

By og Byg Dokumentation 030

# Løsfyldsisolering i vægge og på lofter

Variierende fugtpåvirkningers indflydelse på densiteten

# Løsfyldsisolering i vægge og på lofter

Variierende fugtpåvirkningers indflydelse på densiteten

Torben Valdbjørn Rasmussen

Titel	Løsfyldsisolering i vægge og på lofter
Undertitel	Varierende fugtpåvirkningers indflydelse på densiteten
Serietitel	By og Byg Dokumentation 030
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2002
Forfatter	Torben Valdbjørn Rasmussen
Sprog	Dansk
Sidetæl	65
Litteratur-henvisninger	Side 54
English summary	Side 55-56
Emneord	Løsfyldsisolering, isolering, vægge, lofter, fugt, krybning
ISBN	87-563-1136-2
ISSN	1600-8022
Pris	Kr. 145,00 inkl. 25 pct. moms
Tekstbehandling	Solveig Johansen
Tegninger	Ove Nesdam
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 030: Løsfyldsisolering i vægge og på lofter. Varierende fugtpåvirkningers indflydelse på densiteten. (2002)*

# Indhold

Forord .....	4
Indledning .....	5
Baggrund .....	5
Formål .....	5
Anvendte isoleringsmaterialer .....	5
Sammenfatning .....	6
Model .....	6
Forsøg .....	6
Beregninger .....	7
Konklusion .....	7
Teori .....	8
Teoretisk beskrivelse af krybning .....	8
Statistiske forhold .....	8
Stabil spændingstilstand og volumenstabilitet .....	9
Konstant relativ luftfugtighed .....	9
Varierende relativ luftfugtighed .....	10
Forsøg .....	11
Konditionering af forsøgsmateriale .....	11
Forsøgsmateriale til bestemmelse af krybningsforhold .....	11
Forsøgsmateriale anvendt ved fri sætnings- og vægforsøg .....	11
Generelt .....	11
Forsøgsudstyr .....	11
Krybningsforhold .....	11
Fri sætning .....	13
Vægforsøg .....	15
Analyse af forsøgsdata .....	24
Krybningsforhold .....	24
Fri sætning .....	24
Vægforsøg .....	25
Resultater .....	26
Krybningsforhold .....	26
Beregnet volumenstabil densitet for en væg .....	29
Dimensionering efter den højeste spændingspåvirkning .....	30
Dimensionering efter en optimeret energibetragtning .....	33
Beregnet tøjning for løst udlagt loftisolering .....	37
Fri sætning .....	39
Vægforsøg .....	40
Anvendte indblæsningsteknikker .....	40
Densitetsmålinger .....	41
Varierende fugtpåvirkning .....	43
Diskussion af forsøgsresultater .....	47
Konklusion .....	53
Litteratur .....	54
Summary .....	55
Model .....	55
Tests .....	55
Calculations .....	56
Conclusion .....	56
Bilag A Loose-fill insulation in walls. Testing and modelling of creep .....	57
Bilag B Tøjningsdiagrammer .....	64

# Forord

Korrekt anvendelse af cellulosebaseret løsfyldsisolering til varmeisolering af bygningskonstruktioner kræver, at der tages højde for at materialet kan sætte sig så der dannes en kuldebro. Der er derfor behov for at kunne karakterisere mekanismerne bag sætninger i cellulosebaseret løsfyldsisolering for derved at blive i stand til at eliminere sætninger ved fremtidige anvendelser.

Denne rapport beskriver resultaterne fra fase 2 af projektet *Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering i vægge*. I rapporten beskrives væsentlige mekaniske egenskaber i relation til forståelsen og beherskelsen af de sætningsproblemer, som anvendelsen af de nye materialer har vist. Medens fase 1 undersøgte mekaniske egenskaber for statiske fugtforhold, undersøger fase 2 mekaniske egenskaber for varierende fugtforhold.

I rapporten behandles resultater fra forsøg med krybning under varierende fugtforhold samt fra forsøg til opnåelse af homogen lejring efter indblæsning. Det viser sig nemlig, at disse faktorer spiller en central rolle for forståelsen af cellulosebaserede løsfyldsisoleringers mekaniske egenskaber.

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

By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut  
Afdelingen for Byggeteknik og Produktivitet  
Juni 2002

*Jørgen Nielsen*  
Forskningschef

# Indledning

## Baggrund

Denne rapport beskriver resultaterne fra fase 2 af projektet *Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering i vægge*. Resultaterne fra fase 1 findes i *By og Byg Dokumentation 011: Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge*.

Fase 2 giver et udvidet kendskab til væsentlige mekaniske egenskaber for en række nye isoleringsprodukter på det danske marked præsenteret i rapporten for fase 1. Endvidere præsenteres en teoridannelse og et designværktøj, hvorefter den sætningsfri densitet af løsfyldsisoleringen kan bestemmes. Egenskaberne og teoridannelsen er væsentlig for at forstå og beherske de sætningsproblemer, som anvendelsen af de nye materialer har vist.

Fase 1 tog udgangspunkt i anvendelsen af de enkelte materialer i et konstant miljø, hvad angår den relative luftfugtighed og temperatur. Fase 2 udvider teoridannelsen og designværktøjet, hvorefter den sætningsfri densitet af løsfyldsisoleringen også kan bestemmes under cykliske fugtpåvirkninger.

Denne rapport kan læses som et selvstændigt stykke arbejde, men forudsætter kendskab til en del materialemekanik præsenteret i rapporten for fase 1. Med fase 2 af projektet *Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering i vægge* er mekanismerne bag sætninger i cellulosebaseret løsfyldsisolering karakteriseret for såvel statiske som varierende fugtpåvirkninger.

## Formål

Projektet har til formål at karakterisere mekanismerne bag sætninger i cellulosebaseret løsfyldsisolering for derved at gøre det muligt ved fremtidige anvendelser at eliminere sætninger. Projektet er afgrænset til byggetekniske anvendelser, hvor isoleringsmaterialet er placeret i lodrette vægge og udlagt på vandrette lofter.

## 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, stenuldsgranulat. Tabel 1 indeholder en oversigt over de undersøgte materialer og de betegnelser, som er anvendt i rapporten.

Tabel 1. Undersøgte materialer, produktnavne samt betegnelser 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 skærver		Dansk Naturisolering A/S	Dansk hør
Stenuldsgranulat	Hulmursfyld	Rockwool A/S	Rockwool

# Sammenfatning

Denne rapport beskriver fase 2 af *projektet Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering i vægge* og er en overbygning på det arbejde, som er rapporteret i *By og Byg Dokumentation 011: Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering af vægge*.

Resultaterne fra fase 1 og fase 2 viser, at celluloseløsfyldsisolering indblæst med en densitet på ca.  $48 \text{ kg/m}^3$ , eller derover, i en 10 cm tyk og 100 cm bred gipspladevæg kan være volumenstabil ved en konstant relativ luftfugtighed (RF) på 50 %. Øges vægtykkelsen til 30 cm kræves en indblæst densitet på ca.  $53 \text{ kg/m}^3$ . Øges den relative luftfugtighed yderligere til 80 %, kræves  $63 \text{ kg/m}^3$  for at sikre volumenstabilitet. Påvirkes væggen endelig med cyklisk varierende relativ luftfugtighed på mellem 50 % og 80 %, kræves  $73 \text{ kg/m}^3$  for at sikre volumenstabilitet. Hvis det kan påvises, at celluloseløsfyldsisoleringen bibeholder en tilstrækkelig del af de elastiske egenskaber efter gentagne cykliske fugtvariationer, kan den krævede indblæste densitet reduceres til  $69 \text{ kg/m}^3$ .

Resultaterne er fremkommet ved anvendelse af den udviklede model kombineret med forsøgsresultater. Resultaterne er sammenfattet i figur 1.

## Model

Der er udviklet en model, hvorefter den nødvendige densitet af et løsfylds-isoleringsmateriale kan bestemmes ud fra kendskab til væggenes karakteristika og fugtforholdene for isoleringen. Modellen indeholder ligeledes en beskrivelse af isoleringsmaterialets krybning under påvirkning af cyklisk fugtvariation i den omgivende luft.

## Forsøg

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, genbrugspapir, træbaseret løsfyldsisolering og granuleret hør.

For alle isoleringsmaterialerne er der udført krybningsforsøg. Krybningsforsøgene er udført ved konstant temperatur ( $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ), tre lastniveauer (ca. 80, 150, 300 Pa) med cyklisk varierende relativ luftfugtighed, som varierer mellem 50 % og 80 % RF.

For enkelte kombinationer af vægmateriale og isoleringsmateriale er friktionskoefficienterne bestemt gennem forsøg.

For ét isoleringsmateriale er der gennemført indblæsningsforsøg, hvor to forskellige metoder til indlejring af isoleringsmaterialet er anvendt. Den ene metode viste sig at være uegnet. For den anden indlejningsmetode er homogeniteten af det indlejrede isoleringsmateriale dokumenteret ved lokale og overordnede densitetsmålinger.

For den udvalgte og anvendte indlejningsmetode er der gennemført indblæsningsforsøg med principielt to forskellige vægkonstruktioner. Den ene vægkonstruktion er opbygget som en kasse med lodrette træstolper, top- og bundrem og gipsplader som for- og bagbeklædning. Den anden vægkonstruktion er opbygget som en kasse med lodrette træstolper, top- og bundrem samt vandrette lægter i hele væggenes bredde placeret pr. 0,6 m

mod bagsiden af væggen og med gipsplader som for- og bagbeklædning. Ved den anden vægkonstruktion er der yderligere placeret en dampbremse mellem de vandrette lægter og beklædningen.

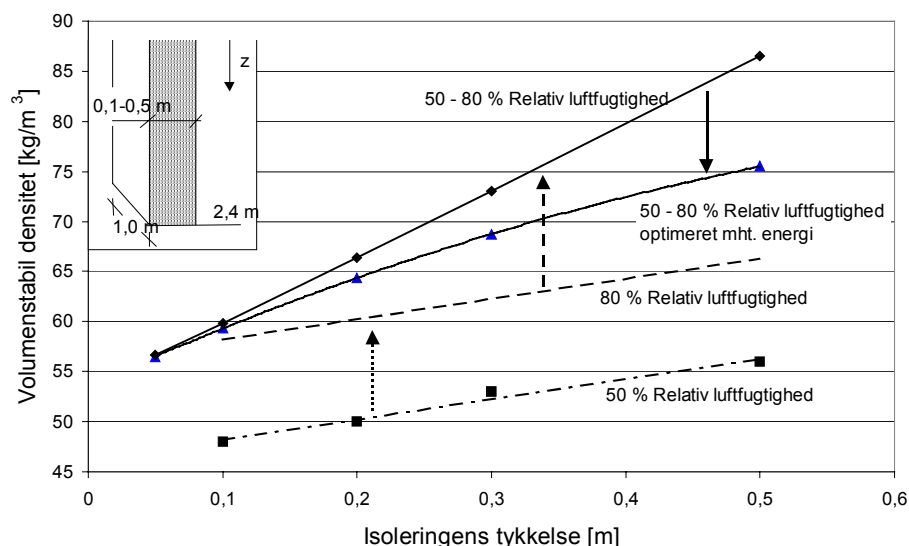
Verifikationen af det udarbejdede teoretiske grundlag er gennemført gennem to fuldskalaforsøg med vægge og tre forsøg med løst udlagt isolering. I alle tilfældene er forsøgene udført ved konstant temperatur (23 °C) og med cyklisk varierende relativ luftfugtighed, som varierer mellem 50 % og 80 % RF.

## Beregninger

Der er foretaget en lang række beregninger med det udviklede designværktøj. Beregningerne er foretaget ud fra tre principielt forskellige designprincipper. I det første designprincip antages, at isoleringsmaterialet, i en given væg, er påvirket af et konstant miljø, hvad angår temperatur og relativ luftfugtighed. For de to øvrige designprincipper antages, at isoleringsmaterialet, i en given væg, er påvirket af et varierende miljø, hvad angår relativ luftfugtighed. For disse to designprincipper, er der udført beregninger henholdsvis med og uden hensyntagen til isoleringsmaterialernes reversible egenskaber.

## Konklusion

Sammenfattes resultaterne fra fase 1 og fase 2, ser den udviklede model ud til at kunne forklare de fænomener, der observeres i praksis. Resultaterne fra fase 1 redegør for forholdene ved konstant klimapåvirkning, medens resultaterne fra fase 2 redegør for forholdene ved varierende klimapåvirkning. Projektet redegør for de materialemekaniske egenskaber, som resulterer i sætninger for løsfyldisolerede vægge. Ligeledes gøres der rede for de nødvendige værktøjer, som er blevet udviklet i projektet, og for hvorledes de kan tages i anvendelse for at eliminere sætninger 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 1,0 m bred og 2,4 m høj gipspladevæg ved et vandindhold svarende til ligevægt ved 50 % og 80 % RF samt for cyklisk varierende fugt varierende mellem 50 % og 80 % RF. Der er benyttet materialedata for Ekofiber vind. Den beregnede volumestabile densitet er relateret til 50 % RF og 23 °C. Kurven for 80 % RF er delvist baseret på ekstrapolerede data. Kurven for cyklisk varierende fugt er baseret på henholdsvis: 1) at isoleringsmaterialet mister sin reversible tøjning ved den cykliske fugtpåvirkning. 2) at isoleringsmaterialet bibeholder sin reversible tøjning ved den cykliske fugtpåvirkning (optimeret mht. energi).



# Teori

Teorien, der præsenteres i dette afsnit, er i hovedtræk fra (Rasmussen, 2001b). Den teoretiske beskrivelse af krybning og de statiske forhold er beskrevet i et sådan omfang, at det skulle være muligt, at forstå rapportens resultater, diskussion og konklusion. Ønskes en yderligere introduktion til begreberne omkring materialers krybning og de statiske forhold, som anvendes i dette arbejde, kan denne information hentes i (Rasmussen, 2001b, 2001a, in press, 2002), samt i forslag til Nordtest standard med titlen "Loose-fill insulation in walls. Testing and modelling of creep", der er vedlagt som bilag A.

## Teoretisk beskrivelse af krybning

Nogle materialer kan defineres som Clouser materialer. Disse materialers krybning og tilbagekrybning kan beskrives ved et simpelt udtryk også kaldet Clouserfunktionen (Clouser, 1959). Anvendelsen af Clouserfunktionen er vist i (Rasmussen, 2001b, 2001a), (Fuglsang Nielsen, 1986) og (Fuglsang Nielsen, 1993). Teoretisk set er parametrene i krybningsfunktionen uafhængige af lastniveauet. Dette gælder dog kun, såfremt lastniveauet er af en størrelsesorden, hvor der ikke opstår brud i materialet (ødelæggelse af materialet). Her er den beregnede krybning tilpasset Clouserfunktionen.

Den resulterende tøjning er givet ved:

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \varepsilon_0 + \sigma_1 c(t), & 0 \leq t < t_1 \\ \varepsilon_0 + \sigma_1 c(t) - (\sigma_1 - \sigma_2) c(t - t_1), & t \geq t_1 \end{cases} \quad (1)$$

hvor  $c(t)$  er Clouserfunktionen givet ved:

$$c(t) = \frac{1}{E} \left[ 1 + \left( \frac{t}{T} \right)^{a_1} \right] \quad (2)$$

og  $t$  (s) er tid,  $t_1$  er tiden (s) til hvilken aflastning foretages,  $E$  (Pa) er elasticitetsmodulet,  $T$  (s) er en konstant kaldet relaksationstiden og  $a_1$  (dimensionsløs) er krybningsekspONENTEN, som også er en konstant. Endvidere er konsolideringen  $\varepsilon_0$  (dimensionsløs) en konstant, som bestemmes eksperimentelt.  $\sigma_1$  (Pa) er den konstante spænding for  $t < t_1$  og  $\sigma_2$  (Pa) er den konstante spænding for  $t \geq t_1$ .

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

## Statiske forhold

Spændinger i granulerede isoleringsmaterialer kan beskrives ved teorier anvendt indenfor siloteorien. Siloteorier er sammenfattet og beskrevet i (Wenzel, 1962). Siloteorierne er anvendt til at beskrive spændingstilstanden for tørre granulære materialer i (Hartlén, 1980), (Munch-Andersen & Nielsen, 1990) og til at bestemme anisotrope egenskaber i tørre granulære materialer i (Hartlén, Nielsen, Ljunggren, Mårtensson & Wigram, 1984).

Teorien som benyttes i denne rapport, beskriver spændingstilstanden i et granulært isoleringsmateriale i en væg som funktion af højden. Belastningen

stammer fra egenlasten af det granulære isoleringsmateriale, og det antages, at isoleringsmateriale er fordelt homogent i væggen. Teorien inkluderer to materialeparametre henholdsvis friktionskoefficienten mellem isoleringsmateriale og vægmaterialet og isoleringsmaterialets horisontaltrykforhold.

Den lodrette spænding,  $\sigma_v$  (Pa) som funktion af højden fra oversiden af det granulære isoleringsmateriale, i en væg er beskrevet i (Rasmussen, 2001b, 2001a), (Barfod, 1982) og givet ved:

$$\sigma_v(z) = \frac{A\rho g}{\mu\lambda O} \left[ 1 - e^{-\frac{\mu\lambda O}{A}z} \right] \quad (3)$$

hvor  $A$  ( $m^2$ ) er det vandrette tværsnitareal af isoleringsmateriale,  $O$  (m) er den vandrette omkreds af isoleringsmateriale.  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) er densiteten af det homogene granulære isoleringsmateriale,  $g$  ( $m/s^2$ ) er tyngdeacceleration,  $z$  (m) er afstanden fra isoleringens overflade,  $\mu$  er vægfriktionskoefficienten (dimensionsløs) mellem vægmaterialet og isoleringsmateriale, og  $\lambda$  er horisontaltrykforholdet (dimensionsløs). Ligning (3) er udledt under forudsætning af, at horisontaltrykforholdet er konstant i hele væggen, og at den lodrette spænding  $\sigma_v$  er lig nul for  $z = 0$ .

## Stabil spændingstilstand og volumenstabilitet

Granuleret løsfyldsisolering indlejret i en væg vil være i en volumenstabil tilstand, såfremt løsfyldsisoleringen forbliver i en spændingsstabil tilstand og udfylder det indre volumen af væggen.

### Konstant relativ luftfugtighed

I det tilfælde, hvor væggen er konditioneret til et stabilt miljø med hensyn til temperatur og relativ luftfugtighed, kan den nødvendige densitet af løsfyldsisoleringen bestemmes på følgende måde:

For en forudbestemt homogen densitet af løsfyldsisoleringen bestemmes spændingen som funktion af afstanden fra isoleringens overside ved hjælp af ligning (3). Fra denne beregning bestemmes det spændingsniveau, for hvilket løsfyldsisoleringen skal være volumenstabil. Vælges det højeste spændingsniveau, som det dimensionerende, kaldes dette designspændingen. For den forudbestemte homogene densitet af løsfyldsisoleringen bestemmes krybningen for designspændingen som funktion af tiden ved at anvende Clouser-funktionen. Fra disse beregninger bestemmes den irreversible tøjning.

Hvis den forudbestemt homogene densitet af løsfyldsisoleringen er i sit irreversible tøjningsområde for designspændingen, må der foretages en ny beregning med en højere densitet af løsfyldsisoleringen.

For at den forudbestemte homogene densitet af løsfyldsisoleringen påvirket til designspændingen forbliver i sit reversible tøjningsområde, må den irreversible tøjning elimineres. Den irreversible tøjning,  $\epsilon_{irreversibel}$  kan beregnes ved:

$$\epsilon_{irreversibel} = (\epsilon_0 + \sigma_1 c(t)) - (\sigma_1 c(t - t_1)) \leq 0 \quad (4)$$

hvorfra den kritiske konsolidering kan bestemmes.

Indlejres og forbliver den homogene densitet af løsfyldsisoleringen i dens reversible tøjningsområde, vil dette betyde, at isoleringsmateriale er i en volumenstabil tilstand.

## Variierende relativ luftfugtighed

I det tilfælde, hvor væggen er udsat for en variierende relativ luftfugtighed, kan den nødvendige densitet af løsfyldsisoleringen bestemmes ud fra to principper:

1. ved at anvende et spændingskriterium
2. ved at anvende et energikriterium.

### Spændingskriterium

Ud fra tøjnings-tids-diagrammer ved variierende relativ luftfugtighed findes det stabile tøjningsniveau for forskellige spændingsniveauer. Derpå beregnes den volumenstabile densitet som funktion af spændingsniveauet. En lineær funktion, bestemt ud fra mindste kvadraters metode, angiver densiteten for volumenstabil tilstand,  $\rho_{v-s}$  ( $\text{kg/m}^3$ ), som funktion af den tilhørende spænding,  $\sigma_{v-s}$  (Pa), som:

$$\rho_{v-s} = c\sigma_{v-s} + Z_0 \quad (5)$$

hvor  $c$  ( $\text{kg/Nm}$ ) er en konstant, og  $Z_0$  ( $\text{kg/m}^3$ ) er en konstant.

Designspændingen vælges og bruges til af beregne den volumenstabile densitet. Den volumenstabile densitet er bestemt, når der er overensstemmelse mellem designspændingen og den beregnede volumenstabile densitet. Den volumenstabile densitet bestemmes ved en iterativ proces.

### Energikriterium

Ved denne metode er densiteten for volumenstabil tilstand bestemt ved at optimere energien for løsfyldsisoleringen. Den resulterende energi er differencen mellem den energi, der er brug for, og den energi der er til rådighed i den konkrete væg, med det valgte granulære isoleringsmateriale. Den energi, der er brug for, beregnes ud fra den lodrette spænding i isoleringsmaterialet, for en forudbestemt homogen densitet af det granulære isoleringsmateriale. Den energi, der er til rådighed, bestemmes ud fra spændingen der er relateret til den forudbestemte homogene densitet af det granulære isoleringsmateriale. Isoleringshøjden,  $h_0$  er lig væggen højde. Den resulterende energi  $U_N$  (J) er givet ved:

$$U_N = \int_0^{h_0} A\sigma_{v-s}(\rho)dz - \int_0^{h_0} A\sigma_v(z)dz \geq 0 \quad (6)$$

hvor densiteten ved volumenstabil tilstand er bestemt ved en iterativ proces. For at det granulære isoleringsmateriale kan udfylde vægkonstruktionen er det en forudsætning, at isoleringsmaterialet forbliver i det reversible tøjningsområde efter cykliske fugtvariationer. For  $U_N = 0$  er der overensstemmelse mellem den energi, der er brug for, og den energi der er til rådighed i den konkrete væg, med det valgte granulære isoleringsmateriale. For  $U_N > 0$  er der en overskydende energi i det indlejrede isoleringsmateriale.

# Forsøg

## Konditionering af forsøgsmateriale

### Forsøgsmateriale til bestemmelse af krybningsforhold

Isoleringsmaterialet løsnes før brug ved at blive gennemblæst med trykluft i et lukket kammer. Isoleringsmaterialet samt det anvendte udstyr konditioneres forud for de enkelte forsøgs start til ligevægt, hvad angår relativ luftfugtighed og temperatur.

### Forsøgsmateriale anvendt ved fri sætnings- og vægforsøg

Isoleringsmaterialet leveres fabrikspakket og opbevares tørt indtil brug.

### Generelt

Forsøgsudstyr, som har berøringsflader med isoleringsmaterialet, og som ikke suger vand, (ikke opfugtes ved berøring med vand) vaskes med sæbe i lunken 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 tilførelse eller fjernelse af partikler.

## Forsøgsudstyr

### 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 cylindermateriale med lav friktion i forhold til løsfyldsisoleringsmaterialet, samt ved at anvende en lille højde i forhold til diameteren af cylinderen.

En meget vigtig materialeegenskab for materialer, hvis rheologiske egenskaber er fugtafhængige, er materialets krybning under varierende fugtpåvirkning. Eksperimentelt måles et materiales krybning, for varierende fugt, ved at måle tøjningen (deformationen) over tiden, der fremkaldes i et materiale, når det belastes med en konstant spænding (kraft). For stabiliseret krybningsniveau etableres nyt fugtniveau. Fugtniveauet som etableres under forsøget er henholdsvis en lav og en høj relativ luftfugtighed. Den ønskede relative luftfugtighed etableres i forsøgsomgivelserne.

#### 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. Cylinderens centerlinie er orienteret vertikalt. Det cylindriske rør har en indvendig diameter på 104,5 mm, i hvilken isoleringsmaterialet indlejres.

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.

Bund og låg er forsynet med huller (ca.  $1,5 \text{ } \varnothing \text{ mm}$  hul pr.  $\text{cm}^2$ ) 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 2.

Lågets vertikale flytning måles i cylinderens vertikale centerlinie ved hjælp af en flytningsmåler, også kaldet et dilatometer, der monteres på cylinderrørets øverste kant. Ved hjælp af lodder justeres lågets kraftpåvirkning af oversiden af isoleringsmaterialet. Udstyret til måling af krybning er vist figur 2. Lågets vertikale flytning logges via en PC.



