

By og Byg Dokumentation 011

# Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge

# Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge

Torben Valdbjørn Rasmussen

Titel	Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge
Undertitel	
Serietitel	By og Byg Dokumentation 011
Udgave	1. udgave, 2. oplag
Udgivelsesår	2002
Forfatter	Torben Valdbjørn Rasmussen
Sprog	Dansk
Sidetæl	75
Litteratur-henvisninger	Side 39
English summary	Side 40-41
Emneord	Løsfyldsisolering, modeldannelse, spændingsberegning, friktion, horisontaltrykforhold, krybning, volumenstabilitet.
ISBN	87-563-1092-7
ISSN	1600-8022
Pris	Kr. 164,00 inkl. 25 pct. moms
Tekstbehandling	Torben Valdbjørn Rasmussen, Solveig Susanne Johansen
Tegninger	Torben Valdbjørn Rasmussen
Fotos	Jan Carl Westphall
Udgiver	By og Byg Statens Byggeforskningsinstitut, P.O. Box 119, DK-2970 Hørsholm E-post by-og-byg@by-og-byg.dk www.by-og-byg.dk

Eftertryk i uddrag tilladt, men kun med kildeangivelsen: *By og Byg Dokumentation 011: Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge. (2001)*

# Indhold

Forord .....	4
Indledning .....	5
Baggrund .....	5
Formål .....	5
Anvendte isoleringsmaterialer .....	5
Sammenfatning .....	6
Model .....	6
Forsøg .....	6
Beregninger .....	7
Konklusion .....	7
Teori .....	8
Statiske forhold .....	8
Krybningsforhold .....	10
Øvrige væsentlige parametre .....	12
Forsøg .....	13
Konditionering af forsøgsmateriale .....	13
Forsøgsudstyr .....	13
Friktion .....	13
Horisontaltrykforhold .....	15
Krybningsforhold .....	17
Vægforsøg .....	20
Analyse af forsøgsdata .....	22
Friktion .....	22
Horisontaltrykforhold .....	22
Krybningsforhold .....	22
Vægforsøg .....	23
Resultater .....	24
Friktion .....	24
Horisontaltrykforhold .....	26
Krybningsforhold .....	26
Statiske forhold .....	31
Vægforsøg .....	33
Designværktøj .....	33
Diskussion af forsøgsresultater .....	35
Konklusion .....	38
Litteratur .....	39
Summary .....	40
Bilag .....	43

# Forord

Denne rapport beskriver resultater fra fase 1 af projektet *Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering i vægge*. Rapporten har til formål at undersøge væsentlige mekaniske egenskaber for en række nye isoleringsprodukter på det danske byggemarked. De undersøgte mekaniske egenskaber er væsentlige i relation til forståelsen og beherskelsen af de sætningsproblemer, som anvendelsen af de nye materialer har vist.

I rapporten er resultater fra krybningsforsøgene i særlig grad behandlet. Det viser sig nemlig, at krybning spiller en central rolle for forståelsen af cellulosebaserede løsfyldsisolerings mekaniske egenskaber.

Projektet er iværksat, fordi der har været konstateret betydelige sætninger af størrelsesordenen 7 til 38 cm i en vægkonstruktion i et forsøgshus isoleret med cellulosebaseret løsfyldsisolering. Projektets mål er at karakterisere mekanismerne bag sætninger i cellulosebaserede løsfyldsisoleringer for derved at være i stand til at eliminere sætninger ved fremtidige anvendelser.

Projektet er støttet økonomisk af Energistyrelsens udviklingsprogram for miljø- og arbejdsmiljøvenlig isolering.

By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut  
Afdelingen for Byggeteknik og Produktivitet  
Maj 2001

*Jørgen Nielsen*  
Forskningschef

# Indledning

## Baggrund

Løsfyldsisolering kan sætte sig efter indbygning. Dette er et velkendt problem, der ved udlægning på lofter løses ved, at give isoleringen en overhøjde. Ved indblæsning i vægge imødegås sætning ved at indblæse isoleringen med en høj densitet. Den nødvendige densitet er ikke praktisk eller teoretisk dokumenteret.

Ved en nylig udført demontering af en vægkonstruktion i et forsøgshus på Statens Byggeforskningsinstitut kunne der i en væg med 300 mm isolering konstateres en sætning på henholdsvis 7 og 38 cm før og efter fjernelse af den gipsplade, der både fungerede som vindspærre og som isoleringens udvendige forside. Efter fjernelse af gipspladen kunne en fremadskridende sætning konstateres. Dette efterfølgende forløb kunne umiddelbart ses at være af samme art som det, der kan iagttages, når granulære materialer fyldes i siloer. Dette gav ideen til at beskrive sætning for løsfyldsisolering ved hjælp af teorier for granulære materials mekaniske opførsel i siloer.

## Formål

Projektet har til formål at karakterisere mekanismerne bag sætninger i cellulosebaserede løsfyldsisoleringer for derved at gøre det muligt ved fremtidige anvendelser at eliminere sætninger. Det aktuelle projekt afgrænses til den indbygningsteknik, hvor isoleringsmaterialet er placeret i lodrette vægge.

## Anvendte isoleringsmaterialer

I projektet er væsentlige mekaniske egenskaber for en række nye isoleringsprodukter på det danske byggemarked blevet undersøgt. Disse nye materials egenskaber sammenholdes med de samme egenskaber for et allerede kendt isoleringsmateriale. Tabel 0 indeholder en oversigt over de undersøgte materialer og de betegnelser, som er anvendt i rapporten. For Perlite indgår to typer af materialet, en type mere finkornet end det andet, se figur 20.

Tabel 0. Undersøgte materialer, produktnavn samt betegnelse anvendt i rapporten.

Materiale	Produktnavn	Producent	Betegnelse
cellulose (genbrugspapir)	Ekofiber vind	Ekofiber AB	Ekofiber
cellulose (genbrugspapir)	Papiruld	Miljø Isolering ApS	Papiruld
træfiberisolering	Thermocell Lösull	Thermocell AB	Thermocell
granuleret hør uden skæver		Landbrugets Rådgivningscenter	Dansk hør
ekspereret perlit, fin	Perlite 0515SC	Nordisk Perlite ApS	Perlite 0515SC
ekspereret perlit, grov	Perlite 0560SC	Nordisk Perlite ApS	Perlite 0560SC
stenuidsgranulat	Hulrumsfyld	Rockwool A/S	Rockwool

# Sammenfatning

Denne rapport beskriver, væsentlige mekaniske egenskaber, som har indflydelse på sætning af løsfyldsisolering i vægge.

Problemstillingen er, at isoleringen holdes fast i hulrummet ved friktionskræfter, der modvirker sætning (men besværliggør indblæsning), og hvis størrelse kan aftage med tiden. Spørgsmålet er så, om reduktionen af friktionskræfterne bliver så stor, at en sætning udløses.

De foreløbige resultater viser, at celluloseløsfyldsisolering indblæst med en densitet på ca.  $48 \text{ kg/m}^3$ , eller derover, indblæst i en 10 cm tyk og 100 cm bred gipspladevæg kan være volumenstabilt ved konstant relativ luftfugtighed (RF) på 50 %. Øges vægtykkelsen til 30 cm kræves en indblæst densitet på ca.  $53 \text{ kg/m}^3$ . Øges yderligere den relative luftfugtighed til 80 % kræves  $63 \text{ kg/m}^3$  for at sikre volumenstabilitet. Resultaterne fremgår af figur 1.

Endvidere tyder de foreløbige resultater på, at celluloseløsfyldsisolering udlagt på lofter vil have en resulterende densitet efter sætning på højst  $48 \text{ kg/m}^3$  ved 50 % RF svarende til ca.  $43 \text{ kg/m}^3$  tørt materiale. Resultaterne er fremkommet ved anvendelse af den udviklede model kombineret med forsøgsresultater.

## Model

Der er udviklet en statisk model til beregning af spændingstilstanden i en løsfyldsisolert væg. Den dimensionerende spændingstilstand bestemmes ud fra kendskab til væggenes karakteristika, isoleringens fugtforhold og indlejringens densitet. Endvidere er der opstillet en model til beskrivelse af isoleringsmaterialers krybning (tidsafhængige deformation).

Den beskrevne statiske model kan endvidere anvendes til at foretage en teoretisk optimering af afstanden mellem indblæsningshullerne, således at en ønsket densitet opnås, og at materialet samtidigt bliver jævnt fordelt.

## Forsøg

Friktionskoefficienterne er bestemt gennem forsøg for tre til fire vægmateriale og for syv isoleringsmaterialer. De i forsøgsprogrammet indgående isoleringsmaterialer stammer fra såvel etablerede som nye producenter/leverandører på det danske marked. Følgende materialer indgår i undersøgelsen, mineraluld-baseret løsfyldsisolering, papiruld, mineralisk granulat, træbaseret løsfyldsisolering og granuleret hør.

For alle isoleringsmaterialerne er horisontaltrykforhold bestemt. Bestemmelsen af horisontaltrykforhold har vist sig at stille større krav til det anvendte forsøgsapparatur's nøjagtighed end forventet. Det har derfor været nødvendigt at ændre eksisterende og at fremstille nyt apparatur undervejs i forsøgsprocessen.

Der er udført krybningsforsøg med et udvalgt antal løsfyldsmaterialer. Forsøgene er udført ved konstant temperatur ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ), tre lastniveauer (80, 200 og 500 Pa), og forskellige kombinationer af densiteter og to fugtniveauer (50 og 80 % RF). Endvidere er der udført krybningsforsøg ved konstant temperatur og konstant lastniveau med cyklisk varierende relativ luftfugtighed som varierer mellem 50 og 80 % RF.

Verifikation af det udarbejdede teoretiske grundlag gennemføres gennem to fuldskalaforsøg med vægge.

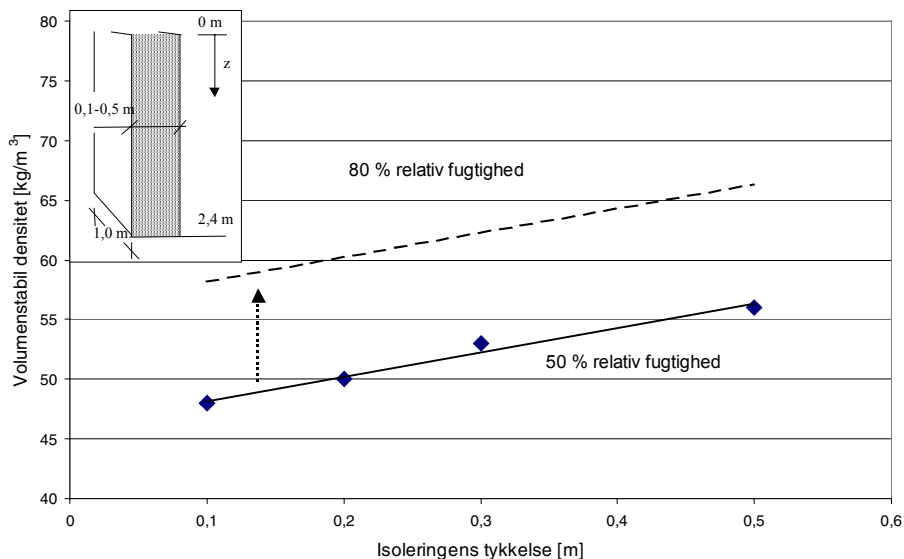
## Beregninger

Der er foretaget en lang række beregninger med den statiske model, som viser, hvorledes isoleringens dimensionerende spændingstilstand kan bestemmes.

Det har vist sig muligt, analytisk og i god overensstemmelse med forsøgsdata, at beskrive løsfyldsisoleringens krybning med den anvendte krybningsmodel.

## Konklusion

Den udviklede model ser ud til at kunne forklare de fænomener, der observeres i praksis. Projektet redegør for de materialemekaniske egenskaber som resulterer i sætninger for løsfyldsisolerede vægge. Ligeledes gøres der rede for de nødvendige værktøjer, som er blevet udviklet i projektet, således at sætninger kan elimineres ved fremtidige anvendelser.



Figur 1. Beregnet nødvendig densitet som funktion af vægtykkelsen for undgåelse af sætning i cellulosefyld indblæst i en væg. Beregningerne er foretaget for en 100 cm gipspladevæg ved et vandindhold svarende til ligevægt ved 50 og 80 % RF. Der er benyttet materialedata for Ekofiber vind. Den beregnede volumenstabile densitet er relateret til 50 % RF og 23 °C. Kurven for 80 % RF er delvist baseret på ekstrapolerede data.



# Teori

Granulære materialer, som fyldes i en væg, vil finde sig i en stabil volumetilstand, såfremt massen kan forblive i kraftligevægt.

Ved krympning forstås her den tidsafhængige deformation, der forekommer i nogle materialer, når de er påført en spænding. Relaksation er det tilsvarende fænomen hvor spændingen falder med tiden i et materiale med fastholdt geometri. Resultatet af disse fænomener kan være, at ligevægtstilstanden i et område ikke kan opretholdes, og således må finde sig en ny ligevægtstilstand. Man siger da, at materialet har sat sig.

Betragtes en skive af løsfyldsisoleringen i det vandrette plan af en væg, vil skiven være i ligevægt, når tyngden af skivens masse ophæves af de kræfter, der virker på skiven, se figur 2.

For cellulosebaserede løsfyldsisoleringer er et af de primære problemer, at disse materialer udviser krybning. Tages der ikke hensyn til løsfyldsisoleringens materialets krybning, kan løsfyldsisoleringen sætte sig.

Simple orienterende forsøg med cellulosebaserede løsfyldsisoleringer er gennemført. Sammentrykningen over tid blev målt for faste lastniveauer ved varierende indlejringer af materialet. Disse forsøg viste en krybning og ved efterfølgende delvis aflastning viste forsøgene en tilbagekrybning.

Forsøgene viser, at det ved indbygning sandsynligvis er muligt at introducere en spændingstilstand, som vil resultere i, at materialets volumen forbliver konstant, og derved vil udfylde konstruktionen. Udnyttelse af dette princip kræver, at det tryktab, krybningen vil forårsage, ikke overskrider grænsen for, hvad der er nødvendigt for at opretholde ligevægten. Tryktabet som krybningen vil forårsage skal betragtes i hele isoleringsmaterialets konstruktionsmæssige levetid.

Forholdene kompliceres yderligere af, at krybningen kan være afhængig af materialets relative luftfugtighed og øges med gentagne variationer af materialets relative luftfugtighed.

## Statiske forhold

Spændingstilstanden i løsfyldsisolering kan beskrives ved hjælp af teorier anvendt inden for siloteorien. Siloteorierne tager udgangspunkt i Janssens formler fra 1895 (Barfod, 1982). Janssens teori, der specielt har vist sig anvendelig til at beskrive spændingstilstanden i et granulært materiale i en silo efter fyldning, kan anvendes til beskrivelse af spændingstilstanden i isoleringen, med og uden påsat vertikal last, i en væg som funktion af væghøjden samt til beskrivelse af spændingstilstanden i isoleringen under indblæsning som funktion af afstanden fra indblæsningsstedet.

En væg med det indvendige horisontale areal  $A$  og omkredsen  $O$  betragtes. Væggen antages at være homogent isoleret med et isoleringsmateriale, som har densiteten  $\rho$ . Vægfriktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialet og væggenes inderside er givet ved  $\mu$ . Isoleringsmaterialet er påvirket af tyngdeaccelerationen,  $g$ .

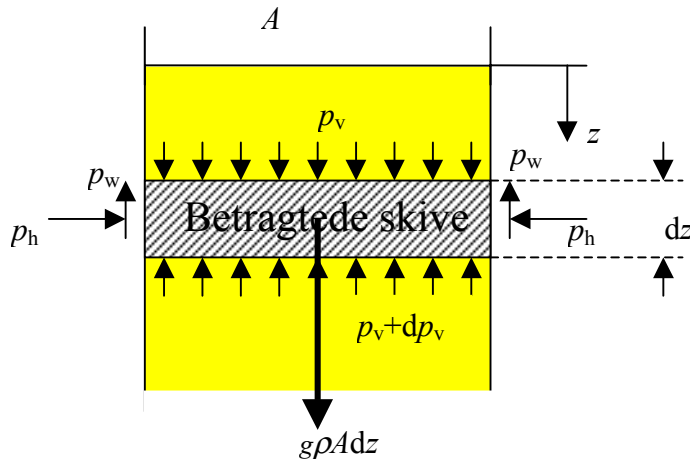
Betragtes en skive af isoleringsmaterialet i afstanden  $z$  fra oversiden af isoleringen, vil denne skives overside være påvirket af et vertikalt tryk  $p_v$ . Skivens underside vil tilsvarende være påvirket af et vertikalt tryk  $p_v + dp_v$ . Da den betragtede skive af materialet har en masse, vil skiven forårsage en samlet vertikal kraft af størrelsen  $g\rho Adz$ .  $p_w$  og  $p_h$  er henholdsvis vægfrikti-

onstrykket og det horisontale tryk. Den betragtede skive vil således være påvirket af følgende kræfter der virker nedad, se figur 2:

Trykkraften på oversiden af skiven:  $p_v A$   
 Tyngden af skiven:  $g \rho A dz$

Og af følgende kræfter der virker opad:

Krafttrykket mod undersiden af skiven:  $(p_v + dp_v) A$   
 Vægfriktionen:  $p_w O dz = \mu p_h O dz$



Figur 2. Tryk og kræfter der virker på en skive af et materiale i en væg.

Skiven vil være i ligevægt, såfremt det gælder, at kraften, der påvirker skiven ovenfra, plus skivens egenvægt er i ligevægt med den modsat rettede kraft fra det underliggende plan plus kraften forårsaget af friktionen mellem skiven og den omkransende væg:

$$(p_v + dp_v) A + \mu p_h O dz = p_v A + g \rho A dz$$

Indføres  $\lambda$  som forholdet mellem det horisontale og det vertikale tryk:

$$\frac{p_h}{p_v} = \lambda$$

fås følgende udtryk under angivelse af, at  $\lambda$  er konstant i hele væggen.

$$\frac{dp_v}{dz} + \frac{\mu \lambda O}{A} p_v - \rho g = 0$$

### Tryk i væg med fri overside

Ovenstående differentialligning løses for det tilfælde, hvor det lodrette tryk på oversiden af isoleringen er lig nul,  $p_v = 0$  for  $z = 0$ . Spændingen  $p$  som funktion af afstanden fra isoleringens overside er da givet ved følgende udtryk, (Barfod, 1982):

$$p(z) = \frac{A \rho g}{\mu \lambda O} \left[ 1 - e^{-\frac{\mu \lambda O}{A} z} \right]$$

hvor:

- $A$  er tværsnitsarealet af den betragtede skive
- $O$  er omkredsen af den betragtede skive
- $z$  er afstanden fra isoleringens overside
- $g$  er tyngdeaccelerationen
- $\rho$  er densiteten af isoleringsmaterialet

$\mu$  er vægfriktionskoefficienten

$\lambda$  er horisontaltrykforholdet, (forholdet mellem det horisontale og det vertikale tryk).

### Tryk i væg med belastet overside

Påsættes en vertikal kraft på oversiden af isoleringen svarende til et tryk af størrelsen  $p_0$ , er spændingsfordelingen som funktion af silodybden givet ved:

$$p(z) = p_0 e^{-\frac{0\mu\lambda}{A}z}$$

Denne ligning er fundet ved at se bort fra egenvægten og ved at sætte det vertikale tryk på oversiden af isoleringen  $p = p_0$  for  $z = 0$ .

### Tryk i væg med belastet kerne

Betragtes et område (indblæsningssted) i væggen, hvor kernen har et tryk  $p_0$ , se figur 3, er trykket i en afstand  $R$  fra kernen givet ved:

$$p(R) = p_0 e^{-\frac{2\mu\lambda(R-r)}{d}}$$

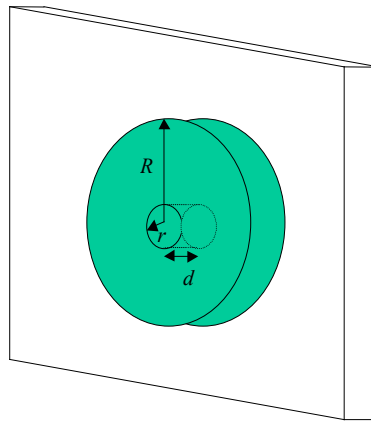
hvor:

$R$  er afstanden fra kernens centrum

$r$  er radius af kernen med trykket  $p_0$

$d$  er væggenes tykkelse, kernens højde.

Denne ligning er fundet ud fra en differentilligning svarende til den tidligere viste, men udledt for et cylinderkoordinatsystem, samt ved at se bort fra egenvægten og ved at sætte trykket i kernen  $p = p_0$  for  $R = r$ .



Figur 3. Vægskive med indblæsningssted. Kernen givet ved cylinderen med radius  $r$  har samme tryk  $p_0$ . Trykket aftager radiært ud fra kernen med radius  $R$ .  $d$  angiver væggenes tykkelse.

## Krybningsforhold

Når et materiale belastes tøjjes det momentant. Vedbliver belastningen, vil de fleste materialer yderligere tøjjes. Denne tidsafhængige tøjning kaldes for krybning. Figur 12 viser et eksempel på et materiales tidsafhængige tøjning efter påsat konstant last og efterfølgende delvis aflastning.

Deformationer, som straks dannes, når belastningen påføres, er momentane. Deformationer, som udvikler sig med tiden, betegnes som tidsafhængige. En deformation, som går helt tilbage ved aflastning, er reversibel. Den momentane elastiske deformation og den tidsafhængige forsinkede elastiske deformation er reversible. En deformation, der vedbliver efter aflastning, er irreversibel. Den momentane plastiske deformation, også kaldet konsolideringen, og den tidsafhængige viskøse deformation, er irreversible.

Krybnings- og tilbagekrybningsdata danner grundlag for en teoretisk beskrivelse ved hjælp af teorien for et Burgermateriale. Med kendskab til den teoretiske krybningsfunktion kan parametrene til beskrivelse af den teoretiske relaxationsfunktion bestemmes. En række materials krybningsforhold lader sig beskrive ved hjælp af teorien for et Burgermateriale. Visse materialer, som er defineret som værende Clousermaterialer, kan beskrives ved et simpelt udtryk, der kaldes Clouserfunktionen.

Teoretisk set er parametrene i krybningsfunktionerne uafhængige af lastniveauet. Dette gælder dog kun, såfremt at lastniveauerne er af en størrelsesorden, hvor der ikke opstår brud i materialet (ødelæggelse af materialet).

Tillader analysen af krybningsfunktionen, at Clouserfunktionen anvendes, foretrækkes denne.

Krybningsfunktionen til beskrivelse af krybning for et Burgermateriale har følgende udtryk, (Nielsen, 1988):

$$c(t) = \frac{1}{E} + \frac{1}{\eta} t + \frac{1}{E_k} (1 - e^{-\delta_k t})$$

hvor

$t$  er tiden

$E$  og  $E_k$  er elasticitetsmoduler

$\eta$  og  $\eta_k$  er viskositeter

$\delta$  og  $\delta_k$  er rheologiske konstanter givet ved:

$$\delta = \frac{E}{\eta}$$

$$\delta_k = \frac{E_k}{\eta_k}$$

Clouserfunktionen til beskrivelse af et Clousermaterials krybning er givet ved udtrykket, (Nielsen, 1986, 1993):

$$c(t) = \frac{1}{E} \left[ 1 + \left( \frac{t}{\tau} \right)^{a_1} \right]$$

hvor:

$\tau = \frac{1}{\delta}$  er en konstant kaldet relaxationstiden

$a_1$  er krybningsekspONENTEN som er en konstant.

Krybningsfunktionen,  $c(t)$ , angiver den tøjning, der fremkaldes, når et materiale belastes til tidspunktet  $t = 0$  med en konstant spænding,  $\sigma = 1$ . Begyndelsesværdien er  $c(0) = 1/E$ .

Relaxationsfunktionen, svarende til ovennævnte krybningsfunktion, kan med god tilnærmelse beskrives ved følgende udtryk, (Nielsen, 1986, 1993):

$$r(t) \approx \frac{1}{c(t)} = E \left[ 1 + \left( \frac{t}{\tau} \right)^{a_1} \right]^{-1}$$

Den viste relaxationsfunktion gælder for ganske få materialer.

De beskrevne krybningsfunktioner kan som beskrevet tidligere kun anvendes til beskrivelse af et materials momentane elastiske tøjning og tidsafhængige tøjning. Materialets plastiske momentane tøjning (konsolideringen) lægges i den følgende analyse til en krybningsfunktion som en konstant for at opnå den ved forsøgene målte absolutte tøjning. Den momentane tøjning består af en elastisk del samt af en (plastisk) konsolidering af materia-

let. Den momentane tøjning er ikke nødvendigvis lineært afhængig af det påsatte lastniveau.

### Øvrige væsentlige parametre

I de nævnte teorier til bestemmelse af et materiales krybning tages der ikke hensyn til betydningen af materialets fugtindhold, temperatur, homogenitet og densitet. Af disse parametre antages materialets fugtindhold at have en central rolle for dets krybning. Denne afhængighed undersøges empirisk, og her er især cykliske variationer af fugt af praktisk interesse, da det er sådanne påvirkninger, man typisk finder i vægge.

# Forsøg

## Konditionering af forsøgsmateriale

Isoleringsmaterialet løsnes før brug ved at blive gennemblæst med trykluft i et lukket kammer. Isoleringsmaterialet samt anvendt udstyr konditioneres forud for de enkelte forsøgs start til ligevægt, hvad angår relativ luftfugtighed og temperatur. Forsøgsudstyr, som har berøringsflader med isoleringsmaterialet, og som ikke suger vand, (ikke opfugtes ved berøring med vand) vaskes med sæbe i lunkent vand. Efter vask skylles overfladerne i destilleret vand ved laboratorietemperatur, aftørres let og stilles til lufttørring i laboratoriet. Ikke vaskbare materialer rengøres ved børstning. Det er vigtigt ikke at røre de i forsøget anvendte overflader med fedtede fingre.

