

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **126**

LAURITZ RASMUSSEN

**MINERALULDBASEREDE
SANDWICHELEMENTER
VÆGELEMENTER UNDER BRANDPÅVIRKNING**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1978

MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER

VÆGLEMENTER UNDER BRANDPÅVIRKNING

LAURITZ RASMUSSEN

Delrapport under TEKNOLOGIRÅDSPROJEKT 1976-1978

Projektdeltagere

Cowiconsult Rådgivende Ingeniører AS

Instituttet for Husbygning DTH

Rockwool A/S

Statens Byggeforskningsinstitut SBI

Superfos Glasuld a/s

Rapport 126 - Instituttet for Husbygning - 1978

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD	1
INDHOLDSFORTEGNELSE	2
SAMMENFATNING	3
1. INDLEDNING	4
2. TEORETISK VURDERING AF ELEMENTERNES RESTBÆREEVNE	6
2.1 Vægelementer uden kantforstærkning	10
2.1.1 Beregning af restbæreevne	10
2.1.2 Bæreevnepforsøg (simuleret indbrændingsforløb)	17
2.2 Vægelementer med forstærkninger ved elementsamlinger	19
2.2.1 Beregning af restbæreevne	20
2.2.2 Bæreevnepforsøg (simuleret indbrændingsforløb)	24
3. BRANDTEKNISKE PRØVNINGER	28
3.1 Prøveelementer (vægkonstruktioner)	28
3.2 Prøvningsopstilling	29
3.3 Målinger	30
3.4 Diskussion af forsøg og måleresultater	32
3.5 Konklusion	39
4. LITTERATURREFERENCER	41
SUMMARY	42

BILAG

Bilag 1:	Arbejdslinier for forsøgselement VB-1A med simuleret indbrænding.
Bilag 2:	Arbejdslinier for forsøgselement VB-1B med simuleret indbrænding.
Bilag 3:	Arbejdslinier for forsøgselement VB-2A med simuleret indbrænding.
Bilag 4:	Arbejdslinier for forsøgselement VB-2B med simuleret indbrænding.
Bilag 5:	Vægelementer til brandprøvning.
Bilag 6:	Detail A - vægelementer til brandprøv- ning (jvf. bilag 5).
Bilag 7:	Detail B - vægelementer til brandprøv- ning (jvf. bilag 5).
Bilag 8:	Vandret snit i prøveopstilling (elementsamling).
Bilag 9:	Lodret snit i prøveopstilling (lastpåførsel).
Bilag 10:	Placering af flytningsmålene.
Bilag 11:	Placering af termoelementer.

FORORD

Nærværende rapport indgår i en serie delrapporter, som omhandler de videre undersøgelser af de mineraluldbaserede sandwich-elementer, der blev anvendt i DTH's nul-energihus.

I denne delrapport redegøres bl.a. for 2 brandtekniske prøvninger af mineraluldbaserede sandwich-vægelementer med kerner af henholdsvis glasuld- og stenuld-lameller.

Prøvningerne er udført i samarbejde med Statsprøveanstalten i april 1978 og udført som klassifikationsprøvninger for bærende bygningsdele efter DS 1052.

Selve den brandtekniske prøvning er udført i overensstemmelse med DS 1051: "Brandtekniske prøvninger af bygningsdeles modstandsevne mod brand".

De udførte prøvninger er de første autoriserede prøvninger i Danmark, hvor vægelementer er belastet under selve prøvningen.

Prøvningsattesterne opbevares af Institutet for Husbygning, der formelt står som rekvirent af de udførte prøvninger.

Rapporten søger desuden at give en mere generel vurdering af sandwich-vægelementernes bæreevne under brandbelastning, baseret på teoretiske overvejelser, suppleret med nogle få bæreevnepforsøg på elementer med simuleret indbrændingsforløb.

Den teoretiske vurdering er ikke tilstrækkelig for en brandteknisk klassifikation, men er tænkt som et redskab for vurderingen af konstruktionens restbæreevne forud for de egentlige og meget bekostelige brandtekniske prøvninger.

Lektor, lic.techn. Egil Borchersen takkes for godt samarbejde ved forsøgenes tilrettelæggelse og gennemførelse og for gennemlæsning af manuskriptet. Desuden takkes lektor, civilingeniør Torben Jakobsen for gennemlæsning af manuskriptet.

Lyngby, maj 1978

Lauritz Rasmussen

SAMMENFATNING

	I rapporten belyses mineraluldbaserede sandwich-vægelementers egenskaber under brandpåvirkning. Herunder vurderes elementernes restbæreevne dels på et teoretisk, dels på et eksperimentelt grundlag.
Konstruktion	Vægelementerne er opbygget som en 3-lags sandwichkonstruktion med flanger af træbaserede plader (f.eks. krydsfinér) limet til en kerne af lamelskåret mineraluld. Desuden kan elementerne være forsynet med forskellige kantløsninger af hensyn til elementernes samling, befæstigelse eller samvirken med nabokonstruktioner.
Statisk virkemåde under brand	Under brandpåvirkning vil den eksponerede flange brænde bort efter 10-15 minutter, og konstruktionen kan herefter styrkemæssigt ikke optræde som en sandwich-konstruktion. Restbæreevnen skal alene sikres af den ueksponerede flangeplade understøttet af den del af mineralulden, der endnu efter brandpåvirkningen er intakt eller eventuelt af de forstærkninger, der kan indbygges i samlingen. Tykkelsen og stivheden af den uforbrændte mineraluld har stor indflydelse på de beskudne restbæreevner af konstruktioner uden kantforstærkninger. For konstruktioner med forstærkninger i kanterne kan opnås væsentlig større restbæreevner primært bestemt af kanternes eget bidrag til restbæreevnen.
Indbrændingsforløb	Indbrændingen i konstruktionen og dermed gennembrændingsmodstanden afhænger af den eksponerede flanges brandmodstandsevne og af indbrændingsforløbet i mineraluldkernen. Indbrændingen i krydsfinérflanger sker med en hastighed på ca. 1 mm pr. minut, og den efterfølgende indbrænding i mineralulden sker med en hastighed på 4-6 mm pr. minut.
Brandtekniske prøvninger	Konstruktionens brandmodstandsevne er belyst gennem to BD-30-klassifikationsprøvninger (efter DS 1051) på etagehøje elementer med 12 mm krydsfinérflanger og kerner af 145 mm mineraluldlameller af henholdsvis glasuld og stenuld. Desuden var elementerne forsynet med 35×45 mm kantlister for en fer/not-samling pr. 1,20 m.
Klassifikation	Denne vægkonstruktion er herefter klassificeret efter DS 1052 som: <u>adskillende, bærende BD-bygningsdel 30</u> når den karakteristiske last ikke overstiger 14 kN (1,4 tons) pr. løbende meter væg, og belastningen overføres til væggens ikke brandpåvirkede side.

1. INDLEDNING

Som bærende, adskillende bygningsdel skal sandwichkonstruktionen ifølge Bygningsreglement opfylde en række brandtekniske krav.

En konstruktion, der primært udnytter styrkeegenskaberne i konstruktionens overflade, er særlig udsat ved brandpåvirkning både udefra og indefra.

Det spørgsmål, der trænger sig mest på, er derfor spørgsmålet om elementets bæreevne under brandpåvirkning. Selv om hovedspændingerne primært ligger i konstruktionens overflade, er vægkonstruktionens meget store bæreevne overfor lodret last (se litt.[7]) betinget af en effektiv samvirken af flangepladerne gennem mineraluld-kernen og limforbindelsen mellem disse.

De styrkemæssige egenskaber under brand afhænger altså også af limforbindelsen og kernematerialets egenskaber. Anvendelsen af mineraluld som kernelag i modsætning til kunststofkerner er en væsentlig forbedring af konstruktionens branddrøjhed, men selv om mineraluldens fibre kan tåle temperaturer op til ca. 800°C, kan de bindemidler, der "hæfter" fibrene sammen ikke kan tåle temperaturer på mere end 250-300°C. Det betyder, at mineralulden stort set mister sin styrke ved temperaturer over dette niveau.

Hvor hurtigt mineralulden mister sin styrke ind igennem konstruktionen, er søgt belyst ved i de her omtalte brandforsøg at registrere temperaturforløbene ind gennem konstruktionen under selve brandprøvningen.

En tilsyneladende effektiv måde at sikre konstruktionen en tilstrækkelig restbæreevne, ville være at indskrænke valget af flangematerialer til brandimprægnerede eller ikke brandbare materialer.

Min formodning er imidlertid, at anvendelsen af brandimprægnerede eller ikke brandbare flangematerialer har kun betydning for de overfladebrandtekniske egenskaber.

Forsøg på Superfos Glasuld a/s's brandlaboratorium med trykbrandimprægneret krydsfinér (rapport 307/135) har helt klart bekræftet,

at gennembrændingsmodstanden er den samme som for uimprægneret krydsfinér.

Anvendelsen af ikke brandbare flangematerialer vil naturligvis hindre denne gennembrænding, men med de små flangetykkelser, der er tale om, vil det næppe være muligt at sikre, at der ikke lige under den eksponerede overflade ville ske temperaturstigninger på over 250-300°C, hvorved bindemidlerne i mineralulden forsvinder. Dette vil igen betyde, at de to flangeplader ikke kan samvirke om belastningsoptagelsen, hvorved restbæreevnen også i dette tilfælde skal sikres af den ikke eksponerede flange, eventuelt understøttet af den del af mineraluldkernen, der ikke har mistet sin styrke.

Det er netop denne "konstruktionsrest", som nærværende rapport søger at give en vurdering af i styrke-/stivhedsmæssig henseende.

Det skal pointeres meget kraftigt, at: skal restbæreevnen sikres gennem det reducerede tværsnit, må understøtningerne være udformet således, at belastningerne overføres til væggens ikke brandpåvirkede side.

Forud for de i nærværende rapport beskrevne klassifikationsprøvninger blev i forbindelse med DTH's nulenergihus udført to pilotforsøg af Inger Nygård i samarbejde med Superfos Glasuld a/s's brandlaboratorium.

Elementerne i de to forsøg var opbygget svarende til typerne 2a og 2b på figur 2.1, side 7. De eksponerede flanger bestod af 12 mm spånplade og de ueksponerede flanger + kantskot af 9 mm krydsfinér. Kernematerialet bestod af 30 cm Glasuldlameller.

Restbæreevnen efter 30 minutters brandpåvirkning (efter DS 1051) målt til henholdsvis 24 kN/m og 31 kN/m for elementlængden 2,40 m.

Forsøgene er beskrevet i: Intern notat 1974-10-08/7311/IN, Instituttet for Husbygning.

2. TEORETISK VURDERING AF ELEMENTERNES RESTBÆREEVNE

DS 1052

Ifølge DS 1052: "Brandteknisk klassifikation af bygningsdele (ekskl. døre)" (se litt.[2]) kan bygningsdele klassificeres ved prøvning. For sandwichkonstruktioner med flanger af træbaserede materialer er det kravene til klassen: "Branddrøj Bygningsdel" (BD-bygningsdel), der har interesse.

Om en branddrøj bærende bygningsdel hedder det i DS 1052 bl.a.: Hvis prøvelegemet er belastet under prøvning, må det ikke bryde sammen, og det skal efter slukning og afkøling have en restbæreevne, som er $\geq 1,5 \times$ prøvelasten.

Standarden giver ikke retningslinier for en teoretisk vurdering af en konstruktions modstandsevne ved brandpåvirkninger, og i sådanne tilfælde må der foretages en tolkning af DS 1052 med henblik på dette.

Den efterfølgende teoretiske vurdering giver således ikke grundlag for nogen brandteknisk klassifikation, men er kun tænkt som hjælp til vurdering af konstruktionens restbæreevne forud for de egentlige og meget bekostelige brandtekniske prøvninger.

Konstruktionsprincip

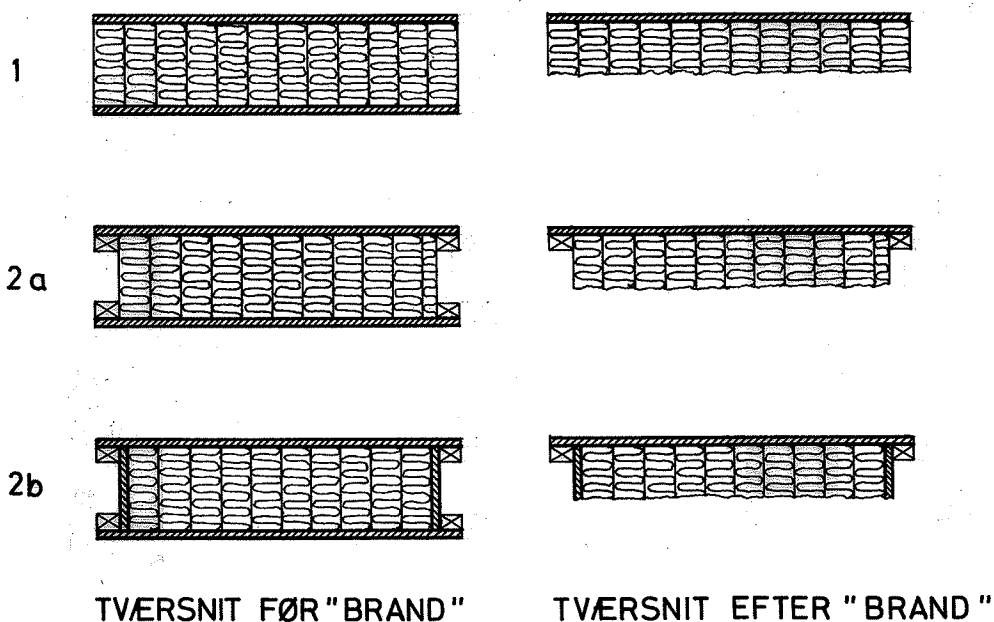
Den konstruktion, der behandles, er opbygget som en tre-lags sandwichkonstruktion med flanger af krydsfinérplader og kerne af lamelskåret mineraluld (glasuld eller stenuld). Mineralulden er limet til flangerne med en enkomponent polyurethanlim.

For konstruktionens praktiske anvendelighed har det vist sig nødvendigt i mange tilfælde at indbygge visse kantforstærkninger for at sikre elementernes befæstigelse eller samvirken med nabokonstruktioner, og der vil således i det følgende blive skelnet mellem sandwich-elementer henholdsvis med og uden kantforstærkninger, idet kantforstærkningerne giver en væsentlig forøgelse af konstruktionens restbæreevne.

Resttværsnit

På figur 2.1 er vist typiske tværsnit af de vægelementer, der ligger til grund for den teoretiske behandling. Kernetykkelsen (isoleringstykkelsen) kan varieres med lamelhøjden, hvorimod elementbredden oftest vil være bestemt af den tilgænge-

lige bredde for det pågældende plademateriale til flanger, og det vil med flanger af krydsfinér være bredder på ca. 1,20 m.



Figur 2.1:

Typiske tværsnit af sandwichvægelementer:

1. Sandwich uden kantforstærkninger
- 2a. Sandwich med kantlister pr. 1,20 m af uklassificeret konstruktionstræ (for fer/notsamling).
- 2b. Sandwich med kantlister og kantskot. Kantskottene er af samme materiale som flangerne (krydsfinér).

Kantlister og kantskot er sømlimet til flanger og skot.

I de skitserede resttværsnit forudsættes, at den flange, der eksponeres, brænder helt bort. Dette begrundes i, at træbaserede flangeplader, klæbet direkte på mineralulden, d.v.s. med en meget dårlig bortledning af varmen bag pladen, vil brænde/forkulle med en hastighed igennem pladetykkelsen på ca. 1 mm pr. minut (se f.eks. litt. [8]). Det betyder, at den brandpåvirkede flange vil brænde bort efter 10-15 minutter, en tid som ikke har interesse i relation til en brandteknisk klassifikation som BD-bygningsdel, hvor der opereres med tider på 30 minutter og opefter i spring á 30 minutter.

Hvis konstruktionen f.eks. ønskes klassificeret som bygningsdel BD 30, må man altså sikre sig, at resttværsnittet efter 30 minutters brandpåvirkning (standardbrand) har en restbæreevne, der er større end 1,5 gange den foreskrevne last.

Ved den foreskrevne last skal forstås den karakteristiske last, konstruktionen skal beregnes for i henhold til DS 410.1, Dansk Ingeniørforenings norm for "last på bærende konstruktioner".

Tilpasningen af teorien til de praktiske prøvninger sker ved at beregne restbæreevnen som resttværsnittets karakteristiske bæreevne på basis af materialernes karakteristiske styrke- og stivhedsegenskaber, d.v.s. materialeparametre uden partialkoefficienter og uden eventuelle reduktioner på grund af langtidseffekter.

De styrke- og stivhedsegenskaber, der ligger til grund for efterfølgende beregninger, tabel 2.1, er baseret på materialeprøvninger udført på de indgående materialer. Der henvises til litt. [9] og [10].

	Trykstyrke ≠ N/mm ²	Stivhed (E-modul) N/mm ²
12, 6 mm krydsfinér (Canadisk Softwood Plywood)	36	8300
Uklassificeret konstruktionstræ	35	7700
Mineraluld	0,03-0,16	3-9

Tabel 2.1

Styrke- og stivhedstal anvendt i beregning (20°C - 50%RF). Værdierne er baseret på udførte materialeprøvninger.

Det bemærkes, at for krydsfinérplader er E-værdien en fiktiv værdi, der knytter sig til den givne pladetykkelse.

Vedrørende materialedata for konstruktionstræ og krydsfinér henvises i øvrigt til litt. [3] og [4], idet det bemærkes, at de opgivne styrkeparametre er nominelle værdier, d.v.s. langtidsværdier (reduktion 60%) påført en partialkoefficient på 1,3.

Ved beregning af konstruktionens karakteristiske korttidsbæreevne (restbæreevne) kan der altså regnes med styrkeparametre, der er $1,3/0,6 = 2,17$ gange højere end ved normale bæreevneberegninger.

