

Naturlig ull som lydabsorbentmateriale

Katrine Arnesen

Master i elektronikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Peter Svensson, IET

Medveileder: Tor Erik Vigran, IET
Birgitte Linde Røsvik, Rom & Tonik AS

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elektronikk og telekommunikasjon

Sammendrag

Med hovedfokus på naturlig ull har ulike aspekter for bestemmelse av absorpsjons-egenskaper blitt undersøkt. Spansk og mongolsk ull er testet og sammenlignet med glassfiber (Glava) og polyester. Generelt gir Glava best absorpsjon i store deler av frekvensspekteret, mens mongolsk ull og spansk ull med lavest tetthet gir tilstrekkelig god absorpsjon jevnt over frekvensspekteret. Polyester og spansk ull med høye tettheter egner seg dårlig som absorberer.

Ved bruk av hulromsavstand mellom materiale og hard bakvegg får en bedre absorpsjon i lave frekvenser og litt dårligere i høyere frekvenser. For dobbeltporøse materialer med hulldiameter på 30mm (meso-perforering), øker absorpsjonsfaktoren i høye frekvenser med økende perforeringsgrad, og synker tilsvarende i bass. En kombinasjon av hulromsavstand og meso-perforering forbedrer dempningen i mellom-frekvenser, men den blir betraktelig dårligere i høye frekvenser. Disse faktorene anbefales ikke å kombinere, og hvis en ønsker bedre dempning i lave frekvenser er hulromsavstand beste løsning.

Når det gjelder fibertykkelse er dette svært usikkert for naturlig ull, men litt mer pålitelig for fremstilte materialer. Det er usikkert hvordan absorpsjonsfaktoren påvirkes av fibertykkelsen. Strømningsresistansen viser seg å være uavhengig av fibertykkelsen, men den er svært avhengig av tettheten. Økende tetthet gir økende strømningsresistans. Naturlig ull har mange gode egenskaper som gjør det til et godt produkt, det er blant annet hygroskopisk, allergivennlig og flammehemmende. Ull kan dog ikke helt måle seg med glassfiber med tanke på absorpsjon, men den er tilstrekkelig god for vanlig tale i mellom-frekvenser og diskant.

Abstract

Focusing on natural wool, various aspects have been examined to determine the absorption properties. Spanish and Mongolian wool have been tested and compared to fiberglass (Glava) and polyester. Generally, Glava gives the best absorption in most parts of the frequency spectrum, while Mongolian and Spanish wool with lowest density provide adequate absorption evenly across the frequency spectrum. Polyester and Spanish wool with high density are not suitable as sound absorbers.

Using air cavity distance between a material and a hard wall (rigid backing), one gets better absorption in low frequencies and slightly worse in higher frequencies. For double porosity materials with hole diameter of 30mm (meso-perforation), the absorption coefficient increases in high frequencies with increasing perforation, and decreases correspondingly in bass. A combination of air cavity distance and meso-perforation improves the attenuation in medium frequencies, but it becomes significantly worse in high frequencies. It is not recommended to combine these two factors and if one wishes better attenuation in low frequencies, air cavity distance is the best solution.

Fiber diameter is very uncertain for natural wool, but a little more reliable for produced materials. It is uncertain how the absorption coefficient is affected by the fiber diameter. The airflow resistivity turns out to be independent of the fiber diameter, but it is highly dependent of the density. Increasing density gives increasing airflow resistivity. Natural wool has many good properties that make it a good product; it is hygroscopic, allergy friendly and flame retardant, to mention a few. However, wool cannot quite compete with fiber glass considering absorption, but it is sufficiently good for normal speech in medium frequencies and treble.

Forord

Denne masteroppgaven er en del av mastergraden i Elektronikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet. Den er skrevet i løpet av våren 2015 og teller 30.0 studiepoeng gjennom faget TTT4900. Masteroppgaven er skrevet i samarbeid med Rom & Tonik AS.

Jeg vil rette en stor takk til veileder Tor Erik Vigran som har vært til stor hjelp gjennom hele våren, både med hjelp til måleutstyr og relevant litteratur, i tillegg til verdifulle diskusjoner angående resultatene. Takk til faglærer Peter Svensson for god veiledning gjennom prosessen. Jeg vil også takke Birgitte Linde Røsvik i Rom & Tonik for prøvematerialer det er gjort målinger på, samt hjelpsomme samtaler på mail og telefon. Takk til mine medstudenter på lesesalen for gode diskusjoner og positivt arbeidsmiljø: Trine Erfjord Meling, Helene Aasen, Frank Hetland og Leo Hauge. I tillegg vil jeg takke Tore Berg for hjelp til kutting og utskjæring av alle prøver, og Tim Cato Netland for hjelp med måleutstyr og oppsett. Til slutt vil jeg takke familie og venner, spesielt Christian Kavli, for støtte gjennom våren og hele min studietid.

Katrine Arnesen, juni 2015

Institutt for elektronikk og telekommunikasjon, NTNU

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Oppgavebeskrivelse	1
1.2	Disposisjon	2
2	Teori	3
2.1	Kanteffekter	4
2.2	Strømningsresistans	5
2.3	Ull og porøse materialer	5
2.3.1	Porositet	6
2.3.2	Tortuositet	6
2.3.3	Viskøs og termisk lengde	7
2.3.4	Ull	8
2.3.5	Tilvirkningsmetoder	8
2.4	Rayon	10
2.5	Modeller for porøse materialer	10
2.5.1	Johnson/Allard-modellen	10
2.5.2	Meso-perforering	12
3	Måleteknikker	13
3.1	Rør-metoden	13
3.1.1	Impedansrør med 2 mikrofoner	13
3.1.2	Impedansrør med 4 mikrofoner	15
3.2	Rom-metoden	17
4	Relatert arbeid	19
4.1	Spesifikk etterklangsmåling hos Rambøll	19
4.2	Akustiske egenskaper til ull	20

4.2.1	Fibertykkelse	20
4.2.2	Tetthet	21
4.2.3	Strømningsresistans	22
5	Metode	23
5.1	Prøver	24
5.2	Rørimpedansmåling	27
5.3	Måling av strømningsresistans	27
5.4	Rom-metoden	28
5.5	WinFlag	29
5.6	Måling av fibertykkelse	29
6	Resultater og diskusjon	31
6.1	Absorpsjonsfaktor	31
6.1.1	To-mikrofon-metode kontra fire-mikrofon-metode	34
6.2	Rom-metode	35
6.3	Ulik hulromsavstand til hard bakplate	37
6.4	Sammensetning av ulike tettheter	42
6.5	Meso-perforering med ulik perforeringsgrad	44
6.6	Kombinasjon av perforering og hulromsavstand	46
6.7	Fibertykkelse	48
6.8	Regresjonsanalyse	50
6.9	Avvik mellom oppgitte og målte tettheter	51
6.10	Usikkerhet	53
7	Konklusjon og videre arbeid	55
7.1	Konklusjon	55
7.2	Videre arbeid	56
A	Målte og tilpassede verdier for komplekst bølgetall	61

Figurer

2.1	Statistisk absorpsjonsfaktor for forskjellig prøveareal av et porøst materiale	4
2.2	Skisse av idealisert system for måling av porositet	6
2.3	Skisse av poreform i et porøst materiale	7
2.4	Produkter fra Rom&Tonik i mongolsk ull	9
2.5	Skisse av dobbeltporøst materiale	12
3.1	Oppsett for impedansrør med to mikrofoner	13
3.2	Oppsett for impedansrør med fire mikrofoner	15
4.1	Etterklangstid målt hos Rambøll AS	19
4.2	Absorpsjonsfaktor avhengig av fibertykkelse	20
4.3	Absorpsjonsfaktor avhengig av tetthet	21
4.4	Forholdet mellom strømningsresistans og tetthet	22
5.1	Bilder av materialer	25
5.2	Skisse av måleoppsett for måling av strømningsresistans	28
5.3	Skisse av klangrom og utstyrsoppsett	28
5.4	Egenskapsvinduer i WinFlag for porøst materiale ved bruk av Johnson/Allard-modellen og for dobbeltporøst materiale av Sgard	29
6.1	Målt og beregnet absorpsjonsfaktor for mongolske ullprøver	31
6.2	Målt og beregnet absorpsjonsfaktor for Glavaprøver og Sund polyester	32
6.3	Målt og beregnet absorpsjonsfaktor for spanske ullprøver	34
6.4	Målt og beregnet absorpsjonsfaktor ved rom-metoden	35
6.5	Absorpsjonsfaktor for mongolske ullprøver, med ulik avstand til hard bakplate	38

6.6	Absorpsjonsfaktor for Glava og Sund polyester, med ulik avstand til hard bakplate	39
6.7	Absorpsjonsfaktor for spanske ullprøver, med ulik avstand til hard bakplate	41
6.8	Sammensetning av ulike tettheter	43
6.9	Absorpsjonsfaktor for alle prøver, med ulik perforeringsgrad	45
6.10	Absorpsjonsfaktor for alle prøver med perforering, med og uten hulromsavstand	48
6.11	Forhold mellom strømningsresistans og tetthet	50
6.12	Forhold mellom strømningsresistans og fibertykkelse	51
6.13	Absorpsjonsfaktor for målt og oppgitt tetthet	52
A.1	Målte og tilpassede verdier for komplekst bølgetall	68

Tabeller

5.1	Utstyrliste	24
5.2	Sammensetning og kvalitet for spanske ullprøver	25
5.3	Materialegenskaper	26
6.1	Målt gjennomsnittlig fibertykkelse og standardavvik	49
6.2	Avvik mellom målt og oppgitt tetthet fra produsent	51

Symboler

A	Absorpsjonsareal	m^2
c_0	Lydhastighet i luft	m/s
f	Frekvens	Hz
k'	Bølgetall	m^{-1}
k_s	Tortuositet	
m	Masse	kg
r	Refleksjonsfaktor	
r_s	Strømningsresistans pr. lengdeenhet	$Pa \cdot s/m^2$
R_s	Spesifikk strømningsresistans	$Pa \cdot s/m$
S	Overflateareal	m^2
t	Transmisjonsfaktor	
T	Etterklangstid	s
TL	Transmisjonstap	
V	Volum	m^3
Z_c	Karakteristisk impedans	$Pa \cdot s/m$
Z_n	Normalisert impedans (til Z_0)	
Z_0	Karakteristisk impedans for luft	$Pa \cdot s/m$
α	Absorpsjonsfaktor	
γ	Adiabatkonstant	
μ	Viskositetskoeffisient	$kg/(m \cdot s)$
κ	Varmeledningskoeffisient	$watt/(m \cdot K)$
λ	Bølgelengde	m
ρ_0	Tetthet i luft	kg/m^3
σ	Porositet	
ω	Vinkelfrekvens	rad/s
Λ	Karakteristisk viskøs lengde	μ
Λ'	Karakteristisk termisk lengde	μ

Kapittel 1

Introduksjon

Naturlig ull er en type porøst material som egner seg for bruk i lydabsorbenter, men som er lite brukt og lite studert. Ull har dog en rekke egenskaper som gjør det interessant: det er hygroskopisk, dvs. det absorberer vann veldig godt og kan fungere som en buffer for variasjon i luftfuktighet. Ull er også allergivennlig da midd har veldig dårlige vekstbetingelser. Materialets fibrer er store og tunge, hvilket gjør at de faller mot gulvet og ikke lar seg puste inn, i kontrast til glassfiber og steinullsfiber som er farlig å puste inn og derfor må forsegles så fibrene ikke slipper ut i lufta. I tillegg er ull brannsikket. Oppgaven er gitt av Rom&Tonik AS, et firma som lager lydabsorbenter av 100% naturlig ull fra mongolske sauer. Hovedmålet med oppgaven er å undersøke ullens akustiske egenskaper og hvilke faktorer som kan være med på å gjøre produktet bedre.