Figur 2. 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 henholdsvis  $(63,12 + 20)$ ,  $(135,32 + 20)$  og  $(285,45 + 20)$  Pa. Den vertikale last på oversiden af isoleringen er etableret med lodder, og undertrykket på undersiden af isoleringen er 20 Pa.

### Udførelse

Den korrekte mængde isoleringsmateriale, til en vertikal udstrækning på 70 mm, vejes af og deles i 7 lige dele. De enkelte dele indlejres 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 stoppepind. Stoppepinden er en skive med jævnt fordelte huller og med en diameter lidt mindre end cylinderens indvendige diameter påsat en pind. Skiven er forsynet med ca.  $1\frac{1}{2} \text{ } \varnothing \text{ } 1 \text{ mm}$  hul pr.  $\text{cm}^2$ .

Herefter dækkes isoleringens overside med et låg fastholdt 70 mm over isoleringens underside. Flytningsmåleren monteres dernæst på lågets overside. Derpå frigøres låget, og den forud bestemte belastning placeres på lågets overside i form af lodder. Hvis isoleringsmaterialet er indlejret med en densitet, som resulterer i, at låget løftes, når det frigives, frigives låget først mod isoleringsmaterialet. Derpå placeres belastningen, hvorefter låget endeligt frigives.

Lågets vertikale flytning måles som funktion af tiden.

Når den målte krybning er blevet nogenlunde stabil i tiden, typisk efter 2 til 3 døgn, ændres den relative luftfugtighed omkring forsøgsopstillingen, således at isoleringsmaterialet opfugtes eller udtørres ved luftgennemstrømning.

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.

Detaljer omkring indlejring af isoleringsmaterialet og tidsintervallet for dataopsamling er beskrevet i et forslag til Nordtest standard med titlen "loose-fill insulation in walls, Test and modelling of creep", se bilag A.

### **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 ved indlejringen for at opnå den ønskede densitet.

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

Efter at et relativt stabilt tøjningsniveau er opnået ved det givne lastniveau og den givne relative luftfugtighed, ændres den relative luftfugtighed. Tidspunktet, for at et relativt stabilt tøjningsniveau er opnået, beror på et skøn, hvorfor betegnelsen relativt anvendes.

### **Fri sætning**

#### **Princip**

Der foretages deformationsmålinger af udblæst cellulosebaseret løsfylds-isolerings vandrette overflade. Isoleringens vandrette overflades position måles over en tid ved varierende relativ luftfugtighed.

For at opnå et veldefineret volumen af løsfyldsmaterialet under det fri sætningsforsøg omkranses det af formsider. Da løsfyldsmaterialet grænser op til formsidens overflade, vil friktion mellem de to materialer resultere i en reduktion af kraftpåvirkningen fra isoleringsmaterialets egenvægt. Reduktionen af kraftpåvirkningen er en funktion af isoleringens højde og afstanden fra formsiderne til målepinden. Reduktionen af kraftpåvirkningen kan mindskes ved at anvende et formmateriale med lav friktionskoefficient (mellem løsfyldsisoleringsmaterialet og formsiden), samt ved at anvende en lille højde i forhold til afstanden fra formsiderne til målepinden.

En meget vigtig materialeegenskab for materialer, hvis materialeegenskaber er fugtafhængige, er deres fri sætning under varierende fugtpåvirkning. Eksperimentelt måles denne ved at måle materialets vandrette overflades position over tiden under varierende RF når det kun belastes med egenvægt.

For en stabiliseret position af materialets vandrette overflade etableres nyt fugtniveau. Fugtniveauet i omgivelserne veksler under forsøget mellem en lav og en høj relativ luftfugtighed på henholdsvis 50 % og 80 %.

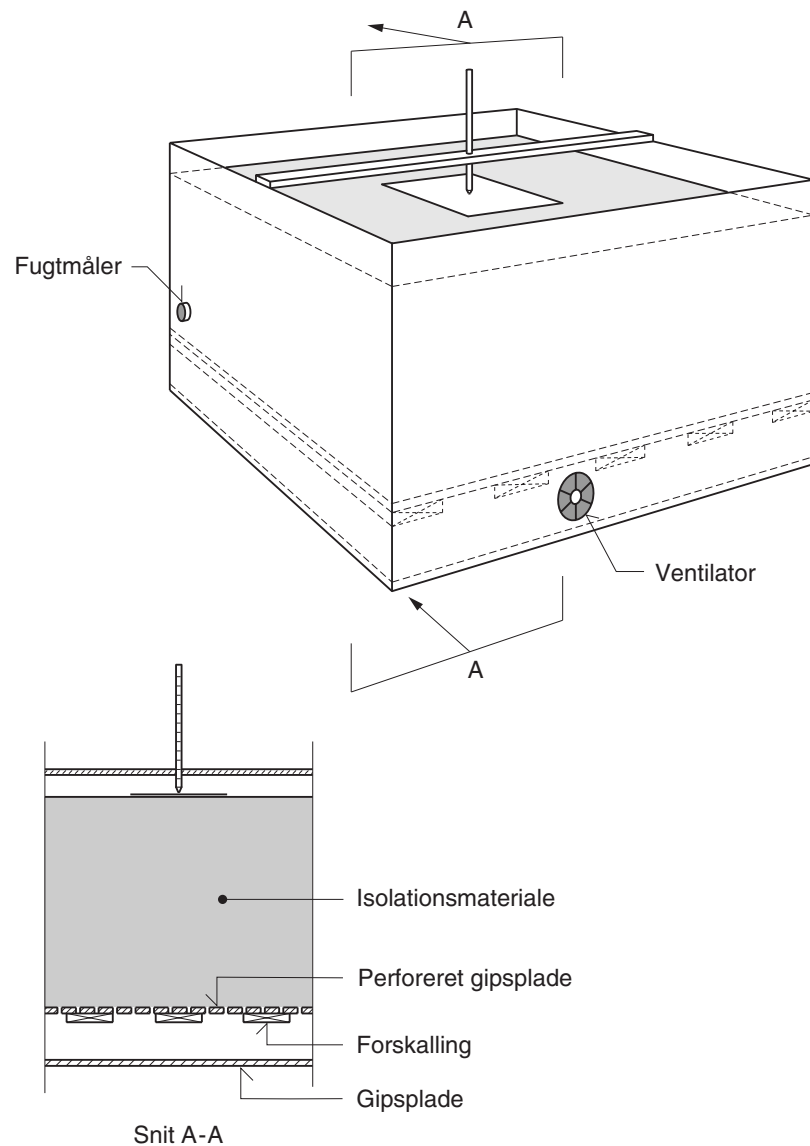
Isoleringsmaterialets vertikale udstrækning holdes begrænset således at tabet i kraftpåvirkningen, pga. friktion mellem formsiden og isoleringsmaterialet, fra oversiden til undersiden af isoleringen samt ved at anvende en lille højde i forhold til afstanden fra formsiderne til måleenheden, at denne er uden betydning i forhold til de målte flytninger.

#### **Udstyr**

For eksperimentelt at være i stand til at måle den fri sætning for cellulose-løsfyldsisolering har det været nødvendigt at designe et nyt, men simpelt forsøgsudstyr. Udstyret består af en plan horisontal bund af vindgips påsat vertikale formsider af 2 mm aluminium. Indenfor formsiderne, der har en sidelængde på 850 mm, indlejres isoleringsmaterialet. Formens højde fra oversiden af vindgipsen er 400 mm. Oven på isoleringsmaterialet placeres en (perforeret) skive på 0,09 m<sup>2</sup> med en vægt på ca. 18 g. På skiven placeres

en målepind med vægten ca. 6 gram. Målepinden holdes lodret ved hjælp af en bro placeret over to af kassens parallelle sider. Broen er fastholdt og udgør målepindens referenceposition. Målepinden forsynes med millimeterinddeling. Den plane horisontale bund placeres på spredt forskalling.

Den plane horisontale bund forsynes med huller, således at luftgennemstrømning gennem isoleringsmaterialet kan finde sted. Bunden har ca. 1  $\varnothing$  5 mm hul pr. 4 cm<sup>2</sup>. Ved at ændre den relative luftfugtighed omkring forsøgsopstillingen kan isoleringsmaterialet opfuges og udtørres ved luftgennemstrømningen. Luftgennemstrømningen etableres ved at opretholde et lille konstant undertryk mod isoleringsmaterialets underside ved hjælp af en ventilator. Undertrykket etableres i et lukket rum under den plane horisontale bund af vindgips.



Figur 3. Apparat til måling af isoleringsmaterialets fri sætning ved cyklisk varierende relativ luftfugtighed. Belastningen udgøres af isoleringsmaterialets egenvægt plus apparaturet til måling af isoleringsmaterialets vandrette overflades position samt det etablerede undertryk, som sikrer luftgennemstrømningen.

Skivens vertikale flytning måles, i den vertikale centerlinie ved hjælp af målepinden. En fugtmåler af fabrikatet Rotronic, type HygroClip placeres på den indvendige forside i isoleringsmaterialet 10 mm fra isoleringens underside. Udstyret til måling af den fri sætning er vist i figur 3.

Skivens flytning, den relative luftfugtighed og det etablerede undertryk aflæses manuelt.

Ved forsøgets afslutning vejes det udlagte materiale. Isoleringsmaterialets densitet beregnes både ved udlægningen og ved forsøgets afslutning.

## Udførelse

Isoleringsmaterialet lægges i formen ved hjælp af et indblæsningsudstyr anvendt af professionelle installatører af cellulosebaseret løsfyldsisolering. Den anvendte cellulosebaserede løsfyldsisolering udlægges med en normalt anvendt densitet og i en tykkelse på ca. 350 mm.

Den normalt anvendte densitet er ifølge producenternes oplysninger ca. 32 til 45 kg/m<sup>3</sup>. Efter endt indblæsning inspiceres den fyldte form for at sikre, at formen er fyldt helt ud og ikke indeholder luftlommer. I tilfælde af utilfredsstillende fyldning tømmes formen og fyldningen gentages.

Herefter placeres skiven og målepinden på isoleringens overside. Skivens vertikale placering aflæses som funktion af tiden. Når den målte vertikale placering af skiven er blevet nogenlunde stabil i tiden, og fugtmålingerne har bekræftet, at det omgivende fugtniveauet er opnået i isoleringsmaterialet, typisk efter 7 dage, ændres den relative luftfugtighed omkring forsøgsopstillingen, således at isoleringsmaterialet opfugtes eller udtørres.

Det er vigtigt at holde opstillingen vibrationsfri under forsøget for at isolere påvirkningen af isoleringsmaterialet. Ved forsøgets afslutning vejes og beregnes den gennemsnitlige densitet af det udlagte isoleringsmateriale efter konditionering ved 23 °C og 50 % RH.

## Usikkerhed

Ved at anvende professionelle installatører af cellulosebaseret løsfyldsisolering og et professionelt indblæsningsudstyr til udlægning af materialet i formen, sikres en forbehandling og arbejdsprocedure lig en virkelig anvendelse af materialet. En sådan procedure stiller ligeledes store krav til produktet. I og med at arbejdssituationen og formens udformning er væsentlig anderledes end ved udlægning på loft, skal det sikres, at produktet er repræsentativt for udlægning af cellulosebaseret løsfyldsisolering på loft.

Den anvendte forms udstrækning og udformning skal være af en sådan art, at målingerne, som foretages på isoleringsmaterialet, påvirkes mindst muligt af opstillingens udformning og apparatur.

Ved en relativ stabil vertikal position af skiven, ved en given relativ luftfugtighed, ændres den relative luftfugtighed. Tidspunktet for den relativt stabile vertikale position af skiven beror på et skøn hvorfor betegnelsen relativt anvendes.

Det undertryk, som accelerer opfugtningen og udtørringen af isoleringsmaterialet, skal være yderst begrænset for ikke at bidrage nævneværdigt til belastning af isoleringsmaterialet.

## Vægforsøg

### Princip

Vægforsøg udføres som fuldskalaforsøg. Ved indblæsning i vægelementer i fuld størrelse undersøges det, hvorledes en given isoleringsdensitet mest hensigtsmæssigt kan installeres under praktiske forhold. Ved forsøgene anvendes to principielt forskellige typer vægkonstruktioner. Forskellige teknikker til indblæsning af den nødvendige densitet af enkelte løsfyldsisoleringsmaterialer anvendes. For én valgt indblæsningsteknik isoleres to vægge som over længere tid påvirkes til varierende fugtcykler.

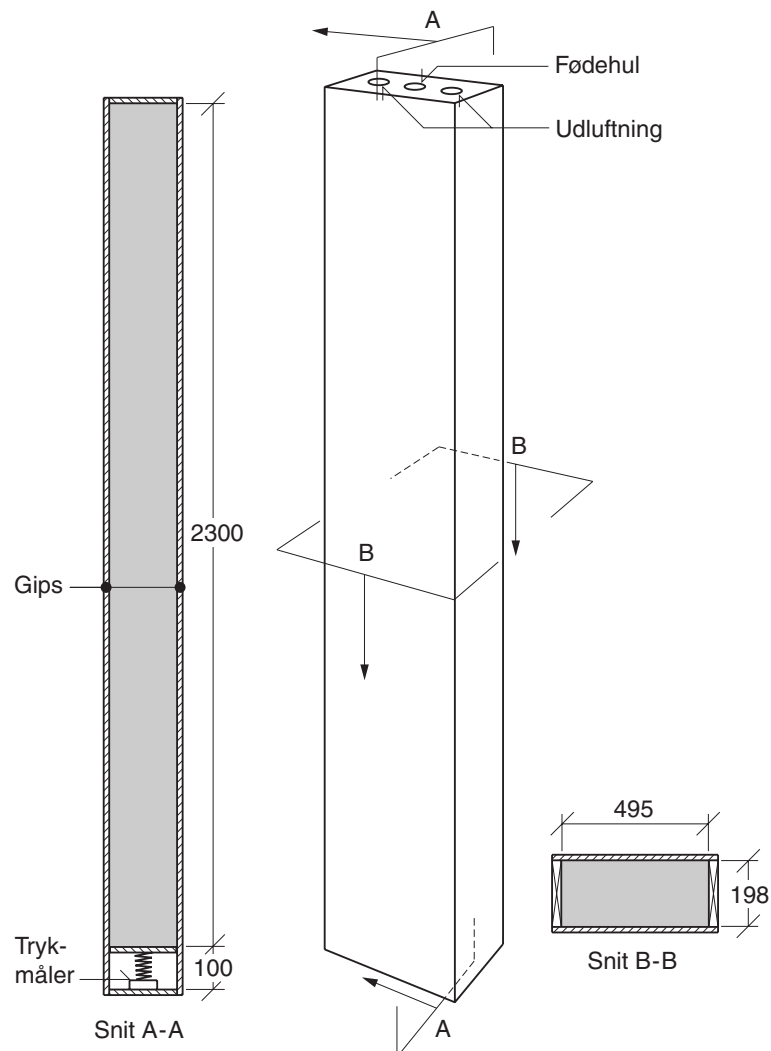
### Udstyr

To vægelementer med dimensionerne 600x2400x200 mm anvendes. Vægelementerne fremstilles som kasseformede elementer med 50 mm træstolpeskelet, som er høvlet. Begge elementer er forsynet med beklædning af 13 mm gipsplade. På det ene element er gipspladerne fastgjort direkte på væggen kasseformede træstolpeskelet, se figur 4. På det andet element er den indvendige beklædning monteret på 19 × 100 mm lægter pr. 600 mm placeret horisontalt. Endvidere er dette andet element forsynet med dampbremse på indersiden af gipspladen, se figur 5.



Efter indblæsning måles densiteten i forskellige højder af væggen. Fra væggen udbores en række cylinderprøver af isoleringsmaterialet. Cylinderprøverne udtages ved at udbores kerner med en diameter på 108 mm. Vægten af den udtagne prøve bestemmes ved vejning på en vægt med en opløsning på 0,01 g. Ligeledes bestemmes den gennemsnitlige densiteten af isoleringsmaterialet i væggen. Isoleringsmaterialet fra væggen fyldes i papirsække. Vægten af isoleringsmaterialet bestemmes ved vejning på en vægt med en opløsning på 0,1 g. Densiteten relateres til 23 °C og 50 % RF ved at konditionere de udtagne prøver forud for vejningen.

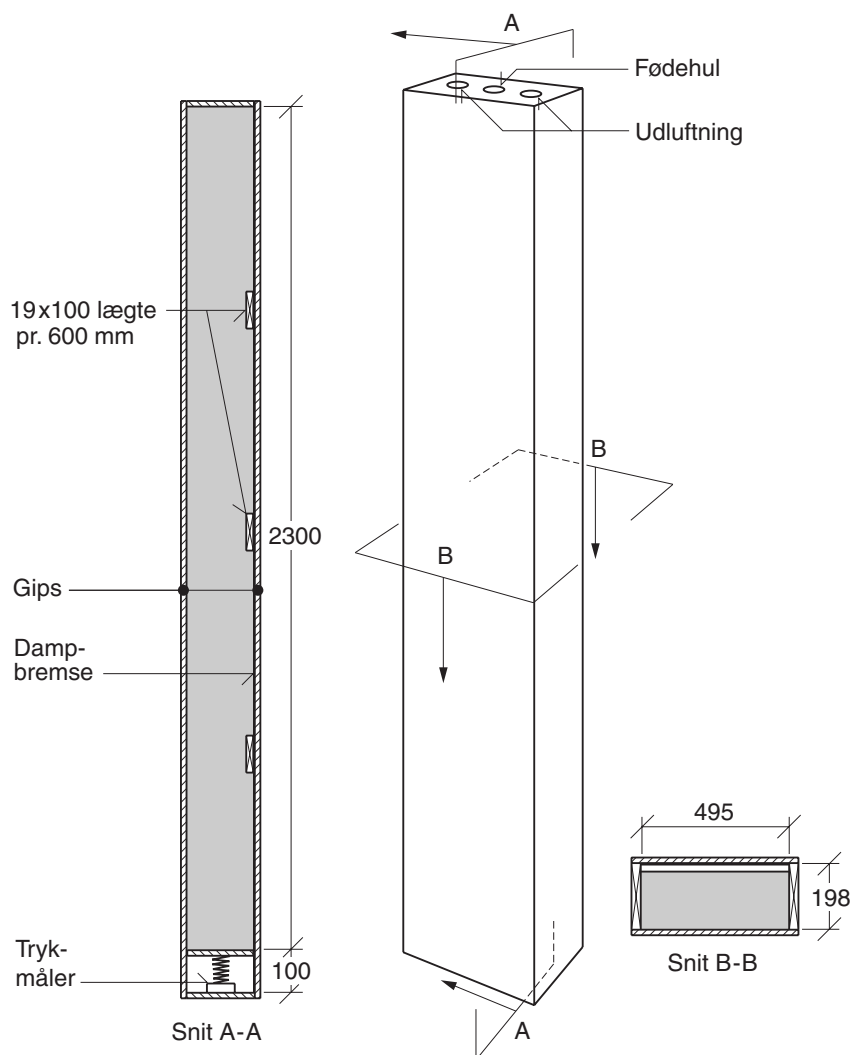
Alle væggene er forsynet med en krafttransducere til måling af bundtrykket. Den anvendte krafttransducer er en NTT (Nordisk Transducer Teknik), type PA6346, med måleområde 0 - 60 N. Krafttransduceren monteres væggens bundrem. Ovenover krafttransduceren placeres en træplade som fungerer som væggens indvendige bund. Langs kanten mellem den indvendige bund og væggens sider tætnes således at det ikke kan komme isoleringsmateriale ind under den indvendige bund. Den indvendige bund kan bevæge sig frit lodret. Signalet fra krafttransduceren forstærkes med en kraftsignalforstærker fra BOFORS af type BKF-1-C.



Figur 4. Skitse med snit af vægkonstruktion med gipsplader fastgjort direkte på væggens træstolpeskelet.

Bundtrykket logges via en skriver af fabrikatet ABB, type SE 120 eller via en datalogger fra Data Electronics, type DT 605. For de to vægge som udsættes for varierende påvirkning af relativ luftfugtighed måles bundtrykket ved hjælp af en datalogger fra Data Electronics af type DT 605. Disse to vægge udstyres endvidere med fugtsensorer af fabrikatet Rotronic, type HygroClip. Disse fugtmålere placeres i isoleringen. En fugtmåler placeres i

vægkonstruktionen med gipsplader ud for midten af træstolpeskelettet, som udgør væggenes side. For væggen med dampbremse placeres fugtmåleren op af dampbremsen midt på væggen. Apparaturet til måling af trykket på bundremmen har en højde på 100 mm. Den endelige indvendige dimension af de anvendte vægge blev: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m.



Figur 5. Skitse med snit af vægkonstruktion med påsatte lægter.

### Udførelse

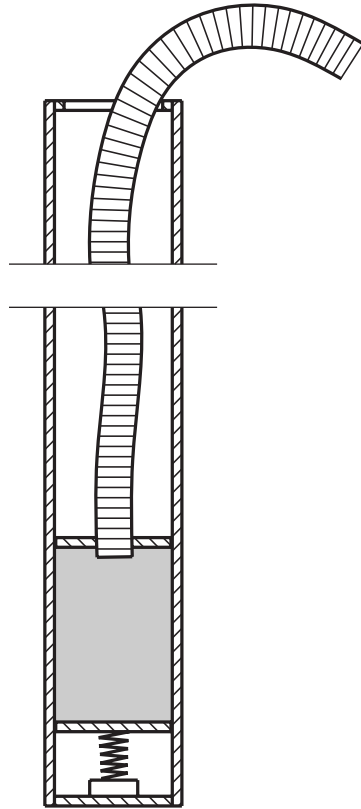
Isoleringsmaterialet indblæses ved hjælp af et indblæsningsudstyr af en type, som anvendt af professionelle installatører af løsfyldsisolering.

Den ønskede densitet af løsfyldsisolering i væggen søges etableret ved henholdsvis en traditionel fyldningsteknik og fyldning med modhold.

Ved fyldning ved hjælp af traditionel fyldningsteknik fyldes væggen ved at føre en fødeslange gennem topremmen og ned til bundremmen af væggen. Under fyldningen trækkes slangen gradvis op, se figur 7 og figur 8.

I topremmen bores et hul, som fødeslangen kan føres gennem. Ved siden af fødeslangens hul placeres huller til udluftning. Hullerne til udluftning og i mellemrummet omkring fødeslangen stoppes med polyuretanskum. Derved tillades luftgennemstrømning medens isoleringsmaterialet holdes inde i vægkonstruktionen, se figur 9.

Ved fyldning med modhold fyldes væggen ved at føre fødeslangen, gennem en plade, placeret parallelt med bundpladen ned til bundremmen af væggen. Under fyldningen trækkes slangen med modhold gradvis op. Pladen, der virker som modhold, skal sikre densiteten af det udlagte isoleringsmateriale, se figur 6.



Figur 6. Skitse af fyldningsteknik med modhold. Isoleringmaterialet placeres under en plade som virker som modhold. Pladens vægt svarer til det tryk der skal til for at isoleringmaterialet indlejres med den rette densitet. Når den rette densitet er etableret under pladen løftes denne gradvist op gennem væggen af løsfyldsisoleringen.

Efter endt indblæsning godkendes den fyldte væg af isolatøren, for at sikre, at væggen er fyldt helt ud og ikke indeholder luftlommer. I tilfælde af utilfredsstillende fyldning tømmes væggen og fyldningen gentages. Under indblæsningen måles trykket fra isoleringen på væggens bundrem. Efter at indblæsningen er gennemført vejes væggen og fronten afmonteres, se figur 10 og figur 11.

Efter at fronten er afmonteret udbores cylindre i forskellige højder af væggen. For væggen uden forskalling udbores 5 × 2 cylindre i forskellige højder af væggen. Cylindrene udbores 125, 635, 1145, 1655 og 2165 mm fra isoleringens overside. For væggen med forskalling udbores 4 × 2 cylindre i forskellige højder af væggen. Cylindrene udbores 125, 900, 1500 og 2165 mm fra isoleringens overside. Der udbores såvel kærner langs den ene side af væggen som i væggens centerlinie. For de kærner der udbores langs den ene side af væggen er afstanden mellem vægside og cylinderkant 25 mm. Isoleringmaterialet anbringes ved 23 °C og 50 % RF indtil endt konditionering og vejning. Cylinderprøverne udtages ved at udbores en kerne i væggen fulde tykkelse med en diameter på 108 mm, se figur 12 og figur 13.

Afslutningsvis beregnes den gennemsnitlige densitet af den indblæste isoleringsmængde. Det anvendte isoleringsmateriale fra væggen fyldes i papiersække, som anbringes ved 23 °C og 50 % RF. Vægten af isoleringsmaterialet bestemmes efter endt konditionering ved vejning, og densiteten beregnes.

Enkelte vægelementer udsættes for varierende påvirkning af relativ luftfugtighed mellem 50 % og 80 %. Et vægelement af hver type, vist i figur 4 og figur 5, indblæses med en forudbestemt ønskede densitet af løsfyldsisolering og opstilles i By og Bygs klimarum. I klimarummet ændres fugtniveauet en gang hver 6 uge. Isoleringmaterialet følges gennem en strimmel plexiglas påsat ved væggens toprem. Løbende opsamles data om isoleringens relative luftfugtighed samt trykket på bundremmen. Når det ønskede fugtniveau er opnået i hele isoleringsmaterialets tværsnit kan fugtniveauet æn-

dres. Afslutningsvis udtages prøver til bestemmelse af den lokale densitet og den totale densitet af det indblæste isoleringsmateriale.