Beregningsforudsætninger

For at forenkle beregningerne gøres følgende forudsætninger:

- 1: Styrke og stivhed af det uforkullede træ er uændret efter brand.
- 2: Styrke og stivhed af mineralulden er uforandret efter opvarmning i zonen, hvor temperaturerne ikke har været højere end 250°C (kritiske temperatur for mineraluldens bindemidler).
- 3: Indbrændingen foregår efter en plan flade med konstant indbrændingshastighed.

Beregningerne baseres i øvrigt på den tekniske elasticitetsteori og knytter sig til principperne i DS 413, litt. [5].

Der betragtes kun centralt belastede søjler, d.v.s. søjler, hvor belastningen forudsættes at virke i linien gennem tværsnittenes tyngdepunktslinier.

De resttværsnit, der behandles, betegnes med trælitteraturens terminologi for "inhomogene tværsnit", d.v.s. tværsnit, hvor de indgående dele har forskellige styrke- og/eller stivhedsegenskaber. For sådanne tværsnit anvendes ikke de geometriske tværsnitts størrelser, men de transformerede, hvor de enkelte tværsnitsdele vægtes i forhold til deres elasticitetsmoduler.

Mellem tværsnittenes enkelte delelementer forudsættes fuld samvirken (limforbindelse).

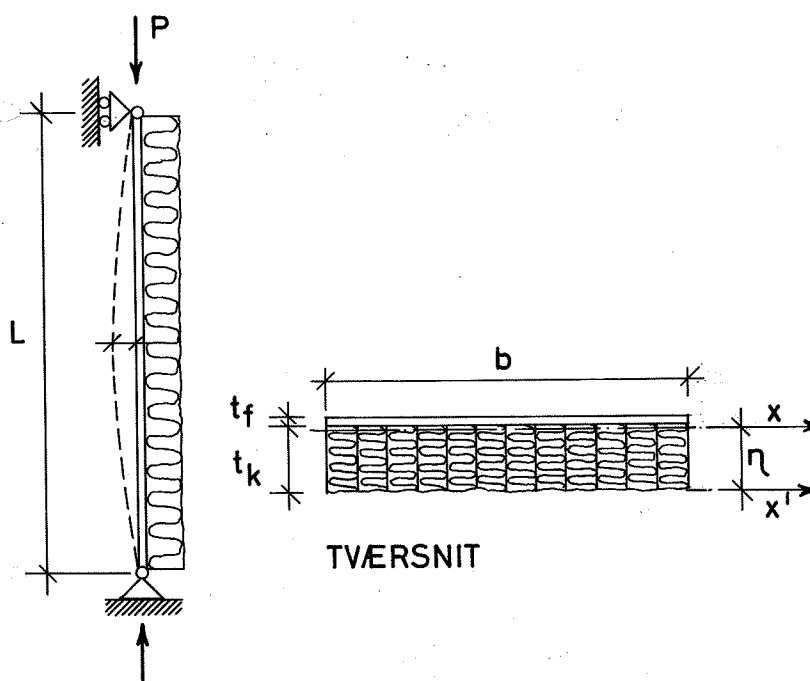
Det bemærkes, at den teoretiske behandling kun vedrører selve konstruktions-elementerne og ikke samlingerne mellem disse. Samlingernes brandtekniske egenskaber er imidlertid ofte det svageste

led i et bærende systems brandmodstandsevne, men vanskelige at underkaste en beregningsmæssig behandling.

2.1 Vægelementer uden kantforstærkninger

Restbæreevnen skal for et resttværsnit som vist på figur 2.2 alene sikres af den tynde flangeplade, understøttet af den mineraluld, der endnu efter brand ikke har mistet sin styrke.

Rent intuitivt synes et sådant tværsnit ikke at have nogen mærkbar bæreevne, men det viser sig, at mineralulden, alt afhængig af tykkelse og E-modul, medvirker til en væsentlig forøgelse af tværsnitets bøjningsstivhed og dermed en forøgelse af den kritiske last, der får søjlen til at knække ud.



Figur 2.2:

Sandwichsøjle uden kantforstærkninger efter brand.

2.1.1 Beregning af restbæreevne

Den sædvanlige analyse af stabiliteten af en aksialbelastet simpelt understøttet elastisk søjle, fører til stabilitetsbrud, når aksialbelastningen (den kritiske last P_{kr}) er lig Euler-lasten (P_E)

givet ved:

$$(2-1) \quad P_{kr} = P_E = \frac{\pi^2 B}{L^2}$$

hvor B er søjlens bøjningsstivhed, og L er søjlelængden. Der betragtes kun simpelt understøttede søjler, d.v.s. søjlelængden er identisk med den såkaldte "frie søjlelængde", som normalt indgår i Eulerformlen.

Denne beregning er kun gældende så længe den til Eulerlasten hørende kritiske spænding er mindre end proportionalitetsspændingen for det givne materiale ("slanke søjler").

Efter DS 413 betyder dette, at den kritiske trykspænding ikke må overstige 0,5 gange materialets trykbrudspænding.

Beregningsgang

For det inhomogene tværsnit, vist i figur 2.2 beregnes i det følgende de transformerede tværsnitsstørrelser.

Referenceelasticitetsmodulen, E_r , kan vælges frit, men vælges referencen svarende til et af de indgående materialer, simplificeres regningerne en del.

Tværsnittets transformerede areal:

$$(2-2) \quad A_t = b \left[\frac{E_f}{E_r} t_f + \frac{E_k}{E_r} t_k \right]$$

Transformeret statisk moment om x' :

$$(2-3) \quad S_{x',t} = b \left[\frac{E_f}{E_r} t_f \left(t_k + \frac{t_f}{2} \right) + \frac{E_k}{E_r} \frac{1}{2} t_k^2 \right]$$

Tyngdepunktsliniens afstand fra x' -aksen bliver herefter

$$(2-4) \quad \eta = \frac{S_{x',t}}{A_t}$$

Tværsnittets transformerede inertimoment om x' -aksen bliver:

$$(2-5) \quad I_{x',t} = b \left[\frac{E_f}{E_r} \left(\frac{1}{12} t_f^3 + \left(t_k + \frac{t_f}{2} \right)^2 t_f \right) + \frac{E_k}{E_r} \frac{1}{3} t_k^3 \right]$$

Tværsnittets transformerede inertimoment om x-aksen bliver herefter:

$$(2-6) \quad I_{x,t} = I_{x',t} - \eta^2 A_t$$

Det er nu muligt at bestemme søjlens inertiradius, og slankhedsforholdet λ :

$$(2-7) \quad i = \sqrt{\frac{I_{x,t}}{A_t}}$$

$$(2-8) \quad \lambda = \frac{L}{i} = L \sqrt{\frac{A_t}{I_{x,t}}}$$

Betingelsen for at bæreevnen kan beregnes efter (2-1) er ifølge DS 413 (se endvidere litt. [3]) at:

$$(2-9) \quad \left(\frac{L}{i}\right)^2 \geq \frac{2\pi^2 E}{s_c} \quad (\text{slanke søjler})$$

hvor s_c er materialets trykbrudstyrke. Fra materialeprøvningen litt. [9] fås forholdet mellem E og s_c for krydsfinér til 230, og betingelsen bliver:

$$\frac{L}{i} \geq 67$$

Betragtes f.eks. etagehøje vægelementer (søjlelængde ca. 2,50 m) med uforbrændte mineraluldstykker fra 0-20 cm, og elasticitetsmoduler på mineralulden varierende fra 3-9 N/mm² svarende til anvendelige typer, vil slankhedsforholdet være $\geq$ ca. 150.

Søjlebruddet sker således som et stabilitetsbrud (Euler-udknækning), og restbæreevnen kan beregnes efter (2-1).

Senere omtalte bæreevnepforsøg med simuleret indbrændingsforløb bekræfter også denne brudtype.

Til brug for beregning af søjlens bæreevne mangler herefter kun bestemmelsen af søjlens bøjningsstivhed, B , der udtrykkes ved:

$$(2-10) \quad B = E_r I_{x,t}$$

Udtrykket (2-1) kan omformes, så den kritiske last udtrykkes direkte ved slankhedsforholdet. (2-1) ser herefter således ud:

$$(2-11) \quad P_{kr} = \frac{\pi^2 E_r A_t}{\left(\frac{L}{i}\right)^2}$$

Beregningseksempel

Der betragtes en søjle, som vist på figur 2.2, med flange af en 12,6 mm krydsfinérplade ($\frac{1}{2}$ ") og en mineraluldkerne på 0,15 m. E-modulen for krydsfinérpladen sættes til 8300 N/mm^2 og for mineralulden 5 N/mm^2 . Søjlelængden sættes til 2,44 m svarende til en standard pladelængde på krydsfinér. Der betragtes en strimmel med bredden $b = 1 \text{ m}$.

Referencemodulen sættes til $E_r = E_f = 8300 \text{ N/mm}^2$.

$$\begin{aligned} A_t &= \left[t_f + \frac{E_k}{E_f} t_k \right] b \\ &= 0,0126 + \frac{5}{8300} \cdot 0,15 \\ &= 0,0126 + 0,00009 = 0,0126904 \text{ m}^2 \\ S_{x,t} &= \left[t_f \left(t_k + \frac{t_f}{2} \right) + \frac{E_k}{E_f} \frac{1}{2} t_k^2 \right] b \\ &= 0,0126 \left(0,15 + \frac{0,0126}{2} \right) + \frac{5}{8300} \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,15^2 \\ &= 0,00196938 + 0,00000678 = \\ &\quad \underline{0,00197616 \text{ m}^3} \\ \eta &= \frac{S_{x,t}}{A_t} = \frac{0,00197616}{0,0126904} = \underline{0,155721 \text{ m}} \end{aligned}$$

Det bemærkes, at det transformerede tværsnitsareal tilnærmelsesvis svarer til flangens tværsnitsareal, og at tyngdepunktslinien stort set er beliggende i flangens tyngdepunktslinie. Begge dele skyldes, at $E_k \ll E_f$. Det skal dog pointeres, at decimalerne har meget stor betydning i en beregning af denne karakter.

$$\begin{aligned}
 I_{x',t} &= \left[\frac{1}{12} t_f^3 + \left(t_k + \frac{t_f}{2} \right)^2 t_f + \frac{E_k}{E_f} \frac{1}{3} t_k \right] b \\
 &= \frac{1}{12} \cdot 0,0126^3 + \left(0,15 + \frac{0,0126}{2} \right)^2 \cdot 0,0126 \\
 &\quad + \frac{5}{8300} \cdot \frac{1}{3} \cdot 0,15^3 \\
 &= 0,00000017 + 0,00030781 + 0,00000068 \\
 &= \underline{0,00030866 \text{ m}^4}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{x,t} &= I_{x',t} - \eta^2 A_t \\
 &= 0,00030866 - 0,155721^2 \cdot 0,0126904 \\
 &= \underline{0,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4}
 \end{aligned}$$

Det ses, at inertimomentet er 5-6 gange større end flangens inertimoment om egen tyngdepunktsakse.

$$\begin{aligned}
 \frac{L}{i} &= L \sqrt{\frac{A_t}{I_{x,t}}} \\
 &= 2,44 \sqrt{\frac{0,0126904}{0,93} \cdot 10^6} = \underline{285} > \underline{67}
 \end{aligned}$$

D.v.s. søjlen kan betragtes som en Euler-søjle.

$$\begin{aligned}
 B &= E_f I_{x,t} \\
 &= 8300 \cdot 10^3 \cdot 0,93 \cdot 10^{-6} = \underline{7,719 \text{ kNm}^2/\text{m}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{kr} &= \frac{\pi^2 B}{L^2} \\
 &= \frac{\pi^2 7,719}{2,44^2} = \underline{12,8 \text{ kN/m}}
 \end{aligned}$$

Ud fra tolkningen af DS 1052 vil søjlen altså have tilstrækkelig restbæreevne, hvis den karakteristiske last ikke overstiger

$$\frac{12,8}{1,5} = \underline{8,5 \text{ kN/m}}$$

Var der i beregningen helt set bort fra mineraluldens stabiliserende virkning, ville søjlens bæreevne alene være bestemt af flangens Euler-bæreevne, givet ved:

$$\begin{aligned}
 P_{Ef} &= \frac{\pi^2 E_f I_f}{L^2} \\
 &= \frac{\pi^2 \cdot 8300 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{12} \cdot 0,0126^3}{2,44^2} = 2,3 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

hvor I_f er flangens inertimoment om egen tyngdepunktsakse.

D.v.s. mineralulden bevirker i dette tilfælde en forøgelse af bæreevnen 5-6 gange.

Styrende parametre

De parametre, der styrer denne bæreevneforøgelse er:

1. Tykkelsen af den intakte mineraluld efter brand.
2. Elasticitetsmodulen for den anvendte mineraluld.

På figur 2.3 er afbildet restbæreevnen pr. løbende meter væg som funktion af uldtykkelsen for forskellige E-moduler af mineralulden.

Med et tilstrækkeligt kendskab til indbrændingsforløbet i mineralulden er det altså muligt at få et indtryk af den restbæreevne, konstruktionen vil have efter en given brandpåvirkningstid.

Forsøg på Rockwool A/S's brandlaboratorium (rapport 175/1974) har vist, at indbrændingen i mineralulden foregår med en hastighed på ca. 5 mm pr. min.

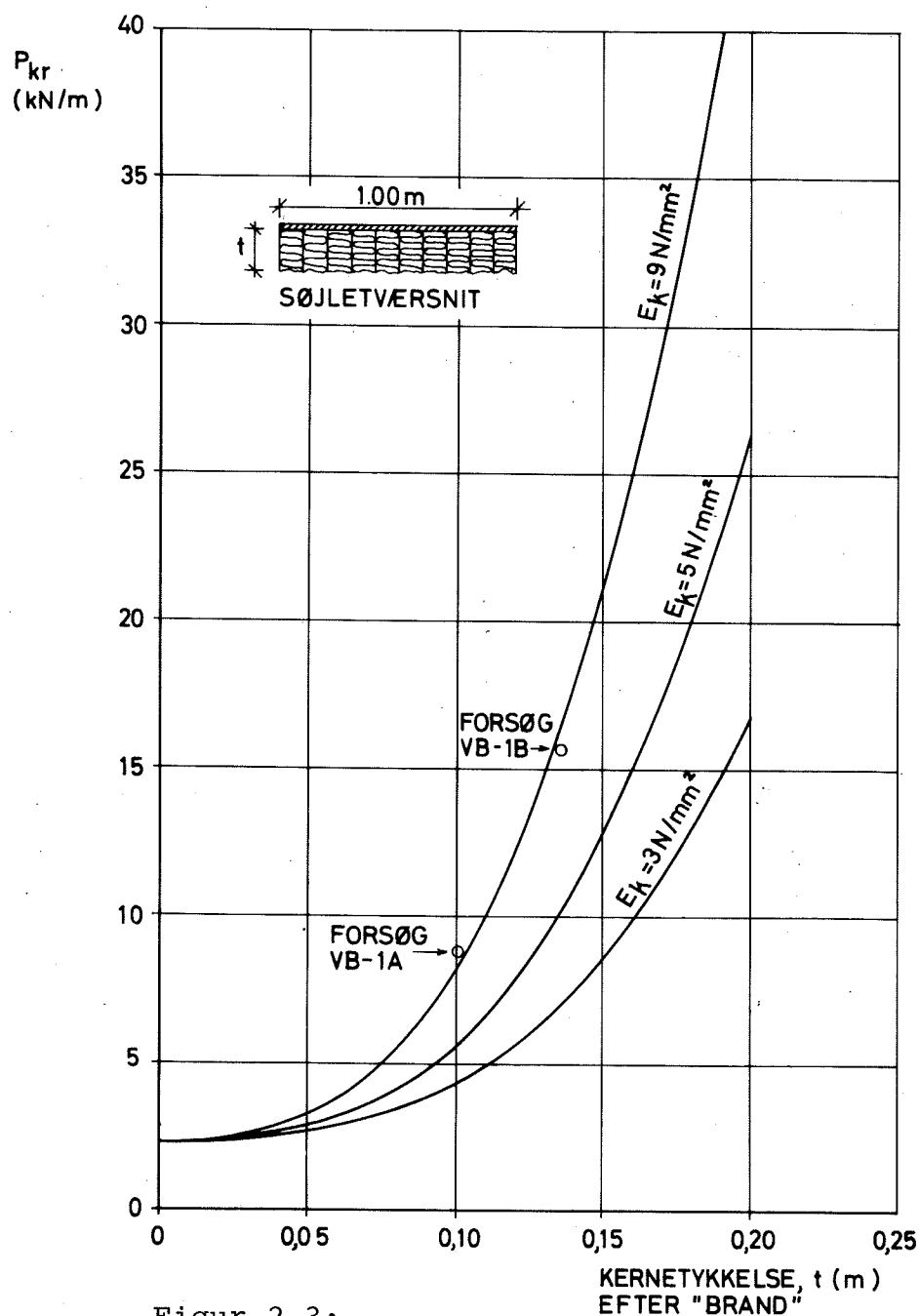
Resultatet er i god overensstemmelse med de resultater, der refereres i denne rapports kapitel 3. For en given last er det altså muligt at danne sig et indtryk af den nødvendige, totale kernetykkelse (isoleringstykkelse), der skal til for at sikre den ønskede restbæreevne.

Eksempel

Der betragtes en sandwichkonstruktion som i ovennævnte beregningseksempel. Konstruktionen ønskes klassificeret som BD 30 med en karakteristisk last (efter DS 410.1) på 8,5 kN pr. løbende meter væg.

Restbæreevnen efter 30 minutter skal altså være $1,5 \times 8,5 = 12,8$ kN/m.

Hertil kræves, at tykkelsen af den intakte mineraluld er ≥ 15 cm (se figur 2.3).



Figur 2.3:

Restbæreevnen (uden partialkoefficient 1,5) for "rene" sandwichelementer som funktion af tykkelsen af den ikke brandpåvirkede mineraluld for mineraluld med forskellige elasticitetsmoduler (E_k). Søjlelængden er overalt 2,44 m.

Der regnes med en 12,6 mm krydsfinérflange med elasticitetsmodulen 8300 N/mm^2 . Det bemærkes, at små ændringer af flangetykkelse og stivhed forskyder kurvernes udgangspunkt (flangens egen Euler-bæreevne), men berører næsten ikke kurvernes forløb for mineraluldtykkelser over 10 cm.