1.1 Oppgavebeskrivelse

I denne masteroppgaven skal det undersøkes flere aspekter som kan bestemme absorpsjonsegenskapene, bl.a. fremstillingsmetode, kombinasjon av ulike sjikt og tetthet, og forskjell i fibertykkelse. I tillegg skal det undersøkes hvordan ull fungerer som en spesiell type lydabsorbent, hvor perforeringer av materialet brukes for å gi forbedrede absorpsjonsegenskaper. Innvirkning av perforeringsgrad, hullstørrelse og materialeegenskaper for ull kan studeres med teoretiske modeller og målinger. Ullen kan sammenlignes med andre typer materialer, som glassfiber og steinullsfiber.

1.2 Disposisjon

Denne oppgaven er delt inn i 7 kapitler der kapittel 1 inneholder introduksjon og oppgavebeskrivelse. Kapittel 2 tar sikte på å gi nødvendig bakgrunnsinformasjon om akustiske egenskaper, materialer og anvendte modeller. Videre blir anvendte måleteknikker med tilhørende teori beskrevet i kapittel 3. Kapittel 4 gir informasjon om tidligere arbeid relatert til temaet og deretter kommer en beskrivelse av gjennomføring og metode i kapittel 5. Kapittel 6 inneholder resultater og tilhørende diskusjon og til slutt finner vi konklusjon og forslag til videre arbeid i kapittel 7.

Kapittel 2

Teori

Innen bygg- og romakustikk finnes det flere sentrale parametere som bestemmer de akustiske egenskapene til et materiale. Den viktigste er absorpsjonsfaktoren, en ubenevnt størrelse som angir i hvilken grad lyd absorberes i et materiale. For lokalt reagerende materialer med lydinnfallsvinkel θ og vinkelfrekvens ω , er den gitt ved:

$$\alpha(\theta, \omega) = 1 - |r(\theta, \omega)|^2, \quad (2.1)$$

der r er refleksjonsfaktoren. Denne er gitt ved:

$$r(\theta, \omega) = e^{j2kL} \frac{1 - H_{12}(\theta, \omega)e^{jks}}{H_{12}(\theta, \omega)e^{-jks} - 1} \quad (2.2)$$

Uttrykket for refleksjonsfaktor er utledet i kapittel 3.1, som beskriver måling av akustiske parametere i et impedansrør. I et impedansrør er den øvre frekvensen begrenset til frekvenser der bare plane bølger kan forplante seg i røret, i vårt tilfelle:

$$f < \frac{0.586c}{d} = \frac{0.586 \cdot 343m/s}{200mm} = 1005Hz, \quad (2.3)$$

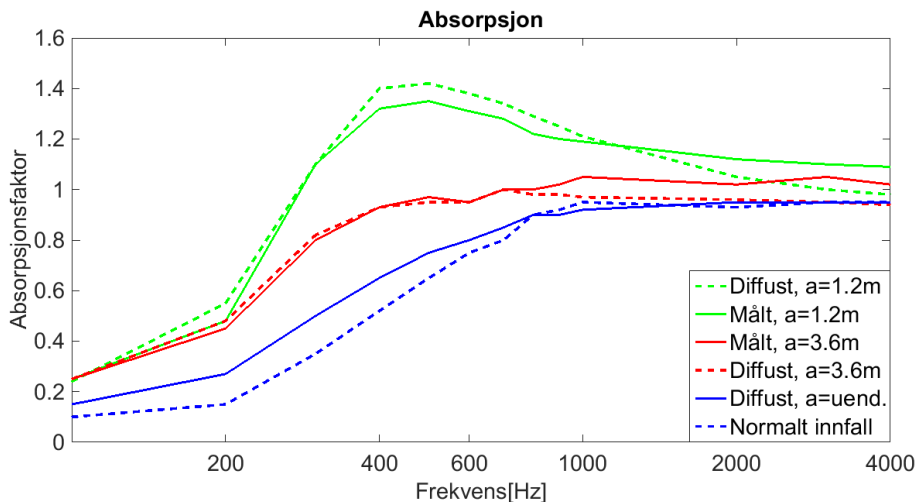
der c er lydhastigheten og d er rørdiameteren. For å kunne få informasjon om høyere frekvenser må en gjøre simuleringer basert på målinger og materialeegenskaper. Måling av absorpsjonsfaktor kan også gjøres ved klangromsmåling, beskrevet i kapittel 3.2. [1]

2.1 Kanteffekter

I praktiske tilfeller kan absorpsjonsfaktoren til et absorberende material bli større enn 1, noe som skyldes kanteffekter. Dette er bøyningseffekter langs prøveflatens ytterkanter som gjør at prøveflaten blir større enn det geometriske arealet. K.-I. Thomasson har ut ifra trykkfordelingen over en absorberende flate beregnet effektiv statistisk absorpsjonsfaktor som funksjon av arealet, beskrevet av Vigran[5]. Ved bruk av følgende ligning kan en regne ut statistisk absorpsjonsfaktor:

$$\alpha_{stat} = \frac{4Re\{Z_n\}}{\pi} \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} \frac{\sin\phi}{|Z_n + Z_f|^2} d\phi d\theta, \quad (2.4)$$

der Z_f er feltimpedans, ϕ er vinkel med flatenormal, θ er asimut-vinkel og Z_n er normalisert impedans til Z_0 , karakteristisk impedans for luft. Figur 2.1 viser beregnet statistisk absorpsjonsfaktor sammenlignet med måledata fra klangrom. Det er brukt mineralullmatter med tykkelse 50mm og strømningsresistans $30\text{kPa}\cdot\text{s}/\text{m}^2$. Mattene har to forskjellige areal, $1.2\times 1.2\text{m}^2$ og $3.6\times 3.6\text{m}^2$.



Figur 2.1: Statistisk absorpsjonsfaktor for forskjellig prøveareal av et porøst materiale, rekonstruert figur fra [5]

Figuren viser også absorpsjonsfaktor med normalt og diffust lydinnfall for en uendelig flate. Resultatet viser at kanteffektene gir drastiske økninger i statistisk absorpsjonsfaktor for en endelig flate sammenlignet med en uendelig flate, selv for prøven med areal $3.6\times 3.6\text{m}^2$, som er vanlig størrelse å bruke ved klangromsmåling.

2.2 Strømningsresistans

Bestemmelse av strømningsresistans baserer seg på at en måler trykkdifferansen over et sjikt av prøvematerialet ved å presse en kjent volumstrøm gjennom. Måleoppsettet finnes i figur 5.2 og følgende definisjoner er hentet fra ISO 9053[2].

Strømningsresistansen er definert ved:

$$R = \frac{\Delta p}{q_v}, \quad (2.5)$$

der Δp er trykkdifferansen i Pascal over prøven relativt til atmosfæretrykket, og q_v er volumhastigheten til en luftstrøm i m^3/s som passerer et porøst materiale.

Den spesifikke strømningsresistansen er definert som:

$$R_s = R \cdot S, \quad (2.6)$$

der S er arealet av prøven loddrett på strømningsretningen, og R_s får enheten $Pa \cdot s/m$. Spesifikk strømningsresistans brukes vanligvis som en karakteristisk størrelse for fiberduker. Dersom prøven er tykkere og en antar at den er homogen brukes betegnelsen strømningsresistivitet:

$$r_s = \frac{R_s}{d}, \quad (2.7)$$

der d er prøvetykkelsen i strømningsretningen, og r_s får enheten $Pa \cdot s/m^2$.

2.3 Ull og porøse materialer

I porøse materialer har fibrene en luftåpen porestruktur i overflaten og inne i materialet. Først og fremst bestemmer materialets tykkelse, porositeten og avstanden til bakenforliggende plate absorpsjonsegenskapene til materialet. Tekstiler, mineralullprodukter, filt og cellulosefibrer er materialer som kan ha høy absorpsjonsfaktor. Kork og gassbetong er materialer med lukkede porer og har relativt lav absorpsjonsfaktor. Porøse materialer absorberer i hovedsak mellom- og høyfrekvenser, men kan bedres ved tykkere materiale, større utføring eller høyere strømningsresistans. [6]

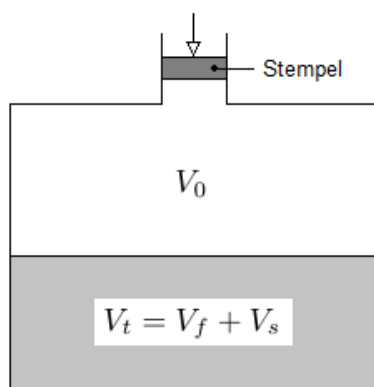
2.3.1 Porositet

Porositeten er forholdet mellom sammenkoblede hulromsvolum og det totale volumet av materialet. Parameteren er viktig med tanke på lydutbredelsen i porøse materialer. Denne størrelsen er vanlig å måle ved å fylle porene med væske, men en kan også bruke metoder basert på bruk av luft, for eksempel følgende metode utviklet av Champoux et al[7]. Figur 2.2 viser en skisse av et målesystem der et materiale med et gitt totalvolum, $V_t = V_f + V_s$, plasseres i et lukket kammer. V_0 er kammerets luftvolum, V_f er porevolumet og V_s er volumet av rammeverket. Da er porositeten gitt ved:

$$\sigma = \frac{V_f}{V_t} \quad (2.8)$$

En kontrollert forskyvning av stempelet gir en volumforandring, ΔV , og en trykkforandring, ΔP . Under forutsetning at trykket i kammeret er likt barometertrykket, P_0 , før stempelforskyvning, og at en har en isoterm tilstandforandring, kan det ukjente totalvolumet av luft i kammeret, $V = V_0 + V_f$, bestemmes ved ligning 2.9. [5]

$$V = -(P_0 + \Delta P) \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad (2.9)$$



Figur 2.2: Skisse av idealisert system for måling av porositet

2.3.2 Tortuositet

Tortuositet er en parameter som gir informasjon om retningsorienteringen av porene i materialet. Der materialet har rørformede porer og disse danner en vinkel,