Forsøgene og håndteringen af isoleringsmaterialerne udføres så vidt muligt med gummihandsker og åndedrætsværn. Denne foranstaltning anvendes både for at undgå indånding af eventuelle tilsatte salte og luftbårne fibre samt for at undgå tilføjelse og fjernelse af partikler.

## Forsøgsudstyr

### Friktion

#### Princip

Friktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialet og overfladen af udvalgte pladematerialer bestemmes ved forskydningsforsøg. Ved forsøgene forskydes isoleringsmaterialet i forhold til pladematerialet. Forskydningsplanet placeres mellem de to materialer. Kraften, der skal til for at forskyde de to materialer i forhold til hinanden, bestemmes for forskellige kontaktryk.

Er forskydningsplanet horisontalt og forskydningskraften parallel med forskydningsplanet, og lasten endvidere vertikalt orienteret og jævnt fordelt over kontaktarealet, kan friktionskoefficienten bestemmes ved udtrykket:

$$F = m_1 g \mu$$

hvor:

$F$  er forskydningskraften

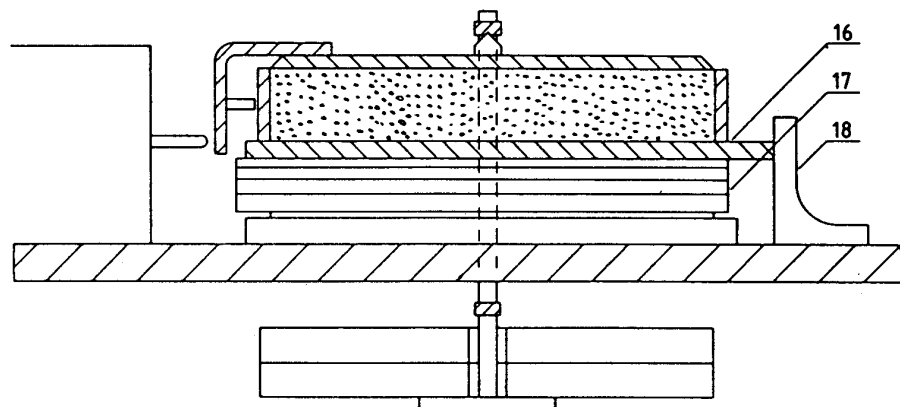
$m_1$  er massen på kontaktarealet

$g$  er tyngdeaccelerationen

$\mu$  er vægfriktionskoefficienten.

#### Udstyr

Forskydningskraften bestemmes ved anvendelse af Jenikes forskydningscelle. Figur 4 viser Jenikes forskydningscelle.



Figur 4. Jenikes forskydningscelle til bestemmelse af forskydningskraften mellem to materialer. 16 angiver placeringen af overfladen af det udvalgte plademateriale. 17 viser placeringen af mellemlæg hvorved overfladen af pladematerialet indstilles til det rette niveau. 18 er en stopklods til fastholdelse af pladematerialet under forsøget. Forskydningen fremtvinges ved at pinden til venstre bevæges mod højre med konstant hastighed, se (The Institution of Chemical Engineers, 1989).

### Udførelse

Jenikes forskydningscelle stilles korrekt op med mellemlæg og fastholdelse af pladematerialet, således at forskydningsplanet er placeret i niveau med lastpinden, se figur 4. Figur 4 viser, hvorledes et isoleringsmateriale (vist med prikket signatur) er omkranset af en ydre ring (vist med skraveret signatur). Isoleringsmaterialet er endvidere afgrænset af overfladen af det valgte plademateriale og af et låg. Via låget overføres kontaktrykket til isoleringsmaterialet.

Ved indlejringen af isoleringsmaterialet stilles ringen til fastholdelse af det granulære materiale på pladematerialet i forsøgsopstillingens udgangsposition. I denne ring indlejres den afvejede mængde af det granulære materiale som anvist i (The Institution of Chemical Engineers, 1989).

Efter indlejring af det granulære materiale placeres låget på materialets overside. Undersiden af låget skal flugte med ringen til fastholdelse af isoleringsmaterialets overside. Dette sikres om nødvendigt med mellemlæg under låget. Lasten påsættes oversiden af isoleringen via låget og det sikres at al den påsatte last, hviler på isoleringen.

Når lasten er påsat, kan den relative flytning mellem isoleringen og pladen påbegyndes. Flytningen foretages med en hastighed på 1 til 3 mm/minut. Under flytningen registreres kraften for den deformationsstyrede flytning med en skriver med konstant papirhastighed. Indledende forsøg har vist, at forsøgene kan gentages ved forsigtigt at føre forsøgsmaterialet, uden den påsatte masse, tilbage til forsøgsopstillingens udgangspositionen.

Forskellige kontaktryk etableres ved at påsætte vertikal last på isoleringens overside med lodder. Forsøgene udføres for fire til fem kontaktryk mellem 140 Pa og 1560 Pa.

Klimaforholdene under forsøgene svarer til forholdene indendørs i et tørt, opvarmet laboratorium, dvs. en lufttemperatur på mellem 20 og 25 °C og en relativ luftfugtighed på mellem 30 og 40 %.

### Usikkerhed

Ved bestemmelsen af repræsentative forskydningskræfter er det nødvendigt, at der er valgt repræsentative materialer og at de indlejres på en realistisk måde. Det er endvidere vigtigt, at materialernes kontaktheder og egenskaber ikke ændrer sig væsentligt med gentagelser. Specielt for anvendelsen af Jenikes forskydningscelle er det vigtigt, at den vertikale belastning overføres til underlaget alene gennem isoleringsmaterialet.

Det er dog erfaringen at usikkerheden på friktionsmåling kan begrænses til et niveau på under 5 %, idet materialeinhomogenitet og ujævn lastfordeling kun har ringe betydning.

## Horisontaltrykforhold

### Princip

Horisontaltrykforholdet angiver forholdet mellem det horisontale tryk og det vertikale tryk.

Horisontaltrykforholdet bestemmes ved at belaste et materiale med en konstant spænding i én retning og måle trykket vinkelret på denne retning.

### Udstyr

Horisontaltrykforhold bestemmes eksperimentelt ved hjælp af en målecelle, der tidligere er anvendt til siloforsøg, se figur 5. Målecellen består af en glatdrejet aluminiumscylinder med en indre diameter på 80 mm, påsat tryktransducere i tre forskellige niveauer. Tryktransducernes målevindue flugter med cylinderens indre overflade. Den nedre tryktransducer er placeret 13 mm fra cylinderens bund. Den øvre tryktransducer er placeret nær cylinderens øvre kant.

I bunden af cylinderen anbringes en lastcelle horisontalt, således at bundens middellast måles. For konstant vertikal last måles det horisontale tryk i den øvre og den nedre tryktransducer. Den mellemste tryktransducer anvendes ikke i disse forsøg.

Den øvre tryktransducer registrerer trykændringer, som ikke hidrører fra lastpåætningen, men som hidrører fra ændringer i barometerstanden. Det målte tryk fra den øvre transducer anvendes derfor som reference for den nedre transducer.

Den vertikale last består af en akrylskive med en ydre diameter på 79 mm (lidt mindre end cylinderens indre diameter) samt lodder.

Signalerne fra tryktransducerne forstærkes. De forstærkede signaler fra tryktransducerne og signalet fra lastcellen opsamles med en datalogger og lagres på en PC.





Figur 5. Cylinder til bestemmelse af horisontaltrykforhold.

### Udførelse

Det anvendte udstyr til bestemmelse af horisontaltrykket er meget følsomt over for temperaturvariationer og variationer i det atmosfæriske tryk. Derfor akklimatiseres udstyret før hvert forsøg. Denne handling foretages i et stort klimarum, hvor der umiddelbart inden forsøgets start slukkes for klimaanlægget og luftfordelingen. Forsøgene udføres enkeltvis med et meget kort ophold i klimarummet.

En nøje afvejet mængde isoleringsmateriale indlejres løst i cylinderen med en plan overside. Mod denne plane overflade af isoleringen lægges lasten forsigtigt an og holdes konstant i en kort tid for så igen at blive fjernet. Inden lasten fjernes måles isoleringens vertikale udstrækning. Det sikres, at den nedre tryktransducer er placeret inden for isoleringens vertikale udstrækning. Ligeledes sikres det, at den øvre tryktransducer har været lastfri under hele forsøget.

Isoleringsmaterialets vertikale udstrækning holdes begrænset, således at tabet af last gennem isoleringen, pga. friktion mellem cylinderrøret og isoleringsmaterialet, kan antages at være lineært og begrænset.

Trykket mod bunden af cylinderen og i øvre samt nedre tryktransducer måles. For at opnå et vellykket forsøg er det nødvendigt at sikre, at isole-

ringsmaterialet har ligget an mod cylinderkanten, hvor den nedre tryktransducer er placeret. Ligeledes er det vigtigt at sikre sig, at den påsatte last ikke har ligget an mod cylinderkanten i nærheden af den nedre tryktransducers placering.

### **Usikkerhed**

Måling af horisontaltrykforhold er forsøgsmæssigt komplicerede at gennemføre på grund af de relative lave tryk, som ønskes målt. Kravene til udstyrets stivhed samt kravene til eliminering af friktionsspændinger. Hertil kommer et krav om at geometrien - specielt den følsomme flade for trykmålerne skal være stor i forhold til enkeltpartikler. Det har vist sig, at desto grovere et granulært materiale er, desto sværere er det ved indlejringen at sikre, at materialet ligger jævnt an mod cylinderens inderside, i særdeleshed mod det sted, hvor den nedre tryktransducer er placeret. Hertil kommer, at udstyret er særdeles følsomt for temperaturændringer og ændringer i barometerstanden. Selv om der er gjort meget for at sikre pålidelige målinger, må usikkerheden på denne type af målinger antages at være omkring 20 %.

### **Krybningsforhold**

#### **Princip**

For at opnå en veldefineret diameter af løsfyldsmaterialet under krybningsforsøgene omkranses det af en cylinder. Da løsfyldsmaterialet grænser op til cylinderens overflade, vil friktion på grænsefladen mellem de to materialer resultere i en reduktion af den påsatte kraftpåvirkning. Reduktionen af kraftpåvirkningen er en funktion af isoleringens højde. Reduktionen af den påsatte kraftpåvirkning kan mindskes ved at anvende et materiale med lav friktion mellem løsfyldsisoleringsmaterialet og cylinderen, samt ved at anvende en lille højde i forhold til diameteren af cylinderen.

Et materiales rheologi rummer som begreb enhver tænkelig materialerelation mellem kraft (spænding) og deformation (tøjning) samt tid. En meget vigtig materialeegenskab indenfor rheologien er et materiales krybningsfunktion. Eksperimentelt måles et materiales krybning ved at måle tøjningen (deformationen) over tiden, der fremkaldes i et materiale, når det belastes med en konstant spænding (kraft).

#### **Udstyr**

For eksperimentelt at være i stand til at måle granulære materials krybning har det været nødvendigt at designe et nyt, men simpelt forsøgsudstyr. Udstyret består af en plan horisontal bund påsat et cylindrisk rør, begge af akryl og med centerlinien orienteret vertikalt. I det cylindriske rør med en indvendig diameter på 104,5 mm indlejres isoleringsmaterialet. Ovenpå isoleringsmaterialet placeres et låg i form af en plan skive af akryl med en diameter på 103 mm, lidt mindre end den indvendige diameter af cylinderen. Lågets vertikale flytning måles i cylinderens vertikale centerlinie ved hjælp af en flytningsmåler, også kaldet et dilatometer, monteret på cylinderrørets øvre kant. Ved hjælp af lodder justeres lågets kraftpåvirkning af oversiden af isoleringsmaterialet. Udstyret til måling af krybning er vist på figur 6.

Dataene logges via en PC'er.



Figur 6. Apparat til måling af momentantøjning samt krybning. I det viste tilfælde er Thermocell med en densitet på  $40 \text{ kg/m}^3$  påsat en vertikal belastning på  $499 \text{ Pa}$ .

For eksperimentelt at være i stand til at måle krybningen ved varierende fugtindhold i isoleringsmaterialet er den normale opstilling vist i figur 6 blevet modificeret. Modifikationen består i, at den normale opstilling forsynes med huller i såvel låget som bunden, således at luftgennemstrømning gennem isoleringsmaterialet kan finde sted. Ved at ændre den relative luftfugtighed omkring forsøgsopstillingen kan isoleringsmaterialet opfugtes og udtørres ved luftgennemstrømning. Luftgennemstrømningen etableres ved at opretholde et lille konstant undertryk mod isoleringsmaterialets underside ved hjælp af en ventilator se figur 7.



Figur 7. Apparatur til måling af krybningen ved cyklisk varierende relativ luftfugtighed. I det viste tilfælde er Ekofiber med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$  påsat en vertikal belastning på  $123 \text{ Pa} + 21 \text{ Pa}$ . Den vertikale last på oversiden af isoleringen er  $123 \text{ Pa}$ , og trykket på undersiden af isoleringen er  $21 \text{ Pa}$ .

### Udførelse

Den korrekte mængde isoleringsmateriale til en vertikal udstrækning på 70 mm vejes af, således at den tilsigtede densitet kan opnås. Den afvejede isoleringsmængde opdeles derpå i 7 lige dele. De enkelte dele indlejres derpå i cylinderen, således at den korrekte densitet opnås ved indlejring af det enkelte lag. Densiteten opnås ved at sammentrykke de allerede indlejrede lag til det for det nye lag korrekte volumen. Indlejringen foretages ved hjælp af en skive med jævnt fordelte huller og med en diameter lidt mindre end cylinderens indvendige diameter.

Herefter dækkes isoleringens overside med et låg fastholdt 70 mm over isoleringens underside. Flytningsmåleren monteres dernæst på lågets overside. Derpå frigøres låget, og den forudbestemte belastning placeres på lågets overside i form af lodder.

Lågets vertikale flytning måles som funktion af tiden.

Tilbagekrybning fremkaldes ved at lodderne forsigtigt fjernes.

Isoleringsmaterialets vertikale udstrækning holdes begrænset, således at tabet i kraftpåvirkningen, pga. friktion mellem cylinderrøret og isoleringsmaterialet, fra oversiden til undersiden af isoleringen er uden betydning i forhold til de målte flytninger.

Det er vigtigt at holde opstillingen vibrationsfri under forsøget.

### Usikkerhed

Plastiske deformationer kan være spændingsafhængige og have en tidlig udvikling, som afhænger af den relative luftfugtighed af materialet. Allerede ved indlejring af isoleringsmaterialet vil en del af den plastiske deformation introduceres. Størrelsen heraf vil afhænge af den kraftpåvirkning, der skal anvendes for at opnå den ønskede densitet.

En mindre del af de målte deformationer vil skyldes forsinket elastiske og permanente viskøse deformationer, der når at opstå i materialet i tiden mellem indlejringen og målingernes påbegyndelse.

Ved lave densiteter er krybningsfunktionens udgangspunkt bestemt ud fra den momentane deformationen under oplastning, idet lågets tyngde alene forårsager en deformation.

## **Vægforsøg**

### **Princip**

Fuldskalaforsøg anvendes til at bestemme de deformationer, som vil opstå med tiden, efter at et isoleringsmaterialet er blevet indlejret i en væg.

### **Udstyr**

To vægelementer med dimensionerne  $600 \times 2400 \times 300$  mm anvendes. Vægelementerne fremstilles som kasseformede elementer med 50 mm træstolpeskelet, som er høvlet. Det ene element er forsynet med henholdsvis ind- og udvendig beklædning af 13 mm og 9 mm gipsplade, og det andet element tilsvarende med både ind- og udvendig beklædning af 12 mm krydsfiner, se figur 8. På oversiden af isoleringen placeres horisontalt en let, tynd men stiv plade forsynet med en vertikal målepind. Målepinden, som forsynes med millimeterinddelinger, monteres således, at den stikker op gennem elementets overside, og den kan derfor aflæses udefra. Den lette plade, som placeres på isoleringens overside, har en diameter på 220 mm. Pladens vægt inklusive målepind er ca. 40 g.





Figur 8. Vægge anvendt til fuldskalaforsøg.

### Udførelse

I væggene monteres måleudstyr til måling af sætninger før end selve indlejringen af isoleringsmaterialerne foretages. Den korrekte mængde isolering for opnåelse af den forudbestemte densitet afvejes for de to vægge. Derpå foretages indlejringen af isoleringen. Isoleringsmaterialet indlejres manuelt og fordeles jævnt lagvis i væggene, medens disse er placeret liggende. Pladen med monteret målepind fastholdes mod elementets indvendige overside ved hjælp af målepinden under indlejringen af isoleringsmaterialet. Der sikres en homogen fordeling af isoleringsmaterialet, inden væggene lukkes med den indvendige beklædning, som skrues fast.

Målepinden frigøres, når væggen er placeret i forsøgsrummet, hvorved pladen lægger sig an mod oversiden af isoleringen.

Sætningerne aflæses på målepinden. Efter en tid afmonteres toppen af væggen for at kontrollere, om deformationsmålingerne stemmer overens med de faktiske sætninger.

### Usikkerhed

Måden hvorpå isoleringen udlejes kan resultere i, at spændingen mod vægsideerne bliver anderledes end ved en konventionel indlejring af isoleringsmaterialet. Endvidere kan isoleringsprocessen, håndteringen og tiden inden elementet er placeret i opstillingen have betydning for de målte sætninger. Yderligere vil der ved den anvendte indlejring kunne opstå anisotropi i isoleringens tværsnit tillige med en risiko for stopning langs væggenes sider. Den momentane deformation af isoleringsmaterialet, som ses ved krybningsforsøgene, vil der kunne blive kompenseret for ved indlejringen. En kompensation for konsolideringen under indlejringen vil resultere i, at densiteten af isoleringsmaterialet falder mod kernen af væggen. Forsøget indeholder ikke spændingsudløsende påvirkninger så som fugtvariationer eller dynamiske påvirkninger af væggene. Dette kan resultere i manglende sætning.

## Analyse af forsøgsdata

### Friktion

Friktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialet og de udvalgte overflader bestemmes ved at plotte den maksimalt målte forskydningskraft som funktion af normalkraften (massepåvirkningerne). For den enkelte overflade bestemmes en ret linie gennem maksimalt målt forskydningskraft som funktion af normalkraft gennem (0,0) ved mindste kvadraters metode. Ud fra den fremkomne rette linies hældningskoefficient kan friktionskoefficienten for de enkelte materialekombinationer bestemmes.

Primærresultatet er en graf med kraften som en funktion af forskydningen, se figur 10. Det konstateres, om den statiske og den dynamiske friktionskoefficient er tilnærmelsesvis ens.

### Horisontaltrykforhold

Med kendskab til isoleringens vertikale udstrækning, samt ved at antage en lineær variation af spændingsfaldet, der er forårsaget af friktionen mellem isolering og cylinderens indvendige overflade, beregnes den horisontale spænding ud for den nedre tryktransducer.

Det målte tryk for den nedre tryktransducer korrigeres for nulpunktsdrift og ændringer i barometerstanden under forsøget ved hjælp af den øvre transducer. Derpå beregnes horisontaltrykforholdet for det pågældende forsøg.

Horisontaltrykforholdet findes som gennemsnit af horisontaltrykforholdet bestemt ved tre forsøg.

### Krybningsforhold

Den eksperimentelt målte krybning tilpasses Clouserfunktionen.

Krybningsfunktionen indeholder ikke den konsolidering, som de granulære materialer udviser ved lastpåsætningen. Derfor adderes konsolideringen til Clouserfunktionen som en konstant tøjning. Clouserfunktionen adderet en konstant tøjning tilpasses de ved forsøg målte krybningsdata. Ved tilpasningen af Clouserfunktionen til krybningsdata benyttes det, at krybningsfunktionen kan lineariseres ved logaritmisering på følgende måde (Nielsen, 1993):

$$Y = Y_0 + \alpha X$$

hvor

$$Y = \log_{10}(Ec(t) - 1)$$

$$X = \log_{10} t$$

$$Y_0 = -a_1 \log_{10} \tau$$

$$\alpha = a_1$$

I det  $X_0$  er givet ved:

$Y=0$  fås:

$$X_0 = -\frac{Y_0}{\alpha}$$

og  $a_1$  og  $\tau$  kan nu bestemmes som:

$$a_1 = \alpha = -\frac{Y_0}{X_0}$$

$$\tau = 10^{-Y_0/\alpha} = 10^{X_0}$$

Ved mindste kvadraters metode tilpasses den lineariserede krybningsfunktion et udsnit af de målte krybningsdata for tre lastniveauer med fastholdt densitet, temperatur og relativ luftfugtighed. Som udgangspunkt må det antages at  $a_1$  og  $\tau$  er funktioner af isoleringsmaterialernes densitet og relative fugtighed. Det anvendte elasticitetsmodul bestemmes ud fra den momentane elastiske tøjning målt ved aflastningen ved de to højeste lastniveauer. Den aflastede andel af den påsatte last for det laveste lastniveau er lille, hvorfor elasticitetsmodul bestemmelsen for dette lastniveau er behæftet med den største fejl.

Elasticitetsmodulet anvendt i beskrivelsen af krybningsfunktionen er defineret ud fra materialets momentane elastiske tøjning. Elasticitetsmodulet kan derfor betragtes som materialets evne til at genvinde sit volumen ved aflastning.

Eksperimentelt målt krybning som funktion af tiden med cyklisk varierende relativ luftfugtighed optegnes.

### Vægforsøg

Målte deformationer som funktion af tiden for vægelementerne opstillet i forsøgsrummet rapporteres og kommenteres.

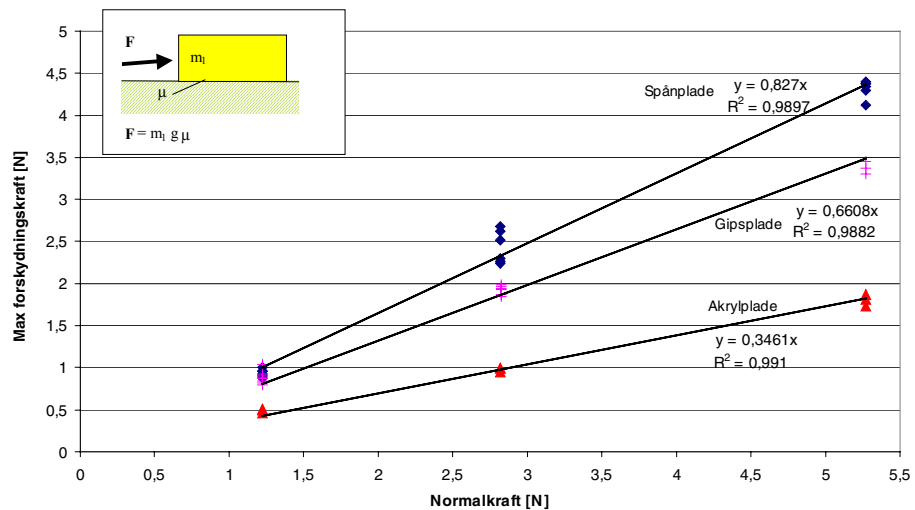


# Resultater

## Friktion

For forskellige kombinationer af isoleringsmaterialer og gipsplade med kartonoverflade, spånplade, krydsfiner og akryl er friktionen bestemt. Figur 9 viser den maksimale forskydningskraft mellem Ekofiber og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften. I figuren er der endvidere optegnet lineære regressionslinier gennem (0,0). Disse liniers hældningskoefficient er lig med friktionskoefficienten mellem isoleringsmateriale og det pågældende plademateriale.

Den maksimale forskydningskraft mellem Ekofiber og krydsfiner er vist på figur 21 i bilag. Den maksimale forskydningskraft mellem Papiruld, dansk hør, Rockwool, Thermocell, Perlite 0515SC og Perlite 0560SC og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften er vist på figur 22 til 27 i bilag. Den maksimale forskydningskraft skal overvindes før end en relativ flytning mellem isoleringsmaterialet og pladematerialet kan forekomme.



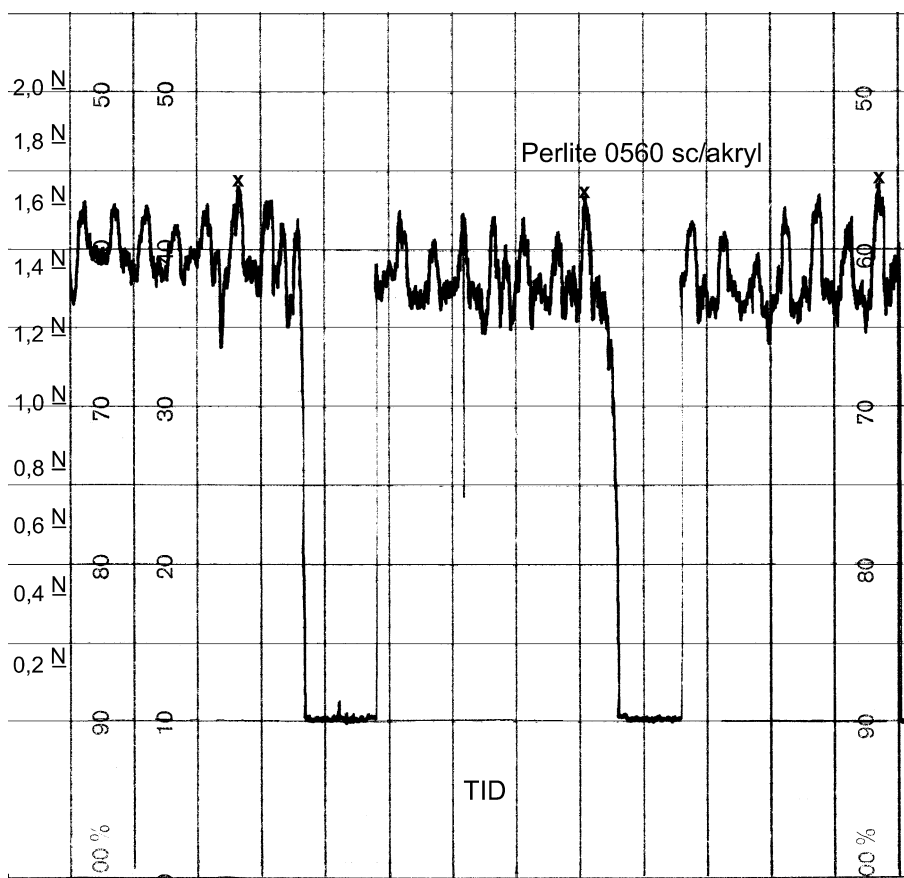
Figur 9. Maksimal forskydningskraft mellem Ekofiber og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.