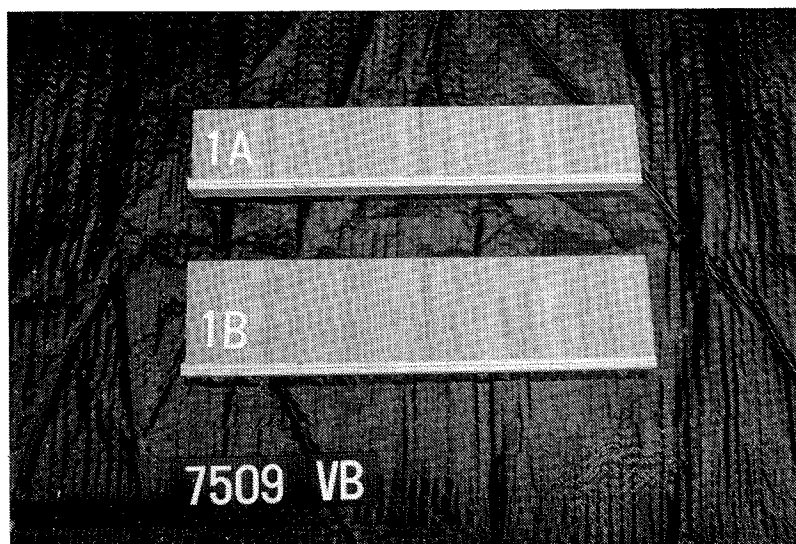
På figuren er indtegnet resultaterne af to bæreevneforsøg på elementer med simuleret indbrændingsforløb. Resultaterne skal sammenlignes med den teoretiske kurve for $E_k = 9 \text{ N/mm}^2$.

Indbrændingen i den eksponerede 12 mm flange sker med en hastighed på ca. 1 mm pr. minut. D.v.s. efter ca. 12 minutter begynder indbrændingen i mineralulden, der foregår i $30 - 12 = 18$ minutter. Med en indbrændingshastighed på ca. 0,5 cm pr. minut (plant indbrændingsforløb) er indbrændingen i mineralulden altså ca. 9 cm.

Det betyder, at en konstruktion med en kernetykkelse på ialt 24 cm må formodes at kunne klare den til BD 30-klassifikationen krævede restbæreevne.

2.1.2 Bæreevneforsøg (simuleret indbrændingsforløb)

Til støtte for de teoretiske overvejelser er der udført to bæreevneforsøg på sandwichelementer med simuleret indbrændingsforløb, d.v.s. elementerne er fremstillet med de reducerede tværsnit, der kunne tænkes at fremkomme efter en given brandpåvirkningstid.



Figur 2.4:

Tværsnit af forsøgselementer til bæreevneforsøg.

Forsøgselementer

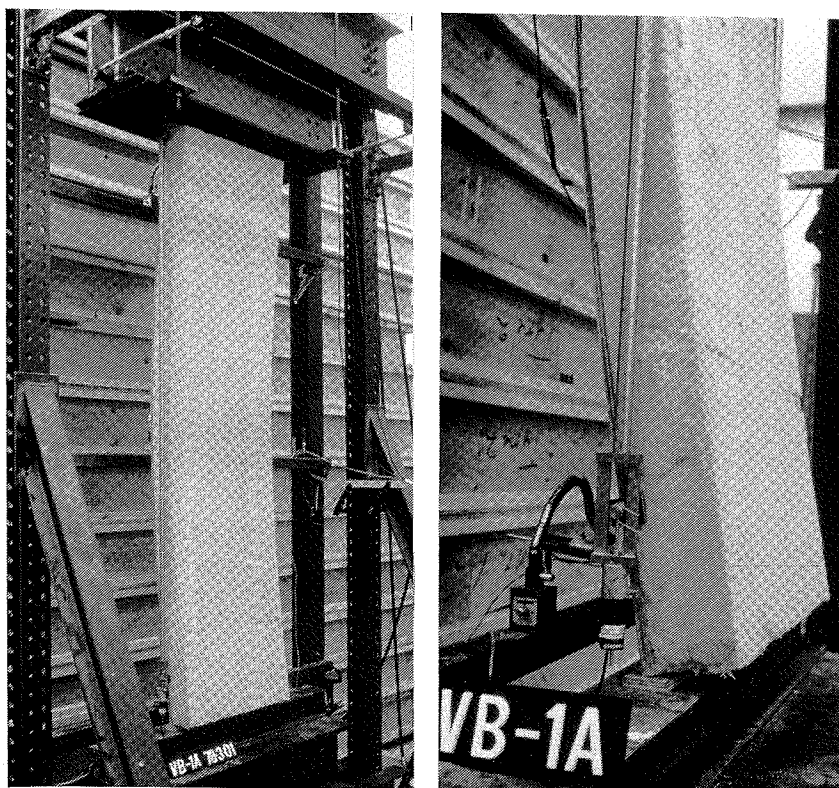
Elementerne bestod af 12,6 mm krydsfinérflanger (Canadisk Softwood Plywood, upudset) limet til mineraluldlameller med en énkomponent polyurethanlim.

Mineraluldlamellerne var af glasuld med rumvægt 50 kg/m^3 i højder på henholdsvis 100 og 135 mm.

Den anvendte mineraluld er detaljeret beskrevet i litt. [9], hvoraf fremgår, at elasticitetsmodulen er ca. 9 N/mm^2 .

Elementbredden var 0,60 m og højden (søjlelængden) 2,32 m.

Elementernes fugtindhold svarer til et ligevægtsfugtindhold ved ca. 20°C og 50%RF.



Figur 2.5:

Forsøgsopstilling og detalje af understøtning (element VB-1A i udknækket tilstand).

Forsøgsopstilling

Til forsøgene er anvendt Instituttet for Husbygningens opstilling til afprøvning af vægelementer. Opstillingen er detaljeret beskrevet i litt. [7].

Elementerne blev belastet med en linielast i flangernes centerlinie. Mellem element og trykhoveder var indskudt bløde mellem-lægsplader til sikring af elementernes frie drejning ved understøtningerne.

Målinger

Under forsøget blev løbende registreret sammenhørende værdier af kraft, lodret sammentrykning og vandrette udbøjninger.

Resultaterne af forsøgene er vist på bilag 1 og 2.

For element VB-1A med højden 2,32 m og 10 cm mineraluld målttes en bæreevne på 5,9 kN pr. 0,60 m. For element VB-1B med 13,5 cm mineraluld målttes en bæreevne på 10,5 kN pr. 0,60 m.

Til sammenligning med de teoretiske overvejelser er elementernes bæreevne indtegnet på figur 2.3.

På grund af forsøgselementernes mindre søjlelængde (2,32 m mod beregningernes 2,44 m) er forsøgsresultaterne konverteret til en højde på 2,44 m ved at multiplicere med kvadratet på forholdet mellem

$$\text{søjlelængderne } \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 = \left(\frac{2,32}{2,44}\right)^2 = 0,90,$$

jvf. formel (2-1).

De indtegnede resultater skal sammenlignes med kurven svarende til $E_k = 9 \text{ N/mm}^2$. Sammenligningen viser god overensstemmelse mellem forsøg og teori.

2.2 Vægelementer med forstærkninger ved elementsamlinger

Denne elementtype (se figur 2.1 - 2.a og b) adskiller sig fra de "rene sandwich-elementer" ved, at kanternes egenbøjningsstivhed bidrager væsentligt til resttværnsnittenes samlede bøjningsstivhed og dermed til en forøgelse af den kritiske søjlelast (jvf. formel 2-1)).

Er elementerne forsynet med kantskot i samlingerne, kan resttværnsnittenes bøjningsstivhed blive så stor, at den kritiske spænding i kantskottet overstiger proportionalitetsspændingen (d.v.s. i det ikke-lineærelastiske område). Over denne grænse kan bæreevnen teoretisk bestemmes af Engessers' formel, se litt. [3] eller ved anvendelse af Ostenfeld-formlen, som anvendes i DS 413.

Senere omtalte forsøg viser dog, at der for denne type inhomogene tværsnit kan ske lokale foldninger.

Dette stabilitetsfænomen medfører dog ikke en udtømmning af bæreevnen, idet der sker en spændingsomlejring, men bæreevnen reduceres betydeligt i forhold til den beregnede.

I denne behandling vil det blive for omfattende at analysere dette problem. Ønskes en nøjere analyse af lokale foldningsfænomener, henvises til speciallitteraturen (se f.eks. litt. [3]).

2.2.1 Beregning af restbæreevne

Så længe den til brudlasten hørende kritiske spænding er mindre end proportionalitetsspændingen (Euler-søjle), kan restbæreevnen beregnes efter samme princip som i afsnit 2.1.1.

Beregningsgangen er helt analog, idet der blot i beregningen af tværsnitskonstanterne må tilføjes bidragene fra eventuelle kantlister eller kantskot. Udtrykkene er trivielle og gengives ikke her.

Det forudsættes også her, at søjlerne belastes centralt i resttværsnittenes tyngdepunktslinier.

Elementer med kantlister i samlinger

For elementtyper med kantlister i samlingerne (f.eks. for en fer/not samling) er resttværsnittets slankhedsforhold stadig så stort, at restbæreevnen kan beregnes som Euler-bæreevnen.

I figur 2.6 er vist restbæreevnen af et element med kantlister (35×45 mm) i samlinger pr. 1,20 m som funktion af tykkelsen af den intakte del af mineraluldkerne.

Også i dette tilfælde (sammenlign figur 2.3) afspejler der sig en tydelig effekt fra mineraluldens medvirken til stabilisering af søjlen afhængigt af dennes resttykkelse og stivhed.

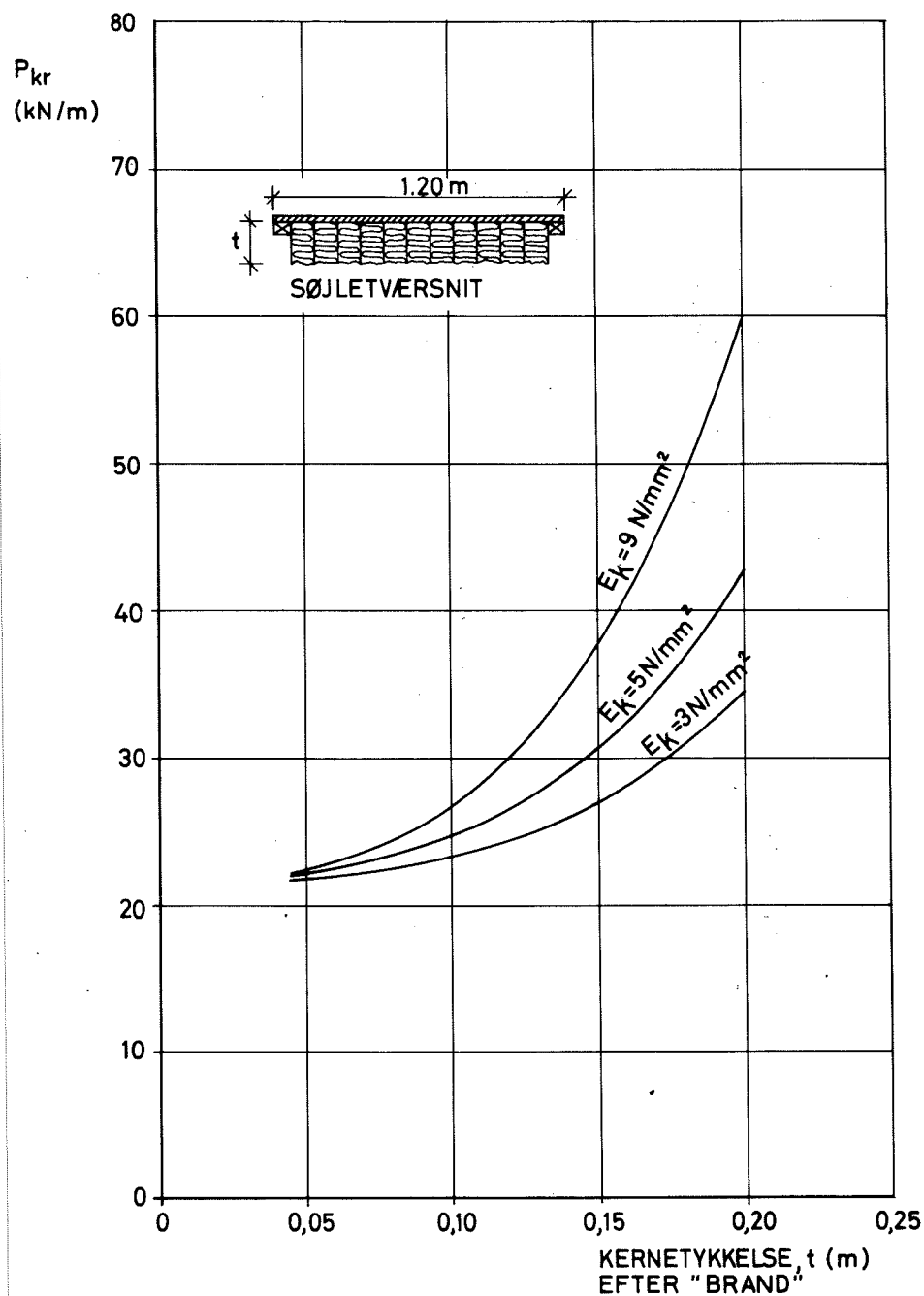
Bæreevnekurvernes udgangspunkt, svarende til flangens + kantlisternes egen Euler-bæreevne, er forøget ca. 10 gange i forhold til flangens egen Euler-bæreevne.

Denne forøgelse har meget stor praktisk interesse, idet restbæreevnerne herefter er tilstrækkeligt store for de fleste typer af enfamiliehuse (1-1½ etage), hvor kravet til et sådant vægelement er BD 30.

Netop denne elementtype er anvendt i de klassifikationsprøvnings, der er beskrevet i afsnit 3.

Elementer med kantliste og kantskot i samlinger

Den sidste af de elementtyper, der skal omtales, er vist på figur 2.1: 2.b, hvor der mellem de to flanger er indbygget et kantskot, der sammen med kernen sikrer flangernes samvirken.



Figur 2.6:

Restbæreevnen efter "brand" (uden partialkoefficient 1,5) for 2,44 m høje sandwichvægelementer, med 12,6 mm krydsfinérflanger og kantlister (35×45 mm) i samlinger pr. 1,20 m.

Restbæreevnen er beregnet for forskellige stivheder af mineraluldkernen.

Den store forskel i stivhed mellem kant-skot og mineraluldkerne betyder, at kernens bidrag til bøjningsstivheden er forsvindende og kan udelades af beregningerne.

På grund af flangens foldning før det endelige brud og den derved reducerede bøjningsstivhed sættes den effektive flangebredde til $25 \times$ flangetykkelsen i hver side.

Afhængigt af, hvor meget der er tilbage af kantskottet efter "brand", vil søjlen optræde som en Euler-søjle eller som en Ostenfeld-søjle. Hvis slankhedsforholdet opfylder betingelsen (2-9), er beregningen analog med ovenstående.

For mindre slankhedsforhold kan beregningen foregå efter Ostenfeld-formlen.

Det analytiske udtryk (se litt. [5]) er:

$$(2-12) \quad s_{kr} = s_c \left(1 - \kappa \left(\frac{L}{i} \right)^2 \right), \text{ hvor}$$

$$(2-13) \quad \kappa = \frac{s_c}{4\pi^2 E}$$

s_{kr} er den kritiske spænding svarende til, at søjlen bryder, s_c er materialets trykbrudspænding og E elasticitetsmodulen.

Både for krydsfinér og for konstruktionstræ, som anvendes til kantlister, har materialeprøvninger vist, at forholdet $\frac{E}{s_c} \approx 230$.

Herved fås: $\kappa \approx 1,1 \cdot 10^{-4}$.