ϕ , med overflaten, er tortuositeten gitt ved:

$$k_s = \frac{1}{\cos^2 \phi} \quad (2.10)$$

En slik modell blir likevel for enkel for mange anvendelser, selv der en forutsetter et isotropt materiale og et stivt rammeverk. [5]

2.3.3 Viskøs og termisk lengde

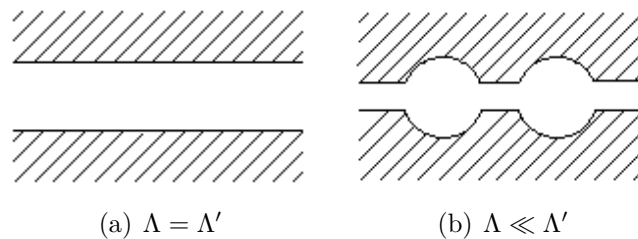
De to parameterne som karakteriserer poreformene i et porøst materiale, viskøs og termisk lengde, er definert på henholdsvis følgende måte:

$$\frac{2}{\Lambda} = \frac{\oint_S \nu_i^2(r_V) dS}{\int_V \nu_i^2(r) dV} \quad (2.11)$$

og

$$\frac{2}{\Lambda'} = \frac{A}{V} \quad (2.12)$$

Telleren i uttrykket for Λ er et flateintegral der ν_i er fluidets hastighet over innsiden av poreveggene med koordinaten r . Tilsvarende volumintegral finnes i nevneren der hastigheten inngår i det totale porevolumet. Λ' er gitt ved forholdet mellom porenes totale indre volum V , og overflate A . Forholdet mellom disse to parameterne gir også en indikasjon på poreformen. For et materiale med enkle rørformede porer vil de to parameterne være av samme størrelsesorden, men dersom porene er forbundet med hverandre ved små og trange forbindelseskanaler som gir høy flytmotstand, vil en ha $\Lambda \ll \Lambda'$. Dette er illustrert i figur 2.3. [5,8]



Figur 2.3: Skisse av poreform i et porøst materiale

2.3.4 Ull

Ullfibrenes overflate er dekket av skjell som ligger over hverandre som takstein. Utenpå skjellene ligger en tynn hinne, epikutikulaen; denne gjør fiberoverflaten vannavstøtende, men er gjennomtrengelig for vanndamp. Skjellene og krusningen fører til at tekstiler av ullfibrer inneholder mye luft og tekstilene får dermed en spesielt god varmeisolerende evne. Ullfibrenes hygroskopiske egenskaper gjør at ullen kan ta opp omtrent 1/3 fuktighet av sin egen masse fra den omgivende luften uten at den kjennes våt. I tillegg er ullen vannavstøtende på grunn av dens lave overflateenergi. Dette betyr at væsker formes til dråper og ruller av i stedet for å bli absorbert av filtet. Da har en tid til å tørke det bort før det setter varige merker. Dette betyr også at det vil slippe støv lett når det støvsuges, og det renses bedre enn syntetiske fibrer som nylon og akryl.

Den mongolske ullen som brukes i produktene til Rom&Tonik kommer fra mongolske sauer og er sterk og grov. Ull er naturlig flammehemmende og trenger sjelden å behandles med flammehemmende kjemikalier. Antennelsestemperaturen er veldig høy, rundt 600°C, og ull brenner veldig sakte. Asken tar form som svart skum og hindrer at brannen sprer seg gjennom materialet.

I motsetning til syntetiske fibrer, som nylon, er naturlig ull allergivennlig. Syntetiske fibrer gir gode levekår for støvmidd som produserer et sterkt allergen som mange reagerer på, særlig i gulvtepper. Ulltepper er derimot like motstandsdyktig mot midd som et hardt gulv. I tillegg er ullfibrer så tunge at de faller til bakken og forurenser ikke luften vi puster inn. Mange vanlige bygningsmaterialer som tre, lim og isolasjon avgir flyktige organiske forbindelser (VOC), som aldehydet metanal, også kalt formaldehyd. Dette kan minke luftkvaliteten i et rom. Ullfibre binder formaldehyd kjemisk og fjerner det dermed fra luften. [16,17]

2.3.5 Tilvirkningsmetoder

Toving

Ved toving blir ullen lagt i kryssende lag på hverandre og vætet med rent vann. Lette sirkelbevegelser gjør at ullen toves sammen på grunn av mikroskopiske ”pigger” i ullen. Varmt såpevann påføres og en kan begynne å tove, gjerne ved å gni ullen langs et vaskebrett eller lignende. Ullen krymper ved varme og friksjon og

blir tettere og fastere ved mye arbeid. Filten skyldes ren for såpe og rulles inn i et håndkle til tørking.

Nålefilting

Ved denne metoden legges også ullen i flak over hverandre slik at fibre krysses, og de legges deretter oppå en pute. Det brukes så en filtenål som stikkes opp og ned gjennom ullen og puten helt til ullen fester seg sammen.

Karbonisering

Karbonisering av ull kan gjøres ved hjelp av svovelsyre(H_2SO_4) og brukes for å fjerne celluloseholdige urenheter fra ullen, og elementer som strå eller borrar. Prosessen begynner ved å dykke ull ned i en oppløsning av svovelsyre som reagerer med celluloseurenheterne. Den konvensjonelle karboniseringsprosessen består av fem hovedtrinn: skuring, syrebehandling, tørking og baking, borreknusing og avstøving, og nøytralisering. Den karboniserte ullen sendt fra Spania er fin og ren ull, hovedsakelig fra merinosau, men ikke utelukkende. Den ukarboniserte ullen har opprinnelse fra spanske og portugisiske sauer. [18]



(a) FeltTile



(b) FeltCeiling

Figur 2.4: Produkter fra Rom&Tonik i mongolsk ull (bildetillatelse fra Rom&Tonik)

2.4 Rayon

De spanske ullprøvene består hovedsakelig av ull, men også en prosentandel med Rayon. Rayon klassifiseres vanligvis som et produsert fiber og ansees å være regenerert cellulose. Siden det er avledet fra naturlig forekommende cellulose er det ikke et kunstig fiber, men det er imidlertid ikke et naturlig stoff, da cellulose krever omfattende behandling for å bli rayon. Ved fremstilling av rayon blir kjemisk rensset cellulose omdannet til en oppløselig forbindelse. En oppløsning av denne forbindelsen føres gjennom en spinnedyse for å danne myke filamenter som deretter kan konverteres til nesten ren cellulose. En spinnedyse er et flerhullet verktøy der et plastpolymer ekstruderes for å danne fibre, som et slags dusjhode.

De forskjellige typene rayonfibre som brukes i dag er navngitt etter hvilken prosess cellulosen omdannes til løselig form og deretter regenereres. Rayonfibre er våtspunnet, hvilket betyr at filamentene som kommer ut fra spinnedysen går direkte inn i kjemiske bad for størkning eller regenerering. I de fleste tilfeller lages rayon ved en viskoseprosess der rensset cellulose konverteres til xantat($\text{ROCS}_2^-\text{M}^+$) i fortynnet kausisk soda, og deretter regenererer cellulose fra produktet når det kommer ut av spinnedyse. [19]

2.5 Modeller for porøse materialer

Følgende modeller er anvendt i simuleringsprogrammet WinFlag og brukes for å finne materialparametere for porøse materialer.

2.5.1 Johnson/Allard-modellen

Forskjellen mellom målt og beregnet bølgetall er forsøkt minimalisert ved hjelp av et Matlab-program laget av Tor Erik Vigran. Programmet finner materialparametere for et porøst materiale beskrevet ved en Johnson/Allard-modell[9,10], modifisert etter Panneton[11]. Her kan en anta en "limp"-situasjon i motsetning til en "rigid"-situasjon (fleksibel vs. stiv ramme).

Panneton skriver at når det porøse materialets ramme antas ubevegelig (rigid), gjennomgår ikke rammen noen forskyvning ($\underline{u} = 0$) eller deformasjon, den følger kun den akustiske trykkbølgen gjennom viskøs friksjon og varmeoverføring. En får

følgende Helmholtzlikning for rigid ramme:

$$\frac{\Delta p}{\omega^2 \tilde{\rho}_{eff}} + \frac{p}{\tilde{K}_{eff}} = 0, \quad (2.13)$$

der $\tilde{\rho}_{eff}$ og \tilde{K}_{eff} er den effektive tettheten og volumstivheten til fluidmediet, respektivt. p er definert som det fluide poretrykket og \underline{u} er den faste faseforskyvningsvektoren. $\tilde{\rho}_{eff}$ og \tilde{K}_{eff} kan brukes til å utlede karakteristisk impedans og forplantningskonstanten til det tilsvarende fluidmediet ved henholdsvis $Z_{eff} = \sqrt{\rho_{eq} K_{eff}}$ og $\gamma = j\omega \sqrt{\rho_{eff}/K_{eff}}$.

Når rammen til det porøse materialet antas fleksibel (limp), motstår ikke rammen eksterne eksitasjoner og dens spenningsfelt forsvinner. Det dannes en kobling mellom luften i porene og bevegelsen i rammeverket som kan gi store utslag i noen frekvensområder. Denne koblingen er dog relativt svak når fluidet er luft. Vi får følgende limp-likning:

$$\frac{\Delta p}{\omega^2 \tilde{\rho}'_{eff}} + \frac{p}{\tilde{K}_{eff}} = 0 \quad (2.14)$$

Etter Johnson/Allard modellen blir uttrykkene for effektiv tetthet og volumstivhet som følger:

$$\rho_{eff} = \rho_0 k_s \left[1 + \frac{r_s \sigma}{j\omega \rho_0 k_s} G_J(\omega) \right] \quad (2.15)$$

og

$$K_{eff} = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) \left[1 + \frac{8\mu}{jPr \cdot \omega \rho_0 \Lambda'^2} G'_J(Pr \cdot \omega) \right]^{-1}} \quad (2.16)$$

Funksjonene G_J er gitt ved

$$G_J(\omega) = 1 + j \frac{4k_s^2 \mu \rho_0 \omega}{r_s^2 \Lambda^2 \sigma^2} \quad (2.17)$$

og

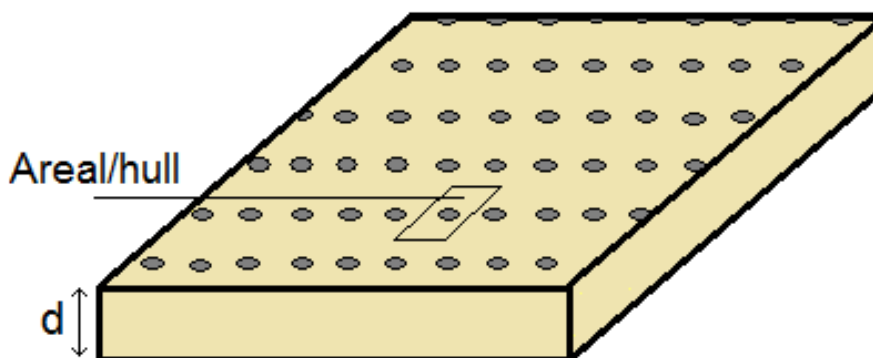
$$G'_J(Pr \cdot \omega) = 1 + j \frac{\Lambda'^2 \rho_0 \omega Pr}{16\mu \sigma^2}, \quad (2.18)$$

der r_s er materialets strømningsresistans, σ er porositet, k_s er tortuositet, Λ er viskøs karakteristisk lengde, Λ' er termisk karakteristisk lengde og Pr er det såkalte *Prandtl-tallet*, gitt ved $\mu \cdot c_p / \kappa$. Pr er en konstant for et gitt fluid og beskriver sammenhengen mellom viskositetskoeffisienten μ , spesifikk varme ved konstant trykk

c_p , og termisk ledningskoeffisient κ . $Pr \approx 0.71$ for luft. [5]