Tabel 1 viser beregnede friktionskoefficienter for de undersøgte kombinationer af isoleringsmateriale og plademateriale. Friktionskoefficienten for kombinationen af Ekofiber og krydsfiner målt ved forskydning parallelt med yderfinerens fiberretning er ligeledes bestemt. Friktionskoefficienten blev bestemt til 0,86 med en korrelationskoefficient på 0,9949. De øvrige pladematerialer antages at have samme friktionskoefficient i alle retninger af overfladens plan.

Tabel 1. Eksperimentelt bestemte friktionskoefficienter for en række kombinationer af isoleringsmateriale og plademateriale. Korrelationskoefficienten  $R^2$  er angivet i kantede parenteser.

Isoleringsmateriale	Plademateriale		
	Spånplade	Gipsplade	Akrylplade
Ekofiber	0,83 [0,9897]	0,66 [0,9882]	0,35 [0,9910]
Perlite 0515SC	0,65 [0,9981]	0,62 [0,9994]	0,57 [0,9992]
Perlite 0560SC	0,73 [0,9971]	0,67 [0,9968]	0,61 [0,9977]
Papiruld	0,82 [0,9944]	0,67 [0,9918]	0,35 [0,9988]
Dansk hør	0,71 [0,9733]	0,60 [0,9827]	0,27 [0,9804]
Thermocell	0,91 [0,9716]	0,91 [0,9923]	0,30 [0,9960]
Rockwool	0,93 [0,9975]	0,71 [0,9921]	0,33 [0,9981]

Figur 10 viser forskydningskraften som funktion af tiden for tre på hinanden efterfølgende friktionsforsøg. I forsøget flyttes Perlite 0560SC relativt i forhold til en akrylplade. Normalkraften er 2,77 N, skriverens papirhastighed er 1 cm/minut. Hvert af de viste friktionsforsøg har en varighed på mellem 3 og 5 minutter.



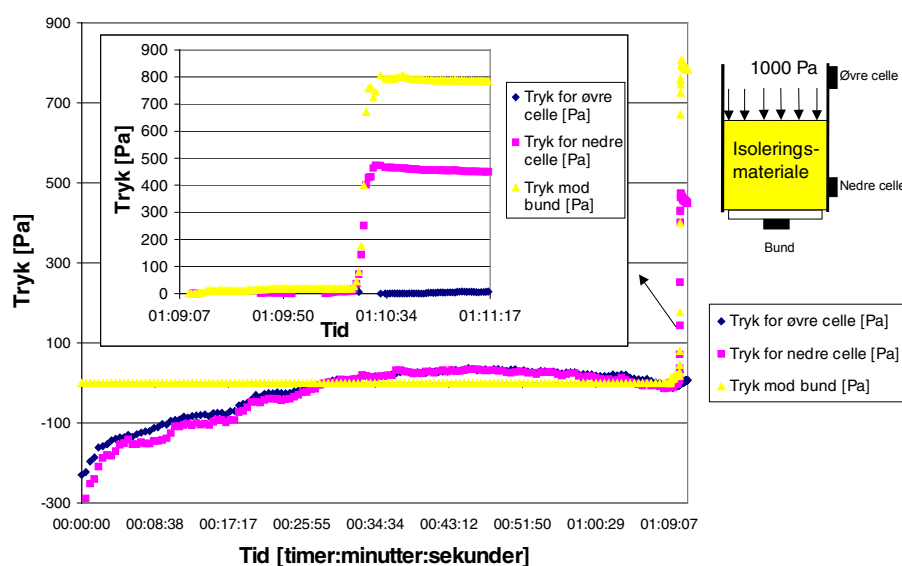
Figur 10. Forskydningskraft som funktion af tiden for tre på hinanden følgende friktionsforsøg med Perlite 0560SC flyttet relativt i forhold til en akrylplade. Den maksimale forskydningskraft i hvert af de tre forsøg er angivet med et kryds. Normalkraften er 2,77 N, papirhastigheden er 1 cm/minut.

## Horisontaltrykforhold

Det horisontale tryk måles som funktion af tiden for konstant last ved 50 % RF og 23 °C. Der udføres tre uafhængige vellykkede forsøg.

Figur 11 viser et tryk-tids-diagram for øvre og nedre tryktransducer monteret på cylinderens indvendige side samt for cylinderens bundcelle. Tryk-tids-diagrammet viser trykket før og under horisontaltrykmålingen. Ekofiber indlejres løst til tiden 01:09:07. Til tiden 01:10:19 påsættes en konstant last på 1000 Pa.

Tilsvarende forsøg er udført for Papiruld, dansk hør, Rockwool, Thermo-cell, Perlite 0515SC og Perlite 0560SC. For hvert enkelt materiale er der udført tre horisontaltrykforsøg. Horisontaltrykforhold, densitet, bundlast, øvre sidetryk og nedre sidetryk for de enkelte horisontaltrykforsøg er vist i tabel 8, se bilag.



Figur 11. Trykket for de enkelte tryktransducerer som funktion af tiden ved bestemmelsen af horisontaltrykket for Ekofiber.

Tabel 2 viser beregnede gennemsnit og spredning på horisontaltrykforhold for de enkelte isoleringsmaterialer. Horisontaltrykforholdene er beregnet som gennemsnit af tre forsøg. Resultaterne for de enkelte målinger er angivet i bilag, tabel 8.

Tabel 2. Målte horisontaltrykforhold ved 50 % RF og 23 °C.

Isoleringsmateriale	Horisontaltrykforhold	
	gennemsnit	Standardafvigelse
Ekofiber	0,42	0,01
Papiruld	0,39	0,03
Dansk hør	0,37	0,10
Rockwool	0,30	0,08
Thermocell	0,32	0,06
Perlite 0515SC	0,44	0,08
Perlite 0560SC	0,38	0,05

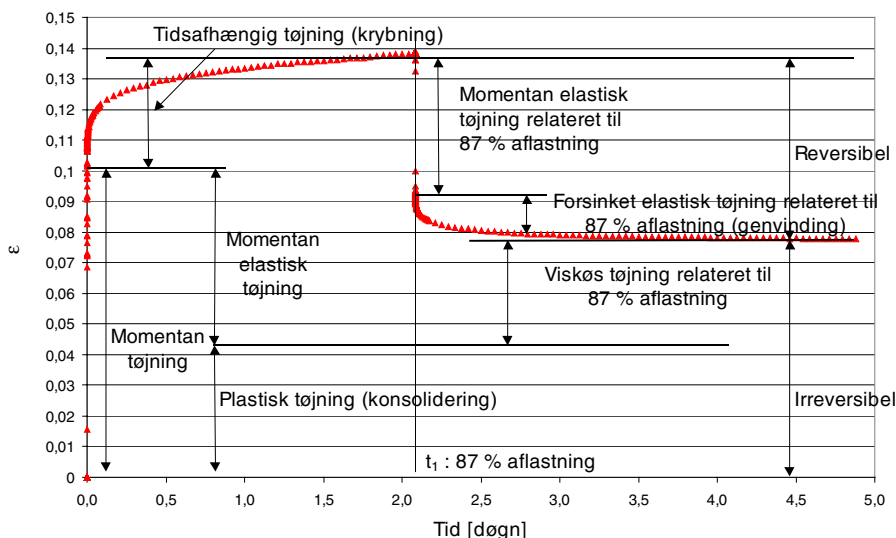
## Krybningsforhold

Krybnings- og tilbagekrybningsforsøg udføres ved tør tilstand (50 % RF, 23 °C) og fugtig tilstand (80 % RF, 23 °C) for to til fire densiteter af løsfyldsisoleringen og tre lastniveauer. De angivne indlejrede densiteter refererer til 50 %

RF og 23 °C. Forsøgsteknisk gøres dette ved at afveje den nødvendige mængde ved 50 % RF og 23 °C, hvorefter materialet konditioneres til et eventuelt højere fugtniveau inden indlejring.

Endvidere måles krybningen for cyklisk varierende relativ luftfugtighed. Den cykliske fugtvariation opnås ved, at lade luft med henholdsvis høj (80 % RF) og lav relativ luftfugtighed (50 % RF) sive gennem isoleringsmaterialet, hvorved det skiftevis opfugtes og udtørres. Temperaturen holdes konstant på ca. 23 °C.

Figur 12 viser et tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på 50 kg/m<sup>3</sup>, der indtil tiden t<sub>1</sub> er udsat for en konstant last på 499 Pa og derefter aflastet med 87 % af sin last. Ved en 100 % aflastning vil den viskøse tøjning blive mindre da en sådan aflastning vil resultere i fuld momentan elastisk tøjning og en øget forsinket elastisk tøjning.



Figur 12. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på 50 kg/m<sup>3</sup>. Prøven er indtil tiden t<sub>1</sub> er udsat for en konstant last på 499 Pa og derefter aflastet med 87 % af sin last. Forsøget er udført ved 50 % RF og 23 °C.

Tabel 3 viser tøjningskomponenter bestemt ud fra tøjnings-tids-diagrammer for Ekofiber. Tabellen indeholder målt momentan tøjning, målt momentan elastisk tøjning bestemt ved aflastning til tiden t<sub>1</sub> og plastisk tøjning. Plastisk tøjning er defineret ved differensen mellem den momentane tøjning og den momentan elastiske tøjning. Tabellen indeholder endvidere den målte krybning og den irreversible tøjning, begge over to døgn. Den irreversible tøjning er defineret som differensen mellem den momentane tøjning plus krybningen og den momentane elastiske tøjning plus den forsinkede elastiske tøjning. Den forsinkede elastiske tøjning er estimeret til 0,35 gange krybningen.

Tøjnings-tids-diagrammerne er målt for Ekofiber, der er indlejret med varierende densitet, og som indtil tiden t<sub>1</sub> er udsat for en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa, og derefter er aflastet med henholdsvis 20, 68 og 87 % af sin last. For Ekofiber med en densitet på henholdsvis 30, 42, 50 og 60 kg/m<sup>3</sup> er forsøgene udført ved 50 % RF og 23 °C. For en densitet på henholdsvis 42 og 50 kg/m<sup>3</sup> er forsøgene udført ved 80 % RF og 23 °C.

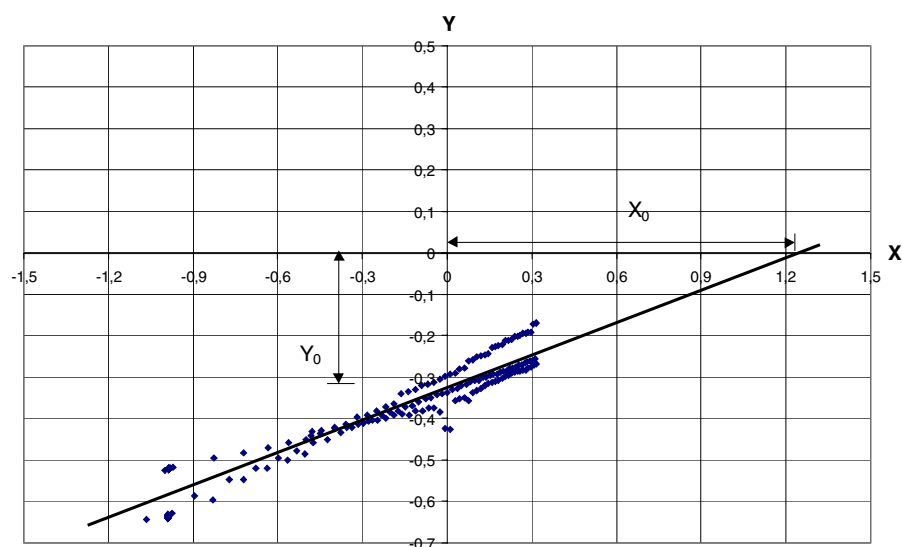
Tøjnings-tids-diagrammerne for de enkelte forsøg med Ekofiber er vist i figur 28 til 32, se bilag.

Den anførte densitet relaterer til løsfyldsisoleringens densitet ved 50 % RF og 23 °C.

Tabel 3. Målte tøjningskomponenter for Ekofiber indlejret med en densitet på henholdsvis 30, 42, 50 og 60 kg/m<sup>3</sup>. Forsøgene er udført ved såvel 50 % RF som 80 % RF og 23 °C. Lastniveauerne lav, middel og høj er henholdsvis 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa.

Relativ luftfugtighed [%]		50				80	
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]		30	42	50	60	42	50
Tøjning	Lastniveau						
Momentan tøjning	lav	0,092	0,062	-0,010	-0,068	0,060	-0,008
	middel	0,201	0,131	0,010	-0,018	0,120	0,004
	høj	0,307	0,22	0,100	0,038	0,210	0,060
Momentan elastisk tøjning	lav	0,005	0,003	0,003	0,010	-	-
	middel	0,020	0,021	0,022	0,022	0,010	0,008
	høj	0,047	0,056	0,054	0,057	0,019	0,022
Plastisk tøjning (konsolidering)	lav	0,088	0,059	-0,013	-0,078	0,060	-0,008
	middel	0,181	0,110	-0,012	-0,040	0,110	-0,004
	høj	0,260	0,164	0,046	-0,019	0,192	0,038
Krybning over to døgn	lav	0,046	0,016	0,0002	-0,007	0,049	0,083
	middel	0,063	0,033	0,016	0,001	0,071	0,131
	høj	0,043	0,049	0,038	0,019	0,099	0,182
Irreversibel tøjning over to døgn	lav	0,117	0,070	-0,013	-0,083	0,092	0,046
	middel	0,222	0,131	-0,001	-0,039	0,156	0,081
	høj	0,288	0,196	0,071	-0,007	0,256	0,156

Figur 13 viser hvordan krybningsparametre for Ekofiber bestemmes ud fra de målte krybningsdata. Ved mindste kvadraters metode tilpasses den lineariserede krybningsfunktion til et udsnit af de målte krybningsdata. Krybningsdataene er målt på Ekofiber påvirket til tre lastniveauer. Densiteten er 50 kg/m<sup>3</sup>, temperaturen er på 23 °C, og den relative luftfugtighed er på 50 %. Det anvendte elasticitetsmodul er vist i tabel 4.



Figur 13. Krybningsparametre for Ekofiber med densiteten 50 kg/m<sup>3</sup> ved en temperatur på 23 °C og en relativ luftfugtighed på 50 % bestemmes ud fra de eksperimentelt bestemte krybningsdata. Ved tilpasningen af Clouserfunktionen benyttes, at krybningsfunktionen kan lineariseres ved logaritmisering.

Tabel 4. Elasticitetsmodul for Ekofiber indlejret med en densitet på henholdsvis 30, 42, 50 og 60 kg/m<sup>3</sup> ved såvel 50 % RF som 80 % RF og 23 °C.

Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	RF [%]	Elasticitetsmodul [Pa]
30	50	10690
42	50	8650
50	50	9850
60	50	9900
42	80	31330
50	80	29385

Tabel 5 viser densiteten og elasticitetsmodul for Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell indlejret ved 50 % RF og 23 °C.

Tabel 5. Elasticitetsmodul for isoleringsmaterialer indlejret ved 50 % RF og 23 °C.

Isoleringsmateriale	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Elasticitetsmodul [Pa]
Papiruld	40	11240
Papiruld	50	9690
Dansk hør	40	10350
Dansk hør	50	8580
Rockwool	60	8720
Rockwool	70	9390
Thermocell	40	16030
Thermocell	50	14300

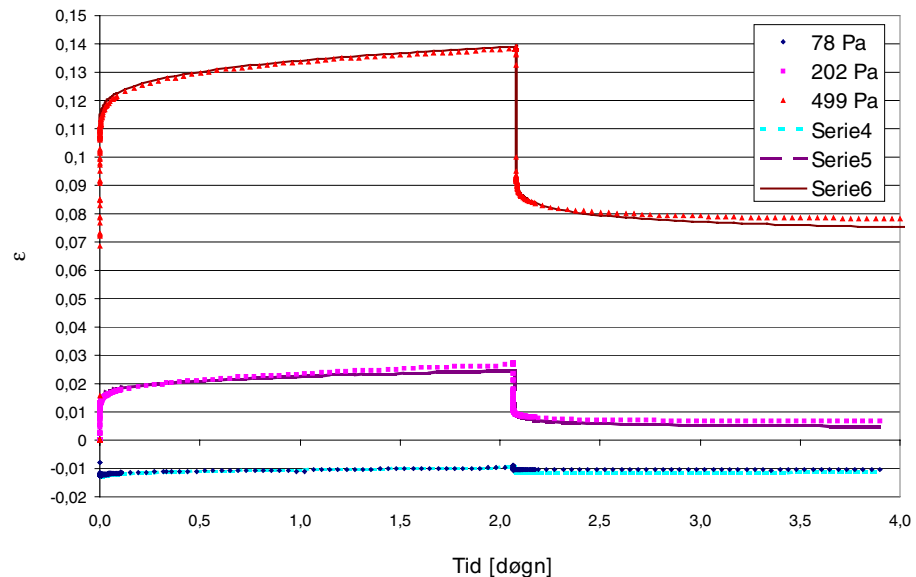
Tabel 6 viser densiteten og elasticitetsmodul for Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell indlejret ved 80 % RF og 23 °C.

Tabel 6. Elasticitetsmodul for isoleringsmaterialer indlejret ved 80 % RF og 23 °C. Den anførte densitet er relateret til 50 % RF og 23 °C.

Isoleringsmateriale	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Elasticitetsmodul [Pa]
Papiruld	40	17700
Papiruld	50	19960
Dansk hør	40	18100
Dansk hør	50	19970
Rockwool	60	8480
Rockwool	70	11520
Thermocell	40	27680
Thermocell	50	31800

Clouserfunktionen til beskrivelse af krybning for Ekofiber ved 50 % RF og en temperatur på 23 °C indlejret med en densitet på 50 kg/m<sup>3</sup> er vist i figur 14. Clouserfunktionen er optegnet med en fuldt optrukken linie. Clouserfunktionen til 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa er angivet som henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Prøverne er aflastet efter to døgn. Clouserfunktionen er efter aflastning beskrevet ved hjælp af superpositionsprincippet, (Nielsen, 1992).

Clouserfunktionen til beskrivelse af krybning for Ekofiber, Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell ved 50 % RF samt ved 80 % RF og en temperatur på 23 °C indlejret ved en række forskellige densiteter er vist i figur 28 til 48, se bilag. Clouserfunktionen til 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa er angivet som henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6.



Figur 14. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Prøverne er aflastet efter to døgn.

Tabel 7 viser krybningsparametrene  $a_1$  og  $\tau$  i Clouserfunktionen til beskrivelse af Ekofiber ved en række indlejningsdensiteter og fugtforhold. Ligeledes viser tabellen de anvendte tøjningskomponenter. Clouserfunktionen er tilpasset krybningsforsøg ved lastniveauerne 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa. Krybningsforsøgene er udført med densiteterne  $30, 42, 50$  og  $60 \text{ kg/m}^3$  ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  og 50 % RF samt med densiteterne  $42$  og  $50 \text{ kg/m}^3$  ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  og 80 % RF.

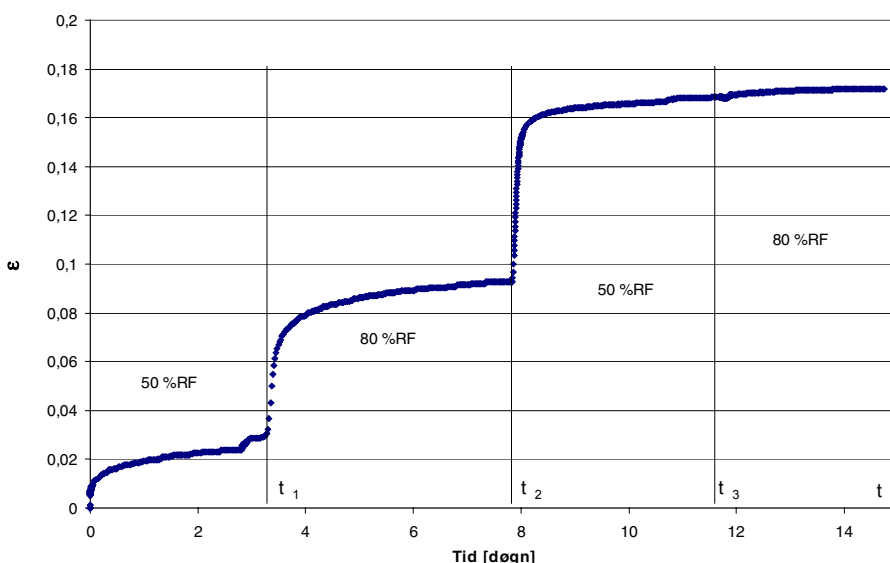
Krybningsparametre til beskrivelse af Clouserfunktionen samt anvendte tøjningskomponenter for Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell er bestemt ud fra de eksperimentelt bestemte krybningsdata og er vist i tabellerne 9 til 12, se bilag.

Tabel 7. Krybningsparametre for Ekofiber er bestemt ud fra krybningsforsøg for en densitet på henholdsvis  $30, 42, 50$  og  $60 \text{ kg/m}^3$  med en temperatur på  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  og en relativ luftfugtighed på 50 %. Ligeledes er krybningsdata for en densitet på henholdsvis  $42$  og  $50 \text{ kg/m}^3$  med en temperatur på  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  og en relativ luftfugtighed på 80 % vist. Lastniveauerne lav, middel og høj er henholdsvis 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa.

Relativ luftfugtighed [%]		50				80	
Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]		30	42	50	60	42	50
$a_1$		0,2563	0,2759	0,2612	0,1345	0,3118	0,3317
$\tau$ [døgn]		0,0723	1,9015	17,4566	139,6309	0,0025	0,0215
Tøjning	Lastniveau						
Momentan tøjning	lav	0,1100	0,0670	-0,0140	-0,0790	0,0850	-0,0120
	middel	0,2200	0,1400	0,0130	-0,0280	0,1450	0,0065
	høj	0,2700	0,2200	0,1100	0,0280	0,2000	0,0670
Momentan elastisk tøjning	lav	0,0073	0,0093	0,0080	0,0079	0,0025	0,0027
	middel	0,0190	0,0243	0,0205	0,0204	0,0065	0,0069
	høj	0,0467	0,0598	0,0508	0,0505	0,0159	0,0170
Plastisk tøjning (konsolidering)	lav	0,1027	0,0577	-0,0220	-0,0869	0,0825	-0,0147
	middel	0,2010	0,1157	-0,0075	-0,0484	0,1385	-0,0004
	høj	0,2233	0,1602	0,0592	-0,0225	0,1841	0,0500

Figur 15 viser et tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , der indtil tiden  $t_1$  at blive udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_2$  er udsat for 80 % RF for igen indtil tiden  $t_3$  er udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_4$  er udsat for 80 % RF. Isoleringmaterialet er påsat

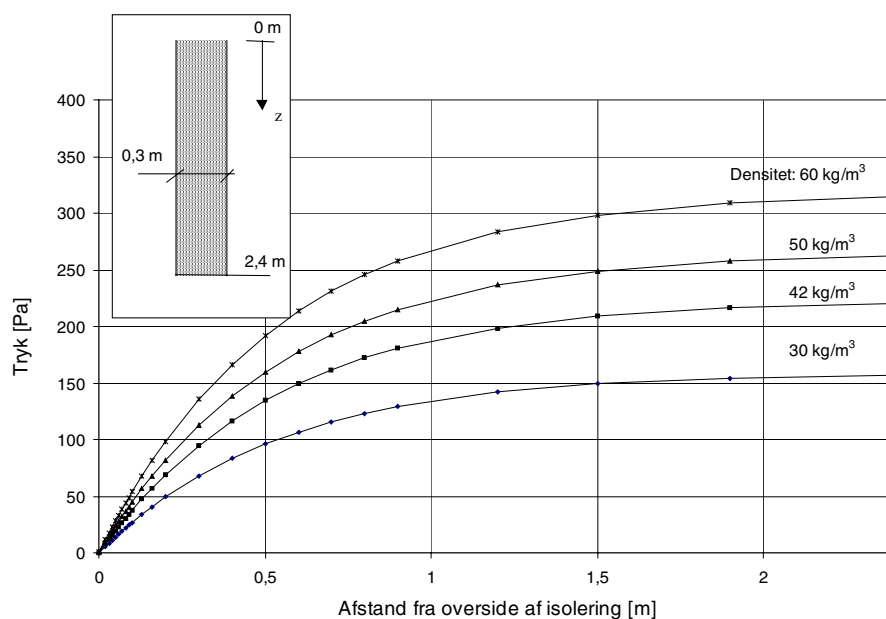
en konstant last på 123 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 21 Pa. Ved forsøgets start er den relative luftfugtighed 50 %, og forsøget er udført ved 23 °C.



Figur 15. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på 50 kg/m<sup>3</sup>, der indtil tiden t<sub>1</sub> er udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden t<sub>2</sub> er udsat for 80 % RF for igen indtil tiden t<sub>3</sub> at blive udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden t<sub>4</sub> er udsat for 80 % RF. Isoleringsmaterialet er påsat en konstant last på 123 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 21 Pa. Forsøget er udført ved 23 °C.