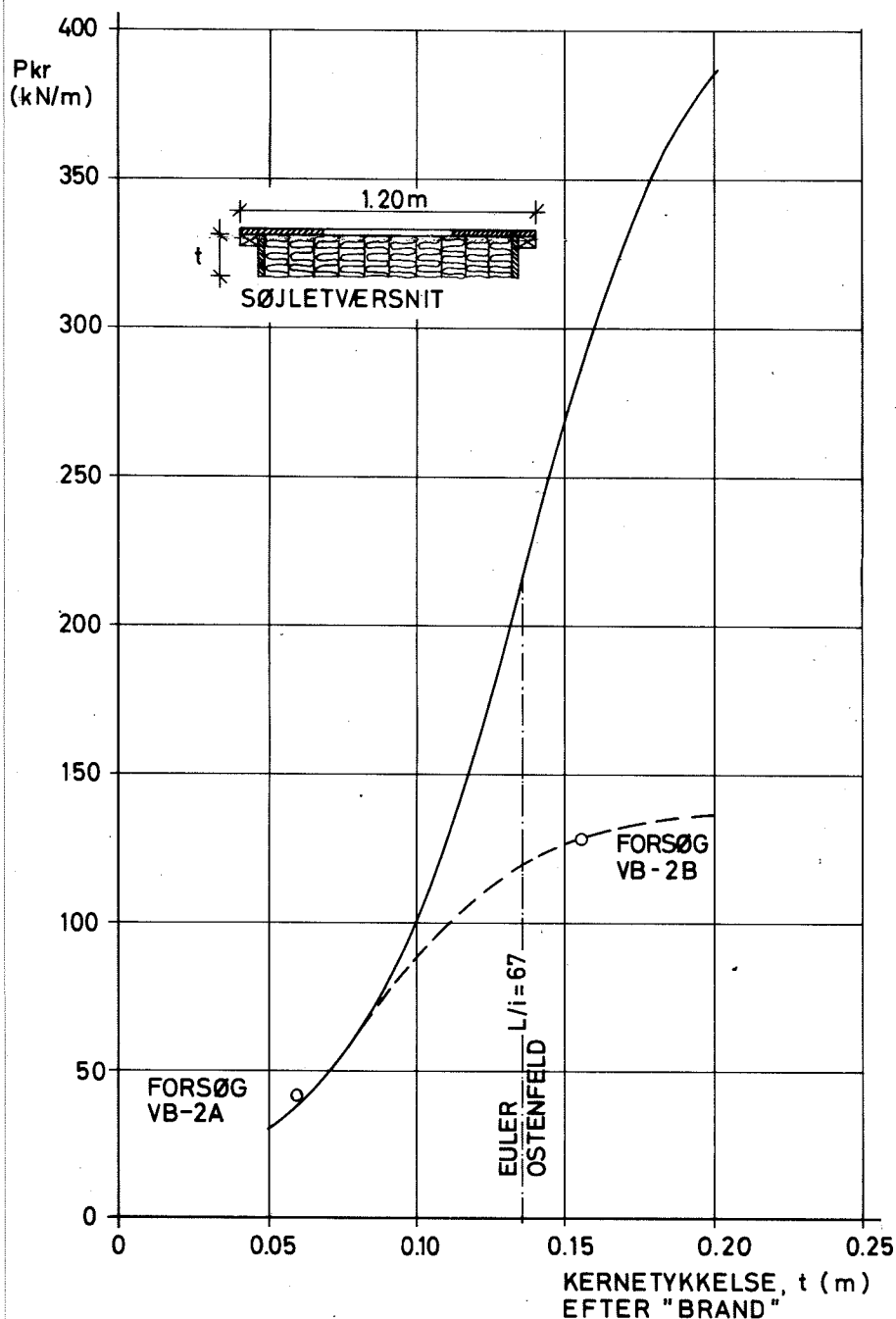
Bæreevnen af det inhomogene tværsnit kan herefter beregnes af udtrykket:

$$(2-14) \quad P_{kr} = s_c \frac{E}{E_r} A_t \left(1 - 1,1 \cdot 10^{-4} \left(\frac{L}{i} \right)^2 \right)$$

Grænsen mellem (2-14) og (2-11) ligger i dette tilfælde ved:

$$\frac{L}{i} = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{s_c}} = 67$$

Figur 2.7 viser resultaterne af et beregningseksempel, hvor elementerne er forsynet med kantskot i samlingen for 1,20 m. Eksemplet tjener endvidere til sammenligning med senere omtalte bæreevneforsøg med simuleret indbrænding.



Figur 2.7:

Restbæreevne efter "brand" (uden partialkoefficient 1,5) for 2,44 m høje sandwichvægelementer med 12,6 mm krydsfinérflanger og kantlister (35×45 mm) + kantsköt (12,6 mm krydsfinér) i samlinger pr. 1,20 m.

Desuden er indtegnet resultaterne af 2 bæreevnepforsøg på elementer med simuleret indbrænding. Den stiplede kurve svarer til et sandsynligt forløb af bæreevnekurven under hensyntagen til foldning i kantskötet.

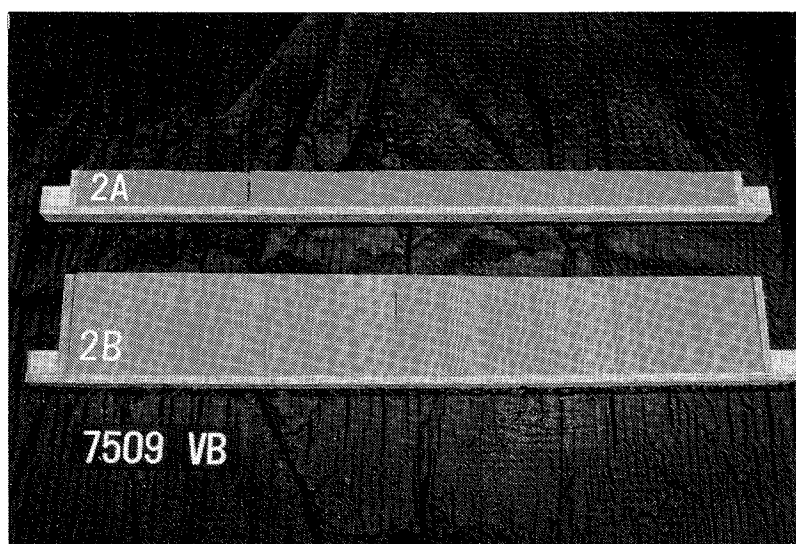
Kurven er fremkommet ved at tildele kantskötet en tilsyneladende lavere stivhed (fiktiv).

Det skal bemærkes, at Ostenfeld-kurven er empirisk bestemt. Generelt er der meget stor spredning på forsøg med "korte" søjler, fordi lokale stivheds- og styrkevariationer, spændingskoncentrationer og excentriciteter i dette tilfælde får meget større virkning end ved de "slanke" søjler, hvor brudlasten i højere grad afhænger af middelværdierne over en større længde. Man må derfor stille spørgsmålstegn ved anvendelsen af forfinede teoretiske udtryk.

2.2.2 Bæreevnforsøg (simuleret indbrændingsforløb)

Som parallel til bæreevnforsøgene beskrevet i afsnit 2.1.2 er der udført yderligere to bæreevnforsøg på etagehøje elementer med kantlister og kantskot i samlinger pr. 1,20 m.

Forsøgene er kørt under helt analoge betingelser, som beskrevet i afsnit 2.1.2.



Figur 2.8:

Tværsnit af forsøgselementer til bæreevnforsøg.

Forsøgselementer

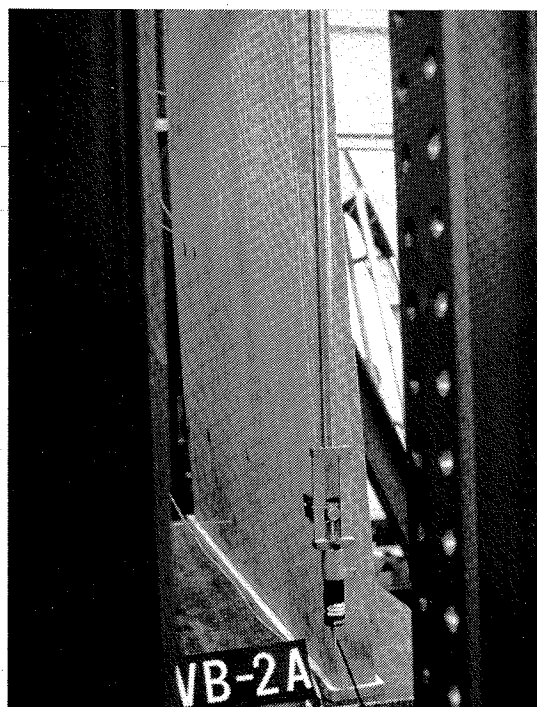
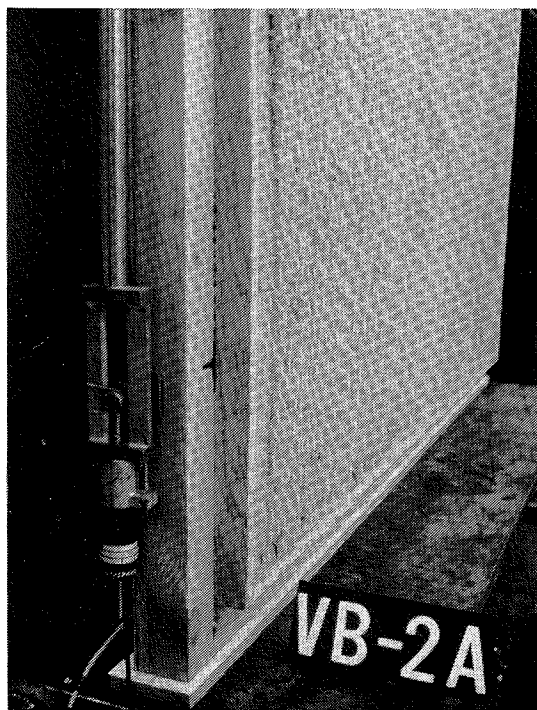
Elementerne bestod af 12,6 mm krydsfinérflanger (Canadisk Softwood Plywood, upudset) limet til mineraluldlameller med en énkomponent polyurethanlim.

Elementbredden var 1,20 m og højden (søjlelængden) 2,40 m.

Mineraluldlamellerne var i forsøg VB-2A af stenuld med rumvægt 80 kg/m^3 og i forsøg VB-2B af glasuld med rumvægt 50 kg/m^3 .

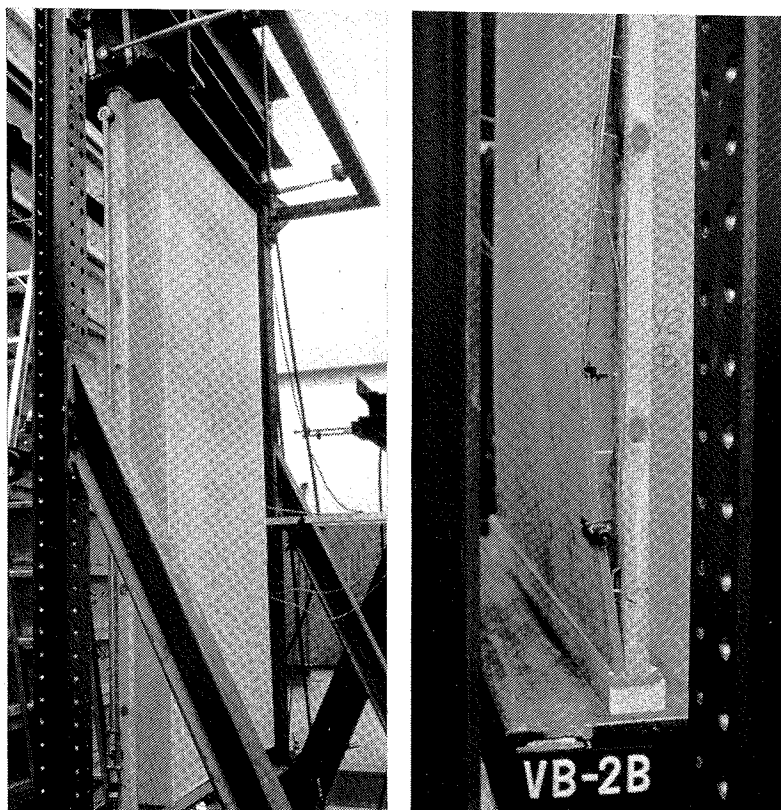
I elementkanterne (pr. 1,20 m) var sømli- met $35 \times 45 \text{ mm}$ kantlister (uklassificeret konstruktionstræ) og kantskot af kryds- finér (som flanger).

Højden (tykkelsen) af kantskot og mine- raluldkerne var i forsøgene henholdsvis 60 og 155 mm.



Figur 2.9:

Forsøg VB-2A. Detaljer af opstilling og element i udknækket tilstand (Euler-udknækning).



Figur 2.10:

Forsøg VB-2B. Opstilling og detalje af element i brudtilstanden. Bruddet skete ved svigt af sømlimning mellem flange og kantliste.

Resultaterne af forsøgene er vist på bilag 3 og 4 (elementernes arbejdslinier).

For element VB-2A med restkernetykkelse 60 mm målttes en bæreevne på 51,4 kN pr. 1,20 m. Element VB-2B med 155 mm restkernetykkelse viste en bæreevne på 160,0 kN pr. 1,20 m.

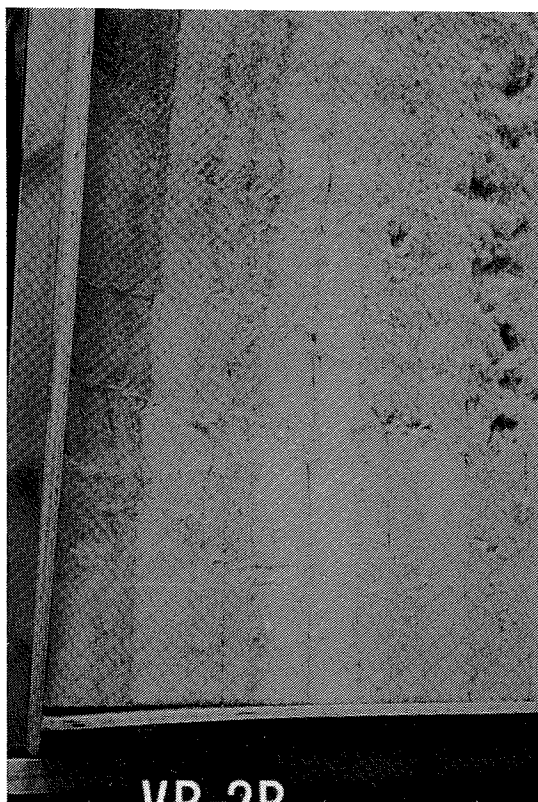
Resultaterne er indtegnet på figur 2.7, konverteret til elementhøjden 2,44 m og en bredde på 1 m. Der er ikke i beregningen taget hensyn til mineralulden, så de forskelle, der måtte være på de to mineraluldsprodukter er uden betydning for denne sammenligning.

Resultatet af forsøg VB-2A stemmer pænt overens med det beregnede (Euler-søjle), medens der må konstateres en uacceptabel uoverensstemmelse mellem VB-2B og den beregnede (Ostenfeld-søjle).

Det sidste skyldes bl.a., som tidligere omtalt, de lokale stabilitetsfænomener omkring kantskottet, der vil give sig udslag i en tilsyneladende lavere stivhed end den, der indgår i beregningerne. Endvidere sker bruddet på grund af svigt mellem enkelte delelementer, således at forudsætningen om fuld samvirken ikke er tilstede.

Foldningen af kantskottet er i nogen grad betinget af mineraluldens understøttende virkning. I dette tilfælde udnyttedes mineralulden på den svage led.

Var lamellerne vendt (anbragt vandret) og limet til kantskottene, ville dette foldningsfænomen sandsynligvis ikke optræde, og bæreevnen nærme sig den teoretiske kurve.



Figur 2.11:

Forsøg VB-2B. Foldning af kantskot og stukningsbrud i mineraluld. Mineraluldens bidrag til bæreevnen er forsvindende, når elementerne forsynes med kantskot i samlingerne.

3. BRANDTEKNISKE PRØVNINGER

På baggrund af de teoretiske overvejelser blev det besluttet at gennemføre to egentlige brandtekniske prøvninger.

For at få et indtryk af kernematerialets indflydelse på indbrændingsforløbet blev prøvningerne udført på elementer med mineraluldkerner af henholdsvis glasuld- og stenuldlameller.

Forsøg i mineraluldproducenternes respektive brandlaboratorier inden disse prøvninger viste dog stort set identiske egenskaber vedrørende indbrændingsforløb.

Bortset fra denne parameter var prøvningerne helt identiske og er i det følgende beskrevet sideløbende.

Vægkonstruktionerne blev prøvet efter DS 1051, "Brandtekniske prøvninger af bygningsdeles modstandsevne mod brand", og klassificeret efter DS 1052, "Brandteknisk klassifikation af bygningsdele (ekskl. døre)".

3.1 Prøveelementer (vægkonstruktion)

Dimensioner

Det til prøvningerne opbyggede udsnit af vægkonstruktionen havde længden 2400 mm og højden 2440 mm. Konstruktionens samlede tykkelse var 169 mm.

I hver prøvning indgik 2 elementer med længde 1190 mm og højde 2440 mm.

Elementopbygning

Hvert element var opbygget af to 12 mm krydsfinérflanger (Canadisk Softwood Plywood, upudset) limet på begge sider af 145 mm høje mineraluldlameller med en én-komponent polyurethanlim (ca. 300 g/m²).

Mineraluldlamellerne bestod i de to prøvninger af henholdsvis glasuld (rumvægt 50 kg/m³) og stenuld (rumvægt 80 kg/m³). Desuden var elementerne forsynet med 35×45 mm kantlister (notlister) for etablering af en fer/not samling pr. 1,20 m.

Kantlisterne var sømlimet til flangerne. Feren var lavet af 12 mm krydsfinér med bredden 37 mm.

Elementudformning med tilhørende detaljer fremgår af bilagene 5-7.

Elementerne blev belastet med en lodret linielast over den ueksponerede flange, som vist på bilag 9.

Mellem elementer og trykhoveder var indlagt bløde mellemlægsplader til sikring af elementernes frie drejning ved understøtningerne.

På grund af betonrammens tilpasning til væghøjder på 2,50 m blev der indskudt en fodrem til udligning af højdeforskellen ned til 2,44 mm.

Belastning

Den påførte linielast svarer til en karakteristisk last på 14 kN/m.

I henhold til DS 1052 blev der svarende hertil påført en last på $1,5 \times 14 = \underline{21 \text{ kN/m}}$ (sammenlign. figur 2.6).

Den samlede last på længden 2,40 m udgjorde således ialt $2,4 \times 21 = \underline{50,4 \text{ kN}}$.

Egenlast af fordelingsbjælke, trækstænger m.v. udgjorde ialt 13,1 kN, således at de hydrauliske presser gav et samlet tryk på 37,3 kN.

Inden den fulde last blev påført elementerne havde de stået ca. 18 timer med lasten fra fordelingsbjælke m.v. (5,5 kN/m), og ca. 1 time før selve prøvningen blev den fulde last påført (21 kN/m).

