

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **128**

LAURITZ RASMUSSEN

**MINERALULDBASEREDE
SANDWICHELEMENTER
MATERIALEPRØVNING AF MINERALULD**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1978

MINERALULDBASEREDE SANDWICHELEMENTER

MATERIALEPRØVNING AF MINERALULD

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 128 · Instituttet for Husbygning · 1978

FORORD

Nærværende rapport indgår i en serie del-rapporter vedrørende undersøgelsen af mineraluldbaserede sandwichelementer anvendt som bærende bygningsdel.

Udover den isolerende funktion indgår mineralulden i sandwichkonstruktionen som kraftoptagende materiale og en nærmere undersøgelse af mineraluldens mekaniske egenskaber har været påkrævet.

I tilknytning hertil har det været nødvendigt at udvikle nye prøvemethoder til simulering af de påvirkninger af ulden, der optræder i den egentlige konstruktion.

Udviklingen og afprøvningen af egnede prøvemethoder er desuden et led i mit arbejde for erhvervelsen af den tekniske licentiatgrad.

De undersøgte materialeparametre er afgrænset til de parametre, der er nødvendige for den teoretiske vurdering af sandwichkonstruktionens styrke- og deformationsforhold og for vurderingen af mineraluldens langtidsegenskaber i relation til den praktiske anvendelse (holdbarhed, udmattelse m.v.).

I undersøgelserne er tilstræbt en parallel undersøgelse af mineraluld fra de to producenter Rockwool A/S og Superfos Glasuld a/s.

Under planlægningen af de fuldskala-forsøg med sandwichelementer, hvortil disse materialeundersøgelser knytter sig, blev der foretaget en udvælgelse blandt standard-produkterne med rumvægte over 50 kg/m^3 ("hård" mineraluld).

De udvalgte mineraluldsprodukter kommer fra løbende produktioner og er således ikke på nogen måde optimeret med henblik på denne specielle anvendelse. En videreudvikling af procesteknologi, materialesammensætning m.v. vil sandsynligvis give betydeligt bedre egenskaber.

Lyngby, juni 1978

Lauritz Rasmussen

INDHOLDSFORTEGNELSE

Side

FORORD	1
INDHOLDSFORTEGNELSE	2
RESUMÉ	3
1. INDLEDNING	5
2. TRÆKPRØVNING	9
2.1 Prismatisk prøvelegeme	9
2.2 Timeglasformet prøvelegeme	16
3. TRYKPRØVNING	19
4. FORSKYDNINGSPRØVNING	25
4.1 ASTM-standard ("single block")	26
4.2 Forskydningsramme (koblede flanger)	29
4.3 Rhombemetoden	40
4.3.1 Lukket ramme for træk-belastning	44
4.3.2 Diagonal trykbelastning	45
4.4 Trækbelastet prisme med indsnit	48
4.5 Sammenligning og vurdering af prøvemetoder.	51
5. SAMMENFATTENDE VURDERING AF KORTTIDSEGENSKABER	55
6. KRYBEFORSØG (STATISK LANGTIDSLAST)	59
7. UDMATTELSESFORSØG (DYNAMISK LAST)	70
8. ACCELEREREDE ÆLDNINGSFORSØG (TEMPERATUR-/FUGTBELASTNING)	73
9. LITTERATURREFERENCER	80
SUMMARY	81

RESUMÉ

I rapporten behandles mineraluldens mekaniske egenskaber i relation til anvendelsen af mineraluld som kernemateriale i bærende sandwichkonstruktioner.

Mineralfibrenes planparallelle gitterstruktur og fibrenes indbyrdes sammenbinding giver mineralulden betydelige styrke- og stivhedsegenskaber parallelt med fiberplanet. Disse egenskaber udnyttes i sandwichkonstruktionen ved at opskære mineralulden til lameller og lime dem til flangepladerne med fiberplanet orienteret vinkelret herpå.

Korttidsegenskaber

Mineraluldens egenskaber (i fiberplanet) er undersøgt for henholdsvis træk, tryk og forskydningspåvirkninger og i tilknytning hertil er undersøgt/udviklet egnede prøvemethoder.

Undersøgelsen omfatter ialt 6 mineraluldtyper, 3 typer Rockwool og 3 typer Glasuld.

Generelt set udviser mineralulden lineær-elastiske egenskaber ved både træk, tryk og forskydning med en proportionalitetsgrænse omkring 50-60% af tilhørende brudstyrke.

Resultaterne af korttidsprøvningerne er gengivet i nedenstående tabel.

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

Mineraluldens korttidsegenskaber ved træk, tryk og forskydning (i fiberplanet).
Konditionering: 20°C - 65%RF.
Angivne værdier er middelværdier (ca. 10 prøver).
Variationskoefficienter er angivet i parentes.
 γ angiver rumvægten i kg/m³.

Trækprøvninger på emner udskåret direkte af fabriksfremstillede sandwichelementer viste, at trækstyrken i limforbindelsen mellem mineraluld og flangeplade er 15-45% lavere end mineraluldens trækstyrke.

Langtidsegenskaber

Udover prøvninger med korttidsbelastning er udført forsøg til belysning af mineraluldens krybeegenskaber under påvirkning af statisk langtidsbelastning (forskydnings-spændinger) og forsøg med dynamiske påvirkninger (udmattelsesforsøg).

Resultaterne af krybeforsøgene beskrevet gennem analytiske modeller (hyperbelfunktioner) viser, at for belastningsniveauer op til ca. 30% af korttidsbrudstyrken udgør krybningen ca. 12-18% af initialdeformationen. Forskydningsstivheden bestemt ved korttidsforsøg reduceres herved med ca. 11-15% under statisk langtidslast.

Endvidere er omtalt accelererede ældningsforsøg til belysning af mineraluldens holdbarhed under indvirkning af vekslende temperatur- og fugtpåvirkninger. Sidstnævnte er udført på Statens Byggeforskningsinstitut og er detaljeret beskrevet i litt. [1].

1. INDLEDNING

Mineraluld er en fællesbetegnelse for isoleringsprodukter, der består af uorganiske fibre indbyrdes forbundet med et bindemiddel.

Mineraluld, som udelukkende anvendes til isoleringsformål, kendetegnes almindeligvis ved rumvægten. Når man samtidig anvender mineraluld som kernemateriale i en sandwichkonstruktion, er en rumvægtsangivelse langt fra tilstrækkelig til at udtrykke de egenskaber, man har brug for.

Uldens styrke- og stivhedsegenskaber afhænger især af følgende parametre:

- fibermængde (rumvægt)
- fiberdiameter og -længde
- fiberorientering
- bindemiddeltpe, -mængde og -fordeling

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 fabrikanten at tilvejebringe de nødvendige oplysninger om uldens styrke- og stivhedsegenskaber.

I de undersøgte mineraluldprodukter er rumvægten den eneste variable, og i denne rapport er mineralulden alene karakteriseret ved rumvægten, der primært er bestemt af fibermængden.

Det skulle herved være muligt at sammenligne de forskellige produkter (rumvægte) af samme fabrikat med de i det følgende mere detaljeret beskrevne sammensætninger.

Rockwool

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

Indholdet af fenolharpiks er ca. 2% og olieindholdet ca. 0,2%, begge dele vægtprocent. Ulden produceres i plader med følgende tykkelser for de forskellige

rumvægte:

Rockwool	80 kg/m ³	~ 100 mm
Rockwool	100 kg/m ³	~ 80 mm
Rockwool	120 kg/m ³	~ 60 mm

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

Glasuld

Glasuld-mineralulden er produceret efter normal glasrecept i en såkaldt grovfiberproduktion. Fibrene er karakteriseret ved en gennemsnitsdiameter omkring 12 μ og en længdefordeling med ca. 10% omkring 1 mm, ca. 40% fra 1-3 mm, ca. 40% fra 3-10 mm og ca. 10% fra 10-100 mm (i middel ca. 9 mm).

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

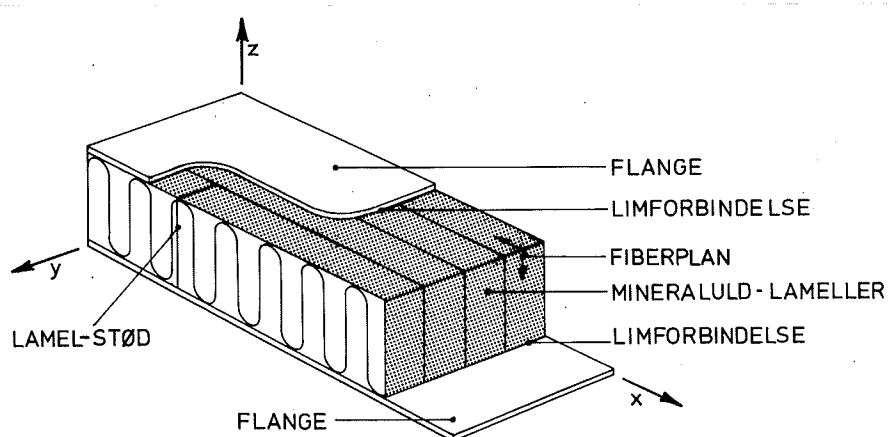
Ulden produceres i plader med nominel tykkelse på 100 mm og rumvægte henholdsvis 50, 70 og 90 kg/m³, i det følgende betegnet G50, G70 og G90.

Lamelprincippet

Mineraluldens evne til at optage belastninger afhænger af fiberorienteringen.

Ved en traditionel produktion lejres fibrene tilnærmelsesvis i flader parallelt med mineraluldpladens plan (fiberplanet).

Mineraluldens styrke- og stivhedsegenskaber i fiberplanet udnyttes i sandwichkonstruktionen ved at opskære mineraluldpladerne til lameller, så fiberplanet bliver orienteret vinkelret på flangerne (se figur 1.1).



Figur 1.1:

Mineraluld (lameller) som kernemateriale i en 3-lags sandwichkonstruktion. På grund af lamellerens begrænsede længde er det nødvendigt at udføre stød. Lamellerne anbringes i et passende forbandt, så virkningen af svækkelserne i stødene minimeres.

Fibrene er orienteret parallelt med x-z-planet.

Vinkelret på fiberplanet (y-retningen) kan der stort set ikke overføres kræfter gennem ulden. Sandwichkonstruktioner baseret på kerner af lamelskåret mineraluld må altså primært anvendes som enkeltspændende konstruktionselementer med plane spændingstilstande (søjle-/bjælkeelementer).

Materialleegenskaber

Mineraluldens funktion i sandwichkonstruktionen er at stabilisere flangepladerne mod udknækning og hindre, at flangerne glider i forhold til hinanden (forskydes).

De mekaniske egenskaber, der efterspørges hos materialet, er således i første række

- styrke og stivhed ved direkte træk og tryk vinkelret på flangerne
- styrke og stivhed ved forskydning vinkelret på flangerne (i fiberplanet).

Egenskaberne overfor bøjning er af mindre interesse, idet det viser sig, at mineraluldens bidrag til sandwichkonstruktionens bøjningsstivhed er forsvindende i forhold til bidraget fra de to flanger.

Limforbindelsen

Herudover indeholder konstruktionen en limforbindelse (mellem mineraluld og flange), hvis styrke er helt afgørende for konstruktionens virkemåde.

Produktionsteknisk er det endnu vanskeligt udenfor laboratoriet at etablere en limforbindelse med samme styrke som mineralulden. I forbindelse med undersøgelsen af de enkelte materialeparametre er der udført parallelle forsøg til belysning af de svækelser, der uvægerligt vil være i limforbindelsen, når sandwichelementerne fremstilles industrielt.

I de udviklede prøvemethoder er det i høj grad tilstræbt at kunne anvende prøvelegemer udskåret direkte af konstruktionen, så samvirkningen mellem uld og flanger samtidig bliver belyst.

Til disse prøvninger blev hos Tåsing Træ a/s fremstillet 6 sandwichelementer (1,20×2,40 m), svarende til de 6 beskrevne mineraluldtypeper med 100 mm kernetykkelse og flanger af 12 mm krydsfinér.

Til limforbindelsen blev anvendt en én-komponent polyurethanlim, der hærder til en kemikalie-, vand- og kogefast polyureaethan. Udhærdningen foregår ved hjælp af luftens og materialernes fugtighed.

Limmængden er ca. 300 g/m^2 i hver forbindelse.

Ved fremstilling af prøvelegemer i laboratoriet blev anvendt en tokomponent polyurethanlim i en mængde på ca. 1000 g/m^2 . Med de laboratoriefremstillede prøvelegemer tilstræbes en limforbindelse med større styrke end selve ulden.

I praksis vil det være urealistisk at anvende så store limmængder af økonomiske årsager. Det er således ønskeligt at få iværksat et udviklingsarbejde med henblik på en optimering af limforbindelsens kvalitet gennem valg af limtype, limmængde og procesteknologi.

2. TRÆKPRØVNING

Ved bestemmelsen af mineraluldens egenskaber ved enakset trækpåvirkning er anvendt to forskellige metoder.

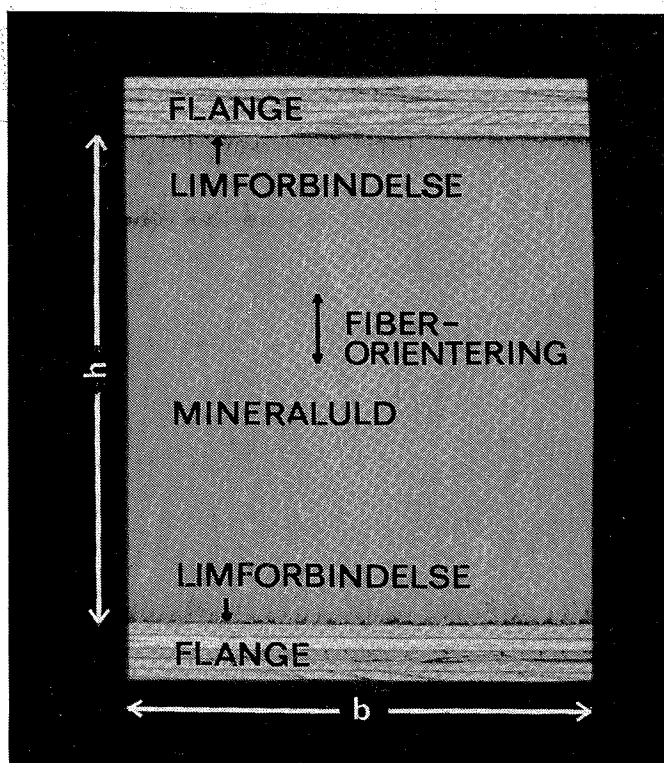
Den ene baseres på et primatisk prøvelegeme trækpåvirket gennem pålimede plader, den anden på et timeglasformet prøvelegeme, hvor bruddet placeres i det reducerede tværsnit.

Førstnævnte metode åbner mulighed for samtidig måling af trækstyrke og -stivhed (E-modul) samt måling af limforbindelsen trækstyrke, mens sidstnævnte kun kan anvendes til bestemmelse af mineraluldens styrke.

Metoden er kun medtaget her, fordi den er simpel og hurtig i brug og sandsynligvis anvendelig i en produktionskontrol.

2.1 Prøvning med prismatisk prøvelegeme

Princippet i prøvningen går ud på at trækpåvirke en prismatisk mineraluldklods gennem pålimede "stive" plader. Prøvelegemet, som vist på figur 2.1, kan udskæres direkte af et sandwichelement, eller fremstilles



Figur 2.1:

Prismatisk trækprøvelegeme med kvadratisk tværsnit.

enkeltvis i laboratoriet, så eventuelle svækkelser i limforbindelsen undgås.

Kræfterne påføres, så de virker gennem normalsnittenes tyngdepunktslinie. Alligevel kan det være svært at sikre, at normalspændingen er jævnt fordelt over ethvert snit. Spændingsvariationer vil primært optræde ved endefladerne (limforbindelse) og et stykke fra endefladerne kan der med rimelighed antages at være en homogen spændingstilstand.

Prøvelegemets højde (længde) bør generelt set svare til sandwichkonstruktionens tykkelse.

I disse prøvninger er højden overalt sat til 100 mm.

For hver af de 6 undersøgte mineraluldtypeper er der lavet 11 prøver udskåret direkte af 120 cm brede sandwichelementer med 12 mm krydsfinérflanger.

Prøvelegemerne er udskåret på tværs af elementlængden (lamelretningen), så prøverne udtages fra forskellige lameller.

Herudover er der i laboratoriet fremstillet 6×5 prøver af samme mineraluldtypeper, til bestemmelse af uldens faktiske trækstyrker.

Konditionering

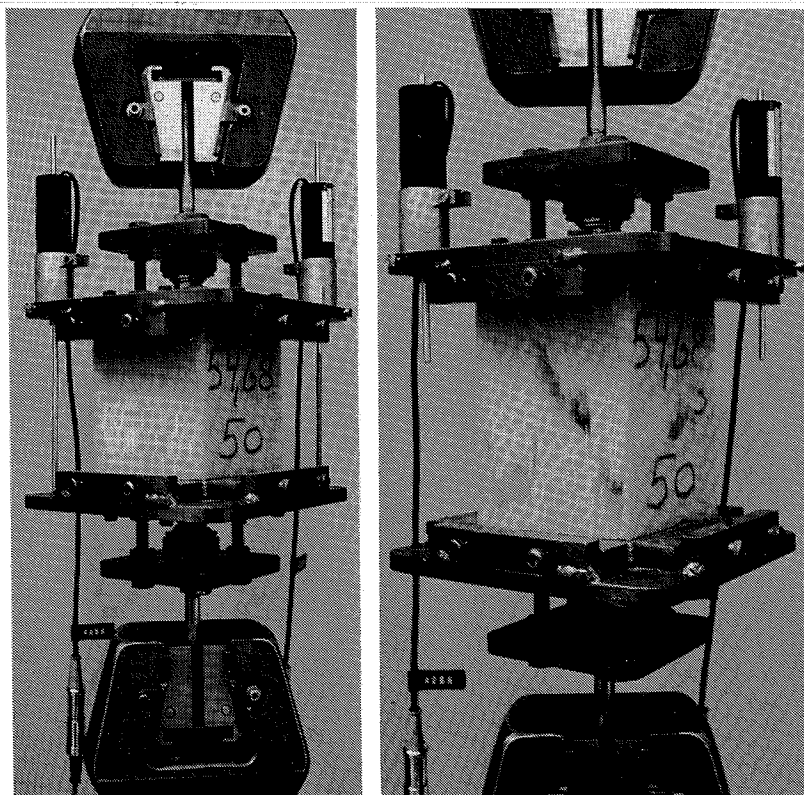
Alle prøvelegemer er inden prøvningen konditioneret ved en temperatur på 20°C og en relativ fugtighed på 65%.

Vanddampdiffusionen igennem mineralulden foregår dog så hurtigt, at ligevægtsfugtindholdet let forstyrres under selve afprøvningen, der foregår under laboratoriets klimaforhold ved ca. 20°C og 50%RF.

Lastpåføring

For at simplificere afprøvningen er der konstrueret to kæber, der kan gribe om prøvelegemets stive flanger, så prøvningen kan foregå i en almindelig trækprøvemaskine (se figur 2.2). Belastningen overføres ved friktion mellem trækkæber og kanten af den pålmede stive plade.

Denne måde at påføre belastningen giver stort set ingen mekaniske forstyrrelser af prøvelegemet inden prøvningen og simplificerer de mange prøvninger, der er nødvendige af hensyn til den statistiske vurdering.



Figur 2.2:

Prismatisk prøvelegeme opspændt i trækkæber (før og efter brud).

Alternativt kunne trækbelastningen overføres gennem skruer i den pålimede flange eller gennem en ekstra limforbindelse.

Trækbelastningen påføres kontinuert ved en kontant deformationshastighed på 0,2-0,5 mm pr.minut, afpasset så bruddet optræder efter 3-6 minutter.

Målinger

Under hver prøvning registreres sammenhørende værdier af belastning og deformation. Mineraluldens forlængelse registreres ved måling af flangepladernes indbyrdes glidning ved hjælp af 2 elektriske flytningspotentiometre. Træktøjningen, ε , og trækspændingen, σ , udtrykkes ved:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} \quad , \quad \sigma = \frac{P}{b^2}$$

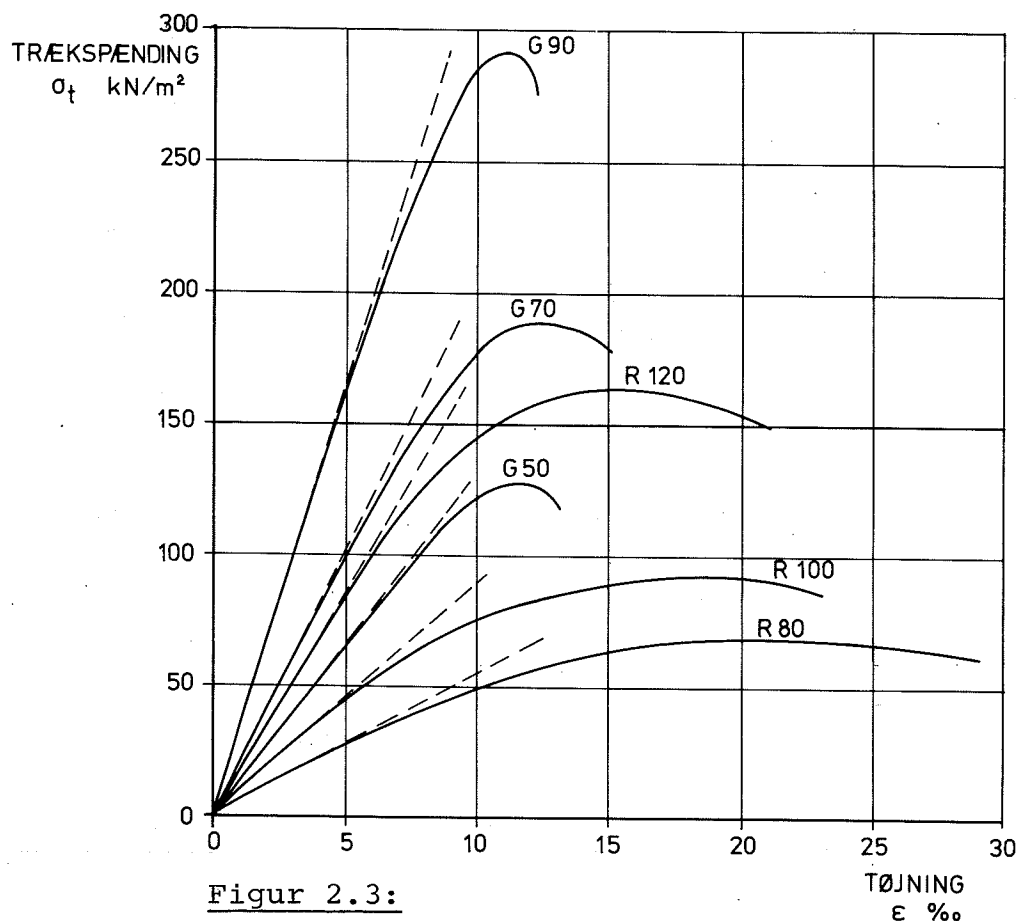
hvor h er prøvens højde, Δh højdetilvæksten, P den påførte kraft og b prøvens bredde.

Mineraluldens elasticitetsmodul, E , udtrykkes ved hældningen af arbejdslinien i det lineærelastiske område som:

$$E = \frac{h}{b^2} \frac{P}{\Delta h}$$

Resultater

På figur 2.3 er vist typiske arbejdslinier for de 6 undersøgte mineraluldtyper.



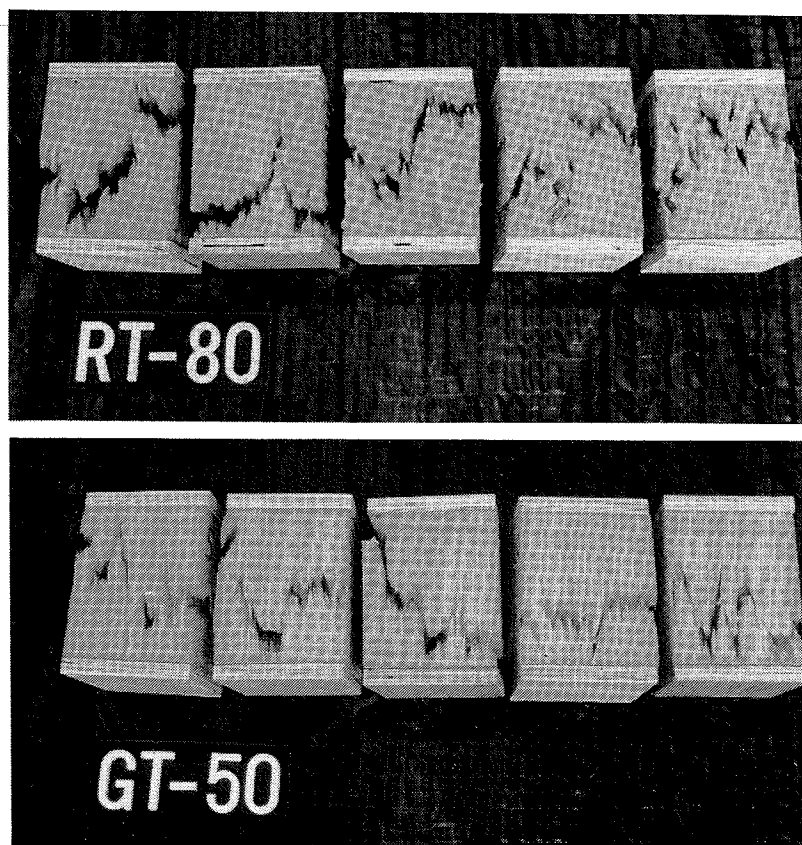
Figur 2.3:

Typiske arbejdslinier for enakset træk af de 6 undersøgte mineraluldtyper.

Arbejdsliniernes forløb er principielt ens for de undersøgte mineraluldtyper.

Materialet er lineært elastisk op til proportionalitetsgrænsen, der for alle typer ligger omkring 50-60% af trækbrudspændingen.

Brudtøjningen varierer mellem 10 og 25‰.



Figur 2.4:

Typiske billeder af trækbrud i mineraluld.

Resultaterne af de udførte trækprøvninger er gengivet i tabel 2.1 og 2.2. For hver enkelt prøvelegeme er foretaget en rumvægtsbestemmelse i tabellerne angivet ved en middelværdi og en variationskoefficient (relativ spredning) i %.

Mineraluld	Antal prøver	Rumvægt (aktuel)		Styrke (i uld)		Stivhed (E-modul)	
		γ kg/m ³	Var. koeff. %	σ_t kN/m ²	Var. koeff. %	E_t kN/m ²	Var. koeff. %
R80	8	85	4	68	18	5890	38
R100	7	107	3	83	11	8130	14
R120	7	136	8	164	28	18490	24
G50	8	55	4	135	12	13850	12
G70	5	74	6	196	22	22960	29
G90	5	96	1	300	16	35700	17

Tabel 2.1:

Trækprøvning af mineraluld (ingen svækkelser i limforbindelse.

Hvis bruddet er indtrådt i limforbindelsen, er prøven kasseret.

Mineraluld	Antal prøver	Rumvægt (aktuel)		Styrke (gn.lim)		Stivhed (gn.lim)	
		γ kN/m ³	Var. koeff. %	$\sigma_{t,L}$ kN/m ²	Var. koeff. %	$E_{t,L}$ kN/m ²	Var. koeff. %
R80	11	83	7	48	44	5760	33
R100	11	106	6	67	48	7630	24
R120	11	126	7	96	32	13330	23
G50	11	53	5	113	12	12220	19
G70	11	70	11	126	24	20040	32
G90	11	109	15	164	32	38380	25

Tabel 2.2:

Trækprøvning af mineraluld + limforbindelse.
E-modulen er her en fiktiv størrelse knyttet til prøvelegemets aktuelle højde (100 mm).