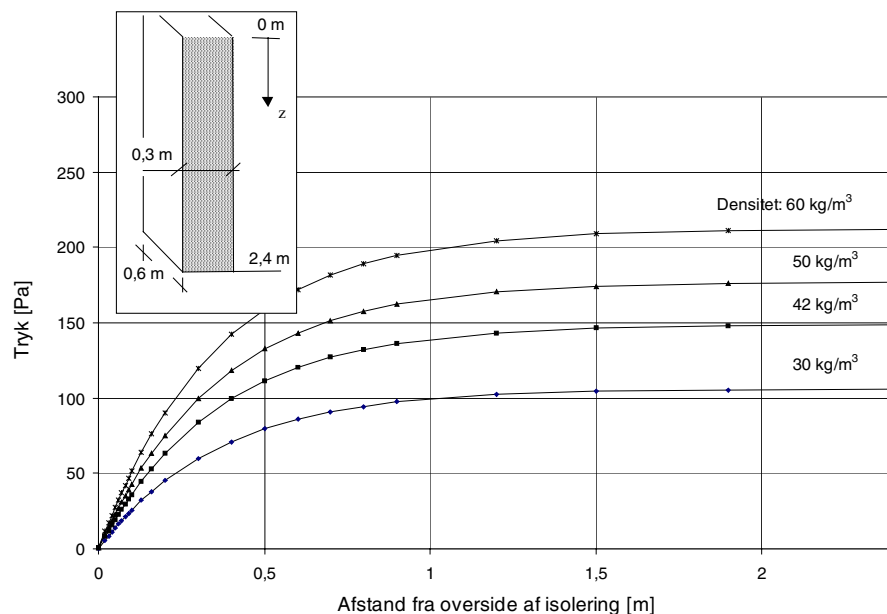
## Statiske forhold

Spændingstilstanden som funktion af højden af en Ekofiber løsfyldsisoleret væg uden påsat vertikal last er vist i figur 16 og figur 17. Beregningerne er foretaget, med den eksperimentelt bestemte friktion og med et horisontaltrykforhold på 0,42. For beregningerne vist i figur 16 er det antaget, at væggen er beklædt med gipsplader, samt at den er meget bred i forhold til sin tykkelse. For beregningerne vist i figur 17 er det antaget, at væggen er beklædt med gipsplader, samt at den har en bredde på 0,6 m. Begge figurer tager udgangspunkt i en vægtykkelse på 0,3 m.



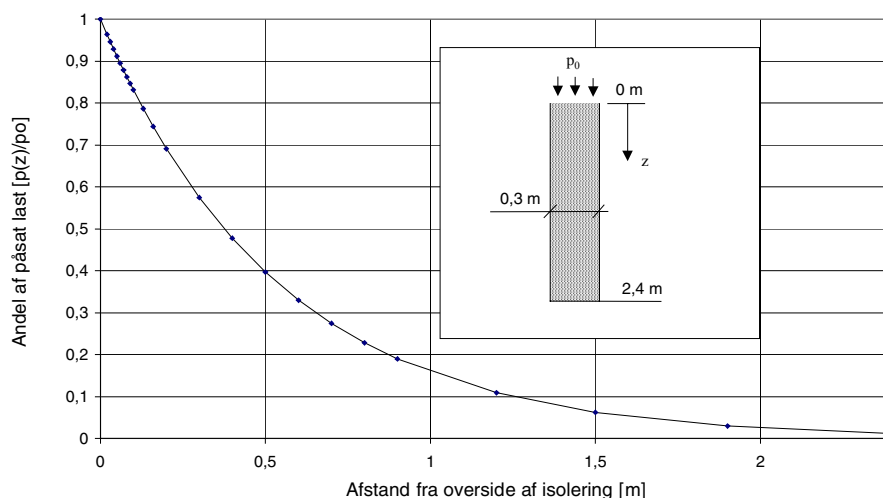
Figur 16. Spændingsfordeling i Ekofiber isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde × bredde × højde lig med ∞ × 0,3 m × 2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,42.





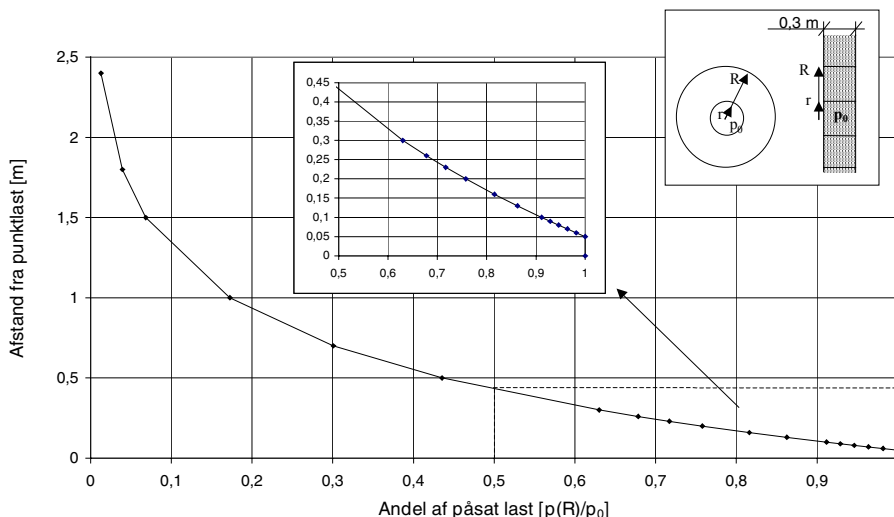
Figur 17. Spændingsfordeling i Ekofiber isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en bredde på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,42.

Spændingsfordelingen i en Ekofiber løsfyldsiseret væg med påsat vertikal last er vist i figur 18. Beregningerne er foretaget med den eksperimentelt bestemte friktion og med et horisontaltrykforhold på 0,42. Den beregnede væg antages at være beklædt med gipsplader samt at være meget bred i forhold til sin tykkelse. Spændingerne er normeret med den påsatte spænding.



Figur 18. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i Ekofiber isoleret gipspladevæg for et horisontaltrykforhold på 0,42. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m

Spændingstilstanden som funktion af afstanden til et indblæsningssted for en Ekofiber løsfyldsiseret væg er vist i figur 19. Beregningerne er foretaget med den eksperimentelt bestemte friktion og med et horisontaltrykforhold på 0,42. Den beregnede væg antages at være beklædt med gipsplader samt at være meget bred i forhold til sin tykkelse. Spændingerne er normeret med den påsatte spænding ved indblæsning.



Figur 19. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningssted for en Ekofiber løsfyldsisoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,42. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

Spændingstilstanden som funktion af højden af en henholdsvis Ekofiber, Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell, Perlite 0515SC og Perlite 0560SC isoleret væg med og uden påsat last samt for punktformet indblæsning i en væg er vist i figur 49 til 76, se bilag. Beregningerne er foretaget med den eksperimentelt bestemt friktion og horisontaltrykforhold. Væggen antages meget bred i forhold til sin tykkelse. Spændingerne er normeret med den påsatte spænding ved indblæsning.

## Vægforsøg

Væggene isoleres begge med Ekofiber. Væggen af krydsfiner isoleres med en densitet på  $55 \text{ kg/m}^3$ . Væggen af gipsplade isoleres med en densitet på  $48 \text{ kg/m}^3$ .

De to vægelementer blev efter manuel fyldning lukket og placeret i et klimarum med 50 % relativ luftfugtighed og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Efter opstilling blev måleskiven løsnet. Løbende aflæsning af målepindens flytning viste en umiddelbar flytning på henholdsvis 4 mm og 5 mm for henholdsvis krydsfinerpladevæggen og gipspladevæggen. Efter 25 dage blev flytningen målt til 5 mm og 10 mm for henholdsvis krydsfinerpladevæggen og gipspladevæggen. Ved at afmontere de øverste 150 mm af væggen forplade blev det konstateret, at de målte flytninger afspejler Ekofiber løsfyldsisoleringens sætning.

## Designværktøj

For at anvende den fremførte teori er det nødvendigt at kende parametrene: (i) friktionskoefficienten for den ønskede materialekombination, væg og isoleringsmateriale; og (ii) horisontaltrykforholdet for isoleringsmaterialet. Begge er materialeparametre som kan bestemmes efter metoder anført i denne rapport.

Yderligere er det nødvendigt at kende krybningsforholdene for isoleringsmaterialet under lastpåsætning, under konstant last og under efterfølgende aflastning. En metode til bestemmelse af krybningsforholdene er givet i rapporten. Krybningsforholdene som anvendes i forbindelse med designværktøjet, angivet nedenfor, skal afspejle de forhold som materialerne udsættes for gennem væggen forventede levetid.

Rapportens resultater kan anvendes som designværktøj på følgende måde:

- 1 Væggen specificeres og karakteriseres med hensyn til materiale og størrelse.
- 2 Isoleringsmaterialet specificeres og friktionskoefficient mellem isoleringsmaterialet og væggen bestemmes. Endvidere bestemmes horisontaltrykforholdet.
- 3 For en antaget homogen densitet af isoleringsmaterialet i væggen bestemmes spændingen som funktion af afstanden fra isoleringens overside, (tryk i væg med fri overside, side 9 og om nødvendigt kombineret med tryk i væg med belastet overside, side 10).
- 4 Den dimensionerende spænding bestemmes ud fra den beregnede spændingspåvirkning af isoleringsmaterialet i væggen f.eks. vælges det højeste spændingsniveau.
- 5 For den antagede homogene densitet af isoleringsmaterialet bestemmes krybningen for det valgte spændingsniveau som funktion af tiden (figur 12, side 27 og krybningsfunktionen for et Burgermateriale samt Clouserfunktionen, side 11). Herudfra kan det bestemmes om isoleringsmaterialet i den specificerede væg er i det reversible tøjningsniveau for den antagede levetid. Forbliver isoleringsmaterialet i sit reversible tøjningsniveau vil det fylde det indvendige volumen ud i væggen hvorved sætninger vil være elimineret. Hvis beregningen viser at isoleringsmaterialet ikke er i sit reversible tøjningsniveau er det nødvendigt at gennemføre en ny dimensionering (punkt 1 til 5) med de nødvendige korrektioner.

## Diskussion af forsøgsresultater

Friktionskoefficienten mellem en række isoleringsmaterialer, som Ekofiber, Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell, Perlite 0515SC og Perlite 0560SC og udvalgte overflader, som krydsfiner, spånplade, gipsplade og akrylplade, er bestemt. Bestemmelsen er foretaget ved at plotte den maksimale forslydningskraft som funktion af normalkraften, hvormed de enkelte isoleringsmaterialer påvirker de enkelte udvalgte overflader. Friktionskoefficienten for de enkelte materialekombinationer er bestemt analytisk ved anvendelse af mindste kvadraters metode med en meget fin tilnærmelse, se tabel 1.

Resultaterne viser, at friktionskoefficienten er uafhængig af isoleringsmaterialernes densitet. Dette ses ved, at der er en lineær sammenhæng mellem den maksimale forslydningskraft og normalkraften, se figur 9.

Fra papiret med den optegnede kraft, hvormed Perlite 0560SC med den påsatte masse forslydes over en akrylplade, se figur 10, konstateres, at den statiske og den dynamiske friktionskoefficient er tilnærmelsesvis ens, da niveauet for den maksimale kraft forbliver tilnærmelsesvis konstant under den relative flytning mellem Perlite og akrylpladen.

Det horisontale tryk, som et granulært isoleringsmateriale udviser ved et vertikalt tryk, er bestemt ved forsøg, og forholdet mellem det horisontale tryk og det vertikale tryk også kaldet horisontaltrykket er beregnet. horisontaltrykforholdet med den tilhørende standardafvigelse for tre forsøg for Ekofiber, Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell, Perlite 0515SC og Perlite 0560SC er vist i tabel 2. Horisontaltrykforholdet er bestemt med en meget varierende standardafvigelse for de enkelte isoleringsmaterialer. Standardafvigelsen er størst for de isoleringsmaterialer med mindst tilbøjelighed og evne til at lade sig homogen løst indlejre. Forsøg til bestemmelse af horisontaltrykforhold kræver stor omhyggelighed.

Ekofibers tøjning under konstant belastning er vist i figur 12. Cellulosebaserede løsfyldsisoleringer udviser momentan og tidsafhængig deformation ved belastning, se figur 12. Tilsvarende ses for Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell, se figur 28 til 48 i bilag.

Den momentane deformation indeholder såvel en reversibel som en irreversibel del. For Ekofiber ses det, at den reversible del, også kaldet den momentane elastiske del af den momentane deformation, er tilnærmelsesvis uafhængig af løsfyldsisoleringens densitet og faldende med den relative luftfugtighed for isoleringsmaterialet, se tabel 3. Konsolideringens andel af den momentane deformation er aftagende med densiteten for fastholdt relativ luftfugtighed, og er vist for 50 RF og 23 °C, helt at kunne elimineres.

Ligeledes indeholder krybningen såvel en reversibel som en irreversibel del. Den reversible del, som er den forsinkede elastiske del, udgør omtrent en fast andel af den irreversible del, den viskøse del.

Beregnes den irreversible deformation over to døgn, se tabel 3, ses det, at løsfyldsisoleringen kan indlejres med en densitet, som er volumenstabil. I tabel 3 er en negativ irreversible tøjning over to døgn lig en positiv reversibel tøjningskapacitet i det indlejrede materiale. Dette viser, at det ved indlejring er muligt at introducere en spændingstilstand, som vil resultere i, at materialets volumen forbliver konstant og derved vil udfylde konstruktionen. Princippet kræver, at isoleringsmaterialet under hele sin levetid, befinder sig i det reversible tøjningsområde.

Betragtningerne kompliceres yderligere, da krybning ligesom den momentane elastiske tøjning er afhængig af isoleringsmaterialets relative luftfugtighed, se tabel 3 og tabel 4. Endvidere er det vist, at krybningen øges

ved cykliske variationer af isoleringsmaterialets relative luftfugtighed, se figur 15. Krybningen over to døgn ses ligeledes at stige med materialets relative luftfugtighed. Dette resulterer i et fald i reversibel tøjning, hvilket kan resultere i en irreversibel tøjning.

Den momentane elasticitet hænger nøje sammen med isoleringsmaterialets elasticitetsmodul vist i tabel 5 og tabel 6. Papiruld, dansk hør og Thermocell har samme egenskaber som Ekofiber. Elasticitetsmodulet for Rockwool ses at være uafhængigt af dets relative luftfugtighed.

Ekofiber løsfyldsisolering krybning er søgt beskrevet ved Clouserfunktionen. Anvendelsen af Clouserfunktionen er vist på figur 13, og den tilpassede funktion er illustreret i figur 14.

Den tilpassede Clouserfunktionen for Ekofiber, Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell for de enkelte kombinationer af densitet og relativ luftfugtighed er vist i figur 28 til 48, se bilag.

Den tilpassede Clouserfunktionen og forsøgsdata, ses at stemme godt overens. Overensstemmelsen for de to lave lastniveauer er af størst betydning, da dette lastniveau er relevant i de statiske beregninger. For lave densiteter, høj last og høj relativ luftfugtighed ses en mindre god overensstemmelse mellem Clouserfunktionen og den målte tøjning. For disse kombinationer er forudsætningen for anvendelsen af krybningsfunktionen ikke opfyldt.

Krybningsparametre for Ekofiber løsfyldsisolering er vist i tabel 7. Konsolideringsparametrene ses at stemme overens med den målte konsolidering, se tabel 3. KrybningsekspONENTEN  $a_1$  er sammenlignelig med krybningsekspONENTEN for træ påvirket parallelt med fibre, som er lig 0,25, Nielsen (1993).

Krybningsparametre for Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell er vist i tabel 9 til 12, se bilag.

Spændingstilstanden i Ekofiber løsfyldsisolering beregnes ved hjælp af teorier anvendt inden for siloteorien. Spændingstilstanden som funktion af højden af en Ekofiber løsfyldsisoleringet væg uden påsat vertikal last er vist i figur 16 og figur 17. Spændingstilstanden for en løsfyldsisoleringet væg reduceres med en reduktion af væggenes bredde. Spændingstilstanden som funktion af væggenes højde er proportional med væggenes forhold mellem bredde og tykkelse. Påvirkes væggen af en vertikal last, vil denne resultere i en øget spændingstilstand som funktion af væggenes højde, se figur 18.

Fra krybningsforsøgene kan den nødvendige spænding til indlejring af forskellige densiteter af Ekofiber løsfyldsisolering bestemmes. Den nødvendige spænding til indlejring udgør beregningsmæssigt den vertikale last, som må lægges til spændingsfordelingen fra isoleringens egenlast ved beregning af isoleringens dimensionerende spændingstilstand. Ved en iterativ beregning mellem den dimensionerende spændingstilstand, væggenes karakteristika, isoleringens fugtforhold og indlejringens densitet kan kriterierne for sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering opstilles. Sådanne beregninger er foretaget for Ekofiber, se Figur 1.

Figur 1 er fremkommet ud fra den beregnede irreversibel tøjning over to døgn, for 50 % RF og 23 °C, som funktion af den påsatte spænding og spændingsberegninger fra den statiske model. Irreversible tøjning over to døgn er for de enkelte densiteter antaget lineært afhængig af spændingen. Ved en iterativ proces sammenholdes den irreversible tøjning over to døgn lig nul med densiteten og den dertil hørende beregnede maksimale spænding for den betragtede væg. Kurven for 80 RF og 23 °C er fremkommet ved at lægge den eksperimentelt bestemte differens i krybning til kurven for 50 RF og 23 °C. Ved denne betragtning er der ikke taget højde for cykliske fugtvariationer.

Den anvendte teori kan endvidere anvendes til, at beregne spændingstilstanden som funktion af afstanden til et indblæsningssted, se figur 19. Disse beregninger kan anvendes ved fastlæggelse af en indblæsningsprocedure. Beregningerne viser, i hvilken afstand fra indblæsningspunktet en given spænding opnås. Med kendskab til den nødvendige spænding til indlejring af

et givent materiale med en given densitet, kan der foretages en optimering mellem indlejringen og homogeniteten af det indlejrede materiale.

Tilsvarende beregninger for Ekofiber, Papiruld, dansk hør, Rockwool og Thermocell, Perlite 0515SC og Perlite 0560SC løsfyldsisolerede vægge er vist på figur 49 til 76, se bilag.

Til verifikation af den statiske model blev to vægge isoleret med Ekofiber opstillet. Ingen af de to vægge viste nævneværdige sætninger svarende til de sætninger som er kendt fra tidligere forsøg, for eksempel vægkonstruktioner i et forsøgshus på Statens Byggeforskningsinstitut. Sætningerne var forventet indenfor en kort tidsperiode, men det må konstateres at opstillingen i sig selv ikke indeholder sætningsudløsende mekanismer så som varierende fugtforhold eller dynamiske påvirkninger. Disse forhold vil der blive taget højde for i projektets anden fase.

# Konklusion

Forskydningskraften kan bestemmes ved anvendelse af Jenikes forskydningscelle.

Friktionskoefficienten mellem en række isoleringsmaterialer og udvalgte overflader som krydsfiner, spånplade, gipsplade og akrylplade er bestemt. Friktionskoefficienten for de enkelte materialekombinationer er bestemt analytisk efter mindste kvadraters metode med en meget fin tilnærmelse. Friktionskoefficienten er vist at være uafhængig af det enkelte isoleringsmateriales densitet. Endvidere kan det konstateres, at den statiske og den dynamiske friktionskoefficient er tilnærmelsesvis ens.

En metode til bestemmelse af et granulært isoleringsmateriales horisontaltrykforhold er vist samt anvendt med tilfredsstillende resultat.

Granulære isoleringsmaterialers tøjning under konstant belastning med delvis aflastning efter en vis tid er målt og analyseret. Granulære isoleringsmaterialer tøjtes momentant ved belastning. Vedbliver belastningen vil materialet yderligere tøjtes.

Granulære løsfyldsisoleringer udviser momentan og tidsafhængig deformation ved belastning. For Rockwool er den tidsafhængige deformation dog yderst begrænset. Den momentane deformation indeholder såvel en reversibel som en irreversibel del. For fastholdt relativ luftfugtighed er den reversible andel stigende med løsfyldsisoleringens densitet. Den irreversible andel af den momentane deformation kan helt elimineres. Ligeledes indeholder krybningen såvel en reversibel som en irreversibel del. Den reversible del udgør omtrent en fast andel af den irreversible del. Beregnes den irreversible deformation ses, at løsfyldsisoleringer kan indlejres med en densitet, som er volumenstabil. Dette vises ved, at der er en positiv reversibel effekt i det indlejrede materiale. Det er således muligt at indbygge løsfyldsisolering på en sådan måde, at der introduceres en spændingstilstand, som vil resultere i, at materialets volumen forbliver konstant og derved vil udfylde konstruktionen.

For de materialer hvis elasticitetsmodul varierer med den relativ luftfugtighed vil fugtsvingninger i løsfyldsisoleringen forringe isoleringsmaterialernes evne til at fylde konstruktionen ud. For disse materialer ses den momentant elastiske tøjning og krybning at være afhængig af materialets relative luftfugtighed. Den elastiske tøjning falder med materialets relative luftfugtighed. Krybningen ses at stige med materialets relative luftfugtighed. Dette medfører et fald i reversibel tøjning, hvilket kan resultere i en irreversibel tøjning.

Granulær løsfyldsisoleringens krybning er beskrevet ved Clouserfunktionen. Den tilpassede Clouserfunktionen og forsøgsdata ses at stemme godt overens i det faktiske anvendelsesområde.

Spændingstilstanden for et udvalgt antal løsfyldsisoleringer er beskrevet med teorier anvendt indenfor siloteorien. Spændingstilstanden som funktion af højden af en løsfyldsisolering væg med og uden vertikal påsat last er beregnet. Isoleringens dimensionerende spændingstilstand kan ved en iterativ beregning mellem dimensionerende spændingstilstand, væggenes karakteristika, isoleringens fugtforhold og indlejringens densitet bestemmes. Et eksempel på en sådan anvendelse er vist i figur 1. Ligeledes kan kriterierne for sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering opstilles.

Med den anvendte teori er det muligt at beregne spændingstilstanden som funktion af afstanden til et indblæsningssted. Med kendskab til den nødvendige spænding til indlejring af et givent materiale med en given densitet, kan der foretages en optimering mellem indlejringen og homogeniteten af det indlejrede materiale.

# Litteratur

Barfod, N. (1982). Partikelmængders strømningsforhold. In *En introduktion til partikelteknologi: Kompendium. Kapitel 14*. Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Institutet for Kemiteknik.

Fuglsang Nielsen, L. (1986). *Materialemechanik: Grundkursus II i bygningsmaterialer. Forelæsningsnoter* (Teknisk Rapport 169/86). Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer.

Fuglsang Nielsen, L. (1988). *Materialemechanik II: Rheologi, brud, kompositmaterialer og levetid* (Teknisk Rapport 189/1988). Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer.

Fuglsang Nielsen, L. (1992). *Materialers rheologi, styrke og levetid med speciel reference til træ* (Teknisk Rapport 265/1992). Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer.

Fuglsang Nielsen, L. (1993). *Materialemechanik: Notater til to forelæsninger i LBM-kursus 6102: Videregående Bygningsmateriallære* (Teknisk Rapport 286/1993). Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer.

The Institution of Chemical Engineers. (1989). *Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell*. Rugby, England.



# Summary

## By og Byg documentation 011: Settling of loose-fill insulation materials in walls

The report describes material behaviour, which significantly influences the settling of loose-fill insulation materials. The specific application presented here is loose-fill insulation material injected in walls as thermal insulation.

The physical formulation of the issue to be discussed is that the mass is kept in position in the cavity by frictional forces, which counteracts the settling but complicates injection. The purpose of this study is to investigate whether there is a possibility that decreased friction will be able to release settling.

Cellulose loose-fill material injected in a 0.1 m thick and 1 m wide gypsum wall with a minimum density of  $48 \text{ kg/m}^3$  was found not to settle if kept at a constant relative humidity, RH 50 %. A minimum density of  $53 \text{ kg/m}^3$  is necessary if the thickness of the wall is increased from 0.1 m to 0.3 m. If changing the constant environment from RH 50 % to RH 80 % a minimum density of  $63 \text{ kg/m}^3$  is necessary. Results are shown in figure 1.

Furthermore, results so far show that cellulose loose-fill material spread on the attic floor will have a density after settling of  $48 \text{ kg/m}^3$  for a constant RH 50 %, corresponding to  $43 \text{ kg/m}^3$  dry material. The results were found by using a model and tests.

## Model

The report describes a theory that can be applied to estimate the settling of loose-fill insulation materials. Settling is determined from characteristics describing the wall and the relative humidity of the loose-fill material and the density of the loose-fill material in the wall. In addition a model describing the creep of the loose-fill material is presented.

Furthermore, it was found that injection procedures for loose-fill materials can be evaluated. When evaluating the injection process, the relationship between stresses and the distance from the injection point must be calculated for each wall and insulation material. From these calculations the injection procedures can be optimised to achieve an almost homogeneous distribution of the insulation material in the wall.

## Tests

The friction coefficient is determined from tests for a combination of 3 - 4 wall materials and 7 loose-fill materials. The loose-fill materials tested are both new and conventional materials sold on the Danish market and used as thermal insulation. The various types of loose-fill material include; mineral based, cellulose, mineral granulate, woodwool and granulated flax.

The ratio between the horizontal pressure and the vertical pressure is determined for all the materials. The ratio is difficult to measure but it was nevertheless done with success. The test method is described in the report.

For a number of the materials, creep has been described. Tests were carried out at a constant temperature. Tests include three load cases, including 80 Pa, 200 Pa and 500 Pa, with different combinations of loose-fill density

and a relative humidity of either 50 % or 80 %. Furthermore, creep tests were carried out using a constant temperature and a constant load level for RH ranging from 50 % to 80 %.

Two full-scale walls were used to verify the model.

## Calculations

A large number of calculations were performed by applying the presented model. Calculations show that stresses in loose-fill materials can be determined.

It was found to be possible to determine creep analytically with good agreement with test results.

