

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **129**

LAURITZ RASMUSSEN

**MINERALULDBASEREDE
SANDWICHELEMENTER
BØJNINGSFORSØG MED
KORTTIDSLAST OG LANGTIDSLAST**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole

Lyngby 1978

MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER

BØJNINGSFORSØG MED

KORTTIDSLAST OG LANGTIDSLAST

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 129 · 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

Foreliggende rapport er et led i en serie delrapporter vedrørende undersøgelsen af mineraluldbaserede sandwichelementer som bærende bygningsdele. Elementerne blev første gang anvendt som bærende bygningsdele i DTH's nul-energihus.

Anvendelsen af en ny og uprøvet konstruktion i husbygning rejser naturligvis en lang række spørgsmål og på den baggrund opstilledes et 2-årigt forskningsprogram med deltagelse af ovennævnte parter.

Projektet har modtaget økonomisk støtte af Teknologirådet.

Denne rapport omhandler forsøg med sandwichelementer påvirket til bøjning (tværlast på dæk-/tagelementer) dels under korttidslast, dels under langtidslast. Gennem fuldskalaforsøg med ialt 96 elementer er søgt belyst forskellige faktorerers indflydelse på elementernes styrke- og stivhedsegenskaber.

Forsøgene er desuden et led i mit arbejde for erhvervelsen af den tekniske licentiatsgrad, og forsøgsresultaterne vil indgå i min licentiatafhandling for vurdering/opstilling af egnede beregningsmodeller. I rapporten indgår derfor ikke større teoretiske overvejelser, men primært forsøgsbeskrivelser med en præsentation og kort vurdering af resultater.

Lektor, lic.techn. Egil Borchersen takkes for den store bistand under forsøgenes gennemførelse og for den kritiske gennemgang af manuskriptet.

Lyngby, juli 1978

Lauritz Rasmussen

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
FORORD	1
INDHOLDSFORTEGNELSE	2
RESUMÉ	3
1. INDLEDNING	5
2. FORSØGSOVERSIGT OG BESKRIVELSE AF FORSØGSELEMENTER	8
3. KORTTIDSFORSØG (STYRKE OG STIVHED)	12
3.1 Forsøgsopstilling	13
3.2 Målinger	15
3.3 Forsøgsresultater	17
4. LANGTIDSFORSØG (KRYBEEGENSKABER)	27
4.1 Analytisk beskrivelse af krybeforløb	29
4.2 Forsøgsopstilling	31
4.3 Målinger	34
4.4 Forsøgsresultater	39
5. BÆREEVNEREDUKTION EFTER LANGTIDSLAST	51
6. KVALITATIV VURDERING AF LIMFORBINDELSE	53
7. LITTERATURREFERENCER	56
SUMMARY	57

BILAG:

- Bilag 1: Elementudformning, varianterne 1-6, 9, 10 og 13-16.
- Bilag 2: Elementudformning, variant nr. 7.
- Bilag 3: Elementudformning, variant nr. 8.
- Bilag 4: Elementudformning, varianterne 11 og 12.
- Bilag 5: Elementudformning, detail A (endeskot).
- Bilag 6: Plan med forbandt til elementvarianterne
1-10 og 13-16.
- Bilag 7: Plan med forbandt til elementvarianterne 11 og 12.
- Bilag 8: Opskæring af elementer.
- Bilag 9: Placering af målepunkter ved korttidsforsøg
(elementlængde 4,0 m).
- Bilag 10: Placering af målepunkter ved korttidsforsøg
(elementlængde 2,67 m).
- Bilag 11: Arbejdskurver for elementerne: DK-1, -5 og -6.
- Bilag 12: Arbejdskurver for elementerne: DK-2, -3 og -4.
- Bilag 13: Arbejdskurver for elementerne: DK-7, -8, -11 og -12.
- Bilag 14: Arbejdskurver for elementerne: DK-9 og -10.
- Bilag 15: Arbejdskurver for elementerne: DK-13 og -15.
- Bilag 16: Arbejdskurver for elementerne: DK-14 og -16.
- Bilag 17: Placering af målepunkter ved langtidsforsøg.

RESUMÉ

I nærværende rapport beskrives fuldska-
forsøg med ialt 96 sandwichelementer med
mineraluldkerne og krydsfinérflanger.

Elementerne blev påvirket til bøjning
(tværlast på dæk-/tagelementer), dels un-
der korttidslast, dels under langtids-
last.

Korttidsforsøg (styrke/stivhed)

Ved korttidsforsøgene blev 64 elementer
belastet til brud primært til belysning
af følgende parametres indflydelse på ele-
menternes styrke- og stivhedsegenskaber:

- mineraluldens styrke/stivhed
(mineraluldtype)
- kernetykkelsen
- flangetykkelsen (flangestivheden)
- spændvidden.

Sandwichelementerne udviser lineærelasti-
ske egenskaber med en proportionalitets-
grænse omkring ca. 50% af tilhørende brud-
styrke.

Elementernes bæreevne er primært bestemt
af mineraluldens og limforbindelsens for-
skydningsstyrke, således at der er tilnær-
melsesvis proportionalitet mellem bæreevne
og forskydningsstyrke. De produktionsbe-
stemte svækkelser i limforbindelsen har af-
gørende indflydelse på elementernes bæreevne.

Langtidsforsøg (krybeegenskaber)

Ved langtidsforsøgene blev 32 elementer
(simpelt understøttet) belastet med en
jævnt fordelt fladelast i et år, primært
til belysning af elementernes krybeegen-
skaber i afhængighed af følgende faktorer:

- mineraluldens stivhed
(mineraluldtype)
- belastningens størrelse
- belastningens karakter
(statisk/vekslende)

Under indvirkning af vedvarende belastning
vil sandwichelementerne udvise krybetenden-
ser. Krybningen udtrykt ved den tidsafhæn-
gige tilvækst i maksimalnedbøjningen vokser
tilnærmelsesvis proportionalt med den be-
lastning (spænding), der forårsager den,
når mineralulden ikke belastes ud over ca.
50% af forskydningsstyrken.

Den relative krybning, nedbøjningstilvæk-
sten i forhold til initialnedbøjningen,
er tilnærmelsesvis uafhængig af belastnings-
niveauet.

Efter et år udgør krybningen omkring 14-19% af initialnedbøjningen. Krybeforløbene viser aftagende hastighed med tendens til, at krybningen langsomt dør hen. Krybningens afhængighed af tiden kan med god tilnærmelse beskrives ved en hyperbelfunktion af typen: $\phi = t/(\alpha + \beta t)$, hvor ϕ er den relative tilvækst i maksimalnedbøjningen, t er tiden, og α og β er empiriske konstanter.

Forudsættes, at krybningen følger de opstillede modeller udover det eksperimentelle tidsforløb, vil krybningen gå imod grænseværdier omkring 18-23% af initialnedbøjningen.

Belastningens vekslende karakter har ikke mærkbar indflydelse på krybeforløbet.

Styrke/stivhed
efter langtidslast

Endelig blev de elementer, der havde været langtidsbelastet, belastet til brud analogt til korttidsforsøgene for belysning af eventuelle styrke-/stivhedsreduktioner hidrørende fra langtidslasten.

De aktuelle belastninger, elementerne var påvirket af gennem 1 år, har ikke medført nogen generel bæreevnereduktion.

Samtidig var arbejdskurverne stort set sammenfaldende med referenceelementernes (fra korttidsforsøgene), d.v.s. uændrede stivhedsegenskaber.

1. INDLEDNING

Virkemåde

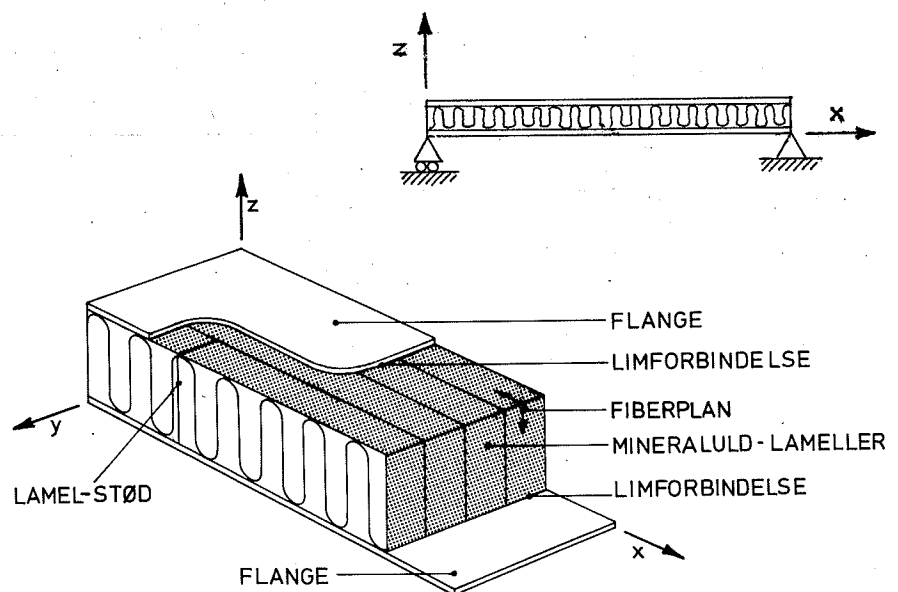
Sandwichelementerne er opbygget som en 3-lags konstruktion bestående af to tynde krydsfinérplader limet til en kerne af lamelskåret mineraluld (se figur 1.1).

I bøjningspåvirkede sandwichelementer udnyttes flangernes gode styrke-/stivhedsegenskaber (i aksial retning) til momentoptagelsen ved flangernes indbyrdes samvirken gennem kernen.

Kernens funktion er primært at sikre flangernes indbyrdes afstand, stabilisere den trykbelastede flange mod udknækning og hindre, at flangerne glider i forhold til hinanden (overføre forskydningskræfter).

Det, der er af betydning ved anvendelsen af mineraluld som kernemateriale, er altså uldens egenskaber ved træk- og trykpåvirkning vinkelret på flangepladerne og egenskaberne ved forskydning i planer vinkelret på flangerne. Mineraluldens egenskaber overfor bøjning er af mindre interesse, idet uldens bidrag til sandwichkonstruktionens bøjningsstivhed er forsvindende i forhold til bidraget fra de to flanger.

Flangernes samvirken gennem kernen er afhængig af en effektiv limforbindelse mellem flange og kerne.



Figur 1.1:

Princip i sandwichkonstruktion med kerne af mineraluld (lameller).

Mineraluldens evne til at optage belastninger beror på mineraluldfibrenes tilnærmelsesvis planparallelle gitterstruktur og fibrenes indbyrdes sammenbinding.

Lamelprincippet

Uldens egenskaber i fiberplanet udnyttes i sandwichkonstruktionen ved at opskære mineralulden til lameller og lime dem til flangepladerne med fiberplanet orienteret vinkelret herpå. Princippet er illustreret på figur 1.1. Mineralfibrenes orientering svarer til x-z-planet.

Vinkelret på fiberplanet (y-retningen) kan der stort set ikke overføres kræfter, og mineraluldbaserede sandwichelementer må altså primært anvendes som enkeltspændende elementer (søjle-/bjælkeelementer).

Af hensyn til håndtérbarhed, sårbarhed under transport m.v. anvendes lamellerne med begrænset længde (2-2,5 m) og ved større elementlængder er det således nødvendigt at udføre stød. Lamellerne anbringes derfor i forbandt, så virkningen af svækkelsen i stødene minimeres (se bilagene 6 og 7).

Mineraluld

De anvendte mineraluldprodukter hidrører fra en traditionel produktion og er på ingen måde optimeret med henblik på denne specielle anvendelse.

Almindeligvis er mineraluld en fællesbetegnelse for isoleringsprodukter bestående af uorganiske fibre indbyrdes forbundet med et bindemiddel.

Anvendes mineralulden udelukkende til isoleringsformål, kendetegnes den almindeligvis ved rumvægten.

Når den desuden anvendes som kernemateriale i en sandwichkonstruktion, er en rumvægtsangivelse langt fra tilstrækkelig til at udtrykke de egenskaber, man har brug for.

Udover den nævnte fiberorientering afhænger styrke- og stivhedsegenskaberne af fibermængden, fiberlængden, fiberdiameteren, samt bindemiddeltpe og -mængde.

De mange parametre gør det vanskeligt at sammenligne forskellige fabrikater og for den sags skyld forskellige produkter af samme fabrikat blot ved en rumvægtsangivelse. Det må derfor fremtidigt overlades til fabrikanterne at fremskaffe de nødvendige oplysninger om uldens styrke- og stivhedsegenskaber.

Til de udførte forsøg er udvalgt 6 forskellige mineraluldtyper, 3 typer Rockwool og 3 typer Glasuld.

I tilknytning hertil er på hver mineraluldtype udført en lang række materialeprøvninger, detaljeret beskrevet i litt. [1].

Sammensætningen af de anvendte mineraluldtyper er detaljeret beskrevet i det følgende.

Rockwool

Rockwool-mineralulden er produceret på en traditionel produktionslinie og består af mineralfibre med gennemsnitsdiameter $5\ \mu$ og gennemsnitslængde 2,5 mm. Fibrene er indbyrdes forbundet med fenolharpiks og desuden imprægneret med olie.

Indholdet af fenolharpiks er ca. 2% (vægtprocent), og olieindholdet ca. 0,3%.

Ulden er produceret i plader med følgende tykkelser (lamelbredder) for de forskellige rumvægte:

Rockwool $80\ \text{kg/m}^3$ - 100 mm

Rockwool $100\ \text{kg/m}^3$ - 80 mm

Rockwool $120\ \text{kg/m}^3$ - 60 mm

De tre uldtyper betegnes i det følgende henholdsvis R80, R100 og R120.

Glasuld

Glasuld-mineralulden er produceret af standardglas i en såkaldt grovfiberproduktion. Mineraluldfibrene har en gennemsnitsdiameter omkring $12\ \mu$ og en gennemsnitslængde omkring 9 mm.

Bindemiddelindholdet (fenolharpiks) udgør 11-12% og olieindholdet ca. 0,5%, begge dele vægtprocent.

Ulden er produceret i plader med nominel tykkelse på 100 mm og rumvægte henholdsvis 50, 70 og $90\ \text{kg/m}^3$, i det følgende betegnet G50, G70 og G90.

2. FORSØGSOVERSIGT OG BESKRIVELSE AF FORSØGSELEMENTER

Formål	Forsøgene havde til formål at belyse forskellige faktorerers indflydelse på sandwichelementernes styrke- og stivhedsforhold under påvirkning af bøjende momenter (tværlast på dæk-/tagelementer), dels under korttidslast, dels under langtidslast.
Korttidsforsøg	Korttidsbelastningsforsøgene skulle primært belyse konstruktionens korttidsstyrke- og stivhedsegenskaber i relation til følgende 4 faktorer: - mineraluldens styrke/stivhed (mineraluldtype) - kernetykkelsen - flangetykkelsen (flangestivheden) - spændvidden.
Langtidsforsøg	Langtidsbelastningsforsøgene skulle primært belyse konstruktionens (mineraluldens) krybeegenskaber i afhængighed af følgende 3 faktorer: - mineraluldens stivhed (mineraluldtype) - belastningens størrelse - belastningens karakter (statisk/vekslende). En efterfølgende korttidsbelastning til brud af de langtidsbelastede forsøgselementer skulle desuden give et indtryk af eventuelle styrkereduktioner hidrørende fra langtidslasten. Forsøgene blev opdelt i 6 serier omfattende 16 forsøgsvarianter. For alle varianter blev af hensyn til den statistiske vurdering udført 4 forsøg (betegnet A, B, C og D) og alt i alt udførtes korttidsforsøg med 64 elementer og langtidsforsøg med 32 elementer plus efterfølgende belastning til brud af de 32 elementer fra langtidsforsøgene. De 6 forsøgsserier ser således ud: Korttidsforsøg (DK-elementer): 1) Variation i kernemateriale (mineraluldtype): [R80, R100, R120, G50, G70, G90] 2) Variation i kernetykkelse [200, 300, 400 mm] 3) Variation i flangetykkelse [12/12, 16/16, 12/16 mm/mm] 4) Variation i spændvidde [4,00m, 2,67 m]

Langtidsforsøg (DL-elementer):

5) Variation i kernemateriale (mineraluldtype):
[R80, R120, G50, G90]

6) Variation i belastning

$$\left[\begin{array}{l} g + 1,00 \text{ kN/m}^2 \text{ (statisk)} \\ g + 0,25 \text{ kN/m}^2 \text{ (statisk) overlejet af} \\ \quad 0,75 \text{ kN/m}^2 \text{ (vekslende)} \\ g + 2,20 \text{ kN/m}^2 \text{ (statisk)} \end{array} \right]$$

(g refererer til egenlasten)

Fordelingen af de 16 varianter (96 elementer) på de 6 forsøgsserier fremgår af oversigten, tabel 2.1.

Som referencer valgtes varianterne 1 og 2 med kernetykkelse 300 mm, flangetykkelse 12 mm, længde (spændvidde) 4,0 m og mineraluldkerne henholdsvis R80 og G50. Variant nr. 1 indgår dog ikke i forsøgsserierne 2 og 3.

Bredden af forsøgselementerne er overalt 0,60 m.

Variant nr.	Serie nr.	Mineraluldkerne	Kernetykkelse mm	Flangetykkelse		Elementlængde m	Korttidsforsøg		Langtidsforsøg
				Over mm	Under mm		Belastning	Belastning	
1	1- -4-5-6	R80	300	12	12	4,00	til brud	$g^* + 1,00$	
2	1-2-3-4-5-6	G50	300	12	12	4,00	til brud	$g + 1,00$	
3	1	G70	300	12	12	4,00	til brud		
4	1- -5	G90	300	12	12	4,00	til brud	$g + 1,00$	
5	1	R100	300	12	12	4,00	til brud		
6	1- -5	R120	300	12	12	4,00	til brud	$g + 1,00$	
7	2	G50	200	12	12	4,00	til brud		
8	2	G50	400	12	12	4,00	til brud		
9	3	G50	300	16	16	4,00	til brud		
10	3	G50	300	16	12	4,00	til brud		
11	4	G50	300	12	12	2,67	til brud		
12	4	R80	300	12	12	2,67	til brud		
13	6	G50	300	12	12	4,00	til brud	$g + 0,25$ $+ 0,75 \text{ (vek)}$	
14	6	R80	300	12	12	4,00	til brud	$g + 0,25$ $+ 0,75 \text{ (vek)}$	
15	6	G50	300	12	12	4,00	til brud	$g + 2,20$	
16	6	R80	300	12	12	4,00	til brud	$g + 2,20$	

Tabel 2.1:

Forsøgsoversigt. I korttidsforsøgene indgår $16 \times 4 = 64$ elementer, i langtidsforsøgene $8 \times 4 = 32$ elementer.

*g refererer til egenlasten.

Forsøgselementer

Elementernes detaljerede udformning fremgår af bilagene 1-8.

Alle forsøgselementerne er produceret af Tåsinge Træ A/S i en traditionel håndværksmæssig produktion. Vedrørende produktionsteknik henvises i øvrigt til litt. [2].

Flangemateriale

Som flangemateriale er overalt anvendt en femlags amerikansk krydsfinér, kvalitet C-D (exterior glue) i tykkelserne 1/2" (12,5 mm) og 5/8" (15,6 mm). Pladerne hidrører fra samme produktion hos "BRAND S" i Oregon, U.S.A., og er leveret af Oversøisk Træimport A/S.

Separate materialeprøvninger på de anvendte plader er detaljeret beskrevet i litt. [3]. På grund af pladernes begrænsede længde (standardlængde 2,44 m) er pladerne samlet ved skråskarring 1:10.

Skarringerne er i samtlige forsøgselementer bevidst anbragt i de kritiske snit, d.v.s. omkring flangernes midte.

Limforbindelse

Til limforbindelsen er anvendt en énkomponent polyurethanlim, der hærdes til en kemikalie-, vand- og kogefast polyurea-ethan. Udhærdningen foregår ved hjælp af luftens og materialernes fugtindhold.

Under hærdningen sker der en opskumning af limen, der samtidig med etableringen af et pressetryk skulle sikre, at limen udfylder eventuelle hulrum og trænger ind i mineralulden. Limen blev leveret af Lars Foss Kemi A/S (nu Sadofoss A/S) og betegnes "fugtighedshærdende enkeltlim nr. 84-3678".

Limen blev påført flangepladerne med tandspartel i en mængde af ca. 300 g/m².

Efter limning blev elementerne påført et pressetryk på ca. 300 kg/m² i mindst 15 timer.

Opskæring

Alle elementer blev produceret i bredden 1,22 m (svarende til krydsfinérpladernes standardbredde) og derefter opskåret til 2 elementer med bredden 0,60 m (renskåret). For de elementvarianter, der er undersøgt for både korttids- og langtidslast, er sammenhørende halvdele anvendt til henholdsvis korttidsforsøg og langtidsforsøg. Princippet i opskæringen er vist på bilag 8.

Endeskot

På grund af de store belastningskoncentrationer, der uvægerligt vil optræde ved vederlagene, er elementerne forsynet med endeskot af 12 mm krydsfinér limet til mineraluldlamellernes endeflade (se bilag 5). Anvendelsen af endeskot hindrer større lokale sammentrykninger ved understøtningerne (trykbrud ved vederlag), men har ellers ingen betydning for konstruktionen som helhed.

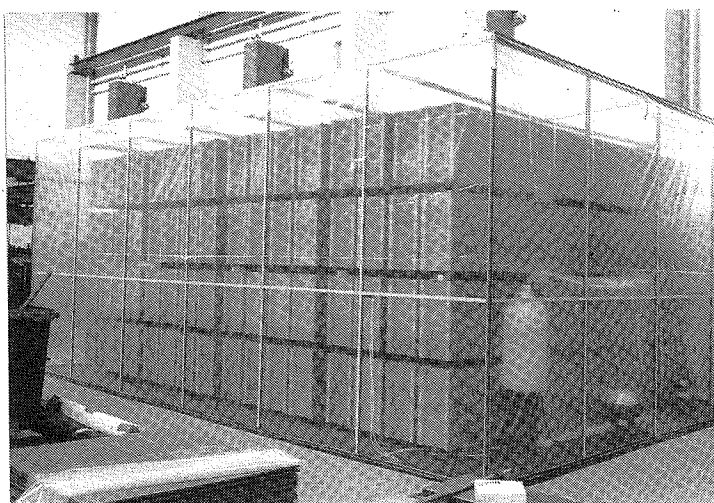
3. KORTTIDSFORSØG (STYRKE OG STIVHED)

Ved korttidsforsøgene blev forsøgselementerne belastet til brud ved bøjningspåvirkning gennem 4 tværgående linielaste. Elementerne var simpelt understøttet over endeskottene.

Belastningen blev påført i trin á ca. 1 kN i forsøgsstarten og umiddelbart før brud i trin á ca. 0,2 kN.

Forsøgenes varighed strakte sig herved fra ca. 10 til 30 minutter afhængigt af de enkelte elements bæreevne.

Den trinvis lastpåførsel skyldes dataregistreringen af sammenhørende værdier af last og deformation for forskellige lastniveauer.



Figur 3.1:

Konditionering af 64 elementer til korttidsforsøg ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og $65\%\text{RF} \pm 3\%\text{RF}$).

Konditionering

Samtlige elementer blev inden forsøgene konditioneret i mindst 1 måned ved en temperatur på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og en relativ fugtighed på $65\% \pm 3\%$.

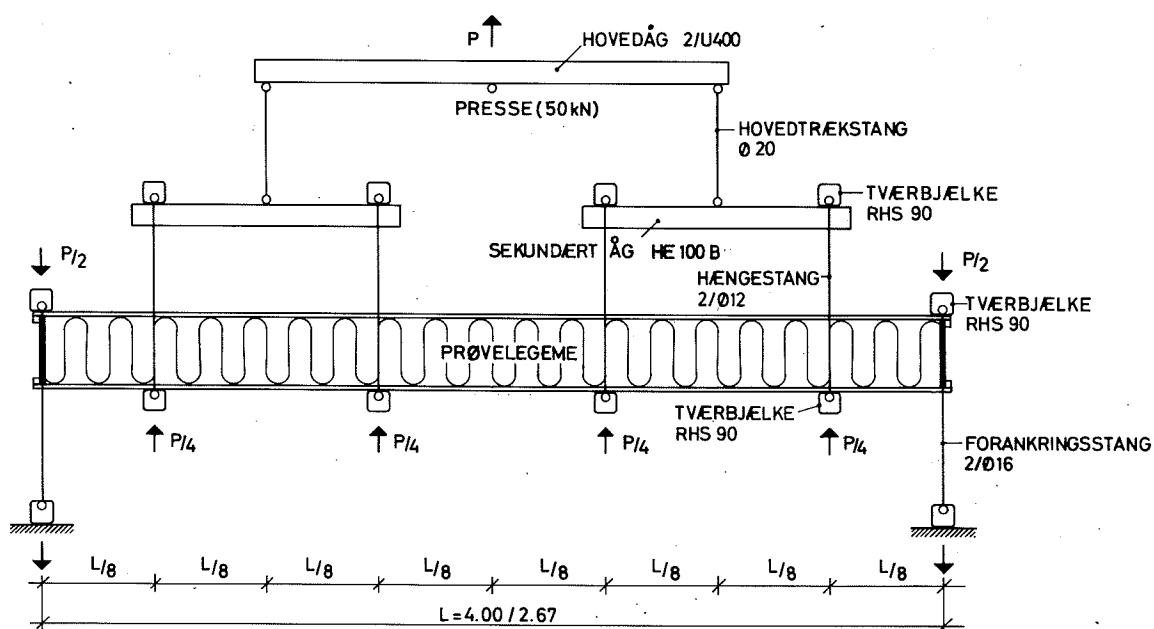
Det valgte konditioneringsklima svarer til øvre grænse i klimaklasse I (se f.eks. litt. [4]).

Ligevægtsfugtindholdet i krydsfinérflangerne blev bestemt på mindre prøver ved tørre/vejemetoden. Middelfugtindholdet i

krydsfinéren baseret på 10 prøver var 8,8%. I massive fyrretræsklodser konditioneret på samme måde målt et fugtindhold på 12,6%. Forskellen skyldes sandsynligvis krydsfinérens mindre fugtkapacitet på grund af limen mellem de enkelte finérlag. Se i øvrigt litt. [5].

3.1 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstilling og belastningsarrangement er vist på figur 3.2 og 3.3.



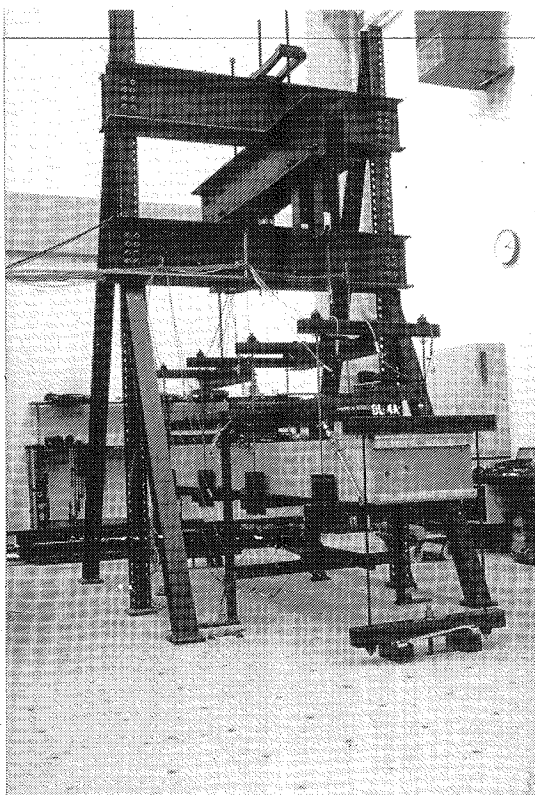
Figur 3.2:

Princip i opstilling til bøjningsforsøg med korttidslast.

Af forsøgstekniske grunde er forsøgselementet anbragt vandret med bøjningslasten (tværlasten) virkende lodret opad. Understøtning af elementet sker gennem forankringer til gulv (spændeplan).

Den omvendte prøvning bevirker, at traksiden vender opad, og at elementets egenvægt virker modsat den påførte tværlast.

Kraftmålingen nulstilles med elementet hængende i belastningsarrangementet og i de senere refererede brudbelastninger er der således kompenseret for bidrag fra egenlasten.