Prøvningerne viser, at limforbindelse, som udført i en praktisk produktion, reducerer trækstyrken med 15-45%, medens E-modulen (hældningen af arbejdslinien i det lineær-elastiske område) stort set er uforandret.

Mineraluldens styrke- og stivhedsegenskaber (tabel 2.1) viser en eksponentiel sammenhæng med mineraluldens rumvægt (se i øvrigt materialespecifikation i kapitel 1).

Analytisk model

Som model for afhængigheden af rumvægten er anvendt en eksponentialfunktion af typen:

$$s = \alpha \gamma^\beta$$

hvor s er mineraluldens styrke eller stivhed, γ den aktuelle rumvægt (målt i laboratorium) og α og β er empiriske konstanter.

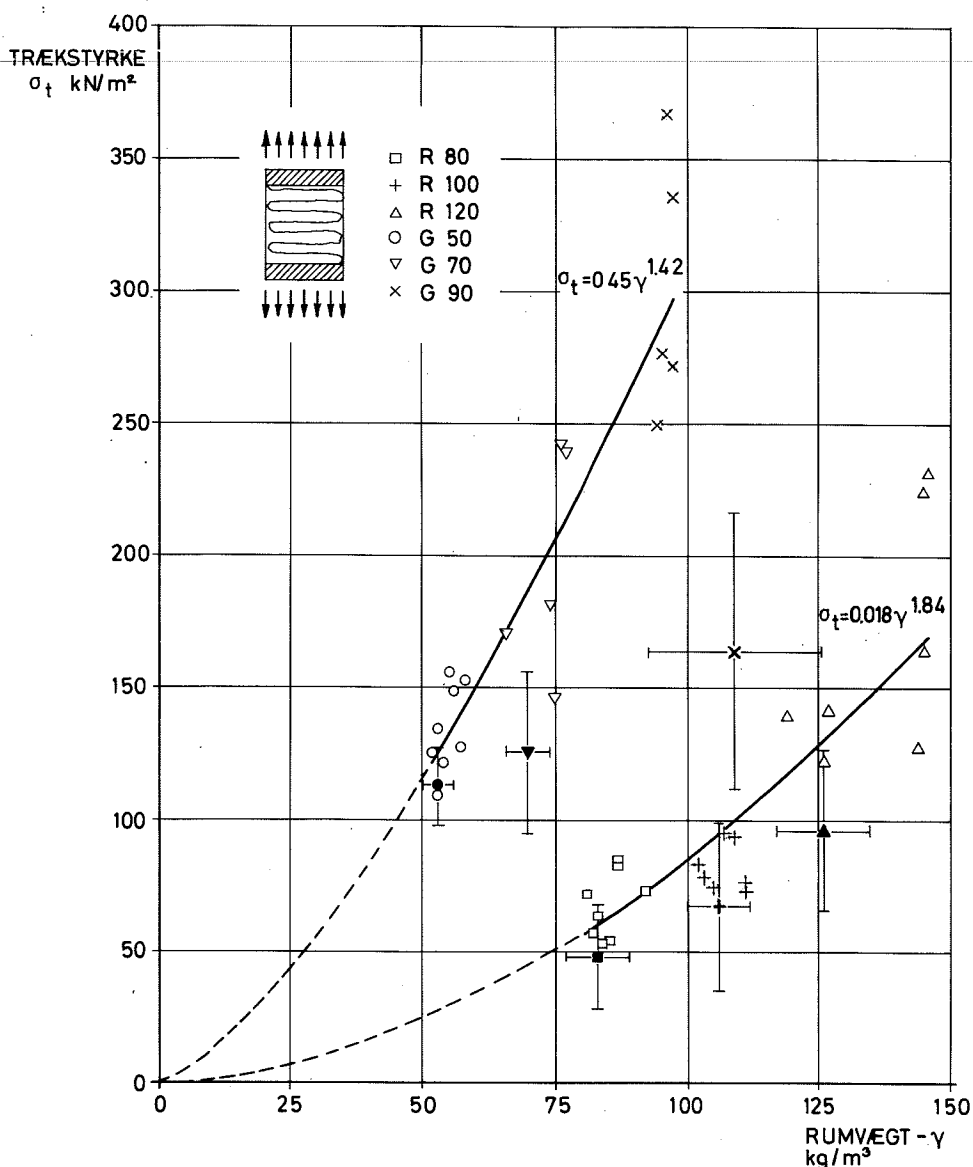
Ved logaritmering af udtrykket fås:

$$\log s = \log \alpha + \beta \log \gamma$$

D.v.s. afbildes $\log s$ som funktion af $\log \gamma$ fås en ret linie med hældning β og skæring med $\log s$ -aksen i $(0, \log \alpha)$.

Parametrene α og β kan altså bestemmes ved lineær regression.

Modellerne for de her undersøgte uldtyper er indtegnet på figur 2.5 og 2.6 sammen med de aktuelle måleresultater.



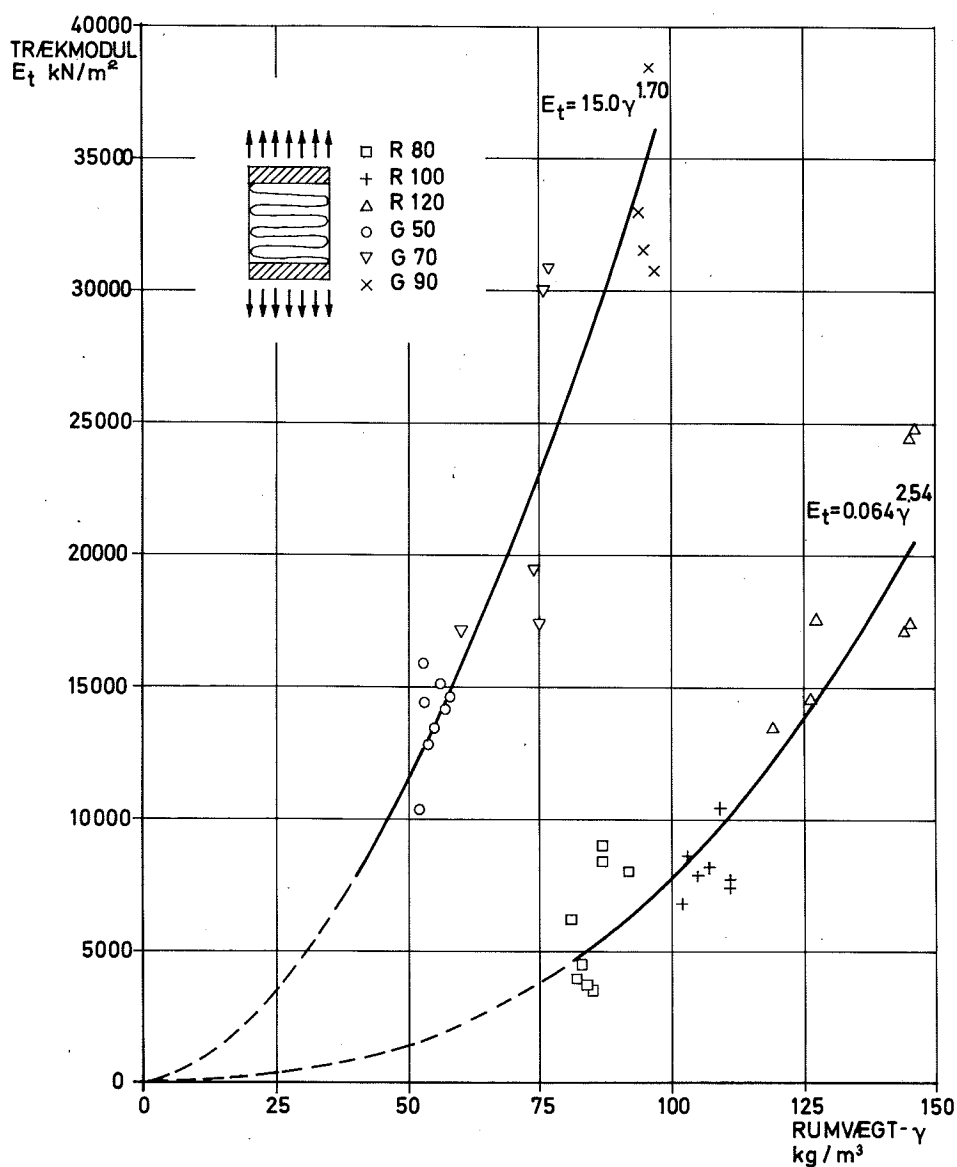
Figur 2.5:

Mineraluldens trækstyrke som funktion af rumvægten.

Trækstyrken i limforbindelsen svarende til de seks mineraluldtyper er indtegnet som middelværdier (sorte punkter) med angivelse af spredninger på henholdsvis rumvægt (vandret streg) og styrke (lodret streg).

Selv om egenskaberne for de to mineraluld-produkter er indtegnet sideordnet på figurerne, må der dog advares mod direkte sammenligning på grund af de her udvalgte produkters varierende sammensætning (se kapitel 1).

Sammenligning af figur 2.5 og 2.6 viser, at både trækstyrken og trækstivheden afhænger af rumvægten på samme måde, således at der for hver af de undersøgte produkter er en næsten entydig sammenhæng mellem rumvægt, styrke og elasticitetsmodul.

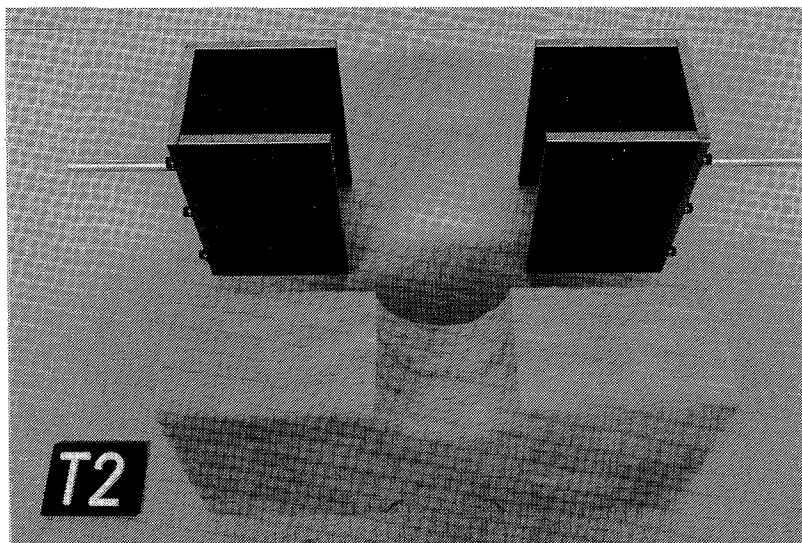


Figur 2.6:

Trækstivhedens afhængighed af rumvægten.

2.2 Timeglasformet prøvelegeme

Prøvemethoden bygger på anvendelsen af et timeglasformet prøvelegeme, hvor trækbelastningen påføres de større tværsnit ved enderne, så eventuelle spændingskoncentrationer udlignes. Det jævne forløb fra det større til det mindre tværsnit har til formål at eliminere risikoen for kærnvirkning, så der i det reducerede tværsnit, hvor bruddet ønskes placeret, kan regnes med en homogen spændingstilstand, d.v.s. at alle fibre i tværsnittet er lige hårdt påvirket.



Figur 2.7:

Timeglasformet trækprøvelegeme og stålkæber (nåleplader) til overførsel af den centralt angribende trækraft.

På grund af mineraluldens porøse struktur kan trækkræfterne ikke som i en sædvanlig trækprøvemaskine overføres ved friktion. I stedet overføres kræfterne gennem to stålkæber forsynet med nåle, der trykkes ind i mineralulden vinkelret på kraftretningen.

Prøvelegemer

De anvendte prøvelegemer er fremstillet af en 100 mm tyk mineraluldplade med dimensionen 200×400 mm. Det reducerede tværsnit er lavet ved hjælp af et såkaldt "propbor", et cylinderformet bor med uændelig diameter på 100 mm centreret over prøvelegemets kant i midtersnittet.

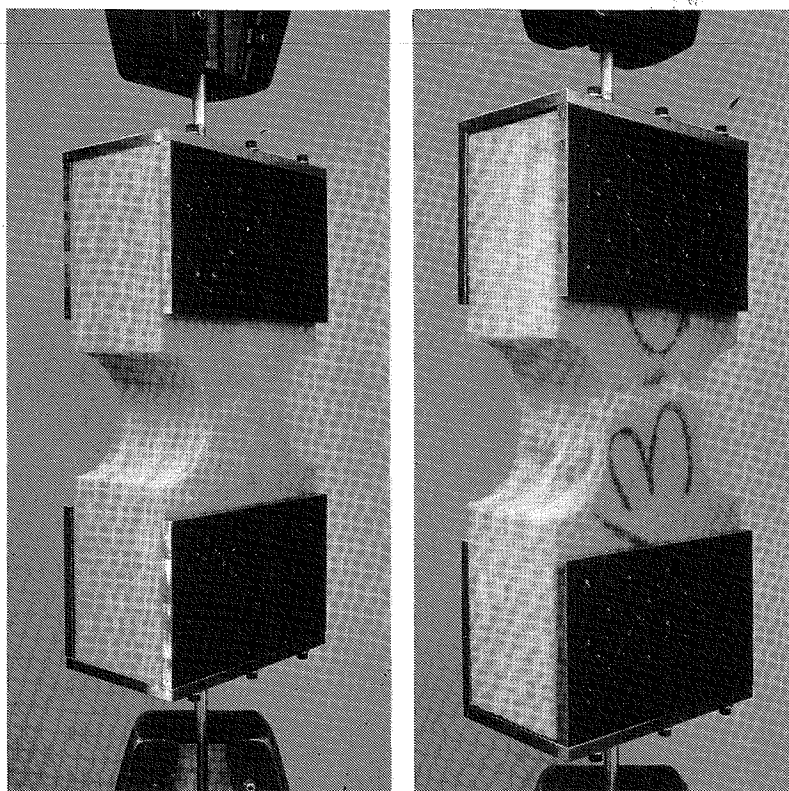
Prøvelegemets mindste tværsnit bliver her ved 100×100 mm.

Fremstillingsmetoden er meget enkel og giver et veldefineret reduceret tværsnit.

I praksis må det dog anbefales at anvende en endnu blødere overgang mellem tværsnitsdelene (større bor-diameter).

Metoden er imidlertid kun medtaget for princippets skyld og derfor ikke gennemarbejdet med hensyn til minimering af eventuelle kærnvirkninger.

Vedrørende prøvelegemets udformning kan i øvrigt henvises til den amerikanske standard, ASTM-C-209-72, litt. [2] eller den tyske standard, DIN 18 165.



Figur 2.8:

Trækprøvelegeme med reduceret tværsnit opspændt i en trækprøvemaskine. Bruddet optræder som et adskillelsesbrud i det reducerede tværsnit.

Metoden er kun afprøvet for 10 prøvelegemer af mineraluld G50, konditioneret som beskrevet i afsnit 2.1. Resultatet af afprøvningerne fremgår af tabel 2.3.

Mineraluld	Antal prøver	Rumvægt (aktuel)		Styrke (i uld)	
		γ kg/m ³	Var. koeff. %	σ_t kN/m ²	Var. koeff. %
G50	10	55	2	139	9

Tabel 2.3:

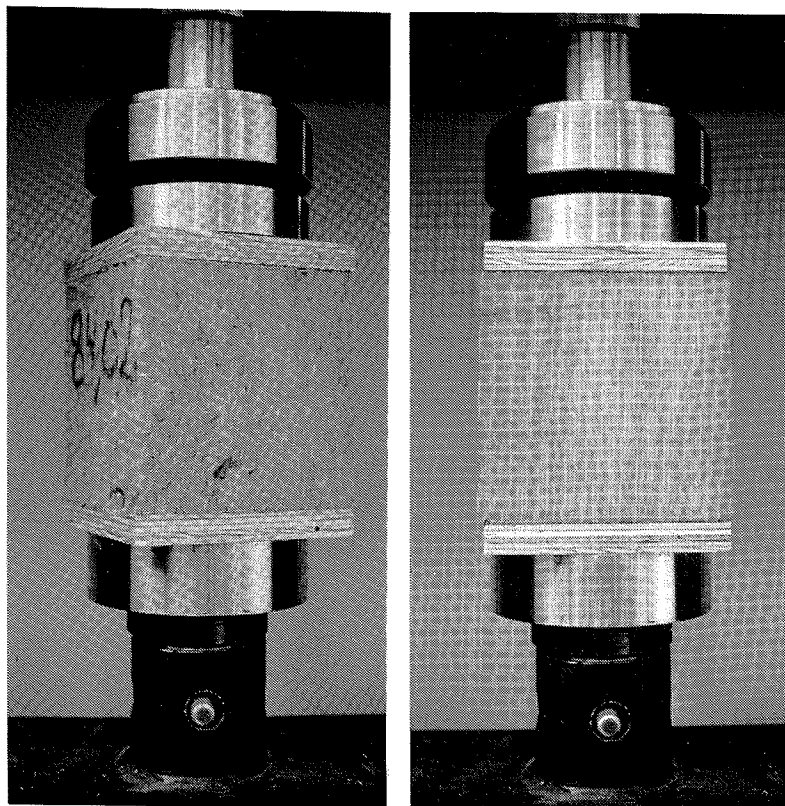
Trækprøvning af mineraluld baseret på timeglasformede prøvelegemer.

En sammenligning af de målte trækstyrker med resultaterne fra den tidligere beskrevne metode, tabel 2.1, viser fin overensstemmelse mellem de to prøvemethoder.

3. TRYKPRØVNING

Prøvningerne blev udført på prismatiske prøvelegemer, som beskrevet i afsnit 2.1 (se figur 2.1) med et kvadratisk tværsnit på 100×100 mm.

Prøvelegemerne belastes til brud ved en kontinuert kraftpåførsel med en deformationshastighed på 0,2 eller 0,5 mm pr. minut, afpasset så bruddene optræder efter 3-6 minutter.



Figur 3.1:

Trykprøvning af mineraluld (i fiberplanet). Prøvelegemer af henholdsvis R80 og G50.

Visuelt ytrer bruddet sig ved en stukning af mineralfibrene eller i specielle tilfælde som en søjleudknækning af de slanke tværsnitsdele, der kan forekomme, når den trykkede mineraluld er sammensat af flere, tynde lameller som i den egentlige sandwichkonstruktion.

I praksis vil slankhedsforholdet være bestemt af konstruktionens tykkelse (lamelhøjden) og de anvendte lamellers bredde. Prøvningen bør generelt set udføres på prøvelegemer, der modsvarer de faktiske forhold.

Ved udskæringen af prøvelegemer fra de her anvendte fabriksfremstillede elementer er det tilstræbt, at der ikke forekommer tværsnitsdele med kantforhold mindre end 1:4.

Tværudvidelser

Ved sammentrykningen af mineralulden vil der ske en udvidelse i tværretningen. I limforbindelsen mellem mineralulden og flangepladerne kan denne udvidelse ikke uhindret finde sted, prøvelegemet holdes lokalt sammen, hvilket kan give anledning til en forøget styrke og stivhed.

Nogle primitive målinger af mineraluldens tværudvidelser i forhold til længdeændringen (Poissons forhold, ν) viser dog, at tværudvidelserne er næsten forsvindende i forhold til den langsgående sammentrykning ($\nu \approx 0$), således at ovennævnte effekt næppe har stor betydning for mineraluldens styrke og stivhed.

Trykstyrke uden pålimerede plader

Derimod har det vist sig, at brudbilledet og brudmekanismen ændres meget betydeligt, hvis limforbindelsen er helt udeladt, som det er nærliggende at gøre under denne simple trykprøvning.

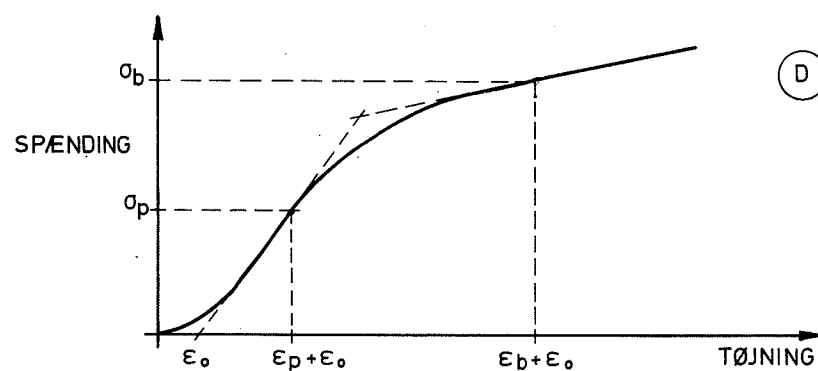
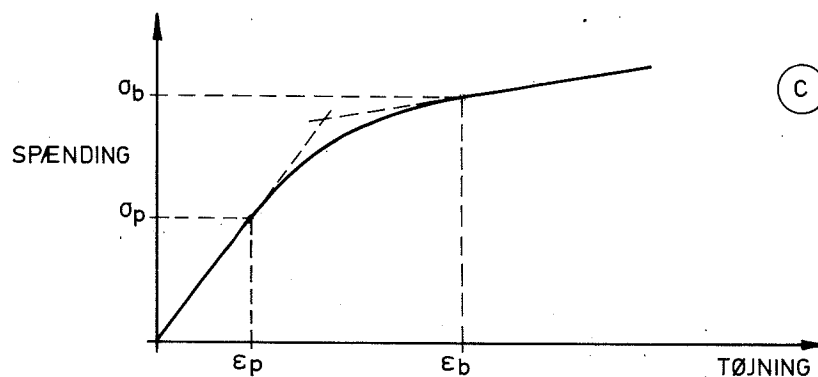
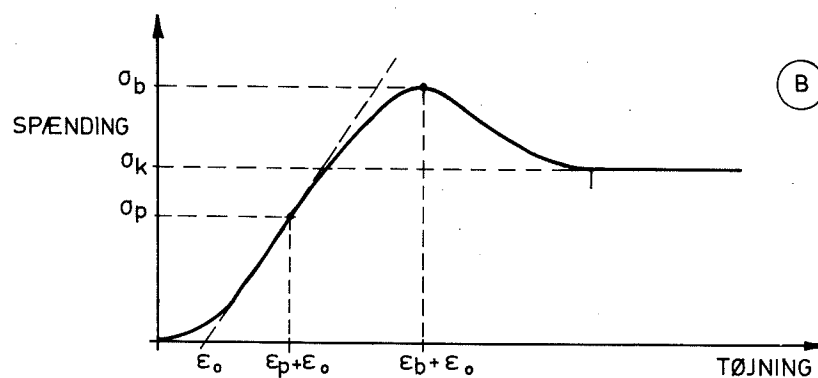
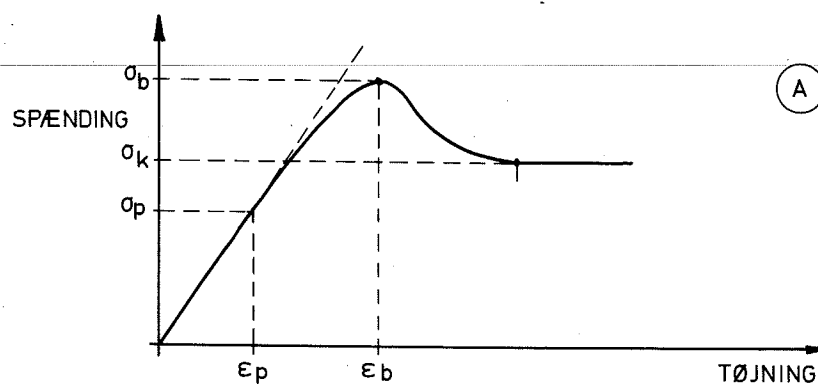
Bruddet udvikler sig herved allerede for meget små belastninger ved en successiv komprimering af mineralfibrene lige under trykkæberne. Styrke- og stivhedsegenskaberne målt under disse vilkår kan være 2-3 gange lavere.

Arbejdslinier

Under afprøvningerne med pålimerede flanger blev der observeret fire principielt forskellige arbejdslinieforløb (spændings-/tøjningskurver), som vist på figur 3.2 A, B, C og D. De fire typer optræder vilkårligt på de 6 undersøgte mineraluldprodukter.

Fælles for de fire arbejdslinietyper er det tilnærmelsesvis retlinede forløb fra 10% til ca. 60% af brudspændingen, hvor materialet udviser lineært elastiske egenskaber. Hældningen af arbejdslinierne i dette område, der ligger til grund for de angivne elasticitetsmoduler, er fastlagt ved lineær regression.

Typerne B og D svarer helt til typerne A og C over det lineærelastiske område, men er kendetegnet ved en karakteristisk initialtøjning, der varierer i størrelse afhængigt af limforbindelsens kvalitet. En dårlig limforbindelse vil sandsynligvis medføre visse spændingsvariationer,



Figur 3.2:

Observerede forløb af mineraluldens trykarbejds-
linier (tryk i fiberplanet). σ_b er brudspændingen
med tilhørende brudtøjning, ε_b . σ_p er proportio-
nalitetsspændingen med tilhørende tøjning, ε_p .
 σ_k er komprimeringsstyrken og ε_0 initialtøjningen.

Arbejdskurverne B, C og D optræder kun i få til-
fælde.

der først udlignes efter en vis deformation (initialtøjning).

Fænomenet betyder i realiteten, at uldens begyndelsesstivhed (for små belastninger) er lig nul, hvilket har overordentlig uheldig virkning i sandwichkonstruktioner, hvor mineraluldens stabiliserende virkning mod foldning i så fald først indtræder efter en given deformation.

Heldigvis forekommer disse initialtøjninger kun i forholdsvis få tilfælde. I de undersøgte prøver varierer disse tøjninger fra 0‰ til 3‰. Brudtøjningerne varierer mellem 10‰ og 25‰ afhængigt af mineraluldstypen.

Brudtøjning med tilhørende brudspænding kan entydigt fastlægges ud fra typerne A og B, hvor arbejdskurven antager et maksimum (vandret tangent), inden flydning i materialet indtræder.

I tilfælde C og D indtræder flydningen gradvis, og arbejdskurven vil på et vist tidspunkt stige svagt efter en ret linie i takt med komprimeringen. Brudspændingen fastlægges i dette tilfælde ved begyndelsespunktet af arbejdskurvens retlinede del (flydepunktet).

Resultaterne af udførte prøvninger fastlagt efter de nævnte principper er gengivet i tabel 3.1.

Konditionering

Prøvelegemerne er konditioneret ved $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 65%RF $\pm$ 3%RF, svarende til de klimaforhold, hvorunder fuldskalaforsøgene med sandwichelementer er udført.