Figur 7. Indblæsning af Papiruld i en væg beklædt med gipsplade. Væggen er en lukket kasse forsynet med top- og bundrem. Topremmen er forsynet med huller. Et hul er placeret centralt i topremmen og bruges til at stikke fødeslangen ned i væggen. Ved siden af hullet til fødeslangen er der placeret huller til luftudtag. Under indblæsningen afdækkes hullerne med polyuretanskum. Før indblæsningen påbegyndes føres fødeslangens munding ned til væggenes bundrem. Under indblæsningen trækkes slangen gradvist op. Væggen er fastholdt under indblæsningen. I det viste tilfælde indblæses løsfyldsisoleringen i en væg med de indvendige dimensioner: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$  uden lægter.



Figur 8. Indblæsning af Papiruld i en væg beklædt med gipsplade. På den ene side af væggen er de øverste 15 cm af beklædningen, erstattet af en plexiglasplade. Gennem plexiglaspladen kan indblæsningen af papirulden følges. Papirulden ses gennem plexiglaspladen som et gråt materiale. I det viste tilfælde indblæses løsfyldsisoleringen i en væg med de indvendige dimensioner: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m uden lægter.



Figur 9. Hulleerne i topremnen til fødeslangen og luftudtag er dækket med polyuretanskum. Afdækningen af hullerne forhindrer papirulden i at blæse tilbage i hovedet på isolatøren. Polyuretanskummet er fastholdt med tape over luftudtaget og ved håndkraft omkring fødeslangen. I det viste tilfælde indblæses løsfyldsisoleringen, Papiruld, i en væg med de indvendige dimensioner: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m uden lægter.





Figur 10. Efter endt indblæsning vejes væggen for at bestemme den omtrentlige gennemsnitlige densitet. I det viste tilfælde er Papiruld indblæst i form af løsfyldsisolering i en væg med de indvendige dimensioner: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$  uden lægter. Den endelige beregnede gennemsnitlige densitet af løsfyldsisoleringen relateres til 50 % relativ luftfugtighed og  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Løsfyldsisoleringen konditioneres i klimarum.



Figur 11. Efter vejning lægges væggen ned og gipspladen, som udgør en af væggens sider, afmonteres således, at den indblæste Papiruld kan inspiceres.



Figur 12. Af den indblæste isolering udtages prøver til bestemmelse af densiteten på forudbestemte steder. Prøverne udtages ved at føre et rør gennem papirulden. Røret er slebet skarpt, således at det med lethed kan skære sig gennem papirulden ved håndkraft. Papirulden fastholdes i den umiddelbare nærhed af stedet for densitetsprøven af en spånplade. Spånpladen tjener ligeledes som styr for røret til prøveudtagningen.





Figur 13. Røret, til at udtage den lokale densitetsprøve med, føres hele vejen gennem papirulden før prøven udtages. Papirulden fastholdes, i den umiddelbare nærhed af stedet for densitetsprøven af en spånplade. Spånpladen tjener ligeledes det formål at være styr for røret til prøveudtagningen.

### **Usikkerhed**

Ved at anvende en professionel installatører af løsfyldisolerung og et professionelt indblæsningsudstyr til indblæsning af isoleringsmaterialet i væggen, sikres en forbehandling og arbejdsprocedure lig en virkelig anvendelse af materialet.

Isoleringsprocessen, håndteringen og tiden inden væggen er isoleret, kan have betydning for de indhentede målinger. Laboratorieforholdene, hvorunder isoleringen indlejres, kan resultere i, at spændingen mod vægsideerne bliver anderledes end ved en konventionel indlejring af isoleringsmaterialet.

## **Analyse af forsøgsdata**

### **Krybningsforhold**

Eksperimentelt målt tøjning, som funktion af det påsatte spændingsniveau for cyklisk varierende relativ luftfugtighed, optegnes. De eksperimentelt målte tøjninger tilpasses logaritmiske funktioner, ved hjælp af mindste kvadraters metode, for derigennem at kunne bestemme et stabilt tøjningsniveau ved den påsatte fugtpåvirkning.

Ved hjælp af mindste kvadraters metode tilpasses en lineær regressionslinie det stabile tøjningsniveau for tre lastniveauer, med fastholdt temperatur og varierende relativ luftfugtighed, for de enkelte isoleringsmaterialer.

Som udgangspunkt må det derfor antages, at det stabile tøjningsniveau er en funktion af isoleringsmaterialernes høje og lave relative luftfugtighed ved cyklisk belastning.

### **Fri sætning**

Eksperimentelt målte flytninger af isoleringsmaterialets overside under cyklisk varierende relativ luftfugtighed registreres som funktion af tiden.

Endvidere registreres den relative luftfugtighed af isoleringsmaterialet. Disse observationer vil vise det omgivende fugtniveaus tidlige indflydelse på isoleringsmaterialets opfugtning. Yderligere beregnes den gennemsnitlige densitet af det udlagte isoleringsmateriale relateret til 23 °C og 50 % RF. Den gennemsnitlige sætning af isoleringsmaterialets overside findes som gennemsnit af tre parallelle forsøg.

De fremkomne målinger sammenholdes med beregninger af den teoretisk bestemte sætning.

## Vægforsøg

Med udgangspunkt i de eksperimentelt bestemte krybningsforhold, sammenholdt med de teoretisk bestemte spændingsforhold, bestemmes den nødvendige densitet for isoleringsmaterialets volumenstabilitet.

Ud fra målingerne beregnes den gennemsnitlige densitet af det indblæste isoleringsmateriale relateret til 23 °C og 50 % RF. Såvel væggenes gennemsnitlige densitet som densiteten, udtaget lokalt i væggen, bestemmes.

Isoleringsmaterialets densitet bestemmes i forskellige højder. Densiteten afbilledes som funktion af væggenes højde for derved at kunne vurdere homogeniteten af det indblæste isoleringsmateriale, ved anvendelse af den benyttede indblæsningsteknik. Den målte densitet for de enkelte forsøg sammenholdes. Den gennemsnitlige densitet af isoleringsmaterialet bestemmes og sammenholdes med den lokalt bestemte densitet i forskellige højder. Densiteten af isoleringsmaterialet relateres til 23 °C og 50 % RF.

Under indblæsningen måles trykket på væggenes bundrem. De målte tryk noteres og sammenholdes med teoretisk bestemte tryk.

Enkelte vægelementer, som isoleres med den efter beregninger ønskede densitet af løsfyldsisolering, testes i By og Bygs klimarum. Vægelementerne udsættes for en relativ luftfugtighed mellem 50 % og 80 %. Resultaterne sammenholdes med de teoretisk bestemte.

# Resultater

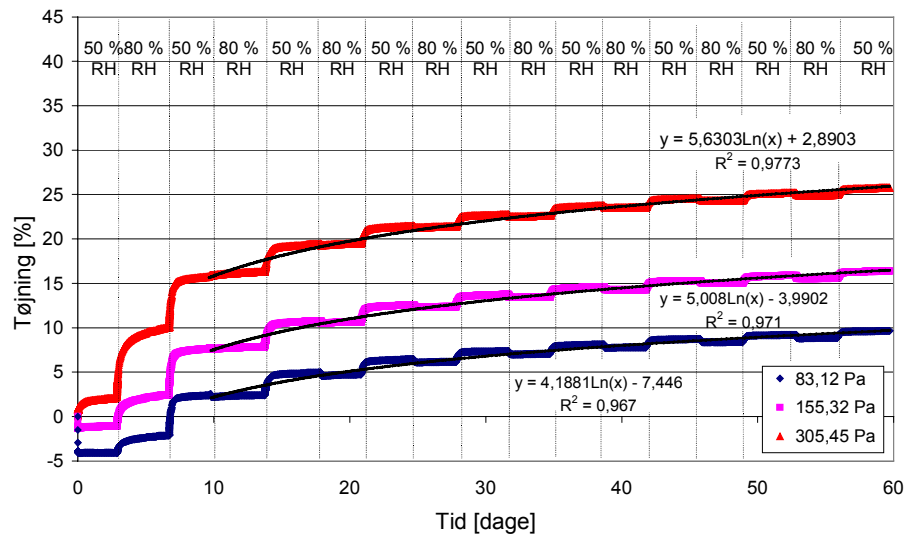
## Krybningsforhold

Figur 14 viser et tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$  påvirket af varierende relativ luftfugtighed. Den relative luftfugtighed fremgår af figuren. Et skift i relativ luftfugtighed er vist ved en lodret linie i figuren. Isoleringmaterialet var påsat en konstant last på henholdsvis 63,12, 135,32 og 285,45 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 20 Pa. Ved forsøgets start er den relative luftfugtighed 50 %, og forsøget er udført ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ligeledes viser figur 14, for hvert lastniveau, en logaritmisk funktion fundet ved mindste kvadraters metode. De enkelte logaritmiske funktioner er tilpasset data fra den fjerde fugtcyklus. Den logaritmiske funktion er givet ved:

$$\varepsilon = a \ln(t) + X_0$$

hvor  $\varepsilon$  (%) er tøjningen,  $a$  (%) og  $X_0$  (%) er konstanter, og  $t$  (dag) er tiden.

Tøjnings-tids-diagram for Dansk hør, Papiruld, Rockwool og Thermocell er vist i bilag B.



Figur 14. Tøjnings-tids-diagram for Ekofiber indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$  påvirket til en relativ luftfugtighed varierende mellem 50 % og 80 %. Isoleringmaterialet er påsat en konstant last på henholdsvis 63,12, 135,32, 285,45 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 20 Pa. Forsøget er udført ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Tabel 2 viser tøjningsparametrene  $a$  og  $X_0$  for de enkelte logaritmiske funktioner, som er tilpasset data fra og med fjerde fugtcyklevariation. Tøjningsparametrene samt korrelationskoefficienten  $R^2$  er vist for de enkelte isoleringsmaterialer og de anvendte lastniveauer.

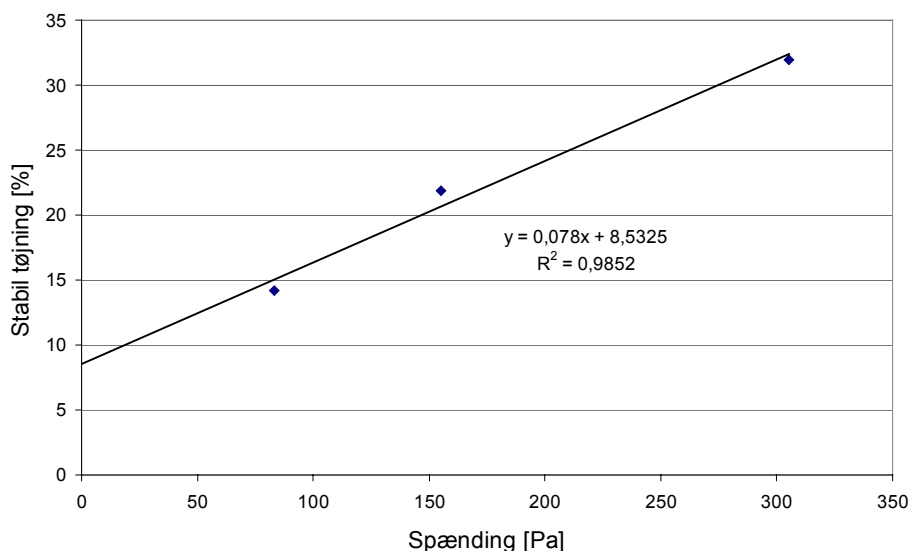
Tabel 2. Tøjningsparametrene  $a$  og  $X_0$  for de enkelte materialer til tre forskellige lastniveauer, Parametrene er fundet ved mindste kvadraters metode for data fra og med fjerde fugtskifte. Korrelationskoefficienten  $R^2$  er angivet.

Parametre til bestemmelse af tøjning				
	Last [Pa]	$a$ [%]	$X_0$ [%]	$R^2$
Ekofiber	83,12	4,19	-7,45	0,9670
	155,32	5,01	-3,99	0,9710
	305,45	5,63	2,89	0,9773
Dansk hør	80,66	4,81	-15,04	0,9418
	149,91	5,33	-5,27	0,9582
	299,50	5,77	3,87	0,9651
Papiruld	83,97	4,14	-8,73	0,9675
	154,94	5,23	-3,73	0,9749
	304,73	5,67	3,83	0,9764
Rockwool	80,66	0,023	0,14	0,0565
	149,91	0,069	2,83	0,4301
	299,50	0,136	13,23	0,6168
Thermocell	69,58	7,01	-26,37	0,9847
	138,79	8,36	-22,02	0,9881
	287,36	8,81	-15,09	0,9910

Med kendskab til tøjnings-tids-relationerne til tre lastniveauer er det muligt at beregne tøjningen til et tøjningsniveau, som for de enkelte lastniveauer kan betragtes som værende stabilt. Med de eksperimentelt bestemte ligninger, til bestemmelse af tøjningen som funktion af tid og RF cykler, er 175 dage, hvilket svarer til 25 fugtvariationer, valgt til at repræsentere et stabilt tøjningsniveau for disse eksperimenter. Det beregnede stabile tøjningsniveau for tre lastniveauer er for Ekofiber vist i figur 15. Ligeledes viser figur 15 en ret linies ligning tilpasset dataene ved mindste kvadraters metode. Liniens ligning er givet ved:

$$\varepsilon = b \sigma + Y_0$$

hvor  $\varepsilon$  (%) er tøjningen,  $b$  (%m<sup>2</sup>/N) og  $Y_0$  (%) er konstanter.



Figur 15. Det stabile tøjningsniveau som funktion af den påsatte spænding for Ekofiber. Det stabile tøjningsniveau er bestemt som tøjningen efter 25 fugtsvingninger.

Tabel 3 viser tøjningsparametrene  $b$  og  $Y_0$  for de enkelte liniers ligninger, for de enkelte isoleringsmaterialer. Korrelationskoefficienten  $R^2$  er ligeledes angivet.

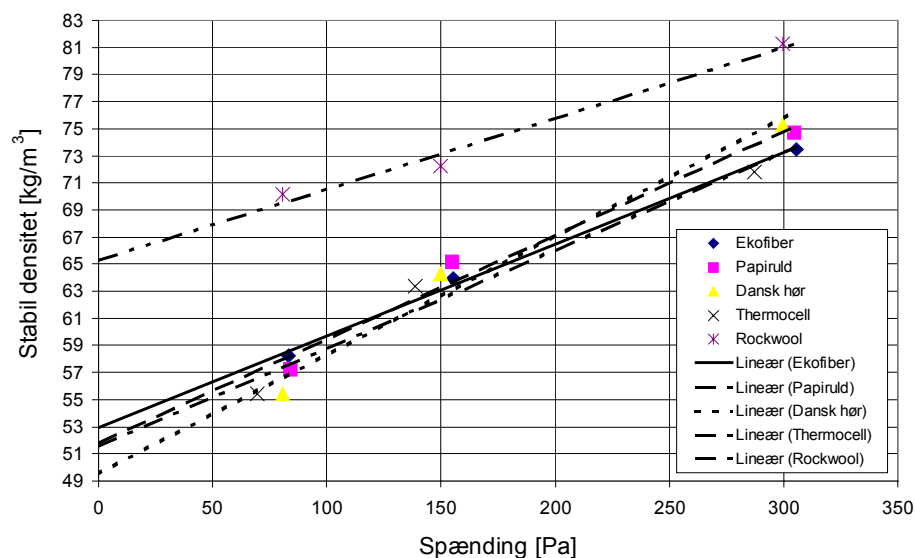
Tabel 3. Tøjningsparametrene  $b$  og  $Y_0$  for de enkelte materialer, Parametrene er fundet ved mindste kvadraters metode. Korrelationskoefficienten  $R^2$  er angivet.

Parametre til bestemmelse af stabil tøjning			
	$b$ [%m <sup>2</sup> /N]	$Y_0$ [%]	$R^2$
Ekofiber	0,0780	8,53	0,9852
Dansk hør	0,1036	3,60	0,9459
Papiruld	0,0885	6,98	0,9497
Rockwool	0,0640	-5,51	0,9878
Thermocell	0,0893	5,70	0,9319

Med kendskab til det stabile tøjningsniveau, som funktion af spændingen, er det muligt at beregne densiteten til et spændingsniveau, der kan betragtes som værende stabilt. Den stabile densitet af isoleringsmaterialet er beregnet som densiteten af isoleringsmaterialet påvirket til den en-aksede tøjning svarende til den stabile tøjning. Den beregnede stabile densitet, som funktion af spændingsniveauet, er for Ekofiber, Dansk hør, Papiruld, Rockwool og Thermocell vist i figur 16. Ligeledes viser figur 16 en ret liniens ligning tilpasset dataene med mindste kvadraters metode. Liniens ligning er givet ved:

$$\rho_{v-s} = c \sigma_{v-s} + Z_0$$

hvor  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) er densiteten,  $c$  (kg/Nm) og  $Z_0$  (kg/m<sup>3</sup>) er konstanter.



Figur 16. Den stabile densitet som funktion af den påsatte spænding for de enkelte materialer. Den stabile densitet er beregnet ud fra tøjningen efter 25 fugtsvingninger.

Tabel 4 viser parametrene  $c$  og  $Z_0$  for de enkelte liniers ligning, for de enkelte isoleringsmaterialer. Korrelationskoefficienten  $R^2$  er ligeledes angivet.

Tabel 4. Parametrene  $c$  og  $Z_0$  for de enkelte materialer. Parametrene er fundet ved mindste kvadraters metode. Korrelationskoefficienten  $R^2$  er angivet.

Parametre til bestemmelse af stabil densitet			
	$c$ [kg/Nm]	$Z_0$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$R^2$
Ekofiber	0,0677	52,95	0,9966
Dansk hør	0,0882	49,42	0,9787
Papiruld	0,0769	51,75	0,9779
Rockwool	0,0524	65,30	0,9819
Thermocell	0,0723	51,58	0,9645

## Beregnet volumenstabil densitet for en væg

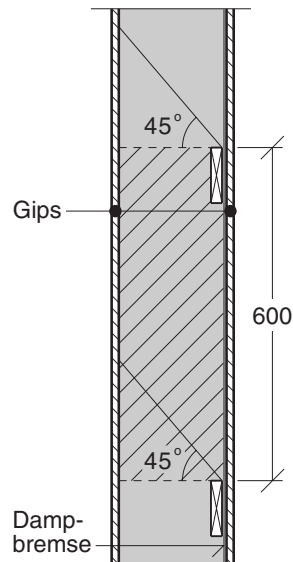
Fremgangsmåden, hvorefter den nødvendige densitet af et granulært isoleringsmateriale kan bestemmes for en given vægkonstruktion, er tidligere beskrevet i (Rasmussen, 2001b). Det beskrevne designværktøj kan ligeledes anvendes i det tilfælde hvor densiteten af isoleringsmaterialet dimensioneres efter indflydelsen fra varierende fugtpåvirkninger.

I det efterfølgende beregnes den volumenstabile densitet for en række materialer indlejret i en væg af gipsplader. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Dimensionerne refererer til væggenes indvendige dimensioner.

Ligeledes beregnes den volumenstabile densitet for de tilsvarende materialer, indlejret i en væg af gipsplader med lægter monteret pr. 0,6 m langs den ene side af væggen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Beregningerne foretages efter at de monterede lægter aflaster isoleringsmaterialet således at den beregningsmæssigt dimensioneres som en væg af gips med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  0,6 m, se figur 17.

Endvidere foretages der beregninger til bestemmelse af den volumenstabile densitet i det tilfælde hvor en dampbremse placeres mod isoleringen bag lægterne, som er placeret langs den ene side af væggen pr 0,6 m. I det tilfælde har væggen dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  0,6 m. Ikke anførte parametre som friktionskoefficienter og horisontaltryksforhold er at finde i (Rasmussen, 2001b).

For vægkonstruktionen med påsatte lægter antages det, at disse lægter vil kunne inddele det indblæste løsfyldsisoleringsmaterialet i sektioner svarende til afstanden mellem lægterne. Dette vil resultere i, at isoleringsmaterialet vil hvile af på lægten i stedet for at ligge af mod det underliggende isoleringsmateriale. Teoretisk set vil der ved denne antagelse ikke blive overført spændinger mellem to på hinanden ovenover liggende sektioner af isoleringsmaterialet. For at simplificere beregningerne antages materialet at udgøre et kvadratisk udsnit. Ligeledes er der ved beregningerne, hvor en dampbremse er monteret, anvendt en friktionskoefficient svarende til gennemsnittet af friktionskoefficienterne for isoleringsmateriale/gipsplade og dampbremse/isoleringsmateriale.



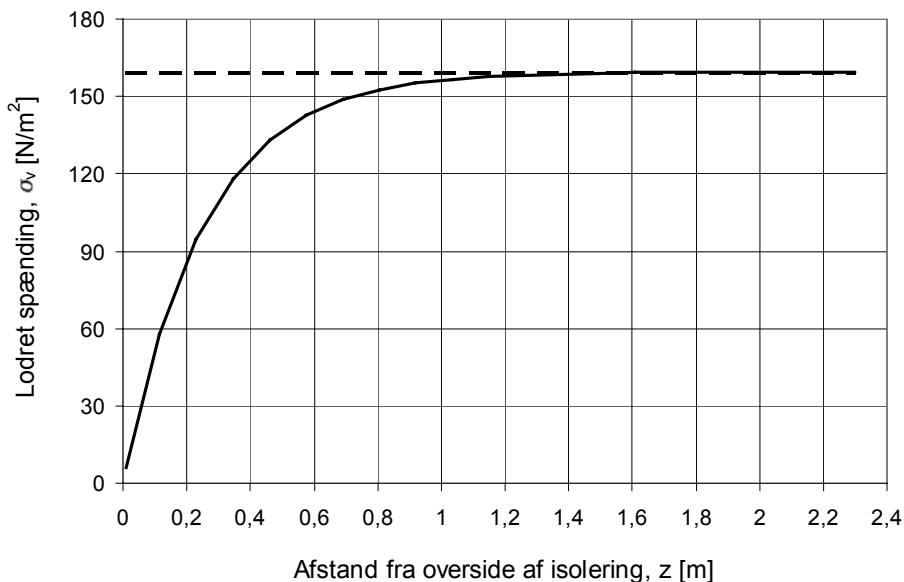
Figur 17. Vægkonstruktion med påsatte lægter. De beregningsmæssige dimensioner er vist skraveret på figuren.

### Dimensionering efter den højeste spændingspåvirkning

Designværktøjet, beskrevet i (Rasmussen, 2001b), kan anvendes, således at der ikke tages højde for isoleringsmaterialets reversible egenskaber. I praksis vil det sige, at antagelsen om at isoleringsmaterialet, under hele sin levetid befinder sig i det reversible tøjningsområde ikke benyttes. Dette svarer til, at isoleringsmaterialerne taber deres elastiske egenskaber ved gentagne cykliske fugtvariationer. Ved denne antagelse vil det hårdest belastede spændingsniveau være dimensionerende, da isoleringsmaterialet antages ikke at kunne ekspandere ved spændingsfald. Da forudsætningen om homogen densitet, af det indlejrede isoleringsmateriale, fastholdes, må isoleringsmaterialet indlejres med en densitet, som forbliver volumenstabil ved det højeste spændingsniveau. Derved vil isoleringsmaterialets volumen forblive konstant i den lukkede konstruktion og derved udfylde konstruktionen. I det følgende vil dette princip blive anvendt.