## Conclusion

A model is presented which considers stress analysis for loose-fill materials to remain in a stress-stable state, and the creep of the material. From stress analysis it was found to be possible to set up equations to estimate stresses in granulated insulation materials as a function of the height of a wall. These considerations are combined with theories describing creep of a material, thus providing a better understanding of the material behaviour of loose-fill insulation materials in walls.

In addition a method is presented for theoretically estimating the necessary density of loose-fill insulation in walls in order to ensure volume stability. This theory can be used to calculate the density needed for a given granulated insulation material to stay in a volumestable state.

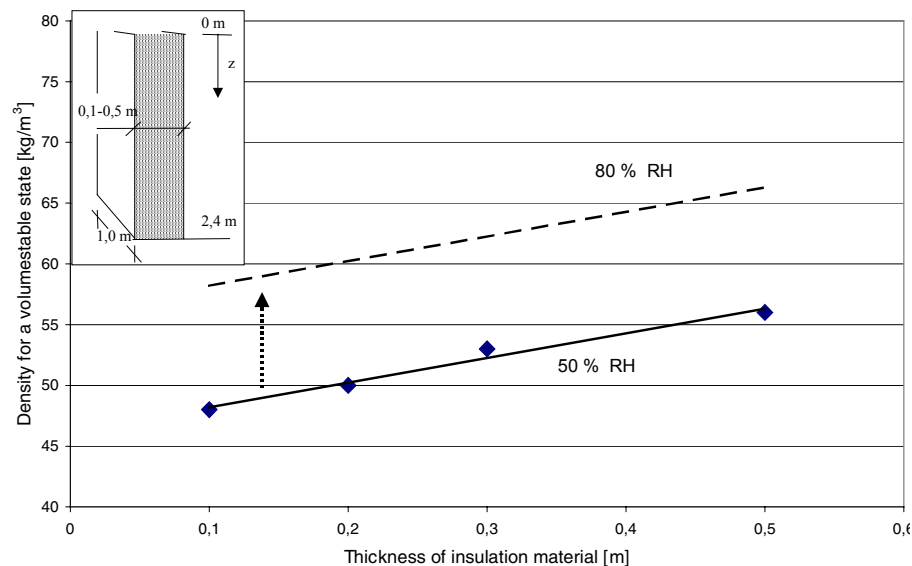


Figure 1. Calculated necessary density as a function of wall thickness to prevent settling of cellulose loose-fill material in a wall. Calculations are performed for a 0.1 m wide gypsum wall with a relative humidity equal to 50 % and 80 %. Data from *Ekofiber vind* are used. The calculated volume-stable state is related to RH 50 % and 23 °C. The curve for RH 80 % is partly based on extrapolated data.

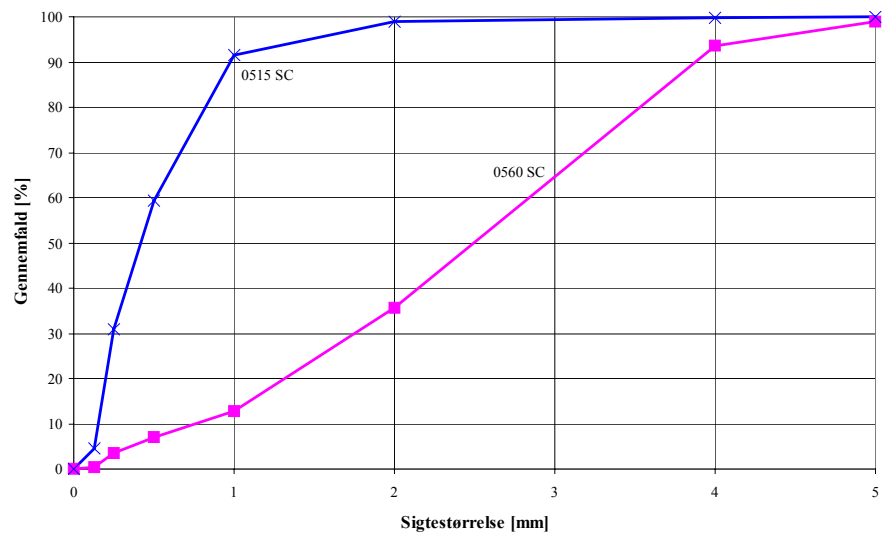


# Bilag

Kornkurve .....	44
Perlite 0515SC og 0560SC.....	44
Friktion.....	44
Ekofiber.....	44
Papiruld.....	45
Dansk hør .....	45
Rockwool .....	46
Thermocell .....	46
Perlite 0515SC.....	47
Perlite 0560SC.....	47
Horisontaltrykforhold.....	48
Tøjnings-tids-diagram.....	49
Ekofiber.....	49
Papiruld.....	51
Dansk hør .....	53
Rockwool .....	55
Thermocell .....	57
Krybningsparametre .....	59
Papiruld.....	59
Dansk hør .....	60
Rockwool .....	60
Thermocell .....	61
Statiske forhold.....	61
Ekofiber.....	61
Papiruld.....	63
Dansk hør .....	65
Rockwool .....	67
Thermocell .....	69
Perlite 0515SC.....	71
Perlite 0560SC.....	73

# Kornkurve

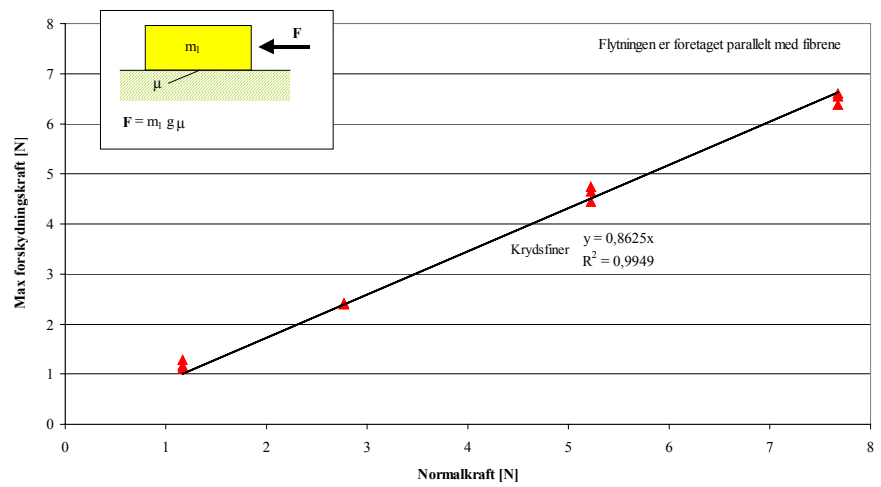
## Perlite 0515SC og 0560SC



Figur 20. Kornkurve for henholdsvis Perlite 0515SC og Perlite 0560SC.

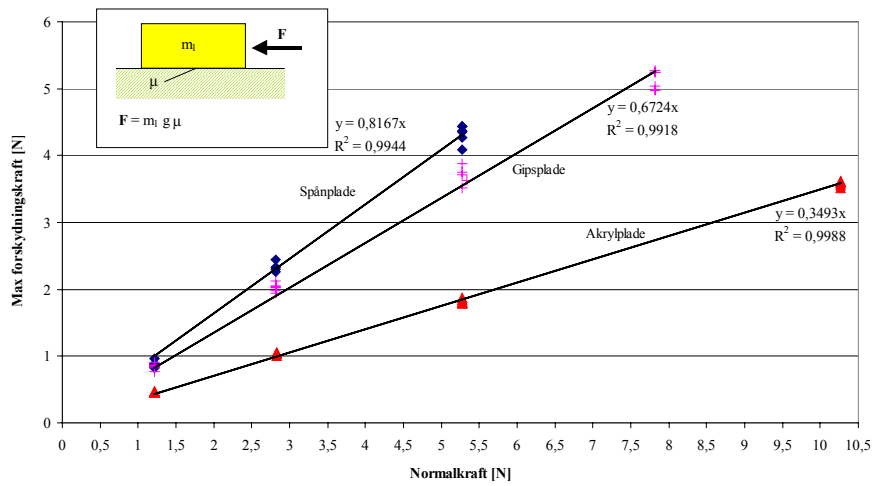
# Friktion

## Ekofiber



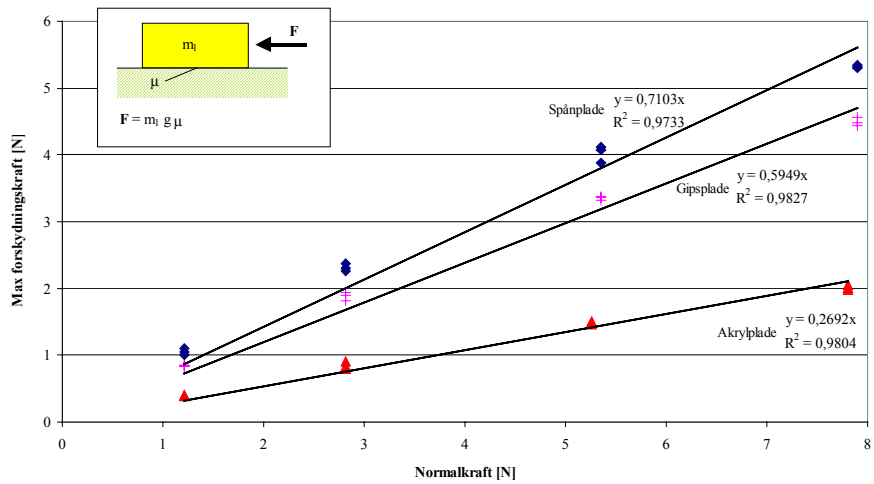
Figur 21. Maksimal forskydningskraft mellem Ekofiber og krydsfinerplade som funktion af normalkraften.

## Papiruld



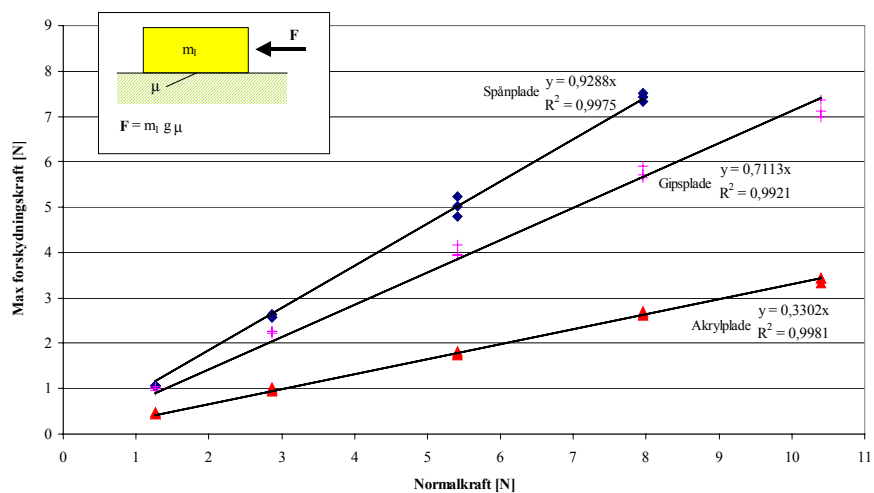
Figur 22. Maksimal forskydningskraft mellem papiruld og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.

## Dansk hør



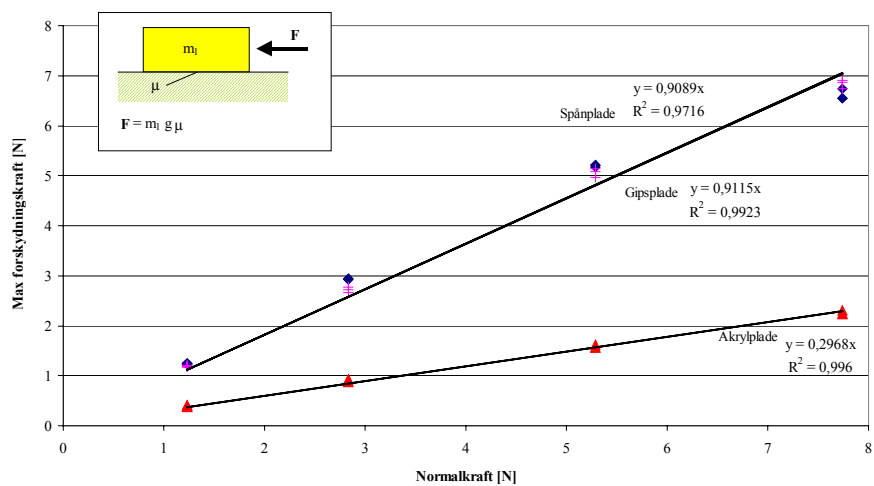
Figur 23. Maksimal forskydningskraft mellem dansk hør og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.

## Rockwool



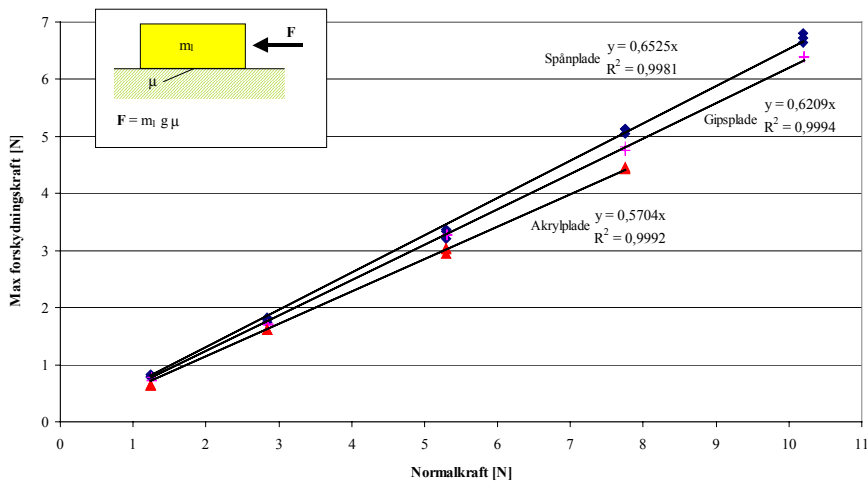
Figur 24. Maksimal forskydningskraft mellem Rockwool og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.

## Thermocell



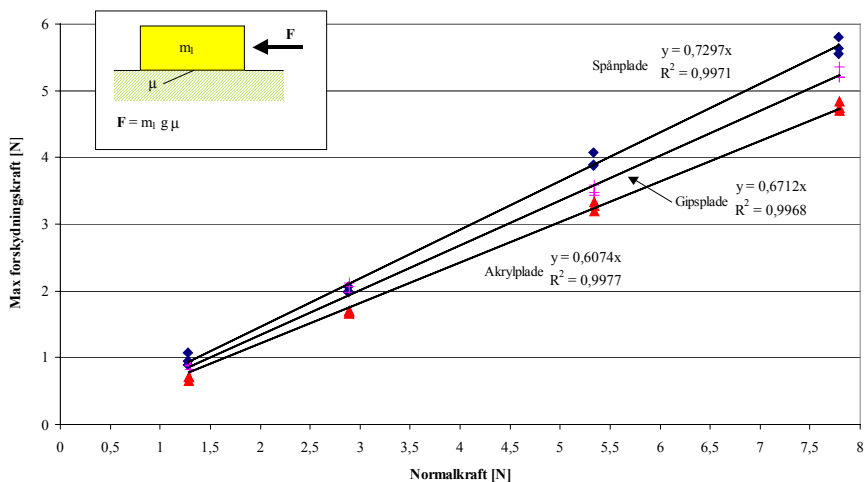
Figur 25. Maksimal forskydningskraft mellem Thermocell og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.

## Perlite 0515SC



Figur 26. Maksimal forskydningskraft mellem Perlite 0515SC og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.

## Perlite 0560SC



Figur 27. Maksimal forskydningskraft mellem Perlite 0560SC og henholdsvis spånplade, gipsplade og akrylplade som funktion af normalkraften.



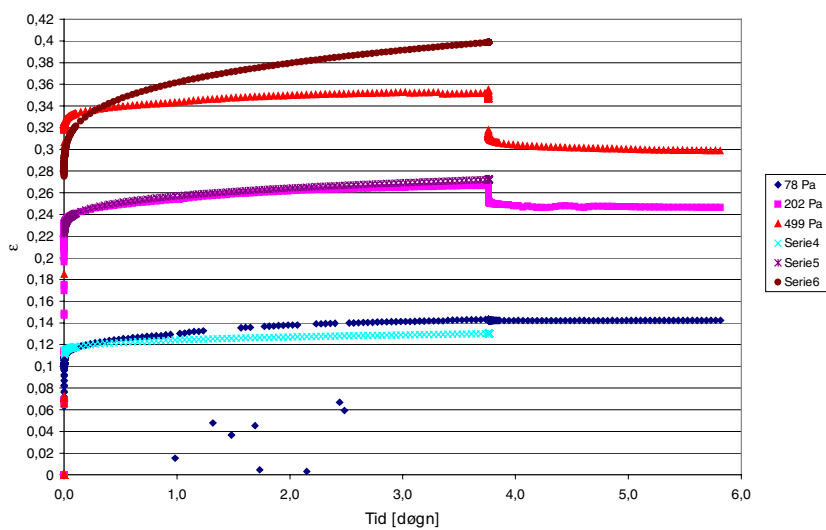
## Horisontaltrykforhold

Tabel 8. Målte tryk for cylinderens øverste og nederste tryktransducere samt for trykcellen monteret som cylinderens bund. Forsøgsresultater for Ekofiber, papiruld, dansk hør, Rockwool, Thermocell og Perlite er vist. Tabellen indeholder ligeledes horisontaltrykforhold og densitet. De enkelte materialer er testet af tre forsøg. Forsøgene er udført ved 50 % RF og 23 °C.

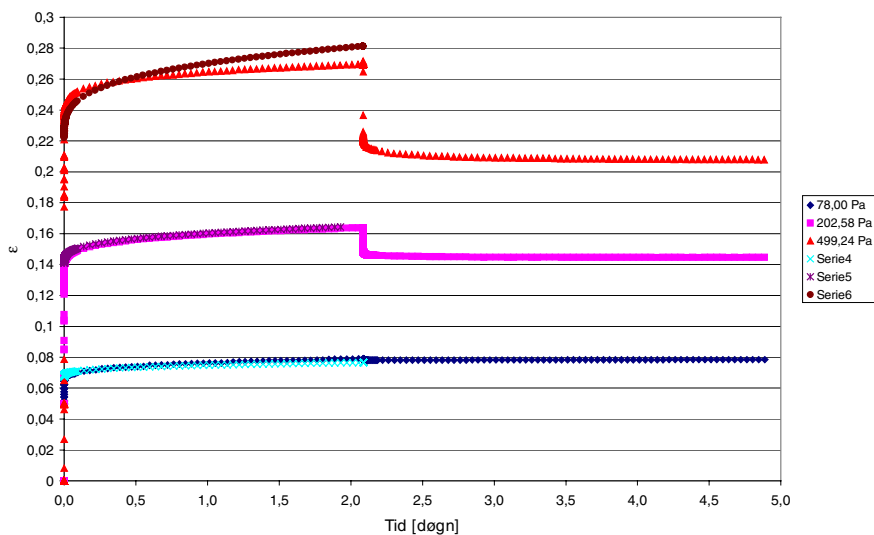
Isoleringsmateriale	Forsøg	Horisontaltry kforhold	Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Bundtryk [Pa]	Øvre sidetryk [Pa]	Nedre sidetryk [Pa]
Ekofiber	1	0,43	56,8	848,77	21,81	409,66
	2	0,41	54,3	802,66	20,63	373,63
	3	0,41	58,2	797,08	41,02	394,96
Papiruld	1	0,43	51,9	770,49	13,00	378,00
	2	0,37	54,3	767,57	149,86	500,00
	3	0,38	53,1	783,32	110,26	432,30
Dansk hør	1	0,28	47,4	794,21	-21,06	214,62
	2	0,48	52,4	783,46	-18,42	389,93
	3	0,35	48,5	792,97	-15,55	281,39
Rockwool	1	0,29	103,6	731,16	-13,63	218,10
	2	0,23	101,5	749,41	-26,76	160,26
	3	0,38	99,5	792,89	-15,06	303,70
Thermocell	1	0,26	36,2	799,06	-5,27	214,83
	2	0,37	38,8	822,59	4,40	329,72
	3	0,34	37,9	791,90	10,03	298,12
Perlite 0515SC	1	0,39	63,5	883,33	41,51	397,02
	2	0,40	63,5	681,74	-24,48	280,52
	3	0,53	64,9	699,69	-38,12	371,90
Perlite 0560SC	1	0,41	95,7	740,74	-3,61	329,18
	2	0,40	95,7	663,06	17,55	320,00
	3	0,32	97,5	699,33	-7,54	237,19

# Tøjnings-tids-diagram

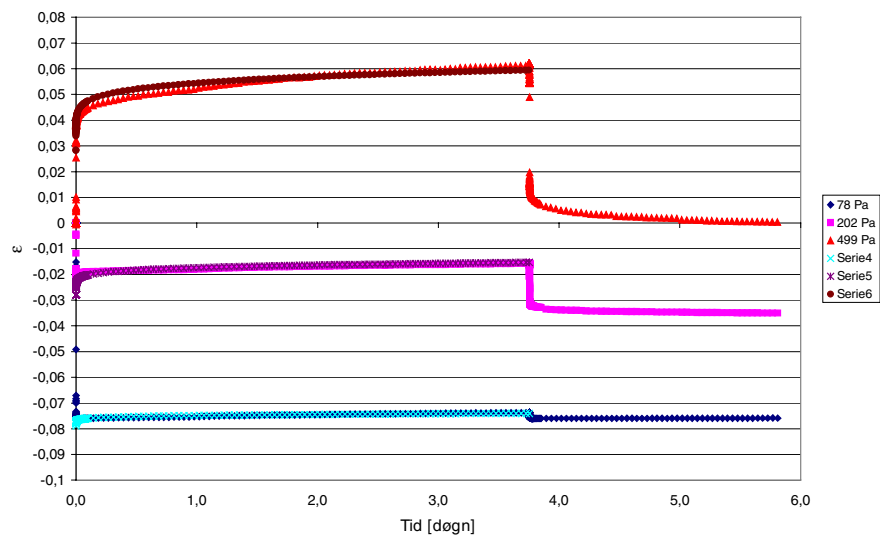
## Ekofiber



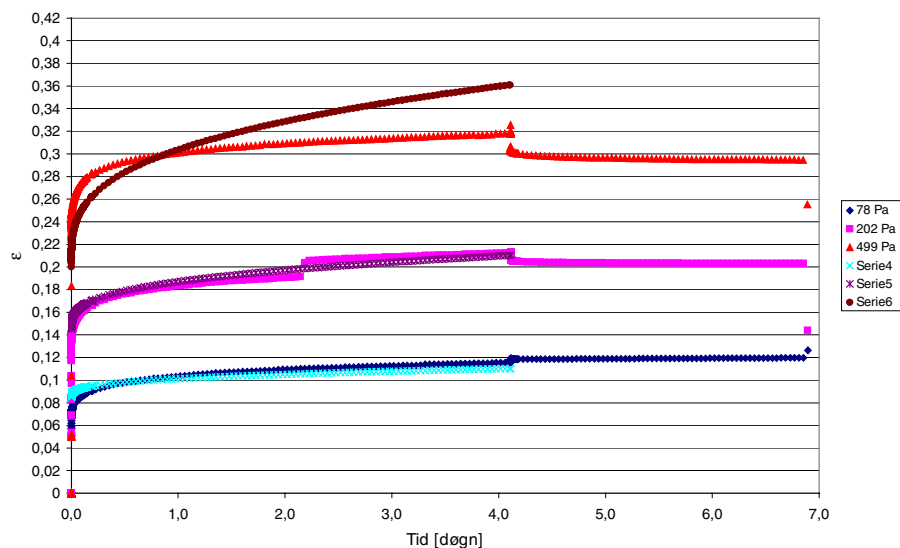
Figur 28. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $30 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



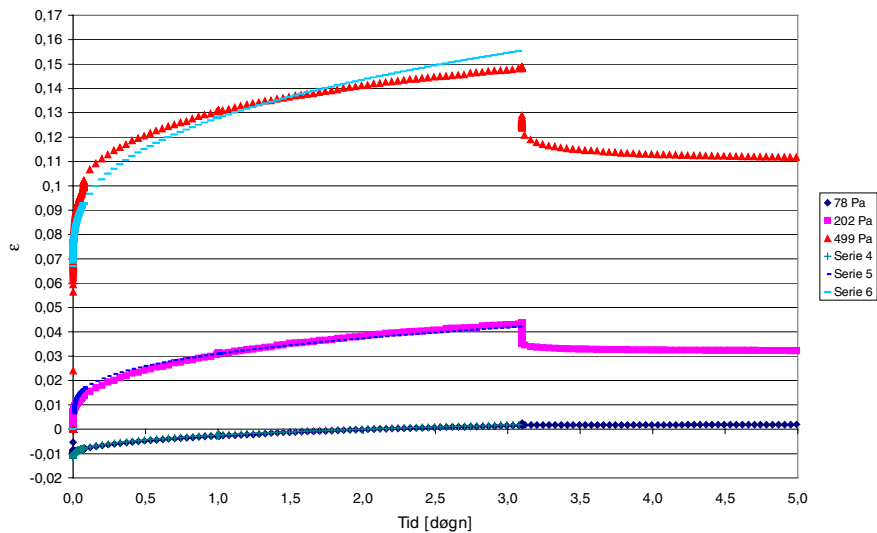
Figur 29. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $42 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 30. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på 60 kg/m<sup>3</sup>, påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og 23 °C.