3.3 Målinger

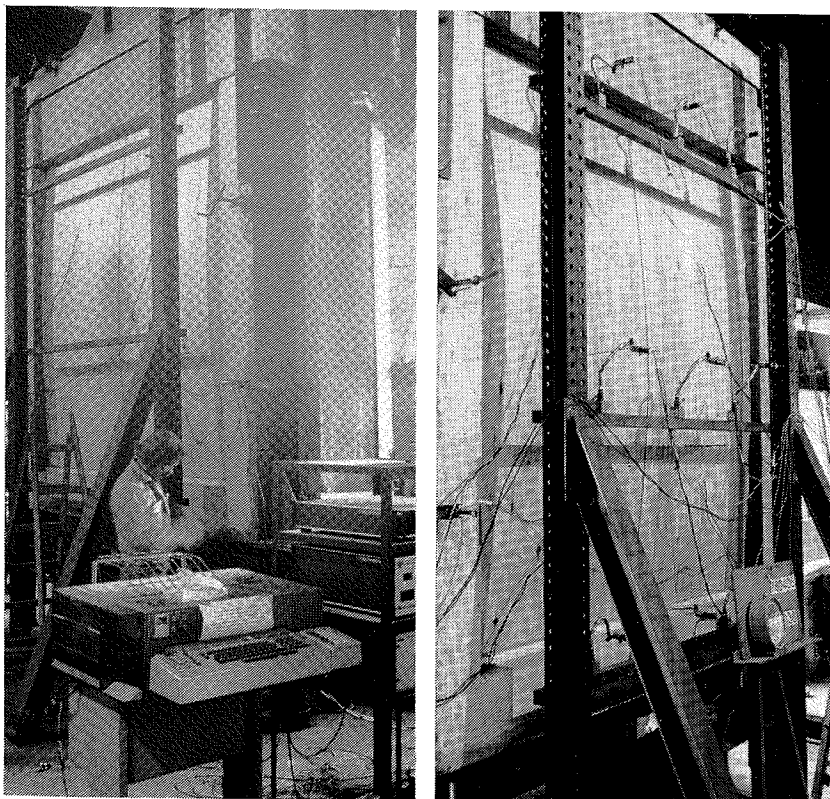
Kraftmåling

Måling af kraften skete ved hjælp af et manometer tilkoblet det hydrauliske system. Inden prøvningen var systemet kalibreret, således at der skulle være kompenseret for eventuelle friktionskræfter.

Deformationsmålinger

Under prøvningen blev elementernes vandrette flytninger registreret i ialt 9 punkter. Målingerne skete ved hjælp af 9 elektriske flytningstransducere tilkoblet en datalogger og en skrive- og hulleenhed.

Målepunkternes placering over samlingen og midt på elementerne fremgår af bilag 10.



Figur 3.2:

Måling og registrering af elementernes udbøjning. Flytningstransducerne blev monteret på en fritstående, af ovnen uafhængig, måleramme.

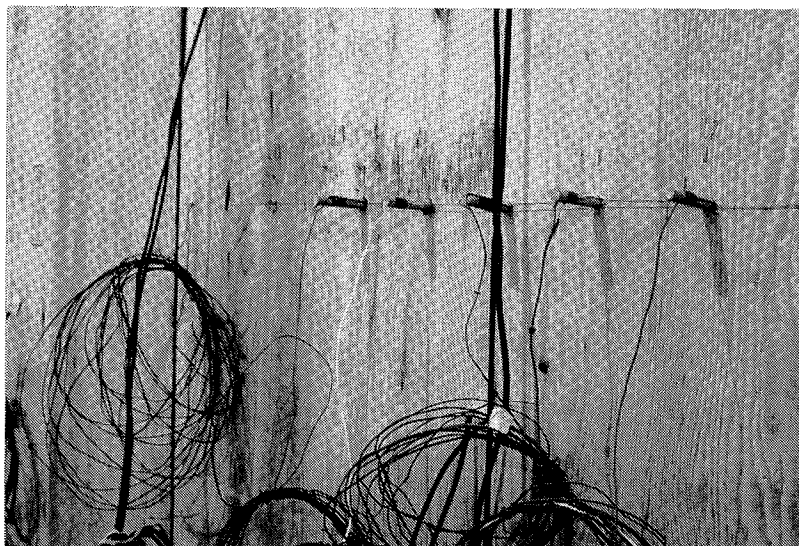
Temperaturmålinger

Til målingerne blev anvendt termoelementer tilkoblet målebro og skriver.

Udover de permanent placerede termoelementer til kontrol og styring af ovntemperatur og kontrol af rumtemperaturen blev der i henhold til DS 1051 monteret 5 termoelementer til registrering af overfladetemperaturerne på konstruktionens ueksponerede overflade.

Inde i væggen blev monteret 5 termoelementer i forskellige dybder for registrering af indbrændingsforløbet i konstruktionen (indbrændingshastigheden). Termoelementerne blev monteret for enden af træstokke (Ø10 mm) med tilledninger langs stokken.

Inderste termoelement er placeret lige under den eksponerede flange og de øvrige i spring af 30 mm ud mod den ueksponerede overflade.



Figur 3.3:

Indvendige termoelementer monteret for enden af en $\varnothing 10$ mm træstok.

Udover disse blev der monteret to termoelementer i elementsamlingen på kantlisternes indersider.

Placeringen af alle termoelementerne fremgår af bilag 11.

Alle indvendige termoelementer er placeret i en højde på 800 mm over elementernes underkant, hvilket svarer til den højde ($1/3$ elementhøjde), hvori der styres mod et ensartet lufttryk på konstruktionens to sider.

Kvalitative målinger

Under selve prøvningerne blev væggene holdt under observation. De eksponerede overflader kunne iagttages gennem åbninger i ovns bagside. De gjorte iagttagelser er beskrevet i afsnit 3.4.1.

3.4 Diskussion af forsøg og måleresultater

Under ingen af forsøgene er der konstateret udsivende røggasser, hverken gennem elementer, elementsamlinger eller langs kanter mod betonrammen.

Det betyder, at der ikke er sket gennemgående revnedannelser, og at fugerne har bevaret deres tæthed.

Forsøgenes forløb beskrives i nedenstående skema på baggrund af gjorte iagttagelser under forsøg. I beskrivelsen er angivet tidtagning fra prøvningens start, ca. 1 time efter påførsel af den fulde belastning.

Tid i minutter

Forsøg 1 ("glasuld")	Forsøg 2 ("stenuld")	Iagttagelser
0	0	Ildpåvirkning starter (fuld last 50,4 kN)
4	4	Antændelse af væggen eksponerede overflade (overtænding).
	9	Overfladen krakelerer på den eksponerede side.
16	15	Kraftig revnedannelse i krydsfinérpladen på den eksponerede side.
17	16	Begyndende nedfald af krydsfinér på den eksponerede side.
19½	18½	Ca. 50% af krydsfinéren på den eksponerede side er faldet ned.
<u>30</u>	<u>30</u>	Ildpåvirkningen afbrydes. Belastningen (50,4 kN) fastholdes.
44	91	Brud. Elementerne bøjer kraftigt ud - bort fra ovnen. Aflastning til 13,1 kN. Temperaturmålinger fortsætter.
67	118	Betonramme med elementer demonteres fra ovnside

Inden for de 30 minutter, svarende til den egentlige prøvetid, må forløbene af de to forsøg betegnes som identiske. Begge elementtyper klarede det ønskede krav til restbæreevnen.

Når elementerne trods ildens afbrydelse ikke kunne holde belastningen, skyldes det, at ildafbrydelsen ikke var efterfulgt af en afkøling, hvorfor temperaturniveauet stadig var så højt, at indbrændingen i mineralulden (udglødning af bindemidler) kunne fortsætte.



Figur 3.4:

Prøveelementer efter brandprøvning set fra den eksponerede side. Til venstre "glasuld-væggen", til højre "stenuld-væggen". Tilsyneladende er kernen stort set intakt, men bindemidlerne er bortglødet langt ind i mineralulden.

Temperaturforløb

På figur 3.5 og 3.6 er vist de målte temperaturforløb under prøvningen. Den øverste kurve på figurerne (ovntemperaturen) viser, hvor langsomt nedkølingen af ovnen foregår trods afbrydelsen af ilden (stråling fra overfladerne).

Det betyder, at indbrændingen i mineralulden fortsætter (se kurverne 3, 4, 5 og 6) og dermed fremkalder det egentlige stabilitetsbrud (Euler-udknækning).

Efter ca. 15 minutter skete en kraftig temperaturstigning i mineralulden lige under den eksponerede krydsfinérflange (kurve 3). Dette stemmer fint overens med, at krydsfinérflangen på dette tidspunkt er brændt igennem, hvorefter termoelementet lige under flangen bliver frilagt og registrerer ovntemperaturen.

Indbrændingen i mineralulden er foregået med en middelhastighed på 4-6 mm pr.minut, hvilket kan aflæses af tempe-

3.2 Prøvningsopstilling

Prøvningen blev udført i Statsprøveanstaltens vertikalovn. Prøveelementerne blev monteret i en belastningsramme med udvendige mål 3,5×3,0 m og med lysningsmål svarende til konstruktionens mål.

Belastningen påførtes gennem betonrammens overligger (trykhoved), der via trækstænger i rammens lodrette sidestykker blev aktiveret af 2 hydrauliske presser under betonrammen.



Figur 3.1:

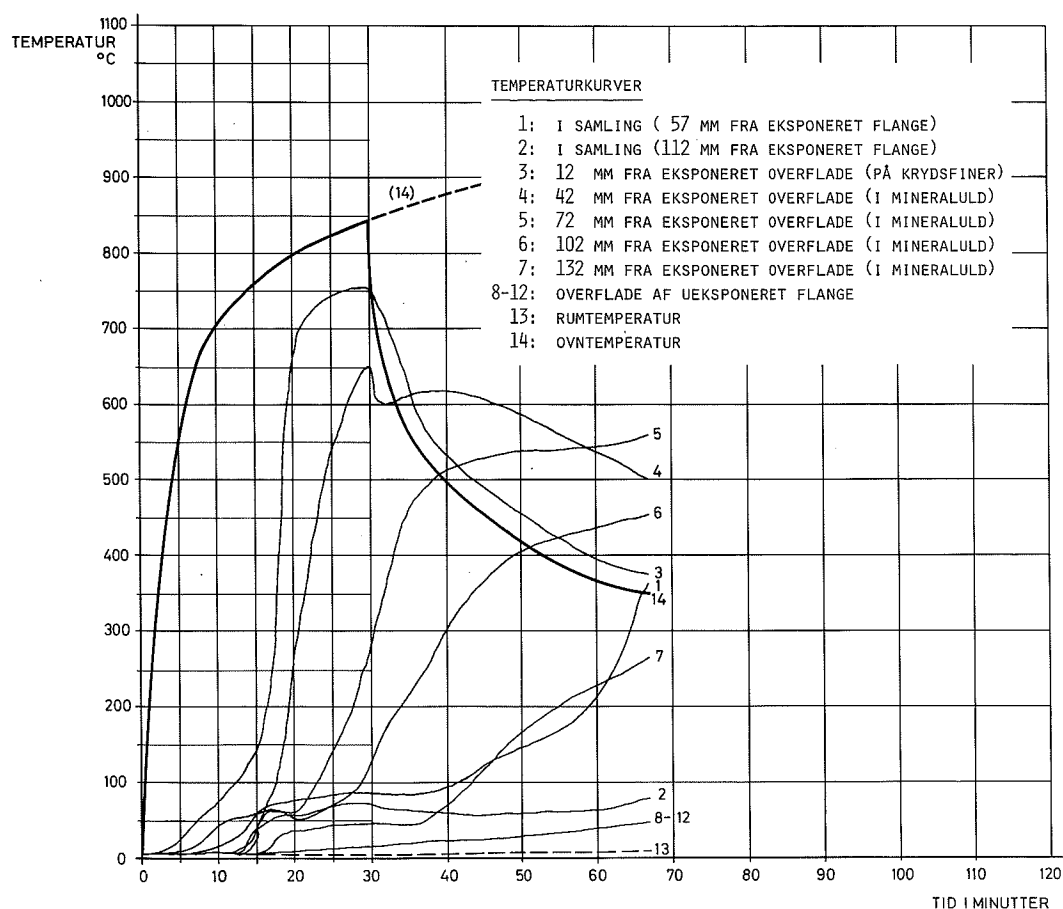
Prøveelementer monteret i belastningsramme set fra henholdsvis ueksponerede og eksponerede overflade.

Opstillingen i belastningsrammen er vist på bilagene 8 og 9.

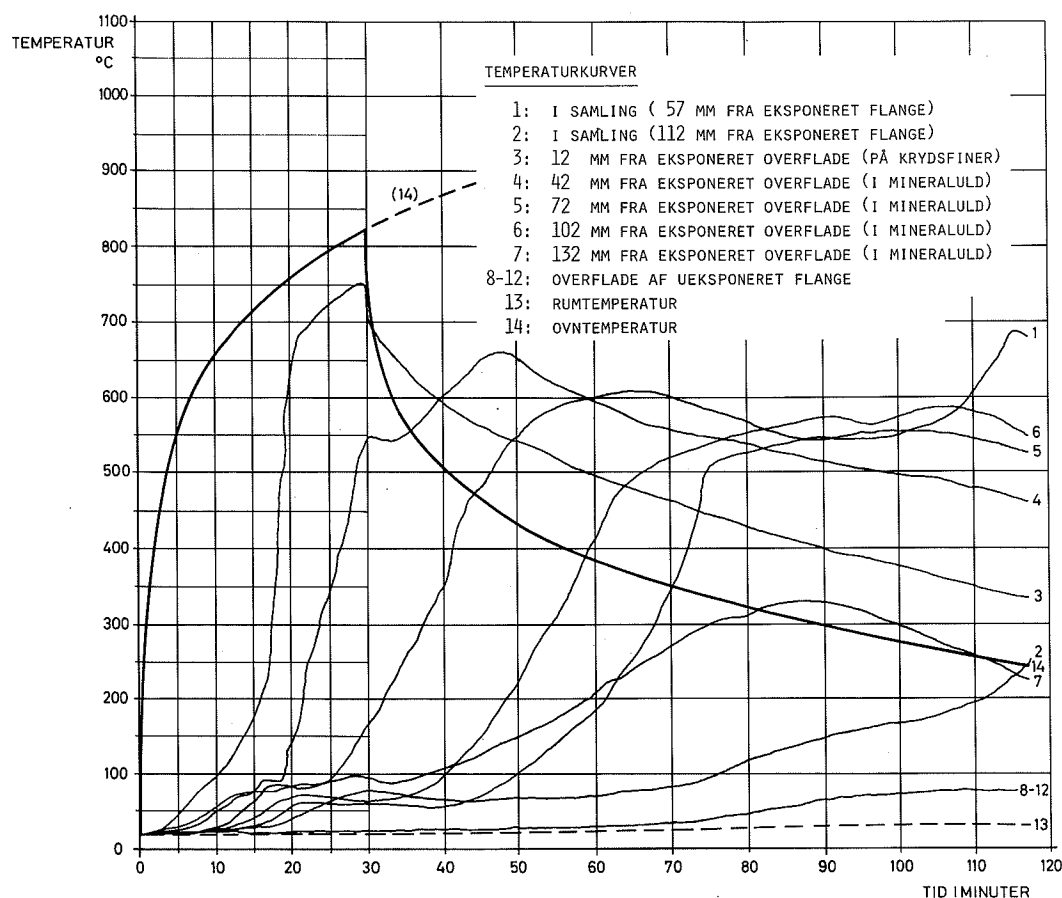
Samlinger

Samlingen mellem elementerne var en fer/not samling med en blød klemt mineraluld mellem kantlisterne.

Langs elementernes lodrette sider mod belastningsrammen blev tætnet med mineraluld-fugestrimler, således at elementerne var sikret mulighed for at bøje ud.



Figur 3.5: Temperaturforløb under brandprøvning af "glasuld"-elementer (forsøg 1).



Figur 3.6: Temperaturforløb under brandprøvning af "stenuld"-elementer (forsøg 2).

raturkurverne for termoelementerne 3, 4 og 5, der er monteret med en indbyrdes afstand på 30 mm.

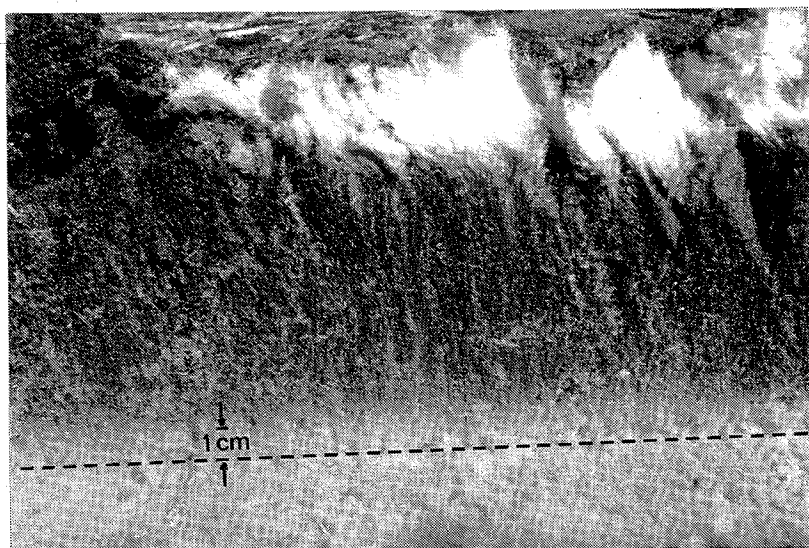
Efter afbrydelsen af ilden (efter 30 minutter) er den fortsatte indbrænding i "glasuld-væggen" tilsyneladende foregået med en noget større hastighed end i "stenuld-væggen". (Sammenlign. f.eks. kurverne 5 og 7 på figurerne 3.5 og 3.6.)

Forholdet kan skyldes forskellen i de to mineraluldprodukters indhold af bindemidler, der brænder ved temperaturer omkring 250-300°C.

Glasuldens bindemiddelindhold er 3-4 gange større end stenuldens.

Selv om fibrene tåler temperaturer op til 800°C er der ved den eksponerede overflade af glasulden sket en begyndende dekomponering af fibrene.

Det betyder, at tværsnittet af de upåvirkede fibre er reduceret og derved ikke yder samme beskyttelse af det bagved liggende isolationsmateriale som i stenulden, hvor fiberstrukturen forekommer intakt gennem hele tykkelsen (se figur 3.4).