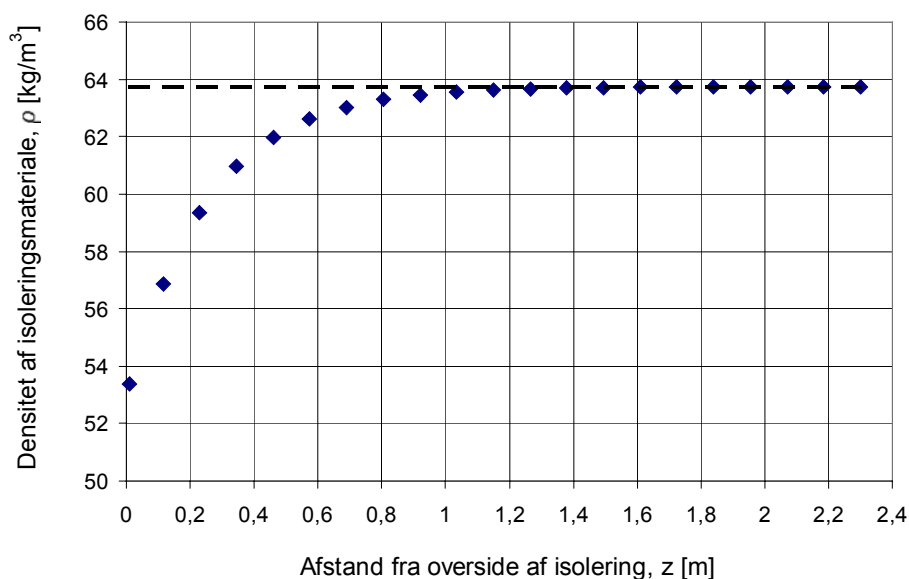
### Vægkonstruktion uden lægter

Designværktøjet, beskrevet i (Rasmussen, 2001b), foreskriver, at væggen specificeres og karakteriseres med hensyn til størrelse og materialer. For de følgende beregninger anvendes en væg med gipsplader med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Endvidere foreskrives valg af isoleringsmateriale samt kendskab til horisontaltrykkforholdet og friktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialet og vægmaterialet. Anvendes Ekofiber med et horisontaltryksforhold lig  $0,42$  og en friktionskoefficient på  $0,66$  mellem Ekofiber og gips, kan den lodrette spænding, som funktion af afstanden fra isoleringens overside, bestemmes for en valgt densitet med ligning (3). Ved disse beregninger antages spændingen at være lig nul mod væggenes toprem. Den stabile spænding for den valgte densitet af Ekofiber bestemmes, se figur 16. Ved en iterativ proces beregnes den nødvendige densitet af isoleringsmaterialet i den pågældende væg. Figur 18 og figur 19 viser resultatet af en iterativ beregning. Den fuldt optrukne linie i figur 18 er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal etableres i isoleringsmaterialet for at undgå tøjninger i det hårdest belastede snit af væggen.



Figur 18. Den beregnede lodrette spænding i Ekofiber isoleret væg af gipsplade som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Den fuldt optrukne linie er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding for det hårdest belastede snit i væggen.

Den beregnede nødvendige densitet af Ekofiber, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet, er vist i figur 19. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af isoleringsmaterialet. Den stiplede linie angiver den nødvendige densiteten beregnet efter det hårdest belastede spændingsniveau. Den nødvendige densitet er beregnet til  $63,8 \text{ kg/m}^3$ .



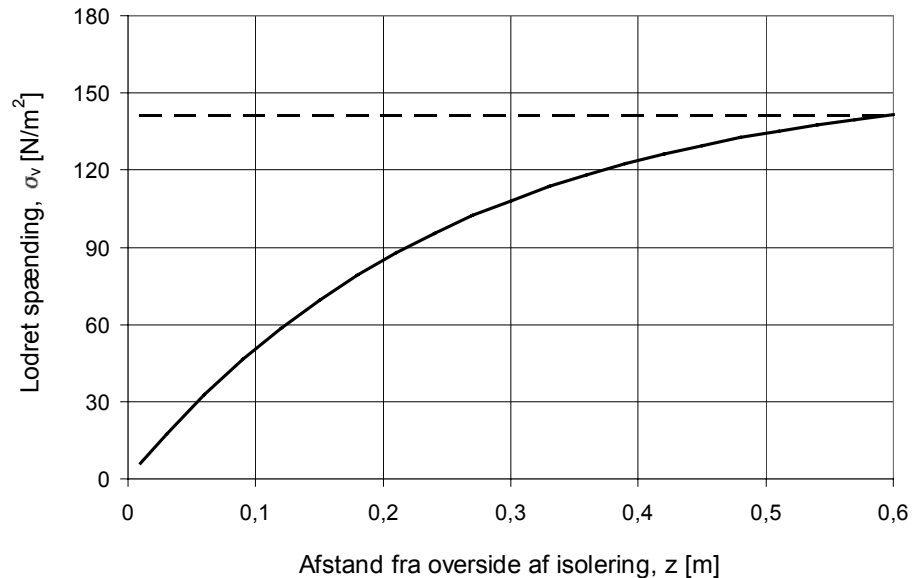
Figur 19. Den beregnede nødvendige densitet af Ekofiber som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af isoleringsmaterialet. Den stiplede linie angiver den stabile densitet relateret til det højeste spændingsniveau, hvilket også er det hårdest belastede snit i væggen.

#### Med lægter

På tilsvarende vis, som beskrevet ovenfor, benyttes designværktøjet, givet i (Rasmussen, 2001b), til at dimensionere den nødvendige densitet for en væg med gipsplader med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$  forsynet med lægter pr.  $0,6 \text{ m}$ . Væggen beregnes under hensyntagen til, at de monterede lægter aflaster isoleringsmaterialet således at den beregningsmæssigt dimensioneres som en væg af gips med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m}$

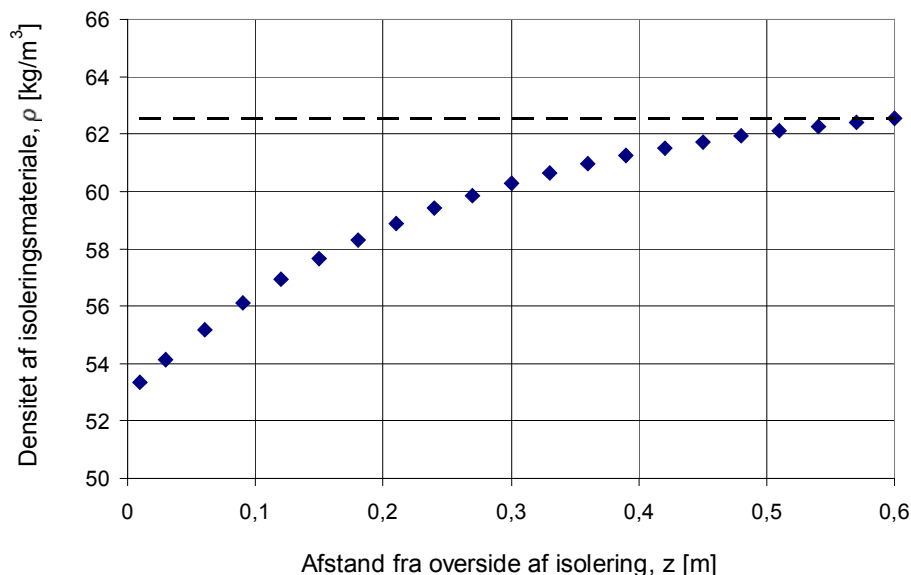


× 0,6 m, se figur 17. Isoleringsmaterialet Ekofiber anvendes ved beregningseksemplet. Den lodrette spænding, som funktion af afstanden fra væggen overside og lægter, bestemmes for en valgt densitet med ligning (3). Ved disse beregninger antages isoleringsmaterialet indlejret i væggen med en homogen densitet. For disse beregninger antages endvidere, at spændingen er lig nul mod væggen toprem og lægter. Den stabile spænding, for den valgte densitet af Ekofiber bestemmes, se figur 16. Ved en iterativ proces bestemmes den nødvendige densitet af Ekofiber. Figur 20 og figur 21 viser resultatet af en iterativ beregning. Den fuldt optrukne linie i figur 20 er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal etableres i isoleringsmaterialet for at undgå tøjninger i det hårdest belastede snit af væggen.



Figur 20. Den beregnede lodrette spænding i en væg, af gipsplade med lægter pr. 0,6 meter, isoleret med Ekofiber, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet fra forrige lægte eller topremmen. Væggen har dimensionerne: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 0,6 m. Den fuldt optrukne linie er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal etableres i isoleringsmaterialet for at undgå tøjninger, i det hårdest belastede snit af væggen.

Den beregnede nødvendige densitet af Ekofiber, som funktion af afstanden fra en lægte, er vist i figur 21. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af lægten eller topremmen. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal etableres i isoleringsmaterialet for at undgå tøjninger i det hårdest belastede snit af væggen. Den nødvendige densitet er beregnet til 62,5 kg/m<sup>3</sup>.



Figur 21. Den beregnede nødvendige densitet af en gipspladevæg med lægter pr. 0,6 meter, isoleret med Ekofiber, som funktion af afstanden fra den antagne overside af isoleringsmaterialet. Væggen har dimensionerne: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 0,6 m. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af isoleringsmaterialet. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal etableres i isoleringsmaterialet for at undgå tøjninger i det hårdest belastede snit af væggen.

Tabel 5 viser resultater fra beregninger af den nødvendige densitet for en række isoleringsmaterialer. Beregningerne er foretaget for en væg af gipsplade med dimensionerne: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m og for en væg af gipsplade med lægter pr. 0,6 m. På grund af lægterne antages væggen beregningsmæssigt at have dimensionerne: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 0,6 m. Ved disse beregninger er densiteten bestemt ud fra det højeste beregnede spændingsniveau i væggen.

Tabel 5. Den beregnede nødvendige densitet af gipspladevæg isoleret med henholdsvis Ekofiber, Dansk hør, Papiruld, Rockwool og Thermocell. Den nødvendige densitet er beregnet ud fra det højeste beregnede spændingsniveau i væggen. Densiteten er beregnet for en væg uden lægter med dimensionerne: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Ligeledes er den nødvendige densitet beregnet for en væg med lægter med dimensionerne: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 0,6 m.

Beregnet nødvendig densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	Beregnet nødvendig densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Uden lægter	Med lægter
Ekofiber	63,8	62,5
Dansk hør	68,2	64,5
Papiruld	65,0	63,3
Rockwool	78,7	76,2
Thermocell	62,3	61,2

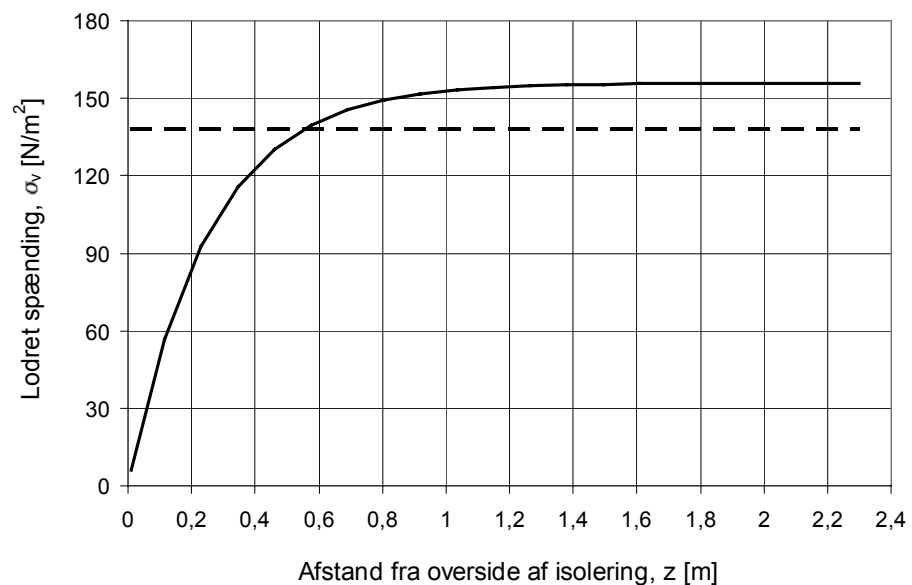
### Dimensionering efter en optimeret energibetragtning

Designværktøjet, beskrevet i (Rasmussen, 2001b), lægger op til en dimensionering af den volumenstabile densitet for en given væg ved, enten at udnytte isoleringsmaterialets reversible egenskaber eller ved at se bort fra isoleringsmaterialets reversible egenskaber. Ved at indlejre isoleringsmaterialet med en densitet, som er så høj, at konsolideringens andel af den momentane deformation er elimineret, vil isoleringsmaterialet være i sit reversible tøjningsområde. At isoleringsmaterialet er indlejret med en densitet, som sikrer, at materialet er i sit reversible tøjningsområde, betyder, at materialets volumen forbliver konstant i den lukkede konstruktion, og derved udfylder konstruktionen. Voluminet forbliver konstant i den lukkede konstruktion, da isoleringsmaterialet til stadighed udøver et tryk på væggenes indersider, som er

større end, eller lig, nul. Forudsætningen for denne antagelse er at isoleringsmaterialet, under hele sin levetid, befinder sig i det reversible tøjningsområde. Dette princip kan udnyttes ved at dimensionere isoleringsmaterialets densitet i en given væg ud fra en energibetragtning som optimeres. I det følgende vil dette princip blive anvendt.

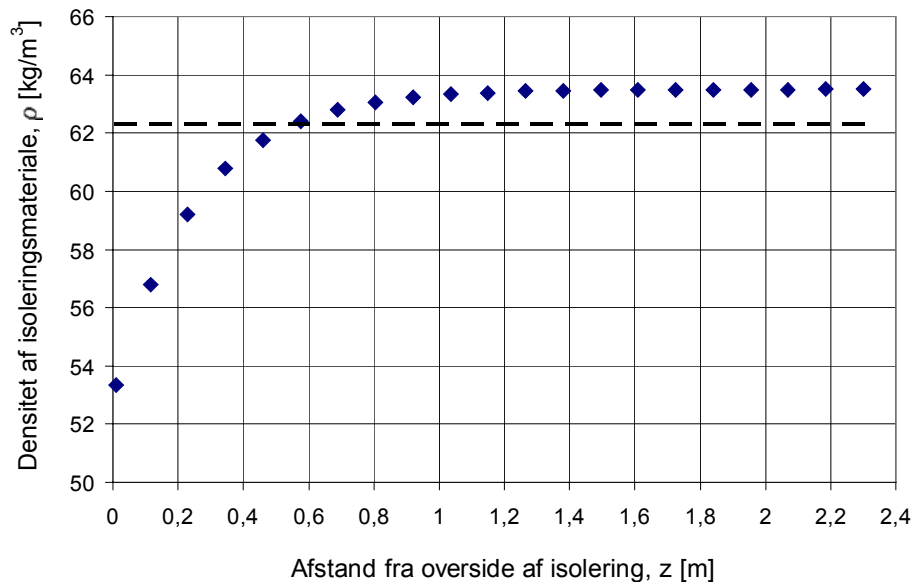
### Uden lægter

I de efterfølgende beregninger ses der på en væg med gipsplader med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Anvendes Ekofiber kan den lodrette spænding, som funktion af afstanden fra væggens overside, bestemmes for en valgt densitet med ligning (3). Ved disse beregninger antages isoleringsmaterialet indlejret i væggen med en homogen densitet. Endvidere antages spændingen at være lig nul mod væggens toprem. Da der er skabt kendskab til den stabile densitet, som funktion af spændingsbelastningen for Ekofiber, kan spændingen for den valgte densitet af isoleringsmaterialet bestemmes, se figur 16. Ved en iterativ proces kan den nødvendige densitet af isoleringsmaterialet i den pågældende væg således bestemmes. Figur 22 og figur 23 viser resultatet af en iterativ beregning. Den fuldt optrukne linie i figur 22 er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal til for at opfylde energiligningen, ligning (6). Energiligningen er opfyldt, når arealet under den fuldt optrukne linie er lig arealet under den stiplede linie.



Figur 22. Den beregnede lodrette spænding i en gipspladevæg, isoleret med Ekofiber, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Den fuldt optrukne linie er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal til for at opfylde energiligningen. Energiligningen siger, at arealet under den fuldt optrukne linie skal være lig arealet under den stiplede linie.

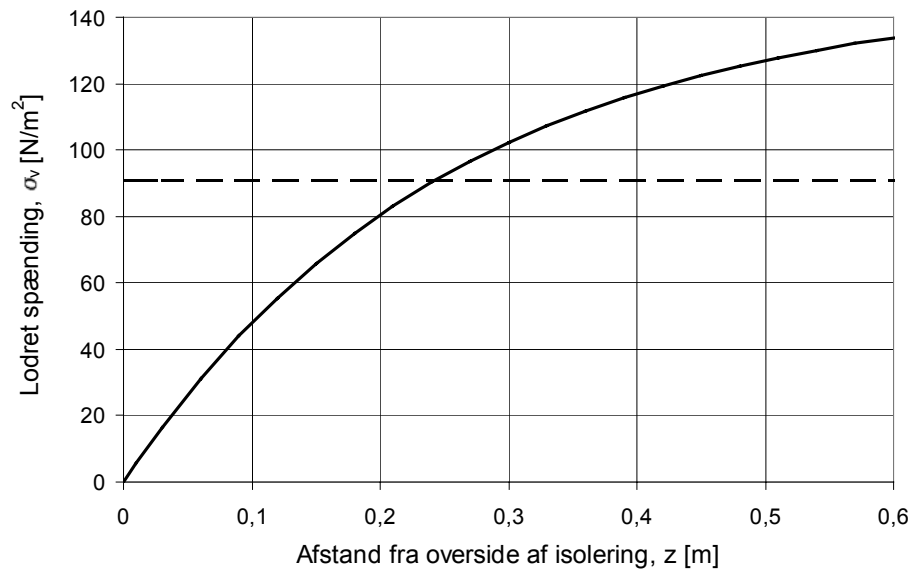
Den beregnede nødvendige densitet af Ekofiber, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet, er vist i figur 23. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af isoleringsmaterialet. Den stiplede linie angiver den nødvendige densitet, beregnet efter energiligningen, for det stabile spændingsniveau. Den nødvendige densitet er beregnet til  $62,3 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 23. Den beregnede nødvendige densitet af Ekofiber, som funktion af afstanden, fra oversiden af isoleringsmaterialet. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af isoleringsmaterialet. Den stiplede linie angiver densiteten for det efter energiligningen nødvendige stabile spændingsniveau.

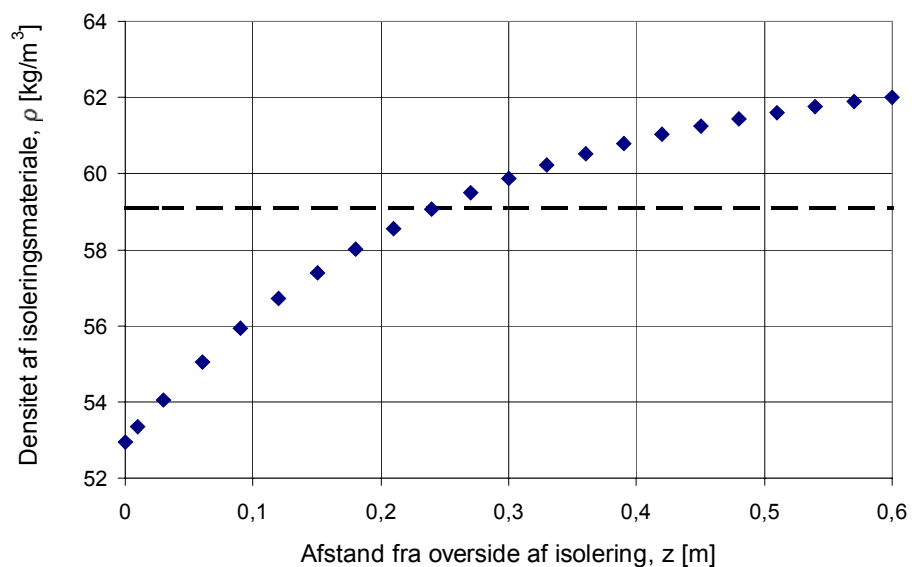
#### Med lægter

På tilsvarende vis som beskrevet ovenfor benyttes designværktøjet, givet i (Rasmussen, 2001b), til at dimensionere den nødvendige densitet for en væg med gipsplader med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m, forsynet med lægter pr. 0,6 m. Væggen beregnes under antagelse af, at de monterede lægter aflaster isoleringsmaterialet, således at den beregningsmæssigt dimensioneres som en væg af gips med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  0,6 m. Isoleringsmaterialet Ekofiber anvendes ved beregningseksemplet. Den lodrette spænding, som funktion af afstanden fra væggen overside og lægter, bestemmes for en valgt densitet med ligning (3). Ved disse beregninger antages isoleringsmaterialet indlejret i væggen med en homogen densitet. Endvidere antages spændingen at være lig nul mod væggen topem og lægter. Spændingen for den valgte densitet af Ekofiber bestemmes, se figur 16. Ved en iterativ proces bestemmes den nødvendige densitet af Ekofiber. Figur 24 og figur 25 viser resultatet af den iterative beregning. Den fuldt optrukne linie i figur 24 er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal til for at opfylde energiligningen. Energiligningen er opfyldt, når arealet under den fuldt optrukne linie er lig arealet under den stiplede linie.



Figur 24. Den beregnede lodrette spænding i en gipspladevæg med lægter pr. 0,6 meter isoleret med Ekofiber, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet fra forrige lægte eller topremmen. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  0,6 m. Den fuldt optrukne linie er den beregnede spænding. Den stiplede linie er den konstante spænding, der skal til for at opfylde energiligningen. Energiligningen siger, at arealet under den fuldt optrukne linie skal være lig arealet under den stiplede linie.

Den beregnede nødvendige densitet af Ekofiber, som funktion af afstanden fra en lægte eller toprem, er vist i figur 25. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af lægten. Den stiplede linie angiver den nødvendige densiteten beregnet efter energiligningen for det stabile spændingsniveau. Den nødvendige densitet er beregnet til 59,1 kg/m<sup>3</sup>.



Figur 25. Den beregnede nødvendige densitet i en gipspladevæg med lægter pr. 0,6 meter, isoleret med Ekofiber, som funktion af afstanden fra den antagne oversiden af isoleringsmaterialet. Væggen har dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  0,6 m. Punkterne angiver den beregnede nødvendige densitet i udvalgte afstande fra oversiden af isoleringsmaterialet. Den stiplede linie angiver densiteten for det efter energiligningen nødvendige stabile spændingsniveau.

Tabel 6 viser resultater fra beregninger af den nødvendige densitet for en række isoleringsmaterialer. Beregningerne er foretaget for en væg af gipsplade med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m og for en væg af gipsplade med lægter pr. 0,6 m. For denne væg antages væggen at have dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  0,6 m.

Tabel 6. Den beregnede nødvendige densitet for en række isoleringsmaterialer indlejret i en væg af gipsplade. Den nødvendige densitet er beregnet ud fra energiligningen. Densiteten er beregnet for en væg uden lægter med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Ligeledes er den nødvendige densitet beregnet for en væg med lægter med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ .

Beregnet nødvendig densitet [kg/m <sup>3</sup> ]		
	Uden lægter	Med lægter
Ekofiber	62,3	59,1
Dansk hør	64,8	58,3
Papiruld	63,1	59,0
Rockwool	76,4	71,9
Thermocell	61,0	57,9

Tabel 7 viser resultater fra beregninger af den nødvendige densitet, for et udsnit af de anvendte isoleringsmaterialer. Beregningerne er foretaget for en væg af gipsplade med dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$  med lægter pr.  $0,6 \text{ m}$ . For denne væg antages væggen at have dimensionerne: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ . Endvidere er væggen forsynet med en dampbremse mod isoleringen på den side af væggen, hvor lægterne er placeret. Den anvendte dampbremse er af typen ØKO b-2. Tabel 7 indeholder ligeledes den eksperimentelt bestemte friktionskoefficient,  $\mu$  for de enkelte kombinationer af isoleringsmaterialet og dampbremsen. Ligeledes indeholder tabel 7 den ved beregningerne anvendte friktionskoefficient. Den ved beregningerne anvendte friktionskoefficient er den, beregnet efter areal, gennemsnitlige friktionskoefficient mellem isoleringsmaterialet og væggenes indvendige overflade. Friktionskoefficient er bestemt ved anvendelse af Jenikes forskydningscelle (Rasmussen, 2001b). En optimeret energibetragtning ligger til grund for beregningerne.

Tabel 7. Den beregnede nødvendige densitet af en væg af gipsplade, isoleret med henholdsvis Ekofiber, Dansk hør, Papiruld og Thermocell med dampbremse mod isoleringen på den ene side af væggen med lægter pr.  $0,6 \text{ meter}$ . Den nødvendige densitet er beregnet ud fra energiligningen. Ligeledes er den eksperimentelt bestemte friktionskoefficient og den ved beregningerne anvendte friktionskoefficient angivet. Den eksperimentelt bestemte friktionskoefficient  $\mu$  er fundet for en række kombinationer af isoleringsmateriale og dampbremsen ØKO b-2.

Beregnet nødvendig densitet			
	$\mu$	$\mu$ ved beregning	Med lægter [kg/m <sup>3</sup> ]
Ekofiber	0,58	0,62	59,4
Dansk hør	0,45	0,53	58,9
Papiruld	0,57	0,62	59,4
Thermocell	0,64	0,78	58,5

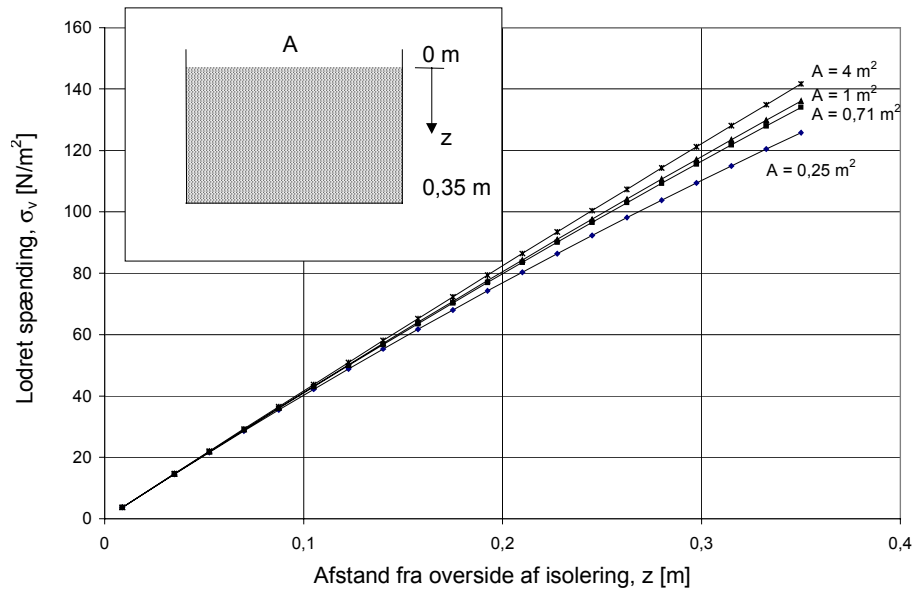
## Beregnet tøjning for løst udlagt loftisolering

Fremgangsmåden, hvorefter tøjningen af det løst udlagte isoleringsmateriale bestemmes efter, er på mange måder lig den viste fremgangsmåde til bestemmelse af volumenstabil densitet for en væg.