Mineraluld	Antal prøver	Rumvægt (aktuel)		Styrke		Stivhed (E-modul)	
		γ kg/m ³	Var. koeff. %	σ_c kN/m ²	Var. koeff. %	E_c kN/m ²	Var. koeff. %
R80	11	87	7	32	22	3390	33
R100	11	109	7	51	12	5090	18
R120	11	127	5	71	13	7930	28
G50	11	54	6	54	17	5250	19
G70	10	70	8	82	17	5840	12
G90	11	111	15	212	35	21890	33

Tabel 3.1:

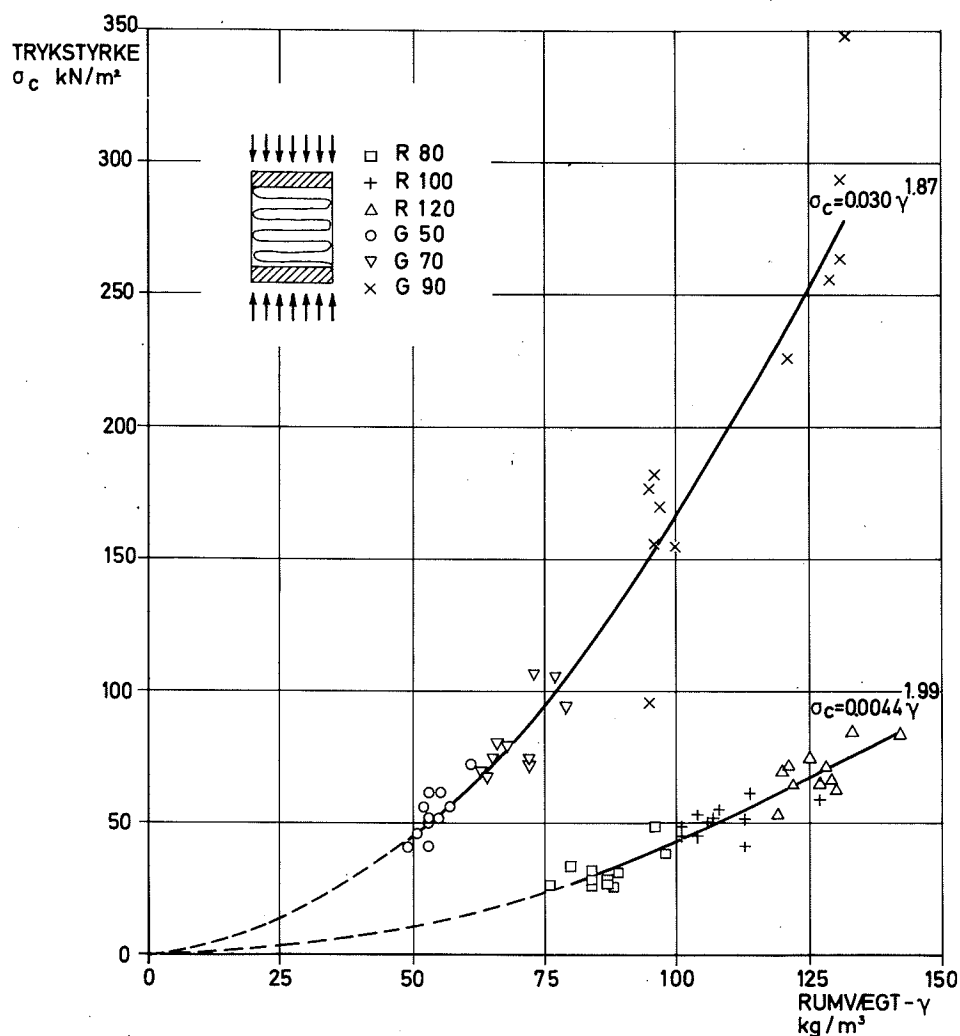
Trykprøvning af mineraluld (i fiberplanet).

Både trykstyrke og trykmodul viser, som resultaterne af trækprøvningerne, en eksponentiel sammenhæng med rumvægten.

For hvert produkt er opstillet et analytisk udtryk for denne sammenhæng.

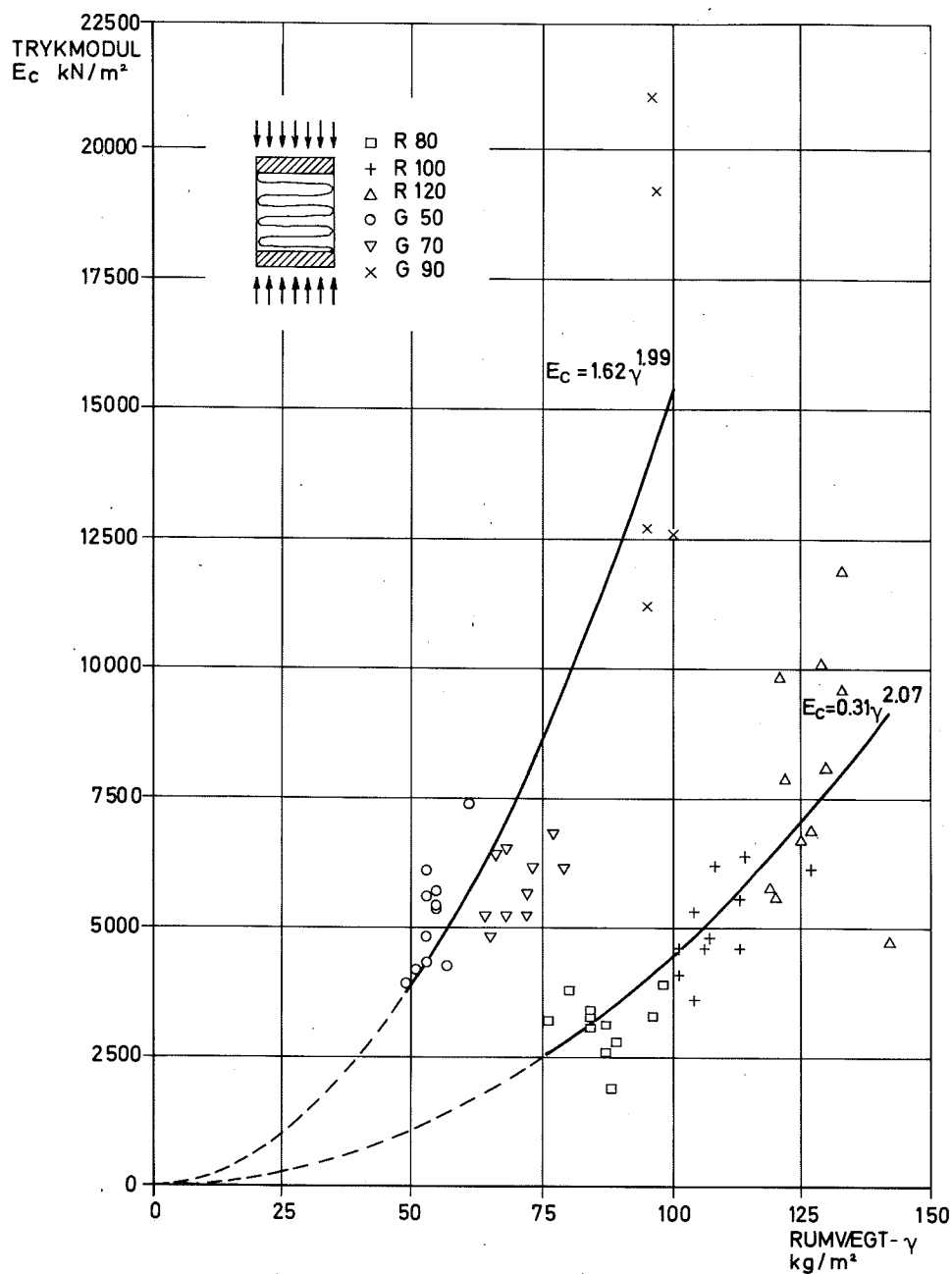
Modellen er analog til den, der er beskrevet i afsnit 2.1, ligesom de empiriske konstanter er bestemt efter samme princip.

Kurverne er indtegnet på figur 3.3 og 3.4 sammen med de aktuelle måleresultater.



Figur 3.3:

Trykstyrkens variation med mineraluldens rumvægt.



Figur 3.4:

Trykmodulens variation med mineraluldens rumvægt.

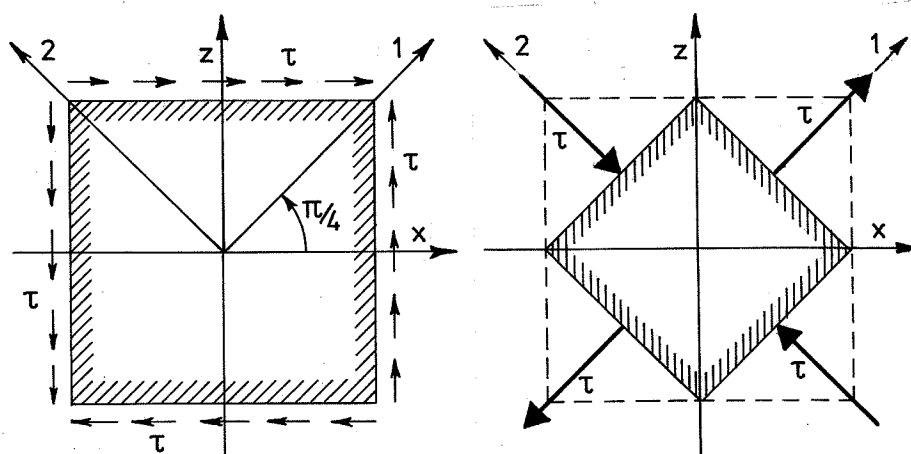
De store spredninger på resultaterne betyder, at modellerne må anvendes med forsigtighed og kun i de aktuelle rumvægtsintervaller. Desuden er modellerne kun anvendelige for de givne produktsammensætninger beskrevet i kapitel 1.

En sammenligning mellem trykstyrkens og trykstivhedens variation med rumvægten, figur 3.3 og 3.4, viser et næsten konstant forhold mellem styrke og stivhed.

4. FORSKYDNINGSPRØVNING

Mineraluldens egenskaber ved forskydning (i fiberplanet) er helt afgørende for sandwichkonstruktionens styrke- og stivhedsegenskaber. Spændingstilstanden for forskydning er i realiteten en kombination af træk- og trykspændinger, og i relation til den mekaniske afprøvning er det i højere grad et spørgsmål om at simulere de mekanismer, der optræder i de egentlige sandwichkonstruktioner under påvirkning af kræfter og momenter end at tilvejebringe et rent forskydningsfelt.

Den rene forskydningstilstand er illustreret på figur 4.1.



Figur 4.1:

Forskydningsspændinger på randen af en kvadratisk skive. Til højre den hermed ækvivalente spændingstilstand frembragt ved træk- og trykspændinger.

Karakteristisk for spændingstilstanden er, at hovedspændingerne (største og mindste normalspænding) er af samme størrelse som forskydningsspændingerne, og at hovedsnittene (snit uden forskydningsspændinger) ligger under 45° med snittene, der har ren forskydning.

Betragtes delskiven (figur 4.1 til højre) med siderne parallelt med hovedakserne kan påvirkningen ækvivaleres med en trækspænding i den ene hovedretning og en lige så stor trykspænding i den anden, d.v.s. styrken svarer til den mindste værdi af træk- og trykstyrken i hovedretningerne. Denne kan altså give en størrelsesorden af mineraluldens forskydningsstyrke.

C: "Double-block" med pålimede endestykker.

Princippet i metoden er illustreret på figur 4.2.A.

Kernematerialet (mineralulden) limes til to tykke metalflanger og belastes som vist på figur 4.2 (diagonalt) til træk eller tryk. Forskydningsspændingen, τ , beregnes af den påførte last, P , og forskydningsarealet som:

$$\tau = \frac{P}{Lb}$$

hvor L er prøvelegemets længde og b bredden.

Forskydningstøjningen, γ , beregnes af flangerens indbyrdes glidning, δ , og prøvelegemets højde, h , som:

$$\gamma = \frac{\delta}{h}$$

Forskydningsstivheden (G -modulen) kan herefter beregnes af udtrykket:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Lb\delta}$$

Metodens svagheder

Prøvemethoden har flere svagheder:

På grund af forskydningskræfternes drejning i forhold til den påførte kraft introduceres bøjende momenter i metalkæberne, der giver anledning til normalspændinger i prøvelegemet, så forskydnings-spændingerne ikke fordeler sig jævnt over prøvens længde.

Den tilstræbte jævne fordeling af forskydningsspændingerne er ydermere forstyrret af den frie rand ved enderne, hvor der selvsagt ikke kan optræde forskydnings-spændinger.

Randproblemet kan negligeres ved at gøre forholdet mellem tykkelse og længde af prøvelegemet tilstrækkeligt lille.

I den amerikanske standard foreskrives en længde ikke mindre end 12 gange tykkelsen. Med det samtidige krav om, at tykkelsen af prøvelegemet skal svare til tykkelsen i sandwichkonstruktionen vil det for de aktuelle mineraluldbaserede sandwichelementer svare til, at prøvelegemerne skal være 3-4 m lange, hvilket er helt urealistisk.

Betydningen af forholdet mellem tykkelse og længde er analyseret i forbindelse med den i afsnit 4.2 beskrevne prøvemethode, der er en videreudvikling af den her omtalte.

Bøjningspåvirkningerne i kæberne kan negligeres ved at gøre bøjningsstivheden så stor, at bøjningsdeformationerne bliver forsvindende (stor tykkelse).

"Double-block"-metoden

På figur 4.2.B og C er tillige vist to alternative prøvemethoder, der er afarter af den omtalte. Ved disse metoder gøres prøvningen 2-sidet ("double-block"), så bøjningspåvirkningerne reduceres. Betydningen af den frie rand (ingen forskydningskræfter) er i metode C søgt reduceret ved at pålime prøvelegemet specielle endestykker (bridge-pieces), så forskydningskræfter kan overføres helt ude ved randen. "Double-block"-metoden er beskrevet i litt. [4] og omtales ikke nærmere i nærværende rapport.

"Single-block"-metoden er kun afprøvet med 5 prøvelegemer og kun medtaget for sammenligningens skyld.

Prøvelegemer

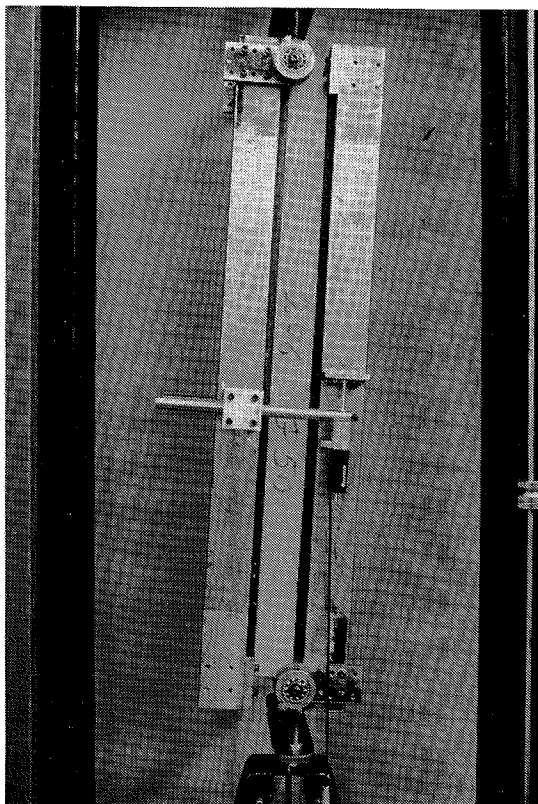
Prøvelegemerne består af prismatiske mineraluldklodser med bredde 100 mm, højde 50 mm og længde 800 mm limet til 2 stk. 12 mm stålflanger (100×800 mm).

Dimensionerne overholder ASTM-standardens krav til kantforhold, men ikke kravet til højden (her 50 mm), der skulle svare til tykkelsen i sandwichkonstruktionerne (100 - 400 mm).

Stålflangerne opspændes i to stålkæber, der anbringes i en almindelig trækprøvemaskine. Stålkæberne, som anvendes til overførsel af trækkræfterne, er de samme som anvendes i prøvemethoden beskrevet i afsnit 4.2.

Kæbernes indbyrdes forskydning måles ved hjælp af to elektriske flytningspotentiometre.

Den anvendte prøveopstilling er vist på figur 4.3.



Figur 4.3:

Opstilling for forskydningsprøvning svarende til den amerikanske standardmetode ("single-block"). (ASTM-C273-61).

Resultaterne af prøvningerne er gengivet i afsnit 4.5, hvor der foretages en direkte sammenligning mellem de undersøgte prøvemethoder.

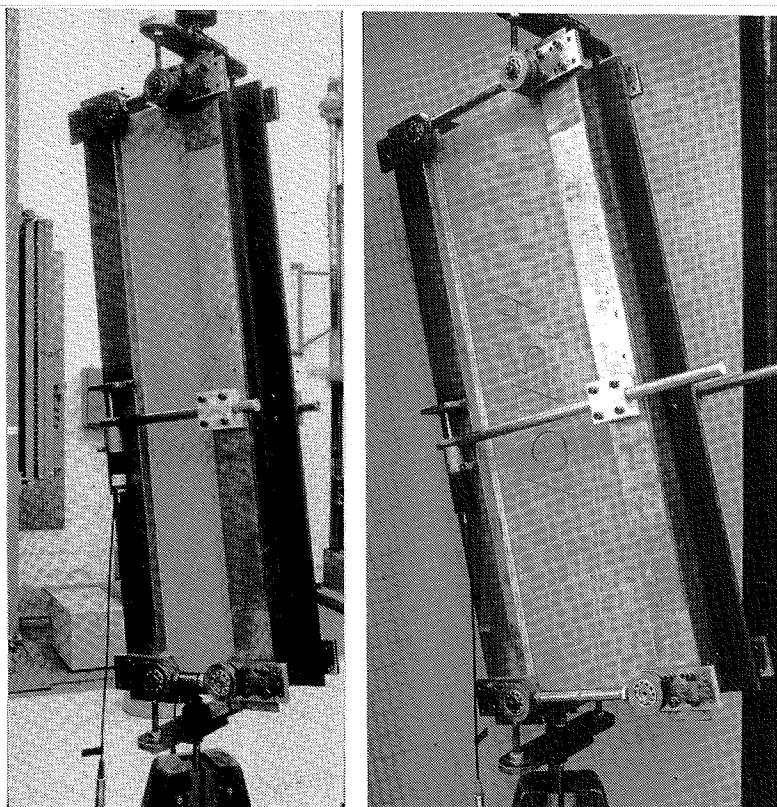
4.2 Forskydningsramme (koblede flanger)

Metoden bygger på samme princip som i ovennævnte metode, blot er flangerne koblet med stive forbindelser, der kan dreje i limforbindelsens niveau.

Prøverammen er vist på figur 4.4, opspændt i en almindelig trækprøvemaskine.

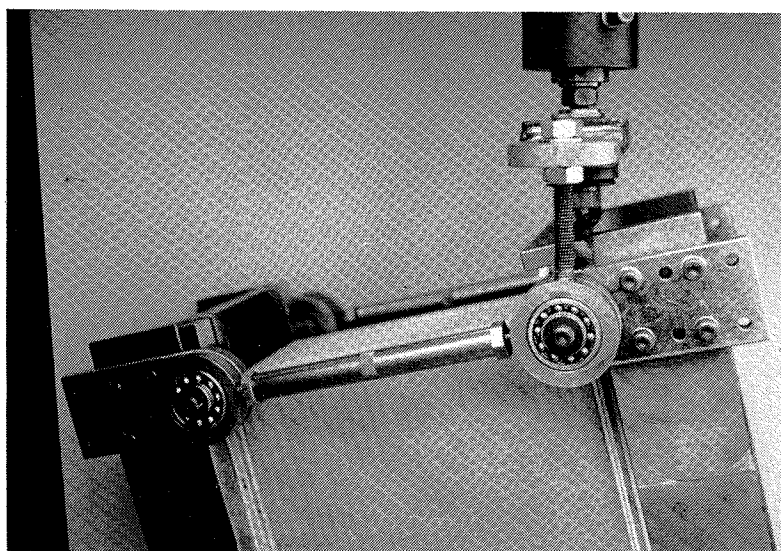
Prøverammen består af to stive kæber (UNPl80) forbundet gennem 4 stk. bardunstrammere ophængt i sfæriske kugleled i kernens hjørnepunkter (i plan med limforbindelsen).

De fire diagonalt placerede kugleled tjener desuden som kraftangrebepunkt for den diagonalt virkende trækraft.



Figur 4.4:

Ramme for forskydningsprøvning (trækbelastet i diagonal retning). Afstanden mellem flangepladerne (kernetykkelsen) er henholdsvis 100 og 200 mm.



Figur 4.5:

Detalje af ramme til forskydningsprøvning. Prøve-rammen kan justeres, så den kan anvendes for forskellige kombinationer af kernetykkelse og flange-tykkelse, uden at omdrejningsliniens beliggenhed i kernens hjørner flyttes.

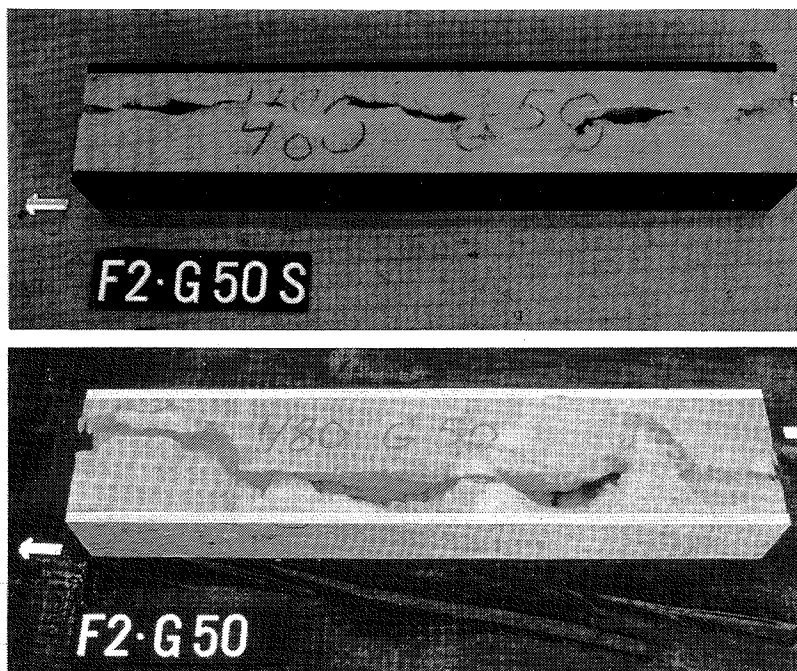
Forskydningskræfterne overføres til flangerne gennem justerbare klodser for enden af flangepladen. Flangerne bliver i princippet forspændt på en måde, der giver flangerne en tryknormalkraft og et bøjende moment, der vil prøve at tvinge flangen ind mod de planparallelle stive kæber.

Opspændingsmetoden muliggør en hurtig og enkel montage af prøvelegemerne, og uden at prøvelegemet forstyrres (inden prøvningen), som tilfældet ville være, hvis fastgørelsen til kæberne f.eks. foregik med skruer.

Målinger

Flangernes indbyrdes forskydning måles fra to stive arme påmonteret den ene kæbe. Målinger på begge sider af prøvelegemet tjener til kompensation for eventuelle vridninger. Selve målingen udføres ved hjælp af to elektriske flytningspotentiometre tilkoblet data-logger-udstyr, der samtidig registrerer kraftsignalet fra den i trækprøvemaskinen indbyggede vejecelle.

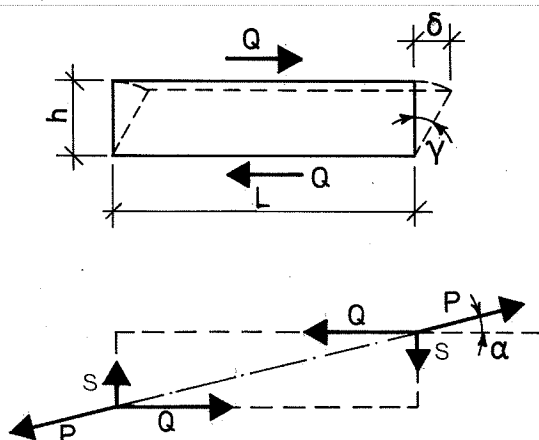
Trækbelastningen påføres kontinuert ved en konstant deformationshastighed på 0,2 - 1,0 mm pr.minut, afpasset så bruddet indtræder efter 3-6 minutter.



Figur 4.6:

Forskydningsprøvelegemer efter brud. Det langs-gående brud gennem prøvelegemets midtersnit er typisk for prøvemethoden, når der ikke forekommer større svækkelser i limforbindelsen.

Billederne viser prøvelegemer med henholdsvis stål- og krydsfinérflanger (nederst). Krydsfinérflangens mindre stivhed influerer ikke på de målte forskydningssegenskaber i mineralulden.



Figur 4.7:

Princip i prøvningen. Q er forskydningskraften, P trækraften (fra prøvemaskine), og S er stangkraften i koblingsstængerne mellem kæberne.

Beregning

Antages friktionsløse drejningsled (i kuglelejer), kan forskydningskraften, Q , på grund af symmetrien, beregnes af den påførte trækraft, P , som:

$$Q = P \cos \alpha = P \frac{L}{\sqrt{L^2 + h^2}},$$

hvor L er prøvens længde, og h er højden.

Regnes forskydningsspændingerne, τ , jævnt fordelt over prøvens længdetværsnit fås:

$$\tau = \frac{Q}{Lb} = \frac{P \cos \alpha}{Lb} = \frac{P}{b\sqrt{L^2 + h^2}},$$

hvor b er prøvens bredde (lameltykkelse).

Kernens vinkeldrejning, γ (se figur 4.6), fås af udtrykket:

$$\gamma = \frac{\delta}{h},$$

hvor δ er flangernes indbyrdes forskydning.

Forskydningsmodulen, G , fås herefter af udtrykket:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{P \cos \alpha h}{Lb\delta} = \frac{Ph}{b\delta\sqrt{L^2 + h^2}}$$

Vurdering af prøvemethoden

Antagelsen om friktionsløse drejningsled betyder negligering af friktionsmomenter, der modvirker rammens deformation.

Friktionen er søgt reduceret ved anvendelse af kuglelejer, og da kræfterne i forbindelsestængerne er små sammenlignet med forskydningskræfterne, må den fejl, der begås, antages at være uden betydning.

Koblingen af flangerne har den fordel, at der selv for store prøvetykkelser (kerne-tykkelser) stort set ikke optræder bøjende momenter i kæberne, men kun normalkræfter.

Betydningen af de frie endeflader

Derimod har metoden samme svaghed som den amerikanske standardmetode, idet prøvelegemet også her indeholder frie endeflader, hvor der ikke kan optræde forskydende kræfter.

Dette forhold må dog ses i relation til den praktiske anvendelse af mineralulden som kernemateriale i sandwichkonstruktioner, hvor ulden opskæres i lameller med begrænset længde (se figur 1.1) og stødes sammen.

Lamellerne har af håndteringsmæssige grunde ikke været anvendt i længder større end 2 - 2,5 m.