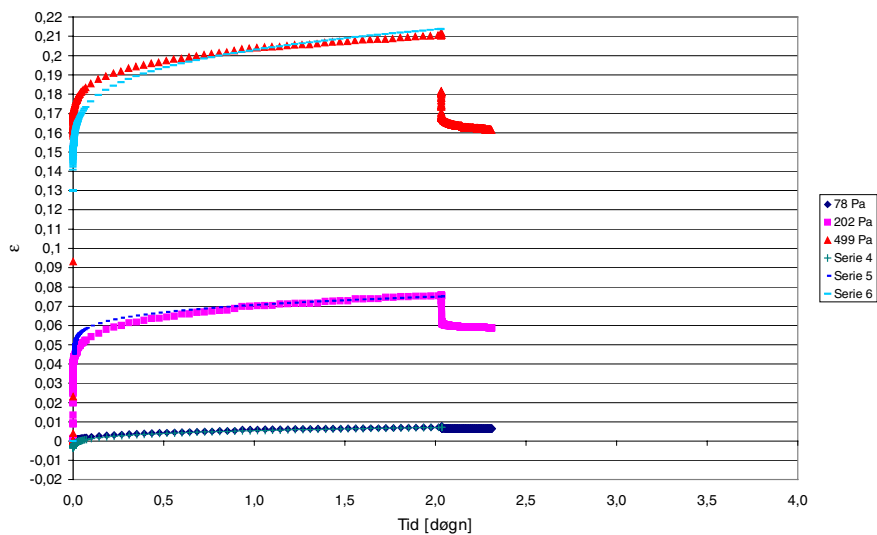


Figur 31. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på 42 kg/m<sup>3</sup>, påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og 23 °C.

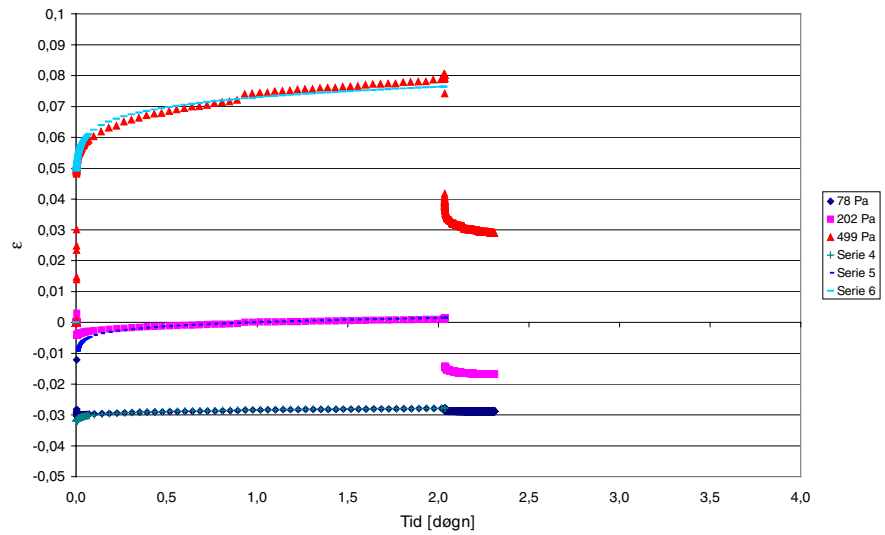


Figur 32. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

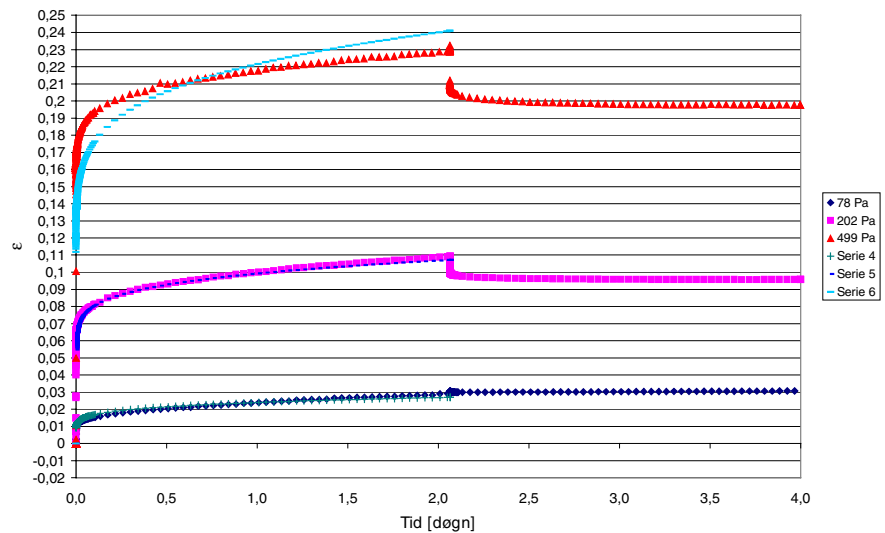
## Papiruld



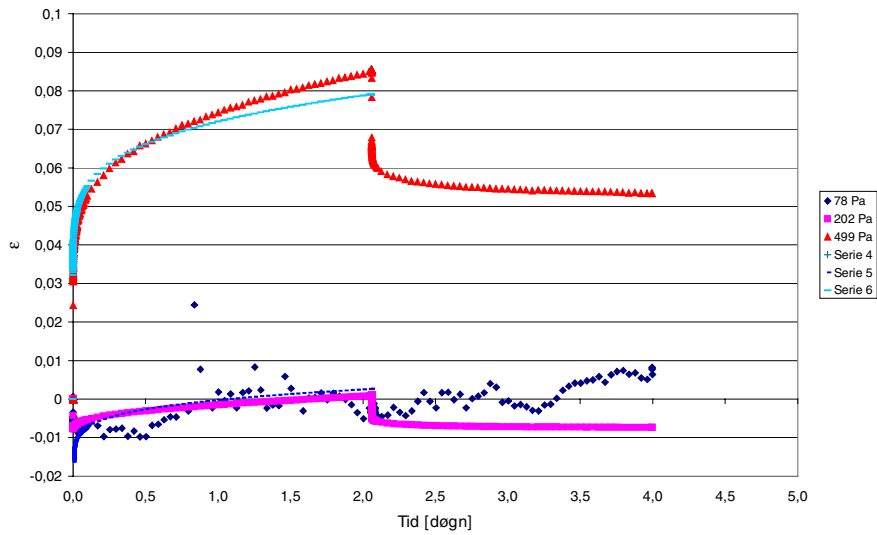
Figur 33. Tøjnings-tids-diagram for papiruld indlejret med en densitet på  $40 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 34. Tøjnings-tids-diagram for papiruld indlejret med en densitet på 50 kg/m<sup>3</sup>, påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og 23 °C.

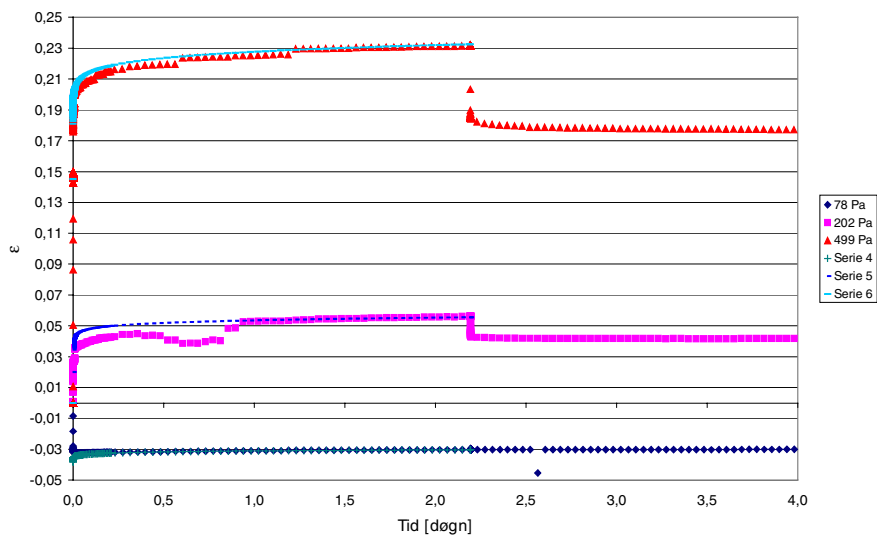


Figur 35. Tøjnings-tids-diagram for papiruld indlejret med en densitet på 40 kg/m<sup>3</sup>, påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og 23 °C.

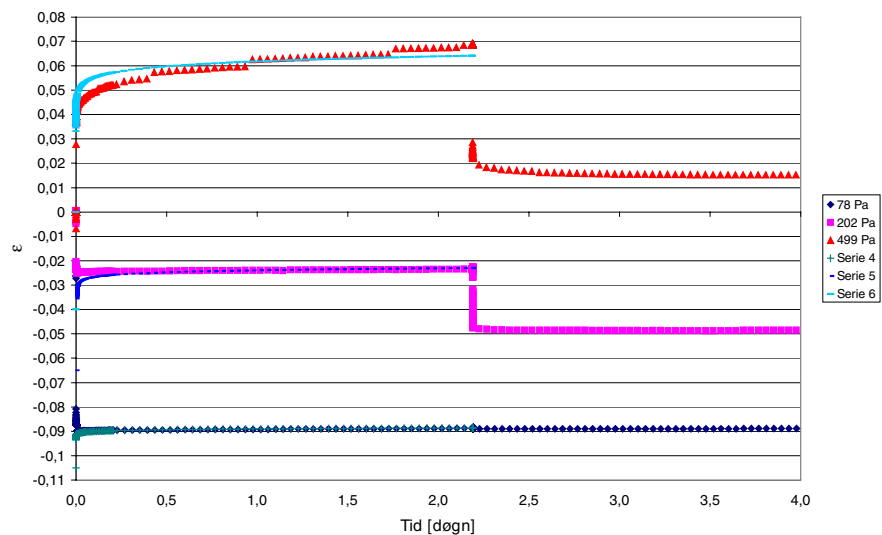


Figur 36. Tøjnings-tids-diagram for papiruld indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

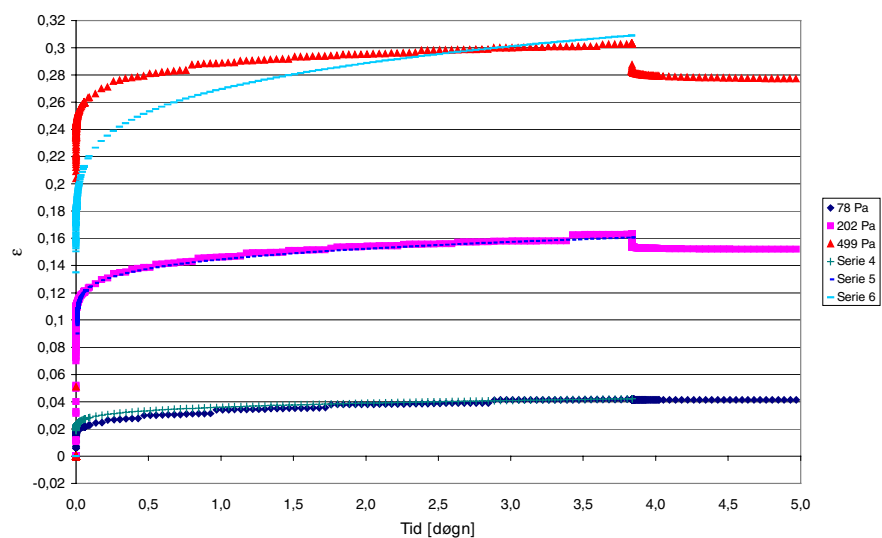
## Dansk hør



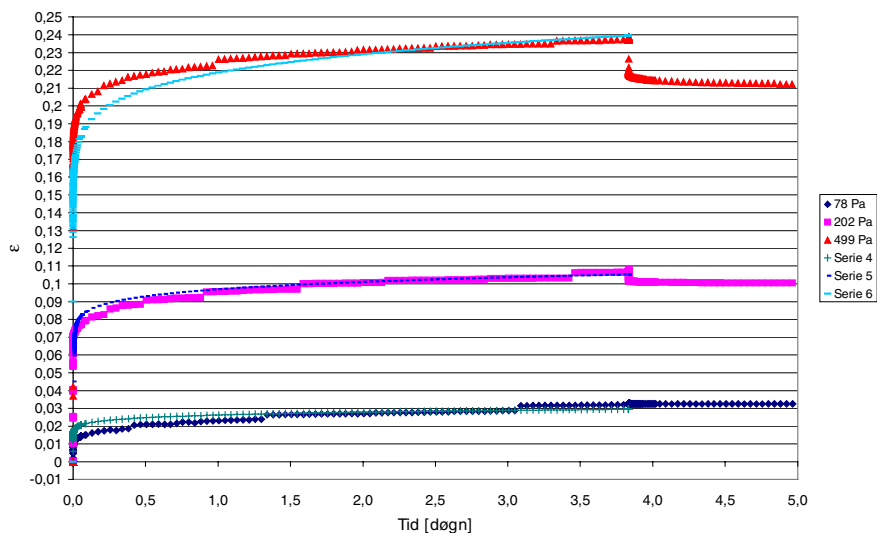
Figur 37. Tøjnings-tids-diagram for dansk hør indlejret med en densitet på  $40 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 38. Tøjnings-tids-diagram for dansk hør indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

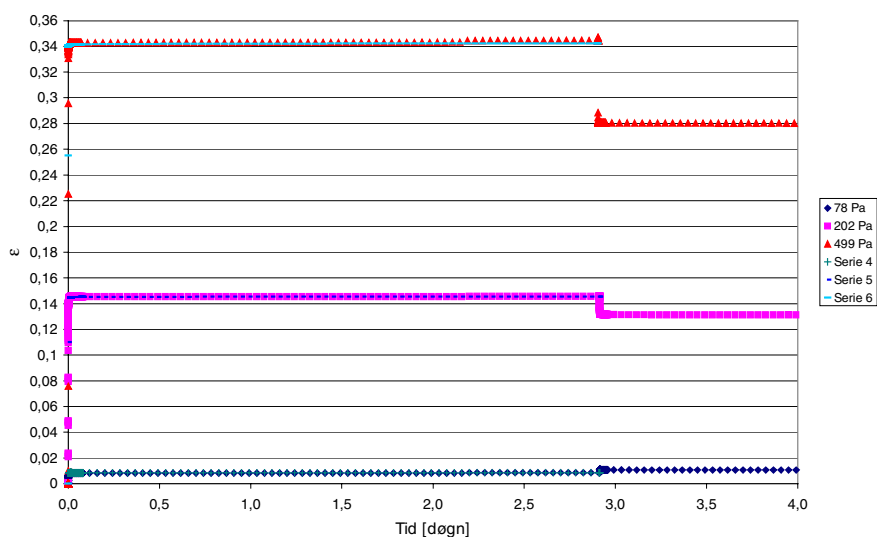


Figur 39. Tøjnings-tids-diagram for dansk hør indlejret med en densitet på  $40 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



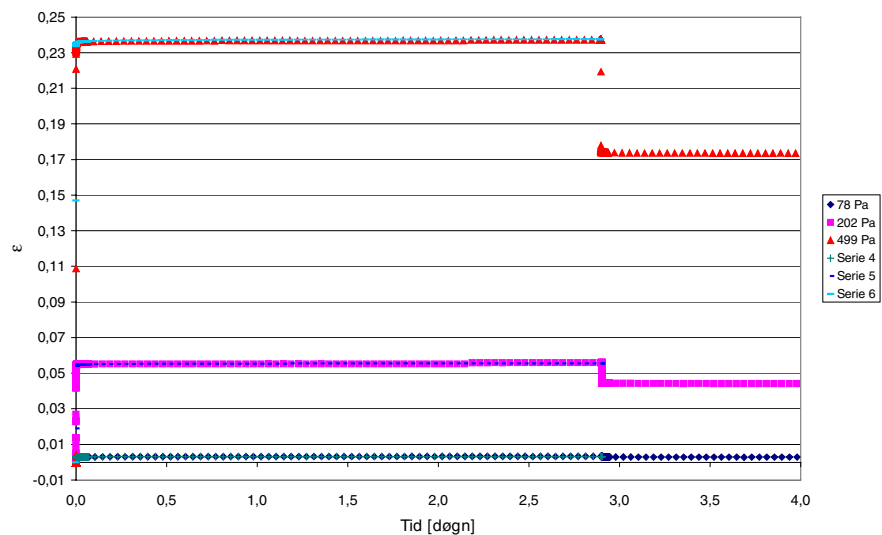
Figur 40. Tøjnings-tids-diagram for dansk hør indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Rockwool

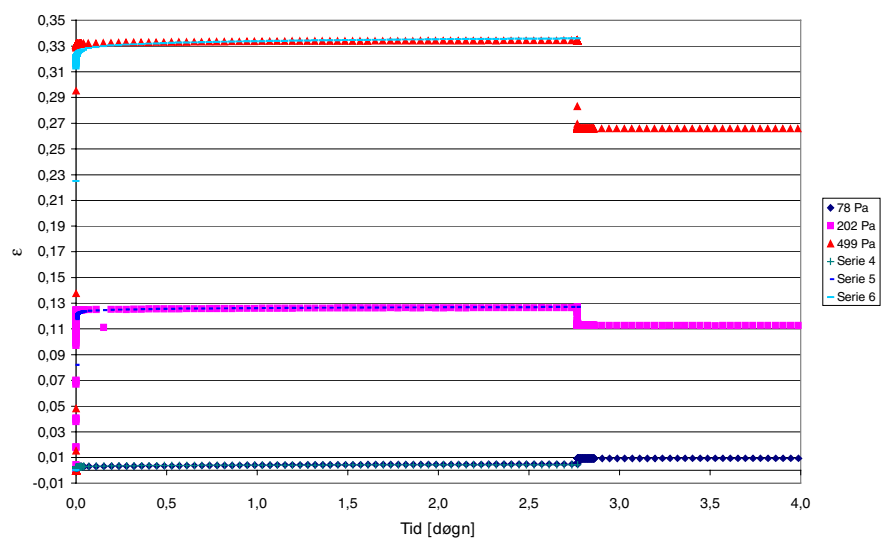


Figur 41. Tøjnings-tids-diagram for Rockwool indlejret med en densitet på  $60 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

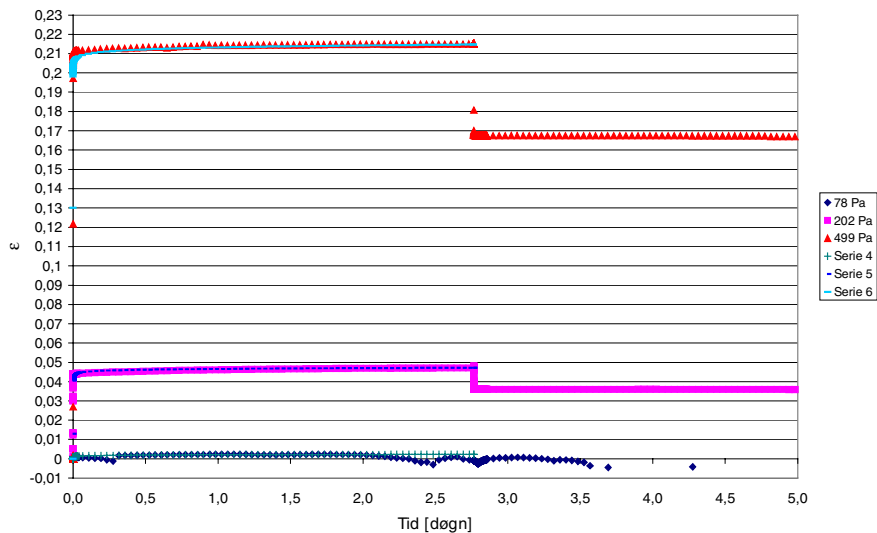




Figur 42. Tøjnings-tids-diagram for Rockwool indlejret med en densitet på 70 kg/m<sup>3</sup>, påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og 23 °C.

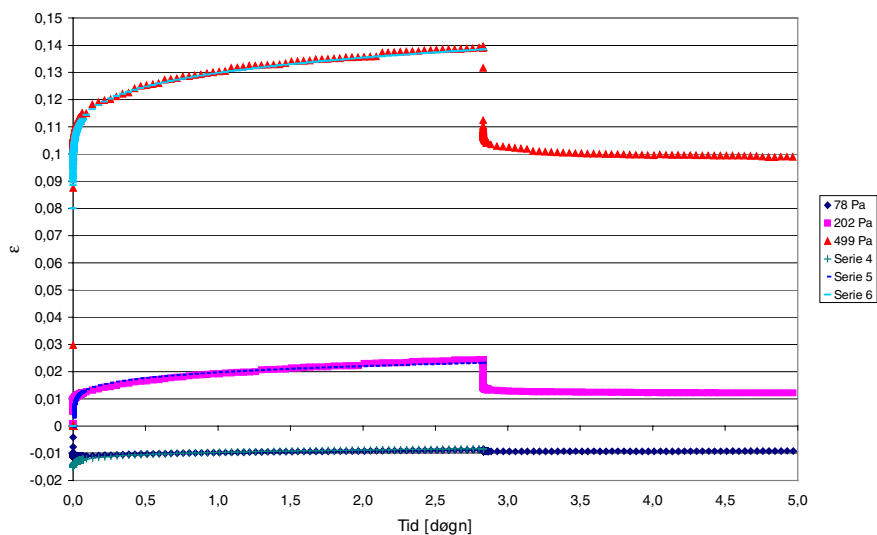


Figur 43. Tøjnings-tids-diagram for Rockwool indlejret med en densitet på 60 kg/m<sup>3</sup>, påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og 23 °C.

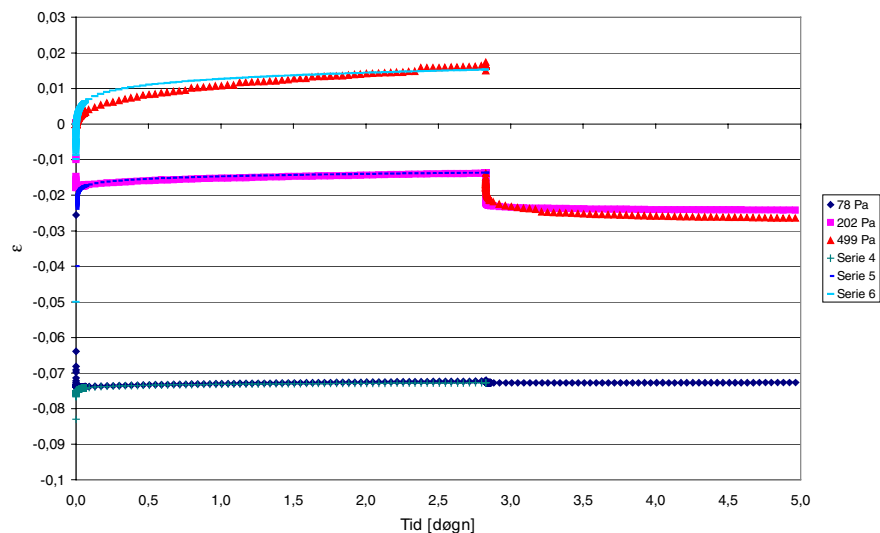


Figur 44. Tøjnings-tids-diagram for Rockwool indlejret med en densitet på  $70 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

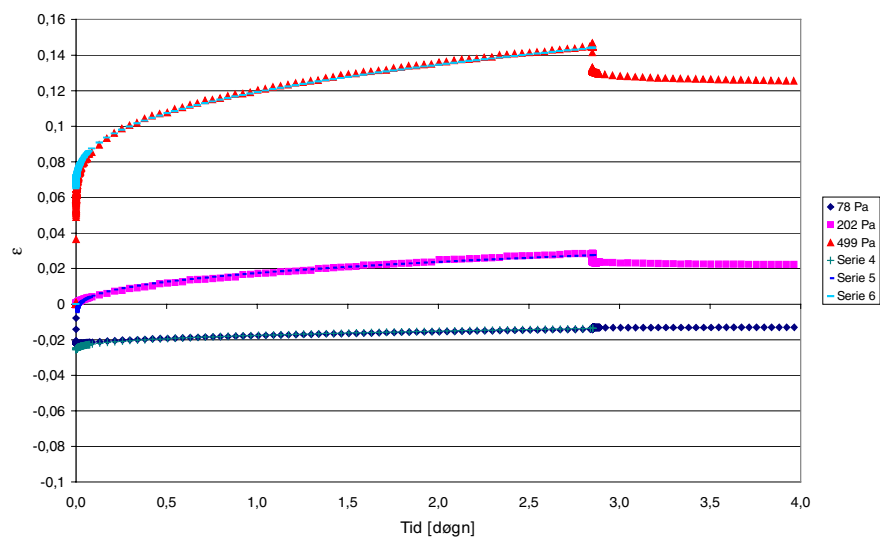
## Thermocell



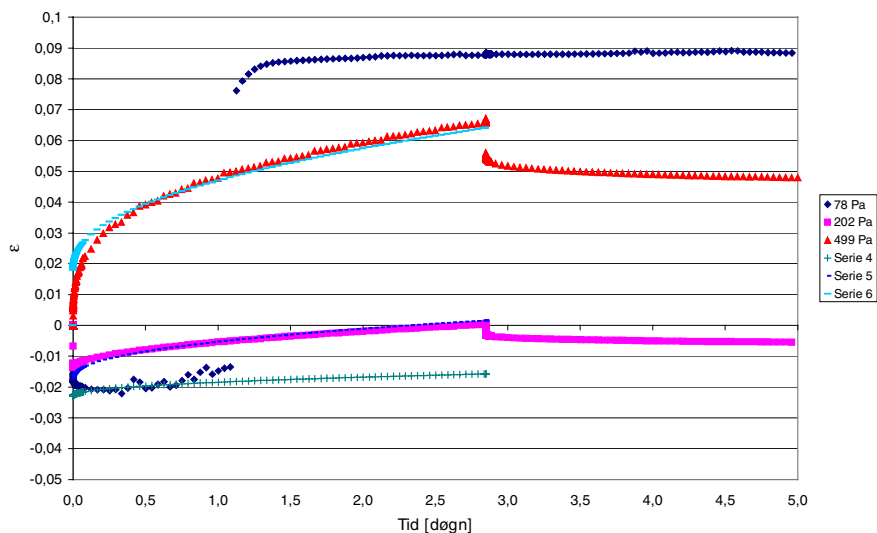
Figur 45. Tøjnings-tids-diagram for Thermocell indlejret med en densitet på  $40 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 46. Tøjnings-tids-diagram for Thermocell indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 50 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 47. Tøjnings-tids-diagram for Thermocell indlejret med en densitet på  $40 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 48. Tøjnings-tids-diagram for Thermocell indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , påsat en konstant last på henholdsvis 78, 202 og 499 Pa og den tilpassede Clouserfunktion angivet med henholdsvis serie 4, serie 5 og serie 6. Forsøget er udført ved 80 % RF og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Krybningsparametre

### Papiruld

Tabel 9. Krybningsparametre for papiruld er bestemt ud fra krybningsforsøg for en densitet på henholdsvis 40 og  $50 \text{ kg/m}^3$  samt en relativ luftfugtighed på henholdsvis 50 og 80 % og med en temperatur på  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Lastniveauerne lav, middel og høj er henholdsvis 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa.