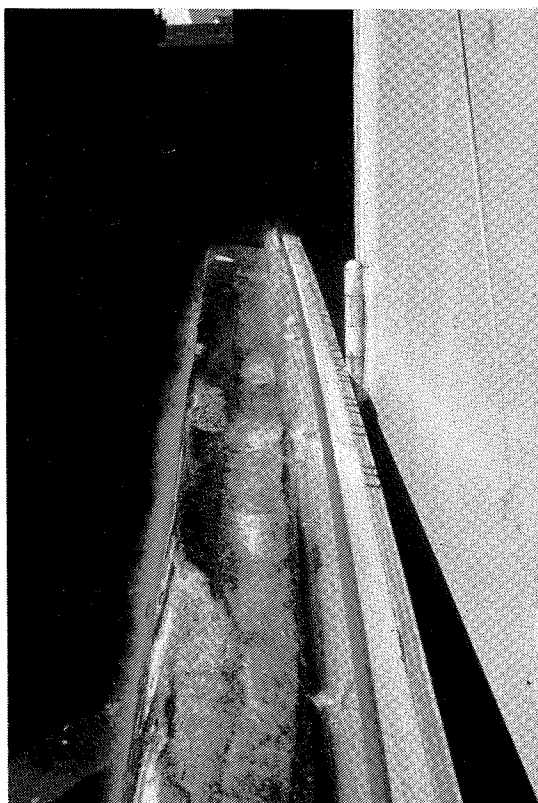


Figur 3.7:

Indbrændingen i mineralulden er ved forsøgenes afbrydelse kun ca. 1 cm fra den ueksponerede flange (se afstand til stiplede linie).

Temperaturforløbet ind igennem samlingen (kurverne 1 og 2) viser, at indbrændingen i samlingen (kantlisten) er foregået med en forventet mindre hastighed end i mineralulden. Samtidig må konstateres, at den bløde klemte mineraluld ikke er faldet ud og har ydet den ønskede beskyttelse af de ikke eksponerede kantlister, der i væsentlig grad bidrager til konstruktionens restbæreevne.

Temperaturforløbet på elementernes ueksponerede overflade (kurverne 8-12) viser, at der ikke indenfor de 30 minutters prøvetid blev registreret temperaturer over 25°C.



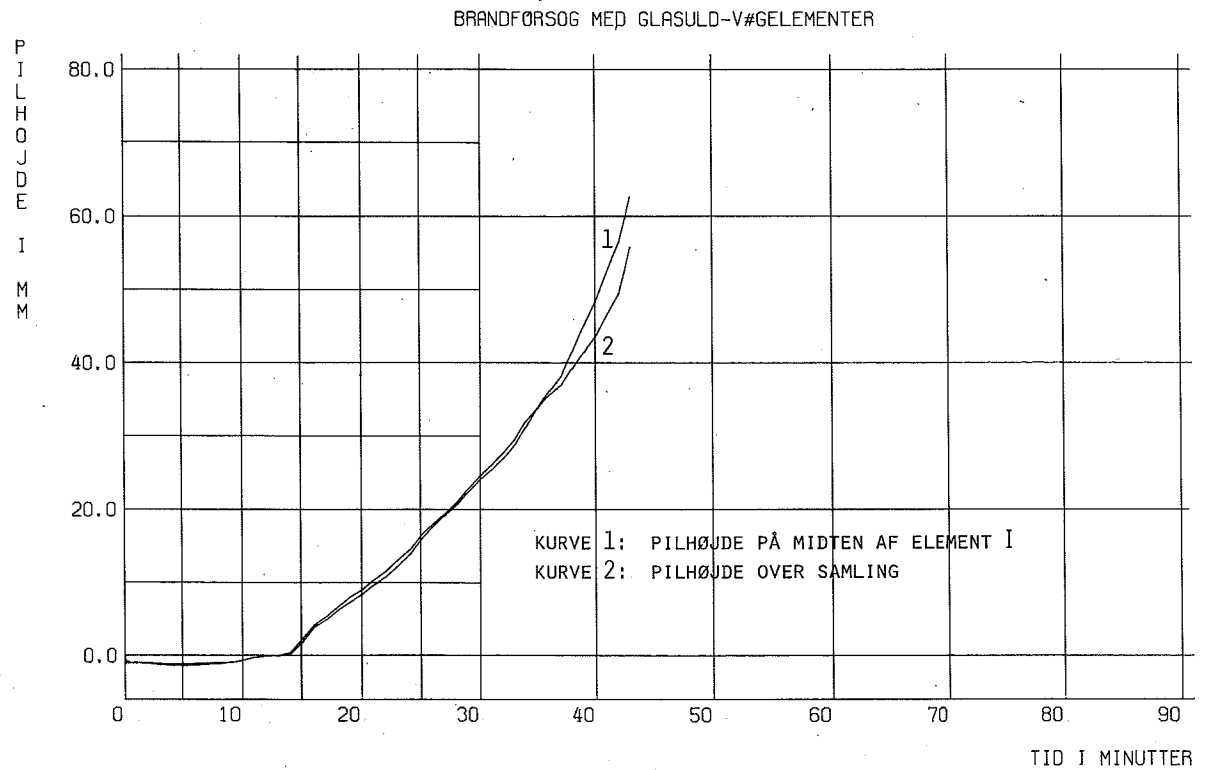
Figur 3.8:

Detalje af elementsamling (notliste) efter brandprøvning. Ved forsøgenes afbrydelse var indbrændingen i samlingen nået ind til kantlisten på den ueksponerede flange.

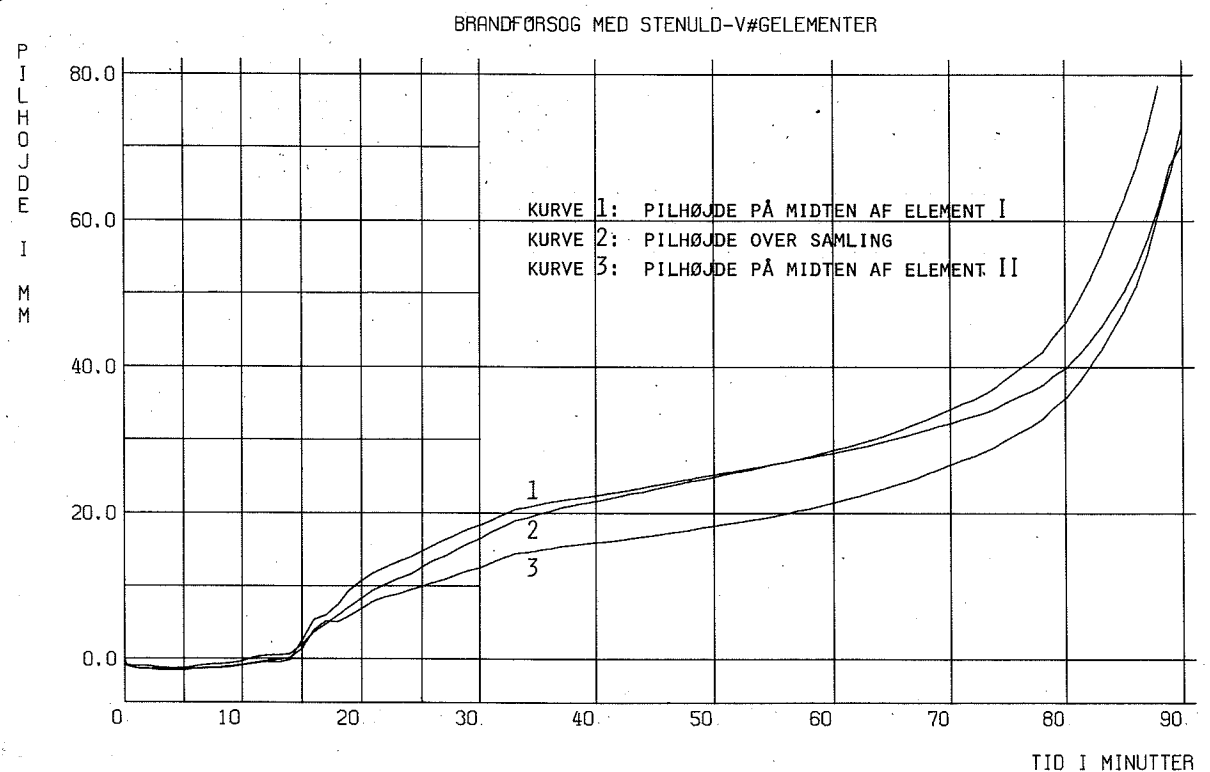
Deformationer

Forløbet af elementernes udbøjning under brandprøvningerne er vist på figurerne 3.9 og 3.10.

De vandrette flytninger ved understøtningerne var helt forsvindende, og figurerne gengiver kun pilhøjden på elementmidte og over samling.



Figur 3.9: Forsøg 1. "Glasuld"-elementernes udbøjning under brandprøvning. Forløbet af kurve 1 må tages med forbehold på grund af en fejl ved elektronikken.



Figur 3.10: Forsøg 2. "Stenuld"-elementernes udbøjning under brandprøvning.

Som forventet forløb udbøjningerne næsten identiske under den egentlige 30 minutters prøvning. Den begyndende udbøjning efter ca. 15 minutter skyldtes, at den eksponerede flange er gennembrændt og har mistet bæreevnen.

På dette tidspunkt sker der en spændingsomlejring, og deformationsforløbet er herefter bestemt af indbrændingen i mineralulden.

Elementernes pilhøjde (udbøjning ud af ovnen) efter de 30 minutters prøvetid var omkring 20 mm.

Efter henholdsvis 44 og 91 minutter, hvor indbrændingen var nået næsten ind til de ueksponerede flanger og kantlisterne på disse, var tværsnittenes restbæreevne mindre end den påførte last, 21 kN/m (sammenlign figur 2.6). Udbøjningerne voksede meget kraftigt med en nødvendig aflastning til følge.

3.5 Konklusion

På baggrund af den 30 minutters prøvning kan følgende konkluderes om vægkonstruktioner, opbygget som beskrevet i nærværende rapport:

1. Konstruktionens stabilitet i orden.
2. Konstruktionens integritet blev bevaret under hele prøvningen. Samlingen (fer/not+klemte bløde mineraluld) forblev tæt under hele prøvningen, - ingen udsivende røggasser.
3. Temperaturstigningen på den ueksponerede side af konstruktionen var helt ubetydelig ($< 5^{\circ}\text{C}$). Ifølge DS 1052 må middeltemperaturstigningen ikke overstige 140°C , og temperaturstigningen i intet punkt overstige 180°C .
4. Indbrændingen i mineralulden (temperaturniveau over 250°C) foregik med en middelhastighed på 4-6 mm pr.minut (under en standardbrand).
5. Konstruktionens restbæreevne efter 30 minutter var $\geq 1,5 \times 14 \text{ kN/m} = 21 \text{ kN/m}$ (jvf. DS 1052).

Restbæreevnen svarer med god tilnærmelse til den beregnede restbæreevne (jvf. kapitel 2).

6. Konstruktionens brandtekniske klassifikation er:

adskillende, bærende BD-bygningsdel 30,

når belastningen (uden partialkoeffi-
cients) ikke overstiger 14 kN/m

$\left(= \frac{21 \text{ kN/m}}{1,5} \right)$ og kan overføres til væg-
gens ikke brandpåvirkede side.

Bemærkning:

Den del af prøvningen, der ligger efter
de 30 minutter, har kun eksperimentel in-
teresse og vedrører ikke den egentlige
BD 30-klassifikationsprøvning.

4. LITTERATURFORTEGNELSE

- [1] DS 1051. Brandteknisk prøvning af bygningsdeles modstandsevne mod brand.
1. udgave, juni 1966.
- [2] DS 1052. Brandteknisk klassifikation af bygningsdele (ekskl. døre).
1. udgave, juni 1966.
- [3] Larsen, H.J.:
Beregning af trækonstruktioner.
Teknisk Forlag, 1967.
- [4] Larsen, H.J.:
Materialer og forbindelsesmidler til trækonstruktioner.
Teknisk Forlag, 1971.
- [5] DS 413. Dansk Ingeniørforenings norm for trækonstruktioner.
3. udgave, december 1974.
- [6] Jensen, B.C.:
Branddimensionering af konstruktions-elementer i træ.
IFH-forelæsningsnotat nr. 41, 1975.
- [7] Borchersen, Egil og Rasmussen, Lauritz:
Bæreevneprovning med sandwichvægelementer med mineraluldkerne og krydsfinérflanger.
IFH-rapport nr. 112, 1976.
- [8] Rasmussen, Lauritz:
Brandforsøg med 2 mineraluldbaserede sandwichdækelementer.
IFH-rapport nr. 122, 1977.
- [9] Rasmussen, Lauritz:
Mineraluldbaserede sandwichelementer: Materialeprøvning af krydsfinér.
IFH-rapport nr. 127, 1978.
- [10] Rasmussen, Lauritz:
Mineraluldbaserede sandwichelementer: Materialeprøvning af mineraluld.
IFH-rapport nr. 128, 1978.

SUMMARY

This report deals with the performance of load-bearing sandwich wall-components under the influence of fire including an estimation of their residual load capacity partly on a theoretical and partly on an experimental basis.

Construction of the Component

The wall-component is a 3-layered sandwich component with flanges of wooden laminae (i.e. plywood) glued to a core of mineral wool lamellae. Furthermore, the components may be provided with various edge solutions due to their connection, fixing or interaction.

Structural Performance During a Fire

During a fire the exposed flange will burn away in 10-15 minutes after which the construction can no longer act as a sandwich construction regarding load capacity. Therefore, the residual load capacity must be secured only by the unexposed flange supported by that part of the mineral wool which is still intact after the fire, or possibly by the edge web plates etc. which can be built into the joints.

The thickness and stiffness of the unburnt mineral wool have great influence on the limited residual load capacity of the components without reinforcement at the edges.

For components with edge web plates considerably higher residual load capacity can be achieved, primarily determined by the contribution of the edge web plates themselves.

Course of Fire

The fire resistance of the components is depending of the fire resistance ability of the exposed flange and of the course of fire in the mineral wool core.

The plywood flanges burn away at a rate of about 1 mm per minute and following the mineral wool burn away at a rate of 4-6 mm per minute.

Fire Performance Tests

The fire resistance of the components were illustrated through BD-30-classification tests (according to Danish Standard, DS 1051) on full scale components with flanges of 12 mm plywood and core of 145 mm mineral

wool lamellae consisting of Glass-wool and Rock-wool respectively. At the edges, each 1.20 m, the components were provided with 35×45 mm timber studs for jointing by a tongue and groove technique.