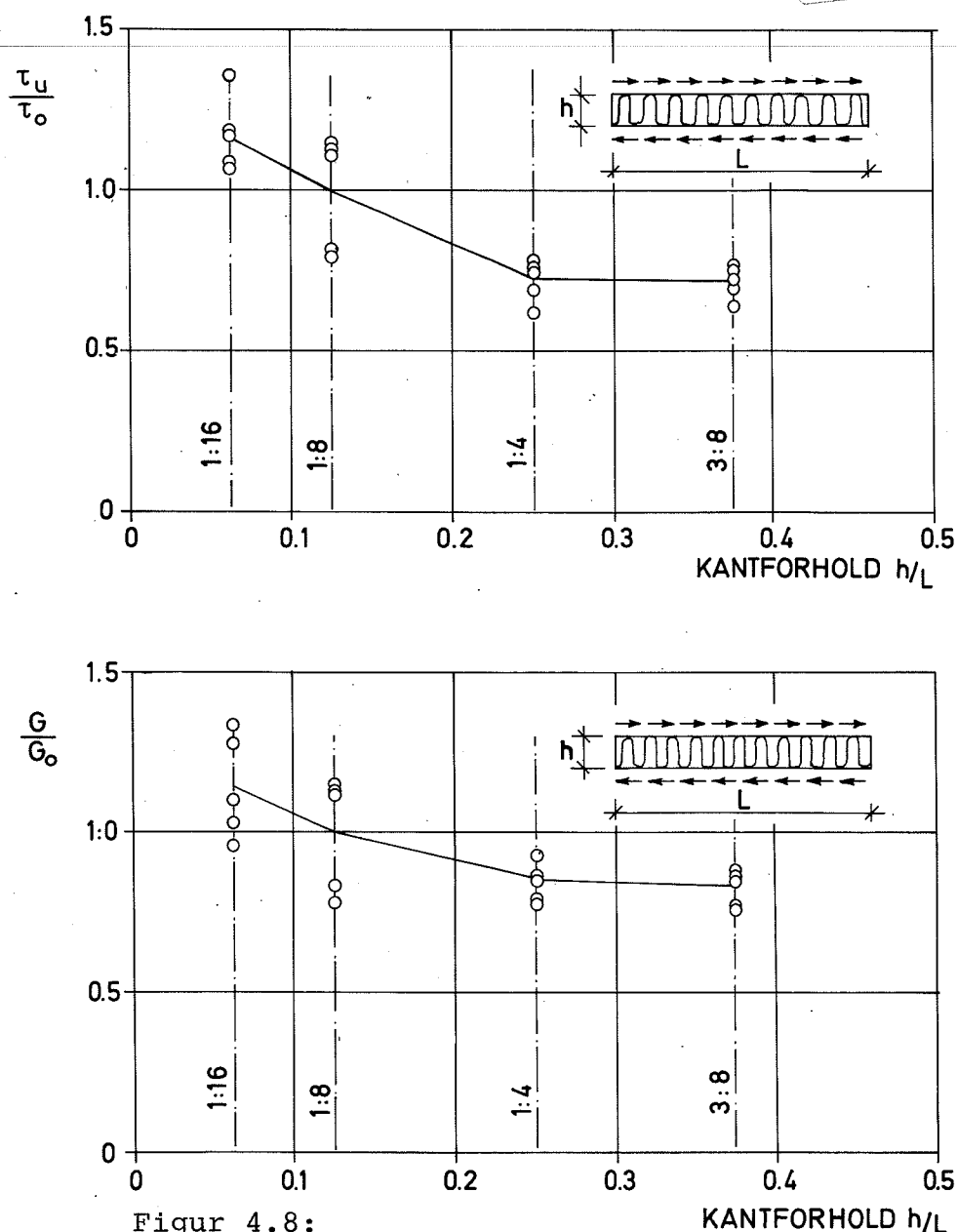
I sandwichkonstruktionen vil der altså optræde stød svarende til en fri rand, hvor der ikke kan overføres forskydningskræfter. Prøvemethodens svaghed er altså på dette punkt en god simulering af de faktiske forhold.

Lamellernes kantforhold varierer selvfølgelig fra element til element, afhængigt af den valgte kernetykkelse og det valgte forbandt.

Betydningen af kantforholdet er undersøgt ved at variere prøvelegemets højde (kerne-tykkelse), idet længden er konstant lig 800 mm.

For samme mineraluldtype er udført 4x5 prøvninger med kernetykkelser henholdsvis 50, 100, 200 og 300 mm. Med disse tykkelser bliver kantforholdene henholdsvis 1:16, 1:8, 1:4 og 3:8.

Resultatet af prøvningerne er vist på figur 4.8. Som reference er valgt kantforholdet 1:8, der er anvendt under prøvningerne af de forskellige mineraluldtyper refereret senere.



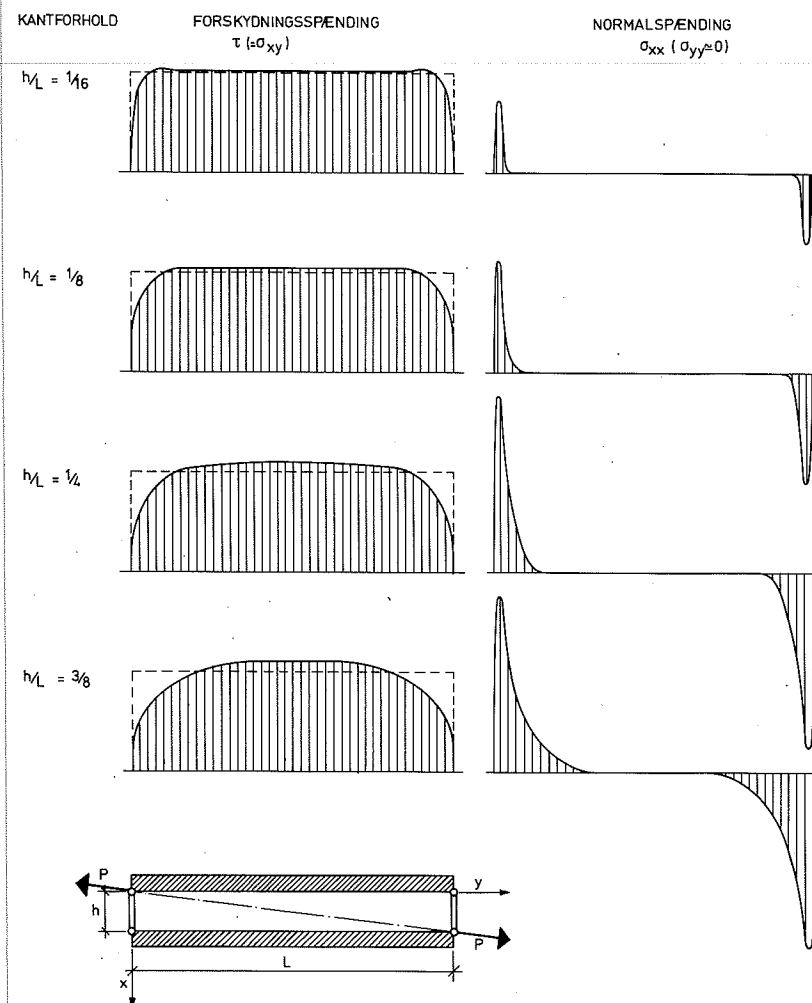
Figur 4.8:

Kantforholdets indflydelse på den effektive forskydningsstyrke (øverst) og den effektive forskydningsmodul (nederst). Som referencer er anvendt forskydningsstyrken τ_0 og forskydningsmodulen G_0 svarende til kantforholdet 1:8.

Den observerede sammenhæng indikerer en tydelig afhængighed af forholdet mellem lamelhøjden og -længden. De målte styrke- og stivhedsegenskaber falder med stigende kantforhold.

Forholdet skyldes bl.a. de frie endefladers indflydelse på forskydningsspændingernes fordeling gennem tværsnittet.

Fordelingen af forskydningsspændingerne, afhængigt af kantforholdet, er undersøgt ved en elastisk finite-element-beregning, og resultatet er vist på figur 4.9.



Figur 4.9:

Forskydningsspændingernes faktiske fordeling over prøvens længde for forskellige kantforhold. Den regningsmæssige jævne fordeling er vist stiplet. Til højre er vist de tilhørende fordelinger af normalspændingerne vinkelret på prøvens længderetning.

Beregningerne viser, at forskydningsspændingsfordelingens afvigelse fra den regningsmæssige fordeling vokser med øget kantforhold. Spændingsændringerne ledsages af forøgede normalspændinger (træk og tryk) ved de frie randfelter.

For kantforhold større end 1:8 vil bruddet begynde som tryk- eller trækbrud nær randfelterne, inden der udvikles et egentligt forskydningsbrud.

Et andet forhold, der kan have indflydelse på variationen, er mineralfibrenes indspænding ved limforbindelsen. Under limprocessen trænger limen ind omkring de yderste fibre, der herved i princippet bliver indspændt. Forskydningsdeformationerne i kernematerialet må herved antage en svag S-form og ikke, som antaget, en retlinet fordeling (se figur 4.7). Indspændingen

vil give sig udslag i en tilsyneladende større forskydningsstivhed ved de små kernetykkelser, mens effekten er forsvindende for større kernetykkelser.

Flangestivhedens betydning

I relation til forskydningsspændingernes fordeling over flangerne er desuden undersøgt, om flangernes stivhed og hermed deformationerne i disse har mærkbar indflydelse på de målte egenskaber ved mineralulden. Til sammenligning er udført 2×5 analoge prøver med flanger af henholdsvis stål og krydsfinér.

Prøve Nr.	Flanger	Rumvægt (mine- raluld) kg/m ³	Styrke τ kN/m ²	Stivhed G kN/m ²
1	<u>Stål</u> E ≈ 2,1×10 ⁵ N/mm ² G ~ 0,8×10 ⁵ N/mm ²	60	61	5710
2		69	84	7830
3		66	83	7790
4		65	83	7720
5		57	58	5390
Middelværdi		63,4	77,3	6890
Variationskoefficient %		8	12	18
6	<u>Krydsfinér</u> E _o ≈ 8,4×10 ³ N/mm ² G ₉₀ ≈ 0,6×10 ³ N/mm ²	60	62	5510
7		67	82	7580
8		69	87	7780
9		67	78	6980
10		65	78	6930
Middelværdi		65,6	73,7	6960
Variationskoefficient %		3	17	13

Tabel 4.1:

Sammenligning af målte forskydningsegenskaber under anvendelse af prøvelegemer med flanger af henholdsvis stål og krydsfinér.

Den til sammenligningen anvendte mineraluld tilhører ikke de i kapitel 1 beskrevne uldtyper.

De angivne stivhedsparametre for krydsfinéren er hentet fra litt. [5].

Det er ikke muligt ud fra disse få prøvninger at påvise nogen signifikant forskel, og flangernes stivhed er sandsynligvis uden større betydning for den undersøgte prøvemethode.

Prøvelegemer

Undersøgelsen af de 6 udvalgte mineraluld-typer er sket på basis af prøvelegemer, udskåret af 100 mm tykke sandwichelementer med 12 mm krydsfinérflanger.

Prøvelegemernes længde er 800 mm, og bredden 100 mm.

Sandwichelementerne blev produceret på fabrik og formålet med prøvningerne var primært at få et indtryk af limforbindelsens forskydningsstyrke og limforbindelsens indflydelse på forskydningsstivheden (svarende til forholdene i praksis).

Imidlertid var limforbindelsernes kvalitet i de her anvendte emner af en væsentlig højere kvalitet (ensartethed) end tilfældet var i sandwichelementerne anvendt til fuldskalaforsøgene.

Alle prøvelegemer brød efter mønsteret vist på figur 4.6 uden tydelige tegn på svækkelser i limforbindelserne.

De opnåede resultater kan således tages som udtryk for mineraluldens egenskaber.

Resultaterne er gengivet i tabel 4.2. I tabellen er desuden angivet de faktiske rumvægte af mineralulden baseret på cylinderformede emner udtaget af hver enkelt prøvelegeme.

Konditionering

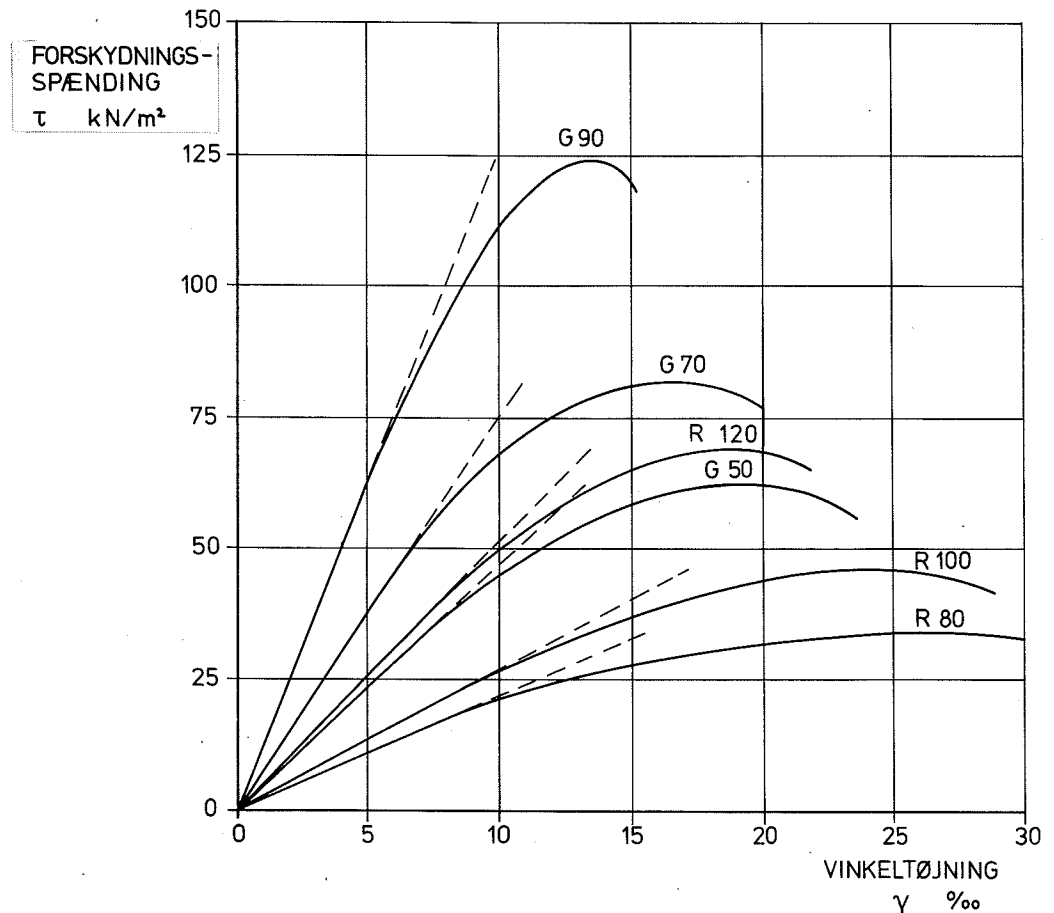
Alle prøvelegemer er konditioneret ved en temperatur på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og en luftfugtighed på $65\%\text{RF} \pm 3\%\text{RF}$.

Mineraluld	Antal prøver	Rumvægt (aktuel)		Forskydningsstyrke		Stivhed (G-modul)	
		γ kg/m ³	Var. koeff. %	τ kN/m ²	Var. koeff. %	G kN/m ²	Var. koeff. %
R80	11	82	7	32	20	2130	23
R100	11	103	9	41	24	2410	41
R120	11	129	6	66	11	5170	14
G50	11	54	5	62	6	4740	12
G70	11	71	3	82	10	7500	21
G90	11	97	9	124	14	11920	14

Tabel 4.2:

Forskydningsprøvning af mineraluld.

På figur 4.10 er indtegnet typiske arbejdskurver for de seks undersøgte mineraluld-typer.



Figur 4.10:

Typiske arbejdskurver ved forskydning.

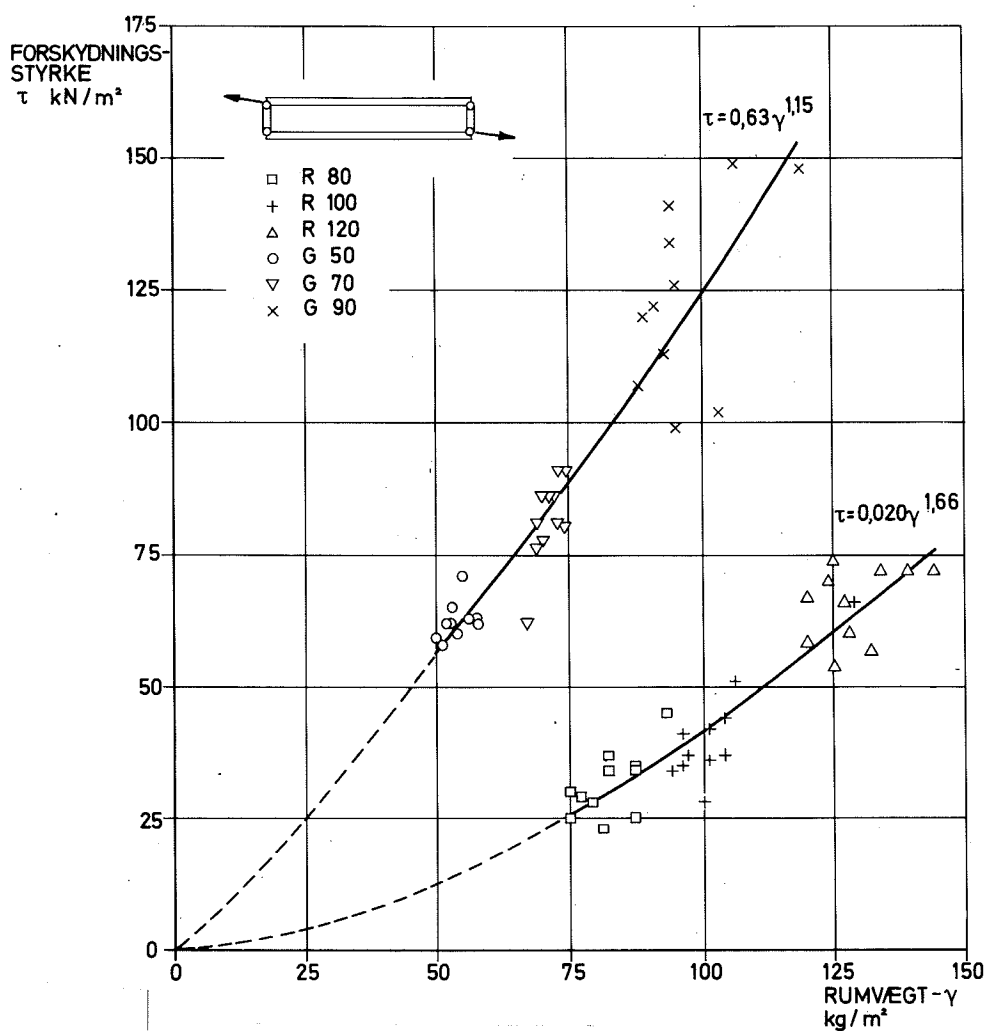
Arbejdskurverne for de seks undersøgte mineraluldtyper forløber principielt ens. Mineralulden udviser lineært-elastiske egenskaber med en proportionalitetsgrænse omkring 50-60% af forskydningsstyrken. Vinkeltøjningerne ved brud varierer mellem ca. 13 og 30 ‰.

Resultatet af prøvningerne viser for hver af de undersøgte mineraluldfabrikater en næsten entydig sammenhæng mellem rumvægt (γ), forskydningsstyrke (τ) og forskydningsstivhed (G).

Den tilsyneladende eksponentielle sammenhæng er undersøgt ved anvendelse af modellen beskrevet i afsnit 2.1. De empiriske konstanter er bestemt efter samme princip.

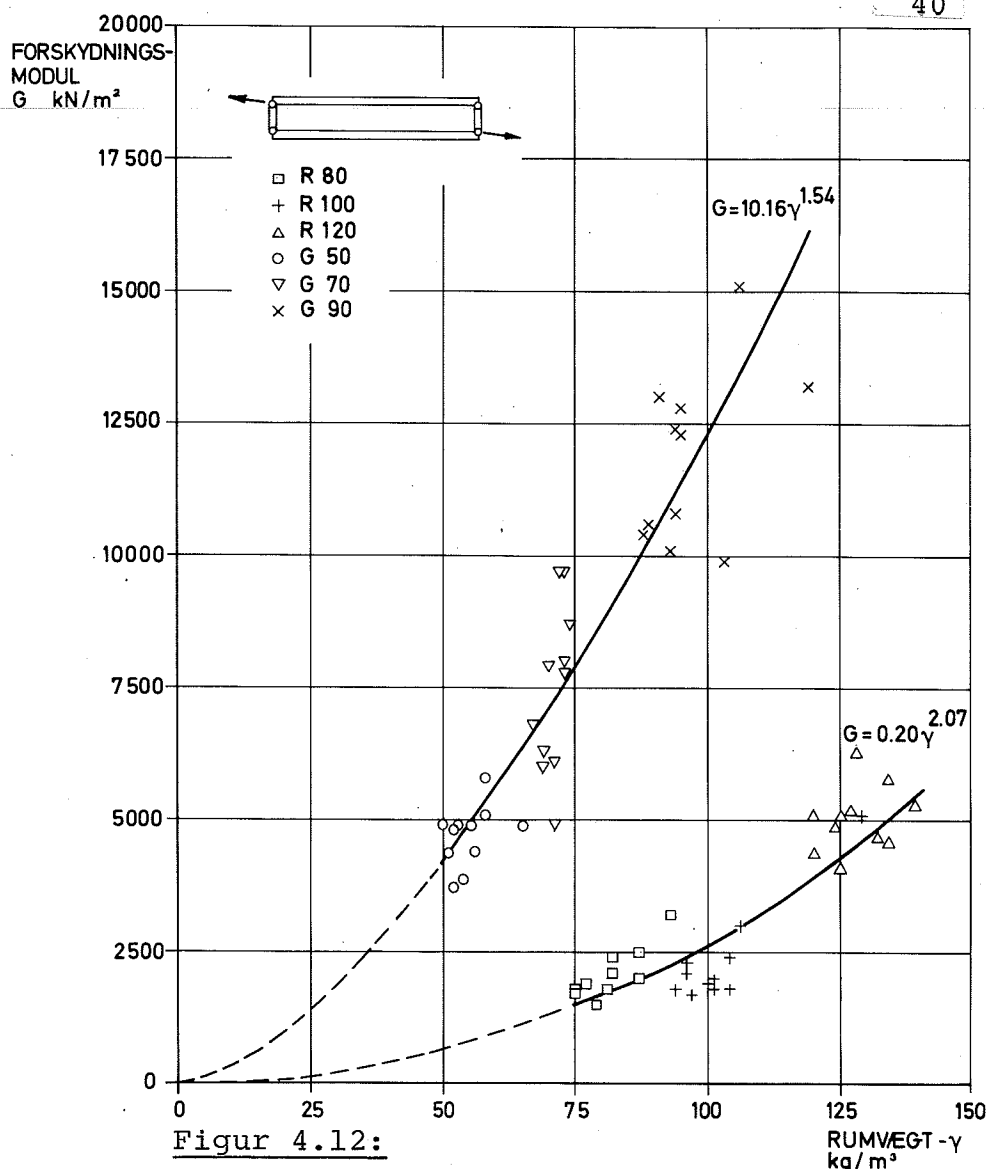
Den teoretiske sammenhæng med rumvægten er afbildet på figur 4.11 og 4.12 sammen med de aktuelle måleresultater.

Modellerne viser god overensstemmelse med de aktuelle målinger.



Figur 4.11:

Mineraluldens forskydningsstyrke som funktion af rumvægten (se i øvrigt materialespecifikation i kapitel 1).



Figur 4.12:

Mineraluldens forskydningsstivhed (G-modul) som funktion af rumvægten.

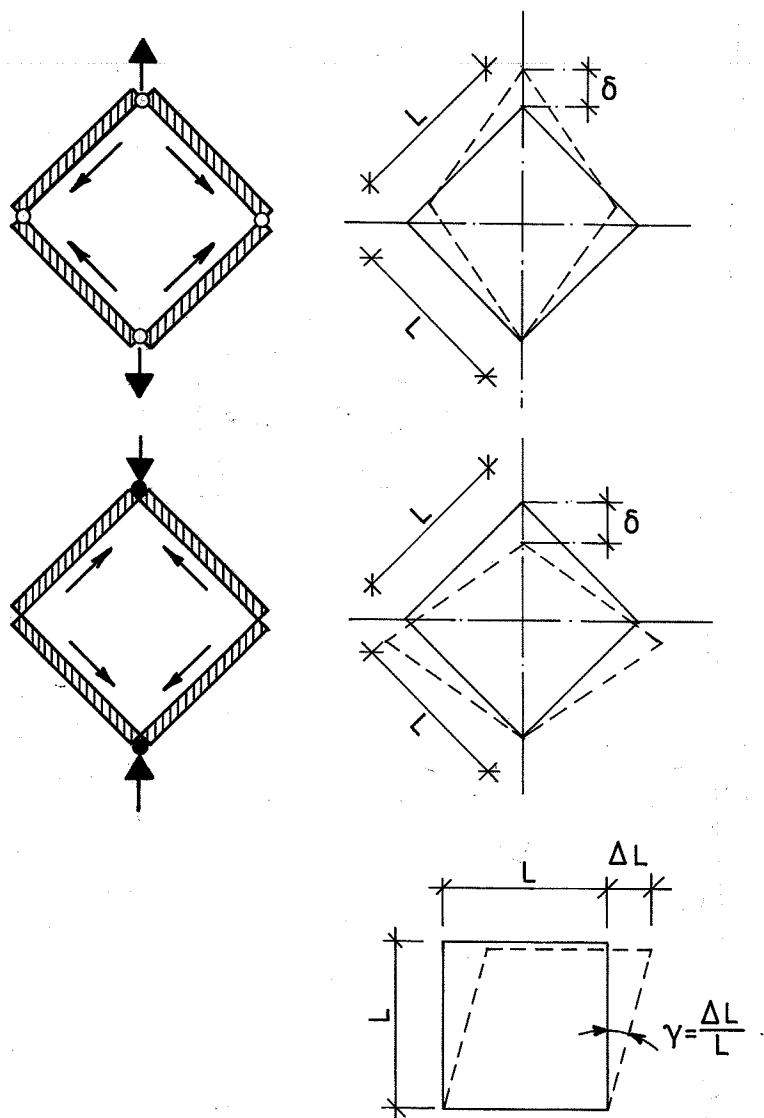
4.3 Rhombemetoden*

Prøvemethoden bygger i princippet på at etablere et rent forskydningsfelt (se figur 4.1) i pladens plan (fiberplanet), og i mindre grad på at simulere de inhomogene forhold i den faktiske sandwichkonstruktion.

En kvadratisk mineraluldplade med tykkelse svarende til de anvendte lameller pålimes fire stive plader, der belastes parallelt med pladernes plan ved at belaste prøvelegemet med en træk- eller trykkraft i diagonal retning.

Det samme princip anvendes almindeligvis ved bestemmelse af pladematerialers egenskaber ved skiveforskydning (se f.eks. litt. [5]).

*Prøvemethodens betegnelse, "rhombemetoden", hidrørende fra prøvelegemernes deformationsfigur, er ikke nogen autoriseret betegnelse, men indført i nærværende rapport af praktiske grunde.



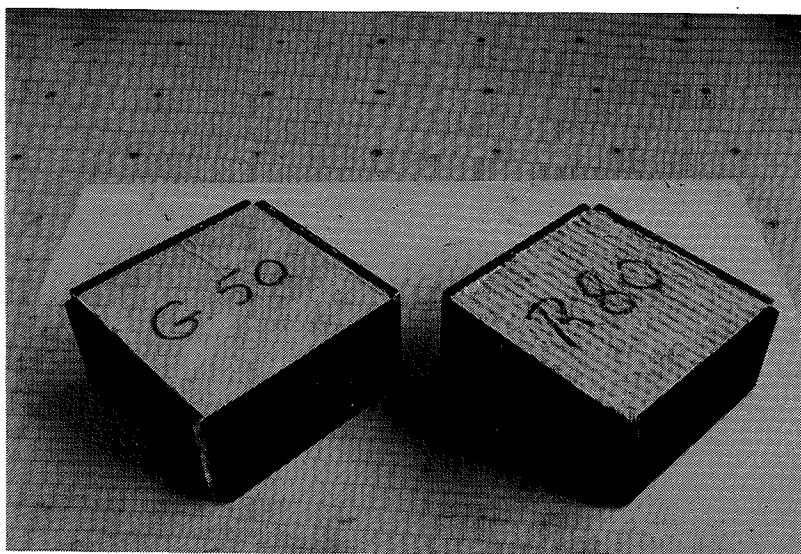
Figur 4.13:

Princip i "rhombemetoden". Prøvelegemerne belastes i diagonal retning med træk- eller trykkræfter.

De to alternative belastningsmuligheder ændrer ikke noget ved prøvningens princip, men medfører væsentlige forskelle i opbygningen af det arrangement, der skal sikre kræfternes korrekte fordeling.