Relative luftfugtighed		50 %		80 %	
Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]		40	50	40	50
$a_1$		0,1960	0,0553	0,2046	0,2069
$\tau$ [døgn]		0,0796	$7,95 \times 10^{-5}$	$7,98 \times 10^{-4}$	0,0657
Lastniveau ↓					
Momentan tøjning	lav	-0,0060	-0,0420	0,0050	Data udgår
	middel	0,0410	-0,0350	0,0500	-0,0180
	høj	0,1300	-0,0140	0,1000	0,0280
Momentan elastisk tøjning	lav	0,0069	0,0081	0,0044	Data udgår
	middel	0,0180	0,0208	0,0115	0,0101
	høj	0,0444	0,0516	0,0282	0,0251
Plastisk tøjning (konsolidering)	lav	-0,0129	-0,0501	0,0006	Data udgår
	middel	0,0230	-0,0558	0,0386	-0,0281
	høj	0,0850	-0,0656	0,0718	0,0030

## Dansk hør

Tabel 10. Krybningsparametre for dansk hør er bestemt ud fra krybningsforsøg for en densitet på henholdsvis 40 og 50 kg/m<sup>3</sup> samt en relativ luftfugtighed på henholdsvis 50 og 80 % og med en temperatur på 23 °C. Lastniveauerne lav, middel og høj er henholdsvis 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa.

Relative luftfugtighed	50 %		80 %	
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	40	50	40	50
a <sub>1</sub>	0,0733	0,0291	0,1911	0,1113
τ [døgn]	6,54 × 10 <sup>-4</sup>	4,79 × 10 <sup>-9</sup>	2,52 × 10 <sup>-4</sup>	4,09 × 10 <sup>-7</sup>
Lastniveau ↓				
Momentan tøjning	lav	-0,0440	-0,1050	0,0150
	middel	0,0200	-0,0650	0,0900
	høj	0,1450	-0,0400	0,1350
Momentan elastisk tøj- ning	lav	0,0075	0,0092	0,0043
	middel	0,0196	0,0235	0,0112
	høj	0,0483	0,0583	0,0276
Plastisk tøj- ning (kon- solidering)	lav	-0,0515	-0,1142	0,0107
	middel	0,0004	-0,0885	0,0788
	høj	0,0968	-0,0983	0,1074

## Rockwool

Tabel 11. Krybningsparametre for Rockwool er bestemt ud fra krybningsforsøg for en densitet på henholdsvis 60 og 70 kg/m<sup>3</sup> samt en relativ luftfugtighed på henholdsvis 50 og 80 % og med en temperatur på 23 °C. Lastniveauerne lav, middel og høj er henholdsvis 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa.

Relative luftfugtighed	50 %		80 %	
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	60	70	60	70
a <sub>1</sub>	0,0026	0,0036	0,0192	0,0177
τ [døgn]	1,43 × 10 <sup>-70</sup>	2,78 × 10 <sup>-64</sup>	1,35 × 10 <sup>-14</sup>	1,12 × 10 <sup>-16</sup>
Lastniveau ↓				
Momentan tøjning	lav	-0,0050	-0,0110	-0,0130
	middel	0,1100	0,0190	0,0820
	høj	0,2550	0,1470	0,2250
Momentan elastisk tøj- ning	lav	0,0090	0,0084	0,0092
	middel	0,0232	0,0215	0,0239
	høj	0,0573	0,0532	0,0589
Plastisk tøj- ning (kon- solidering)	lav	-0,0140	-0,0194	-0,0222
	middel	0,0868	-0,0025	0,0581
	høj	0,1977	0,0938	0,1661

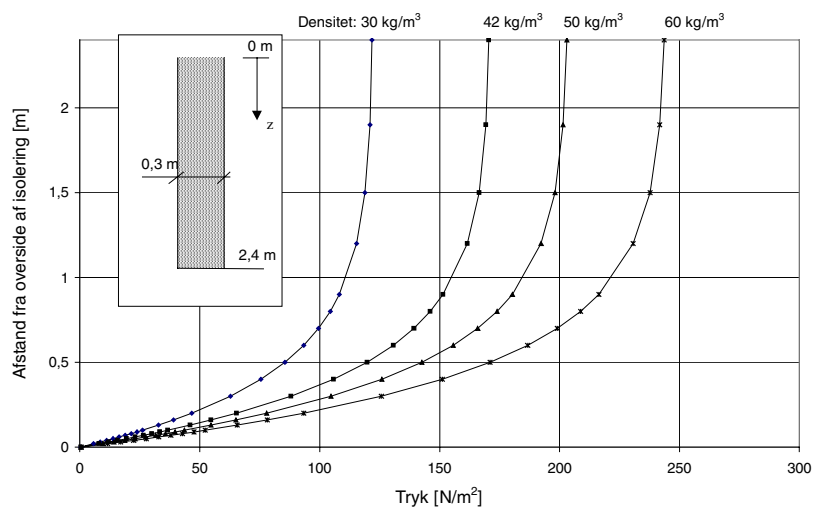
## Thermocell

Tabel 12. Krybningsparametre for Thermocell er bestemt ud fra krybningsforsøg for en densitet på henholdsvis 40 og 50 kg/m<sup>3</sup> samt en relativ luftfugtighed på henholdsvis 50 og 80 % og med en temperatur på 23 °C. Lastniveauerne lav, middel og høj er henholdsvis 78 Pa, 202 Pa og 499 Pa.

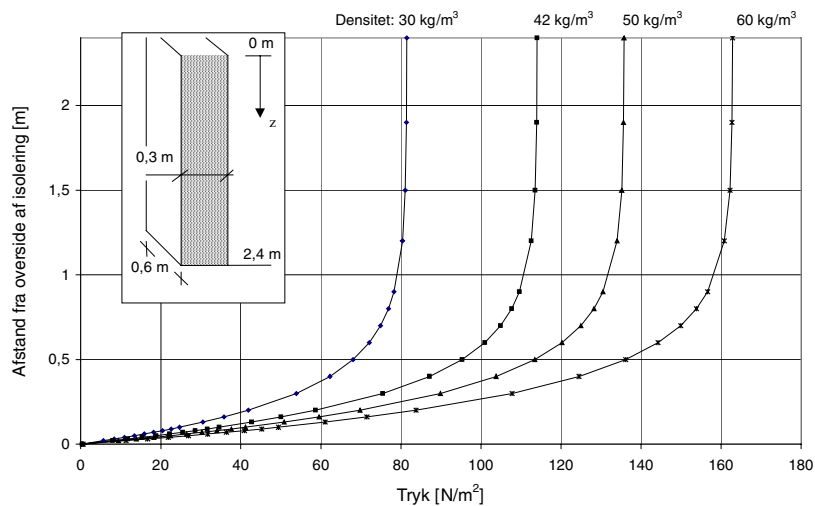
Relative luftfugtighed	50 %		80 %		
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	40	50	40	50	
a <sub>1</sub>	0,1547	0,0392	0,3605	0,4427	
τ [døgn]	0,0484	3,41 × 10 <sup>-7</sup>	0,0474	0,2506	
Lastniveau ↓					
Momentan tøjning	lav	-0,0175	-0,0830	-0,0260	Data udgår
	middel	-0,0005	-0,0400	-0,0045	-0,0170
	høj	0,0800	-0,0500	0,0650	0,0180
Momentan elastisk tøj- ning	lav	0,0049	0,0055	0,0028	Data udgår
	middel	0,0126	0,0141	0,0073	0,0063
	høj	0,0312	0,0350	0,0180	0,0157
Plastisk tøj- ning (kon- solidering)	lav	-0,0224	-0,0885	-0,0288	Data udgår
	middel	-0,0131	-0,0541	-0,0118	-0,0233
	høj	0,0489	-0,0850	0,0470	0,0023

## Statiske forhold

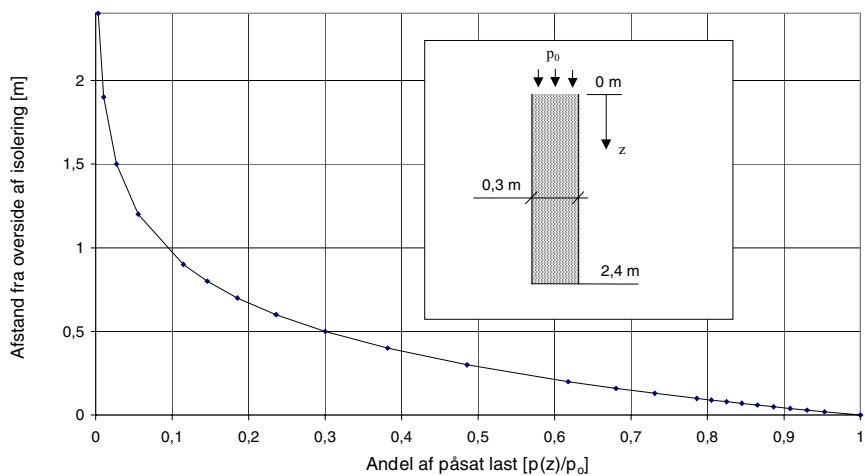
### Ekofiber



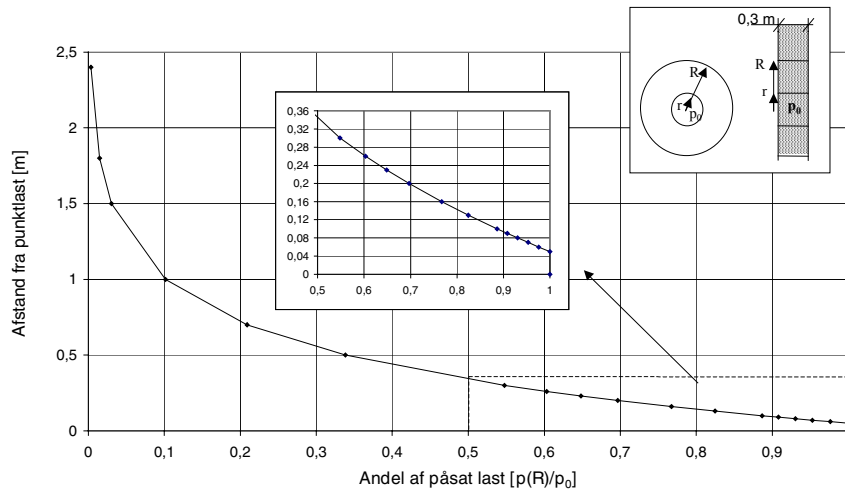
Figur 49. Spændingsfordeling i Ekofiber isoleret væg af krydsfinerplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde × bredde × højde lig med ∞ × 0,3 m × 2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,42.



Figur 50. Spændingsfordeling i Ekofiber isoleret væg af krydsfinerplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en bredde på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,42.

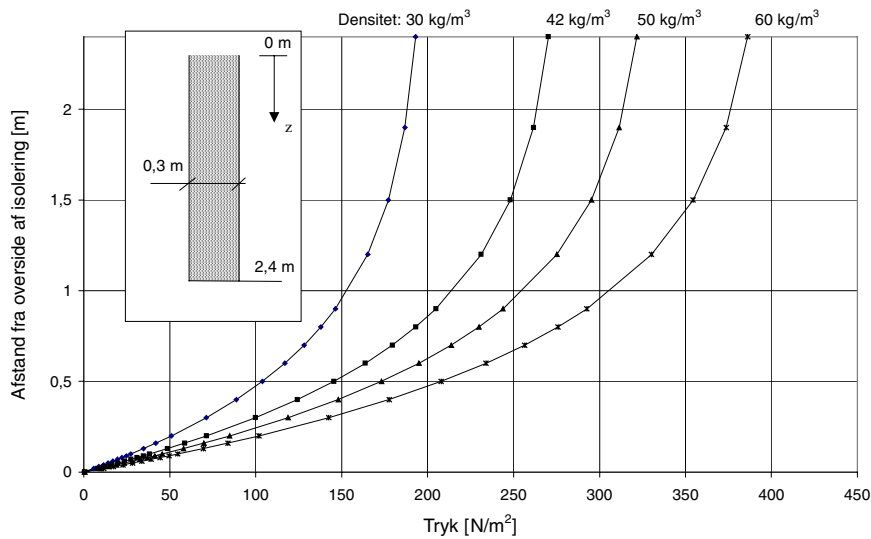


Figur 51. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i Ekofiber isoleret krydsfinervæg for et horisontaltrykforhold på 0,42. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m.



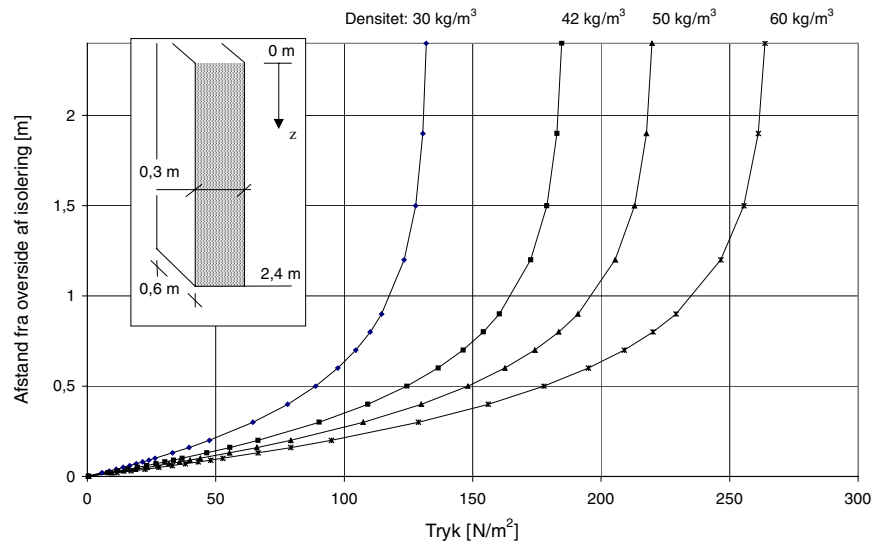
Figur 52. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningsted for en Ekofiber løsfyldsisoleret krydsfinervæg for et horisontaltrykforhold på 0,42. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

## Papiruld

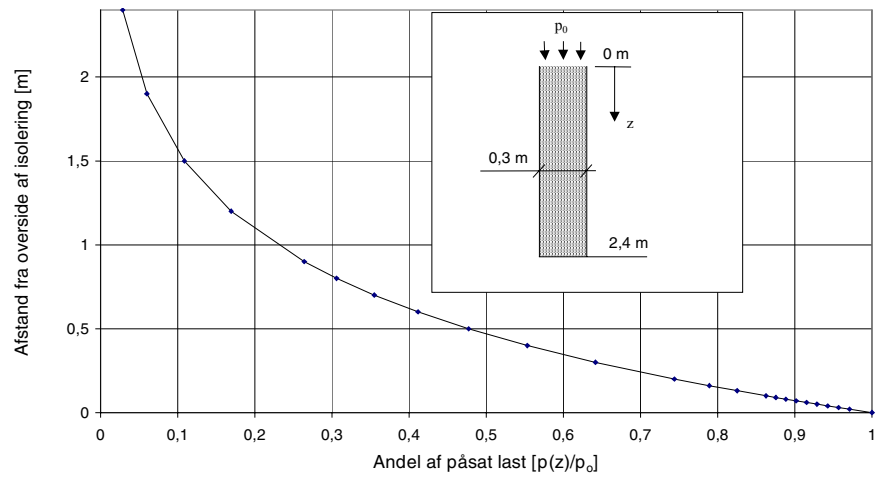


Figur 53. Spændingsfordeling i papiruld isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ . Horisontaltrykforholdet er lig 0,39.

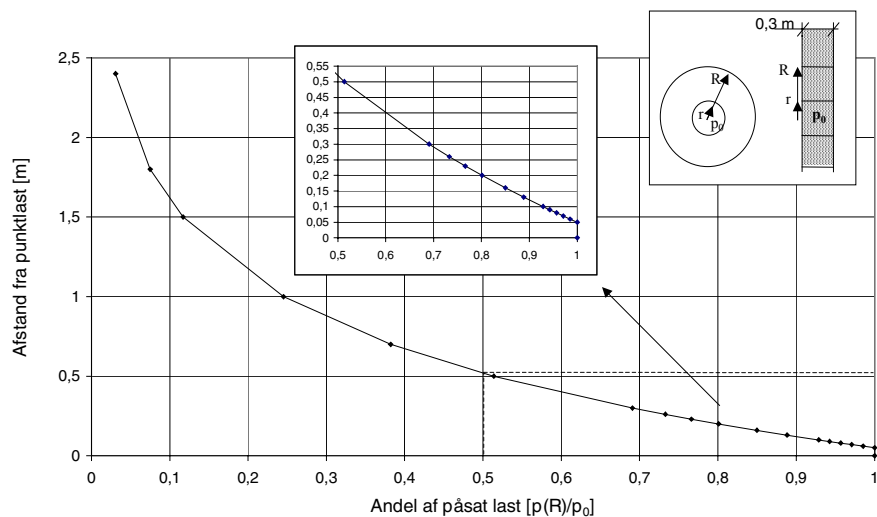




Figur 54. Spændingsfordeling i papiruld isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en bredde på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,39.

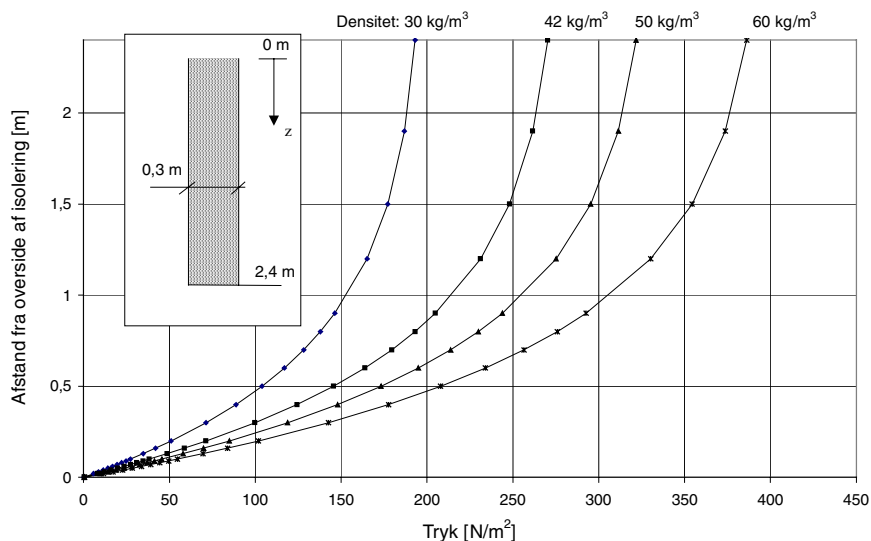


Figur 55. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i papiruld isoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,39. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m.

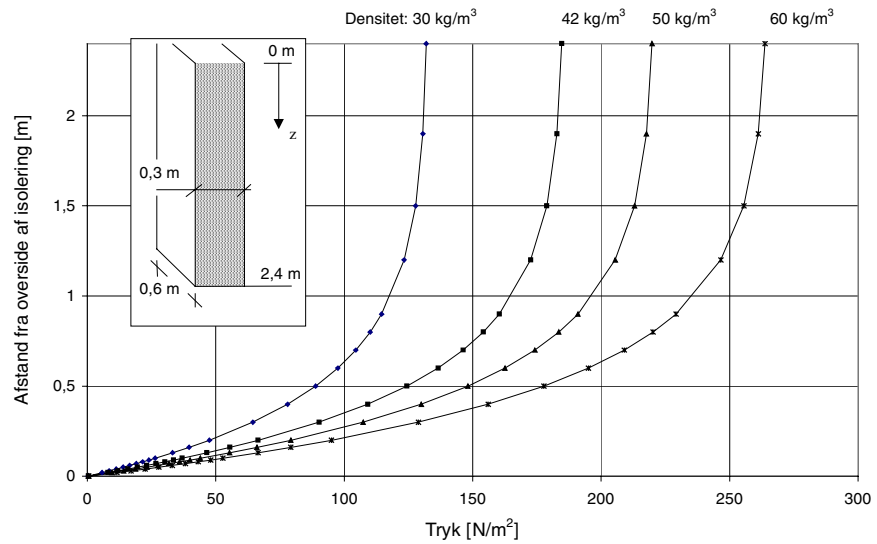


Figur 56. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningsssted for en papiruld løsfyldisoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,39. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

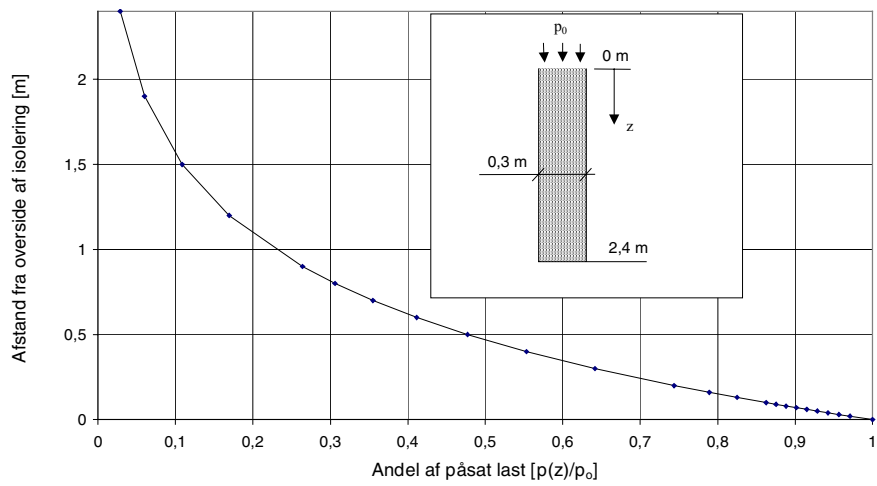
## Dansk hør



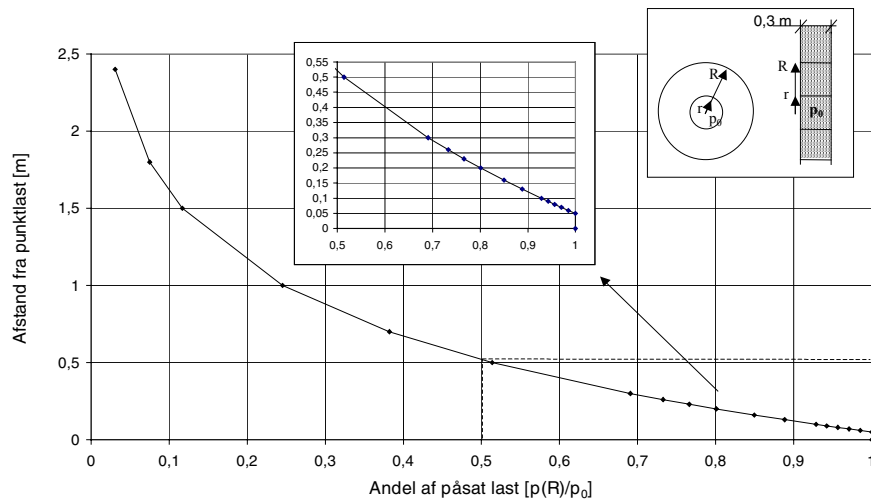
Figur 57. Spændingsfordeling i dansk hør isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ . Horisontaltrykforholdet er lig 0,37.



Figur 58. Spændingsfordeling i dansk hør isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en brede på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,37.

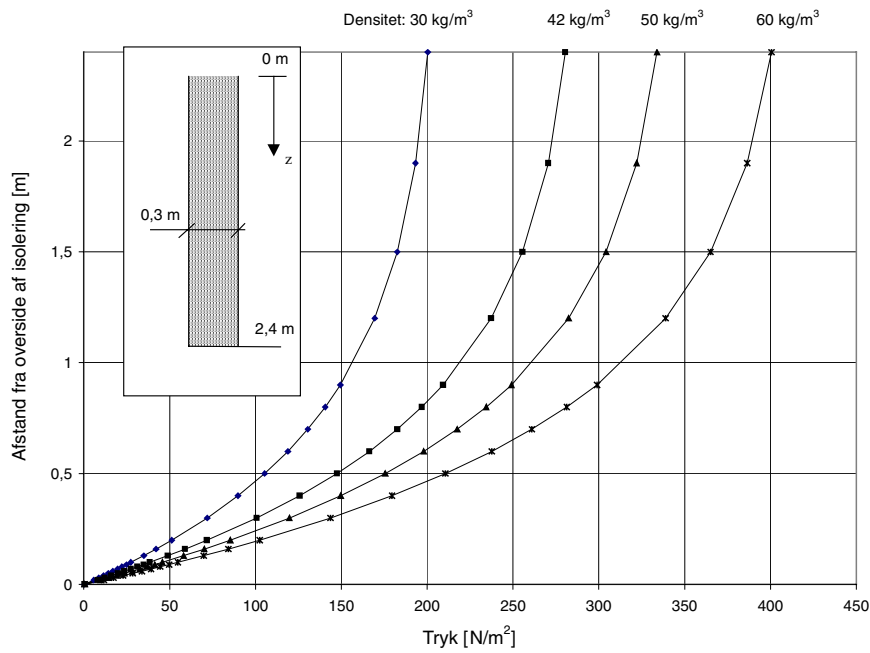


Figur 59. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i dansk hør isoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,37. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m.