2.5.2 Meso-perforering

Materialer med meso-perforeringer kalles gjerne dobbeltporøse materialer da de består av to innbyrdes forbundne nettverk av porer av forskjellig karakteristisk størrelse. I praksis består slike materialer av perforeringer, vanligvis hull, med en karakteristisk størrelse mye større enn porene i materialet. Meso-perforeringer i et materiale kan bidra til å forbedre materialets lydabsorberende egenskaper i noen frekvenser, men en vil få en redusert effekt i andre frekvenser sammenlignet med et tilsvarende enkeltporøst materiale. Dobbelporøse materialer gir en økning av absorpsjonsfaktoren i lave frekvenser, men bare over en viss frekvens. Dermed blir absorpsjonsegenskapene verre i veldig lave frekvenser, et område hvor bruk av enkeltporøse materialer heller ikke er tilfredsstillende. Modellen for dobbeltporøse materialer implementert i WinFlag er den analytiske modellen gitt av Sgard et.al[12]. Ved å sette hull diameteren til null får en samme resultat som et rigid enkeltporøst material gitt av Johnson og Allard. Egenskapsvinduet for et dobbeltporøst material finnes i figur 5.4. Figur 2.5 viser skisse av et dobbeltporøst material. [12,13]



Figur 2.5: Skisse av dobbeltporøst materiale med tykkelse d

Kapittel 3

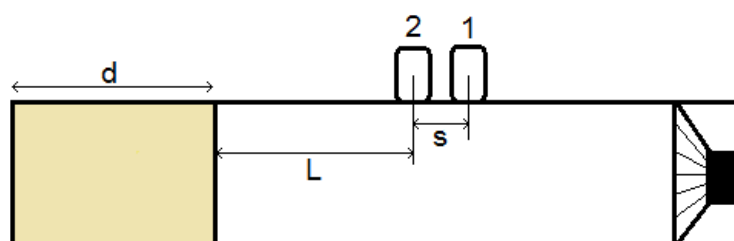
Måleteknikker

I dette kapittelet vil de to måleteknikkene som er brukt presenteres, med tilhørende teori.

3.1 Rør-metoden

Rør-metoden har til hensikt å måle akustiske egenskaper for porøse materialer. To-mikrofon-metoden måler absorpsjonsfaktor, refleksjonsfaktor og impedans, og fire-mikrofon-metoden måler de samme tre parameterne i tillegg til komplekst bølgetall og transmisjonstap.

3.1.1 Impedansrør med 2 mikrofoner



Figur 3.1: Oppsett for impedansrør med to mikrofoner: mikrofon 1 og 2 med avstand s , prøve med tykkelse d og høyttaler

Figur 3.1 viser oppsettet for impedansrør med to mikrofoner. Følgende informasjon er hentet fra ISO 10534-2[1]. Prøven legges i enden av et rett, lufttett impedansrør

og plane bølger genereres i røret med en lydkilde. Lydtrykket måles ved to posisjoner nær prøven med tykkelse d . Den akustiske overføringsfunksjonen, H_{12} , til de to mikrofonsignalene bestemmes og brukes til å beregne refleksjonsfaktor, absorpsjonsfaktor og impedansraten til testmaterialet, alle med lydinnfall vinkelrett på materialet. Overføringsfunksjonen er gitt ved trykket ved de to mikrofonsposisjonene, henholdsvis 1 og 2:

$$H_{12}(f) = \frac{p_2(f)}{p_1(f)} \quad (3.1)$$

Refleksjonsfaktoren er gitt ved:

$$r(f) = \frac{p_R(f)}{p_I(f)}, \quad (3.2)$$

der p_R er den reflekterte bølgen og p_I er innfallende bølge. Innfallende og reflektert trykk ved posisjon x er gitt ved:

$$\begin{aligned} p_I(x) &= a_I e^{jkx} \\ p_R(x) &= a_R e^{-jkx} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Ved å sette $x = 0$ ved overflaten av prøven får en:

$$r = \frac{p_R(0)}{p_I(0)} = \frac{a_R}{a_I} \quad (3.4)$$

Lengden fra mikrofonsposisjon 2 til overflaten av prøven setter vi til L og lengden mellom posisjon 1 og 2 er s . Da er trykket p_1 og p_2 ved posisjon $x_1 = L + s$ og $x_2 = s$:

$$\begin{aligned} p_1 &= a_I e^{jk(L+s)} + r a_I e^{-jk(L+s)} \\ p_2 &= a_I e^{jks} + r a_I e^{-jks} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Dette resulterer i følgende overføringsfunksjon:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{a_I e^{jkL} + r a_I e^{-jkL}}{a_I e^{jk(L+s)} + r a_I e^{-jk(L+s)}} \quad (3.6)$$

$$H_{12} e^{jk(L+s)} + H_{12} r e^{-jk(L+s)} = e^{jkL} + r e^{-jkL} \quad (3.7)$$

r -leddene samles på høyre side:

$$r(H_{12}e^{-jk(L+s)} - e^{-jkL}) = e^{jkL} - H_{12}e^{jk(L+s)}, \quad (3.8)$$

og en får til slutt følgende uttrykk for refleksjonsfaktoren:

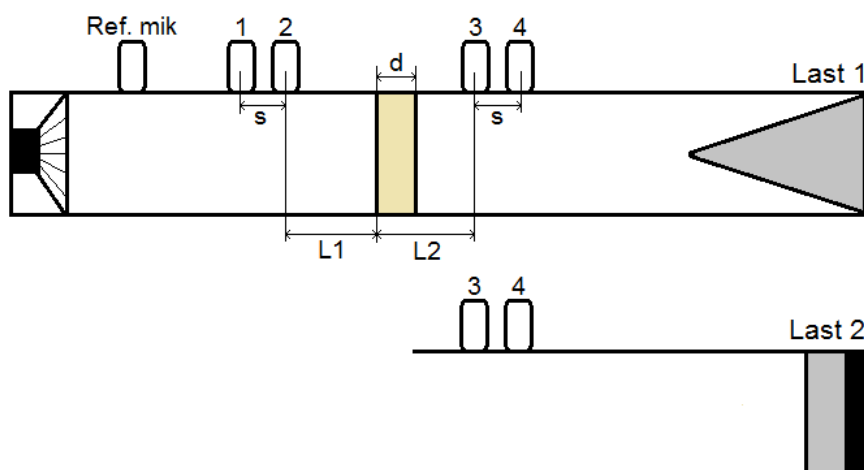
$$r = \frac{e^{jkL} - H_{12}e^{jk(L+s)}}{H_{12}e^{-jk(L+s)} - e^{-jkL}} = e^{j2kL} \frac{1 - H_{12}e^{jks}}{H_{12}e^{-jks} - 1} \quad (3.9)$$

Impedansen ved overflaten av prøvematerialet er gitt ved:

$$Z_n = \frac{1 - r}{1 + r} \quad (3.10)$$

Absorpsjonsfaktoren er gitt av ligning 2.1.

3.1.2 Impedansrør med 4 mikrofoner



Figur 3.2: Oppsett for impedansrør med fire mikrofoner: mikrofon 1 og 2, 3 og 4 med avstand s , referansemikrofon ved høyttaler, prøve med tykkelse d og to ulike laster

Følgende informasjon er hentet fra ASTM-standard E2611-09[3] og Vigrans artikkel om transmisjonstap i et impedansrør[14]. Figur 3.2 viser oppsettet for bølgerør med en høyttaler, en referansemikrofonposisjon og to mikrofonposisjoner i venstre og høyre rør. Det høyre røret kan avsluttes med to forskjellige laster. For de forskjellige lastene er nummer 1 en 550mm "trappetype" av ekkofritt materiale, og nummer 2 er 60mm ekkofritt materiale støttet av en treplate. I motsatt ende

av røret finnes en høyttaler og nærmest høyttaleren ligger referansemikrofonposisjonen. Det er ett sett med mikrofonposisjoner på hver side av prøven, som har tykkelse d . Ved bruk av TM (Transfer Matrix)-metoden kan en finne transmisjonsfaktoren, t , for prøven. TM-metoden involverer to grunnleggende målinger med de to ulike lastene. Overføringsmatrisen relaterer det akustiske lydtrykket, p , og partikkelhastigheten, u , på for- og baksiden av prøvens overflate. De to lastene representeres ved indeksene a og b for å oppnå fire lineære ligninger som kan brukes til å løse med hensyn på de fire ukjente matriseelementene.

$$\begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_a \\ u_a \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=0} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_b \\ u_b \end{bmatrix}_{x=d} \quad (3.12)$$

Lydtrykk- og partikkelhastighetskomponentene finnes ved å dekomponere bølgefeltet inne i røret til forover- og bakovergående bølger på hver side av prøven. Til slutt er overføringsmatrisekomponentene gitt ved:

$$\begin{aligned} T_{11} &= \frac{p_{0a} \cdot u_{db} - p_{0b} \cdot u_{da}}{p_{da} \cdot u_{db} - p_{db} \cdot u_{da}} \\ T_{12} &= \frac{p_{0b} \cdot p_{da} - p_{0a} \cdot p_{db}}{p_{da} \cdot u_{db} - p_{db} \cdot u_{da}} \\ T_{21} &= \frac{u_{0a} \cdot u_{db} - u_{0b} \cdot u_{da}}{p_{da} \cdot u_{db} - p_{db} \cdot u_{da}} \\ T_{22} &= \frac{p_{da} \cdot u_{0b} - p_{db} \cdot u_{0a}}{p_{da} \cdot u_{db} - p_{db} \cdot u_{da}}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

der 0 og d henholdsvis indikerer inngang- og utgangssiden av prøven. Med Z_0 som den karakteristiske impedansen for luft i røret får en følgende materialegenskaper:

Transmisjonsfaktor:

$$t = \frac{2 \cdot e^{jk_0 d}}{T_{11} + \frac{T_{12}}{Z_0} + Z_0 T_{21} + T_{22}}, \quad (3.14)$$

Transmisjonstap ved vinkelrett innfall:

$$TL = 20 \log |t| \quad (3.15)$$

Refleksjonsfaktor:

$$r = \frac{T_{11} - Z_0 T_{21}}{T_{11} + Z_0 T_{21}} \quad (3.16)$$

Forplantningsbølgetall i materialet:

$$k' = \frac{1}{d} \cos^{-1} T_{11} \quad (3.17)$$

Karakteristisk impedans i materialet:

$$Z_c = \sqrt{T_{12}/T_{21}} \quad (3.18)$$

Absorpsjonsfaktoren er den samme som i ligning 2.1.