For at få overført trækkræfterne (figur 4.13 øverst) må de fire stive plader hængsles i hjørnerne (charnierer), der således kommer til at udgøre en lukket ramme.

Ved trykbelastningen (figur 4.13 nederst) kan kræfterne overføres til pladernes endeflader gennem to diagonalt placerede rundjern, der bortset fra små friktionskræfter fungerer som charnierer.



Figur 4.14:

Prøvelegemer til forskydningsprøvning af mineraluld.

De pålmede kæber er i dette tilfælde af stål.

Beregning

Beregningen af forskydningsparametrene ud fra en given prøvning afhænger af den valgte målemetode til bestemmelse af vinkeltøjningerne.

På grund af mineraluldens "porøse" struktur er det næsten umuligt at måle direkte på mineralulden ved hjælp af mekaniske målemetoder, men forskellige optiske målemetoder kan eventuelt anvendes.

I de aktuelle prøvninger er deformationen styret, og vinkeltøjningen er bestemt ud fra målinger af de absolutte diagonale deformationer, δ , eller ved måling af den indbyrdes forskydning, ΔL , mellem to modstillede plader (se figur 4.13).

For sammenhængen mellem δ og ΔL gælder:

$$\Delta L = \delta\sqrt{2}$$

Vinkeltøjningen, γ , beregnes af udtrykket:

$$\gamma = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{eller} \quad \gamma = \frac{\delta\sqrt{2}}{L}$$

Forskydningsspændingen, τ , findes ved ligevægtsbetragtning og kan beregnes af udtrykket:

$$\tau = \frac{P}{L t \sqrt{2}}$$

hvor P er den påførte kraft (træk eller

tryk), L er den kvadratiske prøves kantlængde, og t er mineraluldpladens tykkelse (lameltykkelsen).

Forskydningsmodulen, G , beregnes herefter af udtrykket:

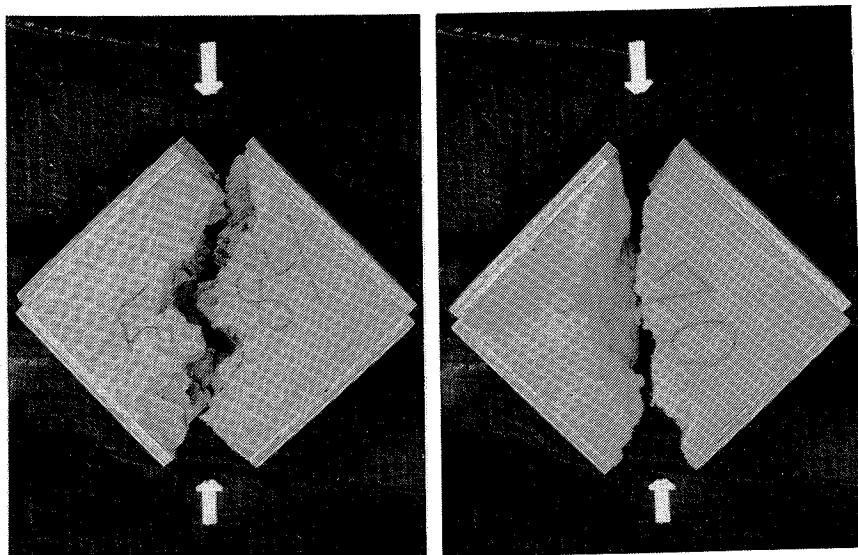
$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{P}{\Delta L t \sqrt{2}} \quad \text{eller} \quad G = \frac{P}{2 t \delta}$$

I de udførte prøvninger fastlægges G -modulen ved bestemmelse af hældningen af arbejdskurven for forskydning (τ - γ -diagram).

Begrænsning i
prøvemethodens
anvendelse

Selv om der i ovennævnte analytiske udtryk indgår en beregning af forskydningsspændinger, må der advares mod at anvende metoden til bestemmelse af mineraluldens forskydningsbrudstyrke.

På grund af deformationernes styring og de pålmede pladers store stivhed, kan forskydningsbruddet ikke udvikle sig frit. Bruddet bliver i stedet et kombineret træk- og trykbrud i diagonalernes retning (se figur 4.15).



Figur 4.15:

Typiske brudfigurer for rhombemetoden. Bruddet viser sig ikke, som forventet, i snittene med størst forskydningsspænding parallelt med de pålmede plader, men i stedet som en slags spaltebrud.

Det venstre brudbillede viser dog en tendens til, at spaltningen foregår i et zig-zag mønster parallelt med pladerne.

Den til brudkraften beregnede forskydnings-spænding er altså ikke direkte udtryk for mineraluldens forskydningsstyrke.

Så længe forskydningsspændingerne befinder sig i det elastiske område, er metoden til gengæld særdeles velegnet for etablering af et rent forskydningsfelt, og det er netop dette område, der sædvanligvis anvendes til fastlæggelse af forskydningsstivheder (brugsstadiet).

Prøvemethoden er efterprøvet for både træk- og trykpåvirkning i diagonal retning, og i det følgende er den praktiske udformning af de to varianter mere detaljeret beskrevet. I begge tilfælde er det tilstræbt at anvende prøvelegemer med samme opbygning, som vist på figur 4.14.

4.3.1 Lukket ramme for trækbelastning

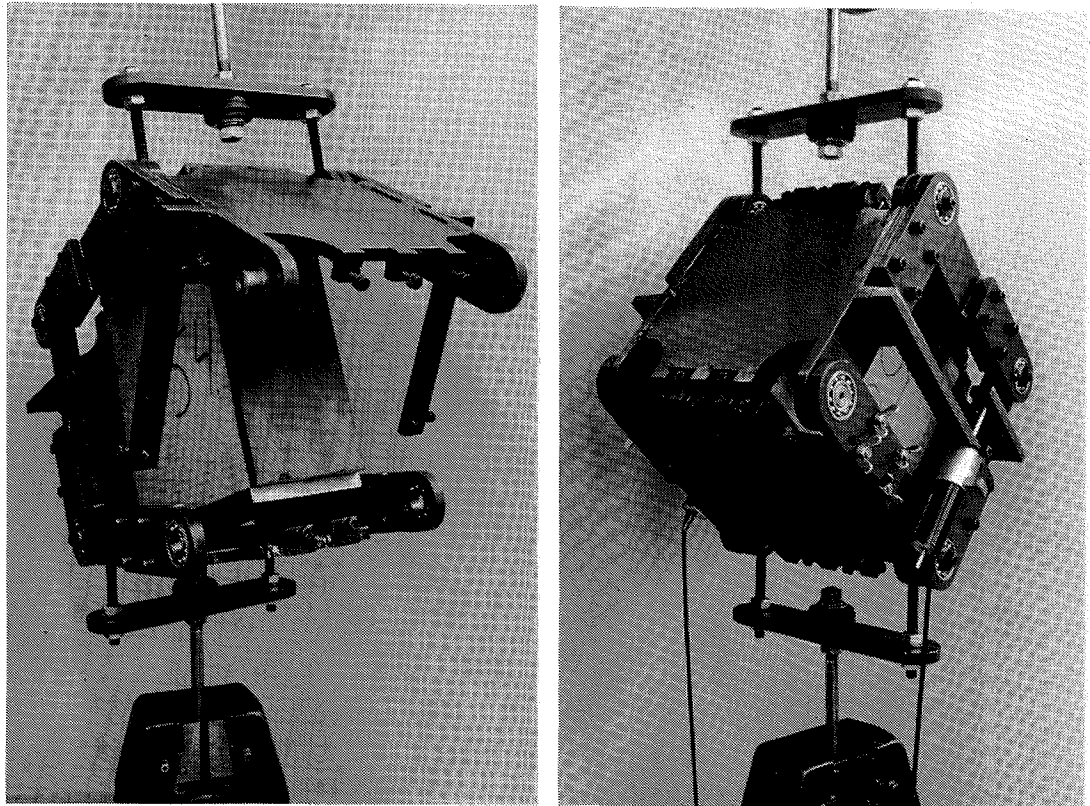
Den nødvendige kobling af de fire kæber i hjørnepunkterne gør trækprøvningen mere kompliceret end trykprøvningen.

Deformationerne i de pålimede plader er små sammenlignet med deformationerne i mineralulden, og den ideelle placering af drejningspunkterne (hængselleddene) ligger i mineraluldklodsens hjørnelinier vinkelret på kraftretningen (jvf. figur 4.13). Hvis drejningspunkterne forskydes i forhold til denne placering, introduceres bøjende momenter, der vil forstyrre den rene forskydningstilstand i mineralulden.

For at undgå dette og samtidig kunne bibeholde den simple opbygning af prøvelegemerne er omdrejningspunkterne anbragt udenfor prøvelegemet i en lukket ramme.

Rammen er samtidig udformet, så den muliggør en hurtig og simpel opspænding af prøvelegemer, som vist på figur 4.14. Rammens konstruktion er vist på figur 4.16.

Forskydningsdeformationerne bestemmes ud fra målingen af kæbernes indbyrdes forskydning. Rammens ene kæbe er forsynet med to stive arme for anbringelse af måleure eller, som vist på figur 4.16, elektriske flytningspotentiometre. Dobbeltmålingen tjener til compensation for eventuelle vridninger.



Figur 4.16:

Trækramme til forskydningsprøvning efter "rhombemetoden".

Rammens kæber er forsynet med gribeclør, der muliggør en hurtig montering. De indbyggede justeringsmuligheder (toleranceudligning) sikrer, at de pålignede plader ligger an mod kæberne, så de udgør en helhed.

Ved beregningen af forskydningsparametrene ses bort fra friktionen i drejningsleddene. Det betyder negligerig af friktionsmomenter, der vil søge at modvirke rammens deformation. Ved anvendelse af de viste sfæriske kuglelejer er friktionen imidlertid reduceret, så den fejl, der begås, må antages at være uden betydning.

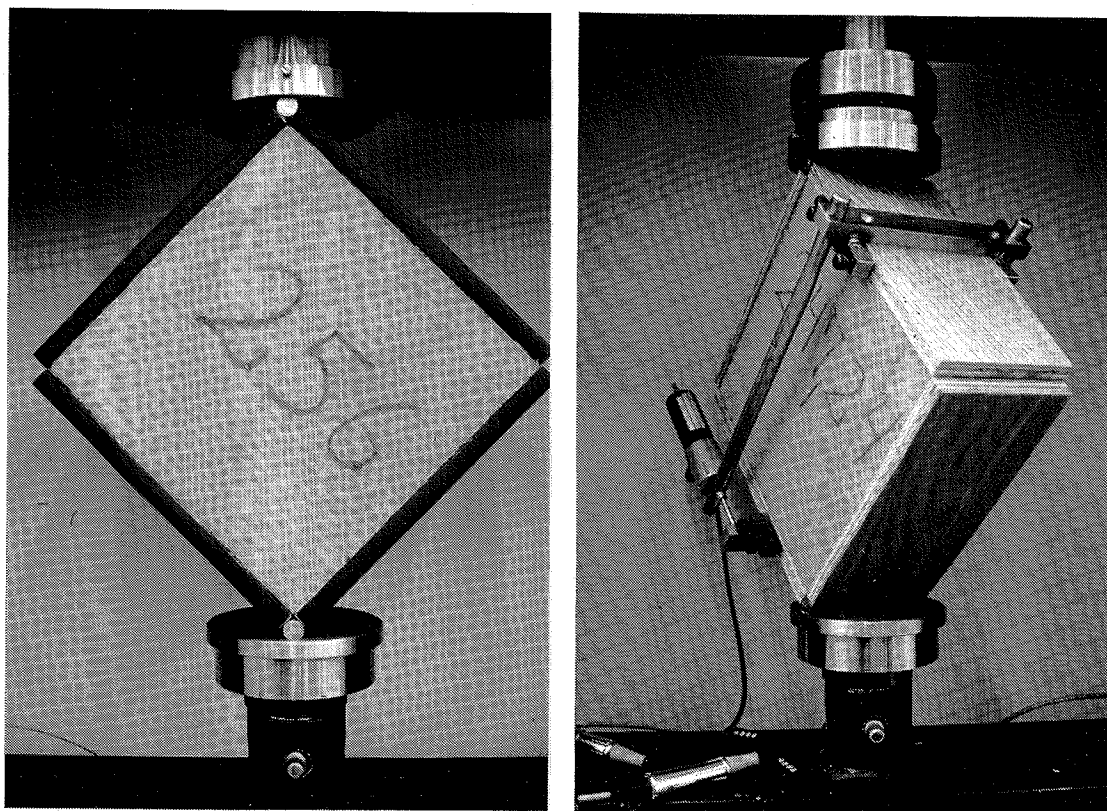
Prøvemethoden er ikke anvendt på de i nærværende rapport undersøgte mineraluldtyper, men til sammenligning med de andre prøvemethoder er udført 5 prøvninger, refereret i afsnit 4.5.

4.3.2 Diagonal trykbelastning

Endnu simplere bliver "rhombemetoden", når belastningen påføres som tryklast.

Belastningen overføres til de pålimede pladers endeflader gennem to diagonalt placerede ruller (rundjern $\varnothing 12$) fastgjort til kæberne i en almindelig trykprøvemaskine.

Opstillingen er vist på figur 4.17.



Figur 4.17:

"Rhombemetoden" under diagonal trykbelastning. Ved anvendelse af stålplader kan forskydningsdeformationerne bestemmes ved måling af trykkæbernes bevægelse. Ved anvendelse af krydsfinérplader kan der ske sammentrykning ved endefladerne og i dette tilfælde måles pladernes indbyrdes glidning gennem de påmonterede stive arme forsynet med elektriske flytningspotentiometre.

Rullernes anlæg mod pladernes endeflader vil under deformationen principielt give anledning til friktionsmomenter, der vil søge at modvirke drejningen. Den fejl, der begås, er ikke detaljeret undersøgt, men må antages at være uden betydning.

Ved det valgte belastningsarrangement føres kræfterne ind i pladernes centerlinier. I forhold til forskydningskræfternes resultanter i limforbindelsen optræder altså ekscentriciteter svarende til

den halve pladetykkelse. De heraf følgende bøjende momenter giver anledning til normalspændinger i de snit, der forudsættes at være i en tilstand af ren forskydning. Med de valgte pladetykkelser på 12 mm og tilsvarende rullediameter på 12 mm er denne effekt sandsynligvis uden større betydning.

Prøvelegemer

Undersøgelsen af de seks udvalgte mineraluldtypers forskydningsstivhed i fiberpladet er sket på basis af 6×10 prøvelegemer med kantlængden 200 mm og tykkelsen 100 mm. Som kraftoverførende plader er anvendt 12 mm krydsfinér limet til mineralulden med en tokomponent polyurethanlim.

Sammenlignende forsøg på 5 prøver med pålimede stålplader viste ingen forskel i de registrerede forskydningsstivheder, og krydsfinerens stivhed må således antages at være tilstrækkelig til sikring af forskydningskræfternes jævne fordeling langs pladerne.

Konditionering

Alle prøvelegemer var konditioneret ved en temperatur på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og en relativ fugtighed på $65\% \pm 3\%$.

Lastpåførsel

Belastningen blev påført kontinuert ved en konstant deformationshastighed på 0,5 - 2 mm pr.minut afpasset, så bruddet indtrådte efter 3 - 6 minutter.

Mineraluld	Antal prøver	Rumvægt (aktuel)		Forskydningsstivhed	
		γ kg/m ³	Var. %	G kN/m ²	Var. %
R80	10	80	4	2370	12
R100	10	101	4	3070	18
R120	10	136	6	6050	18
G50	10	54	5	4760	17
G70	10	70	6	7610	22
G90	10	95	1	11840	10

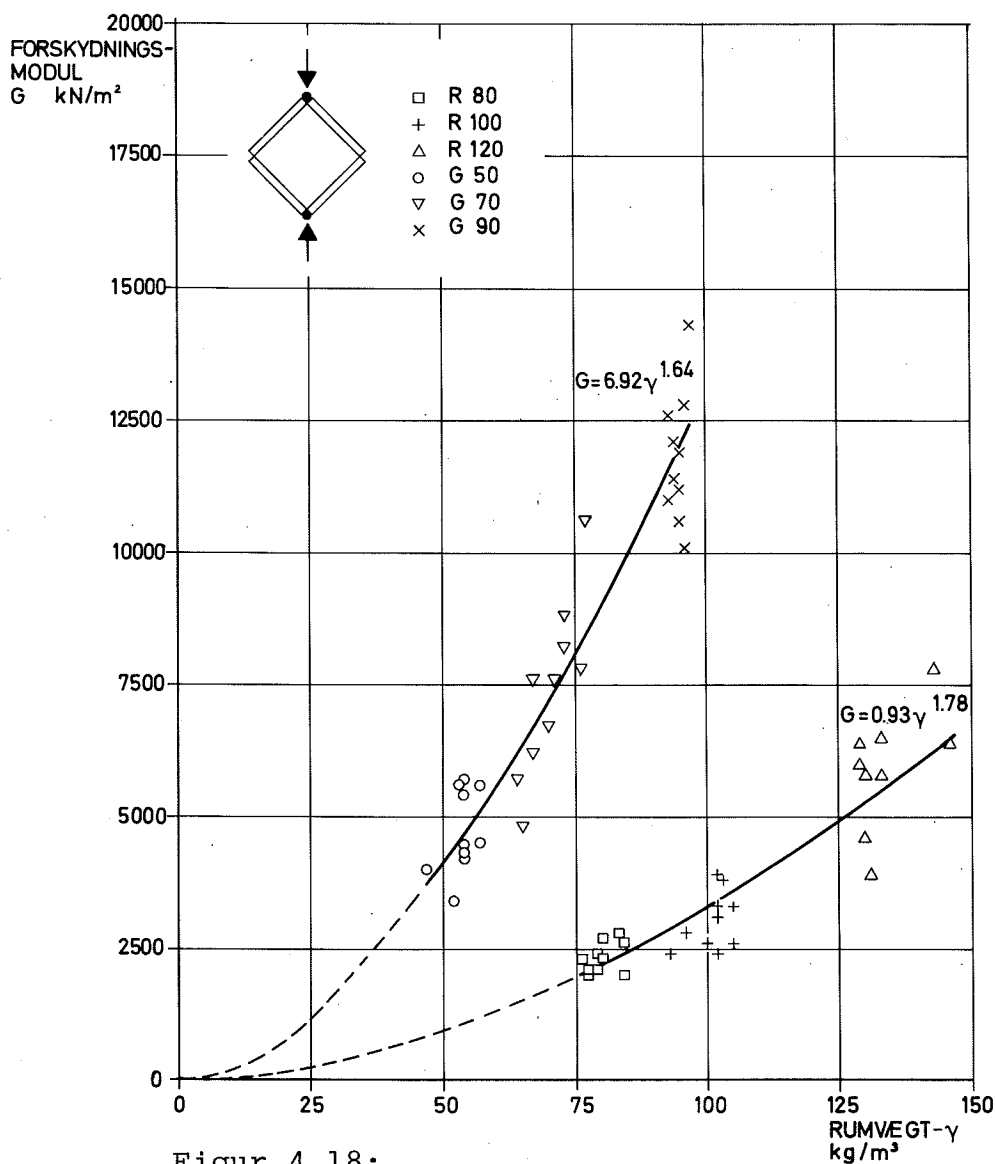
Tabel 4.3:

Mineraluldens forskydningsstivhed bestemt ved rhombemetoden.

Sammenlignes resultaterne i tabel 4.3 med resultaterne i tabel 4.2 baseret på den lange forskydningsramme, kan der konstateres en meget fin overensstemmelse. Sam-

menligningen må naturligvis foretages under hensyntagen til variationen af såvel rumvægten som de fundne forskydningsparametre.

Sammenhængen mellem rumvægt og forskydningsstivhed (G-modul) er afbildet på figur 4.18. Den angivne teoretiske sammenhæng er sket på basis af principperne beskrevet i afsnit 2.1.



Figur 4.18:

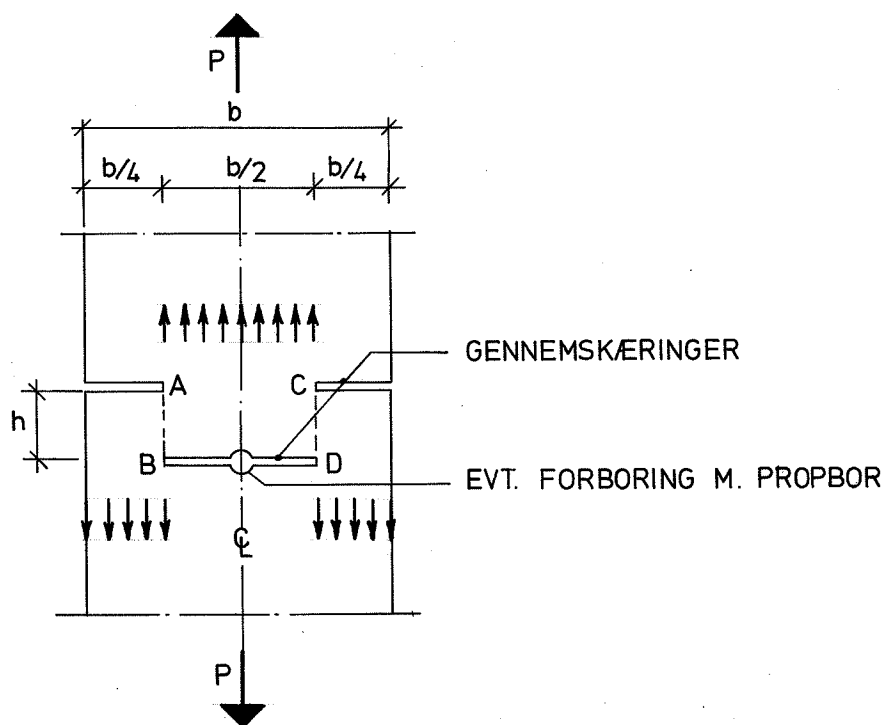
Forskydningsmodulens afhængighed af rumvægten baseret på rhombemetoden.

Mineraluldstyperne er detaljeret beskrevet i kapitel 1.

4.4 Trækbelastet prisme med indsnit

Bestemmelsen af mineraluldens forskydningsstyrke (og kun forskydningsstyrke) i fiberplanet kan ske ved hjælp af et specielt udformet trækprøvelegeme.

En prismatisk mineraluldklods udskæres direkte af en mineraluldplade og forsynes med indsnit, som vist på figur 4.19.



Figur 4.19:

Princip i prøvemethode til bestemmelse af forskydningsstyrken ved anvendelse af specielt udformede trækprøvelegemer.

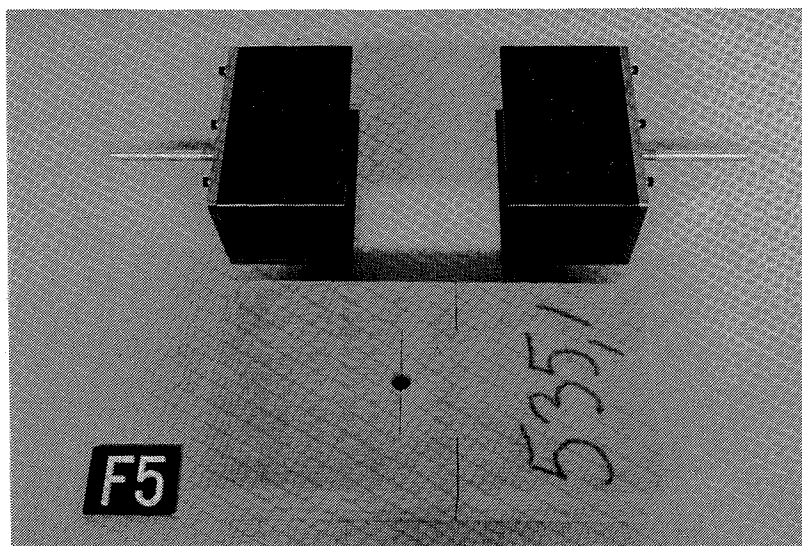
Princippet i metoden anvendes ofte til bestemmelse af pladematerialers skiveforskydningsstyrke (forskydning gennem tykkelsen). Se f.eks. litt. [3] og [5].

I snittene A-B og C-D på figur 4.19 overføres trækpåvirkningen ved forskydning, og den til lasten, P , hørende forskydningsstyrke, τ , kan beregnes af udtrykket:

$$\tau = \frac{P}{2th}$$

hvor t er prøvelegemets tykkelse (lameltykkelsen), og h er højden af snittene A-B og C-D.

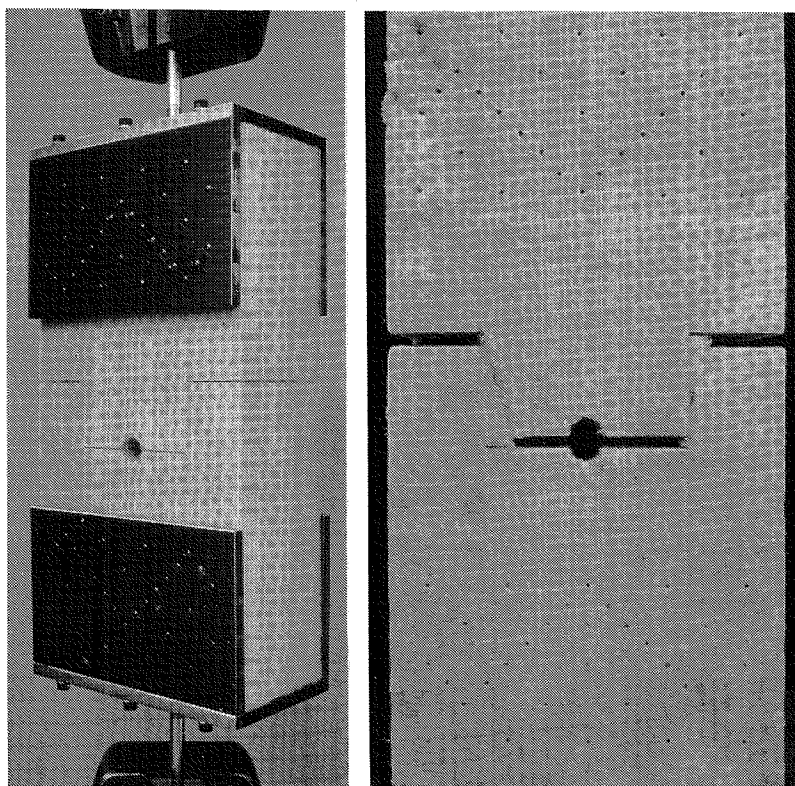
Trækkræfterne overføres gennem to stål-kæber forsynet med nåle, der trykkes ind i mineralulden vinkelret på kraftretningen.



Figur 4.20:

Forskydningsprøvelegeme og stålplader (nåleplader) til fordeling af den centralt angribende trækraft.

Et stykke fra nålepladerne mod prøvens midtersnit antages trækspændingen at være jævnt fordelt. Stålkæberne opspændes i en almindelig trækprøvemaskine, som vist på figur 4.21.



Figur 4.21:

Forskydningsprøveopstilling og prøvelegeme efter brud.

Dimensionen af de anvendte prøvelegemer var 200×400 mm med en tykkelse svarende til pladetykkelsen på 100 mm.

Forskydningssnittenes højde var 50 mm. Forholdet mellem trækarealet og forskydningsarealet, $b: 4h$, er således 1:1, hvilket i de aktuelle prøvninger viste sig at være for lille.

I flere af prøvelegemerne skete bruddet som et trækbrud i den ene side parallelt med indsnittene, sandsynligvis på grund af inhomogeniteter eller ekscentriciteter ved lastpåførslen.