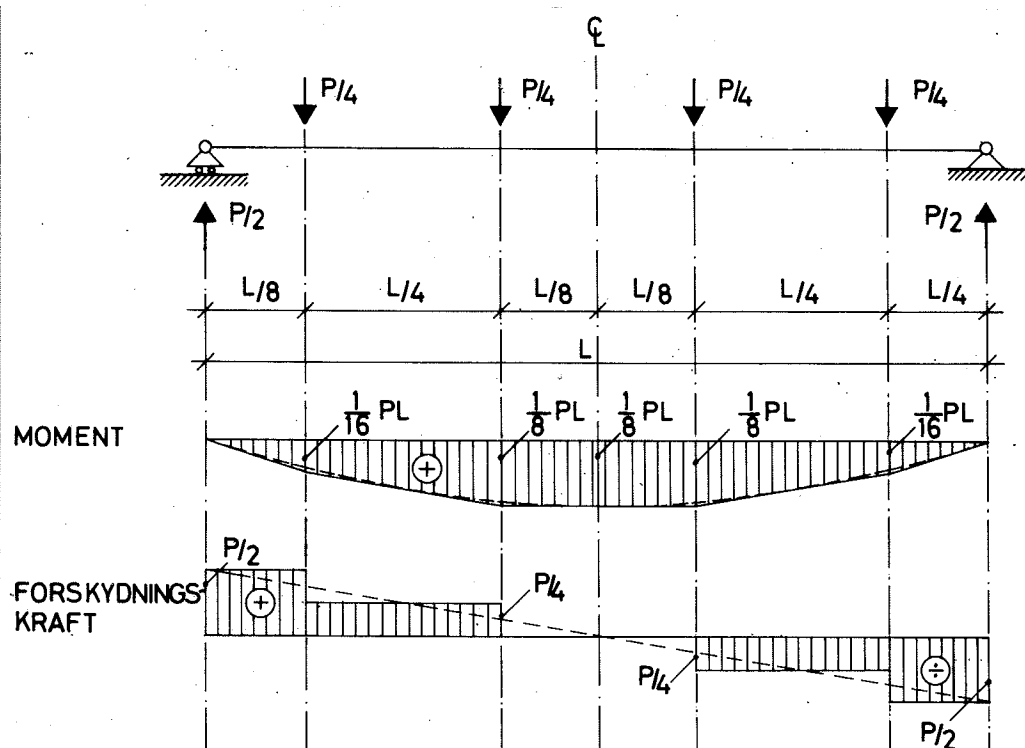
Figur 3.3:

Forsøgsopstilling med 0,30 m tykt og 4,00 m langt forsøgselement.

Hovedtrækstrænger, tværbjælker, hængestænger og forankringsstænger kan placeres i to positioner, så opstillingen kan anvendes for spændvidderne henholdsvis 4,00 m og 2,67 m.

Belastningen påføres gennem en centralt virkende hydraulisk presse og fordeles gennem åg og trækstænger (koblet med charnierer) som fire lige store tværgående linielaste fordelt over elementlængden. Linielastene påføres gennem 100 mm brede tværbjælker med bløde mellem-lægsplader. Med det valgte belastningsarrangement tilstræbes en jævn lastfordeling over elementlængden.

Belastningsprincippet med tilhørende moment- og forskydningskraftfordeling er vist på figur 3.4.



Figur 3.4:

Moment- og forskydningskraftfordeling i forsøgselement under det valgte belastningsarrangement. De tilsvarende fordelinger under en jævnt fordelt fladelast er vist punkteret.

3.2 Målinger

Kraftmåling

Målingen af kraften, P , skete ved hjælp af en vejecelle (Interface, model 1221-AP) indbygget mellem den hydrauliske presse og hovedåget. Til det hydrauliske system var endvidere tilsluttet en trykcelle, der løbende registrerede olietrykket, og som sidste kontrol registreredes træktøjningerne i de to hovedtrækstænger ved hjælp af pålimede strainingage.

Måleusikkerheden på vejecellen er ca. 0,1 kN.

Deformationsmålinger

Elementernes udbøjning blev målt i elementernes midterlinie i 7 punkter på elementernes underside (opad i forsøgsopstilling) og 3 punkter på elementernes overside (se bilagene 9 og 10).

Målingerne skete ved hjælp af 10 elektriske flytningstransducere (af potentiometer-typen) monteret på to målerammer uafhængige af belastningsarrangementet.

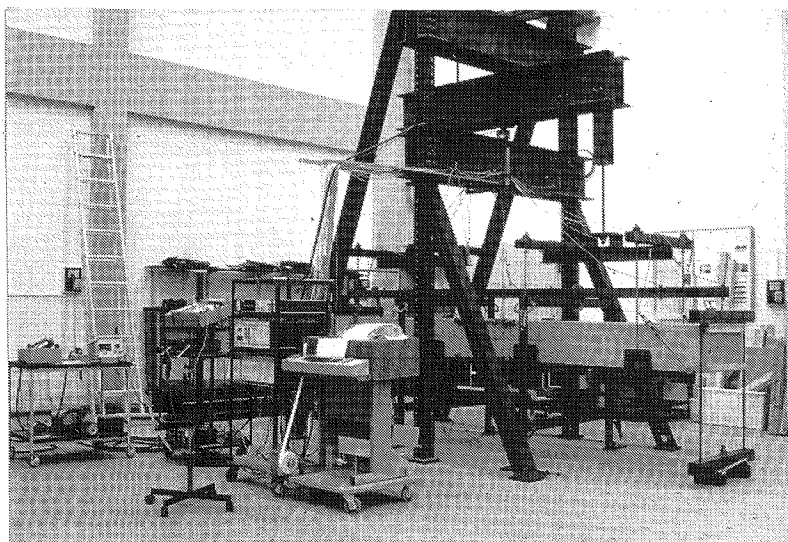
Måleusikkerheden på flytningstransducerne er ca. 0,02 mm.

To af flytningsmålingerne, placeret ved vederlagene centralt over endeskottene, tjente som referencemålinger ved bestemmelse af udbøjningsfiguren og pilhøjden på midten.

Endvidere målttes flangernes træk- og tryktøjninger i midtersnittet ved hjælp af 4 spærmål, påmonteret som vist på bilag 9 og 10. Målestrækningen var 500 mm.

Som kontrol på tøjningsmålingerne blev enkelte forsøgselementer desuden forsynet med strain-gage på hver flangemidte.

Endelig målttes på visse elementer flangernes indbyrdes glidning nær vederlagene i zonerne med maksimal konstant forskydningskraft (se bilag 9).



Figur 3.5:

Forsøgsopstilling med belastnings- og dataregistreringsudstyr.

Målingerne skete ved hjælp af 4 stk. spærsmål anbragt under 45° med elementets flanger.

Registreringen af samtlige målinger skete automatisk ved hjælp af en datalogger tilkoblet en skrive- og hulleenhed.

For hvert lasttrin blev foretaget to aflæsninger (to scan) af samtlige målepunkter, og det er middelværdien af disse to aflæsninger, der ligger til grund for senere refererede resultater.

3.3 Forsøgsresultater

Sandwichelementernes bæreevne under påvirkning af bøjende momenter er primært bestemt af kernens (mineraluldens) og limforbindelsens evne til at modstå forskydningsspændinger, af flangerens evne til at modstå træk- og trykspændinger og af kernens evne til at stabilisere den trykbelastede flange mod udknækning.

Brudtyperne kan inddeles i følgende 4 hovedgrupper:

- I. Forskydningsbrud i mineraluldkernen.
- II. Forskydningsbrud i limforbindelsen mellem flange og kerne.
- III. Træk- eller trykbrud i flangerne.
- IV. Lokal foldning af trykbelastede flanger (træk- eller trykbrud i mineraluldkernen).

Brudmåden afhænger dels af den valgte materialesammensætning dels af elementets spændvidde.

For et givet tværsnit vil en forøgelse af spændvidden medføre større normalspændinger i flangerne i forhold til forskydningsspændingerne og hermed øge muligheden for træk- eller trykbrud i flangerne.

Korte spændvidder giver derimod større forskydningsspændinger og øger muligheden for forskydningsbrud i kerne eller limforbindelse, forudsat at flangerne kan modstå spændinger hidrørende fra bøjende momenter, og forudsat at brud ikke sker på grund af koncentrerede belastninger.

I de udførte forsøg blev observeret brudtyper svarende til I og II (forskydningsbrud) og eventuelt IV (lokal foldning). Brud i flangerne blev ikke registreret. Brudtype IV skal ses i sammenhæng med de koncentrerede belastninger, der uvægerligt vil optræde omkring de påførte linielaste og omkring stødene i mineraluldlamellerne, hvor der ikke kan overføres forskydningskræfter.

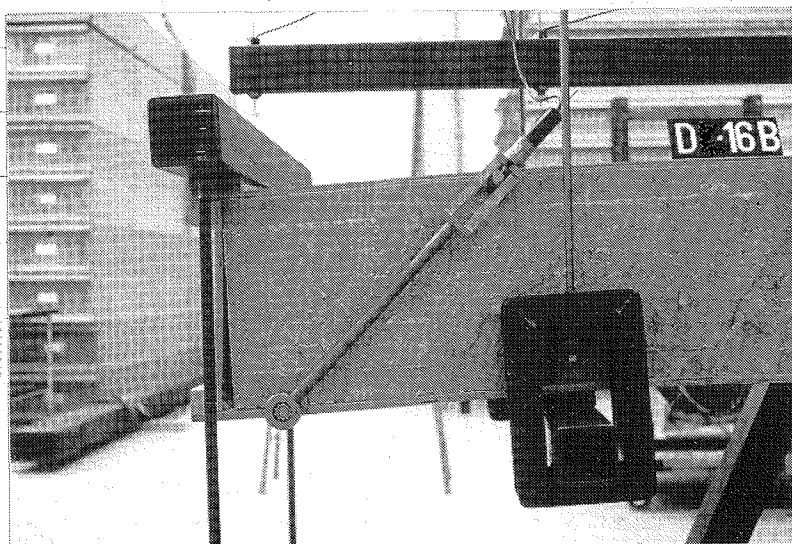
Små forhåndskrumninger (eventuelt hidrørende fra lokale overpåvirkninger eller initieret af svækkelserne ved lamelstødene) giver anledning til bøjningsspændinger i flangen og til træk- og trykspændinger i mineralulden og limforbindelsen mellem uld og flange.

Brud kan derfor forekomme i mineralulden, før trykbelastningen i flangen har nået foldelasten for den helt plane flange.

Visuelt er det meget vanskeligt at registrere lokale foldningsfænomener samtidig med, at følgevirkningerne sandsynligvis giver bruddet udseende af et forskydningsbrud ved limforbindelsen (slip mellem flange og mineraluld).

Observerede
brudtyper

De observerede brudtyper er vist på figurerne 3.6 til 3.9.

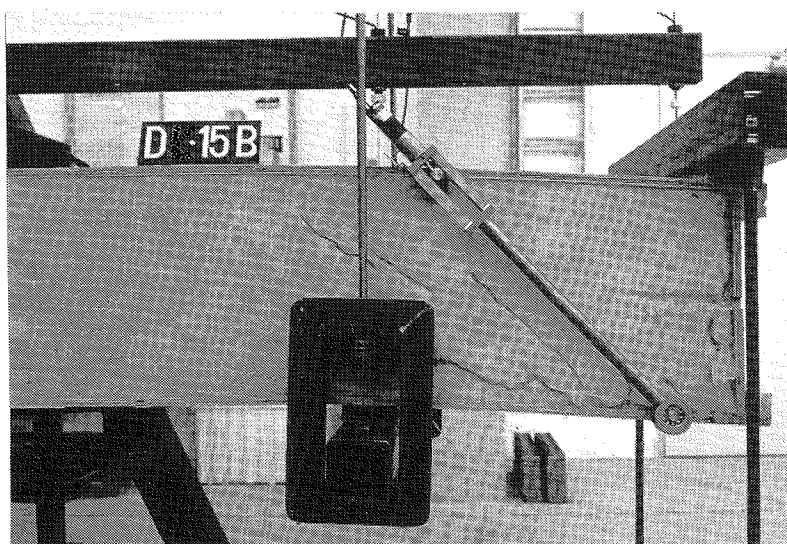


Figur 3.6:

Forskydningsbrud i limforbindelse ved vederlag. Forbindelsen mellem mineraluldkernen og trykflangen (nedad på billedet) er brudt et stykke forbi den tværgående linielast. Flangeglidningen medfører desuden slip ved endeskottet.

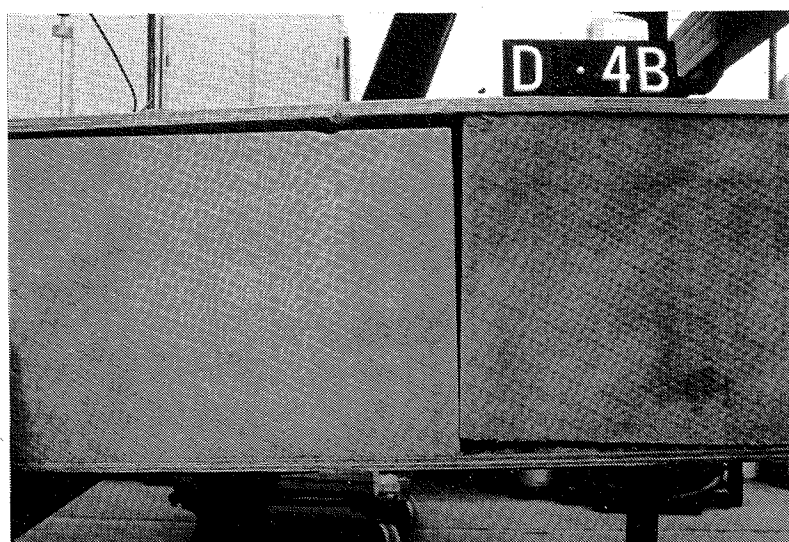
Figur 3.6 viser den brudfigur, der blev observeret i over 90% af forsøgene. Bruddet er et typisk forskydningsbrud bestemt af svækkelserne i limforbindelsen. Bruddet optræder ved vederlagene i området med maksimal forskydningskraft (mellem vederlag og første tværgående liniebelast).

På figur 3.7 er vist et eksempel, hvor forskydningsbruddet desuden optræder i selve mineralulden.



Figur 3.7:

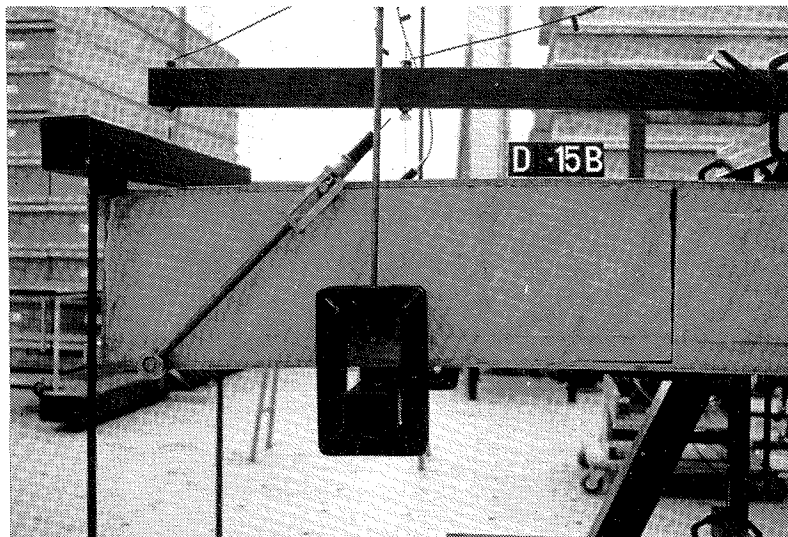
Forskydningsbrud dels i limforbindelse, dels i mineralulden ved vederlag.



Figur 3.8:

Forskydningsbrud ved lamelstød. Bruddet medfører slip mellem flange og mineraluld.

På figurerne 3.8 og 3.9 optræder bruddene som forskydningsbrud ved lamelstøddene nærmest vederlagene (sammenlign bilag 6 og 7). I de lameller, der er forskudt i forhold til støddene, er sket forskydningsbrud i selve mineralulden.



Figur 3.9:

Forskydningsbrud ved lamelstød. Desuden er sket forskydningsbrud i limforbindelsen mod trækflangen (opad) helt ud til vederlaget (sammenlign figur 3.7).

Resultatoversigt

Resultaterne af korttidsforsøgene er vist i tabel 3.1 med angivelse af observerede brudtyper. Det bemærkes, at elementerne 1, 14 og 16, henholdsvis 2, 13 og 15, er helt analoge, idet de tjener som referen-
ceelementer for langtidsbelastningsforsøgene (jvf. oversigt i kapitel 2).

De angivne brudlaste (bæreevner) svarer til den største påførte last, der tillader dobbeltaflæsning af samtlige målepunkter inden brud.

Endvidere er angivet den til brudlasten (enkeltkraften) ækvivalente fladelast og tilhørende brudmoment (pr. 0,6 m) og maksimale forskydningskraft (pr. 0,6 m).

Elementernes stivhed er angivet ved hældningen af arbejdslinierne (sammenhæng mellem påført last og maksimaludbøjning) i det lineærelastiske område.

Arbejdslinierne for de 4×16 forsøgselementer til korttidsforsøgene er endvidere vist på bilagene 11 - 16.

FORSØGSELEMENT							STYRKE						STIVHED		
Variant nr.	Mineral- uldkerne	Kerne- tyk- kelse mm	Planetykkelse		Spænd- vidde m	Egen- vægt kg/m ²	Brudlast (b=0,6m)		Ækvivalent fladelast		Brud- moment kNm	Forskyd- ningskraft kN	Brud- type	Nedbøjning pr. kN/m ²	
			Over mm	Under mm			Aktuel kN	Middel kN	Aktuel kN/m ²	Middel kN/m ²				Aktuel mm/kN/m ²	Middel mm/kN/m ²
DK-1- A B C D	R80	300	12	12	4,00	40	7,8 8,8 11,7 7,2	8,9	3,3 3,7 4,8 3,0	3,7	3,9 4,4 5,9 3,6	3,9 4,4 5,9 3,6	II II II I+II	4,1 3,2 2,8 3,8	3,5
DK-2- A B C D	G50	300	12	12	4,00	31	15,2 15,9 12,8 16,0	15,0	6,3 6,6 5,3 6,7	6,3	7,6 8,0 6,4 8,0	7,6 8,0 6,4 8,0	II II II II	1,9 1,8 2,1 1,8	1,9
DK-3- A B C D	G70	300	12	12	4,00	37	16,6 16,4 18,8 18,4	17,6	6,9 6,8 7,8 7,7	7,3	8,3 8,2 9,4 9,2	8,3 8,2 9,4 9,2	II II II II	1,2 1,2 1,2 1,3	1,2
DK-4- A B C D	G90	300	12	12	4,00	43	34,4 35,8 38,4 35,1	36,0	14,3 14,9 16,0 14,6	15,0	17,2 17,9 19,2 17,6	17,2 17,9 19,2 17,6	II II II II	0,9 0,9 0,9 0,9	0,9
DK-5- A B C D	R100	300	12	12	4,00	46	6,8 5,4 8,1 6,5	6,7	2,8 2,3 3,4 2,7	2,8	3,4 2,7 4,1 3,3	3,4 2,7 4,1 3,3	II I+II II II	3,5 3,8 3,6 3,0	3,5
DK-6- A B C D	R120	300	12	12	4,00	52	17,8 17,0 13,0 9,1	14,2	7,4 7,1 5,4 3,8	5,9	8,9 8,5 6,5 4,6	8,9 8,5 6,5 4,6	I+II II II II	1,5 1,4 1,7 1,6	1,5
DK-7- A B C D	G50	200	12	12	4,00	26	15,3 12,5 11,0 11,0	12,5	6,4 5,2 4,6 4,6	5,2	7,7 6,3 5,5 5,5	7,7 6,3 5,5 5,5	II II I+II II	2,8 2,9 2,8 3,0	2,9
DK-8- A B C D	G50	400	12	12	4,00	36	9,4 9,8 9,7 9,5	9,6	3,9 4,1 4,0 4,0	4,0	4,7 4,9 4,9 4,8	4,7 4,9 4,9 4,8	II I+II II II	1,5 1,5 1,5 1,5	1,5
DK-9- A B C D	G50	300	16	16	4,00	34	12,9 13,6 13,9 10,2	12,7	5,4 5,7 5,8 4,3	5,3	6,5 6,8 7,0 5,1	6,5 6,8 7,0 5,1	II II II II	1,9 1,8 2,0 1,8	1,9
DK-10- A B C D	G50	300	16	12	4,00	36	12,1 10,0 13,0 14,0	12,3	5,0 4,2 5,4 5,8	5,1	6,1 5,0 6,5 7,0	6,1 5,0 6,5 7,0	II II II II	2,1 2,0 1,9 1,9	2,0
DK-11- A B C D	G50	300	12	12	2,67	31	4,2 7,0 6,3 7,6	6,3	2,6 4,4 3,9 4,7	3,9	1,4 2,3 2,1 2,5	2,1 3,5 3,2 3,8	II II II II	1,0 1,0 0,9 0,9	0,9
DK-12- A B C D	R80	300	12	12	2,67	40	8,4 9,3 8,6 8,0	8,6	5,2 5,8 5,4 5,0	5,4	2,8 3,1 2,9 2,7	4,2 4,7 4,3 4,0	II II II II	1,7 1,6 1,4 1,4	1,5
DK-13- A B C D	G50	300	12	12	4,00	31	9,0 12,2 16,8 11,0	12,3	3,8 5,1 7,0 4,6	5,1	4,5 6,1 8,4 5,5	4,5 6,1 8,4 5,5	II II II II	2,0 2,0 1,8 1,9	1,9
DK-14- A B C D	R80	300	12	12	4,00	40	9,0 9,2 9,1 9,3	9,2	3,8 3,8 3,8 3,9	3,8	4,5 4,6 4,6 4,7	4,5 4,6 4,6 4,7	II II II II	3,6 3,3 3,5 3,0	3,3
DK-15- A B C D	G50	300	12	12	4,00	31	16,6 12,2 11,4 20,5	15,2	6,9 5,1 4,8 8,5	6,3	8,3 6,1 5,7 10,3	8,3 6,1 5,7 10,3	II II I+II II	2,0 2,1 1,9 1,5	1,9
DK-16- A B C D	R80	300	12	12	4,00	40	8,1 7,8 10,4 7,4	8,4	3,4 3,1 4,3 3,1	3,5	4,1 3,9 5,2 3,7	4,1 3,9 5,2 3,7	II II II I+II	3,5 3,5 3,2 3,1	3,3

Tabel 3.1:

Oversigt over resultater af korttidsbøjningsforsøg
(20°C - 65%RF).

Vurdering

I det følgende er givet en kort vurdering af de enkelte forsøgsserier og i enkelte tilfælde er resultaterne præsenteret grafisk i henhold til de forskellige faktoreres indflydelse på elementernes styrke og stivhed.

Serie 1: Variation af kernemateriale (mineraluldtype)

Mineraluldens og limforbindelsens forskydningsstyrke har vist sig at være en afgørende parameter for elementernes bæreevne, ligesom mineraluldens forskydningsstivhed (G-modul) har afgørende indflydelse på elementernes udbøjning.

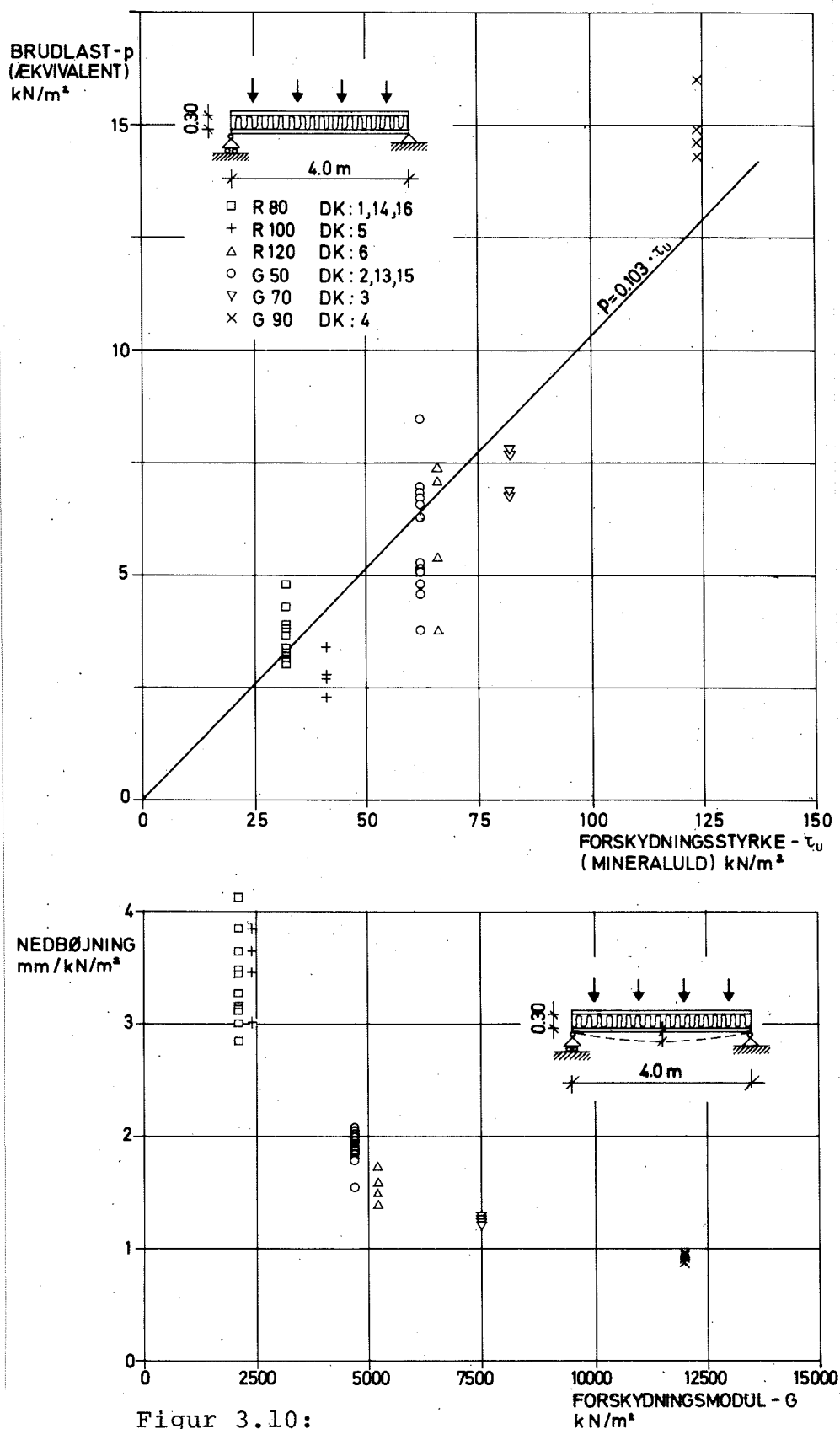
På figur 3.10 øverst er elementernes bæreevne (udtrykt ved den ækvivalente fladelast) afbildet som funktion af mineraluldens forskydningsstyrke (se litt. [1]), og nederst er afbildet elementernes udbøjning (udtrykt ved arbejdsliniernes hældning) som funktion af mineraluldens forskydningsstivhed (se litt. [1]).

Trods meget store spredninger på elementernes bæreevne viser forsøgsresultaterne dog en tilnærmelsesvis retlinet sammenhæng med mineraluldens forskydningsstyrke.

De store spredninger må primært ses på baggrund af de generelt set meget store variationer i limningens kvalitet og dermed limforbindelsens forskydningsstyrke (se eksempler i kapitel 6). Hertil kommer variationen i forskydningsstyrken for de 6 undersøgte mineraluldtyper, der viste sig at ligge omkring ca. 20% (variationskoefficient).

Den indlagte rette linie, fremkommet ved lineær regression, udtrykker sammenhængen mellem bæreevnen og mineraluldens forskydningsstyrke med samtidig hensyntagen til de svækkelser, der optræder i limforbindelsen.

Elementernes nedbøjning udtrykt ved arbejdsliniernes hældning i det tilnærmelsesvis retlignede område viser en aftagende udbøjning med voksende forskydningsstivhed (G-modul). For de svage kernematerialer (lille G-modul) vil forskydningsdeformationerne give et væsentligt bidrag til elementernes samlede udbøjning.



Figur 3.10:

Mineraluldens indflydelse på elementernes styrke og stivhed.