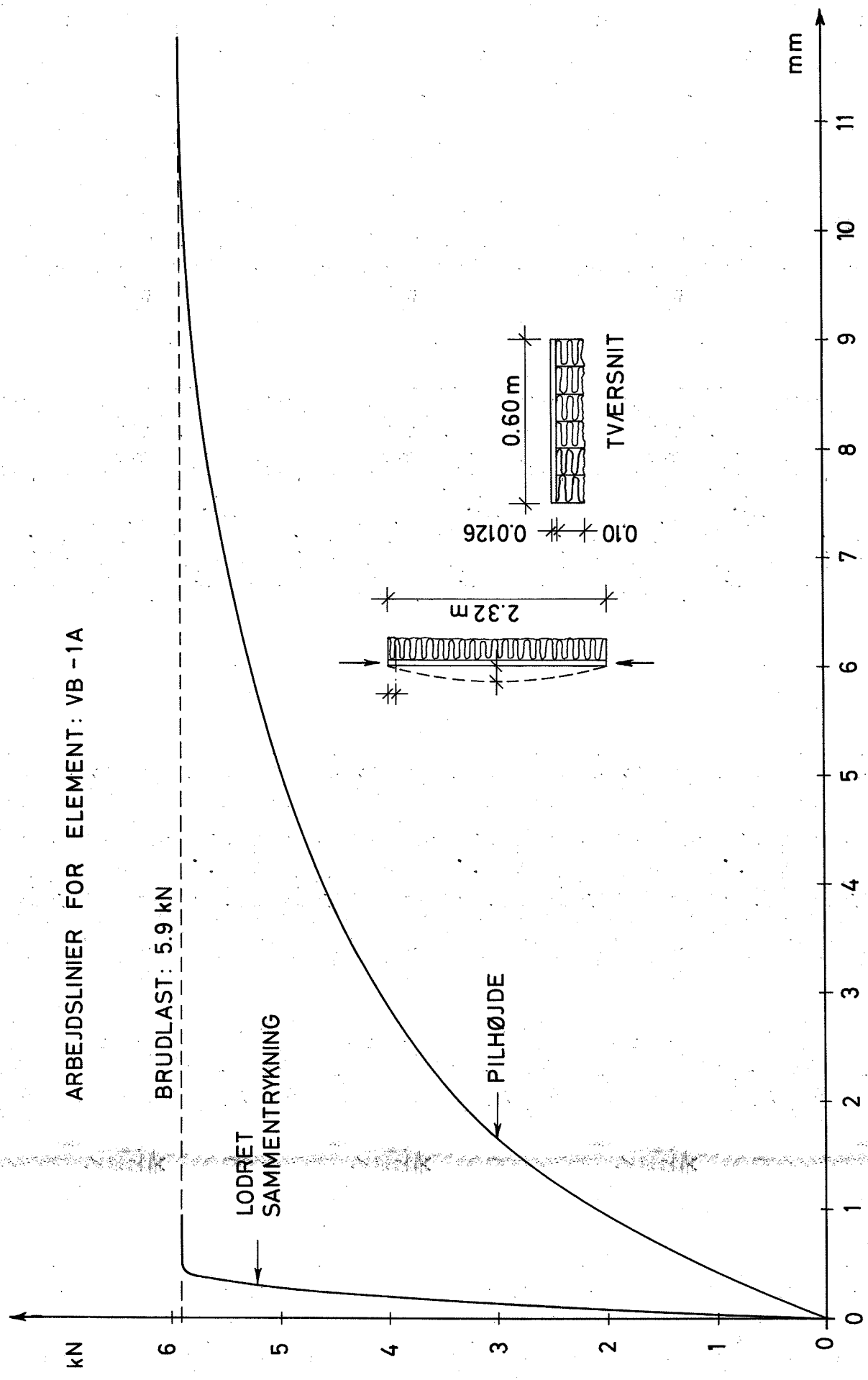
Classification

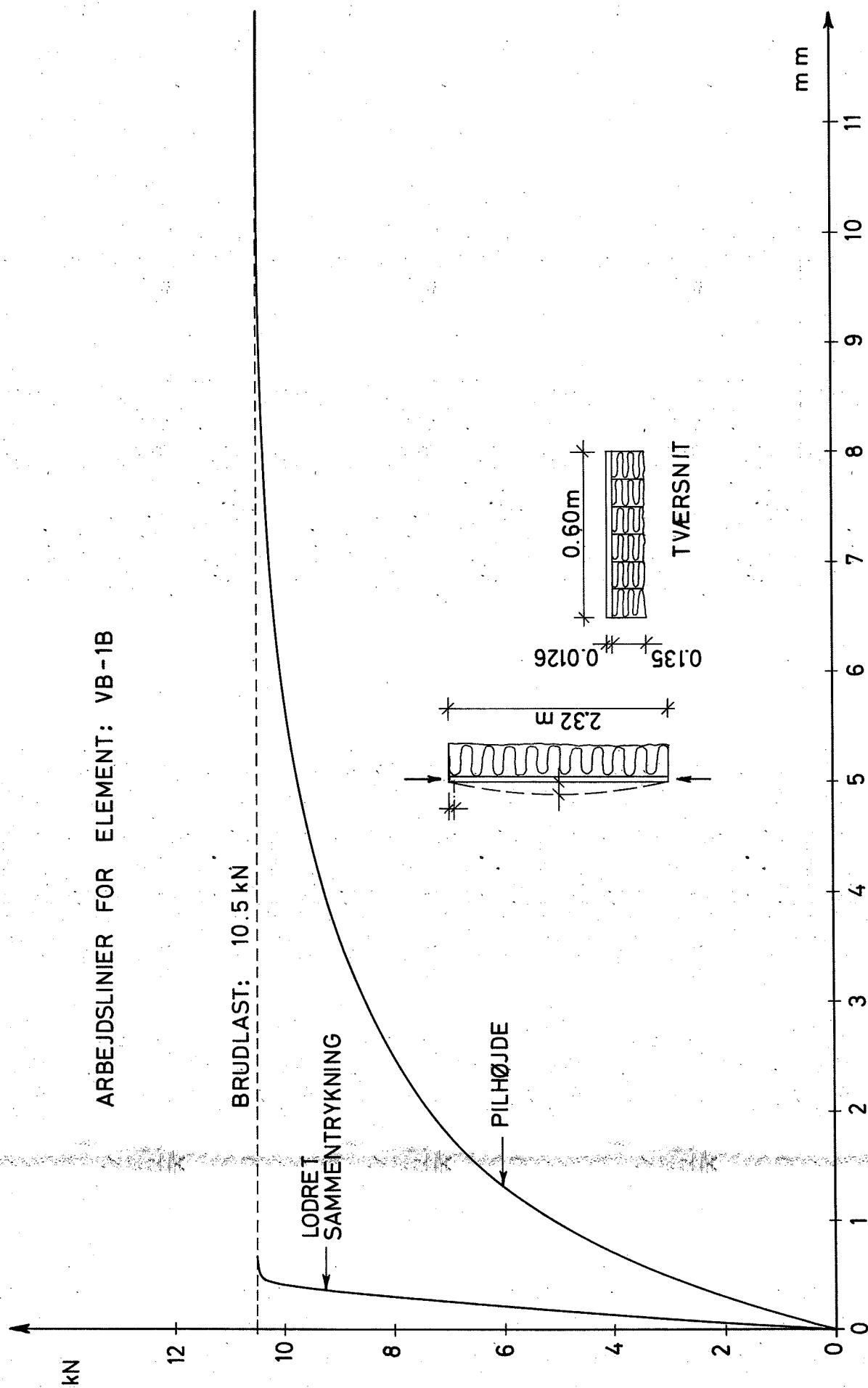
These wall components are by now classified according to Danish Standard, DS 1052, as a

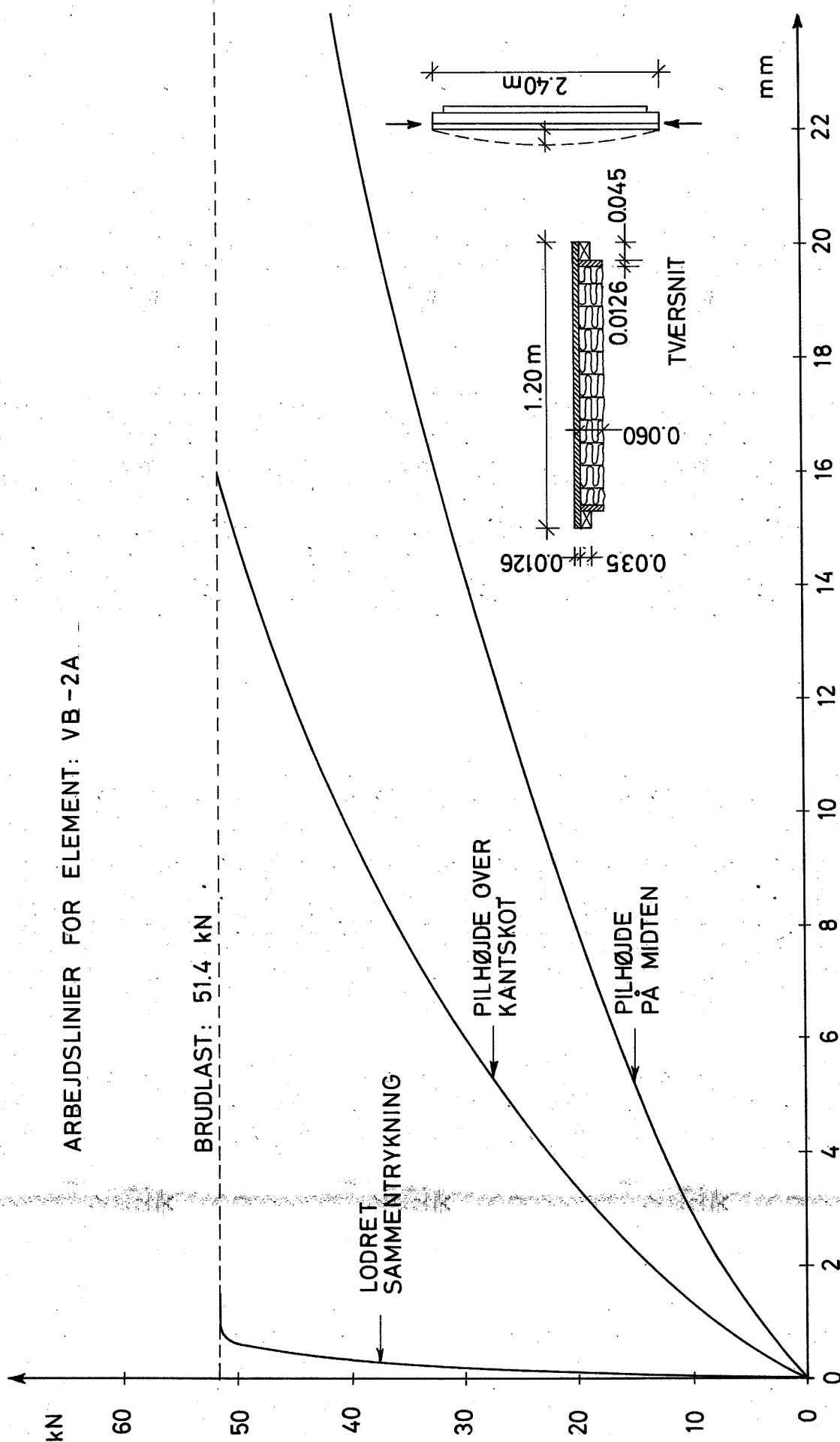
separating, load-bearing

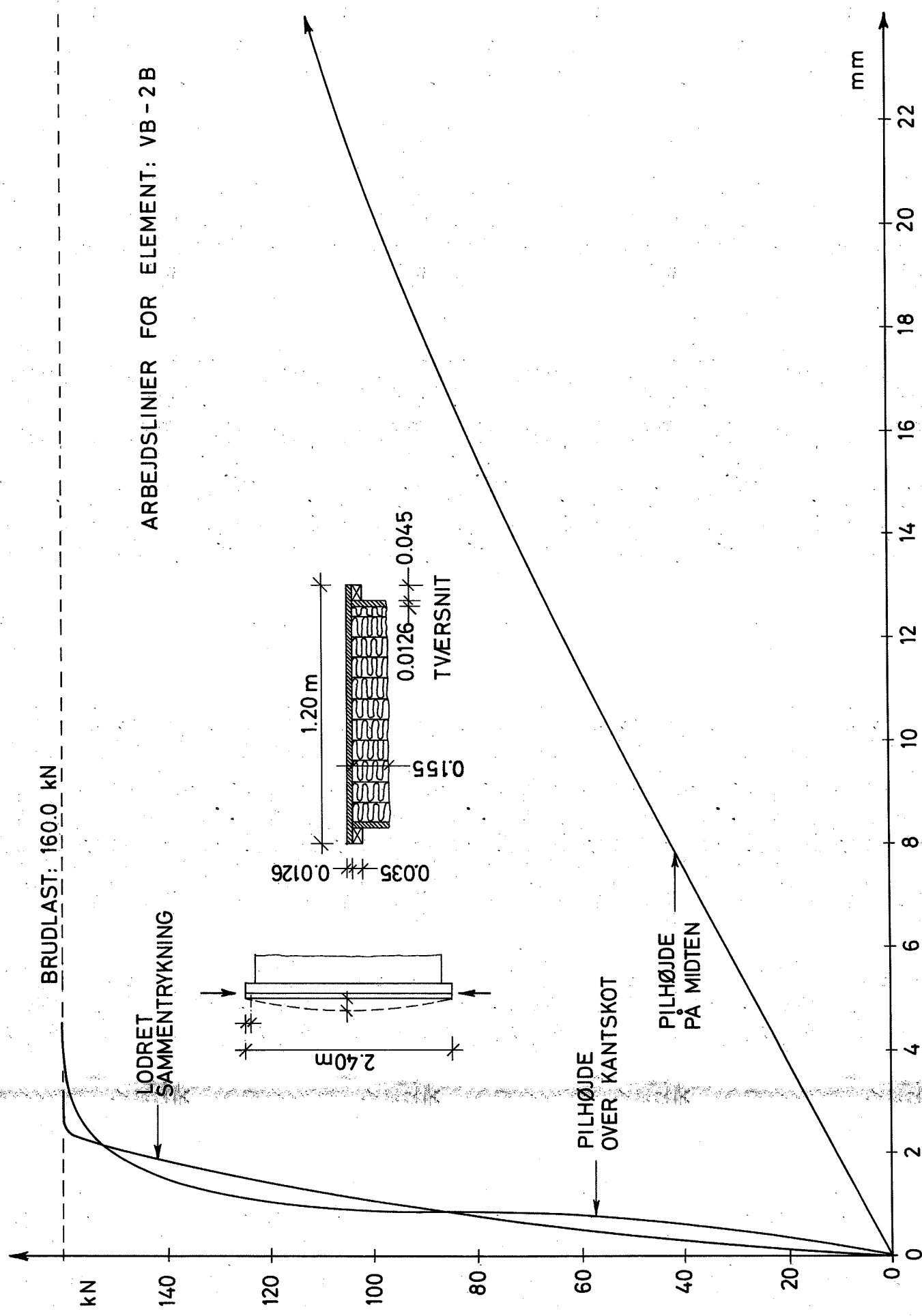
BD-30-building component

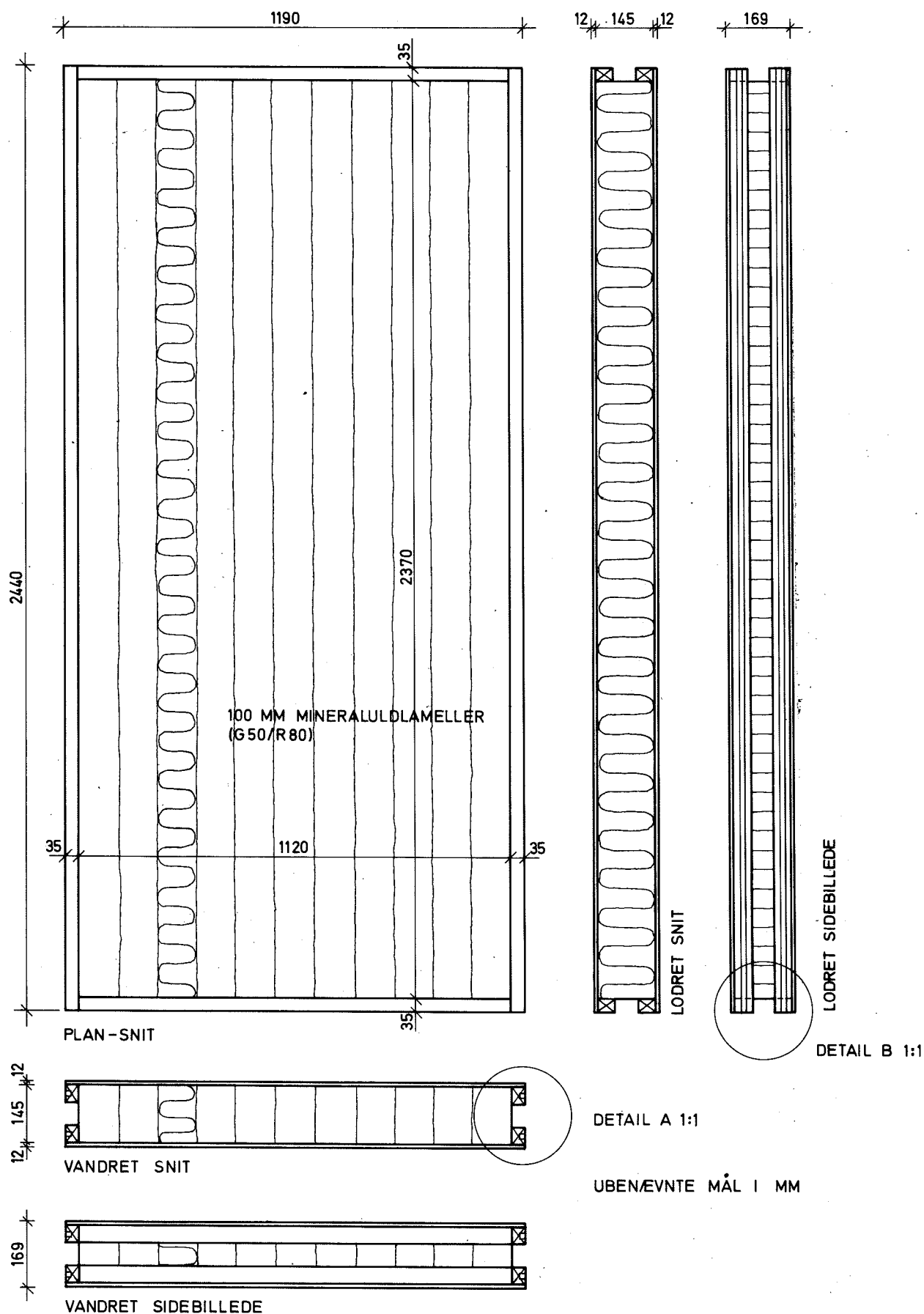
provided that the characteristic normal load does not exceed 14 kN (1.4 tons) per running meter of the wall, and provided that the load can be transferred to the flange not influenced by the fire.