I det følgende beregnes sætningen af et udlagt isoleringsmateriale for en række tykkelser af det udlagte isoleringsmateriale med en række densiteter. Beregningerne er foretaget for Ekofiber løst udlagt i en kasse med bund af gipsplader og forsider af  $2 \text{ mm}$  aluminium, se figur 3.

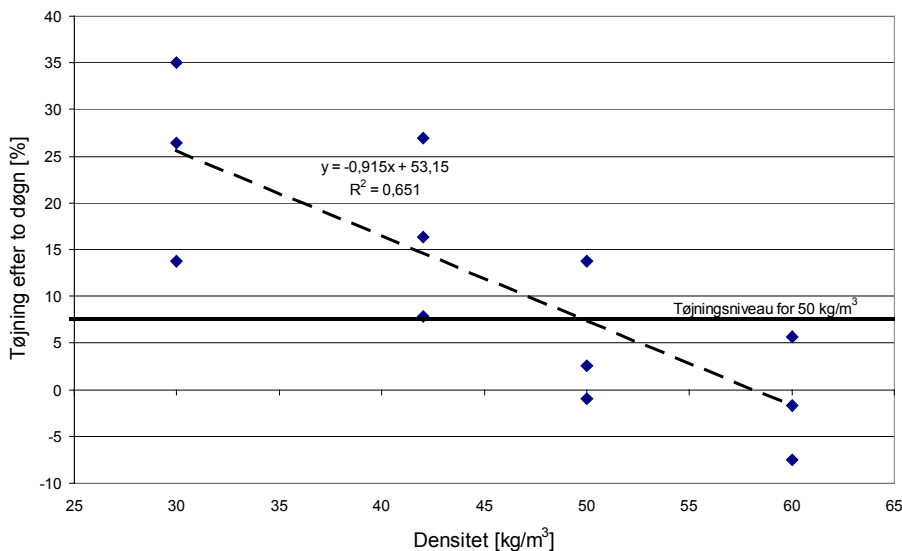
Den eksperimentelt bestemte friktionskoefficient,  $\mu$  mellem Ekofiber og aluminiumspladerne er bestemt til  $0,28$ . Friktionskoefficienten er bestemt ved anvendelse af Jenikes forskydningscelle (Rasmussen, 2001b). Anvendes et horisontaltryksforhold for Ekofiber lig  $0,42$  kan den lodrette spænding, som funktion af afstanden fra isoleringens overside, bestemmes for en valgt

densitet med ligning (3). Som udgangspunkt for beregningerne anvendes en densitet af det udlagte isoleringsmateriale på  $43 \text{ kg/m}^3$ . Ved disse beregninger antages spændingerne at være lig nul mod isoleringsmaterialets overside. Figur 26 viser den beregnede lodrette spænding, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet, for en række kvadratiske kasser med sidelængden på henholdsvis 0,5, 0,85, 1 og 2 m. De enkelte kasser er i figuren betegnet med deres respektive overfladearealer, A.

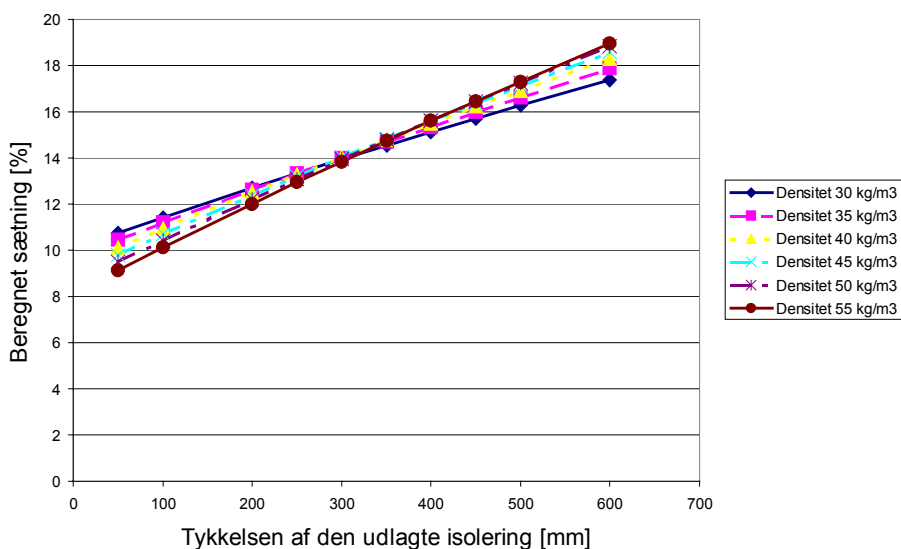


Figur 26. Den beregnede lodrette spænding i Ekofiber isoleret kasse af forskellig størrelse som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet. Kassen er kvadratisk med sidelængde på henholdsvis 0,5, 0,85, 1 og 2 m. Beregningerne er foretaget for Ekofiber med en densitet på  $43 \text{ kg/m}^3$ .

Med kendskab til den lodrette spænding, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringsmaterialet og det stabile tøjningsniveau som funktion af den påsatte spænding (se figur 15), kan sætningen af det udlagte isoleringsmateriale beregnes. Det stabile tøjningsniveau er bestemt som tøjningen efter 25 fugtsvingninger mellem 50 og 80 % relativ luftfugtighed. Sætningen beregnes som integralet af den stabile tøjning fra oversiden til undersiden af isoleringsmaterialet. Tøjningen for isoleringsmaterialet er en funktion af den spænding, som materialet er påvirket af. Den beregnede spænding i isoleringsmaterialet går fra 0 ved den frie overflade af isoleringsmaterialet til den maksimale spænding beregnet ved overfladen af kassens bund. Den beregnede sætning er derpå sat i relation til den udlagte tykkelse af isoleringslaget. Sætningen er beregnet for en række isoleringstykkelser udlagt med forskellig densitet. Figur 28 viser den beregnede sætning, efter 25 fugtsvingninger mellem 50 og 80 % relativ luftfugtighed, for Ekofiber som funktion af tykkelsen af det udlagte isoleringslag. Beregningerne er foretaget for en række forskellige densiteter af det udlagte isoleringslag. For den beregnede sætning foretages en korrektion af tøjningen i relation til densiteten. Korrektionen fås ved en lineær interpolation af dataene for tøjning over to døgn som funktion af densiteten givet i tabel 3 (Rasmussen, 2001b). Korrektionen er lig 0 for densiteten  $50 \text{ kg/m}^3$ . Dataene for tøjning over to døgn, som funktion af densiteten givet i tabel 3 (Rasmussen, 2001b), er vist i figur 27.



Figur 27. Tøjning efter to døgn som funktion af densiteten af den udlagte løsfyldisoleringsmateriale (Rasmussen, 2001b). Resultaterne er vist for Ekofiber.



Figur 28. Den beregnede sætning af Ekofiber efter 25 fugtsvingninger som funktion af tykkelsen af det udlagte isoleringslag. Beregningerne er foretaget for en række densiteter af det udlagte isoleringsmateriale.

## Fri sætning

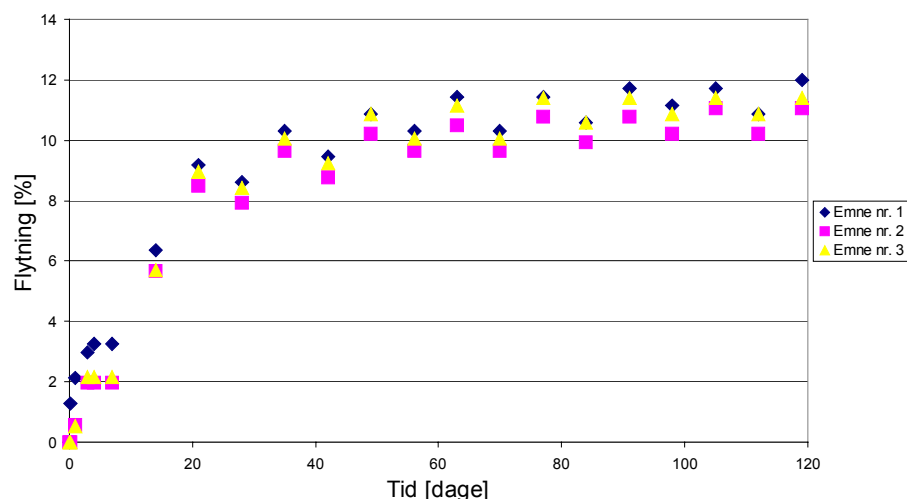
I laboratoriet blev tre kasser indblæst med isoleringsmaterialet Ekofiber. Disse kasser blev derpå påvirket til varierende fugtvariationer. Kasserne blev skiftevis af en uges varighed påvirket til en relativ fugtighed på 50 % henholdsvis 80 % ved en konstant temperatur på 23 °C. Tabel 8 viser den udlagte gennemsnitlige densitet, den resulterende tøjning og den beregnede tøjning for Ekofiber løst udlagt og påvirket til varierende fugtcykler. Forsøgene blev stoppet efter 17 fugtvariationer. For den beregnede tøjning antages spændingspåvirkningen fra luftgennemstrømningen at være negligeabel. Endvidere antages spændingspåvirkningen, fra det anvendte udstyr til bestemmelse af isoleringsmaterialets overfladeposition på 2,6 Pa, at være negligeabel.



Tabel 8. Den udlagte gennemsnitlige densitet, den resulterende tøjning og den beregnede tøjning for - Ekofiber løst udlagt og påvirket til varierende fugtcykler af en uges varighed på henholdsvis 50 % RF og 80 % RF. Temperaturen blev under forsøgene holdt på 23 °C.

Tøjning for Ekofiber løst udlagt			
Emne	1	2	3
Udlagt densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	43,4	46,5	43,0
Resulterende tøjning [%]	12,0	11,0	11,4
Beregnet tøjning [%]	14,9	14,9	15,1

Under forsøgene blev den relative fugtighed i isoleringsmaterialerne kontrolleret ved hjælp af en fugtmåler. Målingerne viste at den relative fugtighed i selve isoleringsmaterialerne stabiliserede sig ved henholdsvis 48 % ± 2 % for det lave fugtniveau og 75 % ± 5 % for det høje fugtniveau. Emnerne blev ved forsøgene placeret ovenover hinanden med emne nr. 1 øverst og emne nr. 3 nederst. Fugtmålingerne viste at emne nr. 1 generelt havde et højere fugtniveau end de øvrige og at emne nr. 3 havde et lavere fugtniveau end de øvrige indenfor de tilsigtede påtvungne fugtniveauer. Figur 29. viser de målte flytninger af isoleringsmaterialets vandrette overflade som funktion af tiden for de enkelte emner. Nulpunktet er relateret til målingen umiddelbart efter at emnerne var blevet placeret i opstillingen. Den observerede sætning relateret til tidsrummet mellem udlægningen af isoleringsmaterialet og målingernes påbegyndelse kan først måles ved forsøgets afslutning. Hver 7. dag blev fugtniveauet ændret.



Figur 29. Målte flytninger af isoleringsmaterialets vandrette overflade som funktion af tiden. Isoleringsmaterialet Ekofiber blev løst udlagt og påvirket til varierende fugtcykler af en uges varighed på henholdsvis 50 % RF og 80 % RF. Temperaturen blev under forsøgene holdt på 23 °C.

## Vægforsøg

### Anvendte indblæsningsteknikker

I laboratoriet blev der gennemført en række forsøg med indblæsningsteknikker. Specielt to teknikker blev sammenholdt. Den ene tog udgangspunkt i en allerede anvendt teknik, medens den anden tog udgangspunkt i indlejring med modhold. Efter gentagne forsøg, med indlejring af løsfyldsisolering i væggen med modhold, blev det besluttet, at gennemføre en dokumentation af homogeniteten af det indblæste løsfyldsisoleringsmateriale, indlejret ved den allerede anvendte indblæsningsmetode. For forsøgene med indlejring af løsfyldsisolering i væggen med modhold viste det sig, at selv med små åbninger mellem undersiden og oversiden af modholdet blæste en hel del løsfyldsisolering til oversiden af modholdet og op i hovedet af indblæseren. Ved

den allerede anvendte teknik til indblæsning af løsfyldsisolering i en væg, føres fødeslangen gennem topremnen ned til bunden af væggen før indblæsningen påbegyndes. Derpå begyndes indblæsningen af løsfyldsisoleringen. Når luftblæseren på indblæsningsmaskinen ikke er i stand til at blæse mere materiale frem, løftes fødeslangen til en ny position 30 til 50 cm højere oppe i væggen. Densiteten af væggen styres af et lufttryk samt af tilførslen af isoleringsmateriale, som indstilles på indblæsningsmaskinen.

## Densitetsmålinger

I laboratoriet blev der gennemført en række indblæsninger i vægge med gipspladebeklædning. To vægtyper blev anvendt ved indblæsningsforsøgene. Den ene med indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Den anden med indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m, med lægter pr. 0,6 m og forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2. Dampbremsen blev placeret mod isoleringen bag de monterede lægter. Væggene blev gentagne gange indblæst med Papiruld med en forskellig overordnet homogen densitet. Tabel 9 viser den overordnede gennemsnitlige densitet for seks indblæsningsforsøg i en væg uden lægter. Ligeledes viser tabel 9 det målte tryk mod bundremmen efter endt indblæsning. De målte densiteter i tabel 9 er relateret til en relativ luftfugtighed på 50 % og en temperatur på 23 °C. Bundtrykket er målt ca. 1 minut efter endt indblæsning.

Tabel 9. Overordnet gennemsnitlig densitet og tryk mod bundremmen efter endt indblæsning for seks indblæsningsforsøg i en væg med gipsplader med den indvendige dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Indblæsningsforsøgene er udført med Papiruld.

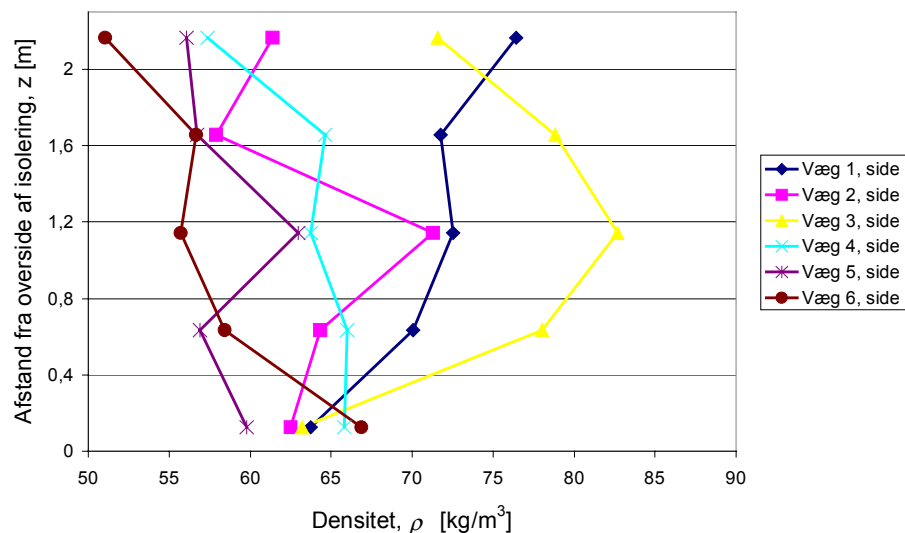
Overordnet densitet ved indblæsning						
Vægforsøg	1	2	3	4	5	6
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	71,42	65,97	64,46	64,22	58,62	58,80
Bundtryk [Pa]	800,5	604,3	412,2	508,3	480,3	356,0

Tabel 10 viser den overordnede gennemsnitlige densitet for tre indblæsningsforsøg i en væg af gipsplader med lægter pr. 0,6 m og med den indvendige dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Væggen er i disse forsøg forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2. Endvidere viser tabellen det målte tryk mod bundremmen efter endt indblæsning. De målte densiteter i tabel 10 er relateret til en relativ luftfugtighed på 50 % og en temperatur på 23 °C. Bundtrykket er målt ca. 1 minut efter endt indblæsning.

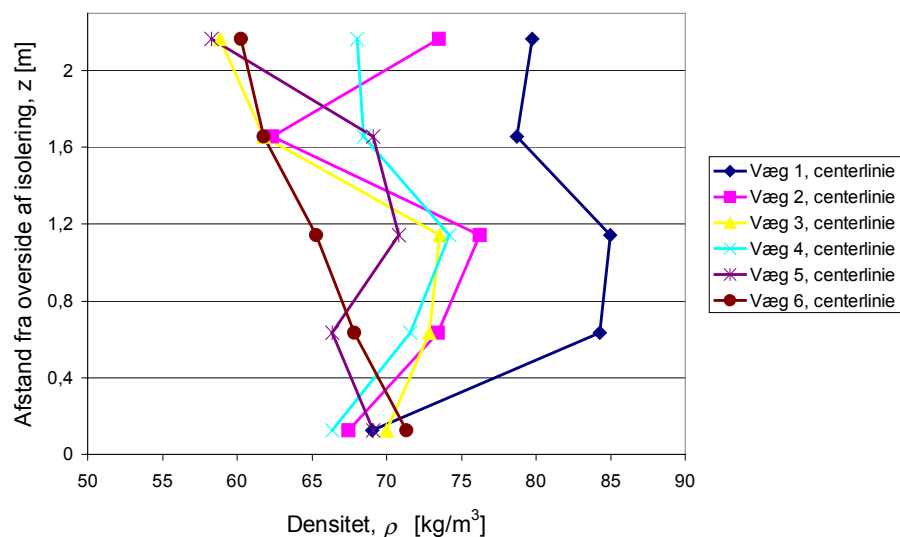
Tabel 10. Overordnet gennemsnitlig densitet og tryk mod bundremmen efter endt indblæsning for tre indblæsningsforsøg i en væg af gipsplader med lægter pr. 0,6 meter og med den indvendige dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Indblæsningsforsøgene er udført med Papiruld.

Overordnet densitet ved indblæsning			
Vægforsøg	7	8	9
Densitet [kg/m <sup>3</sup> ]	68,07	65,15	55,13
Bundtryk [Pa]	644,4	520,3	260,2

Efter endt indblæsning blev lokale densitetsprøver udtaget. Figur 30 og figur 31 viser resultaterne fra de lokale densitetsmålinger. For figur 30 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes side. For figur 31 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. De målte densiteter er relateret til en relativ luftfugtighed på 50 % og en temperatur på 23 °C.

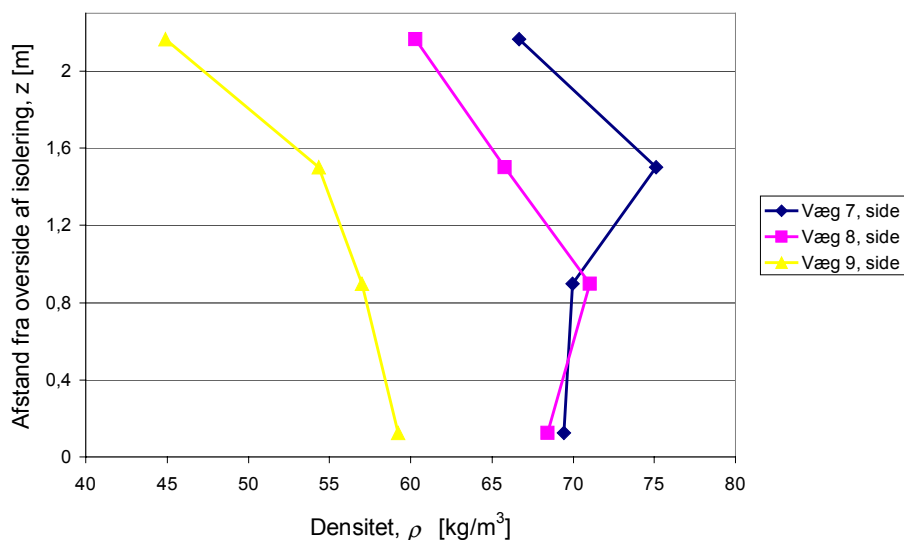


Figur 30. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet for seks indblæsningsforsøg i en væg med gipsplader med den indvendige dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes side. Indblæsningsforsøgene er udført med Papiruld.

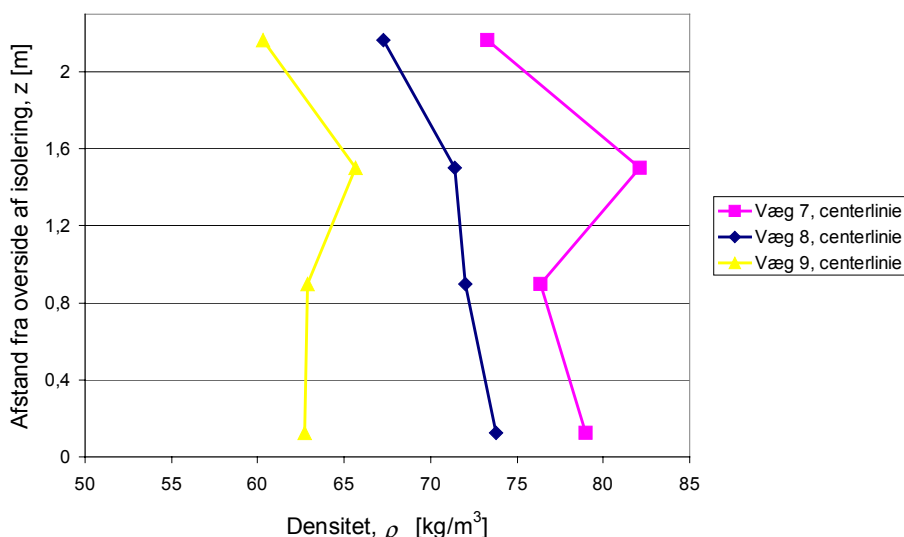


Figur 31. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet for seks indblæsningsforsøg i en væg med gipsplader med den indvendige dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. Indblæsningsforsøgene er udført med Papiruld.

Figur 32 og figur 33 viser resultaterne fra de lokale densitetsmålinger for en væg af gipsplader med lægter pr.  $0,6 \text{ m}$  og den indvendige dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ . Væggen var forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2. Dampbremsen blev placeret mod isoleringen bag de monterede lægter. For figur 32 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes side. For figur 33 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. De målte densiteter er relateret til en relativ luftfugtighed på  $50 \%$  og en temperatur på  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 32. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet for tre indblæsningsforsøg i en væg af gipsplader med lægter pr. 0,6 meter og den indvendige dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes side. Indblæsningsforsøgene er udført med Papiruld.



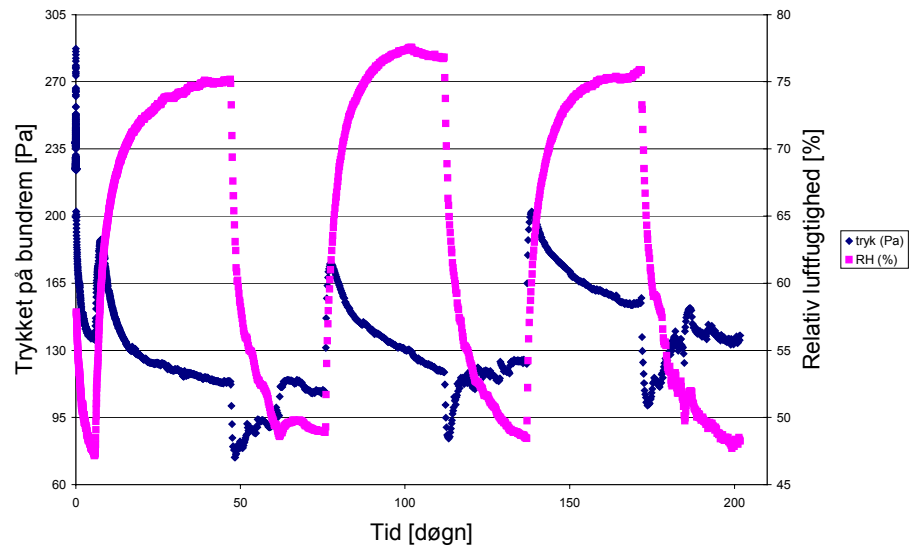
Figur 33. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet for tre indblæsningsforsøg i en gipspladevæg med lægter pr. 0,6 m og den indvendige dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. Indblæsningsforsøgene er udført med Papiruld.