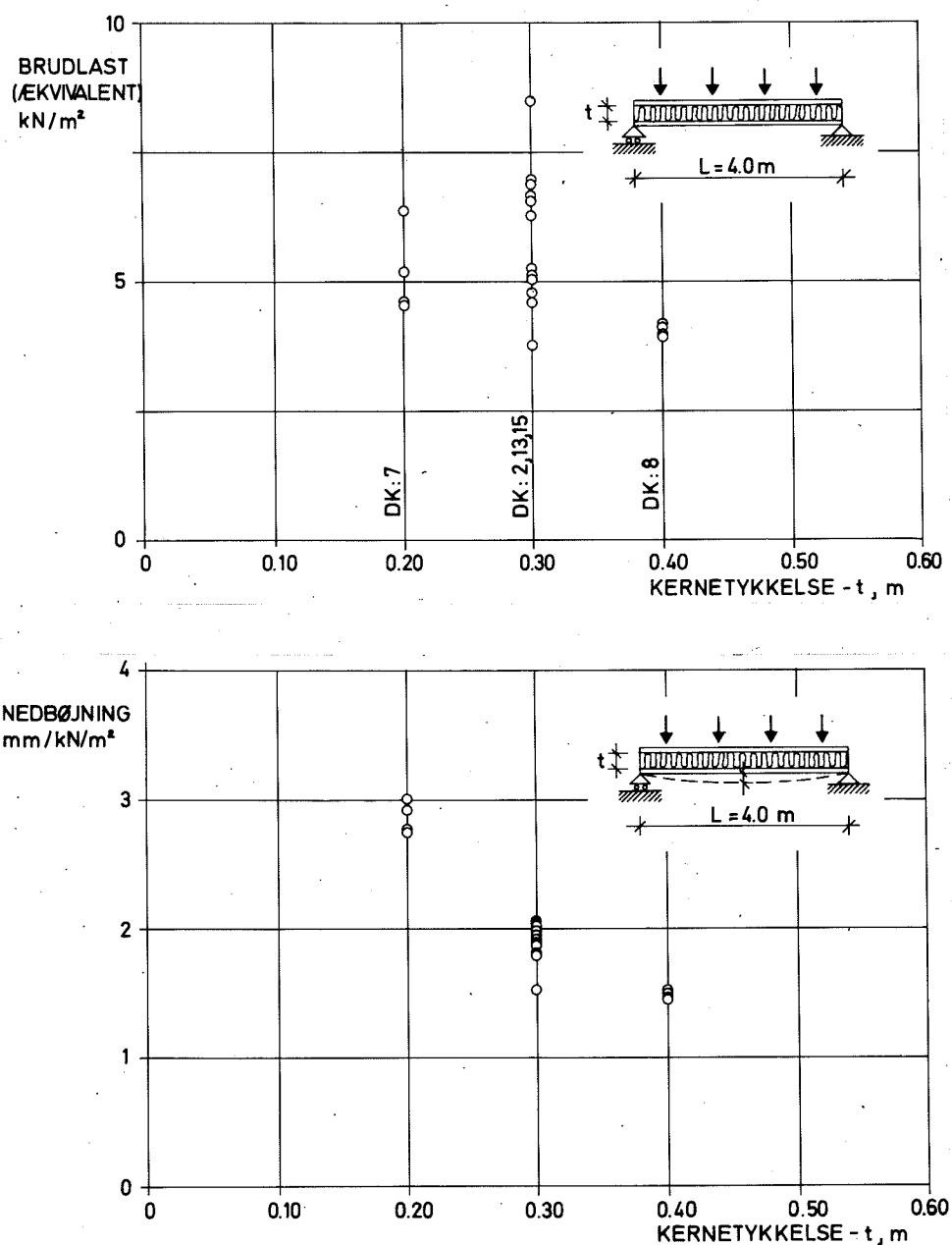
Materialeparametrene for mineralulden er hentet fra litt. [1].

For de store forskydningsstivheder (G-moduler) er forskydningsdeformationerne små og udbøjningen primært bestemt af bøjningsdeformationerne.

De målte udbøjninger viser relativt små spredninger, og det må derfor formodes, at eventuelle svækkelser i limforbindelsen kun har beskednen indflydelse på deformationerne.

Serie 2: Variation af kernetykkelse

Elementernes kernetykkelse har især betydning for forskydningsspændingerne i kernen, således at en forøgelse af kernetykkelsen reducerer forskydningsspændingernes størrelse ved en given last.



Figur 3.11:

Kernetykkelsens indflydelse på elementernes styrke/stivhed.

Desuden har kernetykkelsen betydning for elementernes bøjningsstivhed, der vokser med elementtykkelsen.

På figur 3.11 er dels afbildet de fundne bæreevner, dels de målte udbøjninger som funktion af kernetykkelsen.

Hvis bæreevnen er bestemt af forskydningsstyrken i mineralulden og limforbindelsen (jvf. serie 1), skulle restbæreevnen vokse med voksende kernetykkelse, hvad der ikke just afspejler sig i bæreevnen af elementerne med kernetykkelse 400 mm.

Forholdet kan skyldes de omtalte variationer i limforbindelsens kvalitet (forskydningsstyrke), men da spredningen på bæreevnen af netop de 4 forsøg med kernetykkelse 400 mm er usædvanlig lille, er der givet vis andre faktorer, der spiller ind. Herunder kan bl.a. nævnes, at den store kernetykkelse medfører større lokale sammentrykninger under koncentrerede belastninger og øger dermed risikoen for lokale foldningsbrud (træk-/trykbrud i mineraluld). Samtidig kan nævnes, at stødene af mineraluldlamellerne ved de store kernetykkelser betyder en væsentlig større svækkelse af kernens forskydningsstyrke, idet der i disse stød ikke kan overføres forskydningskræfter. Lamelstødene burde således nok være anbragt i snit med mindre forskydningskræfter (ind mod midten).

Derimod viser nedbøjningernes afhængighed af kernetykkelsen (figur 3.9 nederst) et forventet aftagende forløb.

Serie 3: Variation af flangetykkelse (flangestivhed)

Så længe bæreevnen er bestemt af mineraluldens og limforbindelsens forskydningsstyrker, har flangetykkelsen ingen indflydelse på elementernes bæreevner, hvad forsøgsresultaterne af varianterne DK-2, DK-9 og DK-10 klart bekræfter.

Derimod afspejler forsøgsresultaterne en svag tendens til, at den forøgede flangetykkelse giver mindre udbøjninger, hvad der også skulle forventes med stigende bøjningsstivhed. Den større tykkelse ændrer dog ikke på bidraget fra forskydningsdeformationerne.

I sandwichkonstruktioner med "svage" kerner har flangernes tykkelse primært betydning for fordelingen af koncentrerede belastninger, idet de valgte flanger langt fra kan udnyttes fuldt ud rent styrkemæssigt.

Serie 4: Variation af spændvidde

Ændringen af spændvidden fra 4,00 m til 2,67 m (forhold 3:2) medfører, at forskydningskraften, svarende til samme bøjende moment, forøges med faktoren $3/2$.

Så længe flangerne kan modstå normalspændingerne, er bæreevnen bestemt af forskydningsstyrken i mineralulden og limforbindelsen og dermed af den maksimale forskydningskraft. Det skulle således forventes, at varianterne DK-11 og DK-12 med spændvidder 2,67 m ville bryde ved belastninger, der giver samme maksimale forskydningskræfter, som de tilsvarende elementer DK-2 og DK-1 med spændvidder på 4,0 m.

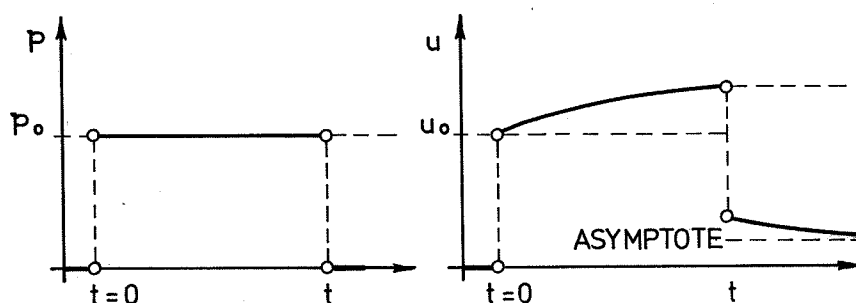
Elementerne DK-1 og DK-12 med mineraluldkerne R80 viser fin overensstemmelse, mens DK-11-elementerne med mineraluldkerne G50 brød ved væsentlig lavere forskydningskræfter end DK-2-elementerne.

En efterfølgende adskillelse af DK-11-elementerne viste usædvanlig dårlige limforbindelser (se kapitel 6), således at afvigelserne med rimelighed kan tilskrives svækkelserne i limforbindelsen.

4. LANGTIDSFORSØG (KRYBEEGENSKABER)

Kernelaget i et sandwichelement, mineralulden, vil under indvirkning af vedvarende belastning udvise krybetendenser, d.v.s. dets deformationer vil under konstant blivende belastning (spænding) forøges med tiden.

Krydsfinéren i flangerne har samme tendens, men krybningen i krydsfinéren er meget lille i forhold til krybningen i mineralulden. Fænomenet krybning er illustreret på figur 4.1.



Figur 4.1:

Illustration af begrebet krybning.

Til venstre: Belastning ($p_0 = \text{konstant}$)

Til højre : Nedbøjning (tidsafhængig)

Hvis en belastning (spænding) påføres sandwichelementet til tiden $t = 0$ og holdes konstant, vil nedbøjningen forøges med tiden (med aftagende hastighed) afhængigt af den påførte spændings størrelse.

Hvis den konstante belastning fjernes helt eller delvis, vil nedbøjningen aftage som funktion af tiden og kun delvis vende tilbage til udgangstilstanden (se figur 4.1).

Krybningen, φ , udtrykkes sædvanligvis ved den relative tilvækst i maksimalnedbøjningen som:

$$\varphi = \frac{u(t) - u_0}{u_0}$$

hvor $u(t)$ er nedbøjningen til tiden, t , og u_0 er initialnedbøjningen til tiden, $t = 0$.

Krybeforløbet er influeret af en lang række parametre, som vanskeliggør valget af frie parametre i den eksperimentelle undersøgelse.

De influerende parametre og deres respektive deformationsandele optræder samtidig, og det er derfor ikke muligt i samme forsøgselement at iagttage parametrene uafhængigt af hinanden.

En af de parametre, der givet vis influerer på krybeforløbet, er fugt- og temperaturforholdene. Øget temperatur, fugtniveau og variationer af disse vil sandsynligvis forøge krybningen.

Da undersøgelsen primært drejer sig om den lastafhængige krybning, er fugt- og temperaturvariationernes indflydelse elimineret ved at køre forsøgene under et konstant rumklima.

Klimabetingelser

Forsøgene blev udført i et klimakammer med en temperatur på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og en relativ fugtighed på $65\% \pm 3\%$.

Desuden var elementerne konditioneret i dette rumklima ca. 1 måned inden forsøgsstarten.

Det valgte temperatur-/fugtniveau svarer til den øvre grænse i klimaklasse I (se f.eks. litt. [4]).

Forsøgsparmetre

I de udførte forsøg er krybningen undersøgt på elementer med forskellige kernematerialer (mineraluldtyper) og for forskellige typer belastning, dels statisk last, dels statisk last overlejret af en vekslende belastning (se oversigt i kapitel 2). I forsøg med statisk last er valgt to forskellige belastningsniveauer svarende til en karakteristisk belastning på tagkonstruktioner, henholdsvis en karakteristisk belastning på gulvkonstruktioner. De resulterende belastninger er sammensat af følgende bidrag:

Tagbelastning:

Egenlast	$g \text{ kN/m}^2$
Nyttelast (beklædninger)	$0,25 \text{ kN/m}^2$
Naturlast (sne)	$0,75 \text{ kN/m}^2$
$\Sigma = g + 1,00 \text{ kN/m}^2$	

Gulvbelastning:

Egenlast	g kN/m ²
Nyttelast:	
Personer + inventar	1,50 kN/m ²
Lette skille vægge	0,50 kN/m ²
Slidlag	0,20 kN/m ²
$\Sigma = g + 2,20 \text{ kN/m}^2$	

Endelig er udført forsøg med vekslende belastning svarende til den karakteristiske belastning på tagkonstruktioner, idet snebelastningen (naturlasten) påføres som en vekslende belastning efter følgende cyclus:

7 uger: $g + 0,25 \text{ kN/m}^2$
 1 uge : $g + 1,00 \text{ kN/m}^2$

Samtlige forsøg har kørt over en periode på 1 år.

4.1 Analytisk beskrivelse af krybeforløb

I relation til den praktiske anvendelse af mineraluldbaserede sandwichelementer er en rent beskrivende fremstilling af krybeforløbet ikke tilfredsstillende.

På grund af den begrænsede tid til de eksperimentelle undersøgelser er det ikke muligt at få et billede af deformationerne over en periode svarende til konstruktions brugsperiode (levetid), og det er således nødvendigt ud fra analytiske modeller at ekstrapolere ud over det eksperimentelle tidsforløb.

I praksis er det næppe nødvendigt at behandle langtidseffekter med særlig stor nøjagtighed, især ikke da langtidslasten vanskeligt lader sig definere særlig præcist.

I den teoretiske behandling er det derfor rimeligt at ignorere de tidshistoriske effekter og simpelt hen behandle krybemoduler som tidsafhængige elasticitetsmoduler.

Dette muliggør, at almindelige lineærelastiske løsninger kan bruges blot ved at erstatte de gængse elasticitetsmoduler med de tidsafhængige moduler.

I relation hertil er der udført langtidsforsøg med mineralulden påvirket til forskydning. Forsøgene, der er detaljeret beskrevet i litt. [1], tager således sigte mod bestemmelse af den tidsafhængige forskydningsmodul (G-modul) som den afgørende parameter for elementernes krybning.

Den teoretiske koordinering af de her omtalte forsøg og de rene materialeprøvnin-
ger vil fremgå af min licentiatafhandling.

Krybefunktion

Til de foreliggende forsøg er krybeforløbet analytisk beskrevet ved hjælp af en krybefunktion: $\varphi = \varphi(t)$, hvor φ er en funktion af tiden.

Som krybefunktion er anvendt en hyperbelfunktion af typen:

$$\varphi(t) = \frac{t}{\alpha + \beta t}$$

hvor α og β er empiriske konstanter. Funktionen opfylder følgende betingelser:

- a) $\varphi(0) = 0$, d.v.s. når lasten påføres, er krybningen lig nul.
- b) $\frac{d\varphi}{dt} > 0$, d.v.s. funktionen er monotont voksende.
- c) $\frac{d^2\varphi}{dt^2} < 0$, d.v.s. krybehastigheden aftager kontinuerligt, og der optræder ikke vendepunkter i kurvens forløb. Dette betyder samtidig en forudsætning om, at alle de faktorer, der influerer på krybningen, langsomt dør hen.

Endelig bemærkes, at krybefunktionen går imod en endelig værdi for tiden gående mod uendelig. Grænseværdien (asymptoten) er givet ved:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = \varphi_{\infty} = \frac{1}{\beta}$$

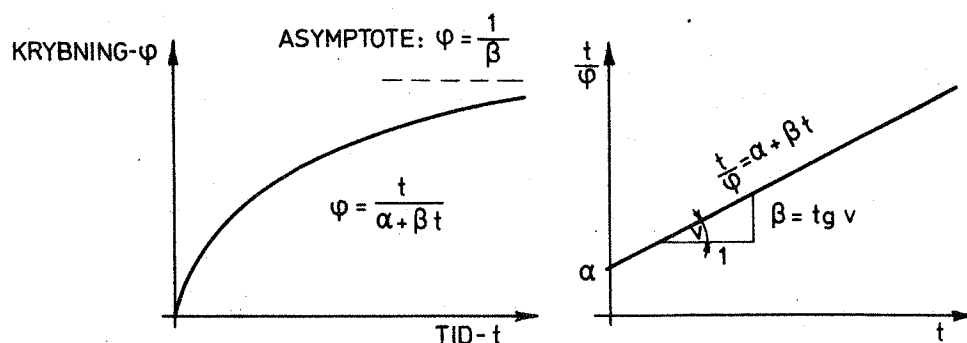
Det sidste punkt, der selvfølgelig ikke eksperimentelt lader sig bestemme på grund af den begrænsede tid, medfører en udelukkelse af den ellers nødvendige vurdering af konstruktionens brugsperiode (levetid).

Den valgte krybefunktion tilpasses forsøgsresultaterne ved en simpel transformation til udtrykket:

$$\frac{t}{\varphi} = \alpha + \beta t$$

der i et $t, \frac{t}{\varphi}$ -kordinatsystem udtrykker en ret linie med hældning, β , og skæring med ordinataksen, $\frac{t}{\varphi}$ -aksen, i punktet $(0, \alpha)$.

Parametrene α og β kan altså efter denne transformation bestemmes ved en lineær regression. Se princip i figur 4.2.



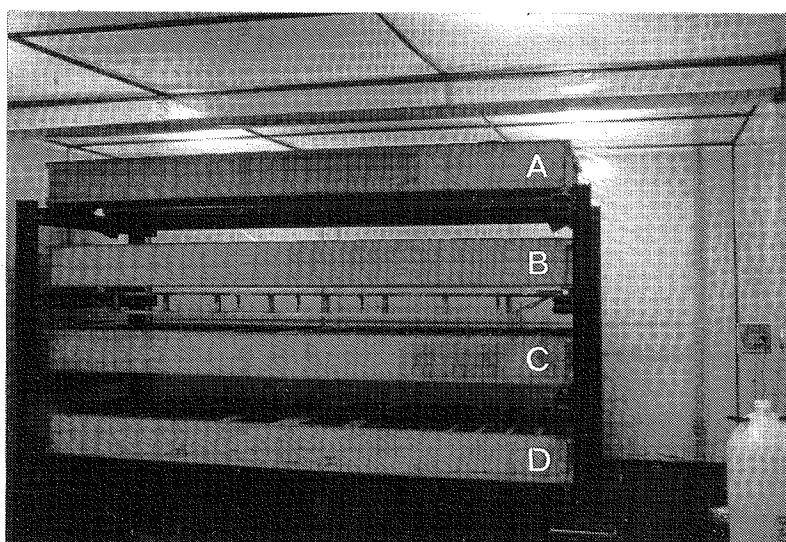
Figur 4.2:

Krybefunktion og princip ved bestemmelse af parametrene α og β .

De fundne krybefunktioner er angivet i afsnit 4.4 sammen med øvrige forsøgsresultater.

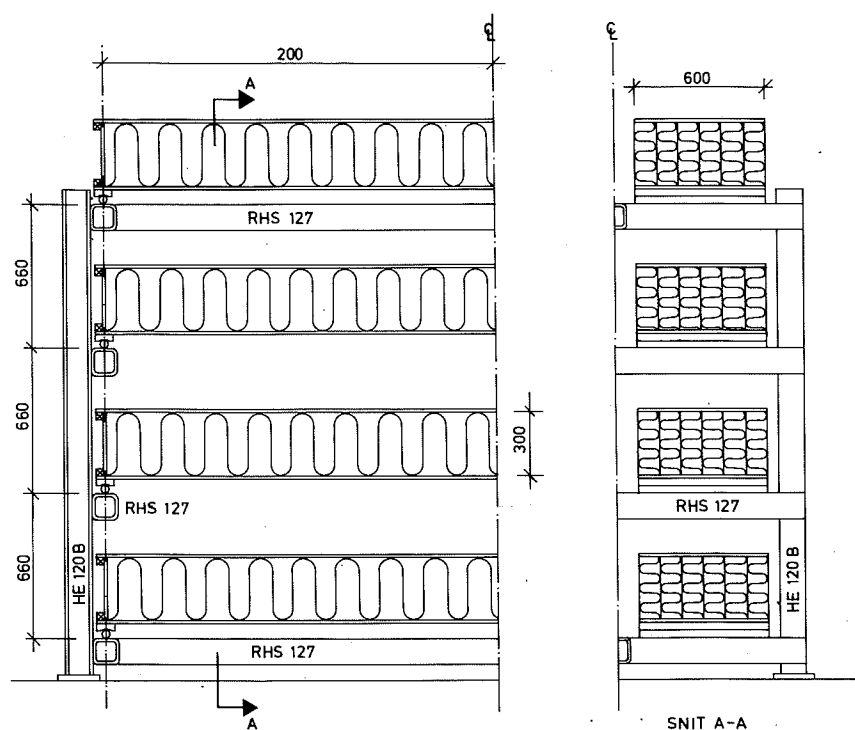
4.2 Forsøgsopstilling

De 32 forsøgselementer beskrevet i kapitel 2 blev oplagt på specielt udformede stålreoler i fire niveauer svarende til sammenhørende varianter A, B, C og D (se figur 4.3).



Figur 4.3:

Forsøgsopstilling til langtidsforsøg. 4 m lange forsøgselementer oplagt på stålreol (før lastpåføring).



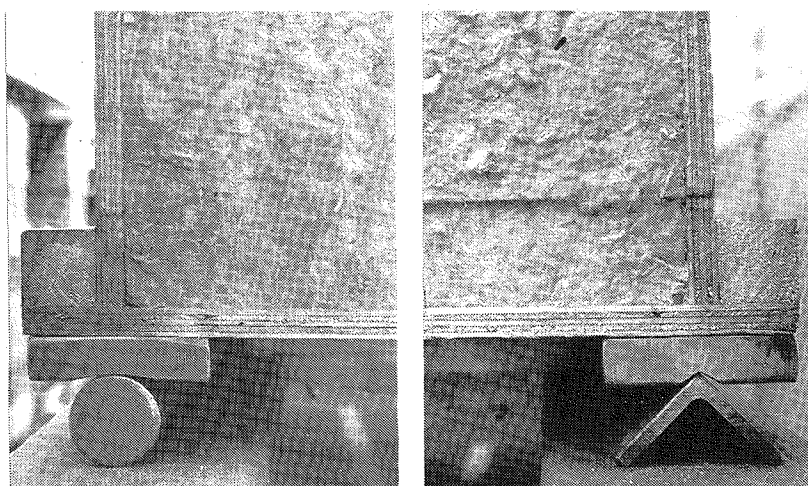
Figur 4.4:

Princip i opbygning af stålreoler til langtidsforsøg.

Reolerne blev anbragt i klimakammer med konstant rumklima $20^{\circ}\text{C}/65\%\text{RF}$. Rumklimaet blev løbende kontrolleret ved hjælp af termohygrograf.

Understøtninger

Forsøgselementerne var simpelt understøttet langs endeskottene, som vist på figur 4.5. For etablering af henholdsvis en "simpel bevægelig understøtning" og en "simpel fast understøtning" blev elementerne forsynet med specielt udformede trykfordelende stålplader under endeskottene.

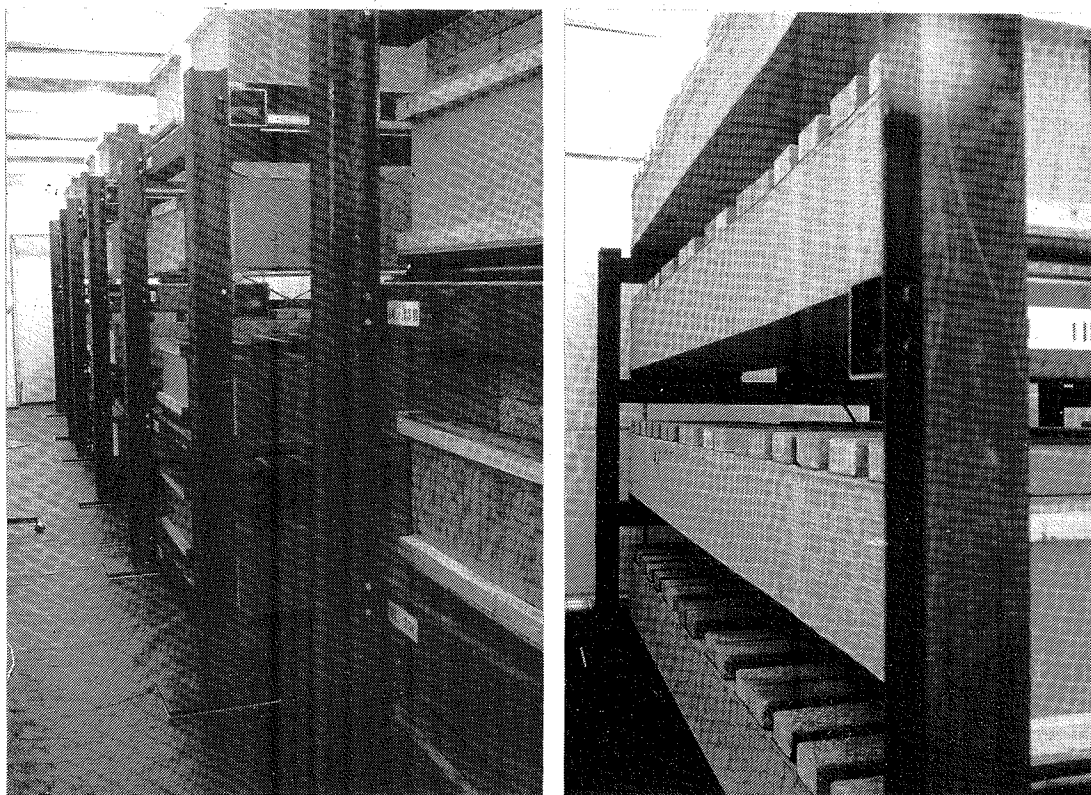


Figur 4.5:

Understøtningsdetaljer for langtidsforsøgselementer.

Til venstre: Simpel bevægelig understøtning.

Til højre : Simpel fast understøtning.



Figur 4.6:

Forsøgsopstilling og belastningsarrangement.

Belastnings- arrangement

Elementerne blev belastet ved hjælp af betonklodser som vist på figur 4.6.

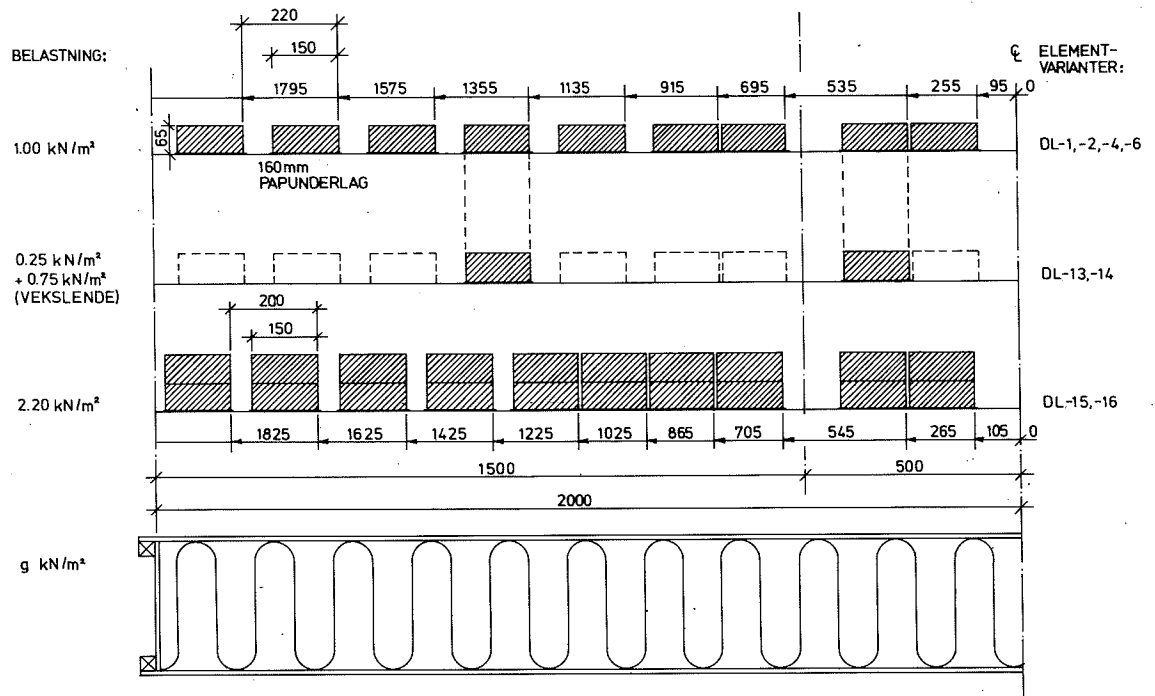
Betonklodserne havde dimensionen $65 \times 150 \times 300$ mm og en egenvægt på $6,5 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$. Vægten blev stikprøvekontrolleret.

Samtlige betonklodser var inden forsøgsstarten konditioneret ved $20^\circ\text{C}/65\%\text{RF}$ i ca. 1 måned.

De forskellige belastningsniveauer blev etableret ved dels at afpasse klodsernes indbyrdes afstand, dels ved at anbringe dem i 2 niveauer (se figur 4.7).

Den vekslende last på elementerne DL-13 A, B, C og D samt DL-14A, B, C og D blev etableret ved pålægning af, henholdsvis af-
tagning af bestemte klodser (på figur 4.7 vist stiplet).

For at hindre eventuelt udtræk fra betonen i at påvirke krydsfinérflangerne blev der under hver betonklods indskudt et tyndt lag tagpap (egenvægt ca. 2 kg/m^2).



Figur 4.7:

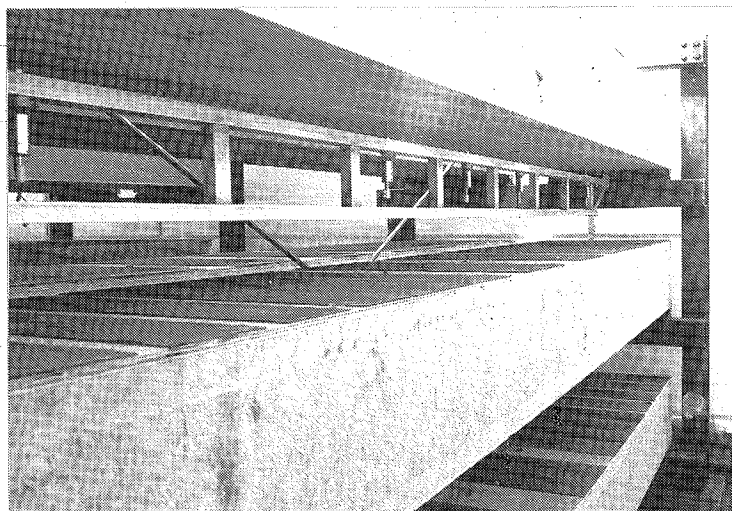
Belastningsarrangementet ved langtidsforsøg. På midten henholdsvis 500 mm fra midten er betonklodserne skubbet sammen for at etablere den nødvendige plads til måleudstyret.

4.3 Målinger

I forsøgsperioden blev løbende foretaget målinger af nedbøjninger, tykkelsesændringer og flangetøjninger..

Nedbøjningsmålinger

Elementernes nedbøjning blev målt i elementernes midterlinje i 5 punkter på elementernes underside, placeret som vist på bilag 17.