3.2 Rom-metoden

Ved rom-metoden måles etterklangstiden i et klangrom med og uten et lydabsorberende material plassert på en av flatene i rommet. Deretter beregnes lydabsorpsjonskoeffisientene ut ifra de målte etterklangstidene. I motsetning til rør-metoden gir rom-metoden måleresultater som ligger nærmere praktiske tilfeller i et rom. Dette er på grunn av kanteffekter, beskrevet i kapittel 2.1. Det er spesifisert at prøvearealet må ha et areal på 10-12 m². Målemetoden baserer seg på Sabines prinsipper; sammenhengen mellom romvolum, etterklangstid og lydabsorpsjon. Rom-metoden gjøres etter ISO 354[4]. [6]

Sabines formel er gitt ved:

$$T = \frac{0.161V}{A}, \quad (3.19)$$

der V er det totale romvolumet og A er rommets absorpsjonsareal. Etter måling med og uten absorbent blir absorpsjonsfaktoren, α , lik:

$$\alpha = \frac{0.161V}{S} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right), \quad (3.20)$$

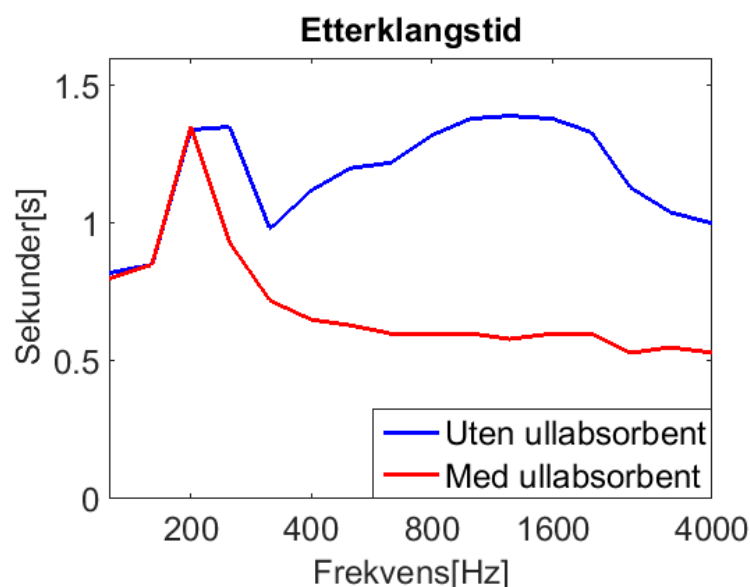
der T_0 er etterklangstiden uten absorbentmateriale, T er etterklangstiden med absorbentmateriale og S er prøvematerialets overflateareal. [5]

Kapittel 4

Relatert arbeid

4.1 Spesifikk etterklangsmåling hos Rambøll

FeltTile-produktet til Rom&Tonik, vist i figur 2.4, har det tidligere blitt gjort målinger på ved Rambølls kontorer i Trondheim. En etterklangstest ble foretatt før og etter installasjon av 12 stk. FeltTile i et møterom på $28m^2$. Med et totalt absorpsjonsareal på $3m^2$, og absorbertene hengende 5-6cm ut fra veggen, ble etterklangstiden målt før og etter oppheng.



Figur 4.1: Etterklangstid målt hos Rambøll AS, rekonstruert figur fra [20]

Rambølls resultater viser tydelig at det er liten endring i frekvenser under $200Hz$, men en tydelig reduksjon fra $315Hz$ og oppover. Absorbentene gir god absorpsjon

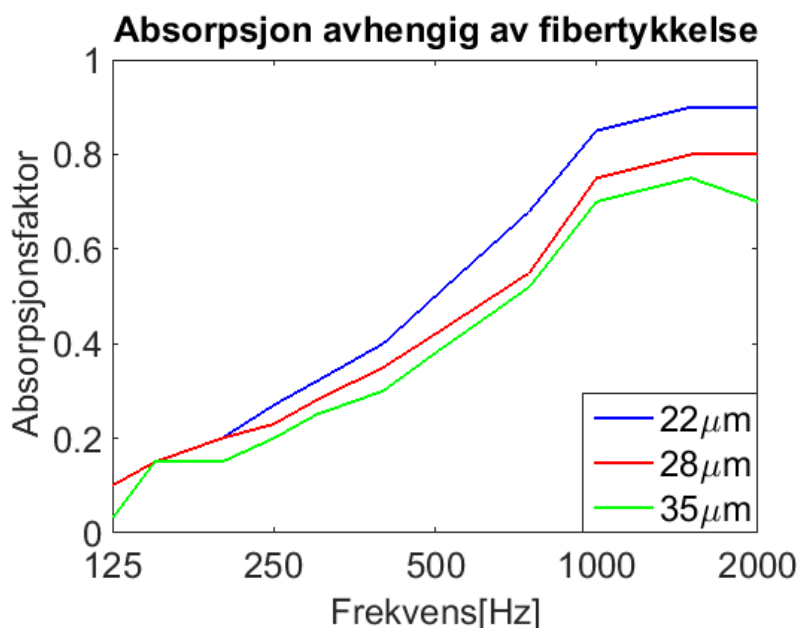
for vanlig tale i et lite møterom, men rommets størrelse spiller en stor rolle. Dersom samme effekt skal kunne oppnås i et større rom må absorpsjonsarealet også økes. [20]

4.2 Akustiske egenskaper til ull

I artikkelen *Acoustical Properties of Wool* av K. O. Ballagh[15] undersøkes akustiske egenskaper til ull. Interessante parametere som undersøkes er tetthet, fibertykkelse og strømningsresistans.

4.2.1 Fibertykkelse

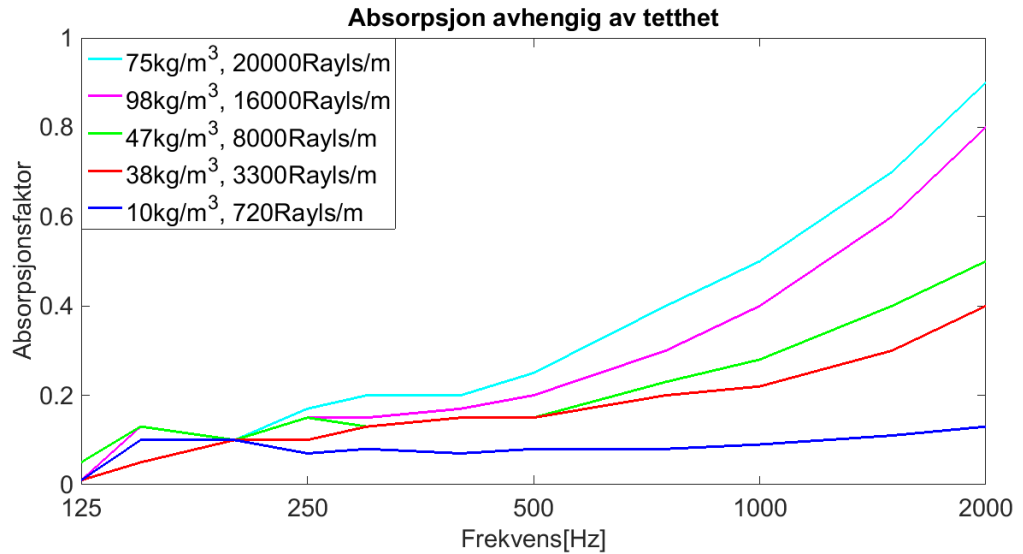
Figur 4.2 viser absorpsjonsfaktor for en 75mm ullprøve med tetthet $18\text{kg}/\text{m}^3$ og hvordan den avhenger av gjennomsnittlig fibertykkelse. Det er helt tydelig at absorpsjonsfaktoren øker med minkende fibertykkelse.



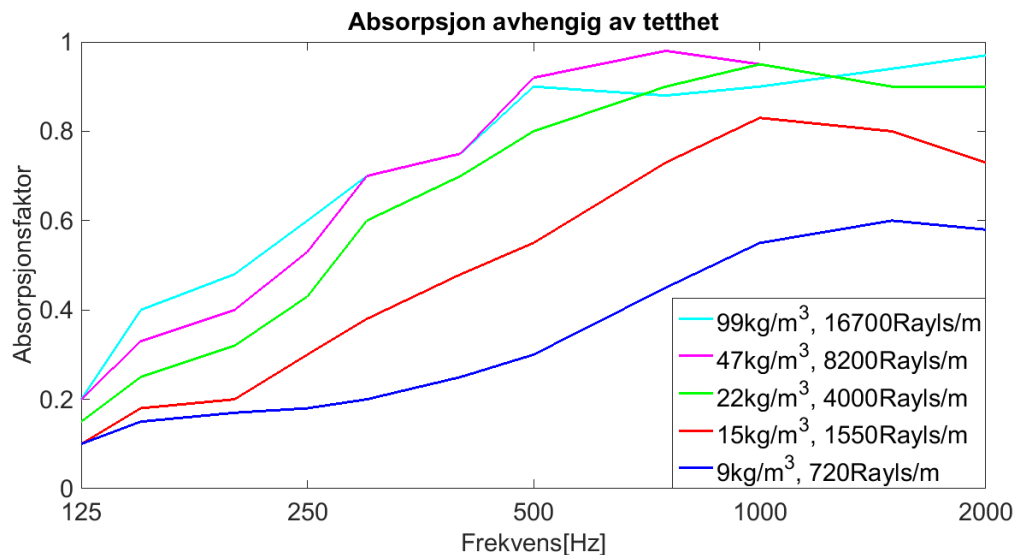
Figur 4.2: Absorpsjonsfaktor avhengig av fibertykkelse for ull med tetthet $18\text{kg}/\text{m}^3$ og tykkelse 75mm , rekonstruert figur fra [15]

4.2.2 Tetthet

Figur 4.3 viser absorpsjonsfaktoren for to forskjellige tykkelser og hvordan den avhenger av tettheten. Begge figurene viser at absorpsjonsfaktoren øker gradvis med økende tetthet, opp til 47kg/m^3 for prøven med tykkelse 100mm . Tettheter høyere enn dette gir ikke bedre absorpsjon for den tykkeste prøven.