### Varierende fugtpåvirkning

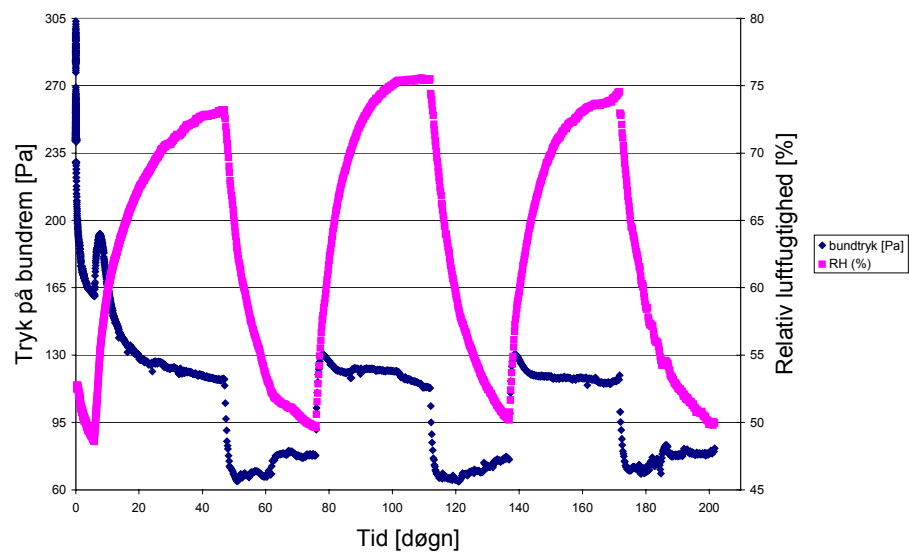
To vægge med gipspladebeklædning blev i laboratoriet udsat for varierende fugtpåvirkning. De to vægtyper der blev anvendt var dels en vægtype med glatte flader og indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m samt en vægtype af gipsplade med indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m med lægter pr. 0,6 m og forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2. Dampbremsen blev placeret mod isoleringen bag de monterede lægter.

Væggene blev indblæst med Ekofiber med en overordnet densitet på henholdsvis 62,7 kg/m<sup>3</sup> og 59,0 kg/m<sup>3</sup>. Den tilsligtede overordnede densitet er tidligere beregnet til henholdsvis 62,3 kg/m<sup>3</sup> og 59,4 kg/m<sup>3</sup>, som den nødvendige densitet under den forudsætning, at Ekofiber bibeholder den reversible tøjning. De tilsligtede densiteter er beregnede og vist i tabel 6 og tabel 7. Figur 34 viser det målte bundtryk og den målte relative luftfugtighed i en væg med gipsplade. Figur 35 viser det målte bundtryk og den målte relative luftfugtighed i en væg med gipsplade med lægter pr. 0,6 m og forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2.

Under forsøgene blev den relative fugtighed i isoleringsmaterialerne kontrolleret ved hjælp af en fugtmåler. Målingerne viste at den relative fugtighed i selve isoleringsmaterialerne stabiliserede sig ved henholdsvis 49 % ± 2 % for det lave fugtniveau og 75 % ± 3 % for det høje fugtniveau.

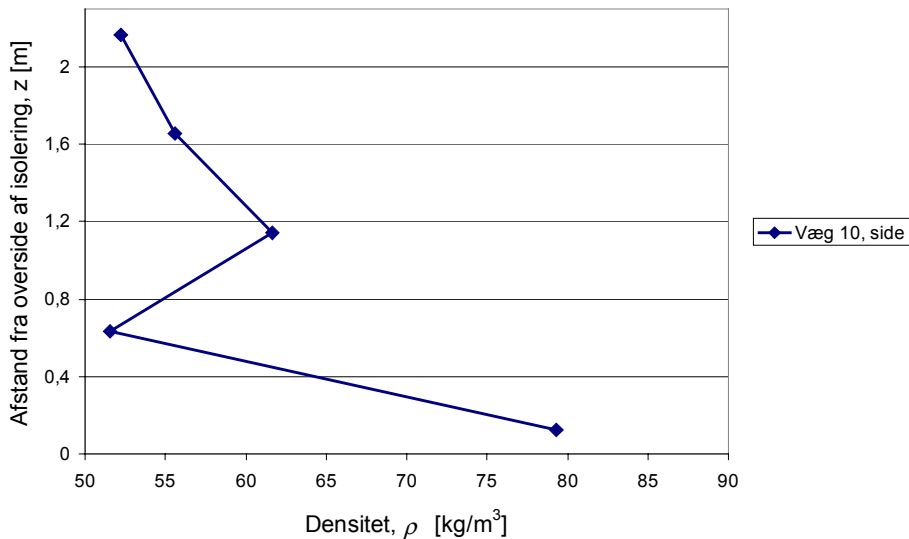


Figur 34. Det målte bundtryk og den målte relative luftfugtighed i en væg med gipsplade med den indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. Væggene er indblæst med Ekofiber med en overordnet densitet på 62,7 kg/m<sup>3</sup>. Temperaturen er konstant 23 °C. Væg 10.

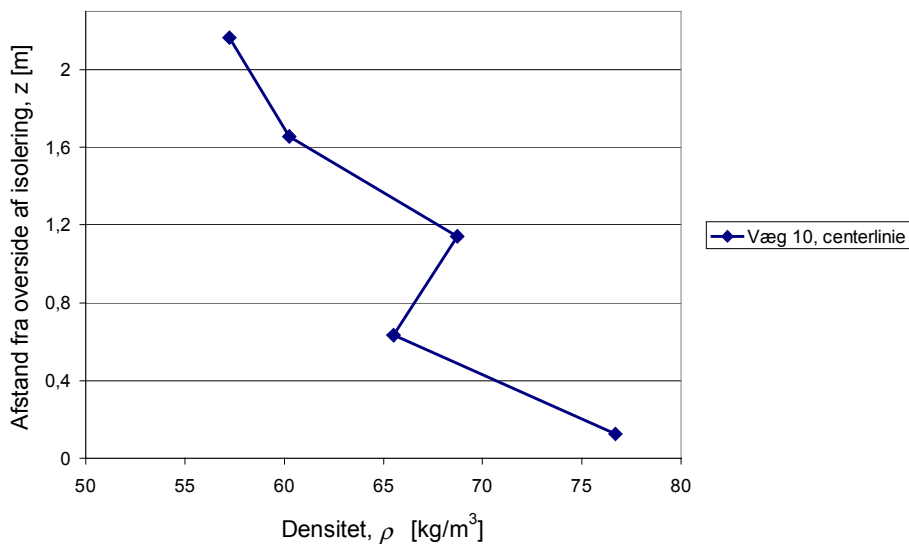


Figur 35. Det målte bundtryk og den målte relative luftfugtighed i en væg med gipspladebeklædning med den indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m med lægter pr. 0,6 meter og forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2. Dampbremsen blev placeret mod isoleringen bag de monterede lægter. Væggene er indblæst med Ekofiber med en overordnet densitet på 59,0 kg/m<sup>3</sup>. Temperaturen er konstant 23 °C. Væg 11.

Efter endt cyklisk fugtprøvning blev lokale densitetsprøver udtaget af de to vægge indblæst med Ekofiber. Figur 36 og figur 37 viser resultaterne fra de lokale densitetsmålinger for en væg med gipspladebeklædning med den indvendig dimension: længde × tykkelse × højde lig med 0,495 m × 0,198 m × 2,3 m. For figur 36 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes side. For figur 37 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. De målte densiteter er relateret til en relativ luftfugtighed på 50 % og en temperatur på 23 °C.

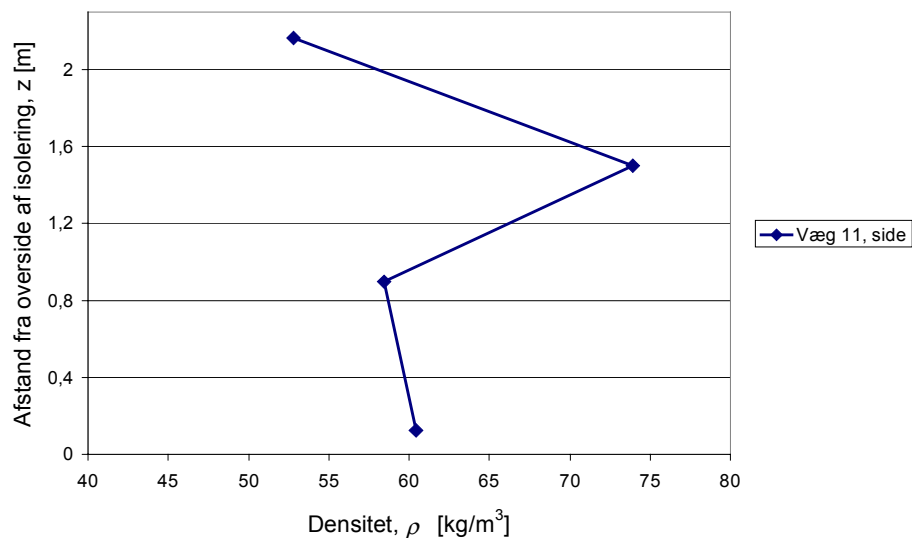


Figur 36. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet indblæst i en væg med gipsplader med den indvendigt dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes side. Væggen er indblæst med Ekofiber.

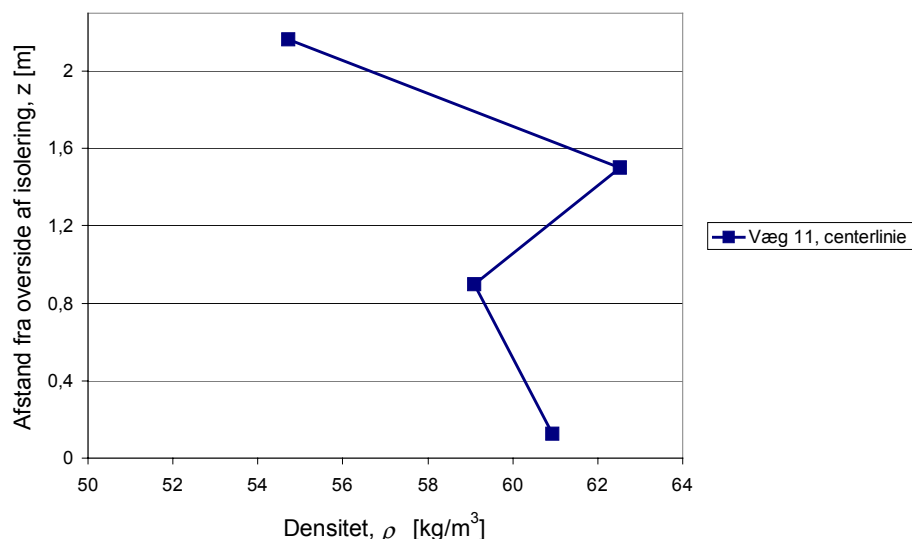


Figur 37. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet indblæst i en væg med gipsplader med den indvendigt dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. Væggen er indblæst med Ekofiber.

Figur 38 og figur 39 viser resultaterne fra de lokale densitetsmålinger for en væg med gipspladebeklædning med lægter pr. 0,6 m og en indvendig dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Væggen blev forsynet med dampbremse af typen ØKO b-2. Dampbremsen blev placeret mod isoleringen bag de monterede lægter. For figur 38 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes side. For figur 39 er densitetsmålingerne foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. De målte densiteter er relateret til en relativ luftfugtighed på 50 % og en temperatur på 23 °C.



Figur 38. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet indblæst i en væg med gipspladebeklædning med lægter pr. 0,6 m, monteret dampbremse og den indvendig dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes side. Væggen er indblæst med Ekofiber.



Figur 39. Afstanden fra oversiden af isoleringen som funktion af den lokale densitet indblæst i en væg med gipspladebeklædning med lægter pr. 0,6 m, monteret dampbremse og den indvendig dimension: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig med 0,495 m  $\times$  0,198 m  $\times$  2,3 m. Densitetsmålingerne er foretaget langs væggenes lodrette centerlinie. Væggen er indblæst med Ekofiber.

Standardafvigelsen, S og variationskoefficienten, V på densiteten af de enkelte vægge er vist i tabel 11. For de enkelte vægge, angivet ved vægnummer, er standardafvigelsen og variationskoefficienten angivet for densiteten målt langs væggenes side og langs væggenes centerlinie. Vægge med lægter pr 0,6 meter og monteret dampbremse af typen ØKO b-2 er yderligere forsynet med et "ja" i kolonnen "lægter påsat". Vægge nummer 1 til 9 er indblæst med Papiruld mens vægge nummer 10 og 11 er indblæst med Ekofiber. For vægge 10 og 11 er densitetsmålingerne udført på vægelementer, som har været påvirket til varierende fugtforhold gennem 200 døgn. Fugtforholdene for væg 10 er vist i figur 34 og fugtforholdene for væg 11 er vist i figur 35. Indblæsning af løsfyldsisoleringsmaterialet Papiruld i væg nummer 1 til 9 er foretaget af den samme isolatør mens indblæsning af løsfyldsisoleringsmaterialet Ekofiber i væg nummer 10 og 11 er foretaget af en anden isolatør.

Tabel 11. Standardafvigelsen, S og variationskoefficienten, V på densiteten af den indblæste isolering for de enkelte vægelementer. Standardafvigelsen og variationskoefficienten er beregnet for den målte densitet langs henholdsvis væggen ene side og væggen centerlinie.

Væg nr.	Langs vægside		Langs centerlinie		Materiale	Lægter påsat
	S [kg/m <sup>3</sup> ]	V [%]	S [kg/m <sup>3</sup> ]	V [%]		
1	4,64	6,5	6,36	8,91	Papiruld	
2	4,96	7,52	5,61	8,5	Papiruld	
3	7,64	11,84	6,69	10,39	Papiruld	
4	3,54	5,52	3,12	4,86	Papiruld	
5	2,88	4,92	4,99	8,51	Papiruld	
6	5,77	9,81	4,49	7,64	Papiruld	
7	3,51	5,16	3,76	5,52	Papiruld	ja
8	4,59	7,04	2,76	4,23	Papiruld	ja
9	6,31	11,45	2,18	3,95	Papiruld	ja
10*	11,5	18,32	7,6	12,12	Ekofiber	
11*	8,96	15,19	3,37	5,72	Ekofiber	ja

\*Densiteten for væg nr. 10 og 11 er målt i vægkonstruktioner påvirket til varierende fugtforhold gennem 200 døgn.



# Diskussion af forsøgsresultater

## Tøjningsdiagrammer

Ekofibers tøjning under konstant belastning og cyklisk fugtpåvirkning er vist i figur 14. Tøjningen ses at øges med antallet af cykliske fugtvariationer. Den relative tøjningsforøgelse er aftagende med antallet af fugtcykler. Dette ses ved, at tøjningsforøgelsen er størst for de første fugtvariationer og derpå aftagende. Efter et antal fugtvariationer ses isoleringsmaterialet, at ændre karakter med hensyn til den målte tøjning. Fra at resultere i øget tøjning resulterer en fugtphobning i isoleringsmaterialet i en reduktion af tøjningen. Denne reduktion af tøjningen antages på sigt at resultere i en stabiliseret tøjning for det enkelte lastniveau. Tilsvarende ses for Dansk hør, Papiruld og Thermocell, se figur 40, figur 41 og figur 43 i bilag B. Tøjningen for Rockwool er ikke på tilsvarende vis afhængig af den relative luftfugtighed i isoleringsmaterialet. Tøjningen for Rockwool ses at stabilisere sig efter kort tid og forblive stabil med fugtvariationerne, se figur 42 i bilag B. Det er vist, at tøjningen til et givent lastniveau, som funktion af tiden og derved indirekte som funktion af antallet af fugtcykler, kan beskrives med en meget fin tilnærmelse ved hjælp af en logaritmisk funktion der er bestemt ved anvendelse af mindste kvadraters metode, se tabel 2.

## Stabil tøjning

Med udgangspunkt i de enkelte isoleringsmaterialers tøjningsfunktion beregnes den stabile tøjning ud fra den forudsætning, at tøjningen for de enkelte lastniveauer og isoleringsmaterialer har stabiliseret sig efter 25 fugtvariationer. Det er vist, at den beregnede stabile tøjning, som funktion af spændingen, kan beskrives med en meget fin tilnærmelse ved hjælp af en lineær funktion, se figur 15, der er bestemt ved anvendelse af mindste kvadraters metode, se tabel 3.

## Stabil densitet

Med kendskab til de enkelte isoleringsmaterialers stabile tøjning ved en cyklisk fugtpåvirkning kan den ækvivalente densitet beregnes og sættes i relation til spændingen. Det er vist, at den beregnede ækvivalente densitet til det stabile tøjningsniveau som funktion af spændingen kan beskrives med en meget fin tilnærmelse ved hjælp af en lineær funktion, se figur 16, der er bestemt ved anvendelse af mindste kvadraters metode, se tabel 4.

Relationen mellem en volumenmæssig stabil densitet og spændingen for et materiale påvirket til cyklisk fugt kan direkte anvendes i det tidligere beskrevne designværktøj (Rasmussen, 2001b). Den cykliske fugtpåvirkning som er anvendt i dette arbejde, varierer mellem en stabiliseret relativ luftfugtighed på henholdsvis 50 % og 80 %. Med en stabiliseret relativ luftfugtighed menes, at sætningsforholdene for et stabiliseret fugtniveau er registreret som værende stabile før det nye fugtniveau introduceres. Fugtniveauerne 50 % relativ luftfugtighed og 80 % relativ luftfugtighed er valgt, da tidligere målinger foretaget i isoleringen i et forsøgshus hos By og Byg har vist, at disse fugtniveauer optræder som sæsonsvingninger (Andersen et al., 2002).

## Nødvendig densitet i vægge

Det tidligere beskrevne designværktøj, (Rasmussen, 2001b) ligger til grund for en række beregninger af den nødvendige densitet af de enkelte isoleringsmaterialer. Beregningerne er foretaget for tre typer vægkonstruktioner. De tre vægtyper er bygget op omkring det samme udgangspunkt:

- Udgangspunktet er en træskeletvæg med gipspladebeklædning med de indvendige dimensioner: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$ .
- Denne vægkonstruktion er derpå forsynet med vandrette lægter med centerafstanden  $0,6 \text{ m}$  placeret tæt op af den ene gipsplade.
- Vægkonstruktionen er derpå forsynet med dampbremse placeret bag de vandrette lægter med centerafstanden  $0,6 \text{ m}$  foran gipspladen.

Den nødvendige densitet af de enkelte isoleringsmaterialer, indlejret i de tre typer vægge, er derpå beregnet efter to principper:

- 1 på baggrund af det beregnede højeste spændingsniveau
- 2 på baggrund af en optimeret energibetragtning.

For den optimerede energibetragtning er det forudsat, at isoleringsmaterialerne bibeholder de reversible egenskaber efter gentagne fugtvariationer.

Beregningerne viser, at den nødvendige densitet for væggen, som anvendes som udgangspunkt, af gipsplade er højere end den nødvendige densitet for væggen påsat vandrette lægter. Den højere nødvendige densitet er dog yderst begrænset men alligevel større i det tilfælde hvor beregningerne foretages på baggrund af en optimeret energibetragtning. Beregningerne viser ligeledes, at den nødvendige densitet er mindre hvis beregningerne foretages på baggrund af en optimeret energibetragtning, end hvis de foretages på baggrund af det beregnede højeste spændingsniveau. Beregnes effekten af at placere en dampbremse i vægkonstruktionen ses at den nødvendige densitet af isoleringsmaterialet øges. Dette er ikke overraskende, da friktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialerne og dampbremsen er lavere end friktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialerne og gipspladen.

### Sætning af løst udlagt løsfyldsisolering

Den beregnede sætning af løst udlagt isolering beregnes på baggrund af ligning (3) og det eksperimentelt bestemte kendskab til en given stabil tøjning som funktion af en påsat spænding. Det er en forudsætning for anvendelse af den eksperimentelt bestemte stabile tøjning, som funktion af påsat spænding, at den resulterende densitet til samme spændingsbelastning er uafhængig af densiteten. Det vil med andre ord sige, at til et givent spændingsniveau vil der efter en tid indstille sig en densitet i isoleringsmaterialet, som er uafhængig af densiteten ved udlægning. Denne forudsætning anvendes ved beregninger for andre densiteter end den ved forsøgets anvendte. For Ekofiber er forsøgene udført med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$  og beregningerne er udført for densiteter på mellem  $30$  og  $55 \text{ kg/m}^3$ . Korrektionen af tøjningen i relation til densiteten fås ved en lineær interpolation af dataene for tøjning over to døgn som funktion af densiteten givet i tabel 3 (Rasmussen, 2001b).

Ved bestemmelsen af den lodrette spænding i løst udlagt isolering, som funktion af afstanden fra oversiden af isoleringen, viser figur 26 spændingsberegninger for en række anvendte arealer af den anvendte kasse, se figur 3. Disse beregninger viser, at friktionskraftens indflydelse på spændingsfordelingen i det udlagte isoleringsmateriale er begrænset. Afvigelsen på den maksimalt beregnede spænding, mellem det ved forsøgene anvendte areal og et areal  $5,6$  gange større, er  $5,4 \%$ , ved en densitet på  $43 \text{ kg/m}^3$  og en isoleringstykkelse på  $350 \text{ mm}$ . Ved forsøgene aflæses sætninger af isoleringsmaterialets overflade med en målepind, hvis påvirkning udgør  $2,6 \text{ Pa}$  eller ca.  $1,9 \%$  af den maksimalt beregnede spænding i isoleringsmaterialet.  $2,6 \text{ Pa}$  er lig den beregnede spænding i isoleringsmaterialet  $6 \text{ mm}$  fra øvre overflade. Fugtforholdene i isoleringsmaterialet sikres ved et etableret undertryk mod isoleringens underside. Undertrykket i kammeret under kassens bundplade er  $21 \text{ Pa}$ . Få millimeter over bundpladen i isoleringsmaterialet antages trykket at være ca.  $1,03 \text{ Pa}$ . Da indflydelsen fra kassens og måleudstyrets udformning har lille indflydelse på den beregnede spændingsfor-

deling i det udlagte isoleringsmateriale, antages forsøget at kunne bruges til at måle tøjninger for løst udlagt isolering.

### Sammenholdelse af sætninger

Den beregnede sætning, som funktion af tykkelsen af den udlagte isolering for en række densiteter af det udlagte isoleringsmateriale, er vist i figur 28. Det bemærkes at for lave densiteter opnås den før beregnede stabile densitet på  $53 \text{ kg/m}^3$  for ubelastet materiale ikke efter sætning, se figur 16. Dette skyldes sandsynligvis, at forholdet mellem den stabile densitet og den påsatte spænding for de lave spændingsniveauer ikke er retlinet. Med det relativt begrænsede antal data, som er tilrådighed, er det dog ikke muligt at antage en mere nuanceret afhængighed. Praktiske målinger (Svennerstedt, 1986) har vist at cellulosefyldsisolering løst udlagt på loft, med en densitet på mellem  $30$  og  $45,7 \text{ kg/m}^3$ , efter et år opnåede en densitet på mellem  $35,8$  og  $48,7 \text{ kg/m}^3$ . Parallele laborieforsøg (Svennerstedt, 1986) viste, at cellulosefyldsisolering løst udlagt, med en densitet på  $34 \text{ kg/m}^3$  efter seks fugtcykler mellem  $45 \pm 5$  og  $85 \pm 5$  % RF, ved  $20\text{--}23$  °C, en densitet på  $37,5 \text{ kg/m}^3$  efter 12 uger. I samme arbejde rapporterede mineraluldsfibres sætning til praktisk taget at være lig nul og upåvirket af fugtsvingninger. Egenskaberne for mineraluld stemmer overens med resultaterne vist i figur 42.

Efter beregningerne opnås den stabile densitet på  $53 \text{ kg/m}^3$  for Ekofiber ved at udlægge  $400$  mm med en densitet på  $45 \text{ kg/m}^3$ . Eller ved at udlægge  $500$  mm med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ .

Den interpolerede stabile minimumsdensitet for Ekofiber på  $53 \text{ kg/m}^3$  er højere end refererede densiteter, men dækker derimod over væsentlig flere fugtcykler. En mere nøjagtig beskrivelse kan verificeres ved at udføre krybningsforsøg med varierende RF og en påsat spænding på mellem  $0$  og  $100$  Pa. Det her anvendte udstyr kan ikke umiddelbart anvendes, da friktionen mellem cylinderens indvendige side og isoleringsmaterialet ikke kan negligeres for så lave påsatte spændinger. Praktiske målinger af sætning for cellulosefyldsisolering, løst udlagt og påvirket til varierende fugtforhold svarende til henholdsvis  $50$  og  $80$  % RF viser (Svennerstedt, 1986) en sætning på  $16$  %,  $16$  % og  $15$  % for henholdsvis udlægningshøjde, densitet svarende til  $300$  mm,  $33 \text{ kg/m}^3$ ;  $250$  mm,  $30 \text{ kg/m}^3$ ;  $350$  mm,  $45,7 \text{ kg/m}^3$ . Laborieforsøg viste en sætning på  $10,4$  % for en udlægningshøjde på  $360$  mm og en densitet på  $34 \text{ kg/m}^3$ . Den, efter den her viste metode, beregnede sætning er  $13,3$  %,  $14,0$  %,  $14,8$  % og  $14,8$  % for henholdsvis udlægnings højde, densitet svarende til  $250$  mm,  $30 \text{ kg/m}^3$ ;  $300$  mm,  $33 \text{ kg/m}^3$ ;  $350$  mm,  $45,7 \text{ kg/m}^3$  og  $360$  mm,  $34 \text{ kg/m}^3$ .

Svennerstedt (Svennerstedt, 1997) opstillede i 1997 en model til beregning af sætning for løsfyldsisolering løst udlagt på lofter. Denne model indeholder såvel et vibrations-, et kelvin- og et mechano-sorptionselement. Modellen er for cellulosefyldsisolering begrænset til at beskrive densiteter mellem  $30$  og  $46 \text{ kg/m}^3$  uden hensyntagen til isoleringstykkelsen. Modellen giver en god korrelation mellem eksperimentelt bestemte og beregnede sætninger for en RF mellem  $0$  og  $75$  %. Den beregnede tøjning efter  $1$ ,  $2$ ,  $4$ ,  $8$  og  $10$  år er henholdsvis  $12,7$ ,  $14,7$ ,  $15,9$ ,  $17,7$  og  $18,5$  %. Eksperimentelt bestemte sætninger er ikke medtaget udover  $10$  år. Teorien benyttes derpå til at bestemme sætninger frem i tiden. Da modellen foreskriver tøjninger større end  $100$  %, skal man være varsom med at anvende modellen til at beregne tøjninger frem i tiden. Den beregnede tøjning efter  $30$ ,  $100$  og  $200$  år er henholdsvis  $27$ ,  $58$  og  $102$  %, hvilket må antages at være urealistisk og modellens svaghed.

Tabel 8 viser sammenholdte værdier for, den beregnede og den eksperimentelt bestemte tøjning, for de udførte forsøg med fri sætning af isoleringsmateriale påvirket til cykliske fugtpåvirkninger. Den, efter den her viste metode, beregnede sætning er  $14,9$  %,  $14,9$  % og  $15,1$  % for henholdsvis udlægningshøjde, densitet svarende til  $355$  mm,  $43,4 \text{ kg/m}^3$ ;  $353$  mm,  $46,5$

kg/m<sup>3</sup>; og 368 mm, 43,0 kg/m<sup>3</sup>. De tilsvarende eksperimentelt bestemte tøjninger er henholdsvis 12,0 %, 11,0 % og 11,4 %.

### **Indblæsning i vægge**

En række indblæsningsteknikker blev forsøgt udført og sammenholdt i laboratoriet. Gentagne forsøg med forskellige indblæsningsteknikker blev afsluttet, og en dokumentation af homogeniteten af det indlejrede løsfyldsisoleringsmateriale blev gennemført. Homogeniteten for indblæsning af løsfyldsisolering, i en væg hvor fødeslangen føres gennem topremmen og ned til bunden af væggen før indblæsningen påbegyndes, er vist i figur 30 til figur 33 og figur 36 til figur 39. Tabel 11 viser standardafvigelsen og variationskoefficienten på den målte densitet for den enkelte væg. Variationskoefficienten ligger med enkelte undtagelser under 10 %. Variationskoefficienten på densiteten følges ikke nødvendigvis ad for målinger taget i væggenes side og centerlinie. Dette betyder, at der under indblæsningen opstår lokale områder eller zoner i isoleringsmaterialet, med en densitet som er forskellig fra gennemsnitsdensiteten. Dette kan eksempelvis afbilde slæbesporet fra indblæsningsslangen. Ligeledes kan svage zoner i isoleringsmaterialet introduceres med risiko for separation af isoleringsmaterialet, under spændingsomlejringen, relateret til krybningsprocessen. Generelt er densiteten af den dokumenterede indblæsning at betragte som værende homogen. Under indblæsningen måles væggenes bundtryk. Resultaterne er vist i tabel 9 og tabel 10. Resultaterne viser et højt og meget varierende bundtryk ét minut efter endt indblæsning. Forklaringen på disse resultater kan findes i figur 34 og figur 35. Figur 34 og figur 35 viser blandt andet bundtrykkets variation med tiden. Det ses, at indenfor de første døgn falder trykket drastisk. Variationen i det målte bundtryk, ét minut efter endt indblæsning, er derfor et udtryk for selve indblæsningstiden og densitetsvariationen i de enkelte vægge. Spændingsomlejringen i det indblæste isoleringsmateriale i en væg forventes at forløbe over en længere periode af mange dage eller uger. Yderligere viser figur 34 og figur 35 bundtrykkets variation med isoleringsmaterialets relative luftfugtighed. For gentagne fugtvariationer ses, at bundtrykket stiger ved opfugtning af isoleringsmaterialet og falder ved affugtning. For væggen uden lægter (væg 10) ses bundtrykket at gå mod en asymptote forstyrret af fugtvariationen. Bundtrykket går asymptotisk mod ca. 130 Pa. Ved den viste metode til spændingsberegning beregnes bundtrykket til 159,6 Pa. Denne væg har en stor variationskoefficient på densiteten af det indblæste løsfyldsisoleringsmateriale. Den store variationskoefficient skyldes en høj densitet af isoleringsmaterialet i væggenes øvre del. Standardafvigelsen og variationskoefficienten på alle væggenes densitetsmålinger er henholdsvis 9,64 kg/m<sup>3</sup> og 15,4 %. Med en gennemsnitlig densitet på 62,7 kg/m<sup>3</sup> svarer dette til et bundtryk på mellem 132,7 og 181,0 Pa. Beregnes den gennemsnitlige densitet af løsfyldsisoleringsmaterialet på baggrund af densitetsmålingerne eksklusiv densitetsmålinger fra 0,125 m fra væggenes toprem, fås en gennemsnitlig densitet på 59,1 kg/m<sup>3</sup> med en standardafvigelse på 6,1 kg/m<sup>3</sup> og en variationskoefficient på 9,73 % hvilket svarer til et bundtryk på mellem 132,5 og 163,0 Pa.

For væggen med lægter (væg 11) ses bundtrykket at variere mellem 80 og 120 Pa afhængig af fugtvariationen. Ved den viste metode til spændingsberegning beregnes bundtrykket til 132,2 Pa. Beregnes densiteten af løsfyldsisoleringsmaterialet på baggrund af densitetsmålingerne, i en afstand 2,165 m fra væggenes toprem, fås en gennemsnitlig densitet af isoleringsmaterialet under den nederste lægte på 53,7 kg/m<sup>3</sup>, hvilket svarer til et bundtryk på 120,4 Pa.

### **Fugtpåvirkede vægge**

Ved afslutningen af forsøgene med varierende fugtpåvirkning af hele vægge blev der ikke konstateret sætning mellem væggenes toprem og isoleringen.

Efter forsigtigt at have afmonteret gipspladerne blev isoleringen inspiceret. For vægelementet med lægter udfyldte isoleringen vægelementet fuldt ud. For vægelementet uden lægter blev der observeret en separationsrevne i isoleringsmaterialet ca. 600 mm fra væggenes top. Revnevidden var ca. 10 mm i hele væggenes tykkelse og strakte sig fra væggenes ene side til væggenes centerlinie. I den resterende del af væggen udfyldte isoleringen vægelementet fuldt ud. På den baggrund antages det nødvendigt, at variationskoefficienten, på densiteten af det indblæste løsfyldsisoleringsmateriale, holdes under 10 %. Isoleringsmaterialet ekspanderede ikke nævneværdigt ved fjernelsen af gipspladen, men var fast og formstabil.

Ved dimensioneringen af den volumenstabile densitet blev energikriteriet anvendt. En forudsætning for anvendelsen af dette princip er, at isoleringsmaterialet bibeholder de elastiske egenskaber indtil endt krybning, samt at densiteten er homogen. På figur 14 ses, at hovedparten af tøjningen, relateret til den introducerede variation i RF, har fundet sted efter de 6 til 7 fugtskifter, som er foretaget i forsøget med de hele vægge. Måling af densiteten har vist, at den anvendte indblæsningsteknik kan introducere svage zoner, hvor der kan opstå separationsrevner under materialets krybning. Ligeledes har det vist sig, at isoleringsmaterialet kan spændingsaflastes ved at placere lægter i væggen. Påvirkes en væg til andre påvirkninger end den her beskrevne fugt, som er dimensionerende for den volumenstabile densitet, er det ligeledes nødvendigt at tage højde for dem ved dimensioneringen.

# Konklusion

Tøjning i et isoleringsmateriale, under konstant belastning og cyklisk fugtpåvirkning, kan beskrives analytisk. Tøjningen til et givent lastniveau, som funktion af tiden og derved indirekte som funktion af antallet af fugtcykler, kan beskrives med en meget fin tilnærmelse ved en logaritmisk funktion bestemt ved anvendelse af mindste kvadraters metode. Den relative tøjningsforøgelse for hver fugtcykel er aftagende med antallet af fugtcykler. Tøjning til et givent lastniveau antages at gå imod et stabilt tøjningsniveau for mange gentagne fugtcykler.

Det stabile tøjningsniveau, for de enkelte lastniveauer, kan bestemmes analytisk for et isoleringsmateriale påvirket af cyklisk fugt. Den stabile tøjning, som funktion af spændingen, kan beskrives med en meget fin tilnærmelse ved en lineær funktion bestemt ved anvendelse af mindste kvadraters metode.

Den ækvivalente densitet, til det stabile tøjningsniveau for de enkelte lastniveauer, kan direkte bestemmes analytisk for et isoleringsmateriale påvirket af cyklisk fugt. Den stabile densitet, som funktion af spændingen, kan beskrives med en meget fin tilnærmelse ved en lineær funktion bestemt ved anvendelse af mindste kvadraters metode.

Den stabile densitet, som funktion af spændingen for et løsfyldsisoleringsmateriale påvirket til cyklisk fugt, kan direkte anvendes til at dimensionere den nødvendige densitet af løsfyldsisoleringsmaterialet i en væg. Beregninger viser at den nødvendige densitet for en væg af gipsplade med de indvendige dimensioner: længde  $\times$  tykkelse  $\times$  højde lig  $0,495 \text{ m} \times 0,198 \text{ m} \times 2,3 \text{ m}$  er meget lidt højere end for en tilsvarende væg påsat vandrette lægter pr.  $0,6 \text{ m}$ . Beregnes effekten af at placere en dampbremse i vægkonstruktionen ses at den nødvendige densitet af isoleringsmaterialet øges. Dette skyldes, at friktionskoefficienten mellem de undersøgte isoleringsmaterialer og dampbremsen er lavere end friktionskoefficienten mellem isoleringsmaterialerne og gipspladen.

Den nødvendige densitet af et løsfyldsisoleringsmateriale indlejret i en væg er beregnet på baggrund af det højeste spændingsniveau i væggen og på baggrund af en optimeret energibetragtning. Beregningerne viser, at den nødvendige densitet er mindst hvis beregningerne foretages på baggrund af en optimeret energibetragtning. For den optimerede energibetragtning er det forudsat at isoleringsmaterialerne bibeholder de reversible egenskaber efter gentagede fugtvariationer. Forsøg med hele vægge, påvirket til vekslende relativ luftfugtighed, har vist, at den volumenstabile densitet kan bestemmes ved hjælp af den her beskrevne metode ud fra energikriteriet. Ligeledes har indblæsningsforsøg vist, at ved den her anvendte indblæsningsteknik kan der introduceres svage zoner, hvor der kan opstå separationsrevner i selve isoleringsmaterialet under materialets krybning og tøjningsrelaterede fugtvariationer. For at undgå separation i isoleringsmaterialet antages det nødvendigt, at variationskoefficienten på densiteten af det indblæste løsfyldsisoleringsmateriale holdes under 10 %. Isoleringsmaterialet kan med fordel spændingsaflastes ved at placere lægter i væggen. Ligeledes kan den beregnede sætning af løst udlagt isolering beregnes ved den her beskrevne metode, og det eksperimentelt bestemte kendskab til en given stabil tøjning som funktion af en påsat spænding. Den stabile tøjning for et løsfyldsisoleringsmateriale skal findes for de i brugen relevante påvirkninger. I denne rapport er varierende fugtpåvirkninger, svarende til det danske klima, anvendt.

# Litteratur

- Andersen, T., Fynholm, P., Hjorslev Hansen, M., Nicolajsen, A. (2002). *Fugtsikre træfacader: Fugtindhold i højisolerede træfacader* (By og Byg Dokumentation 025). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Barfod, N. (1982). *En introduktion til partikelteknologi*. Lyngby: Danmarks Tekniste Højskole, Institut for Kemiteknik.
- Clouser, W. S. (1959). *Creep of small wood beams under constant bending load* (Report 2150). Madison, WI: U.S. Forest Products Laboratory.
- Fuglsang Nielsen, L. (1986). *Materialemechanik: Grundkursus II i bygningsmaterialer* (Teknisk Rapport 169). 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). Lyngby: Danmarks Tekniske Højskole, Laboratoriet for Bygningsmaterialer.
- Hartlén, J. (1980). The strength parameters of grain. In *European Symposium on Particle Technology, 3-5 June, 1980*. Amsterdam.
- Hartlén, J., Nielsen, J., Ljunggren, L., Mårtensson, G., & Wigram, S. (1984). *The wall pressure in large grain silos: Inventory, pressure, measurements, material investigations* (Document D2:1984). Stockholm: Swedish Council for Building Research.
- Munch-Andersen, J., & Nielsen, J. (1990). Pressures in slender grain silos. In *CHISA 1990, Second European Symposium on Stress and Strain in Particulate Solids, 26-31 August 1990*. Prag.
- Rasmussen T. V. (2001a). Modelling settling of loose-fill insulation in walls. Part I. *Journal of Thermal Envelope & Building Science*, 25(2), 129-142.
- Rasmussen T. V. (2001b). *Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge* (By og Byg Dokumentation 011). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Rasmussen T. V. (2002). Modelling settling of loose-fill insulation in walls. Part II. Determination of coefficients. *Journal of Thermal Envelope & Building Science*, 25(3), 189-208.
- Rasmussen T. V. (in press). Creep tests and techniques to predict densities necessary to prevent settling of loose-fill insulation in walls. Accepted for publication In A. O. Desjarlais, & R. R. Zarr (Eds.), *Insulation materials: Testing and applications: 4<sup>th</sup> Vol.* (ASTM STP 1426). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, ASTM.
- Svennerstedt B. (1986). *Sättning hos lösfyllnadsisolering* (Meddelande M85:31). Gävle: Statens Institut för byggnadsforskning.
- Svennerstedt B. (1997). A model for the setting of attic loose-fill insulation. In R. S. Graves, & R. R. Zarr (Eds.), *Insulation materials: Testing and applications: 3<sup>rd</sup> Vol.* (ASTM STP 1320). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, ASTM.
- Wenzel, F. (1962). *Untersuchungen über die Druckverhältnisse in Silozellen*. Dissertation. Braunschweig: TU Braunschweig.

# Summary

## By og Byg Documentation 030: Loose-fill insulation in walls and attics

How varying moisture conditions influence density

This report describes material behaviour that significantly influences the settling of loose-fill insulation materials. The specific application presented here is the loose-fill insulation material filled in walls and used as insulation in attics. This is the second of two reports related to the same programme. The first report is By og Byg Documentation 011.

Filled in a 0.1 m thick, 2.4 m high and 1.0 m wide gypsum wall, cellulose loose-fill material with a minimum density of  $48 \text{ kg/m}^3$  was found not to settle if kept at a constant relative humidity of 50 % and at a temperature of  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . 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 the constant environment is changed from a relative humidity of 50 % to 80 %, a minimum density of  $63 \text{ kg/m}^3$  is necessary. Furthermore, if the wall is exposed to a temperature of  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  and an alternating relative humidity of 50 % and 80 %, the necessary density is increased to  $73 \text{ kg/m}^3$ . Assuming that the material maintains its elastic capability the density can be reduced to  $69 \text{ kg/m}^3$ . Results are shown in Figure 1.

## Model

The report describes a method that can be used for determining the necessary density of a loose-fill insulation material filled in walls. The necessary density is determined from characteristics describing the wall, the loose-fill insulation material and the moisture conditions that the loose-fill insulation material will be exposed to. In addition, the settling of loose-fill insulation materials used as insulation in attics can be determined. And the settling is determined from characteristics describing the loose-fill insulation material and the moisture conditions that the loose-fill insulation material will be exposed to. The method includes both constant and alternating moisture conditions.

## Tests

The loose-fill materials tested were both new and conventional materials sold on the Danish market and used as thermal insulation. They were various types of loose-fill material such as: mineral wool, cellulose, wood fibre and granulated flax.

Creep has been described for all the investigated materials. Tests were carried out at a constant temperature and included three load cases of approximately 80, 150 and 300 Pa, respectively, with an alternating relative humidity of 50 % and 80 % for each case.

For a limited number of materials and wall materials the friction coefficient is determined from tests.

Fill in tests of loose-fill insulation material filled in walls were carried out. Two different fill in procedures have been tested. For one fill in procedure, the local density and the overall density of the filled in loose-fill insulation



materials have been documented. The used fill in procedure have been used on two fundamentally different types of walls; One was built as a closed box with a wooden frame and sides of gypsum boards; the second was built as a closed box with a wooden frame and sides of gypsum boards with horizontal laths added. At 0.6 m intervals, laths was placed against the gypsum boards. A vapour retarder was placed between the laths and the gypsum board of the second type of wall. Full-scale walls and boxes simulating attics were used to verify the method.

## Calculations

A large number of calculations were performed by applying the presented method. Calculations show that the necessary density and settling of loose-fill insulation materials can be determined by using the method presented.

It was found to be possible to determine analytically a stable density of loose-fill insulation material as a function of stress exposed to alternating moisture conditions.

## Conclusion

A method for determining the necessary density and settling of loose-fill insulation materials is presented. The necessary density in a wall can be determined from characteristics describing the wall, the loose-fill insulation material and the environment that the material will be exposed to during its lifetime. And the settling of loose-fill insulation material in attics can be determined from characteristics describing the loose-fill insulation material and the environment the material will be exposed to during its lifetime. The report describes material behaviour, thus providing a better understanding of the material behaviour of loose-fill insulation materials.

This method can be used to calculate the density needed for a given granulated loose-fill insulation material to stay in a volume-stable state.

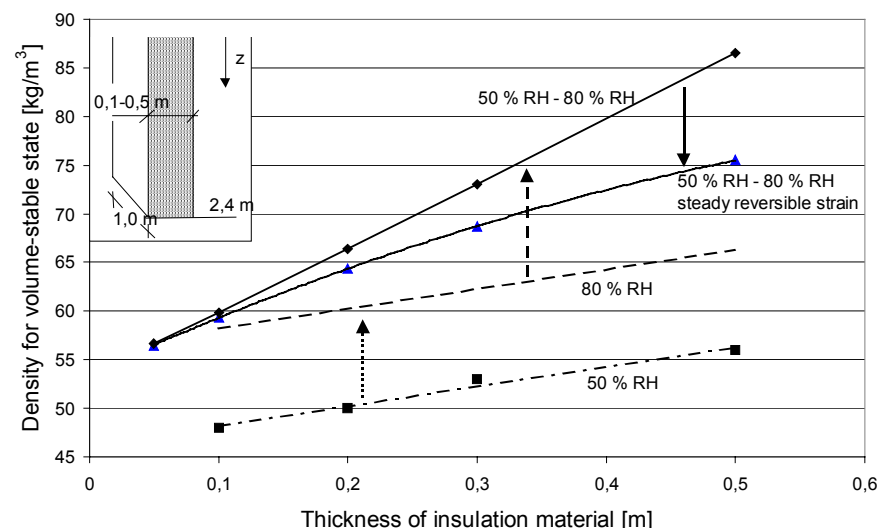


Figure 1. Calculated necessary density as a function of wall thickness to prevent settling of cellulose loose-fill material in a wall. Calculations are performed for a 0.1 m wide gypsum board wall with a relative humidity of to 50 % and 80 %. In addition, the calculated necessary density is shown for an alternating relative humidity of 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 based partly on extrapolated data. The curves for an alternating relative humidity are either based on the assumption, 1) that the cellulose loose-fill material does not keep its reversible strain or 2) that the cellulose loose-fill material keeps its reversible strain.

## **Bilag A Loose-fill insulation in walls. Testing and modelling of creep**

## LOOSE-FILL INSULATION IN WALLS - TESTING AND MODELLING OF CREEP

(Based on By og Byg Documentation 011, "Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge", Danish Building and Urban Research, 2001)

2002 06 12

Key words: Loose-fill material, insulation, creep, model, test method

### 1. SCOPE

This NORDTEST method specifies a method for describing creep for loose-fill material used as insulation in walls. The method consists of a test method and a technique that can be used to adjust test results to a model.

The method seeks to model creep in a loose-fill material influenced by and in balance with a stable environment.

It is the objective to use tests to model and describe long-term material behaviour using a much shorter test period. Consequently, the method is a distinct short-term test.

### 2. FIELD OF APPLICATION

The method has been specially designed to describe and model the creep behaviour of loose-fill materials. The method is designed for use in the laboratory.

### 3. REFERENCES

- Nielsen, L. F. (1986). *Materialemechanik grundkursus II i bygningsmaterialer (Materials mechanics; in Danish)*, Technical Report 169/86, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark.
- Nielsen, L. F. (1988). *Materialemechanik II Rheologi, brud, kompositmaterialer og levetid (Materials mechanics II. Rheology, fracture, composite materials and durability; in Danish)*, Technical Report 189/1988, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark.
- Nielsen, L. F. (1993). *Materialemechanik (Materials mechanics; in Danish)*, Technical Report 286/1993, ISSN 0908-3871, Building Materials Laboratory, Technical University of Denmark.

Rasmussen T. V. (2001). *Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge*, By og Byg Documentation 011, Danish Building and Urban Research.

Rasmussen T. V. (2001). *Modelling Settling of Loose-Fill Insulation in Walls. Part I*, Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 25, No. 2, October 2001.

Rasmussen T. V. (2002). *Modelling Settling of Loose-fill Insulation in Walls, Part II, Determination of Coefficients*, Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 25, No. 3, January 2002.

Rasmussen T. V. (2002). *Creep Tests and Techniques for Predicting Densities Necessary to Prevent Settling of Loose-fill Insulation in Walls*, submitted for publication in *Insulation Materials: Testing and Applications: 4<sup>th</sup> Volume, ASTM STP1426*, A. O. Desjarlais, Ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

### 4. DEFINITIONS

Loose-fill material is defined as a mass of material that contains a lot of minor separate parts of the material. These minor parts are not bound together in a fixed predefined form. By small means the mass can be distributed homogeneously across a predefined area, large compared with the size of a single particle.

Creep is defined as the strain that occurs in a material exposed to a constant load as a function of time. Consolidation seen as part of the instantaneous strain during loading is not defined as creep.

## 5. SAMPLING

Samples should be randomly chosen. The chosen sample is loosened by pressurised air in a closed box mounted a vent that prevents loss of material before tested. Furthermore, the sample must be conditioned to test conditions before testing. Especially conditioning for the predetermined relative humidity and the predetermined temperature is important. The sample should be handled in such a way that the least possible interaction of particles, moisture and additives with the surroundings takes place.

The minimum amount of test specimens is 3 samples of equal weight.

As far as possible a sufficient number of specimens should be exposed as to allow for statistical examination of the results.

## 6. TEST METHOD

Constant environment

### 6.1 Principle

Rheology, as a concept of a material, contains every relation between stress, strain and time. In rheology the creep function of a material is of great importance. Experimentally the creep function is determined by measuring the strain as a function of time for a material exposed to constant stress.

The height of the sample is kept limited so that the loss of stress from the top to the bottom of the mass is unimportant in relation to the measured displacements.

Displacements are measured along the vertical centreline of the loose-fill material.

### 6.2 Apparatus

Apparatus for creep test includes the following:

*Test container.* An acrylic cylinder with a vertical centreline is mounted on a horizontal acrylic plate. The cylinder has an internal diameter of  $104.5 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$  and is approximately 110 mm in height. The test container also consists of a plane disc made of acrylic with a diameter 1.5 - 2 mm less than the internal diameter of the cylinder. The plane disc is provided with small drilled not riddled drilled holes made for grips. The plate is approximately 5.5 mm thick, and the cylinder and the disc are both approximately 3 mm thick. The cylinder is marked on the outside at a horizontal plane at 3 angles ( $120^\circ$ ) at every 10 mm vertically from the bottom plane. The disc is to be fixed in a position where the distance from the

bottom to the underside of the disc is 70 mm. This can be done by sticks put through holes drilled in the cylinder.