Figur 4.8:

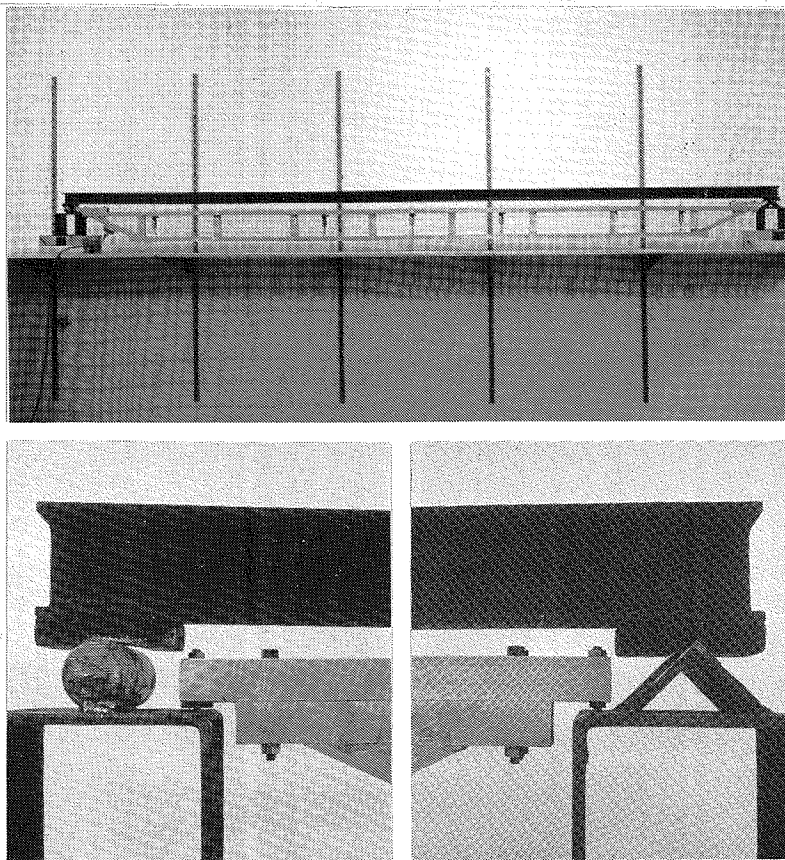
Målebro anbragt under et forsøgselement.

Målingerne blev udført ved hjælp af en transportabel letmetal-målebro med påmonterede elektriske flytningstransducere (5 stk.) af potentiometertypen.

Målebroen er vist på figur 4.8.

Målebroen blev anbragt under elementerne simpelt understøttet (nær elementernes understøtning) i to punkter på stålreolerne. Stålreolerne var ud for elementernes midterlinje forsynet med ilagte præcisionsstål-kugler (Ø5 mm), og målebroen var forsynet med modsvarende messinglejer i den ene ende med keglestubformet udfræsning og i den anden ende med kileformet udfræsning svarende til henholdsvis en fast simpel understøtning og en bevægelig simpel understøtning.

Ud for hvert målepunkt var elementerne forsynet med en indboret målebrik af messing med veldefineret plan overflade.



Figur 4.9:

Referencebjælke i fast opstilling med målebro anbragt nedenunder. Understøtningsdetaljer af målebro i referenceopstilling svarer helt til forsøgsopstillingen.

Referencebjælke

For at kompensere for eventuelle ændringer ved målebro/flytningstransducere blev fremstillet en referencebjælke af stål, der dels kunne oplægges på reolerne (analogt til forsøgsselementerne), dels anbringes i en fast opstilling, som vist på figur 4.9 med målebroen nedenunder.

Måleprocedure

Inden forsøgsstarten blev elementernes initialudbøjninger bestemt i den ubelastede tilstand med elementerne stillet på sidefladen, således at egenlasten ikke gav noget bidrag. Til denne måling var målebroen forsynet med forlængerstykker for at etablere en understøtning på de på elementerne monterede stålplader centreret over endeskottene.

Nedbøjninger hidrørende fra elementernes egenvægt blev bestemt ved at kombinere denne måling med en måling med referencebjælke på reol og en efterfølgende måling med element oplagt.

Efter oplægning af samtlige elementer blev belastningen påført og initialnedbøjningerne bestemt, hvorefter der blev foretaget løbende målinger med skiftende intensitet afhængigt af deformationshastigheden.

Måleusikkerhed

For at undgå store fejl er hver måling dubleret to gange, således at målebroen løftes af efter 2 scan, og proceduren gentages.

Middelværdien af de fire aflæsninger er desuden kompenseret ud fra den tilhørende måling og til referencebjælken i den faste opstilling.

Måleusikkerheden på de anvendte flytningstransducere er ca. 0,02 mm, men ved ophobning af de uundgåelige tilfældige fejl er usikkerheden ca. 0,1 mm.

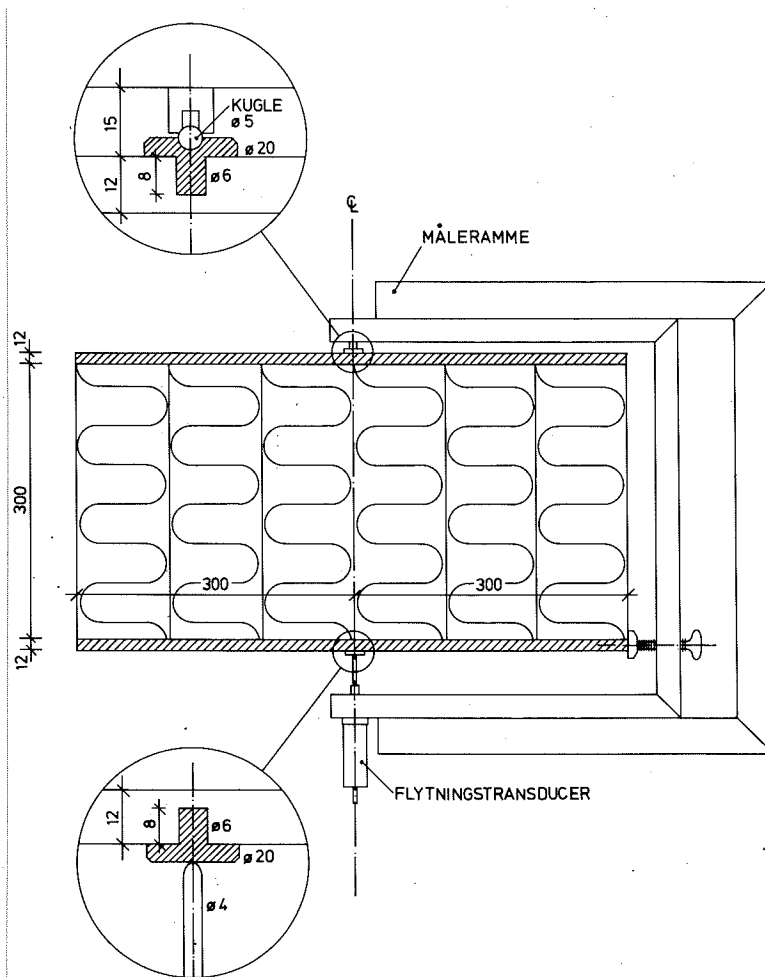
Dataregistrering

Registreringen af flytningstransducernes visning skete automatisk ved hjælp af en datalogger samt en skrive- og hulleenhed (teletype).

Måling af tykkelsesændringer

For at registrere eventuelle sammentrykninger af kernen målt tykkelsesvariationen løbende i 3 punkter, som vist på bilag 17. Målepunkterne er de samme, som anvendes ved nedbøjningsmålingen (3 midterste), og målingen kan derfor sammen med nedbøjningsmålingen indirekte anvendes til bestemmelse af elementernes krumning på over- og underside. Til målingen anvendtes en letmetal-måleramme (se figur 4.10), der kunne gabe

over elementernes totaltykkelse på ca. 325 mm. Målerammen hviler på elementernes overside på en $\varnothing 5$ mm præcisionsstål-kugle anbragt i en i flangen indboret messing-målebrik (se figur 4.10).



Figur 4.10:

Letmetal-måleramme til tykkelsesmålinger med detalje af messing-målebrikker.

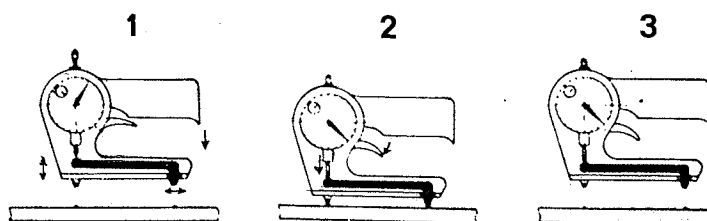
Forneden er rammen forsynet med en tvær-understøtning, der hviler på kanten af underflangen, og en flytningstransducer, der måler til messingbrikkerne på elementernes underside. Som referencetykkelse anvendes en ca. 325 mm lang messingstang ($\varnothing 20$ mm).

Måling af flangetøjninger

Flangetøjningerne hidrørende fra de bøjende momenter blev målt på krydsfinérens overflade i elementernes midtersnit (max.moment) på henholdsvis overside og underside (se bilag 17).

Tøjningsmålingerne giver indirekte udtryk for normalspændingerne i flangerne samt elementernes krumning i midtersnittet. Må-

lingen blev udført ved hjælp af en Pfender-måler med en målestrækning på 100 mm (se figur 4.11).



Figur 4.11:

Pfender-måler til måling af flangetøjninger (målelængde 100 mm). Flangerne er forsynet med messingbrikker med indpressede præcisions-stålkugler, hvori Pfenderens spidser fikseres. Det indbyggede måleur fastholder visningen, når måleren løftes.

På grund af krydsfinérflangernes inhomogeniteter var det ønskeligt med en noget større målestrækning, hvad der ikke umiddelbart kunne praktiseres med det tilgængelige måleudstyr.

På forsøgselementerne er på over- og underside pålimet to messingbrikker med indpressede præcisionsstålkugler ($\phi 1,5$ mm) med en indbyrdes afstand på 100 mm.

Måleusikkerheden på det i pfender-måleren indbyggede måleur udgør ca. 0,001 mm, d.v.s. usikkerheden på tøjningerne er ca. 10^{-5} mm/mm (= 10 mikrostrain).

For kontrol af Pfender-måler og kompensations for små temperatur-/fugtvariationer blev udført tilhørende målinger på en reference af speciel metallegering og en reference af et stykke ubelastet krydsfinér svarende til flangepladerne.

Såvel tykkelsesmålinger som tøjningsmålinger blev foretaget parallelt med nedbøjningsmålinger og således både i elementernes ubelastede og belastede tilstand.

Blivende
deformationer

Efter 1 år blev elementerne aflastet og de blivende deformationer blev registreret.

Efter aflastningen blev kun registreret de momentane elastiske eftervirkninger.

4.4 Forsøgsresultater

Resultaterne af langtidsforsøgene er vist i tabel 4.1.

Til oversigtstabellen skal knyttes følgende kommentarer:

- ad.kolonne 1, 2: Forsøgselementer
 Kernetykkelse: 300 mm
 Flanger: 12 mm Amerikansk krydsfinér, C-D
 (exterior glue)
 Spændvidde: 4,0 m.
- ad.kolonne 3 : Egenlast
 Middelværdier baseret på vejning.
- ad.kolonne 5 : Max.moment: $M = \frac{1}{8} p L^2$ (fra egenlast + påført last)
- ad.kolonne 6 : Max.forskydningskraft:
 $Q = \frac{1}{2} p L$ (fra egenlast + påført last)
- ad.kolonne 10 : Krybning efter 1 år
 Tilvækst i max.nedbøjning i % af initial-nedbøjning.
- ad.kolonne 11 : Blivende nedbøjning efter aflastning for påført last (ikke egenlast).
- ad.kolonne 12,13: Krumning på elementmidte baseret på målte overfladetøjninger. Antages konstant moment på målestrækningen og plan tøjningstilstand, kan krumningen, κ , beregnes af:
- $$\kappa = \frac{\varepsilon_o + \varepsilon_u}{h}$$
- hvor ε_o og ε_u er tøjningerne på henholdsvis overside og underside, og h er afstanden mellem niveauerne for tøjningsmålingerne.
- ad.kolonne 14-19: Krybefunktioner bestemt ud fra målte krybeforløb (jvf. afsnit 4.1) dels for hver enkelt variant, dels for de fire sammenhørende varianter.
- I kolonne 16 og 19 er desuden angivet grænseværdierne for tiden gående mod uendelig, φ_{∞} .
- Krybefunktionerne er ikke angivet for varianterne DL-4, -6, -13 og -14 på grund af en dårlig korrelation til den analytiske model. Årsagen skyldes, at krybningen her er baseret på differensen mellem to små absolutte størrelser, således at måleusikkerheden får meget stor indflydelse.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19		
FORSØGSELEMENT		LANGTIDSLAST				MAX. NEDBØJNING				KRUMNING PÅ MIDTEN										
VARIANT NR.	MINE- RAL- ULD- KERNE	EGEN- LAST kN/m ²	PÅFØRT LAST kN/m ²	M MAX kNm/m	Q MAX kN/m	INITIALNEDBØJN.		NEDBØJ- NING efter 1 år mm	KRYB- NING efter 1 år %	BLIVENDE NEDBØJN. EFTER AFLASTN. mm	INITIAL- KRUMNING 10 ⁻³ m ⁻¹	KRUMNING 1 år 10 ⁻³ m ⁻¹	KRYBEFUNKTION: $\varphi(t) = \frac{t}{\alpha + \beta t}$							
						FRA EGEN- LAST mm	FRA TOTAL- LAST mm						AKTUEL		MIDDEL					
													α	β	$\varphi_{\infty} = \beta^{-1}$ %	α	β	$\varphi_{\infty} = \beta^{-1}$ %		
DL-1	A	0,40	1,00 (statisk)	2,80	2,80	1,54 1,26 1,17 1,20	5,40 4,46 3,89 4,17	6,18 5,08 4,48 5,08	14,4 13,9 15,2 21,8	2,69 2,07 1,92 2,24	0,51 0,47 0,64 0,50	0,69 0,65 0,96 0,74	2,30 1,41 5,26 1,94	0,063 0,067 0,052 0,040	16 15 19 25		2,73	0,055	18	
	B																			
	C																			
	D																			
DL-2	A	0,31	1,00 (statisk)	2,62	2,62	0,67 0,66 0,59 0,62	2,97 2,72 2,58 3,02	3,40 3,01 2,96 3,50	14,5 10,7 14,7 15,9	1,32 1,11 1,20 1,68	0,45 0,55 0,35 0,29	0,63 0,72 0,44 0,59	7,99 13,88 5,22 9,94	0,046 0,050 0,051 0,029	22 20 20 34		9,12	0,044	23	
	B																			
	C																			
	D																			
DL-4	A	0,43	1,00 (statisk)	2,86	2,86	0,41 0,38 0,44 0,39	1,40 1,19 1,36 1,28	1,62 1,44 1,85 1,63	15,7 21,0 36,0 27,3	0,77 0,59 0,75 0,79	0,49 0,45 0,42 0,43	0,60 0,56 0,71 0,62		-	-		-	-		
	B																			
	C																			
	D																			
DL-6	A	0,52	1,00 (statisk)	3,04	3,04	0,73 0,80 0,82 0,69	2,27 2,25 2,30 2,15	2,57 2,62 2,66 2,58	13,2 16,4 15,7 20,0	1,13 1,19 1,84 1,16	0,56 0,50 0,51 0,38	0,75 0,69 0,68 0,53		-	-		-	-		
	B																			
	C																			
	D																			
DL-13	A	0,31	0,25 (statisk) +0,75 (veksl.)	1,12/ 2,62	1,12/ 2,62	0,73 0,78 0,76 0,63	1,39 1,39 1,38 1,24	1,77 1,70 1,70 1,64	27,3 22,3 23,2 32,3	1,23 1,13 1,20 1,11	0,19 0,25 0,23 0,24	0,30 0,35 0,28 0,46		-	-		-	-		
	B																			
	C																			
	D																			
DL-14	A	0,40	0,25 (statisk) +0,75 (veksl.)	1,30/ 2,80	1,30/ 2,80	1,57 1,33 1,66 1,28	2,56 2,10 2,62 2,09	2,95 2,47 3,05 2,64	15,2 17,6 16,4 26,3	2,10 1,74 2,08 1,88	0,42 0,31 0,28 0,34	0,48 0,42 0,39 0,56		-	-		-	-		
	B																			
	C																			
	D																			
DL-15	A	0,31	2,20 (statisk)	5,02	5,02	0,62 0,63 0,59 0,55	4,48 4,57 4,24 3,97	5,28 5,31 4,91 4,75	17,9 15,9 15,8 19,6	1,11 1,15 0,88 0,95	1,12 0,95 0,82 0,86	1,36 1,21 0,95 1,12	2,61 3,84 4,12 5,05	0,051 0,055 0,054 0,039	20 18 19 26		3,91	0,049	20	
	B																			
	C																			
	D																			
DL-16	A	0,40	2,20 (statisk)	5,20	5,20	1,65 1,41 1,25 1,25	10,04 8,49 7,52 7,62	- - 8,84 9,06	- - 17,6 18,9	- - 1,94 2,13	0,93 0,97 0,94 1,08	- - 1,06 1,42	- - 2,33 2,49	- - 0,053 0,46	- - 19 22		2,41	0,049	20	
	B																			
	C																			
	D																			

Tabel 4.1:

Overblik over resultater af langtidsforsøg
(20°C - 65%RF).

Bemærkning:

De tomme kolonner for varianten DL-16-A og -16-B skyldes brud på DL-16-A efter kun 20 dage. Bruddet afstedkom en overpåvirkning af det nedenunder liggende element DL-16-B, der således også måtte udgå.

Bruddet optrådte som forskydningsbrud ved vederlagene analogt til brudtype II beskrevet i kapitel 3.

Bæreevnesvigtet kan skyldes, at DL-16-A blev udsat for uønskede påvirkninger under montagen, idet elementet som det første og eneste blev løftet på plads kun understøttet på midten svarende til en koncentreret last på størrelse med elementets egenvægt.

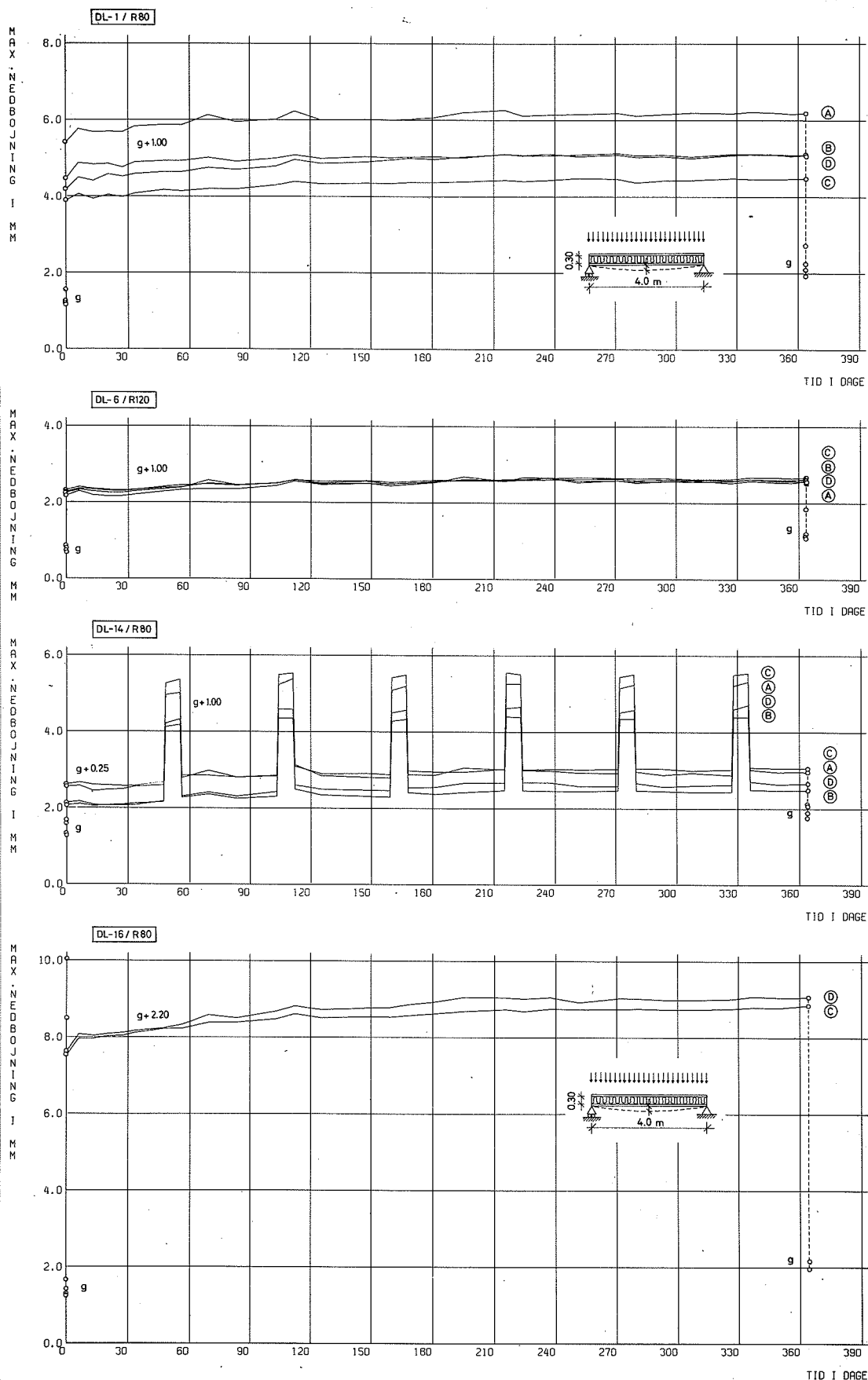
Desuden svarer langtidslasten på denne elementtype til en udnyttelsesgrad på ca. 75% (jvf. korrtidsbæreevne af tilhørende element DK-16-A beskrevet i kapitel 3). Uden svækkelser i limforbindelsen er udnyttelsesgraden beregnet til ca. 50%. Der kan altså også være tale om en overskridelse af mineraluldens/limforbindelsens langtidsstyrke.

En efterfølgende analyse af den anvendte mineraluld viste god overensstemmelse med forventet rumvægt og bindemiddelindhold, men derimod kunne der ved adskillelsen af elementet konstateres store svækkelser i limforbindelsen i elementets ene ende nær vederlaget.

Grafisk præsentation
af forsøgsresultater

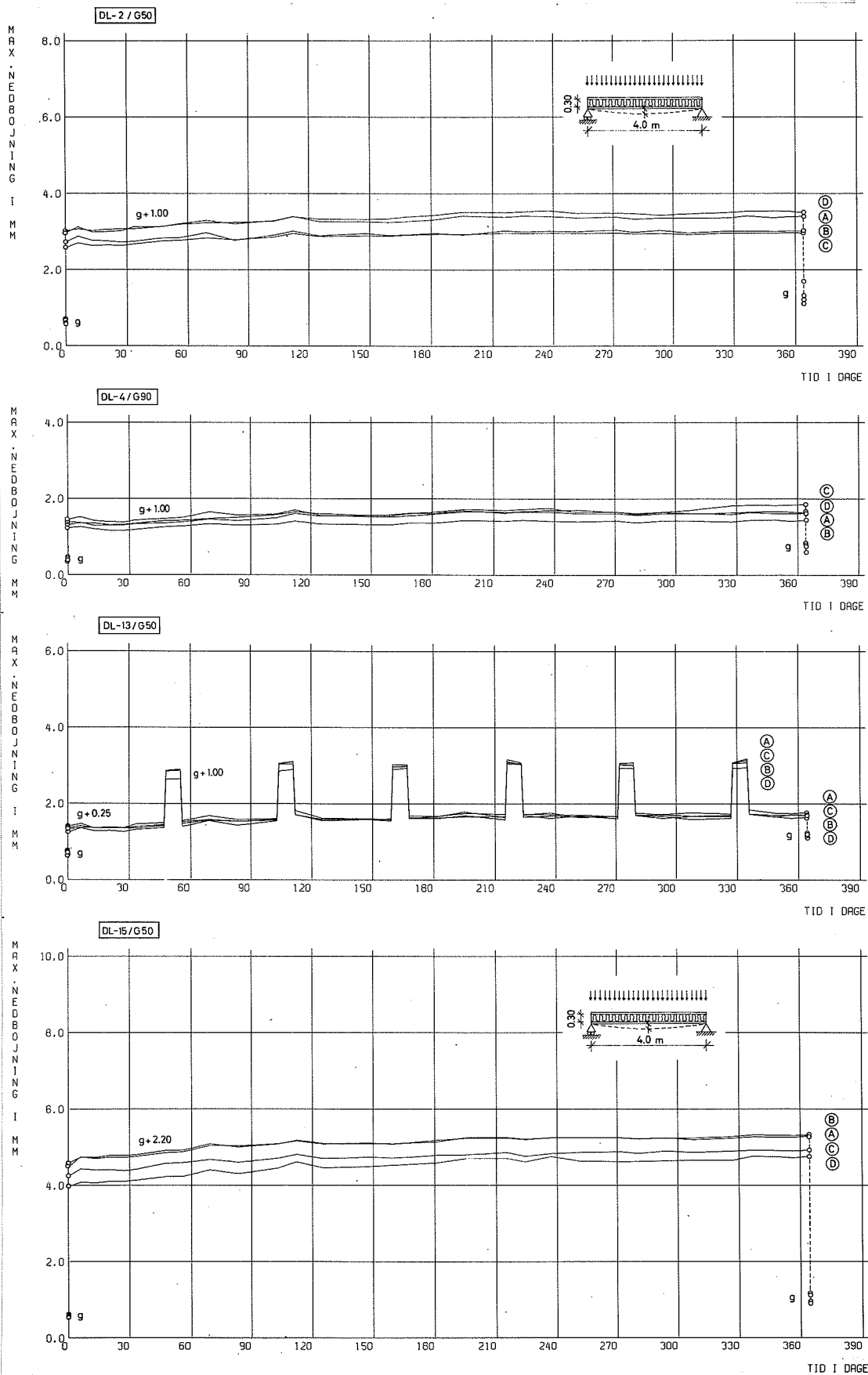
I det følgende er resultaterne af de løbende målinger afbildet grafisk (figurerne 4.12 til 4.18).

I enkelte tilfælde er kun medtaget eksempler fra de udførte målinger, men detailresultater vil være tilgængelige på Instituttets bibliotek.



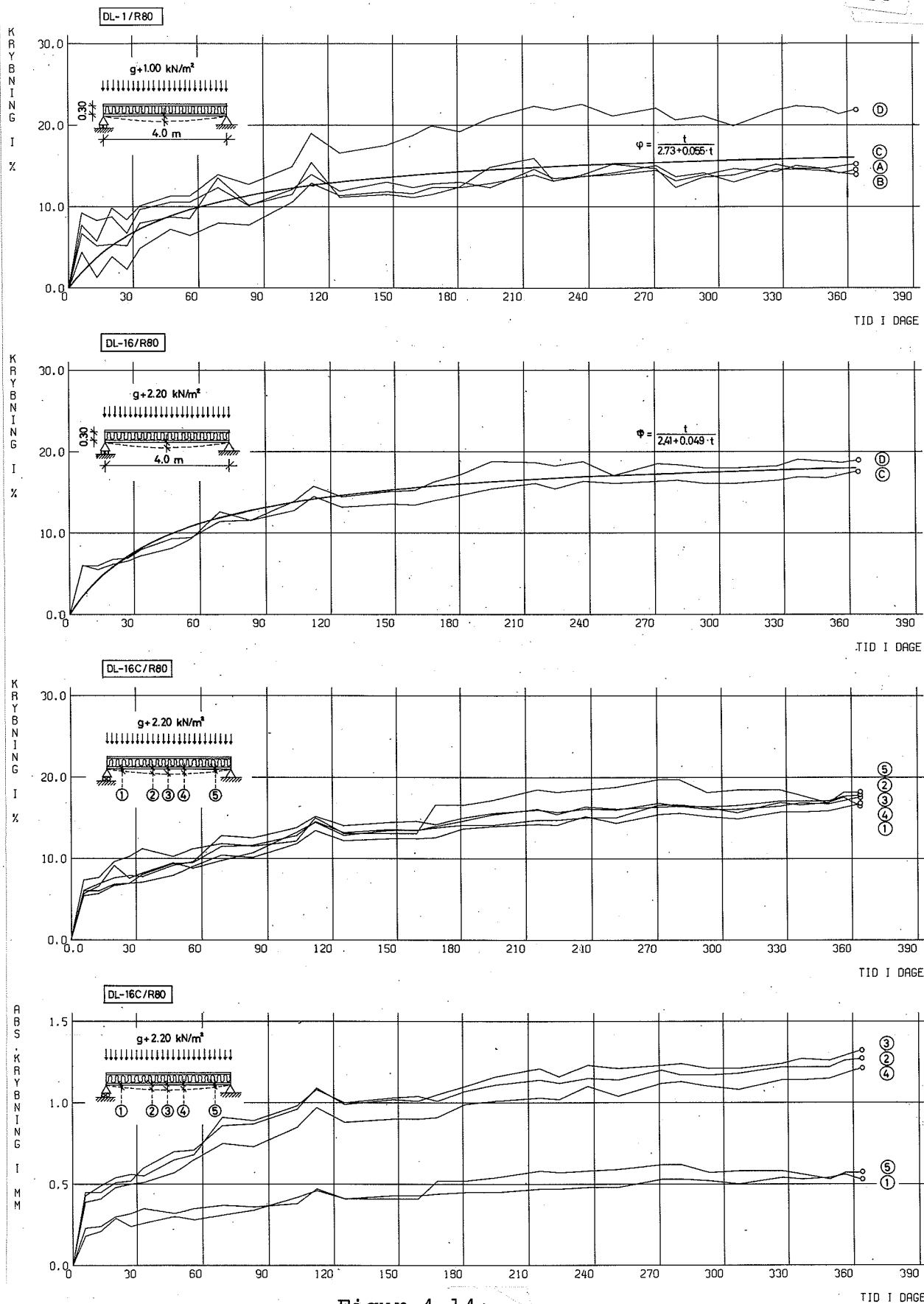
Figur 4.12:

Absolutte maksimalnedbøjninger som funktion af tiden for varianter med kerne af Rockwool.
Vedrørende de manglende varianter A og B for DL-16/R80 henvises til bemærkning side 41.