Inhomogeniteternes betydning kan mindskes ved anvendelse af større prøvelegemer, og i praksis må det tillige anbefales f.eks. at sætte forholdet $b: 4h$ lig 2:1, så bruddet placeres i de ønskede snit. Resultaterne af de udførte prøvninger er refereret i afsnit 4.5 for sammenligning med de alternative prøvemethoder.

Metoden er kun medtaget for princippet skyld, idet den er meget simpel i brug og sandsynligvis anvendelig i en produktionskontrol.

4.5 Sammenligning og vurdering af prøvemethoder

På baggrund af de afprøvede metoder til bestemmelse af mineraluldens egenskaber ved forskydning er det vanskeligt at udpege en enkelt metode som den helt ideelle, og hvilke kriterier skal i øvrigt lægges til grund ?

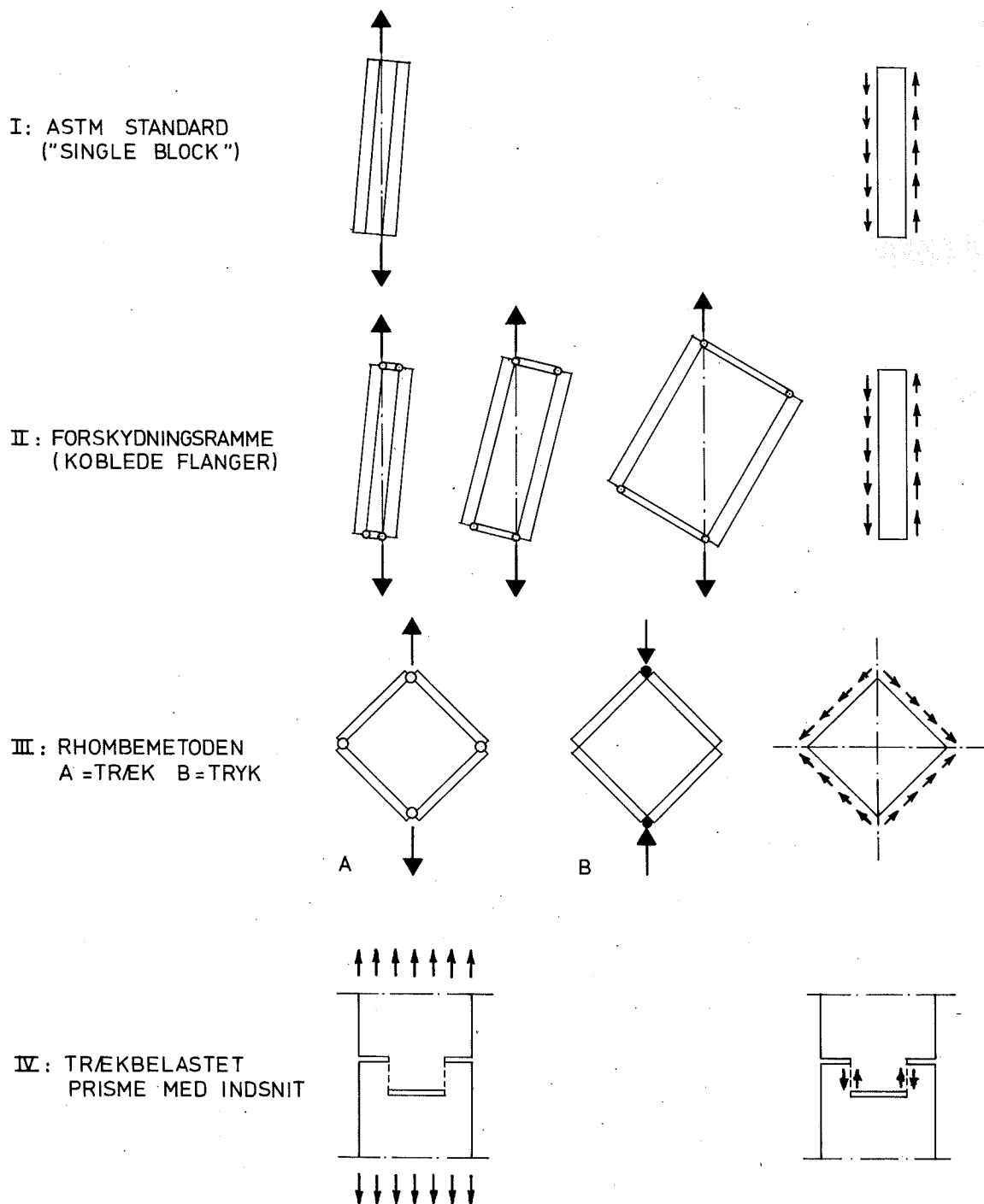
Valg af metode må ske under hensyntagen til resultaternes anvendelse og de forhold, der ønskes simuleret.

Hvis resultaterne f.eks. kun tjener til sammenligning af forskellige materialer på produktniveau kræves ikke så forfinede metoder, som hvis resultaterne skal lægges til grund for teoretiske beregninger af sandwichkonstruktioner. Vanskelighederne opstår imidlertid først, når resultaterne fra én prøvemethode ukritisk sammenlignes med resultaterne fra en anden metode.

Forskellige prøvemethoder giver varierende resultater, og det er selvfølgelig ønskeligt, om der kunne fastlægges en standardmetode.

De her undersøgte metoder er kun et udvalg af mulige metoder. Indirekte prøvningsmetoder ved f.eks. bøjningsprøvning af sandwichbjælker er ikke omtalt.

For overblikkets skyld er de fem undersøgte metoder skitseret på figur 4.22.



Figur 4.22:

Oversigt over undersøgte forskydningsprøvemetoder.

Sammenligningen mellem resultaterne fra de forskellige metoder er baseret på en tilfældigt valgt mineraluld.

Det var naturligvis ønskeligt, om der fandtes et erstatningsmateriale med kendte forskydningsegenskaber, så metodernes godhed ikke blot kunne vurderes relativt, men også absolut.

Den anvendte mineraluld er fra en speciel leverance og hører ikke til de typer, der er beskrevet i kapitel 1.

I de prøvemethoder, hvor der indgår pålignede plader, er overalt anvendt stål.

Resultaterne er refereret i tabel 4.4, og typiske arbejdskurver er optegnet i figur 4.23. Metode IV giver dog ikke mulighed for optegning af arbejdskurve.

Prøvemethode	Antal prøver	Rumvægt (af uld)		Forskydningsstyrke		Stivhed (G-modul)	
		γ kg/m ³	Var. %	τ kN/m ²	Var. %	G kN/m ²	Var. %
I	5	63	8	87	10	7850	14
II	5	63	8	77	12	6890	18
III A	5	63	2	(103)	(5)	7370	4
III B	5	64	3	(105)	(12)	7640	15
IV	5	66	2	72	10	-	-

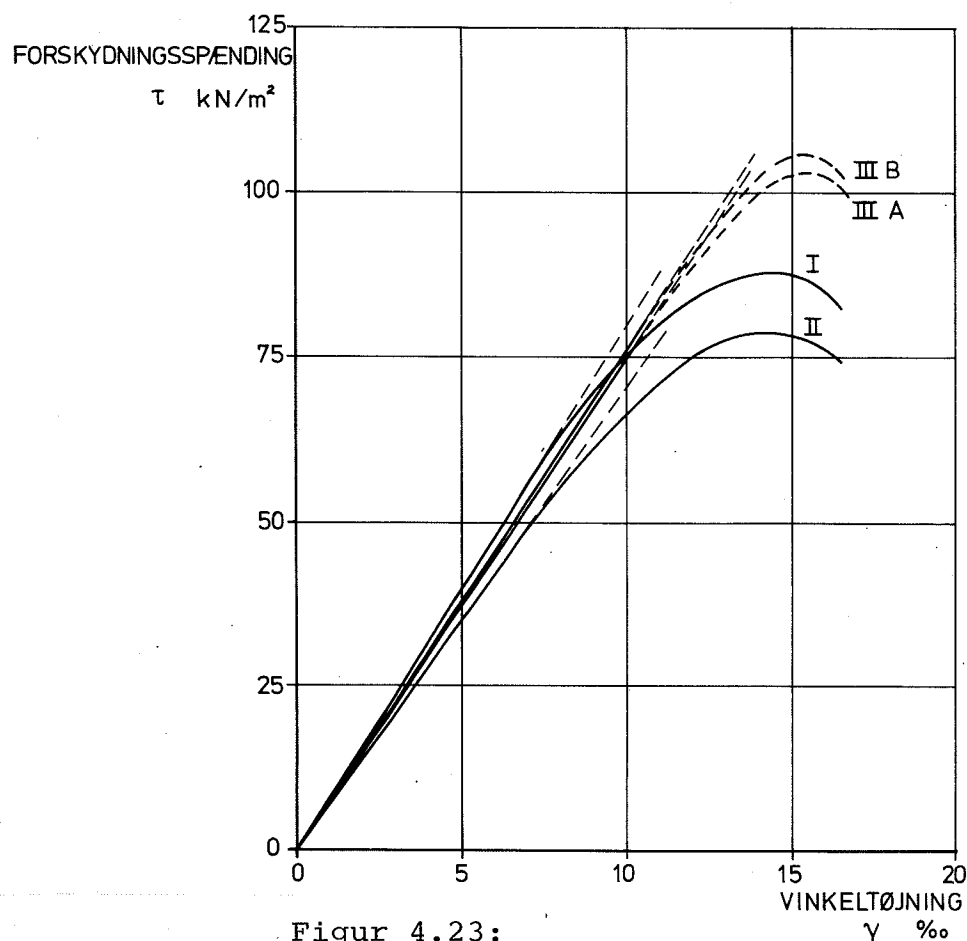
Tabel 4.4:

Sammenlignende forsøgsresultater for de 5 undersøgte prøvemethoder.

I metode II er anvendt et kantforhold på 1:8 (jvf. afsnit 4.2).

På baggrund af det begrænsede prøveantal og de generelt store spredninger viser resultaterne god overensstemmelse mellem de fundne forskydningsmoduler (arbejdskurvernes hældning i det lineærelastiske område).

Forskellene i styrkemiddeltallene synes derimod klart signifikante trods det beskudne antal prøver.



Figur 4.23:

Arbejdskurver for sammenligning af prøvemethoderne I, II, III A og III B.

Metode III A og III B (rhombemetoden) bør, jævnfør diskussionen i afsnit 4.3, ikke anvendes til bestemmelse af forskydningsstyrker (arbejdslinierne på figur 4.23 tegnet stiplet).

Metode I, svarende til den amerikanske standard, giver tilsyneladende større forskydningsstyrker end metode II. Hertil må dog bemærkes, at i metode I er forholdet mellem prøvelegemets højde og længde 1:16, mens kantforholdet i metode II er 1:8.

Korrigeres resultaterne fra metode II til et kantforhold på 1:16, jævnfør figur 4.7, er der meget fin overensstemmelse mellem de to metoder.

Metode II er generelt set den metode, der simulerer de faktiske forhold i en sandwichkonstruktion bedst, samtidig med at der ved valg af prøvelegemernes dimensioner kan tages højde for lamelstrukturens og limforbindelsernes indflydelse på de effektive forskydningsegenskaber i en sandwichkonstruktion.

5. SAMMENFATTENDE VURDERING AF KORTTIDSEGENSKABER

Generelt set udviser mineralulden lineært-elastiske egenskaber ved både træk, tryk og forskydning (i fiberplanet) med en proportionalitetsgrænse omkring 50-60% af tilhørende brudstyrke.

Mineraluldens mekaniske egenskaber ved træk er højere end de tilsvarende egenskaber ved tryk (ca. en faktor 2), men egenskaberne ved træk og tryk varierer med rumvægten på samme måde.

En helt analog variation med rumvægten afspejler sig også i mineraluldens forskydningssegenskaber. Forskydningsstivheden (G-modulen) udgør ca. halvdelen af middelværdien mellem træk- og trykstivheden, i god overensstemmelse med sammenhængen mellem G- og E-modulen for isotrope materialer: $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, når ν (Poissons forhold) er meget nær ved nul.

Forskydningsstyrken er stort set sammenfaldende med trykstyrken, hvad der ikke er noget mærkeligt i. Den rene forskydningspåvirkning kan ækvivaleres med lige store træk- og trykspændinger i hovedspændingsretningerne og er følgelig bestemt af den mindste værdi af træk- eller trykstyrken.

En oversigt over de fundne materialeparametre er givet i tabel 5.1.

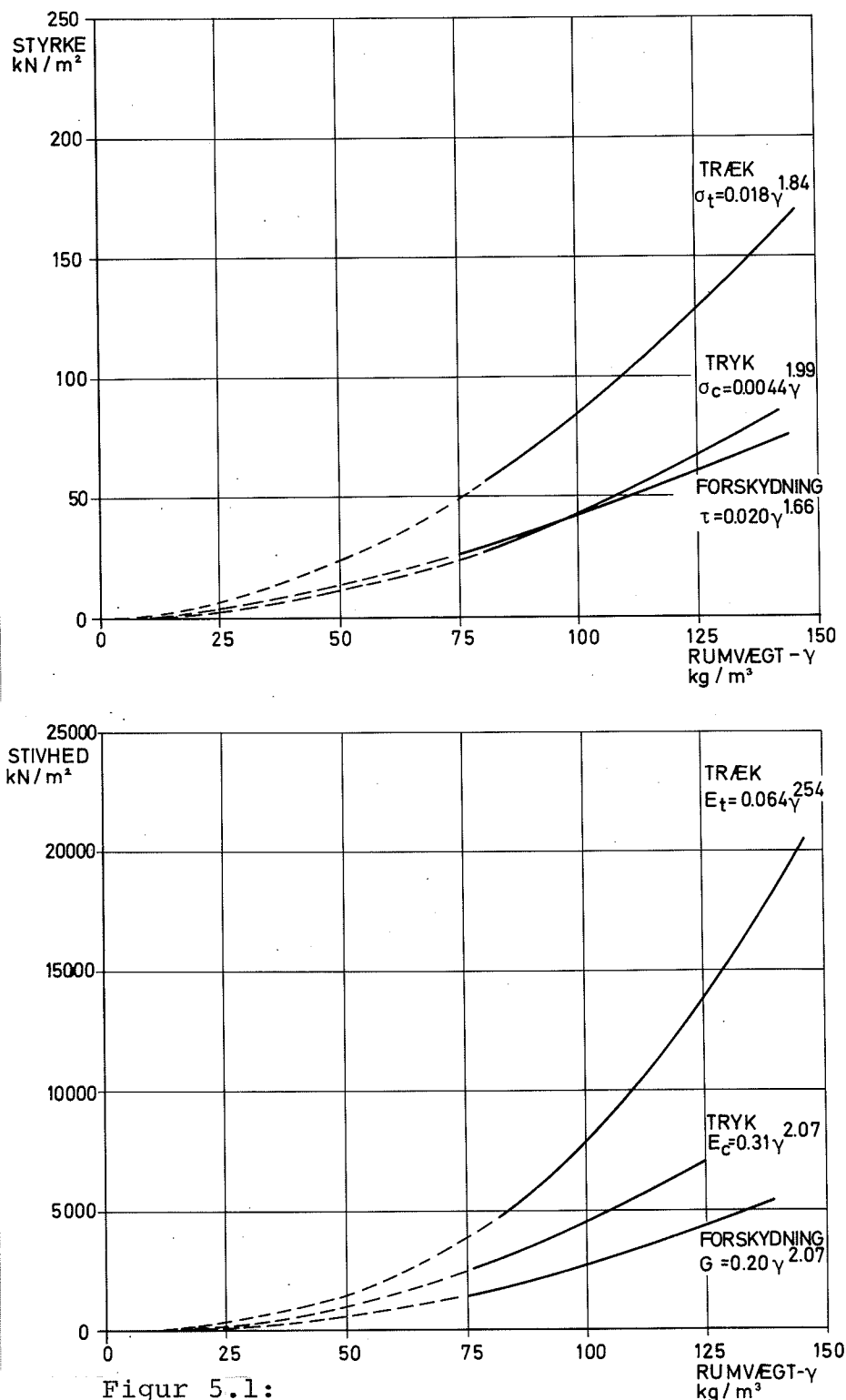
Mineraluld	Træk		Tryk		Forskydning	
	Styrke σ_t kN/m ²	E-modul E_t kN/m ²	Styrke σ_c kN/m ²	E-modul E_c kN/m ²	Styrke τ kN/m ²	G-modul G kN/m ²
R80	68	5890	32	3390	32	2130
R100	83	8130	51	5090	41	2410
R120	164	18490	71	7930	66	5170
G50	135	13850	54	5250	62	4740
G70	196	22960	82	5840	82	7500
G90	300	35700	156	16650	124	11920

Tabel 5.1:

Mineraluldens korttidsegenskaber ved træk, tryk og forskydning (i fiberplanet). Angivne værdier er middelværdier. Konditionering: 20°C - 65%RF.

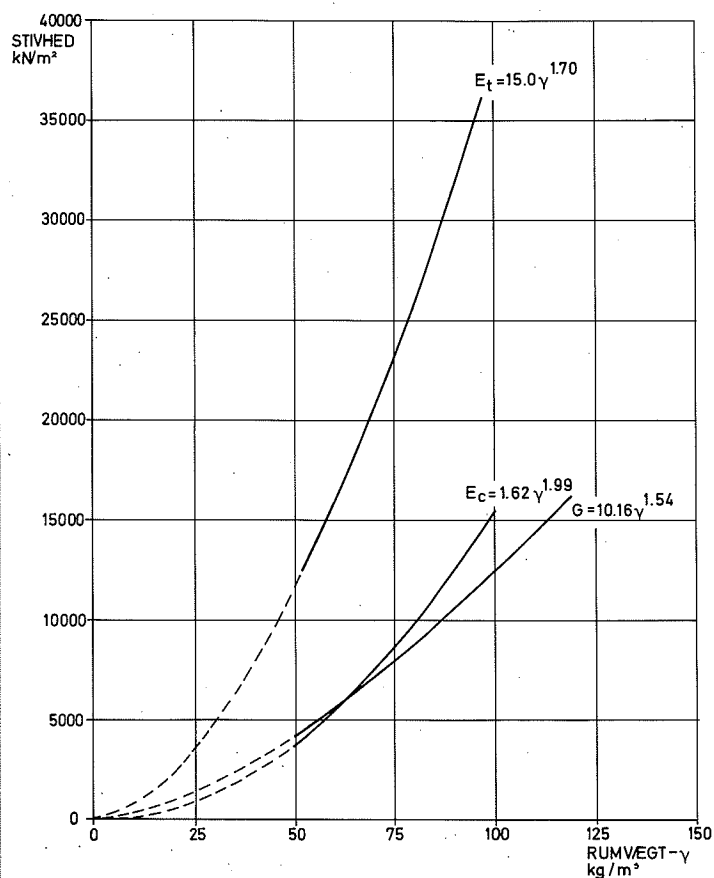
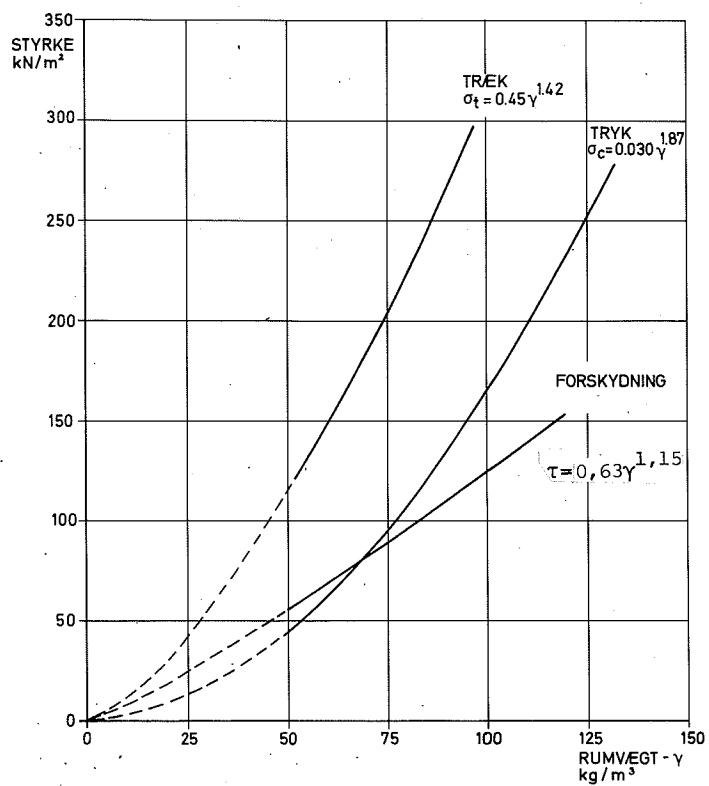
De fundne teoretiske sammenhænge mellem mineraluldens rumvægt og styrke-/stivhedsegenskaber er vist på figur 5.1 og 5.2.

Kurverne må naturligvis betragtes med forsigtighed på grund af de store spredninger. Variationskoefficienterne ligger for materialeparametrene i de fleste tilfælde omkring ca. 20%, og for rumvægtene omkring 5%.



Figur 5.1:

Styrke- og stivhedsegenskaberne af Rockwool-mineraluldstyper (20°C - 65%RF).



Figur 5.2:

Styrke- og stivhedsegenskaberne afhængighed af rumvægten for de undersøgte Glasuld-mineraluld-typer (20°C - 65%RF).

De fundne eksponentielle sammenhænge med mineraluldens rumvægt (fibermængde) er kun en af de parametre, der influerer på mineraluldens mekaniske egenskaber. Selv om der indledningsvis blev advaret mod sammenligninger på tværs af mineraluldfabrikaterne er der næppe tvivl om, at forskellene i styrke- og stivhedsegenskaberne (i fiberplanet) hidrører fra forskellene i fiberdiameter og -længde samt bindemiddelmængde.

Mængden af bindemiddel og fordelingen af samme har det desværre kun været muligt at stikprøvekontrollere.

Ud over de egentlige produktvariationer er resultaterne af styrkeforsøgene også afhængige af påvirkningsmåden (prøvemethoden), prøvelegemets dimension og tilstand. Hertil kommer så de prøvetekniske omstændigheder, der kan have betydelig indflydelse på resultaterne. Herunder må opmærksomheden især henledes på belastningens varighed. Korttidsstyrken stiger med belastningshastigheden, fordi forsøget ved langsom lastpåføring bliver strakt over så lang tid, at krybningsfænomener begynder at gøre sig gældende. I alle udførte prøvninger er lagt vægt på at afpasse deformationshastigheden, så brud indtræder i tidsintervallet 3-6 minutter i overensstemmelse med de fleste i litteraturen beskrevne metoder.

En nedre grænse for forsøgets varighed burde normfastsættes til sikring mod for høje styrketal.

En øvre grænse derimod tjener ikke noget sikkerhedsmæssigt formål, men kan være motiveret ud fra hensynet til reproducerbarheden.

6. KRYBEFORSØG (STATISK LANGTIDSLAST)

Betragtes mineralulden som et elastisk materiale, forudsættes en entydig spændings-/tøjningsrelation, som er uafhængig af, hvor længe spændingen har været påført og hvordan. D.v.s. alle tøjningsændringer hidrørende fra spændingsændringer foregår momentant, kun afhængig af den aktuelle spændings-/tøjningstilstand.

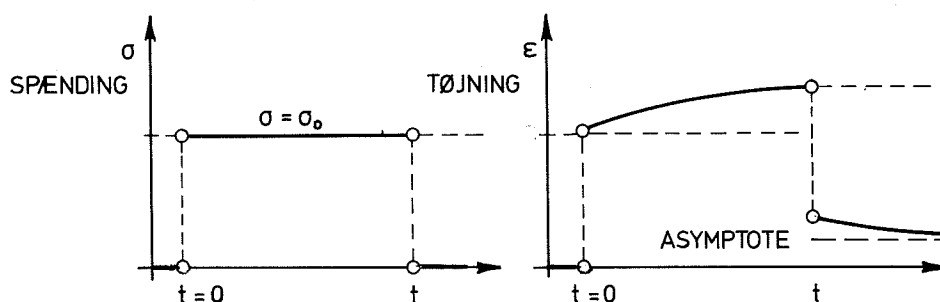
I et sådant materiale oplagres al tilført energi og frigøres under aflastning, d.v.s. et fuldstændigt reversibelt forløb.

I virkeligheden udviser alle materialer tidsafhængige egenskaber (visko-elastiske), og det er denne egenskab ved mineralulden, der er søgt belyst gennem de her omtalte forsøg.

Krybning

Hvis en spænding (belastning) påføres materialet til tiden $t = 0$ og holdes konstant, vil tøjningen forøges med tiden (med aftagende hastighed), afhængigt af den påførte spændings størrelse. Fænomenet, der kaldes krybning, er illustreret på figur 6.1.

Når tøjningen holdes konstant med tiden (i modsætning til spændingen), vil spændingen aftage med tiden, og fænomenet kaldes så relaxation.



Figur 6.1:

Illustrationen af begrebet krybning.

Til venstre: Spændingsbilledet (konstant)

Til højre: Tøjningsbilledet (tidsafhængigt)

Hvis den konstante spænding fjernes, enten helt eller delvis, vil tøjningen aftage som funktion af tiden og kun delvis vende tilbage til udgangstilstanden.

En rent beskrivende fremstilling af krybeforløbet er ikke tilfredsstillende.

I sandwichkonstruktioner med kerne af mineraluld (svag kerne) kan de ikke-elastiske deformationsandele have meget stor indflydelse, og muligheden for en analytisk beskrivelse er af stor praktisk betydning.

Det virkelige krybeforløb for materialet er ukendt, og de analytiske modeller bliver derfor mere eller mindre ufuldstændige. Samtidig er krybeforløbet 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 prøvelegeme at iagttage parametrene uafhængigt af hinanden.

Valget af parametre er i de udførte forsøg sket på basis af en tilpasning til en serie langtidsforsøg med bøjningspåvirkede sandwichelementer (dæk-/tagelementer).

I de bøjningspåvirkede elementer er mineralulden udsat for de hårdeste belastninger (forskydningskræfter) og i relation hertil valgtes at undersøge mineraluldens krybeegenskaber ved forskydning.

Undersøgelsen er koncentreret om de to mineraluldd typer G50 og R80, beskrevet i kapitel 1. Krybningens afhængighed af belastningsniveauet er belyst ved i forsøgene at køre med 2 forskellige belastningsniveauer for hver af de to mineraluldd typer.

Til forsøgene anvendtes prøvemethoden beskrevet i afsnit 4.3.2., rhombemetoden, hvor kvadratiske prøvelegemer med pålimede plader trykbelastes i diagonal retning.

