sinker gennembrænding gennem samlingen.

Lukningen af fugen udad kan i princippet ske på samme måde som indad, men der skal dog være mulighed for en vis grad af udluftning (trykudligning), således at ophobet fugt får mulighed for at komme ud. Fugen kan eventuelt undlades lukket, hvis der udvendig er anbragt en regnskærm.



Hjørnesamlingen kan udformes efter samme princip, idet fer-not løsninger dog fordrer, at ekstra kantlister monteres på det ene elements flange. Dette princip blev anvendt i DTH's Nulenergi-hus, hvor målet var en konsekvent brug af fer-not samlingen, idet alle vægelementer havde samme kantløsning i form af kantlister med not. En anden løsning, svarende til laskeløsningen, kan være at lade den udvendige flange på det ene element overlappe, således at der kan sikres en fastholdelse mellem de to elementer ved, at den overlappende flangedel sømmes til kantlisten på det andet element. En ekstra laskeplade kan så lukke af for hulrummet mellem kantlisterne.

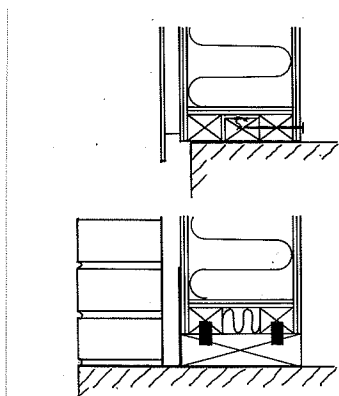
6.3.2 Væg-fundament-samling



Samlingen mellem vægelement og fundament bør sikre, at begge flangers kræfter kan overføres. Specielt i en brandsituation skal den ueksponerede flange kunne overtage hele belastningen, hvis den fornødne restbæreevne skal sikres.

Begge flanger bør derfor så vidt muligt hvile direkte af på fundamentet, dog med murpap eller lignende indskudt. Hvis dette ikke kan udføres, er den næstbedste løsning (statisk) at lade de to kantlister hvile af på fundamentet, således at flangekræfterne nedføres med minimal ekscentricitet.

Fastgørelsen til fundamentet og styringen af elementet under montagen kan ske ved hjælp af en fodrem, der i forvejen er bol-



tet til fundamentet. Remmen bør være tyndere end kantlisterne, således at elementet ikke kommer til at hvile af på remmen. Elementet kan så sømmes til remmen f.eks. via den underste kantliste.

En anden løsning, hentet fra [34], er at gøre fodremmen så bred, at såvel flanger som kantlister kan hvile af på remmen, som så overfører kræfterne til fundamentet. Styringen af elementet sker i dette tilfælde ved en krydsfinérsløjfe, idet der er fræset noter i kantlister og i fodrem. Fastgørelsen sker her ved hjælp af den udvendige laske, der er anvendt i væg-væg-samlingen, og som er ført ned over fodremmen, hvortil den så kan sømmes.

7. REFERENCER

- [1] Boligministeriet
"BYGNINGSREGLEMENT 1977"
København 1977.
- [2] Hans Nielsen og Knud Prebensen
"LETTE LIMEDE YDERVÆGSELEMENTER"
Rapport udført på grundlag af legat
fra Træfonden
Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører A/S
November 1974.
- [3] Laboratoriet for Varmeisolering,
Instituttet for Husbygning og
Laboratoriet for Varme- og Klimateknik,
DTH
"DTH-NUL-ENERGIHUS, ZERO-ENERGY-HOUSE"
Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1976.
- [4] Lauritz Rasmussen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
MATERIALEPRØVNING AF KRYDSFINER"
Rapport nr. 127
Instituttet for Husbygning, DTH,
Lyngby 1978.
- [5] Lauritz Rasmussen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
MATERIALEPRØVNING AF MINERALULD"
Rapport nr. 128
Instituttet for Husbygning, DTH,
Lyngby 1978.
- [6] Lauritz Rasmussen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
BØJNINGSFORSØG MED KORTTIDSLAST OG
LANGTIDSLAST"
Rapport nr. 129
Instituttet for Husbygning, DTH,
Lyngby 1978.
- [7] Nordiska Komitté för Byggbestämmelser
"NORDISKA RIKTLINJER FÖR TRÄKONSTRUKTIONER 3"
NKB-Skrift nr. 18
1973
- [8] Asta Nicolajsen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
LABORATORIEFORSØG TIL BEDØMMELSE AF DE
FUGTTEKNISKE EGENSKABER"
SBI-Rapport nr. 114
Statens Byggeforskningsinstitut
Hørsholm 1978.