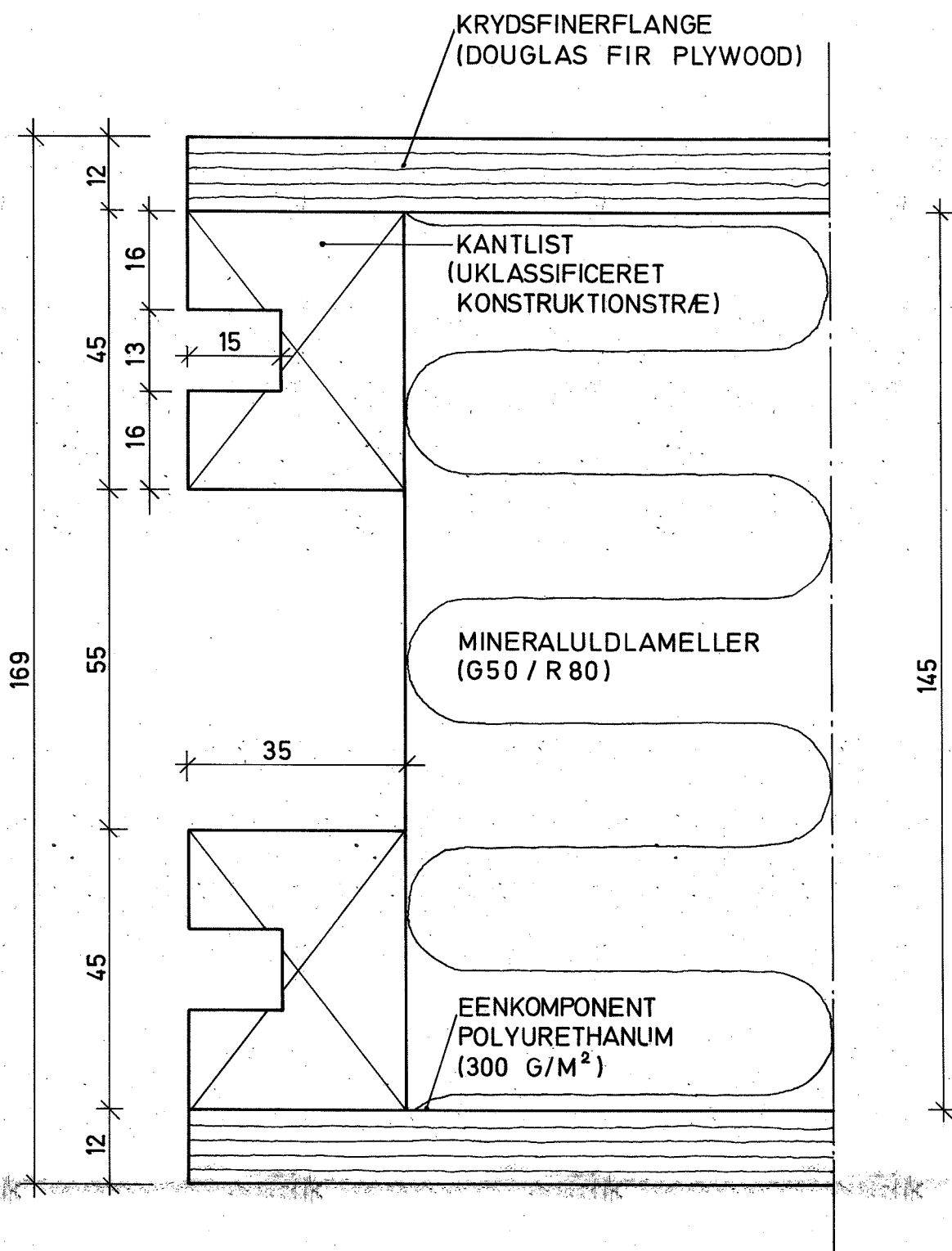




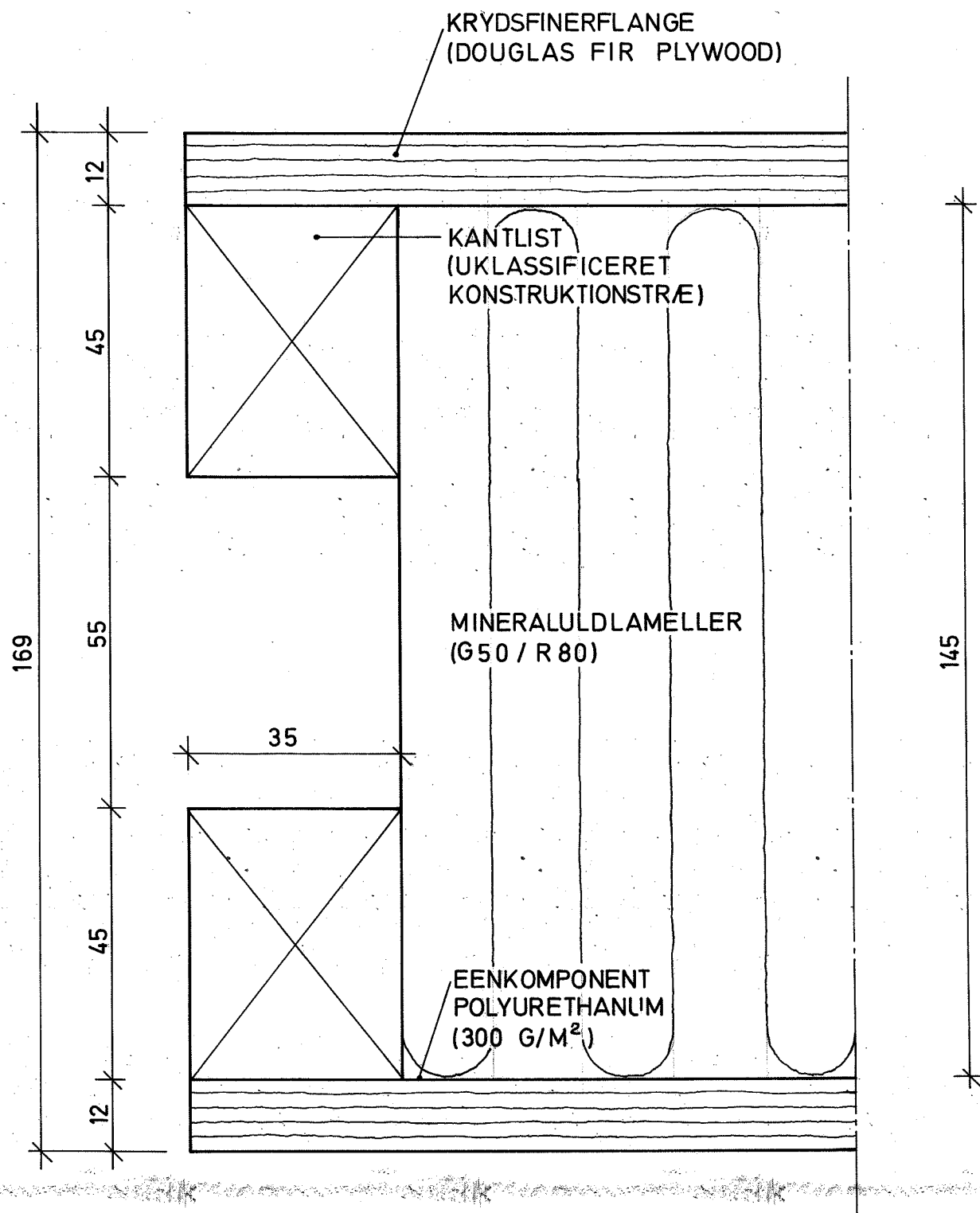


VEGELEMENTER TIL BRANDPRØVNING

1978-03-22
7509/IFH/LR/MF

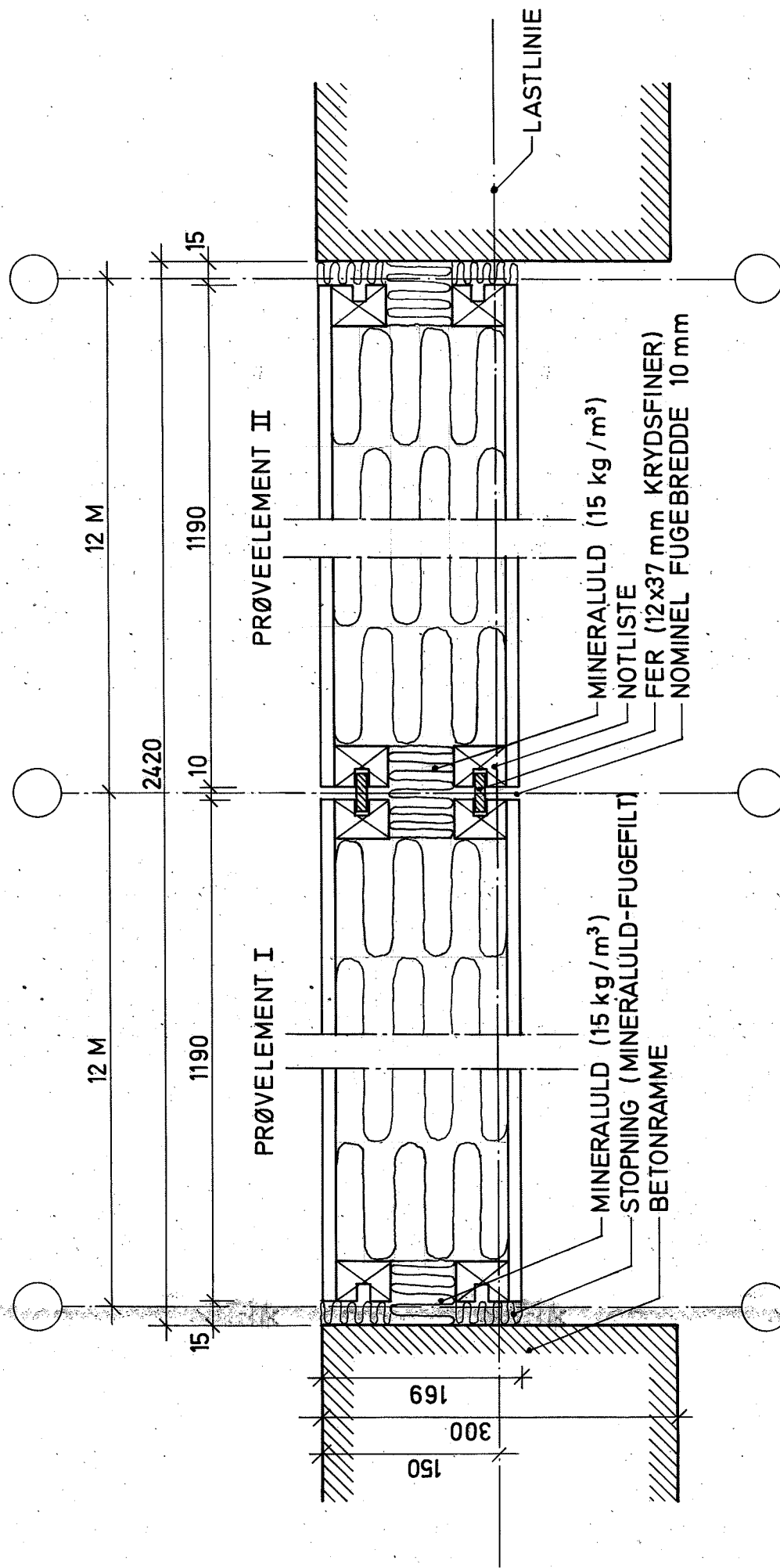


DETAIL A
 VÆGELEMENTER TIL BRANDPRØVNING
 MÅL 1:1
 1978-03-22
 7509 / IFH / LR / MF



DETAIL B
VEGELEMENTER TIL BRANDPRØVNING
MÅL 1:1
1978-03-22
7509 / IFH / LR / MF

BRANDKAMMER



INDBYGNING AF VÆGELEMENTER

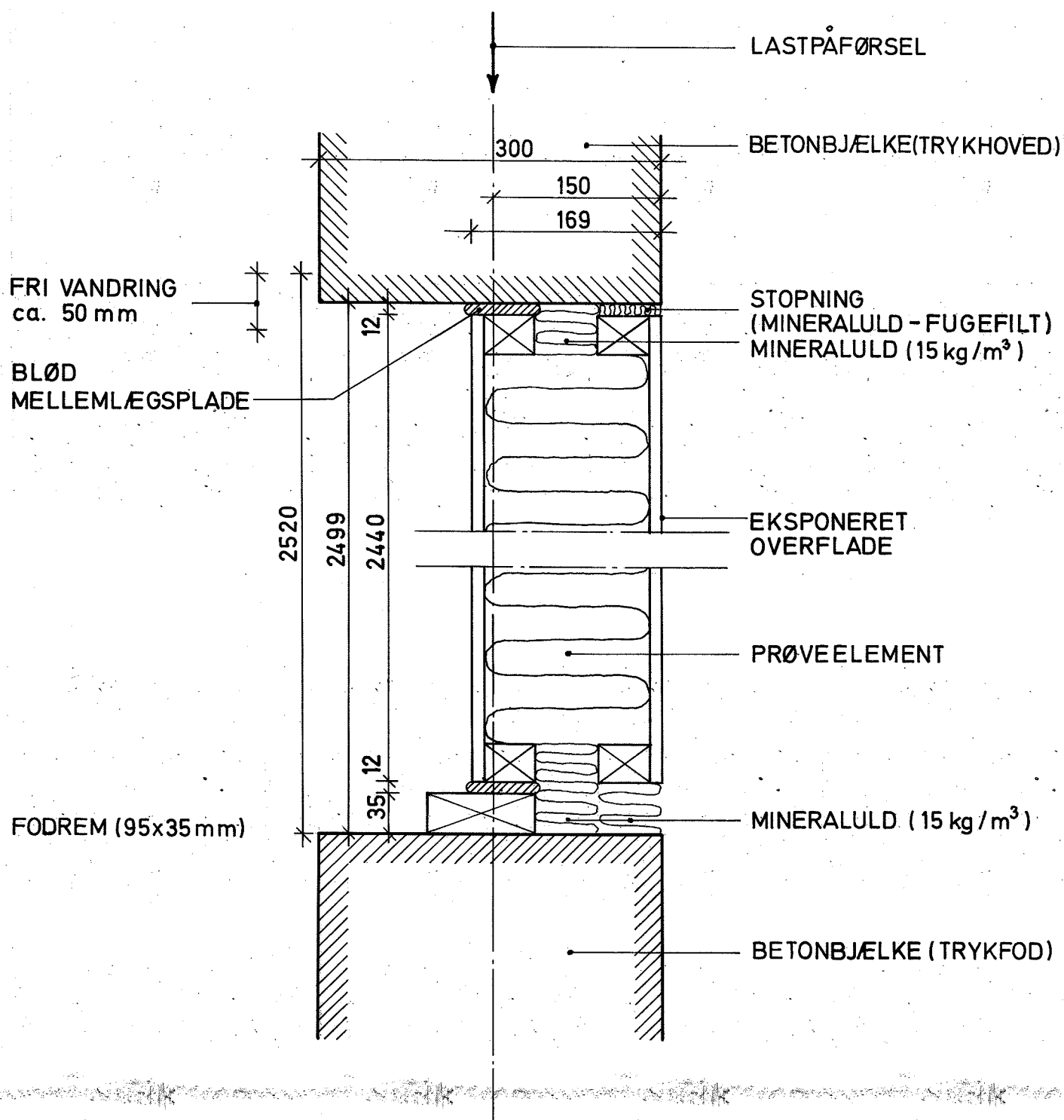
I VERTIKALOVN

VANDRET SNIT

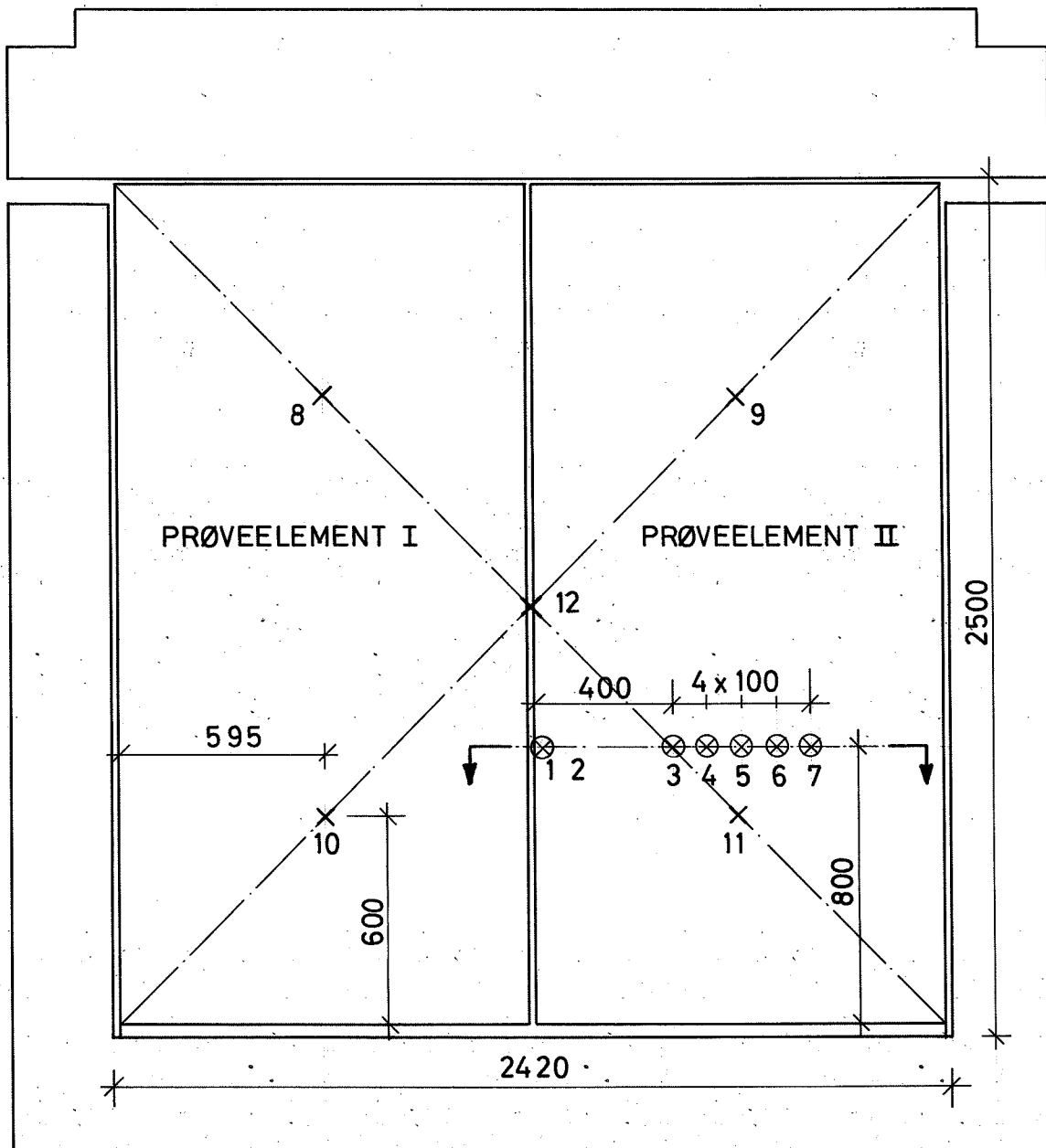
MÅL 1:5

1978-03-30

IFH/7509/LR/MF

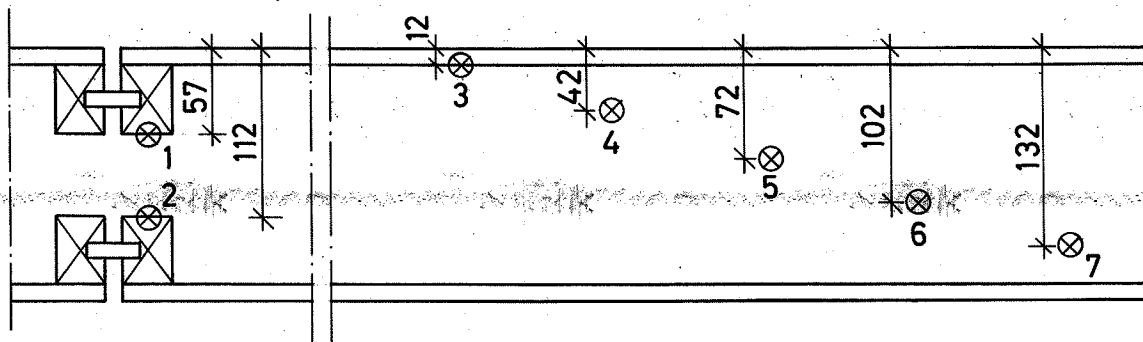


INDBYGNING AF VEGELEMENTER
I VERTIKALOVN
LØDRET SNIT
MÅL 1:5
1978 - 03-30
IFH / 7509 / LR / MF



⊗ = PLACERING AF INDVENDIGE TERMoeLEMENTER

✕ = PLACERING AF OVERFLADE TERMOELEMENTER



PLACERING AF TERMOELEMENTER