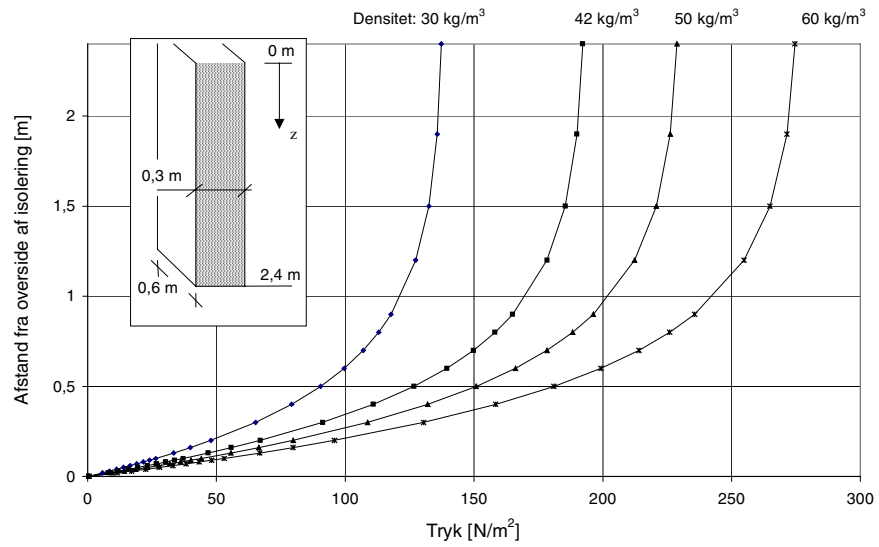


Figur 60. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningsssted for en dansk hør løsfylds isoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,37. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \times 2,4$  m.

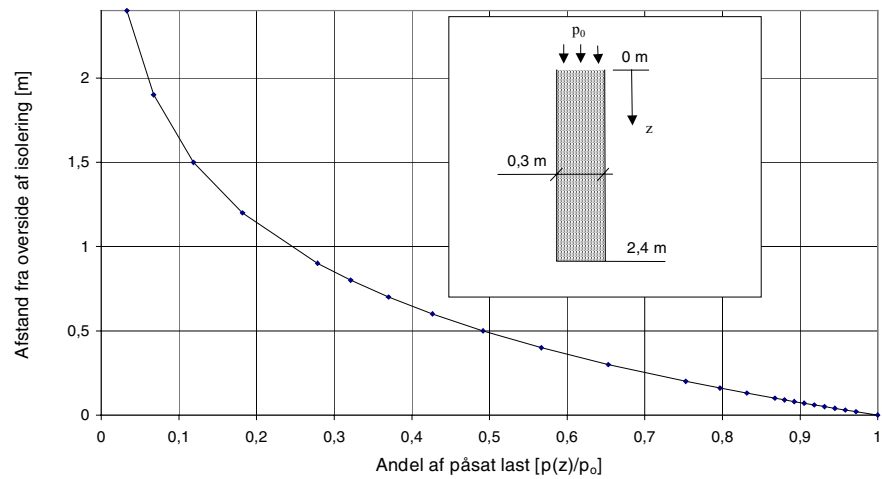
## Rockwool



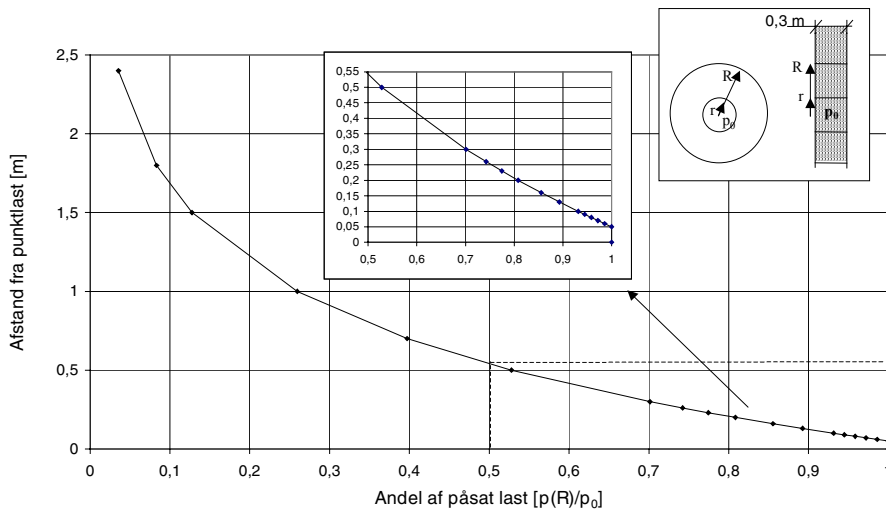
Figur 61. Spændingsfordeling i Rockwool isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \times 2,4$  m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,30.



Figur 62. Spændingsfordeling i Rockwool isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en bredde på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,30.

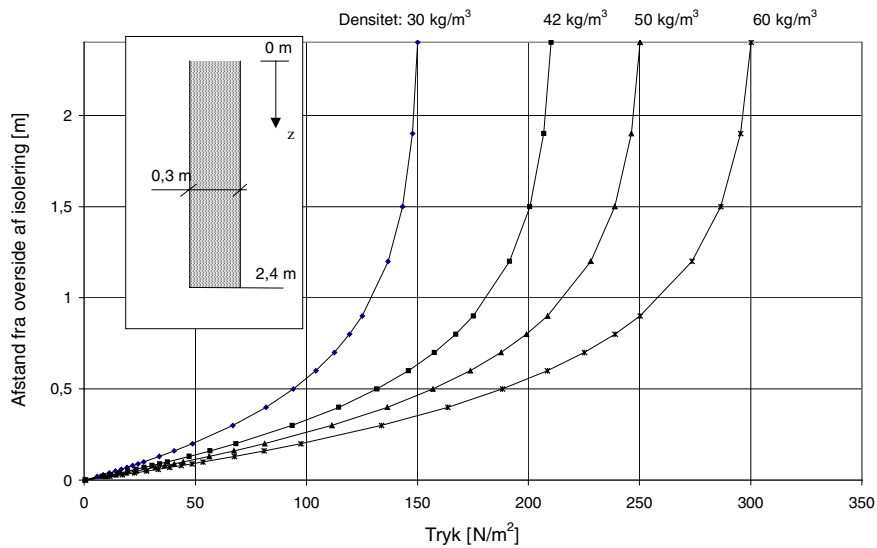


Figur 63. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i Rockwool isoleret med gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,30. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m.

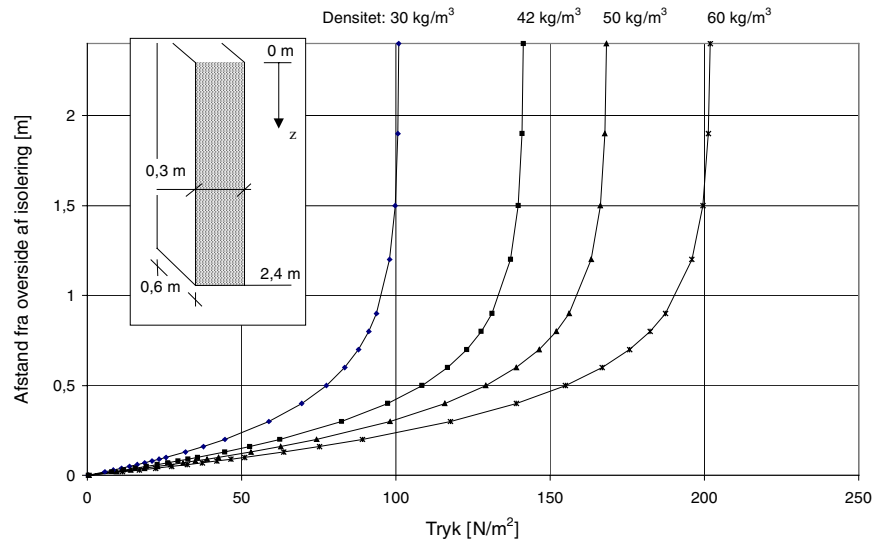


Figur 64. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningsted for en Rockwool løsfyldisoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,30. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

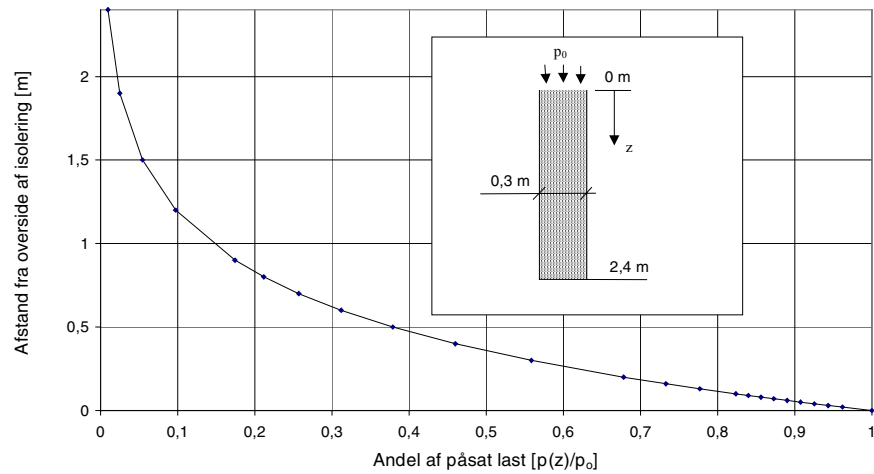
### Thermocell



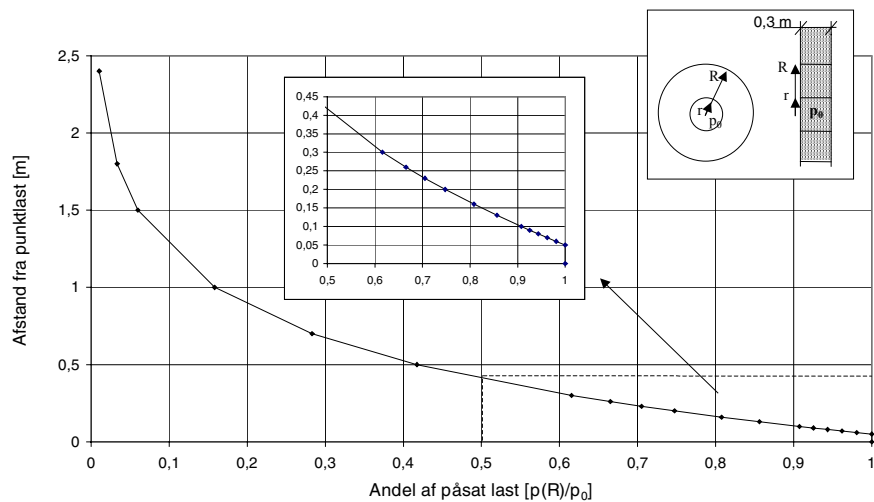
Figur 65. Spændingsfordeling i Thermocell isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ . Horisontaltrykforholdet er lig 0,32.



Figur 66. Spændingsfordeling i Thermocell isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en brede på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,32.

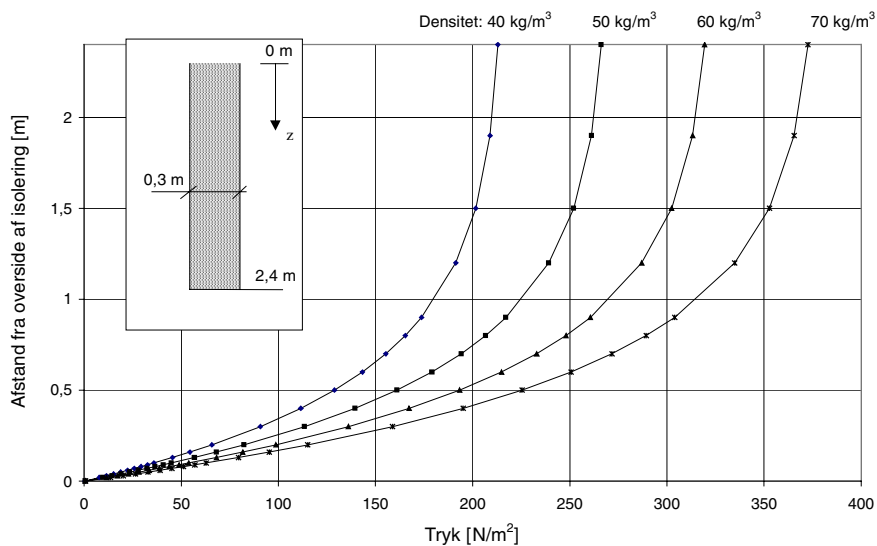


Figur 67. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i Thermocell isoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,32. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m.



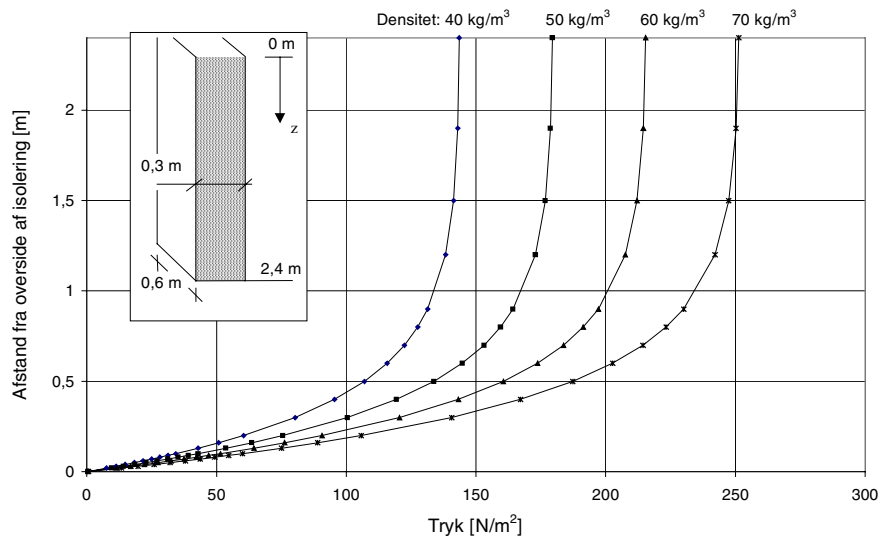
Figur 68. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningsted for en Thermocell løsfyldisoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,32. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

### Perlite 0515SC

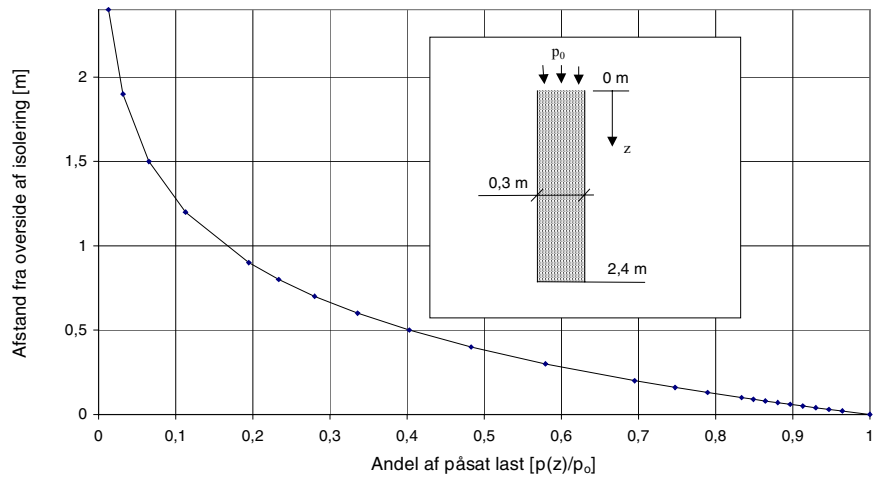


Figur 69. Spændingsfordeling i Perlite 0515SC isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ . Horisontaltrykforholdet er lig 0,44.

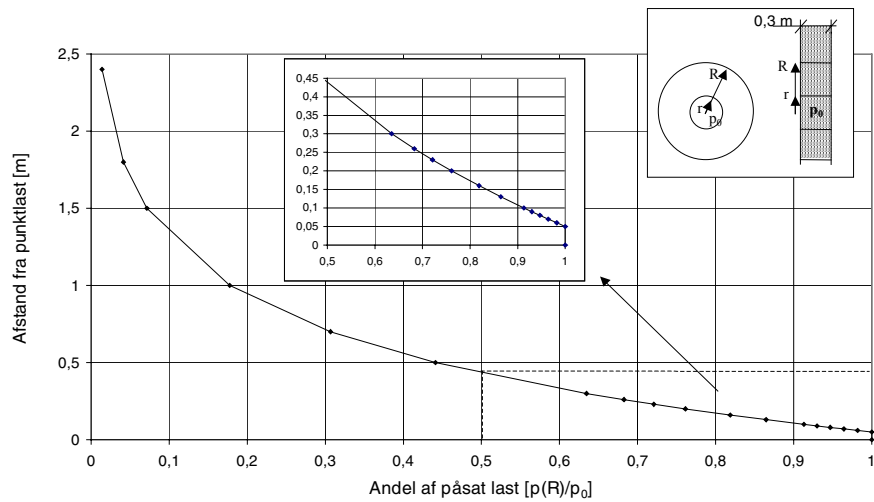




Figur 70. Spændingsfordeling i Perlite 0515SC isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en bredde på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med 0,6 m  $\times$  0,3 m  $\times$  2,4 m. Horizontaltrykforholdet er lig 0,44.

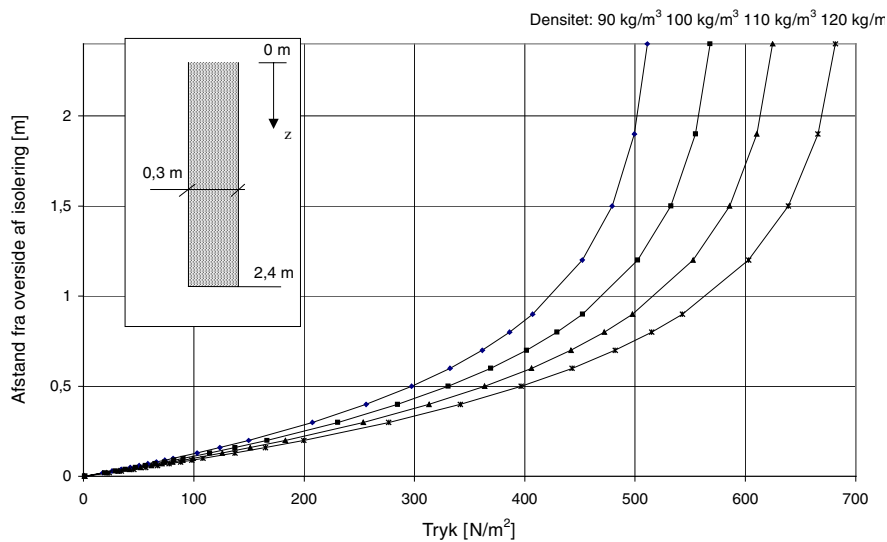


Figur 71. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i Perlite 0515SC isoleret gipsvæg for et horizontaltrykforhold på 0,44. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times$  0,3 m  $\times$  2,4 m.

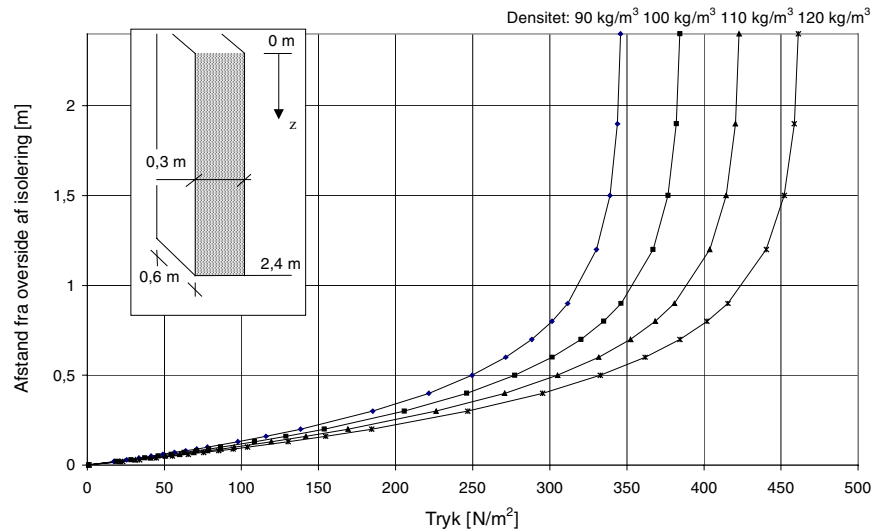


Figur 72. Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningssted for en Perlite 0515SC løsfyldsisereret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,44. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

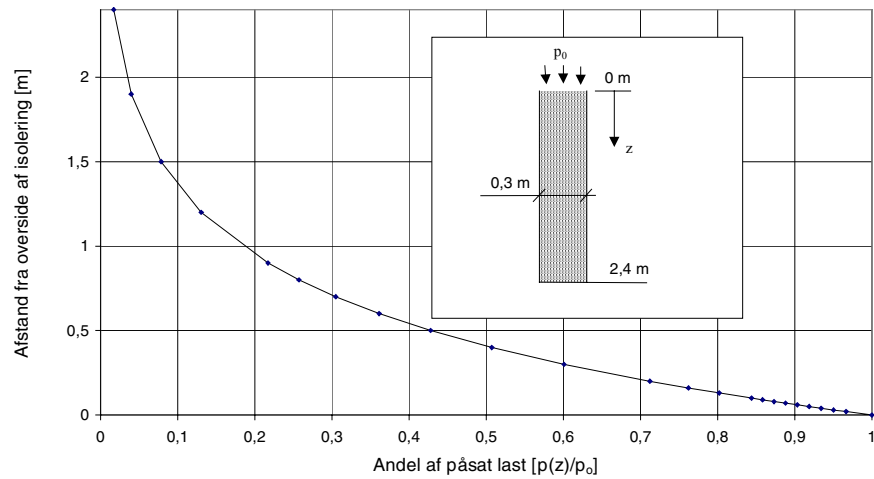
### Perlite 0560SC



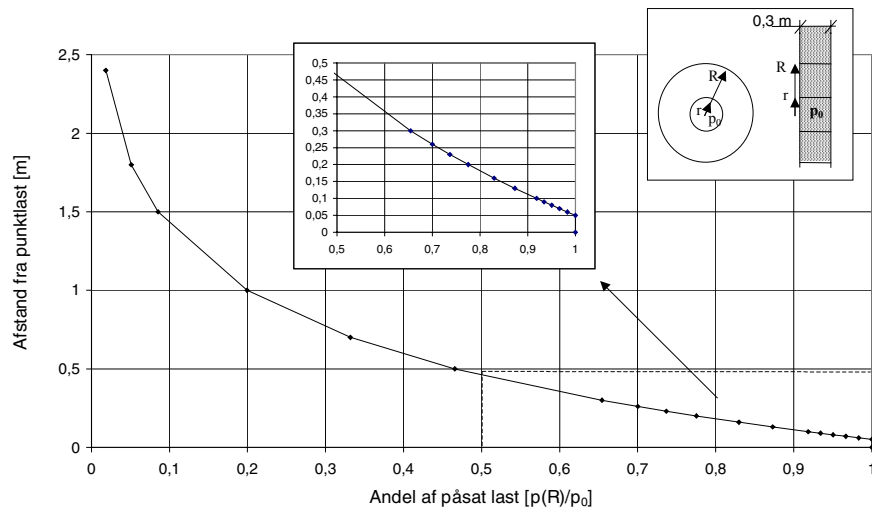
Figur 73. Spændingsfordeling i Perlite 0560SC isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ . Horisontaltrykforholdet er lig 0,38.



Figur 74. Spændingsfordeling i Perlite 0560SC isoleret væg af gipsplade for en række forskellige densiteter af isoleringen. Væggen har en bredde på 0,6 m og en tykkelse på 0,3 m. Væggen har dimensionerne: længde × bredde × højde lig med 0,6 m × 0,3 m × 2,4 m. Horisontaltrykforholdet er lig 0,38.



Figur 75. Sammenhæng mellem spænding normeret med påsat spænding og højden i Perlite 0560SC isoleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,38. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde × bredde × højde lig med ∞ × 0,3 m × 2,4 m.



Figur 76 Sammenhæng mellem spænding normeret med indblæsningstryk og afstanden til et indblæsningsted for en Perlite 0560SC løsfyldsuleret gipsvæg for et horisontaltrykforhold på 0,38. Den beregnede væg antages at have dimensionerne: længde  $\times$  bredde  $\times$  højde lig med  $\infty \times 0,3 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$ .

Hvordan sikrer man, at der ikke opstår hulrum i en væg isoleret med løsfyldsprodukter? Denne rapport indeholder såvel en teoretisk udredning som eksperimentelle resultater, der kan danne grundlag for besvarelsen af dette spørgsmål.

De mekanismer, der resulterer i sætning af isoleringsmaterialer, er beskrevet. Desuden er væsentlige mekaniske egenskaber for en række nye isoleringsprodukter på det danske marked bestemt. Rapporten indeholder udover en teoretisk tilgang til sætning af løsfyldsisolering også forsøgsbeskrivelser til bestemmelse af mekaniske egenskaber for denne type isoleringsmaterialer.

Der er opstillet en række kriterier for at undgå sætning af isoleringsmaterialer ved praktiske anvendelser. Rapporten afsluttes med et forslag til en metode for dimensionering af vægge isoleret med løsfyldsprodukter.

1. udgave, 2. oplag 2002

ISBN 87-563-1092-7

ISSN 1600-8022