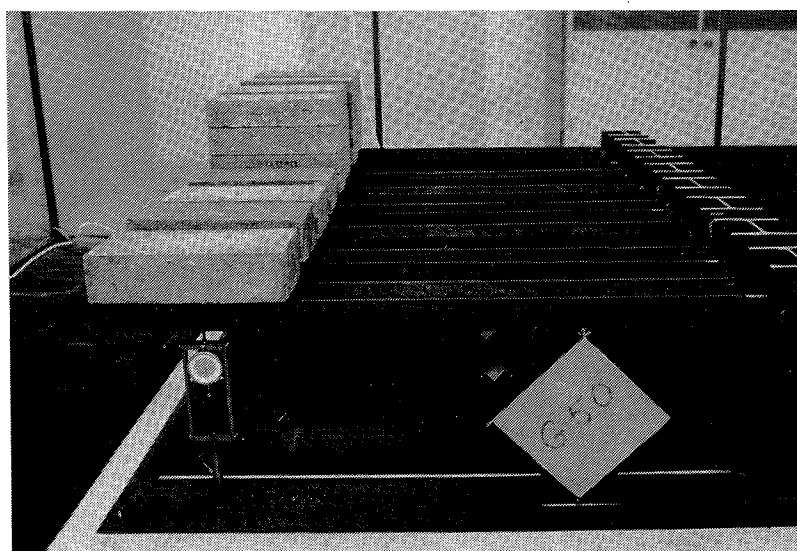
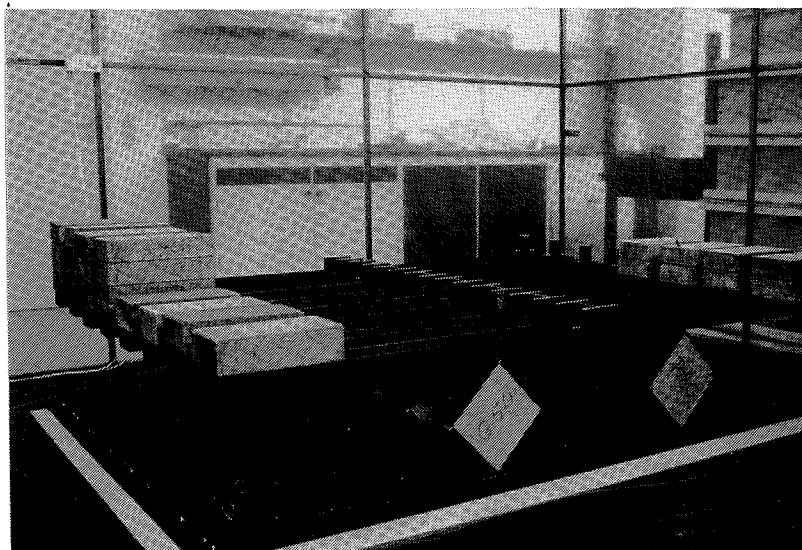
Prøvelegemer

Prøvelegemerne, som vist på figur 4.14, bestod af 200×200 mm mineraluldklodser, udskåret af 100 mm tykke plader (lameller). Vinkelret på fiberplanet er pålimet 12×100×200 mm stålplader med en tokomponent polyurethanlim.

Hver af de to mineraluldd typer G50 og R80 er undersøgt for to forskellige belastningsniveauer med 4 prøver i hver serie. Ialt indgår der altså 16 prøver.

Forsøgsopstilling

Prøvelegemerne blev belastet med en statisk langtidslast gennem et simpelt vægtstangsprincip. Forsøgsopstillingen med de ialt 16 prøvelegemer er vist på figur 6.2.



Figur 6.2:

Forsøgsopstilling til krybeforsøg.

Belastningen blev overført i den drejelige vægtarms tredjedelspunkt til prøvelegemets kæber gennem løse ruller (rundjern, $\phi 12$), der blev fikseret i vægarmen og bundstykket af en trekantformet udfræsning.

Den påførte last blev inden prøvningerne kontrolleret med et dynamometer. Usikkerheden på den påførte last blev herved ca. 1%.

Målinger

Forskydningsdeformationerne er bestemt gennem målingen af prøvelegemernes diagonale sammentrykning.

Den drejelige vægtarm og bundstykket er forsynet med henholdsvis en messingbøsning og en stålkugle for etablering af veldefinerede målepunkter.

Med den valgte placering af målepunkterne (3 gange trykresultantens afstand fra omdrejningspunktet) bliver målingen forstærket 3 gange. Der ses bort fra deformationerne i de svære stålprofiler. Under den trinvis lastpåførsel op til den valgte arbejdsbelastning er målt sammenhørende værdier af last og deformation for bestemmelse af de enkelte prøvelegemers arbejdskurver (herunder initialtøjninger).

I forsøgsperioden, der strakte sig over ca. 250 dage, blev deformationerne målt ca. hver 14. dag med et mekanisk måleur, i den første uge dog hver dag.

Måleusikkerheden er $\pm 0,01$ mm. Fejlaflæsninger er søgt undgået ved omhyggelig kontrol og dublering af målinger. Kalibrering er foretaget inden hver måling.

Forsøgsbetingelser

Forsøgene er udført i et klimakammer med en temperatur på $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ og en relativ fugtighed på $65\% \pm 3\%$. Prøvelegemerne var desuden konditioneret i dette rumklima ca. 1 måned inden forsøgsstarten.

Både fugt- og temperaturvariationer vil sandsynligvis influere på krybeforløbet, således at stigende temperatur og fugtindhold vil forøge krybningen.

Disse parametre er elimineret ved det konstante rumklima, således at krybningen alene må antages at hidrøre fra den påførte last (under de givne klimabetingelser).

Beregninger

Den til den påførte last, P , hørende forskydningsspænding, τ_o , (arbejdsbelast) beregnes af udtrykket:

$$\tau_o = \frac{P}{L T \sqrt{2}}$$

hvor L er prøvelegemets kantlængde (200 mm) og T tykkelsen (100 mm).

Den tilhørende forskydningstøjning, γ_o , (initialtøjning) beregnes af udtrykket:

$$\gamma_o = \frac{\delta_o \sqrt{2}}{L}$$

hvor δ_o er den til τ_o hørende diagonaldeformation.

De valgte belastningsniveauer, for G50 henholdsvis 20 og 40%, for R80 henholdsvis 30 og 60%, ligger i det lineærelastiske område, og forskydningsmodulen svarende til korttidsbelastning, G_o , beregnes som:

$$G_o = \frac{\tau_o}{\gamma_o} = \frac{P}{2 T \delta_o}$$

Krybefunktion

Krybningen udtrykkes ved krybefunktionen $\varphi = \varphi(t)$ med tiden som uafhængig variabel:

$$\varphi(t) = \frac{\gamma(t) - \gamma_o}{\gamma_o}$$

hvor $\gamma(t)$ er vinkeltøjningen til tiden t og γ_o initialtøjningen.

Krybefunktionen udtrykker altså den relative tilvækst af vinkeltøjningen. Omformes udtrykkes, kan $\gamma(t)$ udtrykkes ved:

$$\gamma(t) = \gamma_o (1 + \varphi(t))$$

Indføres krybemodulen $G(t) = \frac{\tau_o}{\gamma(t)}$ fås:

$$G(t) = \frac{\tau_o}{\gamma_o} (1 + \varphi(t))^{-1} = G_o (1 + \varphi(t))^{-1}$$

I praksis er det ikke nødvendigt at behandle langtidseffekter med særlig stor nøjagtighed, især ikke da langtidslasten vanskeligt kan defineres særlig præcist, og det er 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 elasticitetsmodulerne med de tidsafhængige moduler.

Som krybefunktion, $\varphi(t)$, er til de foreliggende forsøg anvendt en hyperbelfunktion af typen:

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

hvor α og β er empiriske konstanter.

Til funktionen er stillet følgende betingelser:

- a) $\varphi(0) = 0$, d.v.s. når lasten påføres må krybningen være nul.
- b) $\frac{d\varphi}{dt} > 0$, d.v.s. det må være en monotont voksende funktion.
- c) $\frac{d^2\varphi}{dt^2} < 0$, d.v.s. krybehastigheden aftager kontinuerligt, og der må ikke optræde vendepunkter i kurvens forløb. I praksis forudsættes altså, at alle influerende faktorer på krybningen langsomt dør hen.
- d) $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\varphi}{dt} = 0$, d.v.s. krybedeformationen går imod en endelig værdi (nødvendig, men ikke tilstrækkelig betingelse for asymptote).

Det sidste punkt, d), lader sig ikke eksperimentelt bestemme på grund af den begrænsede tid.

I litteraturen foreslås ofte funktioner uden asymptote, og det må i så fald påregnes, at deformationen følger modellen indenfor den for konstruktionen ønskede brugsperiode (levetid). Uanset model er det dog næsten altid nødvendigt at ekstrapolere ud over det eksperimentelle tidsforløb.

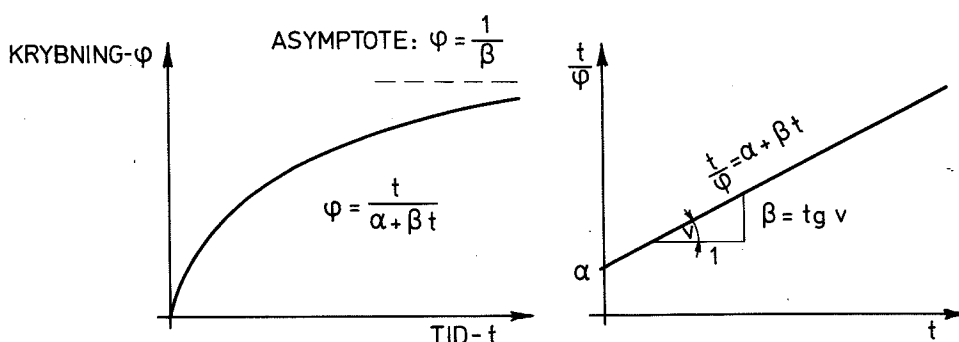
Den valgte krybefunktion, $\varphi = t/(\alpha + \beta t)$ kan forholdsvis simpelt tilpasses forsøgsresultaterne. Hyperblen kan ved en simpel transformation omformes til udtrykket:

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

der i et $\frac{t}{\varphi}$, t -koordinatsystem udtrykker

em ret linie. Parametrene α og β kan altså efter denne transformation bestemmes ved en lineær regression, hvor α angiver liniens skæring med ordinataksen $\left(\frac{t}{\varphi}\right)$ og β er udtryk for liniens hældning (se figur 6.3).

Funktionens grænseværdier (asymptote) for tiden gående mod uendelig er: $\varphi_{\infty} = \beta^{-1}$



Figur 6.3:

Krybefunktion og princip ved bestemmelse af parametrene α og β .

De fundne krybefunktioner er angivet i tabel 6.1 sammen med data for de 16 prøvevelegemer.

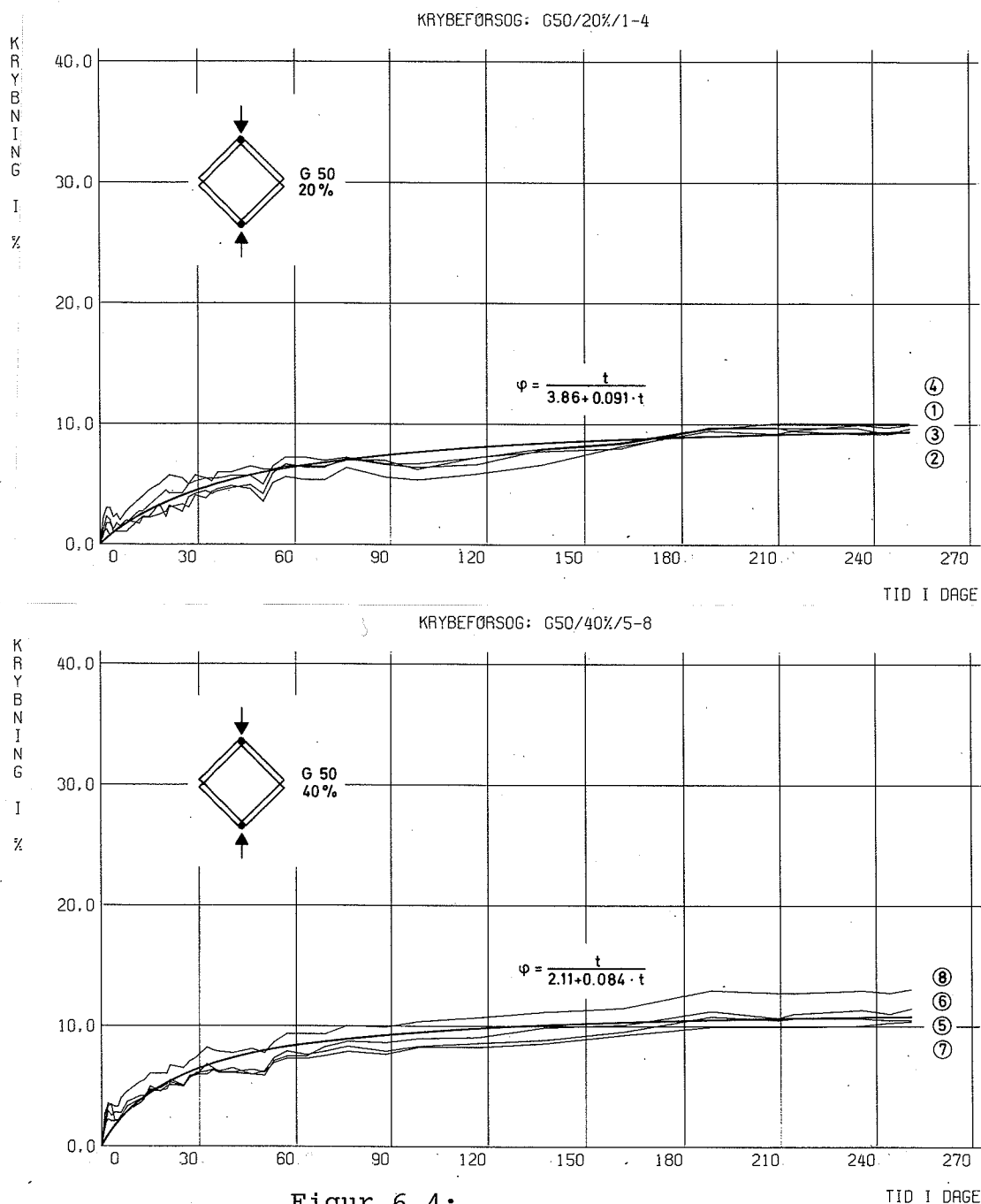
Mine- ral- uld	Prøve nr.	Rum- vægt kg/m³	Last- niveau ‰	Startbetingelser (t = 0)				Krybning efter 250 dage ‰	Blivende tøjning efter af- lastning ‰	Krybefunktion: $\varphi = \frac{t}{\alpha + \beta t}$ [‰] Grænseværdi: $\varphi_{\infty} = \beta^{-1}$					
				τ_0 kN/m²	G_0 kN/m²	G_0 (Mid- del) kN/m²	γ_0 ‰			Aktuel			Middel		
										α	β	φ_{∞} ‰	α	β	φ_{∞} ‰
G50	1	56	≈ 20	15,2	5360	5360	2,84	10,0	1,03	2,44	0,097	10	3,86	0,091	11
	2	58			5470		2,78	9,4	1,11	5,08	0,091	11			
	3	54			5340		2,85	9,7	0,86	3,12	0,094	11			
	4	56			5280		2,88	10,1	0,92	4,79	0,083	12			
G50	5	55	≈ 40	30,4	5940	5180	5,12	10,5	1,62	2,31	0,087	11	2,11	0,084	12
	6	55			4930		6,17	11,5	1,89	2,35	0,082	12			
	7	56			4970		6,12	10,4	1,84	2,12	0,092	11			
	8	55			4890		6,22	13,1	2,10	1,66	0,073	14			
R80	9	83	≈ 30	10,4	2420	2160	4,30	16,3	1,10	1,01	0,060	17	0,81	0,057	18
	10	84			2450		4,09	13,1	0,66	1,07	0,074	14			
	11	73			1920		5,41	20,1	1,46	0,71	0,049	21			
	12	74			1860		5,59	21,8	2,01	0,43	0,045	22			
R80	13	80	≈ 60	20,8	2400	2150	8,67	29,0	1,00	0,43	0,033	30	0,49	0,022	45
	14	79			2230		9,33	36,4	1,53	0,38	0,027	37			
	15	80			2260		9,20	47,8	3,12	0,28	0,020	50			
	16	73			1710		12,16	61,1	2,42	0,27	0,016	63			

Tabel 6.1:

Oversigt over krybeforsøg. Ved aflastningen efter 250 dage registreredes den blivende tøjning (momentane eftervirkning). Den tidsafhængige eftervirkning er ikke undersøgt.

Resultaterne af krybeforsøgene er vist på figur 6.4 og 6.5 sammen med de fundne krybefunktioner.

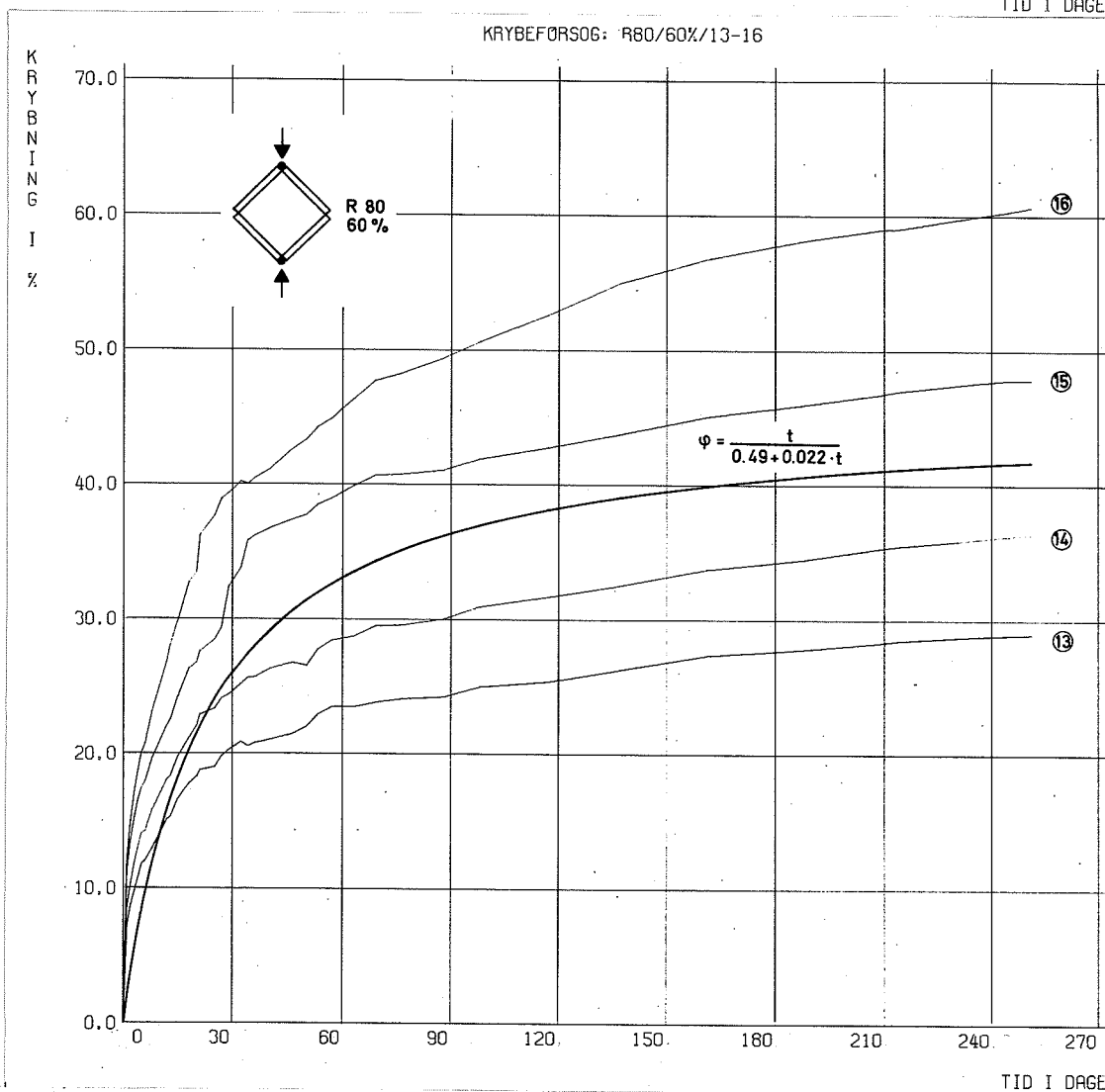
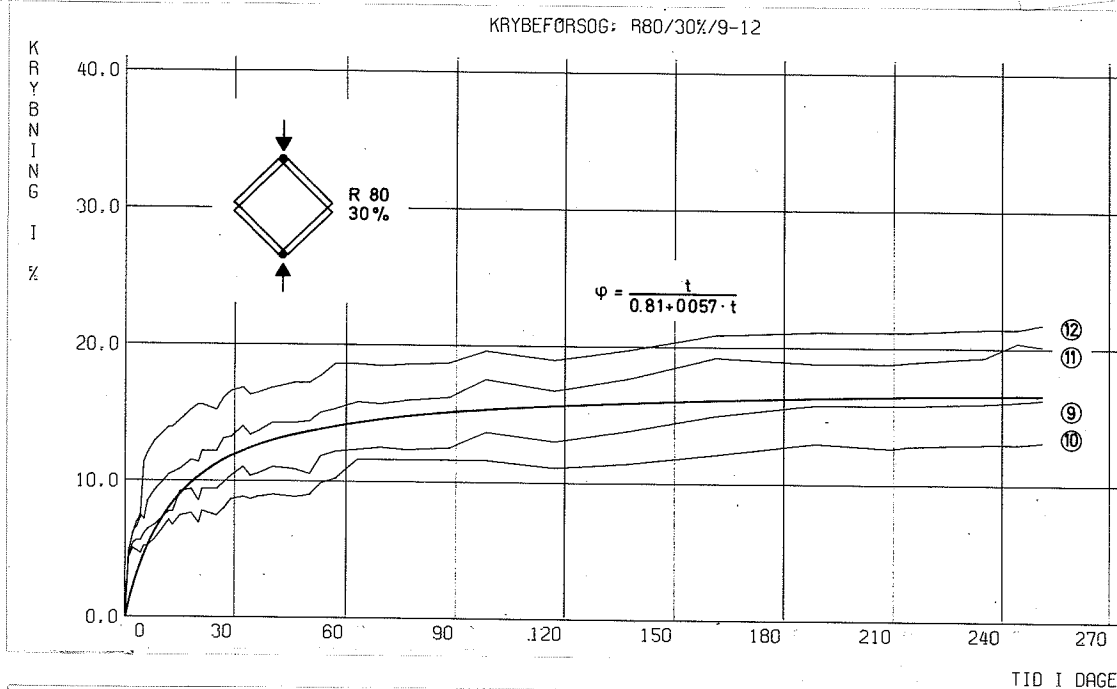
Krybningen er overalt angivet i procent af initialtøjningerne og tiden i dage (å 24 timer). Parametrene α og β i krybefunktionerne er ikke dimensionsløse størrelser.



Figur 6.4:

Resultater af krybeforsøg med G50 for lastniveauer på henholdsvis 20 og 40%.

De angivne numre på kurverne svarer til prøvenumrene i tabel 6.1.



Figur 6.5:

Resultater af krybeførsøg med R80 for lastniveauer henholdsvis 30 og 60%. Angivne numre svarer til prøvenumrene i tabel 6.1. De store spredninger må sammenholdes med de usædvanligt store spredninger på prøvernes aktuelle rumvægte (jfr. tabel 6.1) og dermed forskydningsparametrene.

Vurdering

Generelt set vokser den absolutte krybning (absolutte tilvækst i vinkeltøjning) med den spænding, der forårsager den.

For mineraluld G50 er der tilnærmelsesvis proportionalitet mellem spænding og krybning, op til ca. 40% af korttidsbrudstyrken (øvre lastniveau), da de relative krybninger for de to lastniveauer er tilnærmelsesvis ens (se figur 6.4). Noget tilsvarende er sandsynligvis gældende for R80, men det største lastniveau for R80, 60%, ligger over en eventuel proportionalitetsgrænse, og krybningen vokser her stærkere end spændingen.

Resultaterne af forsøgene med R80 er desværre behæftet med meget store spredninger. Dette må sammenholdes med de usædvanlig store spredninger på prøvernes aktuelle rumvægte (se tabel 6.1). Specielt må noteres de meget lave rumvægte på prøverne 11, 12 og 16.

Rumvægtens indflydelse afspejler sig allerede under forsøgsstarten i de initielle forskydningsparametre. Forskydningsmodulens, G_0 's, afhængighed af rumvægten følger tilsyneladende de i afsnit 4 fundne eksponentielle sammenhænge, og det samme er sandsynligvis tilfældet for forskydningsstyrken. Korrigeres de målte krybninger til samme rumvægt (og dermed lastniveau) efter den eksponentielle sammenhæng, vil de store spredninger reduceres betydeligt.

De analytiske modeller for den relative krybning viser god overensstemmelse med de målte krybeforsøg. De største afvigelser optræder lige efter lastpåførslen, hvor krybehastigheden er størst. Dette har dog mindre betydning for vurderingen af krybeforløbet i relation til en konstruktions brugsperiode (levetid).

Antages krybningen at følge de analytiske modeller udover det eksperimentelle tidsforløb, vil krybningen (ved forskydning) gå mod grænseværdier (hyperbelfunktionernes asymptoter). For belastningsniveauer op til ca. 30% af korttidsbrudstyrken vil mineraluld G50 have en krybegrænse ca. 12% over initialdeformationen og mineraluld R80 ca. 18%.

Forskydningsmoduler (G_0) bestemt ved korttidsforsøg reduceres altså med ca. 11% for G50 og ca. 15% for R80 under statisk langtidslast mindre end ca. 30% af korttidsbrudstyrken.

7. UDMATTELSESFORSØG (DYNAMISK LAST)

Ved vurderingen af mineraluldens langtids-egenskaber i relation til den praktiske anvendelse som kernemateriale i en sandwichkonstruktion må der også tages hensyn til belastningernes vekslende karakter.

Hidtil omtalte forsøg vedrører kun statiske belastninger. I praksis vil konstruktionen ofte udsættes for varierende belastning, f.eks. hidrørende fra vindkræfter, sne på tag, gang over gulv m.v.

Belastningens vekslende karakter kan føre til udmattelsesbrud for spændinger meget lavere end materialets korttidsbrudspænding.

I sandwichkonstruktioner er forskydnings-spændingen den mest kritiske spænding, mineralulden udsættes for. Effekten af gentagne forskydningspåvirkninger af mineralulden er derfor vigtig at få belyst.

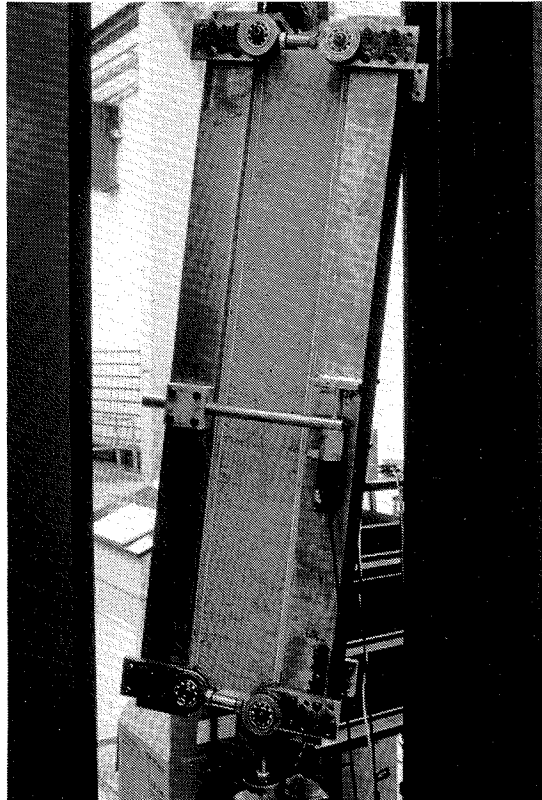
Yderligere vil netop forskydningspåvirkningen give anledning til store bøjningspåvirkninger af mineralfibrene ved limforbindelsen, der på grund af limens indtrængen omkring de enkelte fibre (orienteret i planer vinkelret på flangerne) i princippet er indspændt.

Vekslende forskydningspåvirkninger kan altså give anledning til bøjningsbrud i de enkelte mineralfibre nær limforbindelsen.

Forsøg

Til forsøgene blev anvendt forskydningsprøvemethoden, beskrevet i afsnit 4.2, idet denne metode giver den bedste simulering af forholdene i den egentlige sandwichkonstruktion.