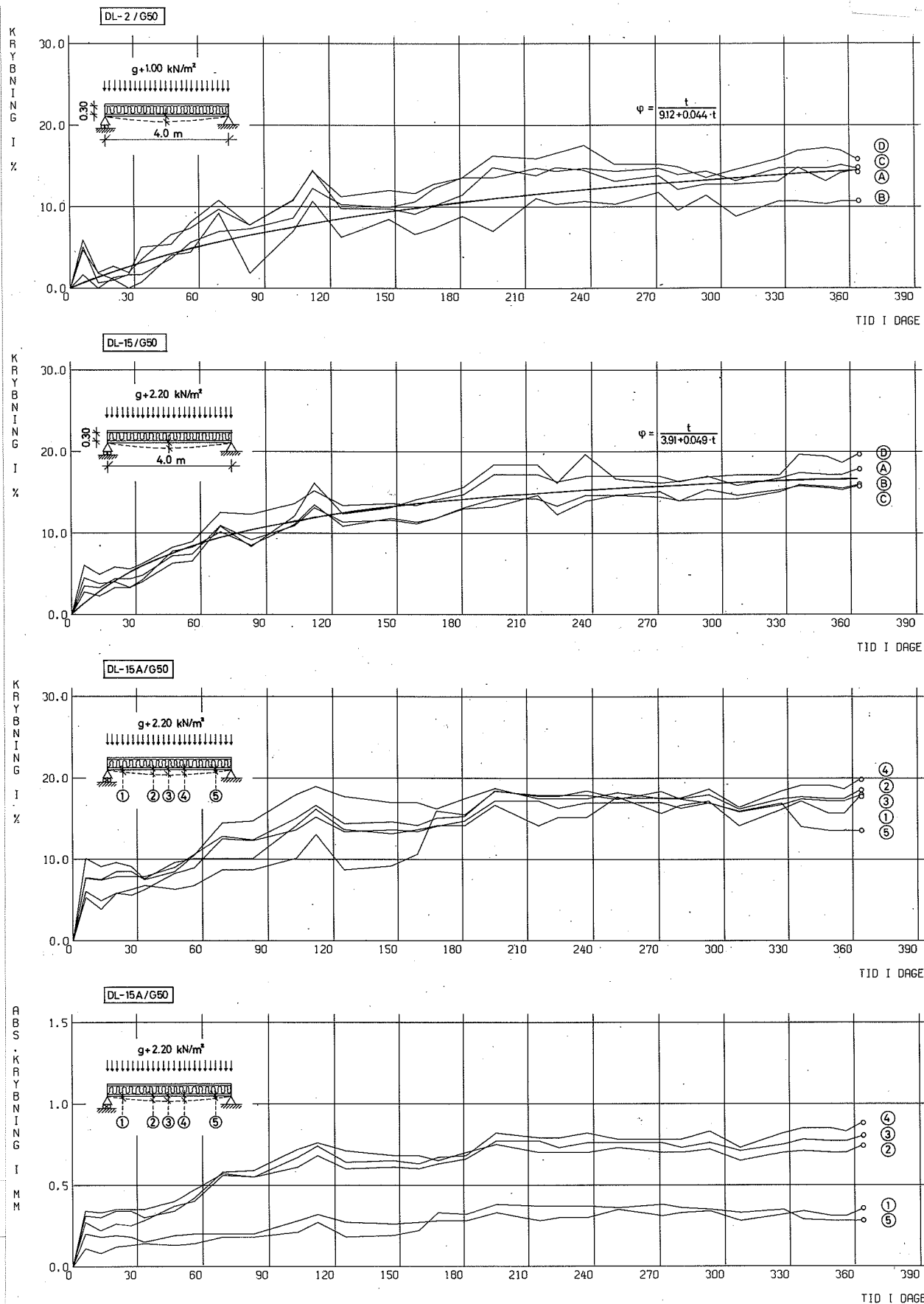
Figur 4.13:

Absolutte maksimalnedbøjninger som funktion af tiden for varianter med kerne af Glasuld.



Figur 4.14:

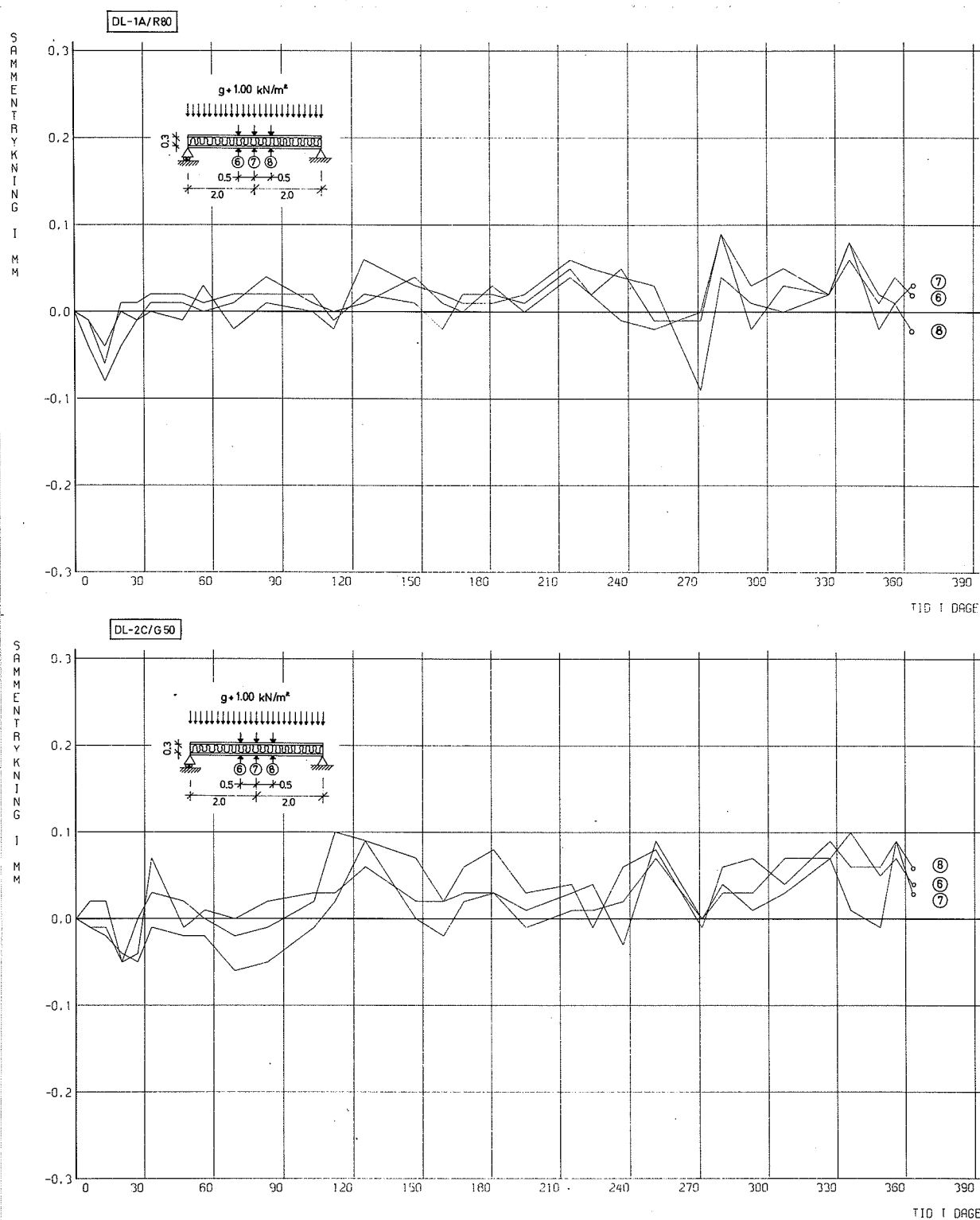
Krybeforløb for Rockwool-elementerne DL-1 og DL-16 med langtidslast henholdsvis $g + 1,0 \text{ kN/m}^2$ og $g + 2,2 \text{ kN/m}^2$. Vedrørende de manglende varianter A og B for DL-16/R80 henvises til bemærkning s.41. Nederst er vist eksempler på krybeforløb i 5 målepunkter fordelt over elementlængden, dels den relative krybning i % af initialnedbøjningen, dels den absolutte krybning i mm.



Figur 4.15:

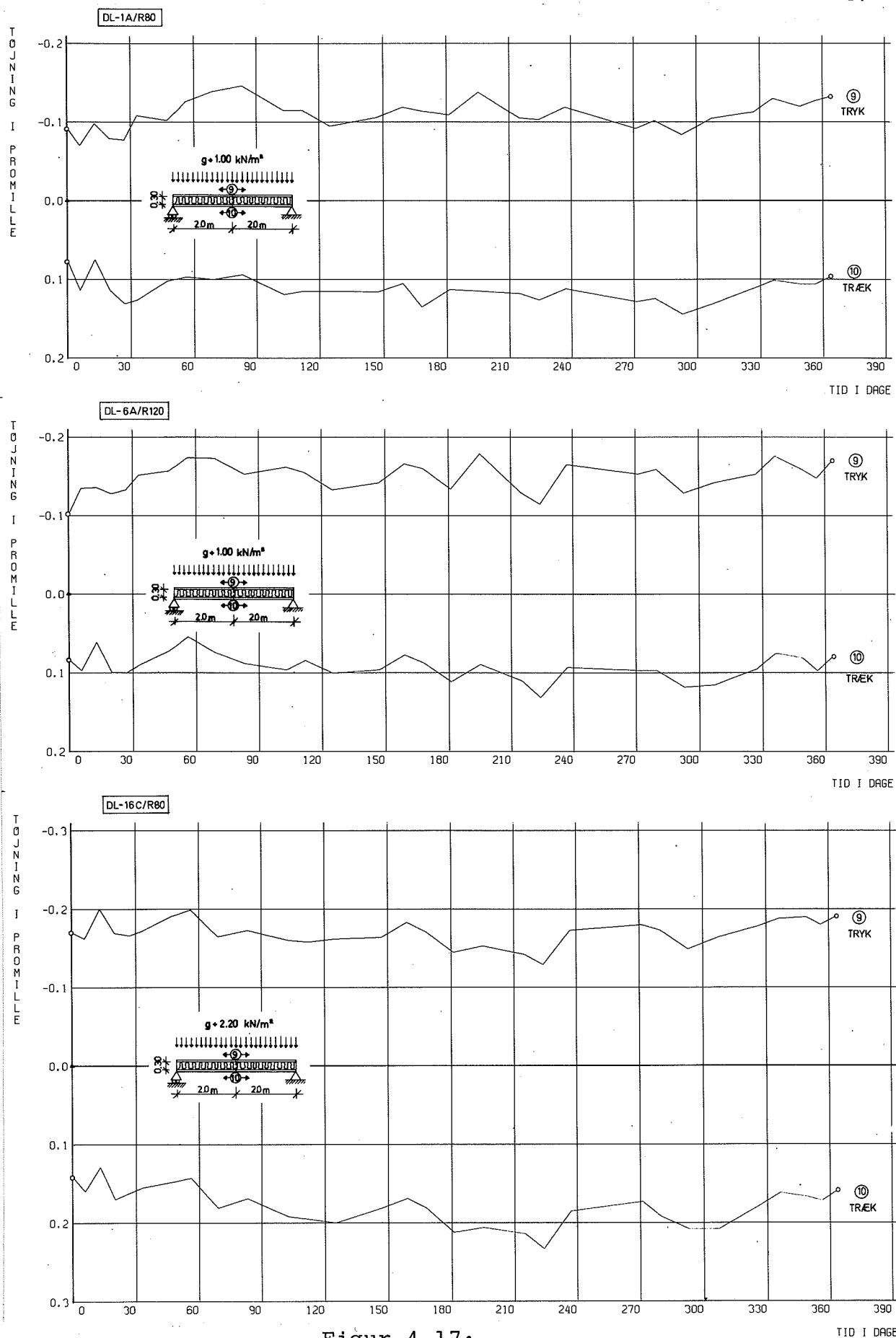
Krybeforløb for Glasuld-elementerne DL-2 og DL-15 med langtidslast henholdsvis $g + 1,0 \text{ kN/m}^2$ og $g + 2,2 \text{ kN/m}^2$.

Nederst er vist to eksempler på krybeforløbet i 5 målepunkter fordelt over elementlængden, dels den relative krybning i % af initialnedbøjningen, dels den absolutte krybning i mm.



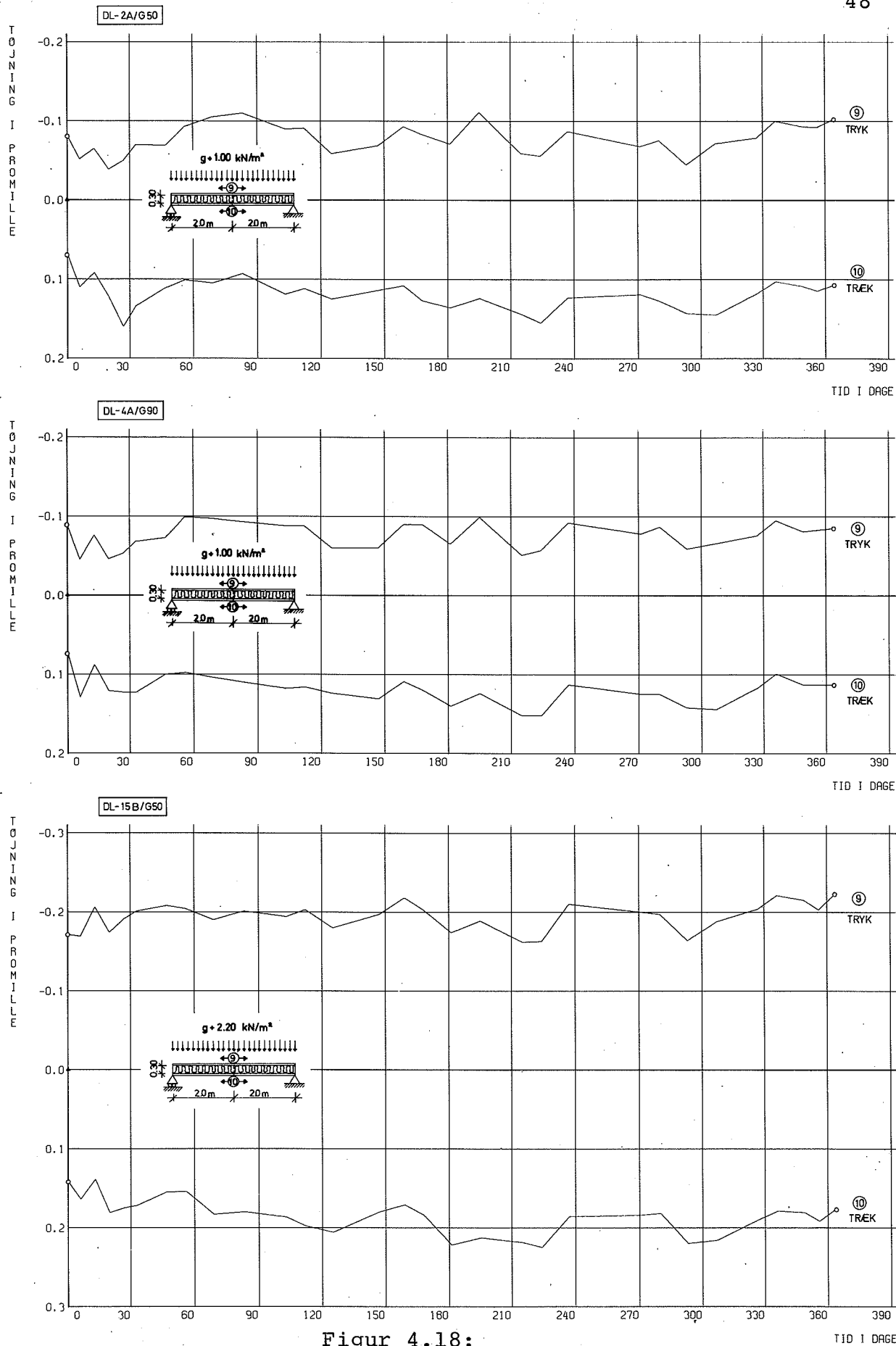
Figur 4.16:

Eksempler på elementernes tykkelsesændring under påvirkning af langtidslast $g + 1,00 \text{ kN/m}^2$.



Figur 4.17:

Flangetøjninger som funktion af tiden for varianter med kerne af Rockwool.



Figur 4.18:

Flangetøjninger som funktion af tiden for varianter med kerne af Glasuld.

Vurdering

Resultaterne af de udførte forsøg afspejler generelt set store spredninger, men på baggrund af materialeparametrenes variation (se litt. [1] og [2]) og variationen i elementernes korttidsbæreevne (se afsnit 3.3) kunne forventes endnu større spredninger.

Adskillelsen af forsøgselementerne efter forsøgenes afslutning (se kapitel 6) viste, at variationen i limforbindelsens kvalitet (forskydningsstyrke), der er helt afgørende for elementernes bæreevne, kun har beskeden indflydelse på deformationerne og dermed krybeegenskaberne.

Initialnedbøjninger

Forsøgselementernes momentane nedbøjninger (se figur 4.12 og 4.13) dels hidrørende fra egenlasten dels hidrørende fra den påførte last (i forskellige niveauer) viser tilnærmelsesvis proportionalitet med belastningen, hvad der skulle forventes, når de indgående materialer ikke belastes ud over proportionalitetsgrænsen.

Produktionsbestemte skævheder

Udbøjningsfiguren ved de lave belastningsniveauer er dog stærkt influeret af elementernes produktionsbestemte skævheder. Målingerne på elementerne i den ubelastede tilstand (kantstillet) viste afvigelser fra retlinethed på ± 2 mm og tykkelsesvariationer på ± 1 mm. Disse skævheder har dog kun beskeden indflydelse på spændingsbilledet fra de aktuelle belastninger (i brugsstadiet) og dermed beskeden indflydelse på krybeforløbet.

Krybeforløb (statisk last)

Den absolutte krybning svarende til den tidsafhængige nedbøjningstilvækst vokser med den belastning (spænding), der forårsager den. For de valgte belastningsniveauer op til ca. 50% af mineraluldens forskydningsstyrke er der tilnærmelsesvis proportionalitet mellem belastning og krybning.

Den relative krybning (i forhold til initialnedbøjningerne) er således tilnærmelsesvis uafhængig af belastningsniveauet, hvad der er af stor praktisk betydning (sammenlign figur 4.14 og 4.15).

De analytiske modeller for krybeforløbet viser god overensstemmelse med de aktuelle målinger med afvigelserne jævnt fordelt over forsøgsperioden (se figur 4.14 og 4.15).

Nedbøjningstilvæksten efter 1 år (i mid-
del 14-19% af initialnedbøjningen) udgør
ca. 60-90% af elementernes langtidskryb-
ning (grænseværdi) under forudsætning af,
at krybningen følger modellerne ud over
det eksperimentelle tidsforløb.

Krybeforløb
(vekslende last)

Resultaterne for forsøgsvarianterne DL-13
og -14 med en statisk last på 0,25 kN/m
overlejret hver 8. uge af en last på
0,75 kN/m (svarende til snelast) viser,
at krybeforløbet stort set er uafhængigt
af belastningens vekslende karakter. Da
der er tale om meget små absolutte kryb-
ninger, må resultaterne dog betragtes med
et vist forbehold, idet måleusikkerheden
herved får meget stor indflydelse.

Blivende
nedbøjninger

De blivende nedbøjninger umiddelbart efter
aflastning er for samtlige forsøgselementer
stort set sammenfaldende med den absolutte
krybning (nedbøjningstilvækst).

Den blivende nedbøjning vil dog givet vis
aftage med tiden ved såkaldt elastisk ef-
tervirkning, men af tidsmæssige årsager
foreligger ingen målinger af dette forløb.

Tykkelses-
ændringer

Resultaterne af de løbende målinger af
elementernes tykkelse (se figur 4.16) vi-
ser, at der inden for måleusikkerheden på
omkring 0,1 mm ikke er sket nogen regi-
strerbar sammentrykning af kernematerialet.

Flangetøjninger

Flangetøjningerne vokser tilnærmelsesvis
proportionalt med den påførte last/spænding
(se figur 4.17 og 4.18). Flangetøjningernes
gennemsnitlige ændring efter 1 år varierer
mellem 12 og 26% af initialtøjningerne.

5. BÆREEVNEREDUKTION EFTER LANGTIDSLAST

For vurderingen af langtidslastens indflydelse på elementernes bæreevne blev de 32 elementer fra langtidsforsøgene (beskrevet i kapitel 4) belastet til brud analogt til korttidsforsøgene beskrevet i kapitel 3.

Som referencer anvendtes de tilhørende varianter fra korttidsforsøgene (anden elementhalvdel).

Resultaterne er gengivet i tabel 5.1 sammen resultaterne fra referenceforsøgene.

Elementernes stivhed er udtrykt ved arbejdskurvernes hældning i det tilnærmelsesvis lineærelastiske område (< ca. 50% af brudlasten). Arbejdskurverne udtrykker her den ækvivalente fladelast (kN/m^2) versus maksimalnedbøjningerne i mm.

Styrkeændringer

Resultaterne bekræfter de generelt set store spredninger på elementernes bæreevne hovedsagelig hidrørende fra variationen af limforbindelsens kvalitet (forskydningsstyrke).

Bruddet optræder i alle tilfælde som forskydningsbrud i mineraluld/limforbindelse ved vederlagene analogt til brudtyperne beskrevet i afsnit 3.3.

Ændringerne i elementernes bæreevne afspejler såvel reduktioner som forøgelse i et tilsyneladende tilfældigt mønster. Det er således ikke muligt ud fra de foreliggende resultater at påvise nogen generel styrkereduktion hidrørende fra de aktuelle belastninger, elementerne var påvirket af gennem ét år.

Stivhedsændring

Ændringerne i elementernes stivhed vurderet på basis af maksimaludbøjningerne viser væsentlig mindre variation, uden at der dog kan påvises nogen signifikant ændring.

FORSØGSELEMENT *		LANGTIDSLAST		DK-elementer (referencer)					DL-elementer					STYRKE/STIVHED efter langtidslast		STYRKEÆNDRING		STIVHEDÆNDRING	
VARIANT NR.	MINERAL-ULDKERNE	EGENLAST kN/m ²	PÅFØRT LAST kN/m ²	BRUDLAST kN	BRUDLAST (ækvivalent) kN/m ²	NEDBØJNING (ækvivalent) mm/kN/m ²	BRUDLAST kN	BRUDLAST (ækvivalent) kN/m ²	NEDBØJNING (ækvivalent) mm/kN/m ²	AKTUEL %	MIDDEL	AKTUEL %	MIDDEL	AKTUEL %	MIDDEL	AKTUEL %	MIDDEL		
A B D-1-C D	R80	0,40	1,00	7,8	3,3	4,1	7,3	3,0	4,8	-6	-4	-17		-9		-4			
				8,8	3,7	3,2	9,0	3,8	3,5	2									
				11,7	4,9	3,8	9,1	3,8	2,9	-22									
				7,2	3,0	3,8	7,9	3,3	3,2	10				16					
A B D-2-C D	G50	0,31	1,00	15,2	6,3	1,9	9,4	3,9	2,0	-38		-5		-6		-1			
				15,9	6,6	1,8	15,4	6,4	1,9	-3				-14					
				12,8	5,3	2,1	14,6	6,1	1,8	14				14					
				16,0	6,7	1,8	14,3	6,0	1,9	-11				-6					
A B D-4-C D	G90	0,43	1,00	34,4	14,3	0,9	38,0	15,8	0,9	10		0		11		3			
				35,8	14,9	0,9	23,9	10,0	0,8	-33				-7					
				38,4	16,0	0,9	35,6	14,8	0,9	0				0					
				35,1	14,6	0,9	35,0	14,6	0,9					0					
A B D-6-C D	R120	0,52	1,00	17,8	7,4	1,5	18,3	7,6	1,6	3		-7		-7		3			
				17,0	7,1	1,4	16,3	6,8	1,5	-4				-4					
				13,0	5,4	1,7	19,9	8,3	1,5	53				15					
				9,1	3,8	1,6	9,9	4,1	1,4	9				13					
A B D-13-C D	G50	0,31	0,25 +0,75 (veksl.)	9,0	3,8	2,0	13,2	5,5	2,0	47		0		0		-4			
				12,2	5,1	2,0	13,5	5,6	2,1	11				-5					
				16,8	7,0	1,8	13,5	5,6	2,0	-20				23					
				11,0	4,6	1,9	16,8	7,0	1,9	53				0					
A B D-14-C D	R80	0,40	0,25 +0,75 (veksl.)	9,0	3,8	3,6	7,8	3,3	3,3	-13		8		8		4			
				9,2	3,8	3,3	11,0	4,6	2,9	20				12					
				9,1	3,8	3,5	9,8	4,1	3,7	8				-6					
				9,3	3,9	3,0	9,7	4,0	3,0	4				0					
A B D-15-C D	G50	0,31	2,20	16,6	6,9	2,0	12,0	5,0	2,0	-28		0		0		-3			
				12,2	5,1	2,1	11,5	4,8	1,9	-6				10					
				11,4	4,8	1,9	12,6	5,3	1,9	11				0					
				20,5	8,5	1,5	17,3	7,2	1,8	-16				-20					
A B D-16-C D	R80	0,40	2,20	8,1	3,4	3,5	-	-	-	-		-		-		0			
				7,8	3,3	3,5	-	-	-	-				3					
				10,4	4,3	3,2	10,4	4,3	3,1	0				10					
				7,4	3,1	3,1	8,8	3,7	3,2	19				-3					

* Spændvidde: 4,0 m , Kernetykkelse: 0,30 m , Flanger: 12 mm Amerikansk krydsfinér, C-D

Tabel 5.1:

Ændringer i styrke og stivhed efter 1 års belastning.

6. KVALITATIV VURDERING AF LIMFORBINDELSE

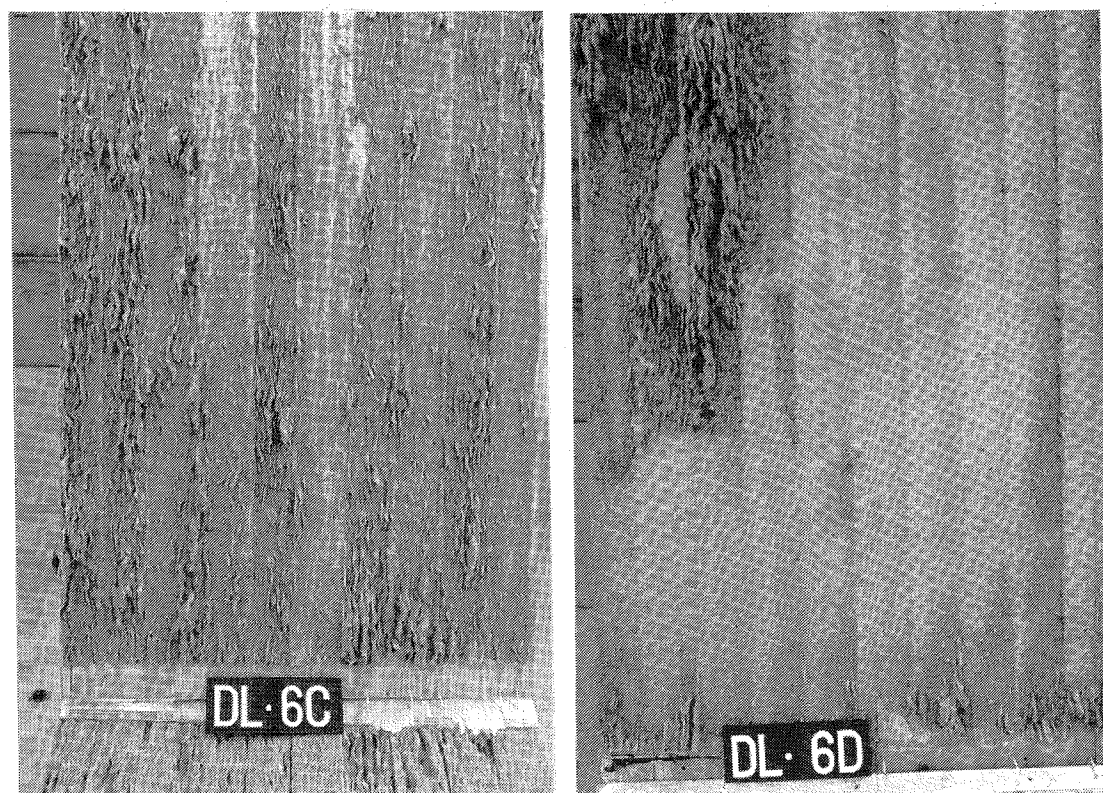
Efter bæreevnepforsøgene blev ca. halvdelen af elementerne adskilt med henblik på en kvalitativ vurdering af limforbindelsens kvalitet.