Weights that should be easy to add to and remove from the upperside of the disc introducing only minor disturbance and source of error to the test. The load is to be mounted as a steady load on top of the disc. For heavier loads it would be a good idea to use load discs with load and off-load hangers.

*Mounting-stick.* An approximately 200 mm stick is mounted perpendicular to a disk. The diameter of the disk is 1.5 - 2 mm less than the internal diameter of the cylinder. The disk is provided with a 1 - 1.5 mm in diameter hole for every  $\text{cm}^2$ . The disc is made of acrylic and is approximately 5.5 mm thick.

A distance measuring system with the capability of at least 12 mm of displacement with an accuracy of  $\pm 0.1 \text{ mm}$ . For example a LVDT displacement transducer mounted on a bridge that can be mounted on top of the cylinder. The position of the displacement transducer should be flexible. The weight of the displacement transducer stick is included in the load put on the mass.

A data logger and a data-logger control system for example a PC.

A balance capable of weighing up to 0.5 kg with an accuracy of  $\pm 0.0001 \text{ kg}$ .

Plastic gloves and a light form of respirator should be used together with tweezers and containers for handling and storing the material.

Tests should be carried out in an environment where the relative humidity and temperature are to be kept constant with an accuracy of  $\pm 2\%$  and  $\pm 2^\circ\text{C}$ , respectively.

Apparatus and a test set-up are shown in figure 1.

### 6.3 Preparation of Test Specimens

Prior to exposure, information about the test specimens is registered, e.g. manufacturer, identification (name and type), production method, date of sampling, observations and measurements. The test specimens are kept in the conditions specified by the supplier until test preparations are carried out.

The test container and the mounting-stick are washed in soap and warm water (approximately  $35^\circ\text{C}$ ) and afterwards flushed out with distilled water before being dried lightly with a paper towel and finally air dried.

Test equipment must be clean and non-static electric.

All test equipment and the loose-fill material are conditioned before testing.

#### 6.4 Procedure

The right amount of loose-fill material in order to obtain the predetermined overall density in the test container is weighed. The weighed material is divided into seven parts weighing the same. The parts are then mounted one by one in the test container in the following way. One part of the mass is homogeneously distributed over the horizontal plane of the cylinder and if necessary the tweezers can be used. When distributed, the mounting-stick is gently used to press the mass to the predetermined density, marked on the test container as a horizontal plane with spots at 3 angles (120°). When the mass is filled in the test container, the disc is fixed. Hereafter the test container is stored for approximately one hour before continuing the test procedure.

If loading with load hangers is used, these will hereafter be put in position. Furthermore, the displacement transducer is put in position.

The test is then ready and logging can take place. When the start position is noted, the disc is loosened and the predetermined load is mounted on the upperside of the disc. Loading should not last longer than 20 seconds. If loosening of the disc does result in an expansion of the mass, the disc must be unfixed first at the underneath and then loaded before the sticks at the upperside of the disc are removed carefully.

Logging time is recommended to start with a time difference of 1 second increasing to 5 seconds a few minutes after loading, increasing stepwise to 1 hour after 2 hours from the time of loading.

The vertical displacement of the disc is measured as a function of time. After some time, for example 3 days, the added load is carefully removed and hereafter the disc and the displacement transducer stick will only load the mass. When unloading it is recommended to use the logging time as described above. The test is finished 2 hours after the removal of a part of the load.

It is important to hold the test set-up vibration free during the test period.

Test specimens exposed simultaneously must not be able to influence each other.

One test series includes 3 in principle identical specimens of loose-fill mounted 3 independent load cases.

The mounting procedure of the test specimens in the apparatus will be described in the report.

Any signs of degradation are noted e.g. voids, lumps, delamination etc. during exposure.

#### 6.5 Theoretical Description of Creep

Creep can be described theoretically by applying the theory for a Burger material, (Nielsen 1988). Creep can be determined with the use of a theoretical description of the creep function. In addition, some materials can also be defined as Clouser materials, and can be described by the simpler Clouser equation. Use of the Clouser equation is recommended if the analysis of the creep function permits.

It is noted that parameters in the creep functions are theoretically independent of the load state. However, this is only true if the load does not cause damage to the material.

The creep of a Clouser material is given by the following equation (Nielsen 1986, 1993):

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

where

$t$  is time

$E$  (Pa) is the elastic module

$\eta$  (Pa·s) is viscosity

and  $\delta$  (s<sup>-1</sup>) is a rheological constant given by

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

$\tau = \frac{1}{\delta}$  is a constant termed the relaxation time (s)

and

$a_1$  (dimensionless) is the creep exponent which is also a constant.

The creep function  $c(t)$  describes the strain that occurs, for the material to be exposed to a constant stress,  $\sigma=1$  at the time  $t=0$ .

#### 6.6 Determination of the Creep Function

The theoretical description of the creep function can be used to describe the time dependent strain. Instantaneous strain contains an instantaneous elastic part and an instantaneous plastic part. The in-

stantaneous plastic strain must be added to the creep function as a constant and take therefor no part in the determination of the parameters  $a_1$  and  $\tau$ , (Rasmussen 2001).

Figure 2 shows in principle creep as a function of time for a material with a constant load that is subsequently removed.

The measured creep that develops in the mass exposed to constant stress, as a function of time is adjusted the Clouser equation. Adjusting the creep data to the Clouser equation it is found that the equation can be linear by logarithm in the following way:

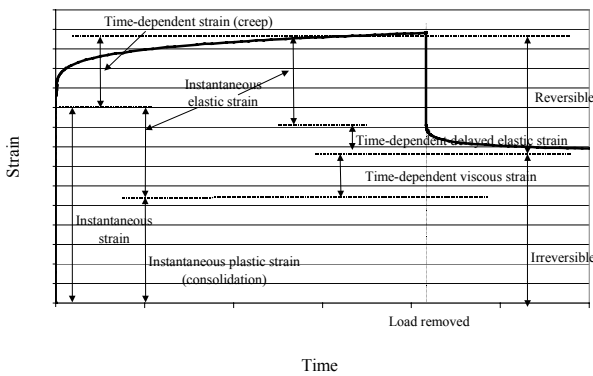


Figure 2 Typical example of creep as a function of time for a material with a constant load that is subsequently removed.

$$Y = Y_0 + \alpha X$$

where

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

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

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

$$\alpha = a_1$$

Here  $X_0$  is found by using:

$Y=0$  which gives:

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

and  $a_1$  and  $\tau$  can be determined as:

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

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

An extract of the measured creep data, for at least 3 load levels, is adjusted to the linear logarithm creep equation by the least square method.

The elastic module used is the average instantaneous elastic modulus found from unloading. It should be noted that the elastic modulus found from the lighter loads could be defective because of the displacement transducer used and because of the low unloading ratio of the total load.

### 6.7 Determining of creep parameters

From the experiments the travel of the disc placed on top of the loose-fill material as a function of time is recorded. The travel of the disc is denoted  $u$  and the start position of the disc is set to zero. The height of the loose-fill material is denoted  $h_0$  and the time,  $t$  is set to zero at test start. At the time,  $t_1$  the added load is carefully removed. The load mounted on top of the disc at test start is denoted  $L_0$  (kg) and the relieved load at  $t = t_1$  is denoted  $L_1$  (kg).

From this input the creep parameters are found using the following steps.

- 1) Test data are shown in a diagram presenting strain as a function of time. In the diagram stress and the time of load relieve is noted.

$$\text{Strain is given as } \varepsilon = \frac{u}{h_0}$$

$$\text{loaded stress is } \sigma_0 = \frac{L_0 g}{A}$$

$$\text{relieved load is } \sigma_1 = \frac{L_1 g}{A}, \text{ where the internal}$$

horizontal area of the cylinder is denoted  $A$  ( $\text{m}^2$ ) and  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  is the gravitational acceleration.

- 2) Determine the Elastic module from the load relieve at the highest load level.

$$E = \frac{\sigma_1}{(\varepsilon_{1,0} - \varepsilon_{1,1})}, \text{ where } \varepsilon_{1,0} \text{ is the strain just}$$

before the load relieve and  $\varepsilon_{1,1}$  is the strain after the load relieve.

- 3) Determine the instantaneous elastic strain

$$\text{given by } \varepsilon_{0,E} = \frac{\sigma_0}{E}$$

- 4) Measure the instantaneous strain,  $\varepsilon_{0,m}$  from loading, diagram given in 1).

- 5) Determine the consolidation given by  $\varepsilon_c = \varepsilon_{0,m} - \varepsilon_{0,E}$
- 6) Determine  $C(t) - C_1$  where  $C(t) = \frac{\varepsilon}{\sigma_0}$  and

$$C_1 = \frac{\varepsilon_c}{\sigma_0}$$

- 7) Determine  $X = \log_{10}(t)$  and  $Y = \log_{10}(E(c(t) - C_1) - 1)$ .
- 8)  $X$  and  $Y$  are shown in a logarithm diagram for i.e.  $-1 < X < \log_{10}(t_1)$ .
- 9) A linear model  $Y = Y_0 + \alpha X$  is adjusted to the  $X, Y$  data by the least square method. The linear logarithm is shown including the used part of the test data together with the equation for the linear logarithm.
- 10) Determine  $a_1$  and  $\tau$  from  $a_1 = \alpha$  and  $\tau = 10^{-Y_0/\alpha}$
- 11) Determine and show in diagram under 1),  $(c(t) + C_1)\sigma_0$  for  $t < t_1$  and  $(c(t) + C_1)\sigma_0 - (c(t - t_1))\sigma_1$  for  $t \geq t_1$ .
- 12) Adjust the instantaneous strain,  $\varepsilon_{0,m}$ , and the used part of the  $X, Y$  test data by interaction to achieve a good agreement between the modelled creep (shown in 11)) and test data (shown in 1)).

### 6.8 Expression of results

The results of the test are given as measured strain time curves shown together with the adjusted Clouser equation clearly marked with the individual load level, temperature and relative humidity used.

In addition a figure showing the linear logarithm  $X$  and  $Y$  are shown including the used part of the test data together with the adjusted linear logarithm.

Calculated values as the instantaneous elastic modulus, the relaxation time, and the creep exponent and instantaneous strain according to load level is registered together with the tested density of the loose-fill material.

Furthermore it should be registered if any changes in appearance of the specimens during the test and any signs of degradation have been discovered, together with information on when the changes occurred and how big they are etc.

### 6.9 Accuracy

*Note: Mathematical modelling of test results always has a degree of uncertainty and consequently the results have to be used with care.*

### 6.10 Test Report

The test report shall include at least the following information:

- a. Name and address of the testing laboratory
- b. Identification number of the test report
- c. Name and address of the organisation or the persons that ordered the test
- d. Purpose of the test
- e. Name and address of manufacturer or supplier of the tested object
- f. Method of sampling and other circumstances (date and person responsible for the sampling)
- g. Name or other identification marks of the tested object
- h. Description of the tested object, the way in which they were mounted in the test apparatus and the used density.
- i. Date of supply of the tested object
- j. Test period
- k. Duration of time and total number of samples for every noted load level specified by test equipment load and flexible load
- l. Conditioning of the test specimens, environmental data before and during the test (temperature, RH, etc.)
- m. Identification of the test equipment and instruments used
- n. Any deviations from the test method
- o. Test results according to 6.7
- p. Inaccuracy or uncertainty of the test result
- q. Date and signature.

*Note: Any results from test methods performed on fresh or aged materials/components may be included.*

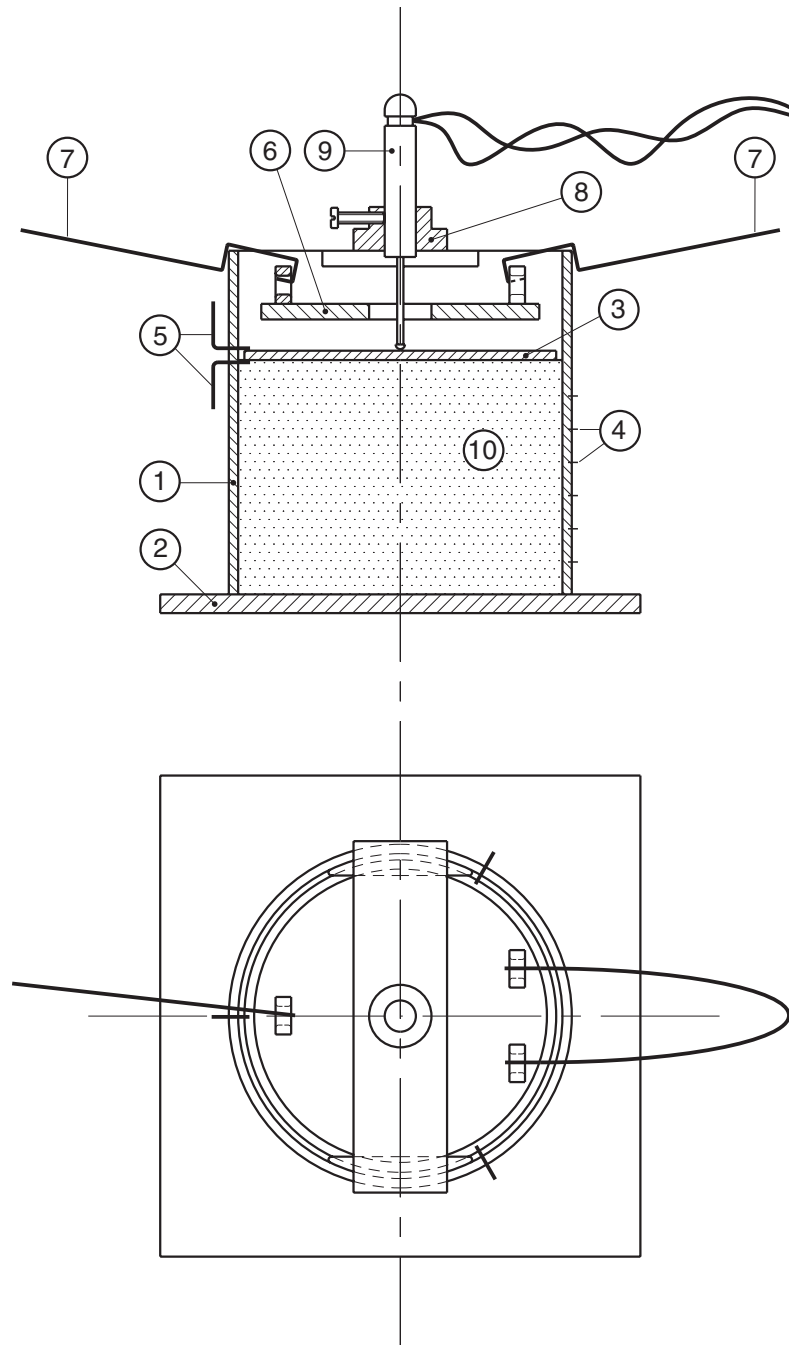
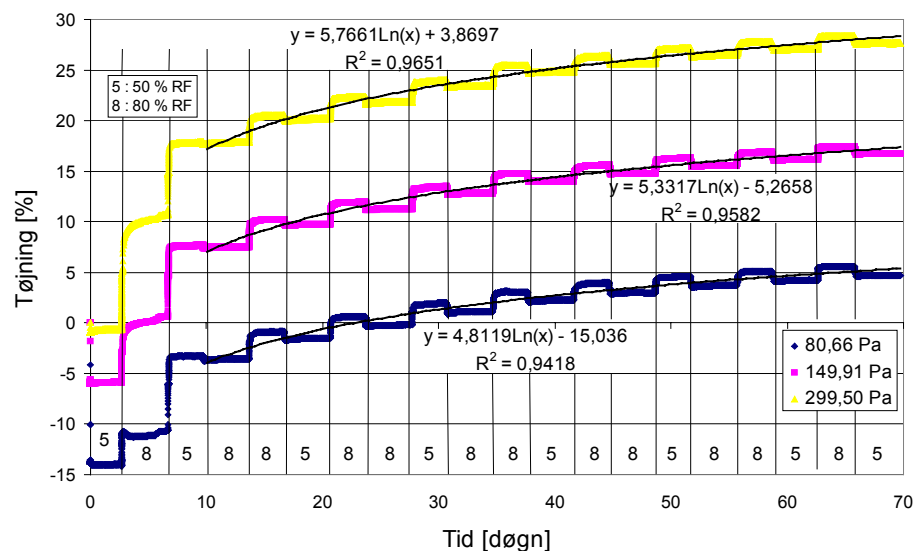


Figure 1 Apparatus to measure instantaneous strain and creep for loose-fill material. Top: vertical section. Bottom: plan. 1: 104.5 mm Ø; acrylic cylinder of 110 mm height. 2: 5.5 mm thick acrylic plate. 3: 3 mm thick acrylic disc. 4: 10 mm marks. 5: sticks. 6: load disc. 7: load and off-load hangers. 8: bridge. 9: LVDT displacement transducer. 10: loose-fill material.



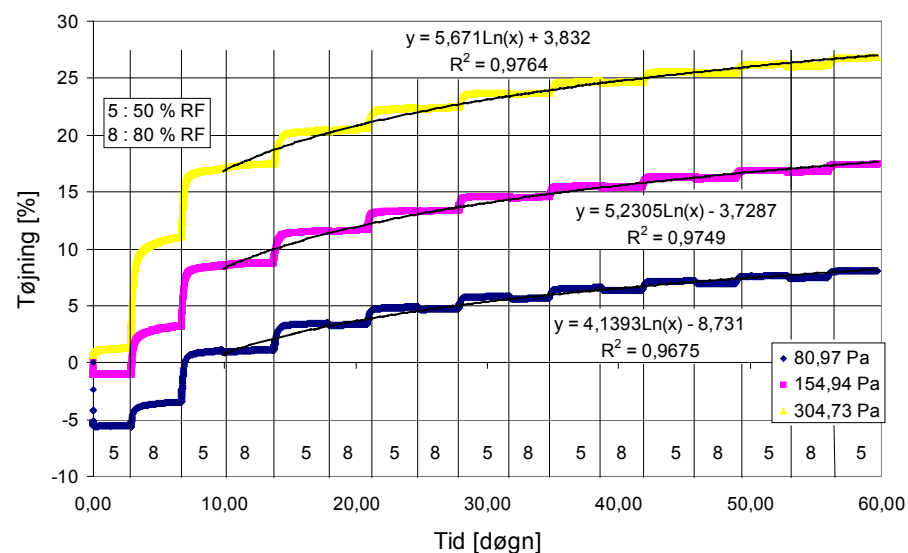
## Bilag B Tøjningsdiagrammer

### Tøjnings-tids-diagram for Dansk hør



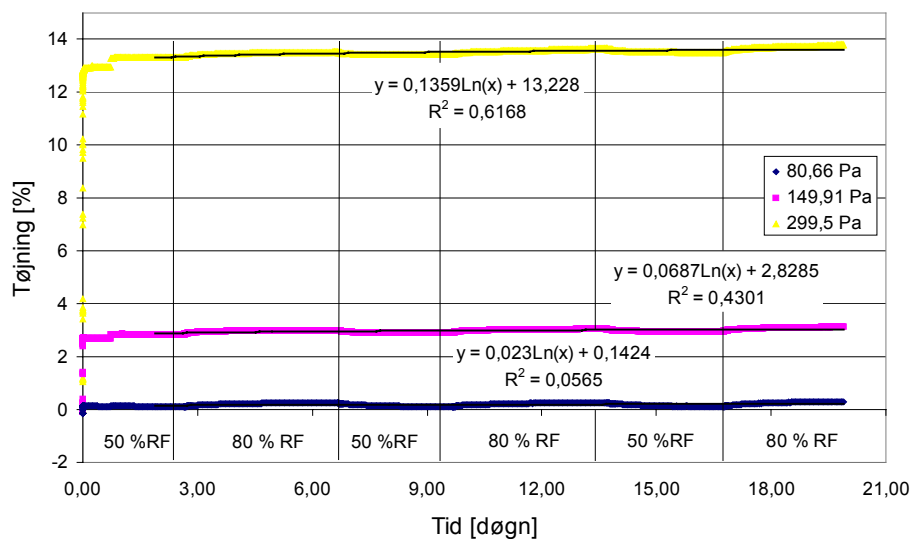
Figur 40. Tøjnings-tids-diagram for Dansk hør indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , der indtil tiden  $t_1$  er udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_2$  er udsat for 80 % RF for igen indtil tiden  $t_3$  at blive udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_4$  er udsat for 80 % RF og så fremdeles skiftes den relative fugtighed for de angivne tider. De angivne tider er anført med lodrette streger i diagrammet. Isoleringsmaterialet er påsat en konstant last på henholdsvis 60,66, 129,91, 279,50 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 20 Pa. Forsøget er udført ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Tøjnings-tids-diagram for Papiruld



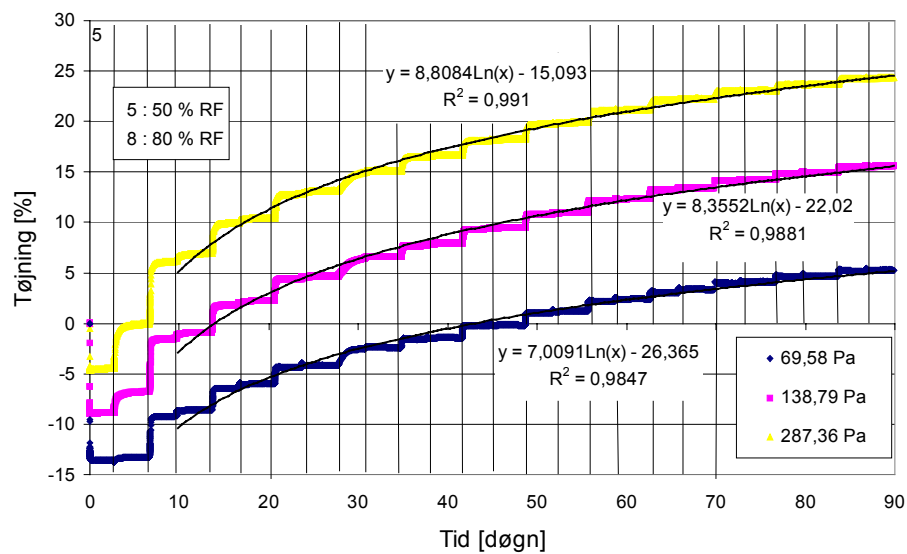
Figur 41. Tøjnings-tids-diagram for Papiruld indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , der indtil tiden  $t_1$  er udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_2$  er udsat for 80 % RF for igen indtil tiden  $t_3$  at blive udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_4$  er udsat for 80 % RF og så fremdeles skiftes den relative fugtighed for de angivne tider. De angivne tider er anført med lodrette streger i diagrammet. Isoleringsmaterialet er påsat en konstant last på henholdsvis 60,97, 134,94, 284,73 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 20 Pa. Forsøget er udført ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Tøjnings-tids-diagram for Rockwool



Figur 42. Tøjnings-tids-diagram for Rockwool indlejret med en densitet på  $70 \text{ kg/m}^3$ , der indtil tiden  $t_1$  er udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_2$  er udsat for 80 % RF for igen indtil tiden  $t_3$  at blive udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_4$  er udsat for 80 % RF og så fremdeles skiftes den relative fugtighed for de angivne tider. De angivne tider er anført med lodrette streger i diagrammet. Isoleringmaterialet er påsat en konstant last på henholdsvis 60,66, 129,91, 279,50 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 20 Pa. Forsøget er udført ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## Tøjnings-tids-diagram for Thermocell



Figur 43. Tøjnings-tids-diagram for Thermocell indlejret med en densitet på  $50 \text{ kg/m}^3$ , der indtil tiden  $t_1$  er udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_2$  er udsat for 80 % RF for igen indtil tiden  $t_3$  at blive udsat for 50 % RF og derefter indtil tiden  $t_4$  er udsat for 80 % RF og så fremdeles skiftes den relative fugtighed for de angivne tider. De angivne tider er anført med lodrette streger i diagrammet. Isoleringmaterialet er påsat en konstant last på henholdsvis 59,58, 128,79, 277,36 Pa på oversiden og et undertryk på undersiden på 10 Pa. Forsøget er udført ved  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Hvordan sikrer man, at løsfyldsisolering i vægge ikke sætter sig, og hvor stor en overhøjde skal isoleringen have på lofter? Denne rapport beskriver de mekanismer, der resulterer i sætninger af løsfyldsisolering i vægge og på lofter udsat for varierende fugtpåvirkninger. Gennem forsøg med konstruktioner i fuld størrelse isoleret med forskellige løsfyldsprodukter på det danske marked viser rapporten, hvordan sætninger i materialerne kan beherskes. Forsøgene omfatter forskellige væg- og loftskonstruktioner udsat for fugtpåvirkninger svarende til det danske klima. Rapporten afsluttes med et forslag til en metode for dimensionering af løsfyldsisolering anvendt i vægge og på lofter. De afrapporterede forsøg og metoder udgør anden del af projektet *Sætningsfri indblæsning af cellulosebaseret løsfyldsisolering i vægge*.

1. udgave, 2002

ISBN 87-563-1136-2

ISSN 1600-8022