(a) Ull med tykkelse 25mm



(b) Ull med tykkelse 100mm

Figur 4.3: Absorpsjonsfaktor avhengig av tetthet for ull med tykkelse 25mm og 100mm , rekonstruert figur fra [15]

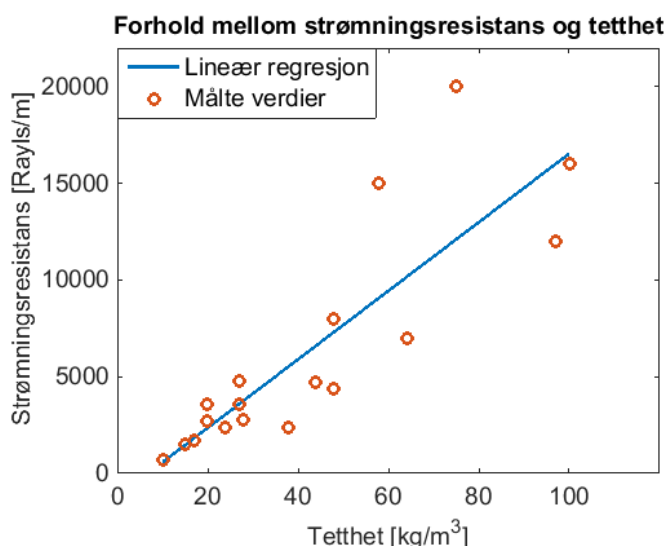
4.2.3 Strømningsresistans

Når en analyserer målingene fra figur 4.3 med tanke på strømningsresistans er det funnet ut at optimal absorpsjon generelt blir oppnådd når produktet av tetthet og strømningsresistans er rundt $1000 Pa \cdot s/m = 1000 Rayls$. Ved høyere verdier er det noe bedring i lave frekvenser, men på bekostning i høyere frekvenser. Andre materialer, som glassfiber, har samme oppførsel. Figur 4.4 viser forholdet mellom strømningsresistans og tetthet og en ser at strømningsresistansen generelt øker med økende tetthet. Ballagh fant ut at sammenhengen mellom tetthet, fibertykkelse og strømningsresistans er gitt ved:

$$r_s = 490 \frac{\rho^{1.61}}{d}, \quad (4.1)$$

der r_s er strømningsresistans i $Rayls/m$, ρ er tetthet i kg/m^3 og d er fibertykkelse i μm .

Siden ull er et naturlig produkt er det forventet at det vil være et spekter av fysiske egenskaper, både i en prøve og mellom flere prøver. Hvor ullen kommer fra på sauen, hvilken type sauerase det er, og sauenes fysiske tilstand i løpet av vekstsesongen vil ha en effekt på fibertykkelsen, og dermed også strømningsresistansen. Imidlertid er ikke de akustiske egenskapene sterkt avhengige av strømningsmotstanden og blir opprettholdt forutsatt at de er innenfor $\pm 20\%$ av ønsket verdi.



Figur 4.4: Forholdet mellom strømningsresistans og tetthet, rekonstruert figur fra [15]

Kapittel 5

Metode

Det er blitt gjort målinger på absorpsjonsfaktor, impedans, bølgetall, transmisjonstap og refleksjonsfaktor i impedansrør med to og fire mikrofoner, beskrevet i kapittel 3.1. Impedansrørene er også brukt til å måle absorpsjonsfaktor for sammensetning av forskjellige tettheter, prøver med ulik hulromsavstand til bakplate og prøver med forskjellig perforeringsgrad. For alle prøvene ble strømningsresistansen målt i tilhørende målerigg.

Målingene fra impedansrør og strømningsresistans kan brukes i Matlab-programmet basert på Johnson/Allard-modellen for å beregne bølgetall, tortuositet, porositet, viskøs og termisk lengde, beskrevet i kapittel 2.5.1. Målte og tilpassede verdier for komplekst bølgetall er vist i figurene i vedlegg A. Disse parameterne brukes deretter i simuleringsprogrammet WinFlag for å beregne absorpsjonsfaktor for materialene for hele frekvensskalaen. For noen materialer ble det gjort målinger på større prøver med rom-metoden beskrevet i kapittel 3.2. Til slutt har fibertykkelsen av materialene blitt målt i et lysmikroskop.

Utstyrliste finnes i tabell 5.1, og tabell 5.2 viser hvordan de spanske ullprøvene er sammensatt og hvordan kvalitet de har (karbonisert eller ukarbonisert). Tabell 5.3 viser hvilke materialer det er gjort målinger på og hvilke egenskaper disse har.

Instrument	Merke	Type
Målerigg for strømningsresistans		
Strømforsyning	GWInstek	GPS3030DD
Mikrofon	Brüel&Kjær	4149
Forforsterker	Brüel&Kjær	2608
Måleforsterker	Brüel&Kjær	2608
Filter	Wavetek	442
Oscilloskop	Tektronix TDS 2014	G04-0498
Rørimpedansmåling		
Lydkort	Axys USB Audio	D-audio
Mikrofon	BSWA TECH	MPA201
Klangromsmåling		
Forsterker	Norsonic front end	336
Forsterker	Acoustical Mfg	QUAD 50E
Mikrofon forforsterker	Norsonic	1201
Mikrofon	Brüel&Kjær	4943
Lydkort	Focusrite Forte	FA0682-02
Måling av fibertykkelse		
Lysmikroskop	Olympus	BX60
Dataprogrammer		
Matlab R2014		
WinFlag v3.0		
WinMLS 2004		

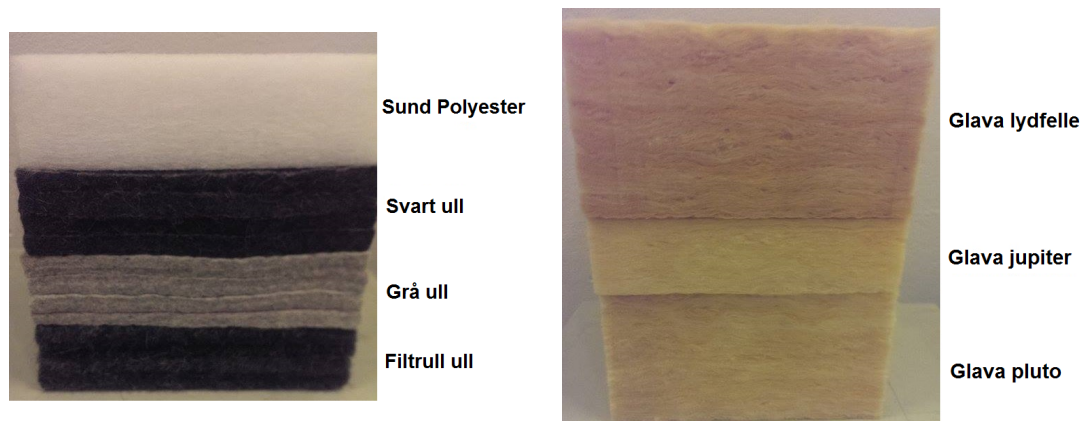
Tabell 5.1: Utstyrsliste

5.1 Prøver

De tre mongolske ullprøvene består av fire lag med ull, sydd sammen, vist i figur 5.1(a), sammen med Sund polyester. De er veldig fleksible og vanskelige å sette rett i impedansrøret, spesielt når de ligger i lag på denne måten. Glavaprøvene og polyesterprøven er ett lag og mindre fleksible enn ullprøvene, se figur 5.1(b). Utsnitt av de spanske ullprøvene finnes i figur 5.1(c) og hvordan de er satt sammen er forklart i tabell 5.2. Alle ullprøvene unntatt prøve 7 har to lag som legges ved siden av hverandre i impedansrøret da de er for harde til å sys sammen. Ullprøve 2, 3 og 6 består i tillegg av to eller tre lag som er limt sammen.

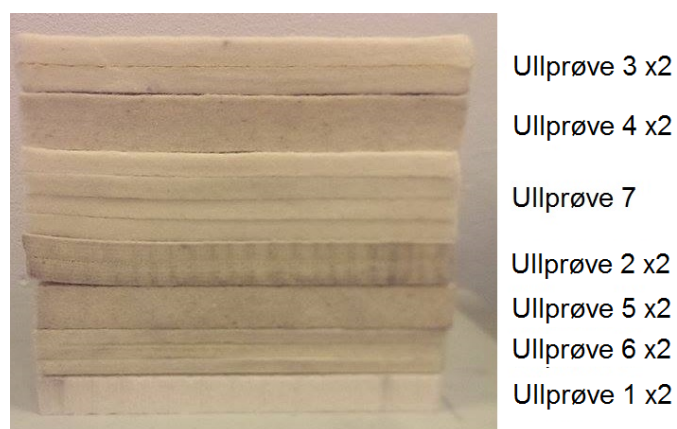
Ullprøve	Sammensetning	Tykkelse
Ukarbonisert		
2	90% ull og 10% rayon	2x(2x10mm, limt og presset)
4	90% ull og 10% rayon	2x20mm
5	80% ull og 20% rayon	2x20mm
Karbonisert		
1	90% ull og 10% rayon	2x19.10mm
3	100% ull	2x(2x10mm, limt og presset)
6	90% ull og 10% rayon	2x(3x8mm, limt og presset)
7	100% ull	4x10mm, sydd sammen

Tabell 5.2: Sammensetning og kvalitet for spanske ullprøver



(a) Sund polyester og mongolske ullprøver

(b) Glavaprøver



(c) Spanske ullprøver

Figur 5.1: Bilder av materialer

Materialer	Tykkelse [mm]	Tetthet [kg/m ³]	Resistivitet [kPa · s/m ²]	Porositet [%]	Tortuositet	Viskøs lengde[μ]	Termisk lengde[μ]
Svart ull	50	173.0	102.28	93.99	1.06	37.45	33.29
Grå ull	45	161.1	89.25	99.99	1.00	88.61	82.08
Filtrull ull	48	175.0	130.50	68.37	1.60	48.73	45.28
Glava pluto	100	40.0	41.65	59.58	2.00	64.08	30.20
Glava lydfelle	100	35.0	39.79	72.60	1.14	32.82	198.10
Glava jupiter	50	37.5	27.46	90.14	1.09	99.08	125.71
Sund polyester	55	31.4	3.69	99.05	1.00	96.87	157.61
Ullprøve 1	40	340.0	360.35	50.02	1.99	10.02	30.11
Ullprøve 2	40	500.0	451.76	50.00	2.00	10.01	54.21
Ullprøve 3	45	130.0	74.19	75.18	1.23	96.14	99.11
Ullprøve 4	50	210.0	103.63	97.87	1.69	30.13	181.39
Ullprøve 5	45	360.0	256.33	50.06	2.00	10.34	88.91
Ullprøve 6	50	400.0	213.19	51.48	1.00	10.41	189.19
Ullprøve 7	45	130.0	58.04	99.99	1.03	70.65	69.04

Tabell 5.3: Materialegenskaper

5.2 Rørimpedansmåling

Måleoppsettet for impedansrøret med to mikrofoner finnes i figur 3.1. WinMLS og Matlab er brukt til måling og beregning av akustiske parametere, og vi har følgende opplysninger:

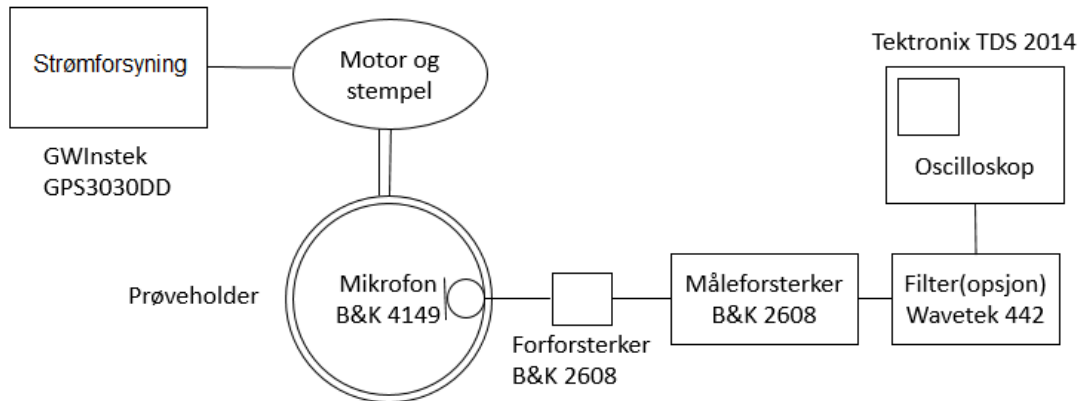
- Avstand til mikrofon 1: $x_1 = 428mm$
- Avstand mellom mikrofon 1 og 2: $s = 150mm$
- Lengden av røret: $L = 1.86m$
- Diameter til røret: $D = 200mm$

Måleoppsettet for impedansrøret med fire mikrofoner finnes i figur 3.2. WinMLS og Matlab er brukt til måling og beregning av akustiske parametere, og vi har følgende opplysninger:

- Avstand mellom forside av prøve til mikrofon 2: $l_1 = 278mm$
- Avstand mellom forside av prøve til mikrofon 3: $l_2 = 990mm$
- Avstand mellom mikrofon 1 og 2, 3 og 4: $s_1 = s_2 = 150mm$
- Lengden av røret: $L = 3.36m$
- Diameter til røret: $D = 200mm$

5.3 Måling av strømningsresistans

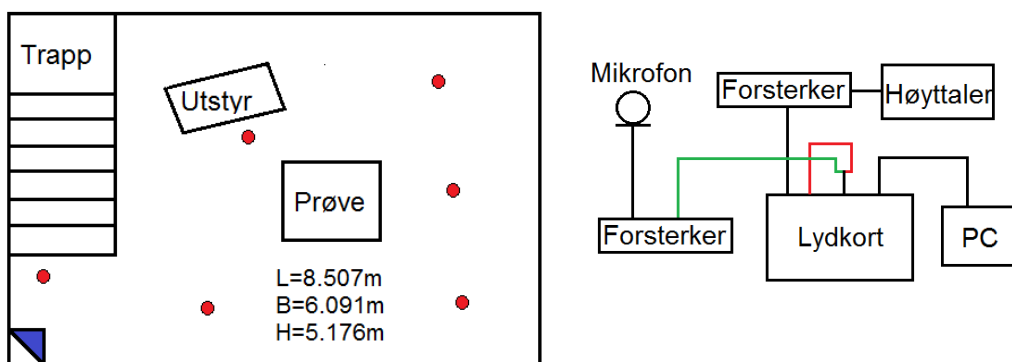
Måling av strømningsresistans, etter ISO 9053[2], ble gjort i målerigg for strømningsresistans med måleoppsett vist i figur 5.2. Beregning av strømningsresistans er gjort i Matlab og det er brukt et stempelutslag på $5.95mm$.



Figur 5.2: Skisse av måleoppsett for måling av strømningsresistans

5.4 Rom-metoden

For de tre Glava-prøvene og filtrullen ble det gjort målinger ved rom-metoden og etterklangsmålingene er gjort med dataprogrammet WinMLS. Her får en informasjon om hele frekvensskalaen og målingene kan sammenlignes med de simulerte data. Ved mangel på store prøver ble det gjort klangromsmåling på prøver med størrelse: $1.2 \times 1.25 m^2$ (lydfelle), $1.19 \times 1.18 m^2$ (jupiter og pluto) og $1.89 \times 3.25 m^2$ (filtrull). Skisse av rommet og utstyrsoppsett finnes i figur 5.3. Rød markering viser de seks mikrofonplasseringene og blå markering viser høyttalerplasseringen. Høyttaleren er plassert i hjørnet ca. 3.4 meter over gulvet. Ved måling av etterklangstid ble et sinus-sweep på 20 sekunder brukt.



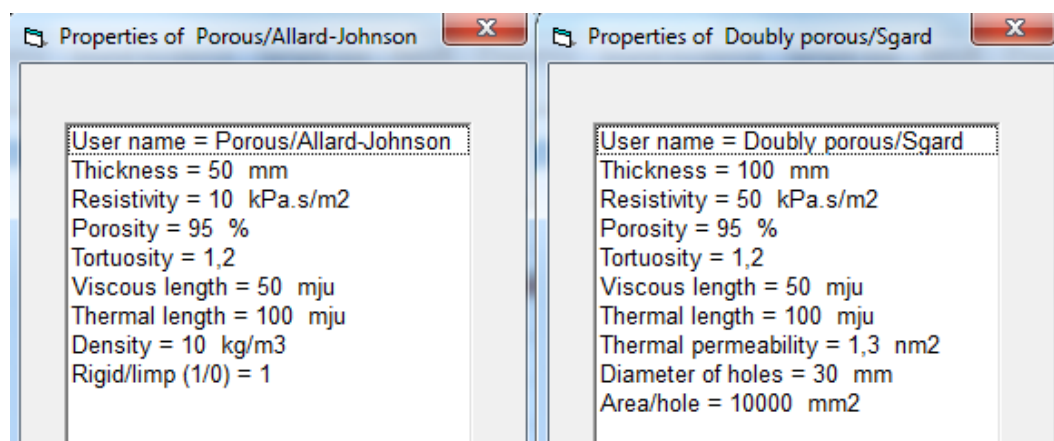
(a) Klangrom, mikrofonplassering: rød markering, høyttalerplassering: blå markering

(b) Utstyrsoppsett i klangrom

Figur 5.3: Skisse av klangrom og utstyrsoppsett

5.5 WinFlag

WinFlag beregner absorpsjonskoeffisient, impedans og refleksjonsfaktor for forskjellige materialsjikt. Det porøse sjiktet basert på Johnson/Allard-modellen ble brukt for å beregne teoretisk absorpsjonsfaktor for prøvene. I tillegg ble sjiktet for dobbeltporøse materialer, basert på en modell av Sgard, brukt for å simulere meso-perforering av materialene. Hulldiameter på 30mm og perforeringsgrad på 7.07 og 15.9% ble brukt. Egenskapsvinduene for disse sjiktene finnes i figur 5.4. Ved sammenligning av de to sjiktene inkluderer Sgard en ekstra parameter i tillegg til parameterne i Johnson/Allard-modellen: termisk permeabilitet gitt i nm^2 . Standardverdien 1.3nm^2 ble brukt, da endring av denne ikke gir betydelige forskjeller.



Figur 5.4: Egenskapsvinduer i WinFlag for porøst materiale ved bruk av Johnson/Allard-modellen og for dobbeltporøst materiale av Sgard

5.6 Måling av fibertykkelse

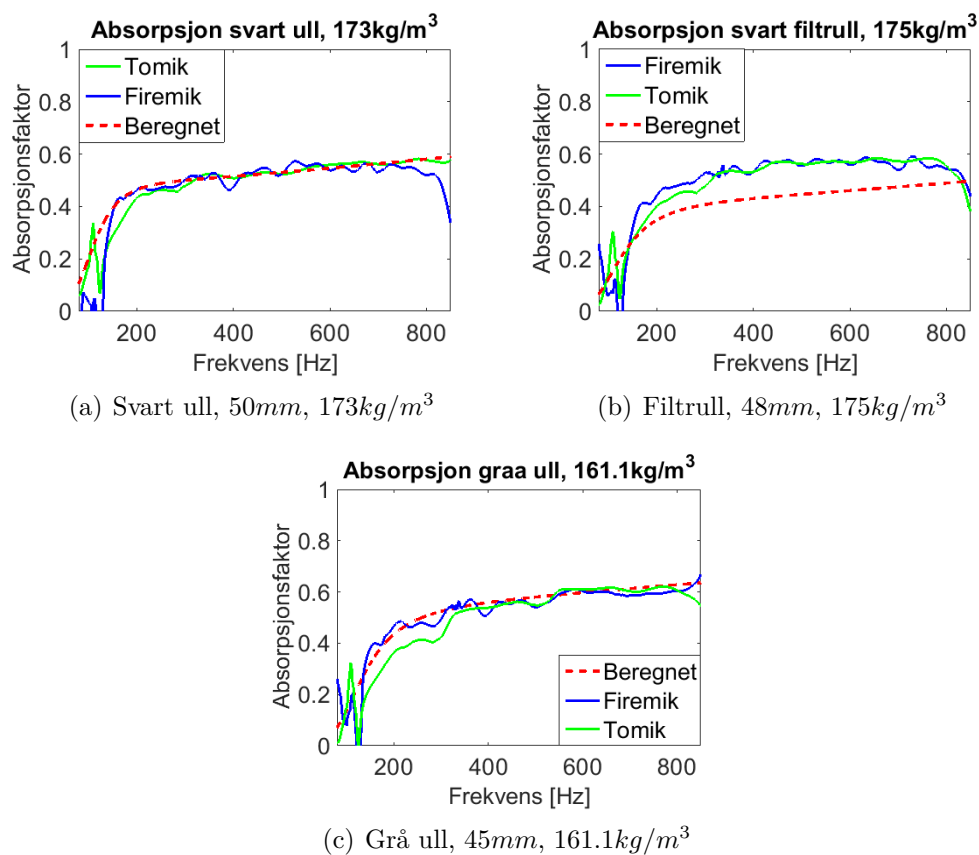
Måling av fibertykkelse ble gjort med et lysmikroskop med en skala i okularet. Kalibreringen til skalaen med en egenforstørrelse på 20 er gitt ved at hver strek på skalaen er lik $5\mu\text{m}$. Det ble gjort 3 målinger per prøve og gjennomsnittlig fibertykkelse ble funnet.