Til undersøgelsen blev udtaget mindst to elementer af hver type svarende til elementerne med henholdsvis største og mindste bæreevne.

Elementernes bæreevne (se kapitel 3) er primært bestemt af mineraluldens og limforbindelsens forskydningsstyrke således, at der er tilnærmelsesvis proportionalitet mellem bæreevne og forskydningsstyrke.

De produktionsbestemte svækkelser i limforbindelsen har afgørende indflydelse på elementernes bæreevne.

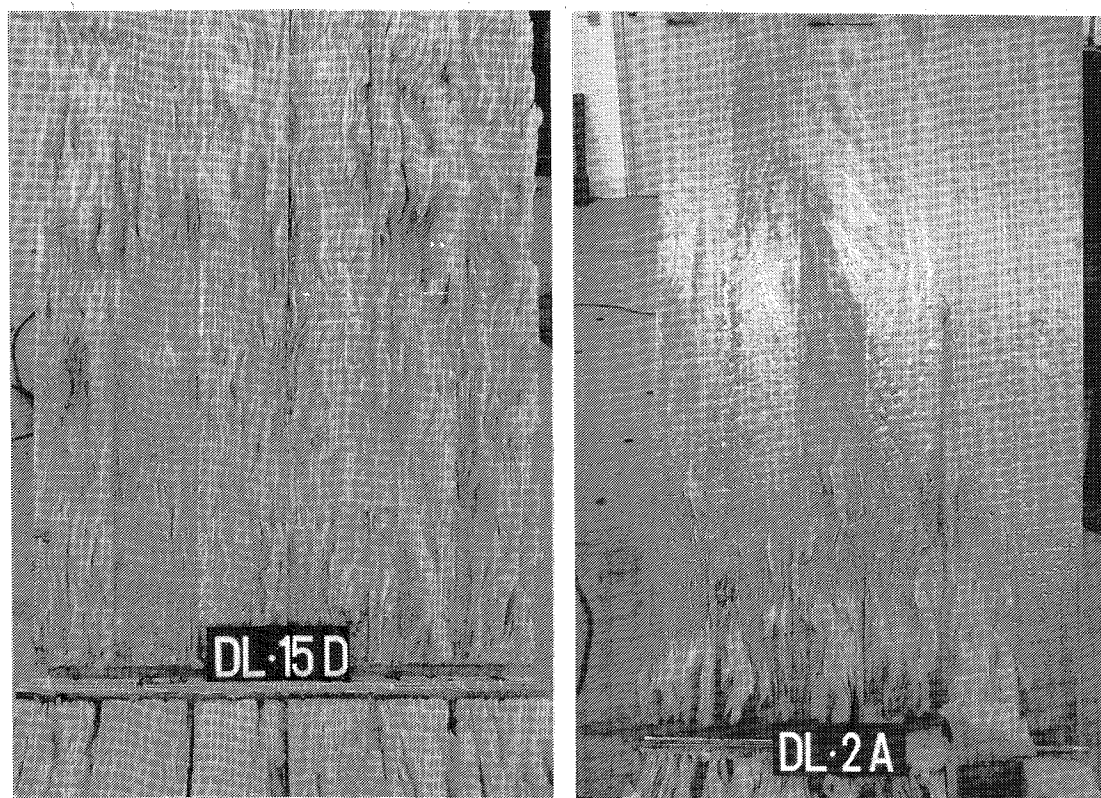
Den kvalitative vurdering af limforbindelsens godhed viste en entydig sammenhæng mellem limforbindelsens kvalitet og elementernes bæreevne.



Figur 6.1:

Eksempler på limforbindelser i elementer med Rock-wool. Til venstre en god limforbindelse, til højre en dårlig.

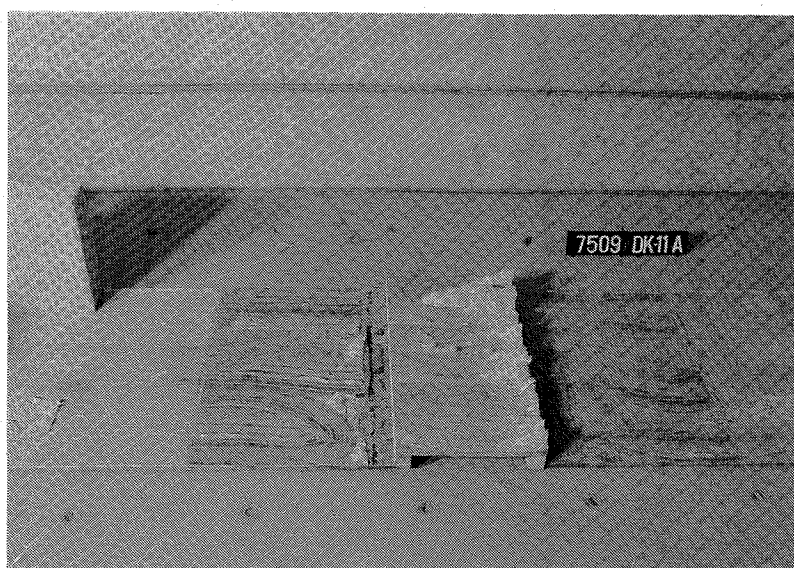
På figur 6.1 og 6.2 er vist eksempler på, hvor store forskelle der er i limforbindelsens kvalitet, trods en meget omhyggelig produktionskontrol.



Figur 6.2:

Eksempler på limforbindelser i elementer med Glasuld. Til venstre en god limforbindelse, til højre en dårlig.

På figur 6.3 er vist et eksempel, der samtidig illustrerer den generelt set meget dårlige limforbindelse til endeskottene, hvor der ikke kunne påregnes overførsel af forskydningskræfter.

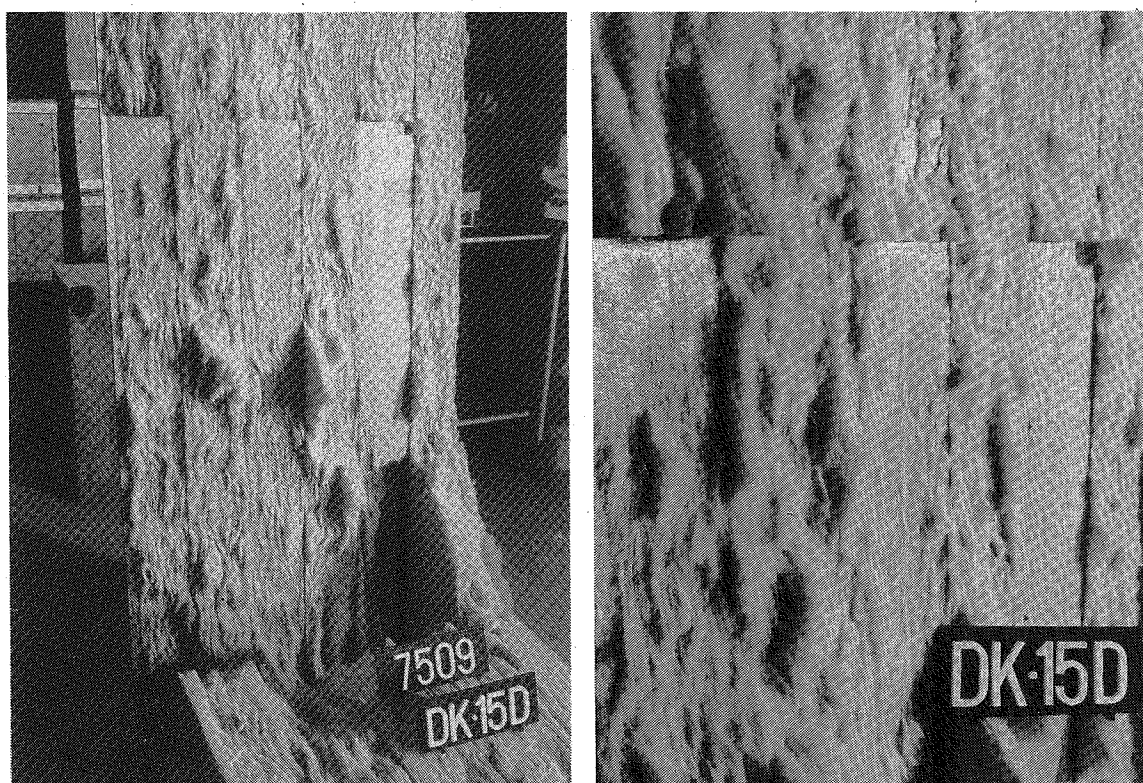


Figur 6.3:

Eksempel på ekstrem dårlig limforbindelse ved både over- og underflange. Den dårlige limforbindelse til endeskottet viser, at limen under produktionen er løbet ned mod bunden af skottet.

Svækkelserne i limforbindelserne er i de fleste tilfælde størst omkring vederlagene (nær endeskottene) netop i de snit, hvor forskydningsspændingerne er størst. Forholdet kan skyldes forskelle i højden af lameller og endeskot, således at det er vanskeligt at etablere et ensartet presstryk under limens opskumning og udhærdning.

Tolerancen på lamelhøjden giver i sig selv anledning til produktionstekniske vanskeligheder omkring lamelstøddene, se figur 6.4, hvor små højdeforskelle giver anledning til varierende presstryk og dermed lokale svækkelser af limforbindelsen.



Figur 6.4:

Svækkelser i limforbindelsen omkring lamelstøddene. Udsnitsforstørrelse til højre.

7. LITTERATURREFERENCER

- [1] Rasmussen, Lauritz:
Mineraluldbaserede sandwichelementer
Materialeprøvning af mineraluld.
IFH-rapport nr. 128, 1978.
- [2] Bunch-Nielsen, Tommy:
Mineraluldbaserede sandwichelementer
Produktionsteknik.
Cowi-publ. nr. 315, 1978.
- [3] Rasmussen, Lauritz:
Mineraluldbaserede sandwichelementer
Materialeprøvning af krydsfinér.
IFH-rapport nr. 127, 1978.
- [4] Træbranchens Oplysningsråd:
TRÆ 26: Spånplader i byggeriet
1977.
- [5] Nicolaisen, Asta:
Mineraluldbaserede sandwichelementer
Laboratorieforsøg til bedømmelse af de
fugttekniske egenskaber.
SBI-rapport 114, 1978.

SUMMARY

This report describes full scale tests on 96 sandwich components with cores of mineral wool and flanges of plywood.

The components used for deck and roof-constructions were tested in bending (transverse loads) partly under short time load, partly under long time load.

Short-time tests strength/stiffness

At the short-time tests 64 components were loaded until failure, primarily to investigate the influence upon strength and stiffness of the following parameters:

- the strength/stiffness of the mineral wool,
- the core thickness
- the flange thickness
(the flange stiffness)
- the span

The sandwich components show linear elastic properties with a proportional limit of approximately 50 per cent of the ultimate stress.

The load bearing capacity of the components is primarily determined by the shear strength of the mineral wool and the glue joint, so that there is an approximate proportionality between load bearing capacity and shear strength.

Long-time tests (creep tests)

At the long-time tests 32 components (simply supported) were loaded with an uniformly distributed load during one year, primarily to investigate the creep characteristics relating to the following parameters:

- stiffness of the mineral wool
(type of mineral wool)
- size of the applied load
- character of the applied load
(static/alternating)

Under constant load the deflection of the sandwich components increases as a function of time.

The creep deflection expressed as the deflection beyond the initial deflection increases approximately proportional to the applied load, when the shear loads does not exceed the proportional limit of the wool.

The creep deflection expressed as a percentage of the initial deflection is approximately independent of the load level.

After one year the creep amounts to 14 to 19 per cent of the initial deflection. The creep rate decrease and the creep tends towards a slowly dying away.

The dependence of time of the creep can be described with a good approximation by a hyperbolic function of the type:
 $\phi = t/(\alpha + \beta t)$ where ϕ is the deflection as a percentage of the initial deflection at time, t , and α and β are empirical constants.

Assuming that the creep correlates the models further than the experimental lapse of time the creep will tend towards limits at about 18-23 per cent of the initial deflection.

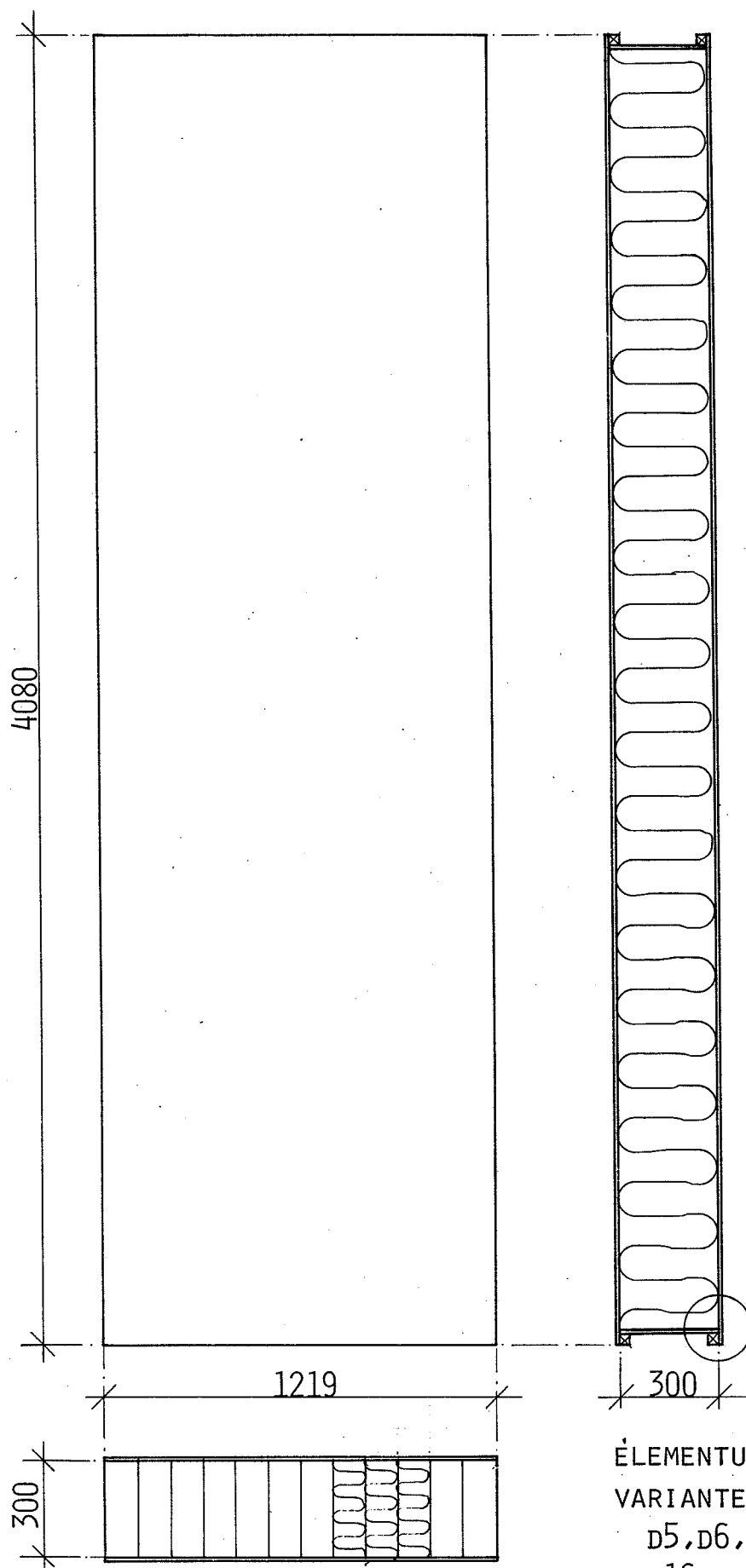
The alternating character of the load has no noticeable influence on the creep behaviour.

Strength/stiffness
after long-time
load

Finally, the components which had been long-time loaded were loaded until failure similar to the short-time tests to investigate any reductions in strength/stiffness due to the long-time load.

The actual loads applied during one year have not caused any reduction in load-bearing capacity in general.

At the same time the curves of deflection data plotted against the applied load and those of the reference components (from the short-time tests) were on the whole identical, i.e. unchanged stiffness properties.



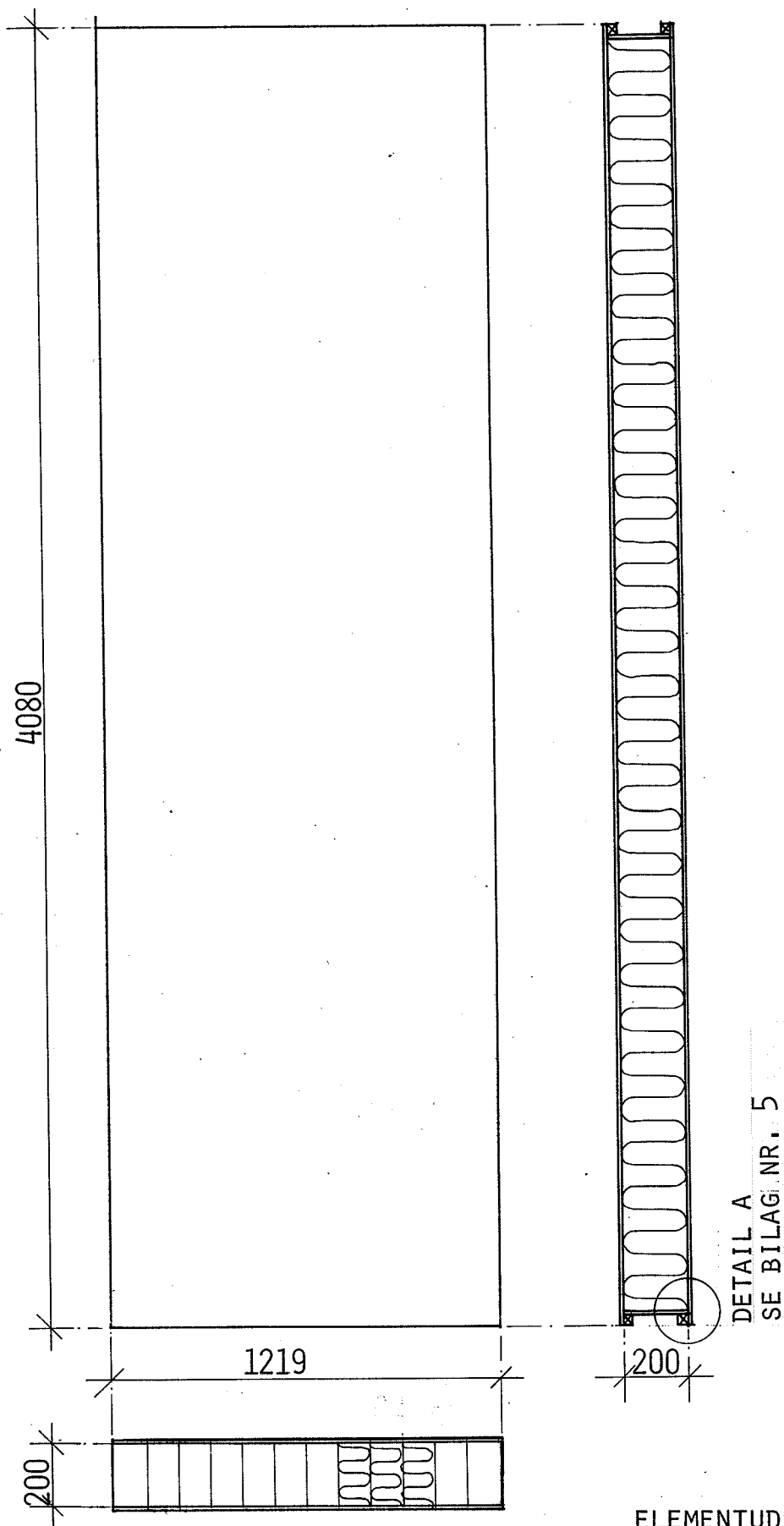
DETAIL A
SE BILAG NR. 5

ÉLEMENTUDFORMNING

VARIANTERNE: D1, D2, D3, D4,
D5, D6, D9, D10, D13, D14, D15,
D16.