- [9] Tommy Bunch-Nielsen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
PRODUKTIONSTEKNIK".
Cowi-publikation 315
Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører
Virum 1979.
- [10] Lauritz Rasmussen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
LUFTLYDISOLATION"
Rapport nr. 118
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1976.
- [11] Leif B. Jørgensen og Tommy Bunch-Nielsen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
ØKONOMIUNDERSØGELSER"
Cowi-publikation 316
Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører
Virum 1979.
- [12] Dansk Eternit-Fabrik A/S Aalborg
"UBRÆNDBARE ETERNIT SANDWICH-ELEMENTER"
Brochure
Juli 1975.
- [13] Egil Borchersen og Lauritz Rasmussen
"BÆREEVNEFORSØG MED SANDWICHVÆGELEMENTER
MED MINERALULDKERNE OG KRYDSFINÉRFLANGER"
Rapport nr. 112
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1976.
- [14] Egil Borchersen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
KORTTIDS-BØJNINGSFORSØG MED DÆKELEMEN-
TER MED KANTSKOT"
Rapport nr. 130
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1979.
- [15] Egil Borchersen
"BEREGNING AF SANDWICHBJÆLKER OG -SØJLER
MED BØJNINGSSLAPPE FLANGER"
Internt Notat
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1979.
- [16] Egil Borchersen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
AFSTIVENDE VÆGELEMENTER"
Rapport nr. 131
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1979.

- [17] Lauritz Rasmussen
"BRANDFORSØG MED 2 MINERALULDBASEREDE
SANDWICHELEMENTER"
Rapport nr. 122
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1977.
- [18] Lauritz Rasmussen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
VÆGELEMENTER UNDER BRANDPÅVIRKNING"
Rapport nr. 126
Instituttet for Husbygning, DTH
Lyngby 1978.
- [19] A/S Rockwool, Hedehusene
"ROCKWOOL LAMELELEMENTER"
Brochure nr. 601A
Maj 1975.
- [20] Superfos Aki A/S
Rapport 307/119-120,
September 1975.
- [21] Superfos Aki A/S
Rapport 307/86 og 307/87,
November 1974.
- [22] A/S Rockwool
FA-Rapport nr. 175,
Oktober 1974.
- [23] Superfos Aki A/S
Rapport 307/135,
Februar 1978
- [24] Tommy Bunch-Nielsen og Knud Prebensen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
BYGGETEKNIK"
Cowi-publikation 317
Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører
Virum 1979.
- [25] Uwe Lohse
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
FUGTOPHOBNING I VÆG- OG TAGELEMENTER"
UDSAT FOR DET NATURLIGE KLIMA"
SBI-Rapport 115
Statens Byggeforskningsinstitut
Hørsholm 1978.
- [26] DS 410
"Dansk Ingeniørforenings Norm for Last
på Bærende Konstruktioner"
2. udgave 1977

- [27] DS 413
"Dansk Ingeniørforenings Norm for
Trækonstruktioner"
3. udgave 1974.
- [28] DS 413. 2. udgave 1968.
- [29] Tommy Bunch-Nielsen:
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
k-VERDIMÅLINGER"
Cowi-publikation 314
Cowiconsult, Rådgivende Ingeniører
Virum 1978
- [30] DS 418
"Dansk Ingeniørforenings regler for
beregning af bygningers varmetab"
4. udgave 1977.
- [31] A/S Rockwool
"ROCKWOOL LAMELEMENTER
- EKSEMPLER OG IDEER"
Brochure nr. 605A
November 1977
- [32] Lauritz Rasmussen
"MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER.
EN METODE TIL IKKE-DESTRUKTIV KONTROL
AF LIMFORBINDELSE"
Rapport nr. 133
Instituttet for Husbygning, DTH,
Lyngby 1979
- [33] Lauritz Rasmussen
"BÆRENDE OG HØJISOLERENDE MINERALULD-
BASEREDE SANDWICHELEMENTER.
TEORI OG FORSØG"
Licentiatafhandling. Forventes publiceret
1980 fra Instituttet for Husbygning.
- [34] Superfos Glasuld a/s
"SUPERFOS 0-ENERGI-ELEMENT BÆRENDE BAGMUR"
Brochure
- [35] Erik Lyngsøe-Petersen
"HISTORIEN OM UDVIKLING AF ET BYGGEELEMENT
1972-1976"
- Superfos Glasuld a/s, juni 1976