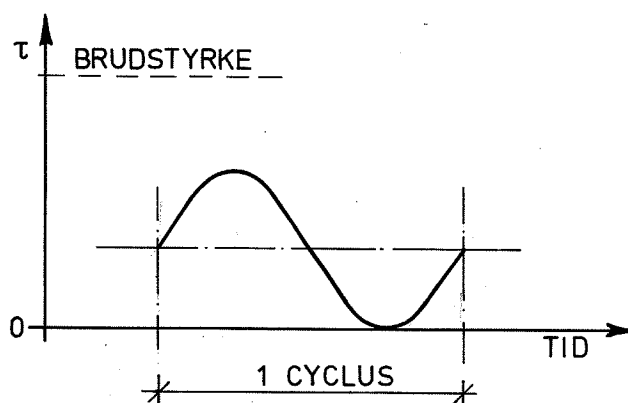
Forskydningsrammen, vist på figur 7.1, blev opspændt i en almindelig trækprøvemaskine, forsynet med et modul til generering af de ønskede belastningscykler. Desuden blev maskinen forsynet med en tæller til registrering af det påførte antal cykler.



Figur 7.1:

Prøvemethode anvendt i udmattelsesforsøg.

Ved bestemmelse af udmattelsesstyrken blev prøvelegemerne påført en sinusformet vekselbelastning, som vist på figur 7.2, gående fra nul til et vist niveau under forskydningsstyrken bestemt ved korttidsforsøg.



Figur 7.2:

Princip i udmattelsesforsøg. Når prøvelegemet i en cyclus belastes fra 0 og opefter betegnes forsøget almindeligvis et udsvingsforsøg.

Den til det øvre lasttrin bestemte udmattelsesstyrke betegnes almindeligvis udsvingsstyrken.

Forsøgsresultatet er altså det tal, der angiver, hvor mange svingninger prøvelegemet har kunnet udsættes for, før brud indtræffer.

Ved gentagelse af forsøget med andre belastninger kan brudstyrken bestemmes som funktion af svingningsantallet. Den tilhørende kurve benævnes almindeligvis som materialets Wöhler-kurve.

For de fleste materialer vil kurven have et tilnærmelsesvis vandret afsnit, svarende til at materialet ved en given spænding teoretisk set kan belastes uendelig mange gange. Det er sædvanligvis denne spænding, der angives som et materiales udmattelsesstyrke.

Desværre har det ikke været muligt tidsmæssigt at opsamle det tilstrækkelige antal data for bestemmelse af mineraluldens Wöhler-kurve.

Lastcyklerne kunne i den valgte opstilling ikke påføres med større frekvens end ca. 300 h^{-1} , og det betyder meget langvarige forsøg, selv med de her valgte meget høje belastningsniveauer.

Udmattelsesstyrker er normalt uafhængige af frekvensen, og den anvendte lave frekvens har sandsynligvis ingen indflydelse på mineraluldens udmattelsesstyrke.

Ialt udførtes fire forsøg, to med mineraluld R120 og to med mineraluld G90, begge typer sammensat som beskrevet i kapitel 1.

Prøvelegemerne bestod af mineraluldlameller ($100 \times 100 \times 800 \text{ mm}$) limet til 12 mm krydsfinérflanger ($100 \times 800 \text{ mm}$) med en énkomponent polyurethanlim (ca. 300 g/m^2).

Konditionering

Prøvelegemerne var inden prøvningerne konditioneret ved $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ og $65\%\text{RF} \pm 3\%\text{RF}$.

Selve prøvningerne foregik dog i laboratoriets rumklima ved ca. 20°C og $50\%\text{RF}$.

Resultatet af prøvningerne er vist i tabel 7.1.

Mineraluld	Prøve nr.	Rumvægt (af uld) kg/m ³	Korttids- styrke τ_u kN/m ²	Lastcyclus % - %	Antal cykler før brud ca.
R120	1	128	66	0 - 60	209200
	2	128		0 - 80	1800
G90	3	96	124	0 - 60	86100
	4	92		0 - 80	13900

Tabel 7.1:

Resultater af udmattelsesforsøg med 4 prøvelegemer af mineraluld R120 og G90.

Det beskedne antal prøver er utilstrækkeligt for vurderingen af mineraluldens udmattelsesegenskaber, og flere forsøg kunne ønskes.

De valgte belastningsniveauer, henholdsvis 60 og 80%, er urealistisk høje i relation til den praktiske anvendelse, men efterlader dog et indtryk af, at belastningers vekslende karakter næppe giver anledning til uvarslede brud ved den praktiske brug af sandwichkonstruktioner, hvor mineralulden efter indførelse af passende sikkerhedsniveau næppe belastes hårdere end ca. 20% af korttidsbrudstyrken.

8. ACCELEREREDE ÆLDNINGSFORSØG (TEMPERATUR-/FUGTBELASTNING)

Alle tidligere omtalte forsøg vedrører kun de rent mekaniske påvirkninger af mineralulden. Skal sandwichkonstruktionen imidlertid anvendes som bærende bygningsdel, må det også sikres, at mineralulden ikke nedbrydes under påvirkning af de vekslende temperatur- og fugtpåvirkninger, sandwichkonstruktionen som klimaskærm uundgåeligt påvirkes af i en bygnings levetid.

Spørgsmålet om holdbarhed kan kun besvares effektivt gennem en registrering af den aktuelle opførsel over konstruktionens brugsperiode, hvad der ikke lader sig praktisere.

I mangel af bedre kan udføres accelererede ældningsforsøg, der selvfølgelig giver et indtryk af ændringerne i materialeegenskaberne under påvirkning af givne ældningsbetingelser, men da disse stort set må vælges arbitrært uden korrelation med de naturlige klimabetingelser, må resultaterne af sådanne ældningsforsøg altid betragtes med megen forsigtighed.

I relation til de materialeteknologiske undersøgelser af mineralulden er der udført to serier accelererede ældningsforsøg med de samme mineraluldtypeper, som beskrevet i kapitel 1.

Forsøgene er udført på Statens Byggeforskningsinstitut og er detaljeret beskrevet i litt. [1]. Nedenstående gengives hovedresultaterne af de udførte prøvninger.

Som parameter for bestemmelse af styrkereduktionen ved forskellige antal belastningscykler er valgt trækstyrken målt gennem limforbindelserne til de anvendte flangeplader, således at eventuelle svækkelser i limforbindelserne hidrørende fra produktionen er indbefattet.

De anvendte prøvelegemer er helt analoge til de prismatiske prøvelegemer beskrevet i afsnit 2.1 (se figur 2.1).

En del af prøvelegemerne er desuden trækprøvet i opstillingen beskrevet i samme afsnit.

I undersøgelsen indgår mineraluld G50, G70, R80 og R100. Som flangeplade er anvendt krydsfinér, spånplade og eternit.

I nærværende rapport refereres dog kun resultaterne af prøver med krydsfinérflanger.

Til limforbindelsen blev anvendt en én-komponent polyurethanlim i en mængde af ca. 300 g/m², og for en enkelt serie prøvelegemer med G50 600 g/m².

De cycliske temperatur-/fugtpåvirkninger for den accelererede ældning er valgt ud fra kendskabet til de ekstreme forhold, der kan optræde, når konstruktionen anvendes direkte som udvendig klimaskærm uden specielle beskyttende foranstaltninger.

De to typer vekslende påvirkninger er karakteriseret ved en cyclus med frysepunktpassager og en cyclus med opfugtning og udtørring (ved høj temperatur).

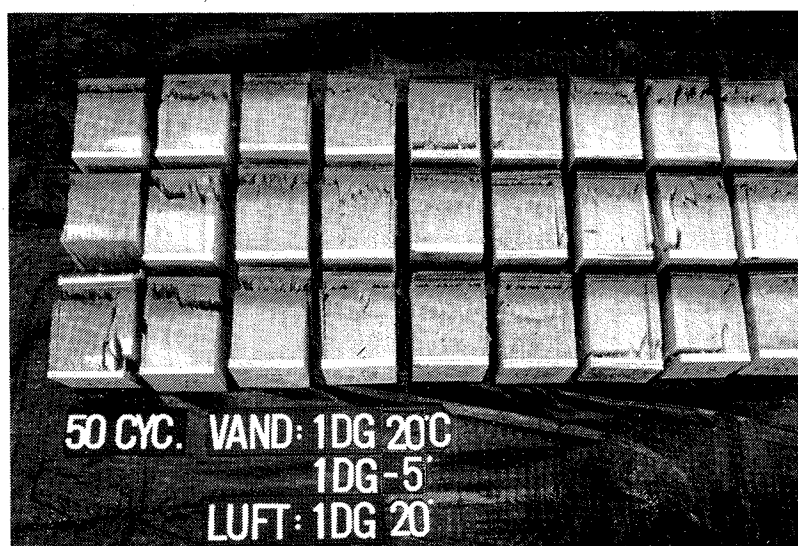
En cyclus med frysepunktpassage består af tre trin:

- 1 døgn i vandbad ved ca. 20°C
- 1 døgn i fryserum ved ca. -5°C
- 1 døgn i alm.rumklima ved ca. 20°C.

Den vandpåvirkede zone af prøvelegemet omfatter den ene flange, limforbindelsen og ca. 1 cm af mineralulden.

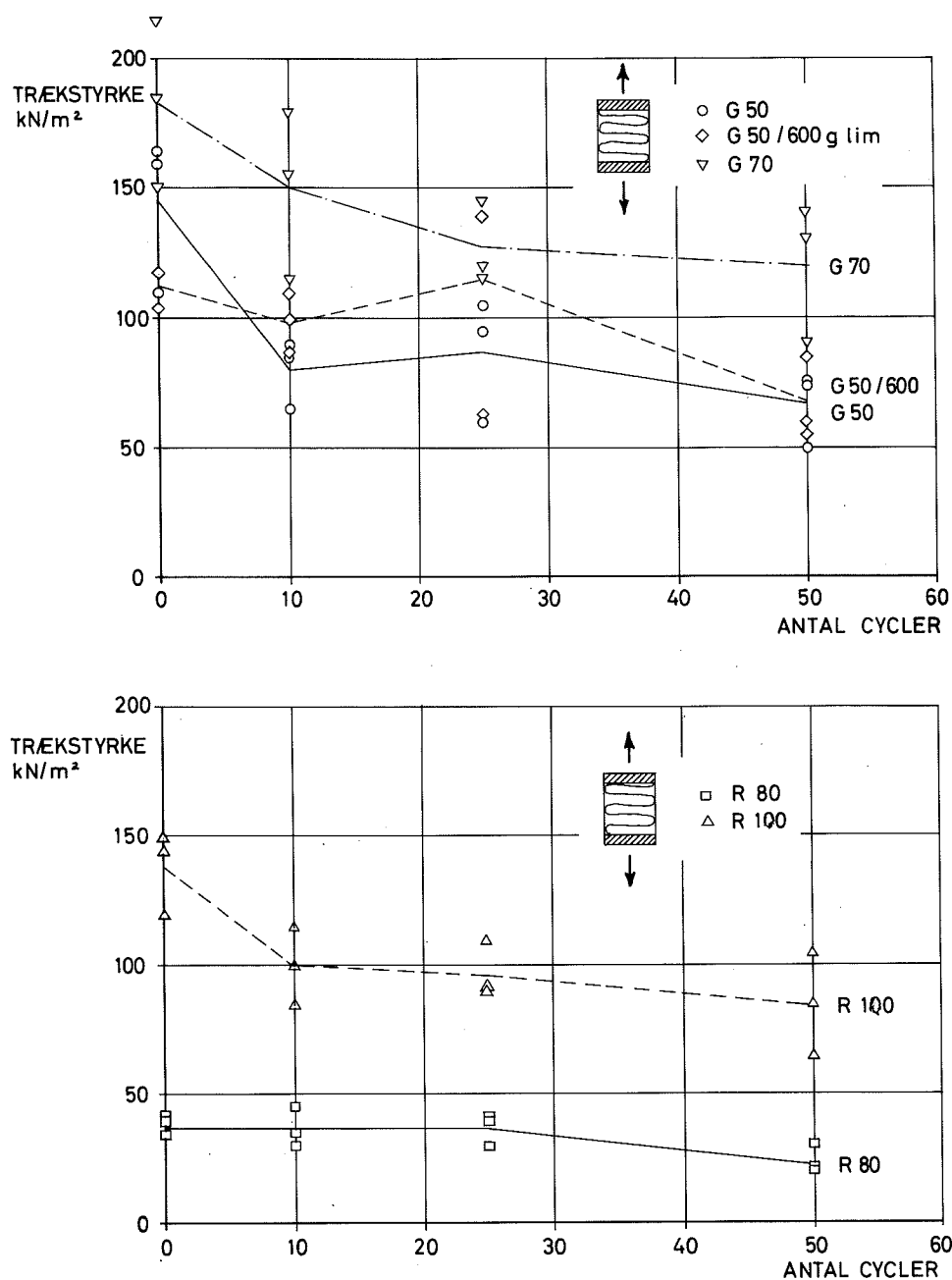
Styrkereduktionen blev undersøgt ved henholdsvis 10, 25 og 50 cykler med 3 prøver i hver serie.

Resultaterne er afbildet i figur 8.2.



Figur 8.1:

Trækprøvelegemer efter 50 cykler med frysning/optøning. Trækbruddet optræder hovedsageligt ved limforbindelsen mod den eksponerede flange.



Figur 8.2:

Trækstyrke for prøver udsat for ældningscykler med frysepunktpassage:

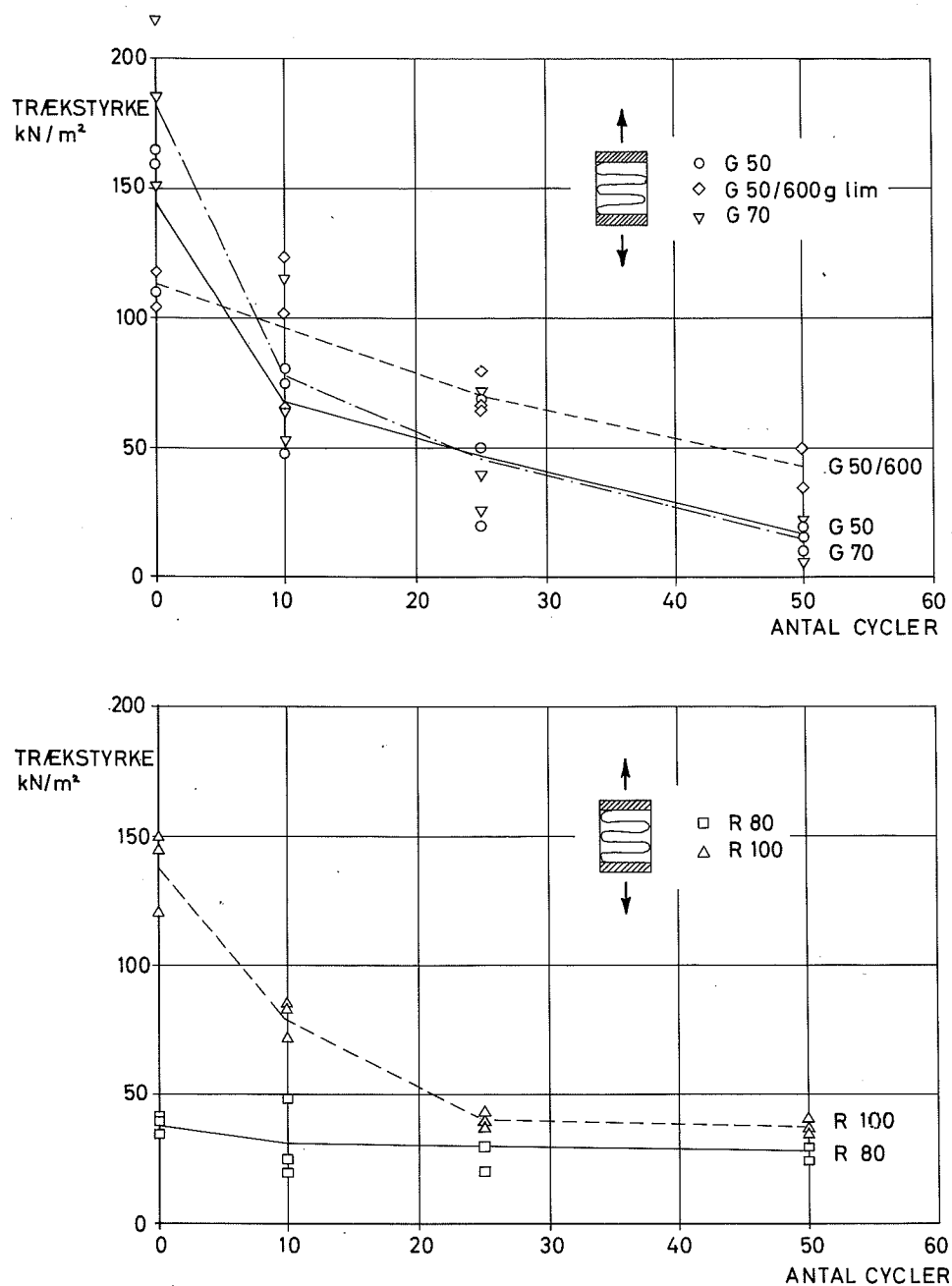
- 1 døgn i vandbad ved ca. 20°C
- 1 døgn i fryserum ved ca. -5°C
- 1 døgn i alm.rumklima ved ca. 20°C

I den anden belastningscyclus (opfugtning/ udtørring) består hver cyclus af to trin:

- 1 døgn i vandbad ved ca. 20°C
- 1 døgn i varmeskab ved ca. 70°C.

Styrkereduktionen er tilsvarende undersøgt ved henholdsvis 10, 25 og 50 cykler med 3 prøver i hver serie.

Resultaterne er gengivet i figur 8.3.



Figur 8.3:

Trækstyrke for prøver udsat for ældningscykler med opfugtning / udtørring:

- 1 døgn i vandbad ved ca. 20°C
- 1 døgn i varmeskab ved ca. 70°C

Generelt set afspejler forsøgene med ældning ved frysepunktpassage forholdsvis små styrkereduktioner, mens ældning ved opfugtning og udtørring ved 70°C viser meget store styrkereduktioner.

Resultaterne er desværre på grund af det beskedne antal prøver i hver serie behæftet med meget store spredninger.

Sammenlignes med resultaterne fra korttidsforsøgene beskrevet i afsnit 2.1 (se figur 2.5), er der endog store afvigelser på referenceværdierne. Specielt ser det på baggrund af tidligere erfaringer ganske ulogisk ud, at referencetrækstyrken under anvendelse af 600 g lim pr.m² i begge typer ældningsforsøg er ca. 30% lavere end ved anvendelse af kun 300 g lim pr.m².

Forholdet skyldes sandsynligvis de produktionstekniske vanskeligheder med etablering af en ensartet limforbindelse. I afsnit 2.1 var trækstyrken, målt gennem limforbindelserne i de tilsvarende fabriksfremstillede elementer, behæftet med variationskoefficienter op til ca. 50%

Ud fra de givne forsøg er det således meget vanskeligt at separere svækkelserne i limforbindelsen fra svækkelserne i selve mineralulden.

Som supplement til disse prøvninger blev der på Rockwool A/S's laboratorium udført en serie ældningsforsøg med R80, men hvor trækstyrken blev bestemt ud fra prøvemethoden beskrevet i afsnit 2.2 (timeglasformet prøvelegeme) med et reduceret tværsnitsareal på $5 \times 15 = 75 \text{ cm}^2$.

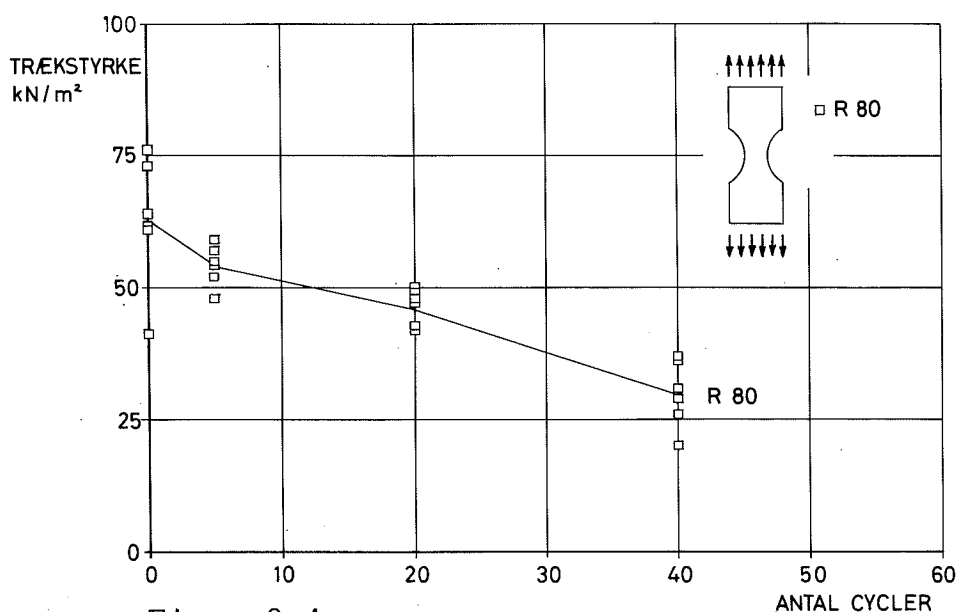
De fundne styrkereduktioner skulle her ved ikke være påvirket af eventuelle svækkelser i limforbindelsen og de mekaniske forstyrrelser hidrørende fra flangepladernes fugtdeformationer og opspændingsarrangementet ved trækprøvningen.

De anvendte ældningscykler påtvunget prøvelegemerne i zonen ved det reducerede tværsnit bestod af to trin:

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

Trækstyrken blev bestemt efter henholdsvis 0, 5, 20 og 40 cykler med 6 prøver i hver serie.

Resultaterne er afbildet i figur 8.4.



Figur 8.4:

Trækstyrke (i uld) efter ældningscykler bestående af:

- 1 time i vanddamp ved ca. 70°C
- 2 timer i fryserum ved ca. -18°C

Spredningerne på målte trækstyrker hidrører primært fra rumvægtsvariationerne mellem de enkelte prøver. I de aktuelle prøver er middelrumvægten 72 kg/m^3 med en variationskoefficient på 8%.

Vurdering af ældningsforsøg

Resultaterne af ældningsforsøgene efterlader uvilkårligt spørgsmålet om, hvilke ældningspåvirkninger, der kan anvendes for at opnå et tilstrækkeligt billede af langtidseffekter.

Til sammenligning kan anføres, at den amerikanske standard for accelereret ældning af kernematerialer til sandwichkonstruktioner, se litt. [3], anvender ældningscykler med tilsvarende ekstreme påvirkninger, som her anvendt, men foreskriver samtidig, at hver cyclus kun gennemløbes 6 gange.

Selv om visse af de anvendte ældningsforløb sandsynligvis er for skrappe, er der dog ingen tvivl om, at især høje vanddampkoncentrationer kombineret med høje temperaturer giver anledning til betydelige styrkereduktioner, som der må tages hensyn til, hvis sandwichkonstruktionen som bærende konstruktion udsættes for sådanne påvirkninger.

Hvis ikke mineraluldens egenskaber kan bevares ved f.eks. imprægnering, må der træffes foranstaltninger (f.eks. udvendig beklædning, indvendig dampspærre m.v.), så spidserne af disse temperatur/fugt-påvirkninger reduceres.

I relation til vurderingen af mineraluldens holdbarhed skal endvidere anføres, at mineralfibrene generelt set ikke er særlig resistente overfor alkaliforbindelser, hvorfor det især ved valg af flangemateriale, limtyper, m.v., må sikres, at eventuelle udvaskninger (alkalisk porevand) ikke optræder.

9. LITTERATURREFERENCER

- [1] Nicolajsen, Asta:
Mineraluldbaserede sandwichelementer -
Laboratorieforsøg til bedømmelse af de
fugttekniske egenskaber.
SBI-rapport 114, 1978.
- [2] ASTM-Standards, Annual Book 1977,
Part 18, USA 1977.
- [3] ASTM-Standards Part 16:
Structural Sandwich Constructions;
Wood; Adhesives.
Philadelphia, 1969.
- [4] O'Sullivan, H.P.:
Double Block Shear Test for Foil
Honeycomb Cores.
Aircraft Engg. 33, 385, 1961.
- [5] Rasmussen, Lauritz:
Mineraluldbaserede sandwichelementer -
Materialeprøvning af krydsfinér.
IFH-rapport nr. 127, 1978.
- [6] Rasmussen, Lauritz:
Mineraluldbaserede sandwichelementer -
Bøjningsforsøg med korttidslast og
langtidslast.
IFH-rapport nr. 129, 1978.

SUMMARY

This report deals with the mechanical properties of mineral wool relating to the use of mineral wool as core material in load-bearing sandwich constructions.

The grid structure of the mineral fibres, parallel in plane, and the mutually bindings in the cross-points of the fibres give the mineral wool considerable strength and stiffness parallel to the fibre plane. These properties are used in the sandwich construction by cutting the mineral wool in lamellae and gluing them to the flange plates with the fibre plane oriented perpendicularly to the plates.

Short-time-properties

The mechanical properties of the mineral wool (in the fibre plane) is examined by stress-strain-tests in tension, compression and shear respectively, and in connection with this different test methods have been examined/developed.

The examination includes a total of 6 types of mineral wool, i.e. 3 types of Rock-wool and 3 types of Glass-wool.

In general the mineral wool shows linear-elastic properties both in tension, compression and shear with a limit of proportionality at about 50-60% of the corresponding ultimate strength.

The results of the short-time tests are shown in the table stated below.

Mineral Wool	Tension		Compression		Shear	
	Strength σ_t kN/m ²	Modulus E_t kN/m ²	Strength σ_c kN/m ²	Modulus E_c kN/m ²	Strength τ kN/m ²	Modulus G kN/m ²
R80	68	5890	32	3390	32	2130
R100	83	8130	51	5090	41	2410
R120	164	18490	71	7930	66	5170
R	$\sigma_t=0,018\gamma^{1,84}$	$E_t=0,064\gamma^{2,54}$	$\sigma_c=0,0044\gamma^{1,99}$	$E_c=0,31\gamma^{2,07}$	$\tau=0,020\gamma^{1,66}$	$G=0,20\gamma^{2,07}$
G50	135	13850	54	5250	62	4740
G70	196	22960	82	5840	82	7500
G90	300	35700	156	16650	124	11920
G	$\sigma_t=0,45\gamma^{1,42}$	$E_t=15,0\gamma^{1,70}$	$\sigma_c=0,030\gamma^{1,87}$	$E_c=1,62\gamma^{1,99}$	$\tau=0,63\gamma^{1,15}$	$G=10,16\gamma^{1,54}$

The short-time properties of the mineral wool in tension, compression and shear (in the fibre plane). Values stated are average values. The test specimens are conditioned at a temperature of 20 °C and a relative humidity of 65 per cent.

Tension tests on specimens cut directly from manufactured sandwich components showed that the tensile strength of the glue joint between mineral wool and flange plate is 15-45 per cent lower than the tensile strength of mineral wool itself.

Long-time-properties

Beside tests with short-time load creep-tests have been carried out to illustrate the shrinkage of the mineral wool influenced by long-time-shear-forces, and furthermore a few experiments have been carried out for determining the effect of repeated shear loads.

The results of the creep-tests described by analytic models (hyperbolic functions) show that for stress levels up to approx. 30 per cent of the short-time ultimate stress the shrinkage amounts to approx. 12-18 per cent of the initial deformation. The shearing stiffness (G-modulus) determined by short-time tests is hereby reduced by approx. 11-15 per cent during long-time-shear loading.

Furthermore, the results of accelerated aging tests are referred in order to illustrate the durability of mineral wool exposed to different temperature and humidity conditions. The laboratory aging is carried out at The Danish Building Research Institute and is described in detail in litt. [1].