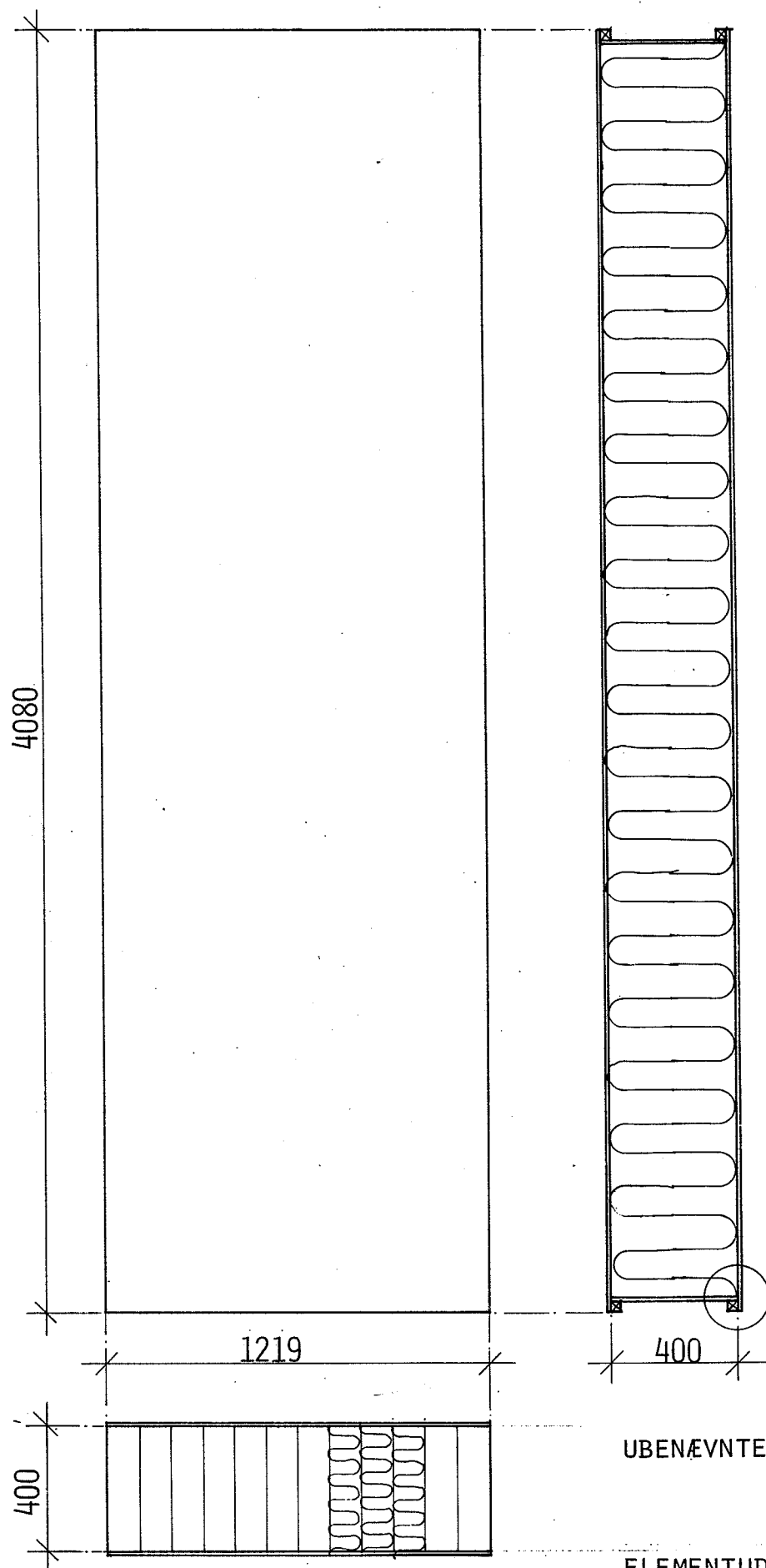
MÅL 1:20

UBENÆVNTE MÅL I MM



ELEMENTUDFORMNING
VARIANT: D7,
MÅL 1:20

UBENÆVNTE MÅL I MM



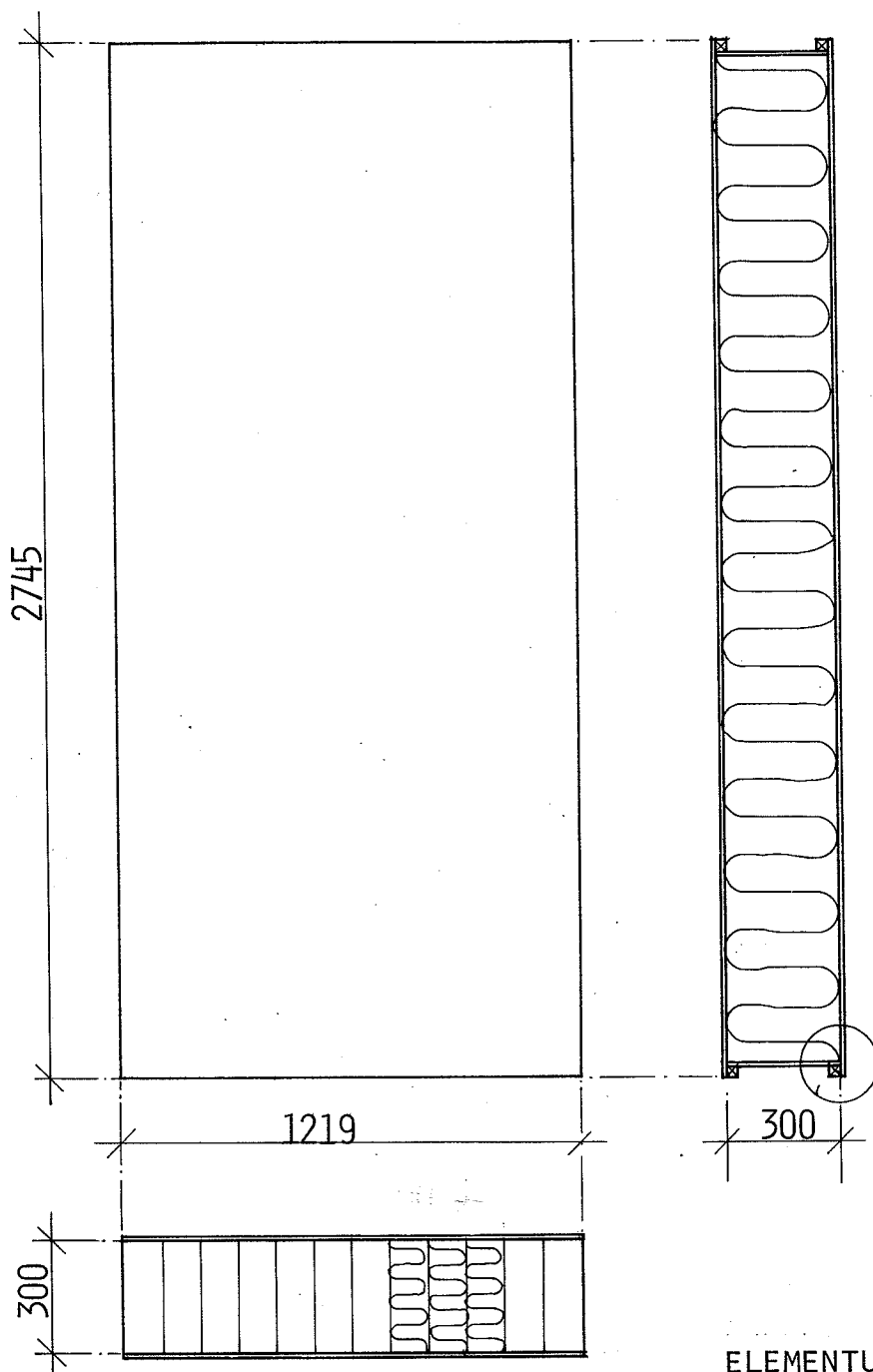
DETAIL A
SE BILAG NR. 5

UBENÆVNTTE MÅL I MM

ELEMENTUDFORMNING

VARIANT: D8

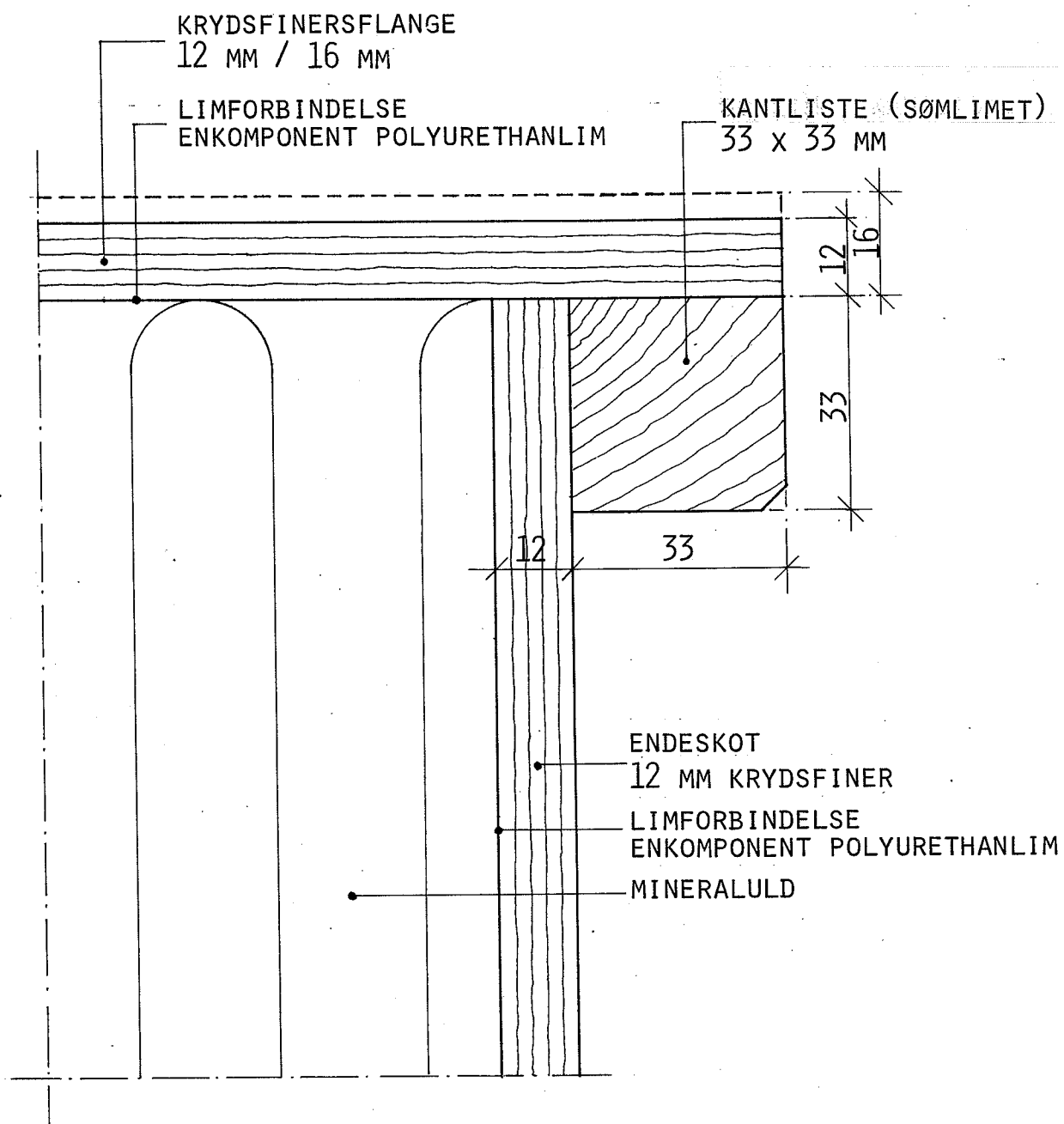
MÅL 1:20



DETAIL A
SE BILAG NR. 5

ELEMENTUDFORMNING
VARIANT: D11, D12.
MÅL 1:20

UBENÆVNTE MÅL I MM

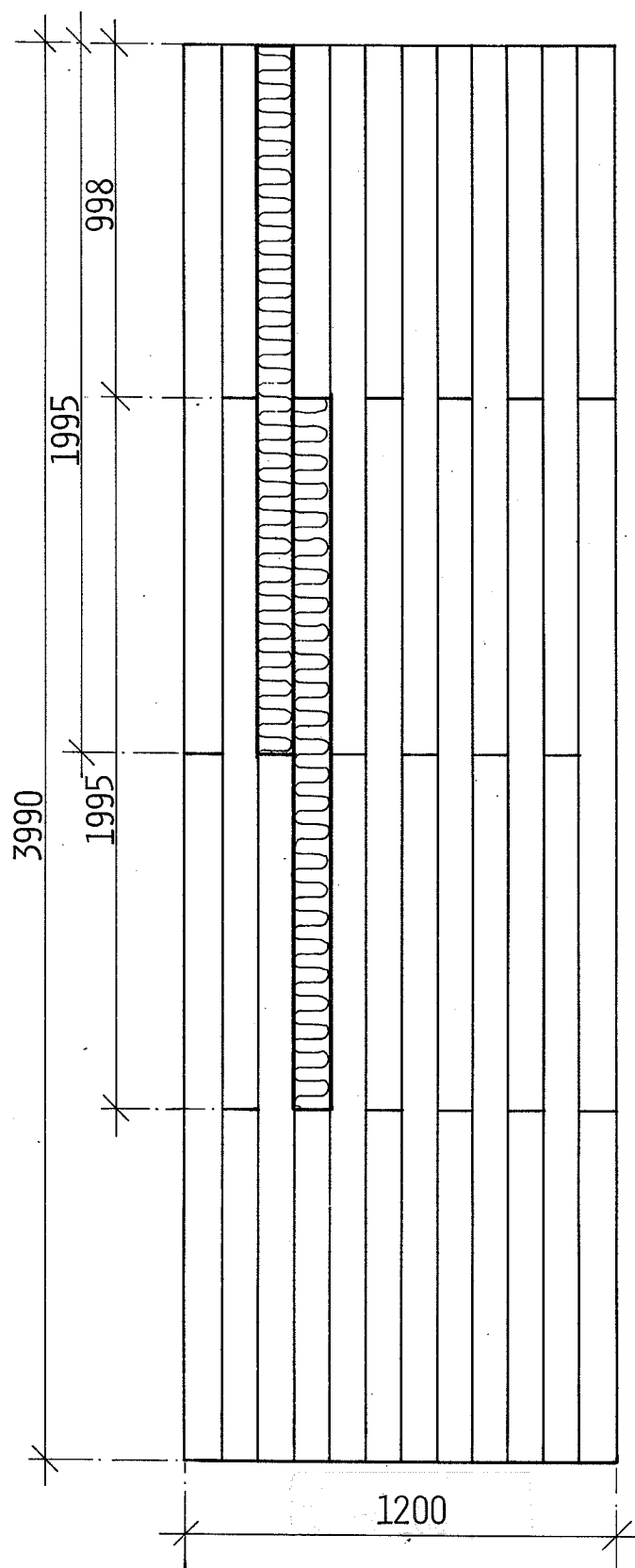


ELEMENTUDFORMNING

DETAIL A

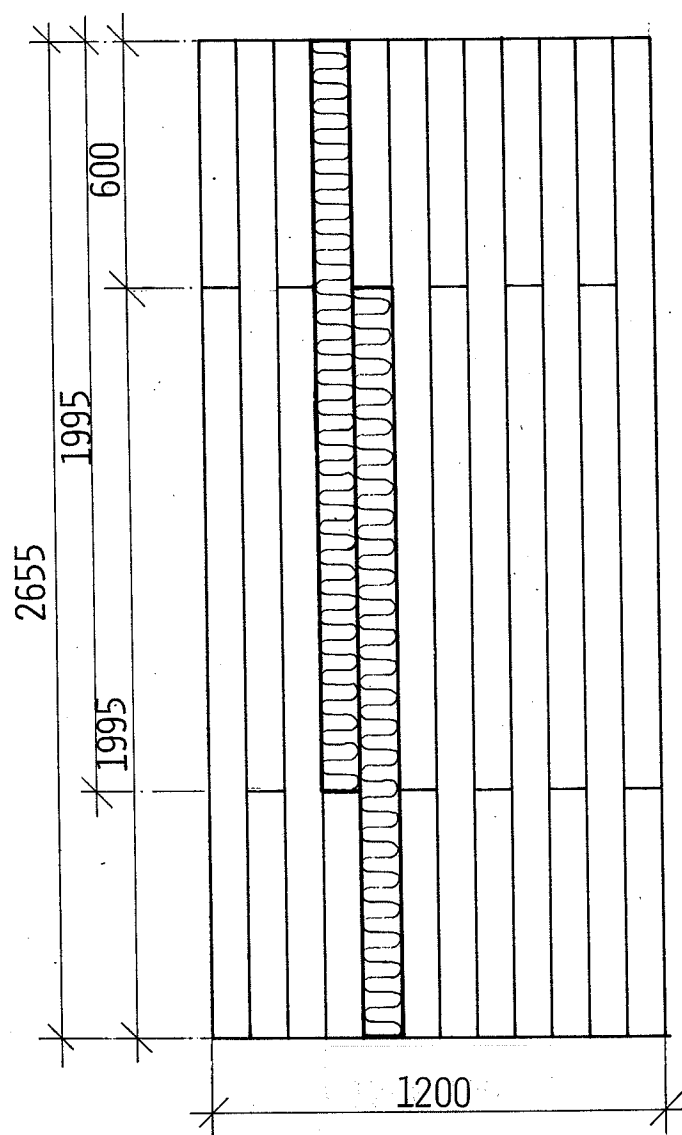
MÅL 1:1

UBENÆVNTE MÅL I MM



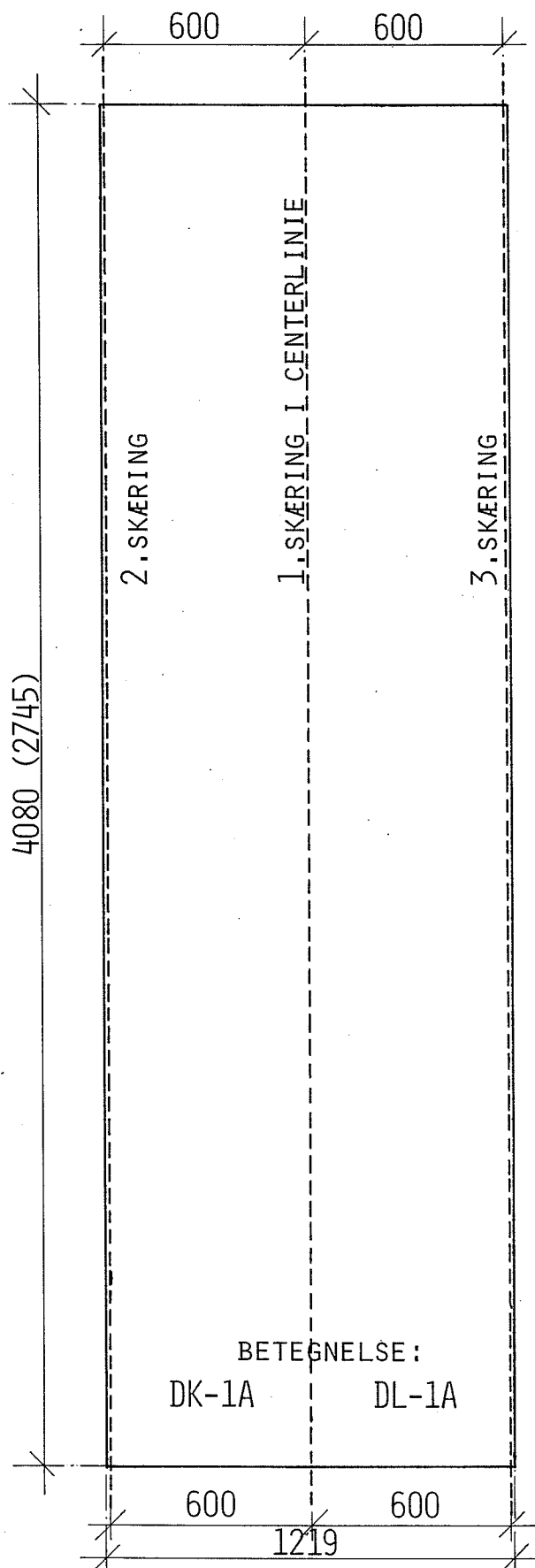
PLAN MED FORBANDT TIL ELEMENTVARIANTERNE:
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10, D13,
D14, D15, D16.

MÅL 1:20



PLAN MED FORBANDT TIL ELEMENTVARIANTERNE:
D11, D12.
MÅL 1:20

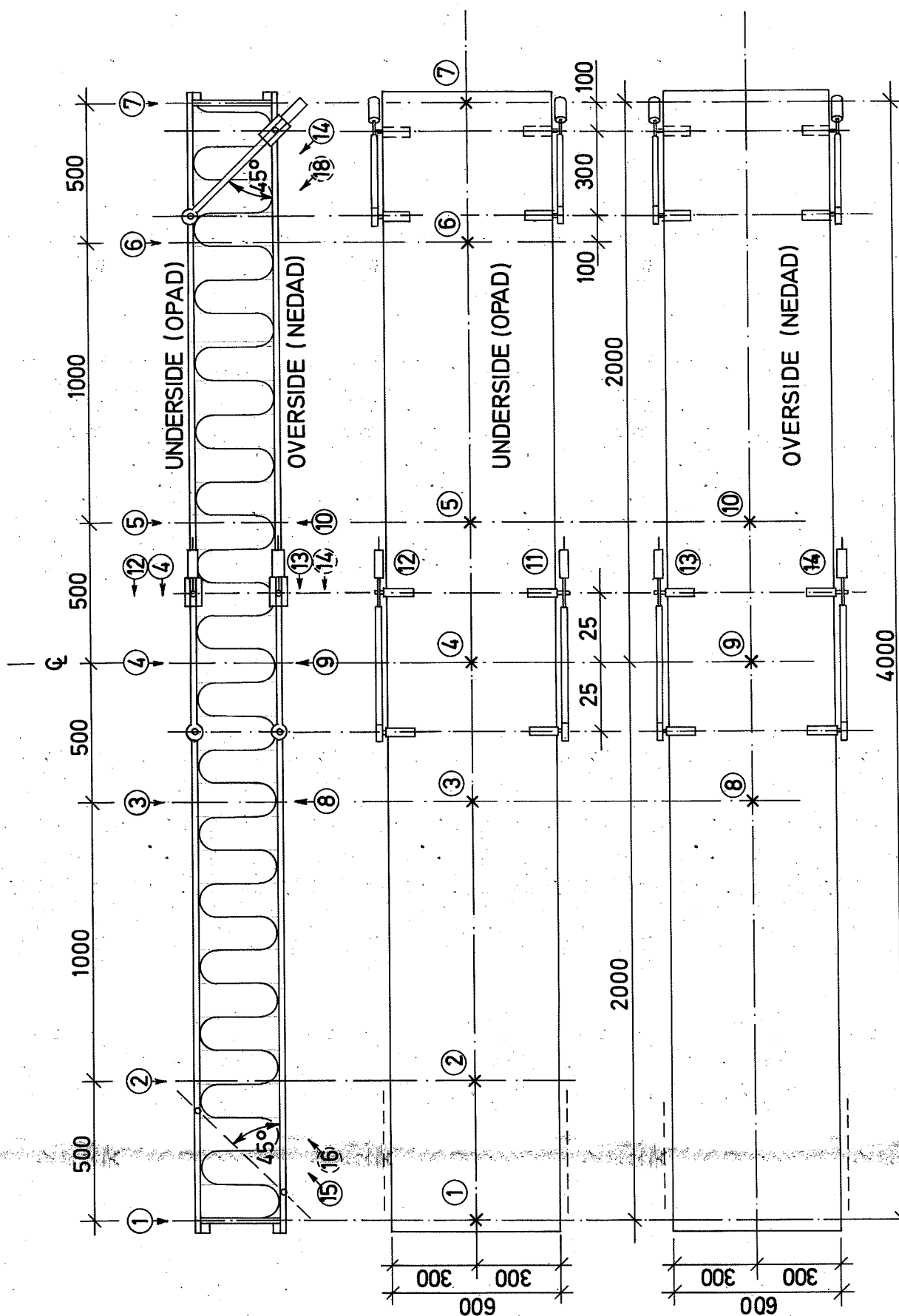
UBENÆVNTE MÅL I MM



OPSKÆRING AF ELEMENTER
MÅL 1:20

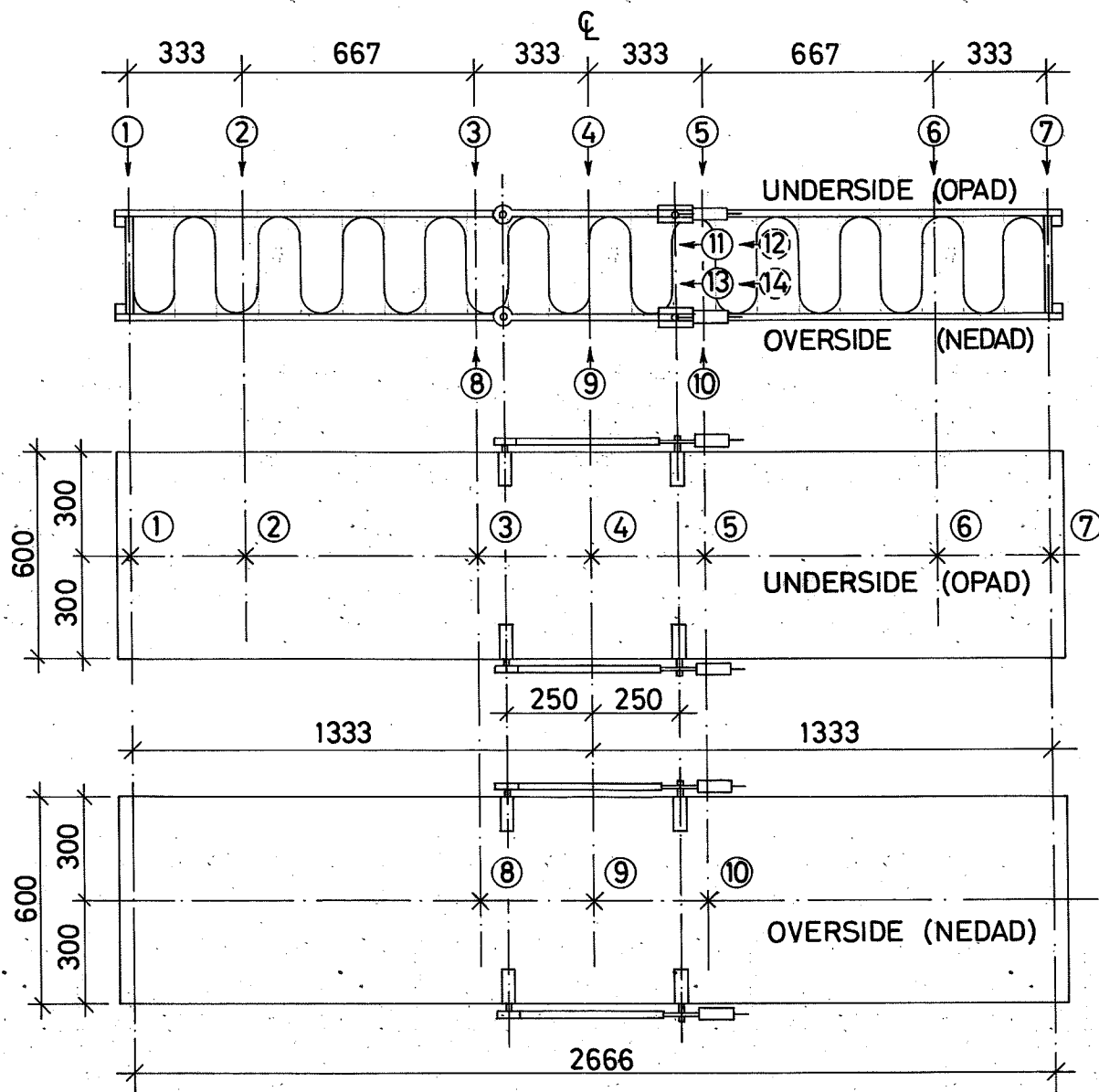
UBENÆVNTE MÅL I MM

PLACERING AF MÅLEPUNKTER VED KORTTIDSFORSØG (ELEMENTLÆNGDE: 4.0 m)



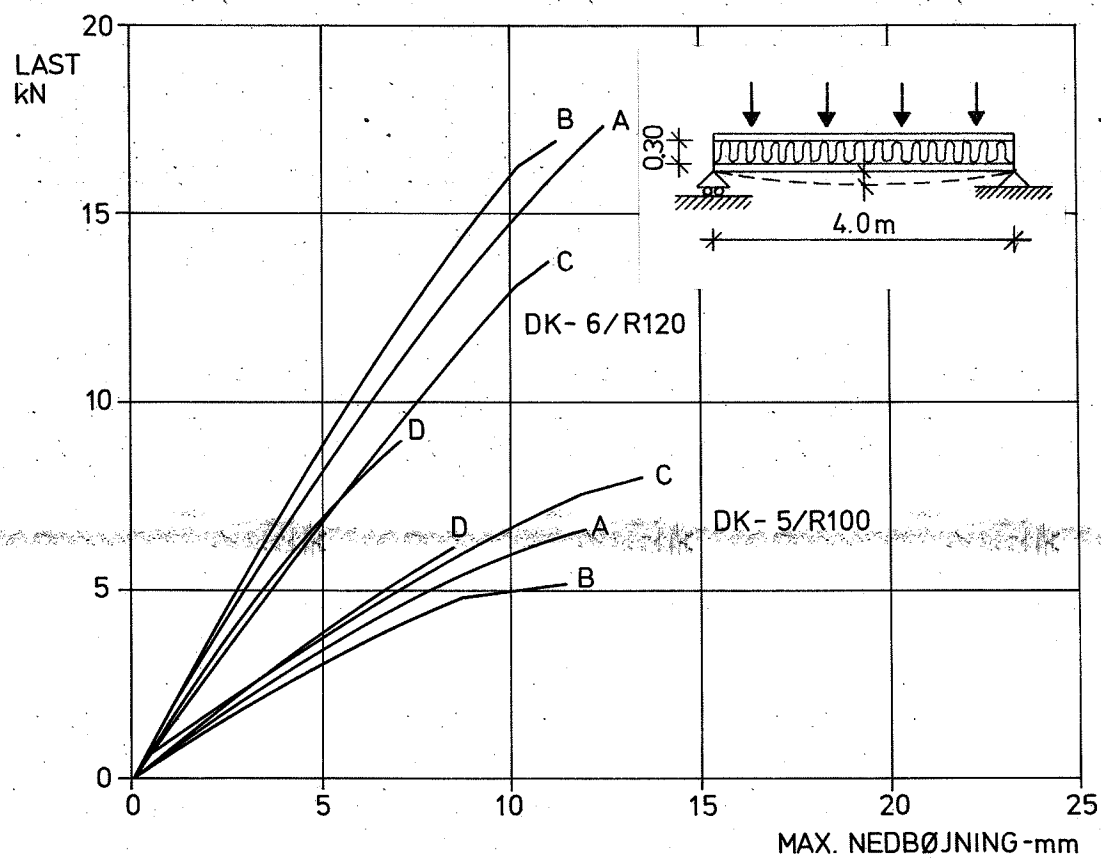
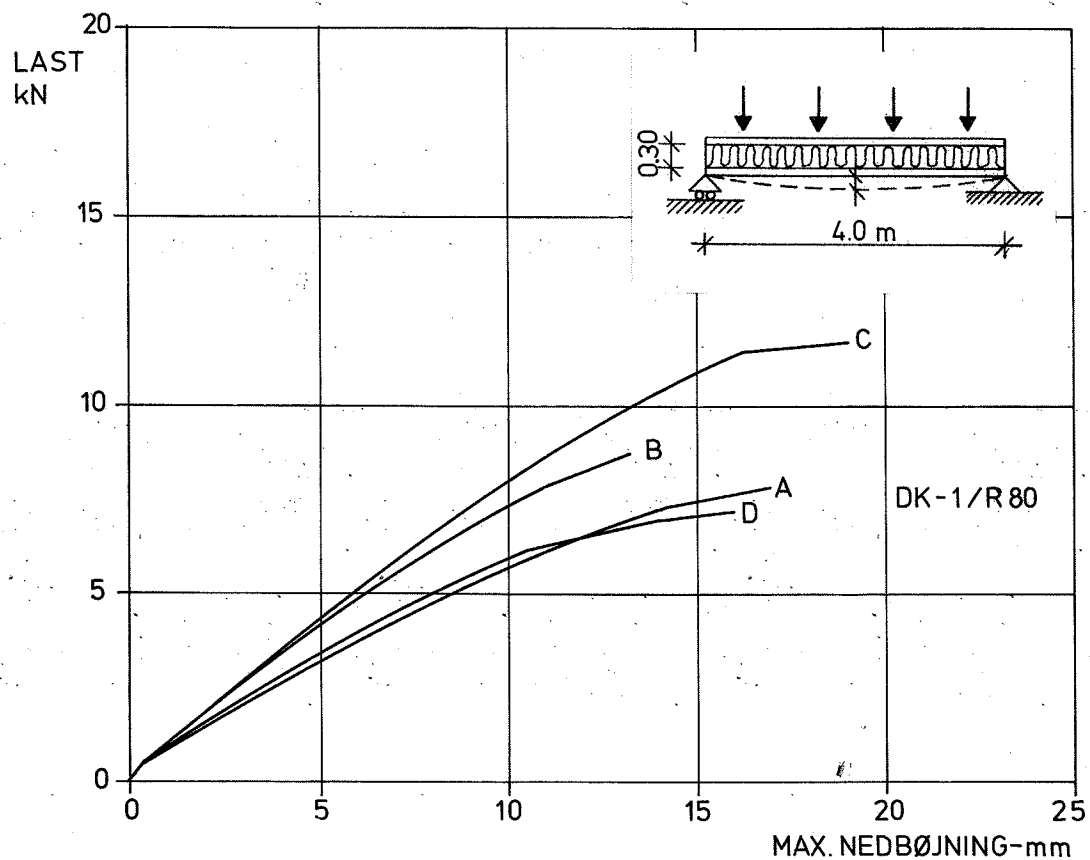
- 1 - 10: UDBØJNINGSMÅLINGER (FLYTNINGSPOTENTIOMETRE)
 11 - 14: MÅLING AF FLANGETØJNINGER (SPÆRMÅL MED FLYTNINGSPOTENTIOMETRE)
 15 - 18: MÅLING AF FLANGEFORSKYDNING (SPÆRMÅL MED FLYTNINGSPOTENTIOMETRE)

PLACERING AF MÅLEPUNKTER VED KORTTIDSFORSØG
(ELEMENTLÆNGDE: 2.67m)

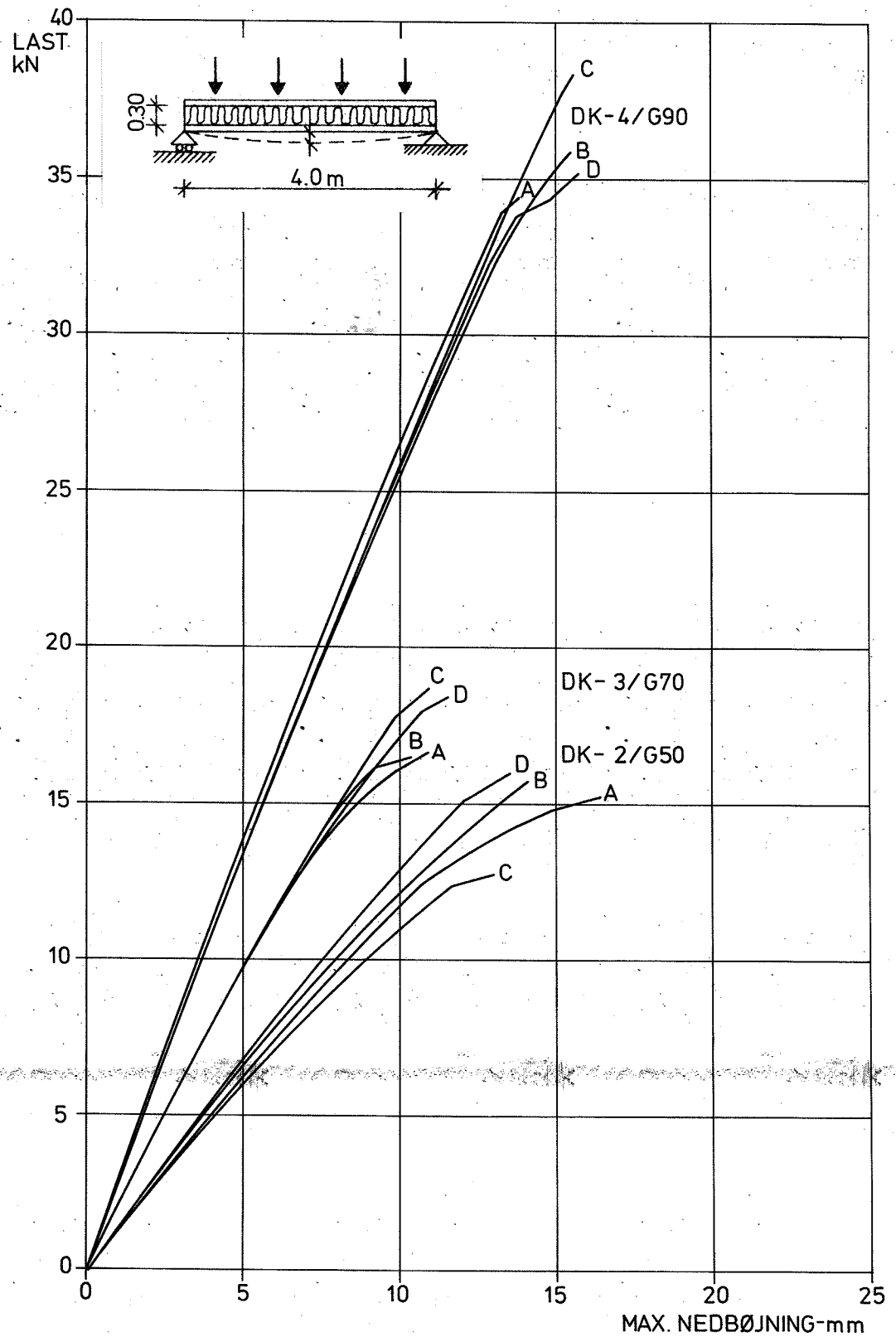


- 1-10: UDBØJNINGSMÅLINGER (FLYTNINGSPOTENTIOMETRE)
11-14: MÅLING AF FLANGETØJNINGER
(SPERMÅL MED FLYTNINGSPOTENTIOMETRE)

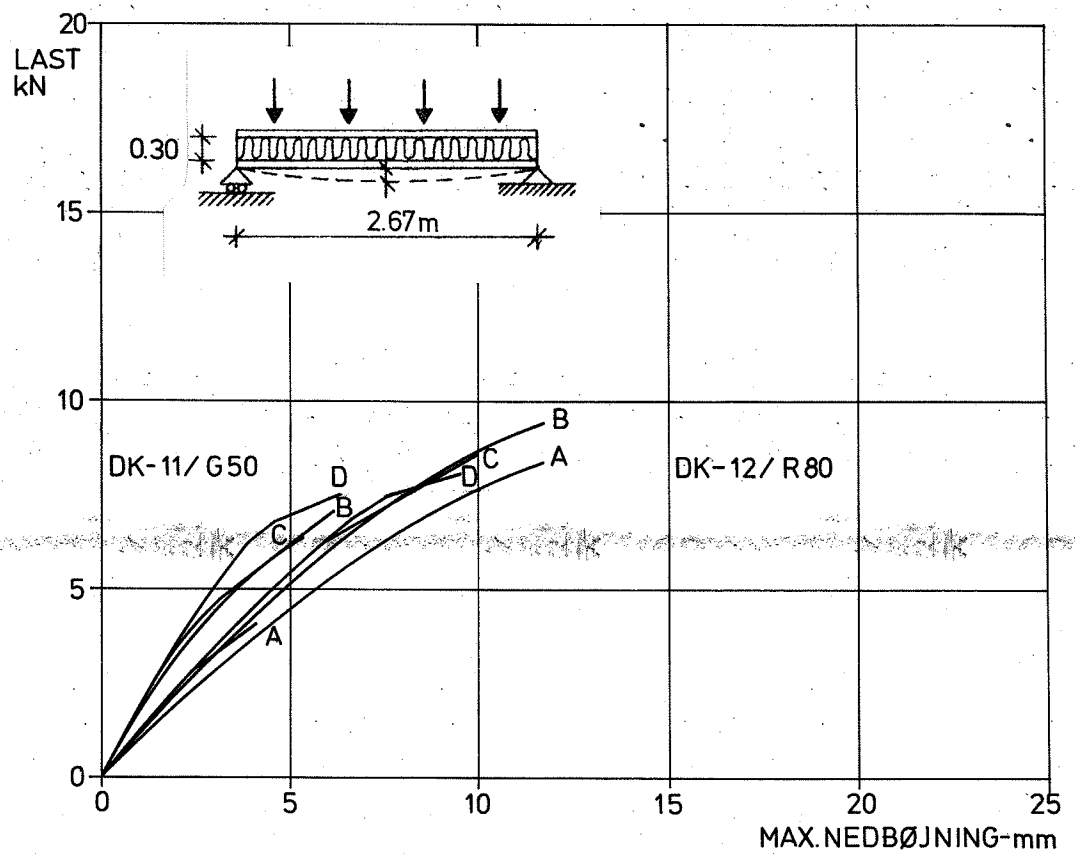
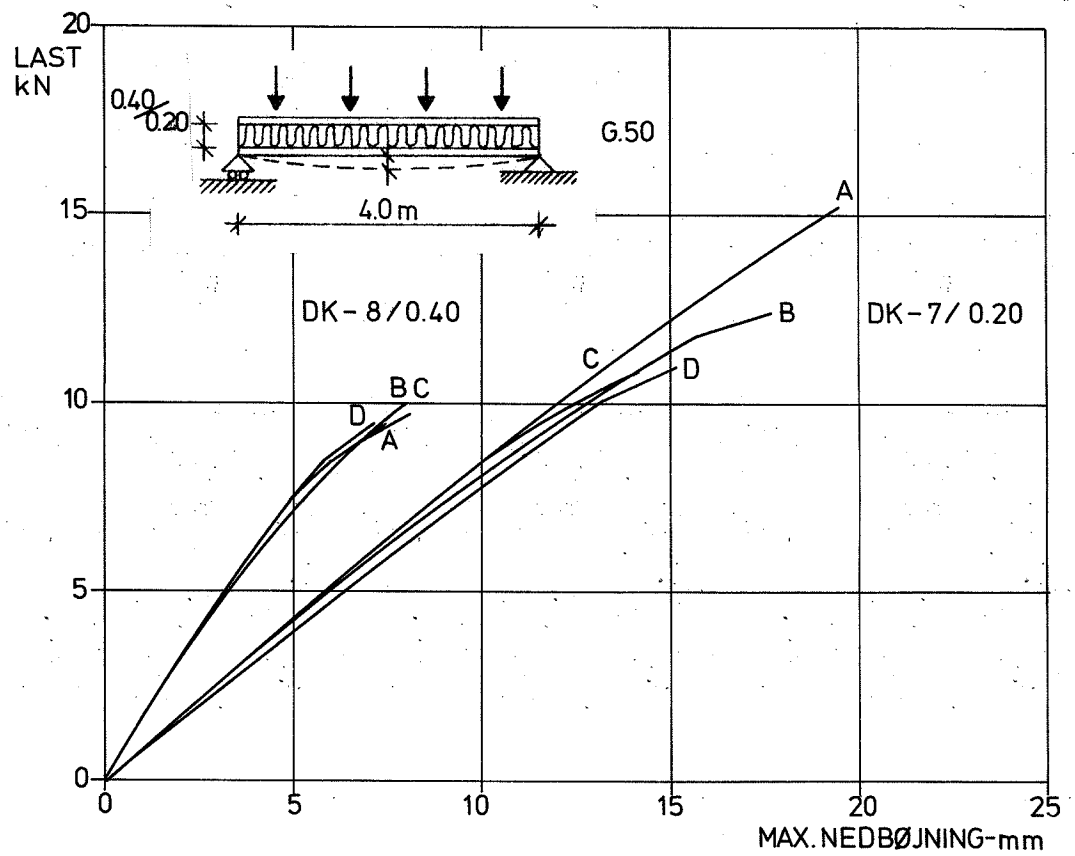
ARBEJDSKURVER FOR ELEMENTER: DK-1,-5 OG-6



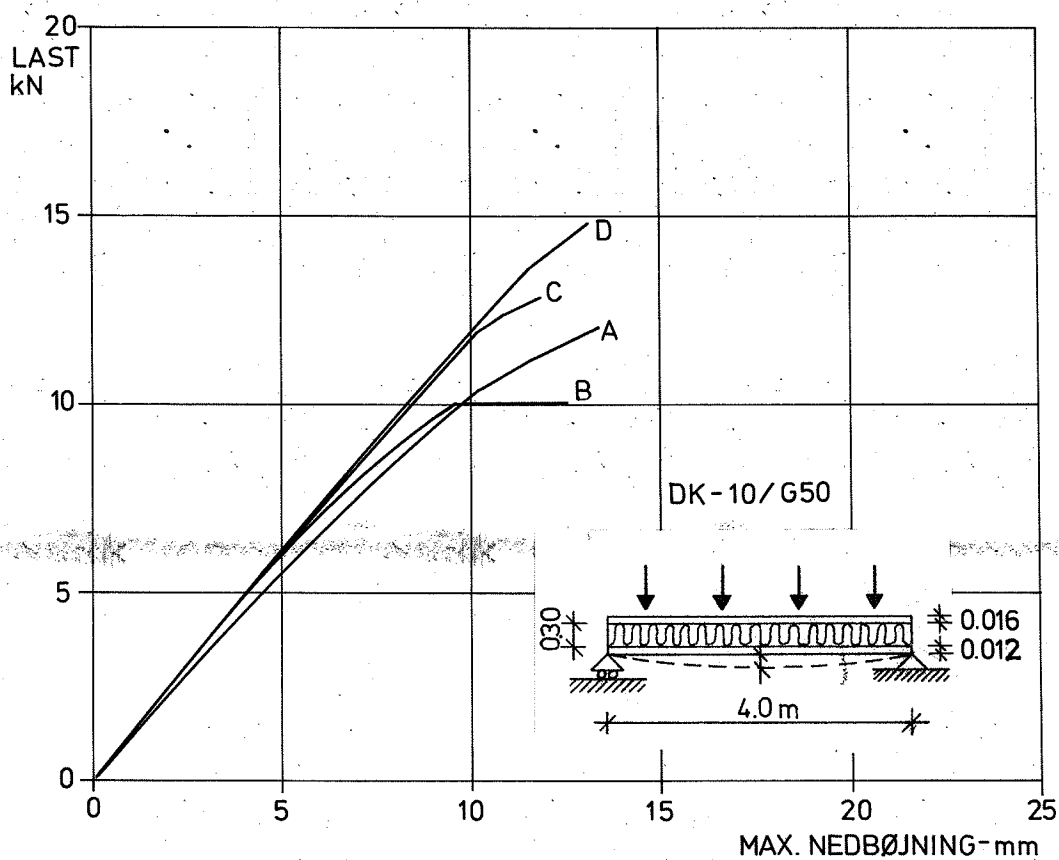
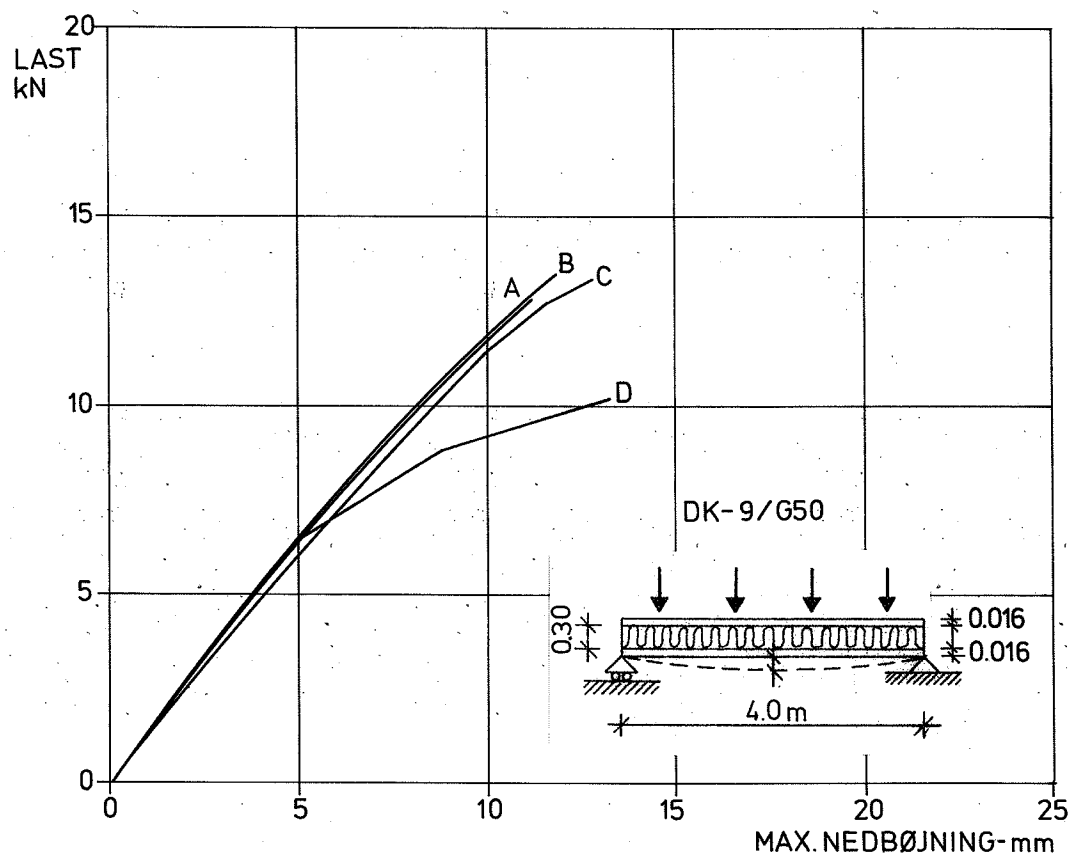
ARBEJDSKURVER FOR ELEMENTER: DK-2,-3, OG-4



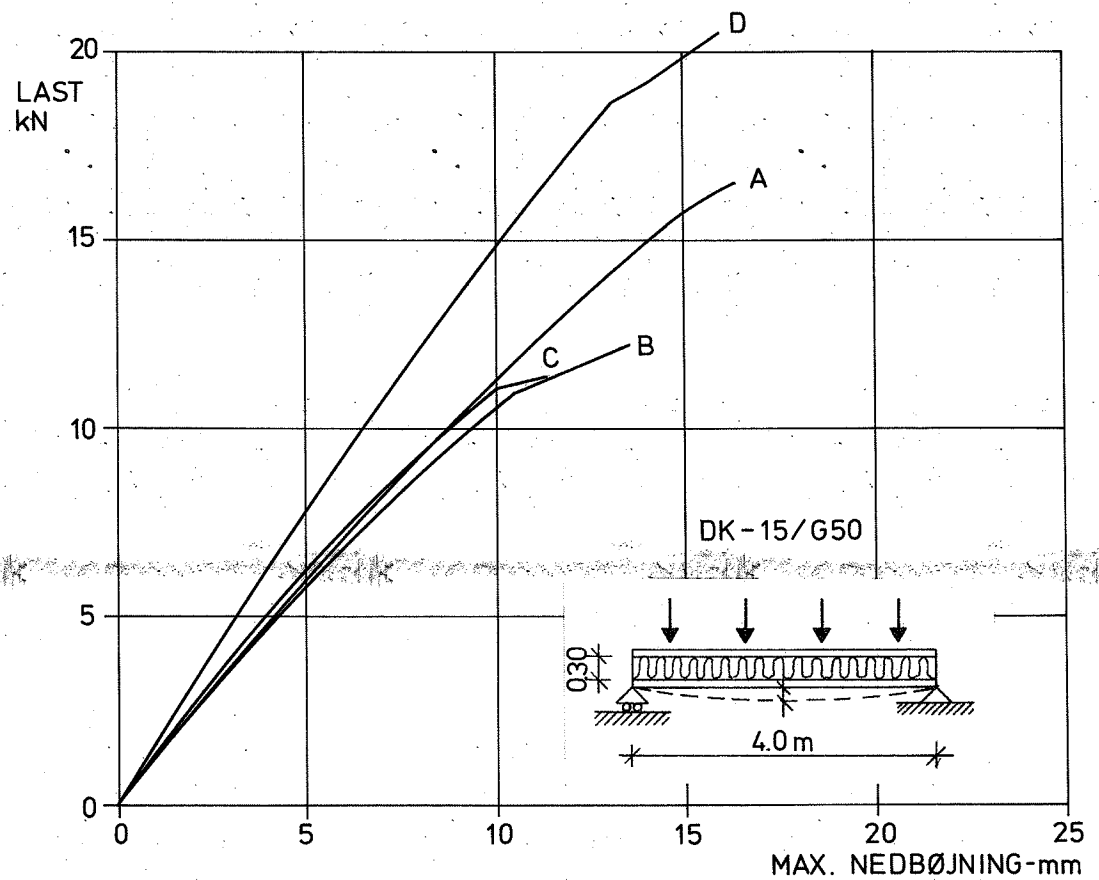
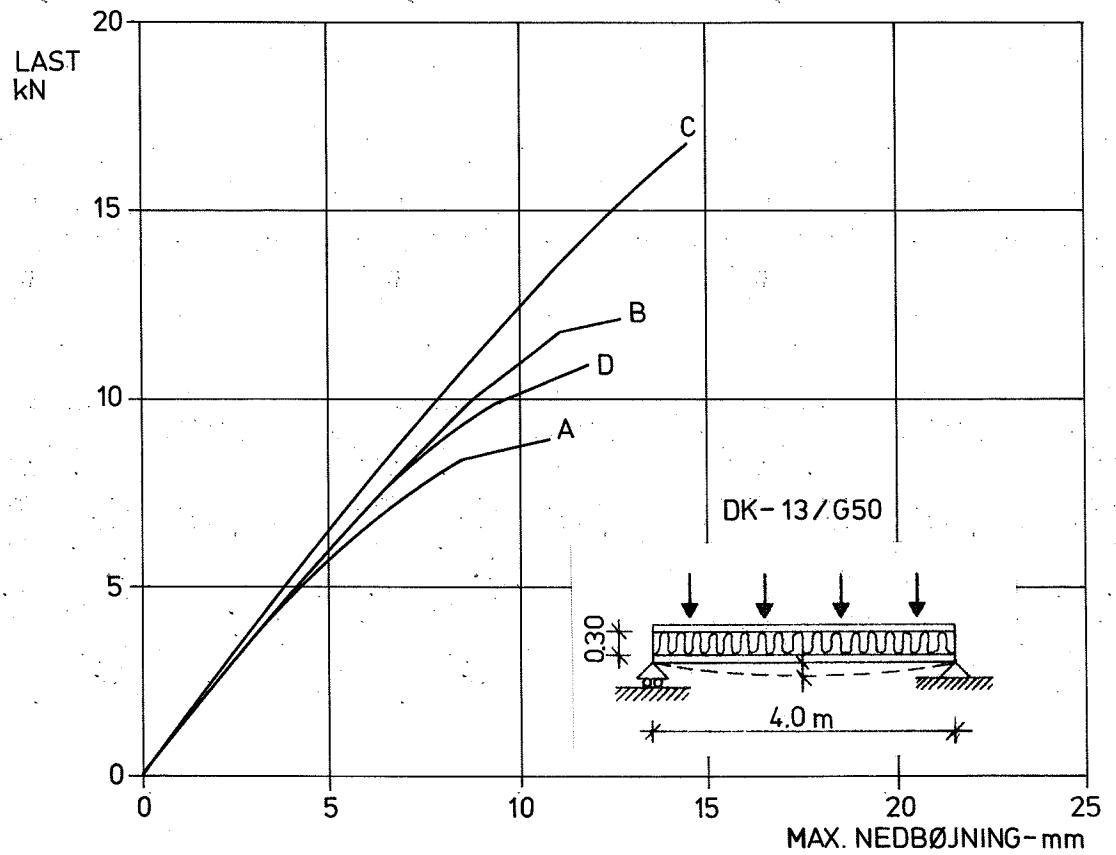
ARBEJDSKURVER FOR ELEMENTER: DK-7,-8,-11,OG -12



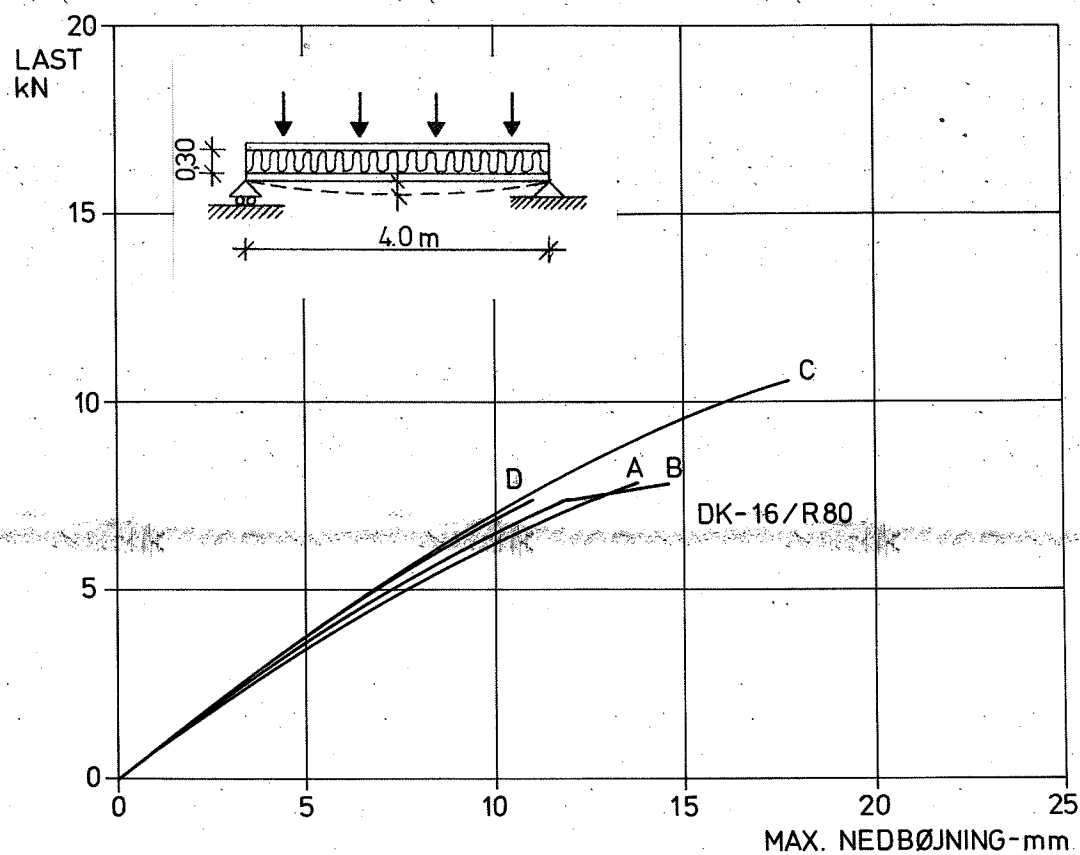
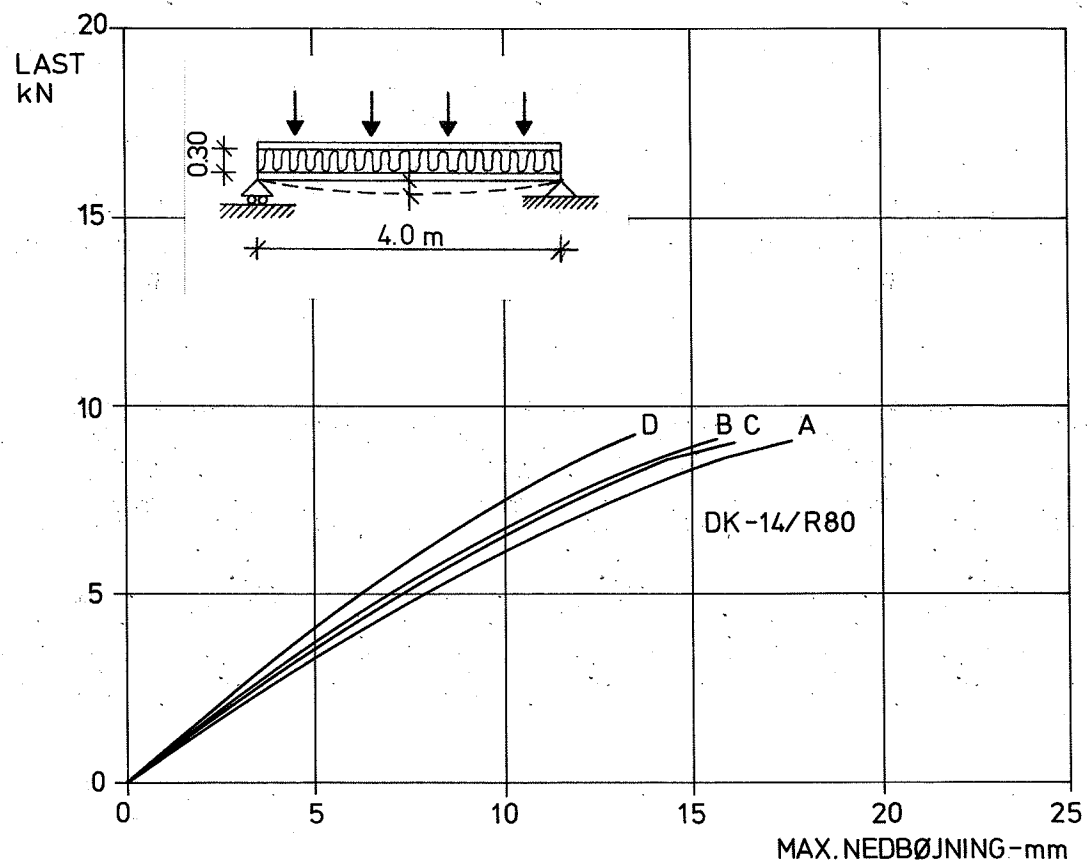
ARBEJDSKURVER FOR ELEMENTER: DK-9, OG-10



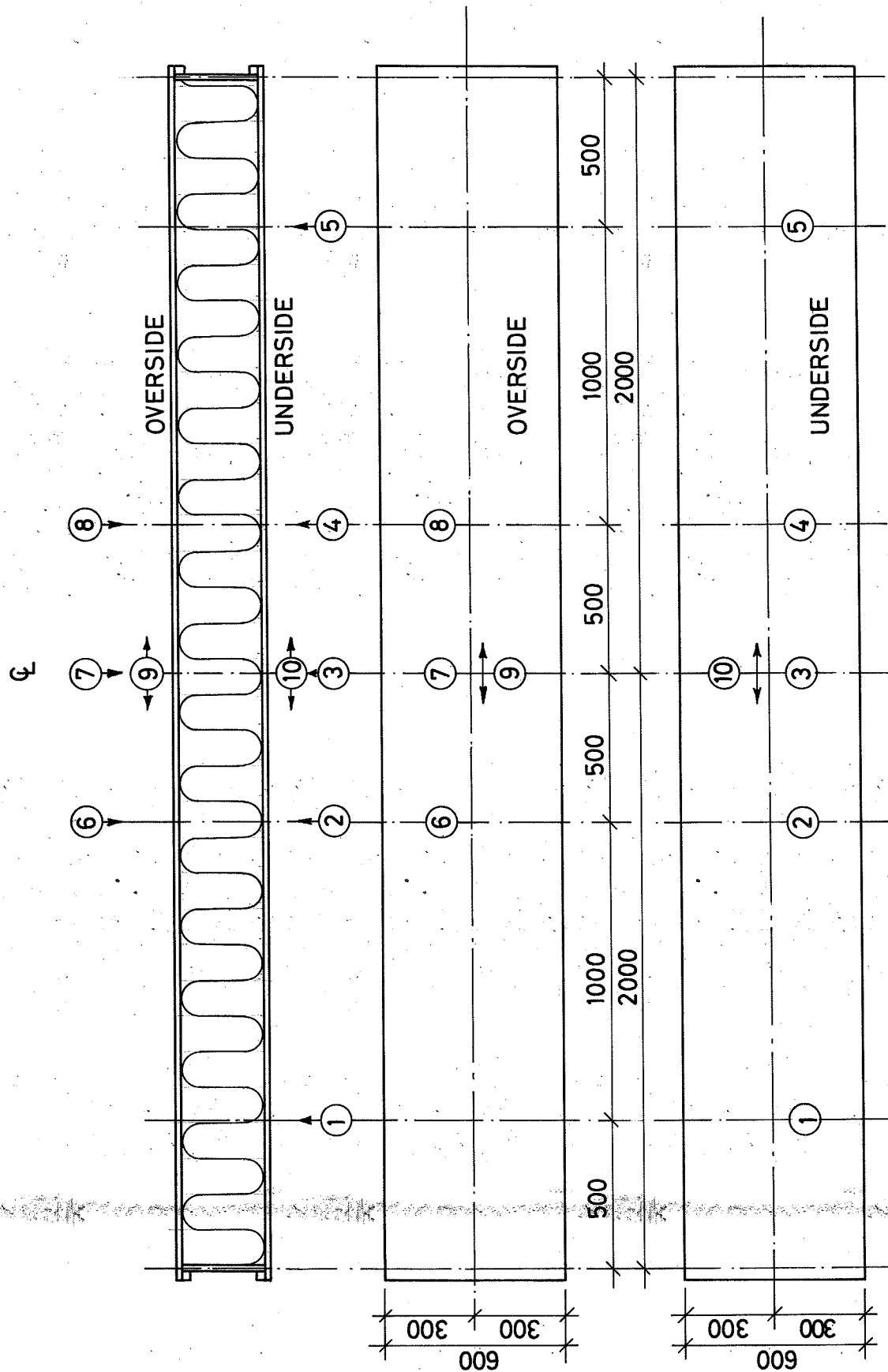
ARBEJDSKURVER FOR ELEMENTER: DK-13 OG-15



ARBEJDSKURVER FOR ELEMENTER: DK-14 OG 16



PLACERING AF MÅLEPUNKTER VED LANGTIDSFORSØG



1-5 NEDBØJNINGSMÅLING PÅ UNDERSIDE ELEMENT

6-8 TYKKELSESMÅLING (SAMMEN MED 2-4)

9-10 MÅLING AF OVERFLADETØJNINGER (PFENDER MED MÅLESTRÆKNING: 100 mm)