Kapittel 6

Resultater og diskusjon

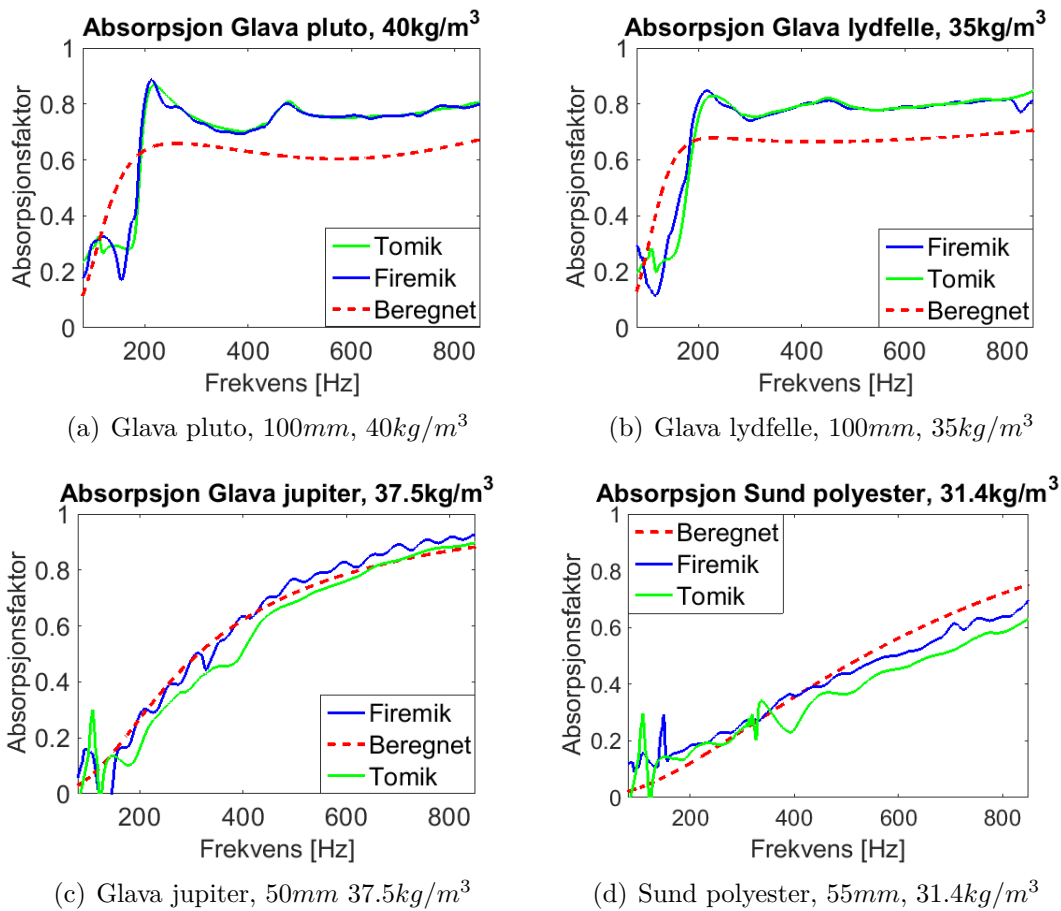
6.1 Absorpsjonsfaktor

Beregnet og målt absorpsjonsfaktor, med to og fire mikrofoner, er vist i figur 6.1, 6.2 og 6.3. Beregningene er gjort med Johnson/Allard-modell og limp-situasjon.



Figur 6.1: Målt og beregnet absorpsjonsfaktor for mongolske ullprøver

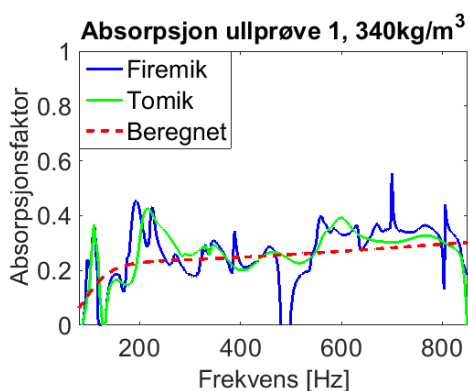
Ved sammenligning av de tre mongolske ullprøvene ser en at disse har relativt lik absorpsjonsfaktor for alle frekvenser. Dette er spesielt forventet for den svarte ullprøven og den svarte filtrullen da disse i utgangspunktet skal være like. De har ganske like tettheter på henholdsvis 173 og 175kg/m^3 , men har derimot litt ulik strømningsresistans, 102.28 og $130.50\text{kPa} \cdot \text{s/m}^2$. Forskjellen i strømningsresistans kan være grunnen til at de beregnede verdiene for filtrullen ligger litt under de målte verdiene. Den grå ullprøven har litt lavere tetthet på 161kg/m^3 , og har litt lavere absorpsjonsfaktor opp til 300Hz og litt høyere over 550Hz . De beregnede verdiene passer fint med de målte for grå og svart ull.



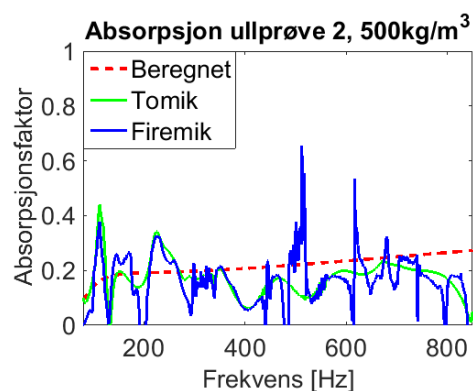
Figur 6.2: Målt og beregnet absorpsjonsfaktor for Glavaprøver og Sund polyester

Absorpsjonsfaktoren for Glava pluto og Glava lydfelle er også veldig like, noe som er forventet da de har tettheter nære hverandre og ganske lik strømningsresistans. For Glava jupiter er absorpsjonsfaktoren mye lavere under 600Hz og litt høyere over 650Hz . Pluto og lydfelle er dobbelt så tykke som jupiter og har høyere

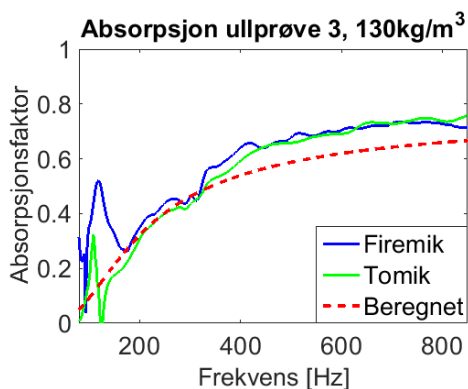
strømningsresistans, noe som gjør at jupiter skiller seg ut. De beregnede verdiene for jupiter passer godt med de målte, men for pluto og lydfelle ligger de beregnede verdiene litt over de målte i bass og under for de øvre frekvensene. For Sund polyester er absorpsjonsfaktoren dårlig i lave frekvenser og bare litt bedre i høyere frekvenser, så den egner seg dårlig som lydabsorbent. De beregnede verdiene passer greit med de målte.



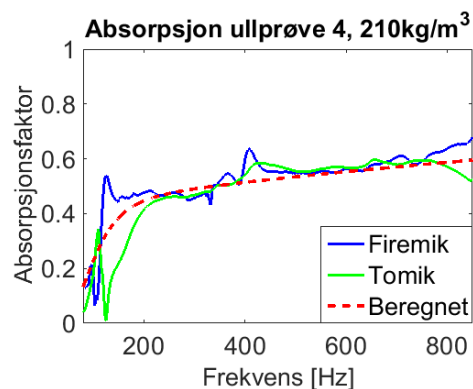
(a) Ullprøve 1, 40mm, 340kg/m³



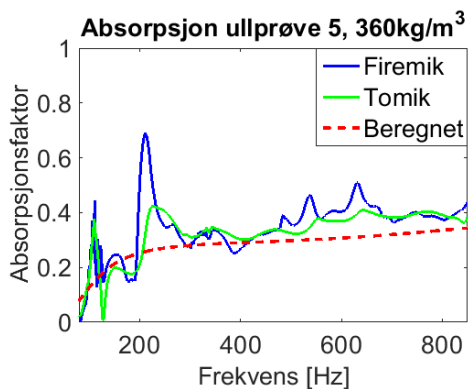
(b) Ullprøve 2, 40mm, 500kg/m³



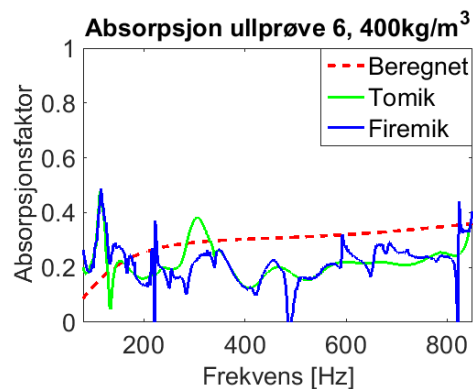
(c) Ullprøve 3, 45mm, 130kg/m³



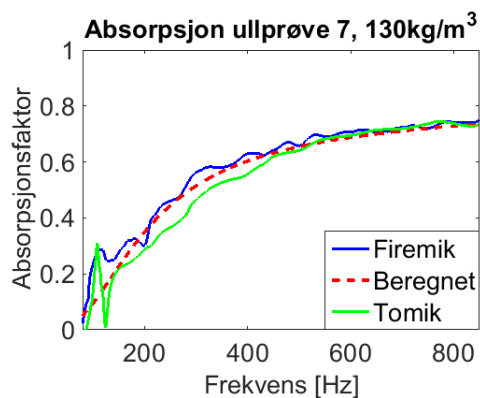
(d) Ullprøve 4, 50mm, 210kg/m³



(e) Ullprøve 5, 45mm, 360kg/m³



(f) Ullprøve 6, 50mm, 400kg/m³

(g) Ullprøve 7, 45mm, 130kg/m³

Figur 6.3: Målt og beregnet absorpsjonsfaktor for spanske ullprøver

Når det gjelder de spanske ullprøvene ser en at de fire prøvene med tettheter over $300\text{kg}/\text{m}^3$ gir dårlig absorpsjonsfaktor, og det kan se ut som om de oppfører seg mer som harde plater og ikke som porøse materialer. Dette gjelder ullprøve 1, 2, 5 og 6. Målingene svinger veldig og det er unødvendig å gjøre videre målinger på disse prøvene da de er ubrukelige som absorbenter. Ullprøve 3 og 7 har lavest tetthet på $130\text{kg}/\text{m}^3$, og gir bedre absorpsjon enn ullprøve 4 med tetthet på $210\text{kg}/\text{m}^3$. De beregnede verdiene passer godt med de målte, både for to og fire mikrofoner. Absorpsjonsfaktoren for disse ullprøvene synes å synke med høyere tetthet, men da vi ikke har prøver med lavere tettheter er ikke dette sikkert. I vedlegg A finnes målte og tilpassede verdier for komplekst bølgetall. For ullprøvene med høyest tetthet svinger bølgetallet mye og de beregnede verdiene blir veldig usikre.

Generelt gir Glavaprøvene best absorpsjonsfaktor for hele frekvensspekteret. Av ullprøvene gir de mongolske prøvene og spansk ullprøve 4 best absorpsjon i lave frekvenser, mens ullprøve 3 og 7 gir best absorpsjon i høye frekvenser. Sund polyester har lav absorpsjon i bass og litt bedre for høyere frekvenser, men eger seg ikke som absorbent. De resterende spanske ullprøvene, 1, 2, 5 og 6 er ubrukelige som absorbenter.

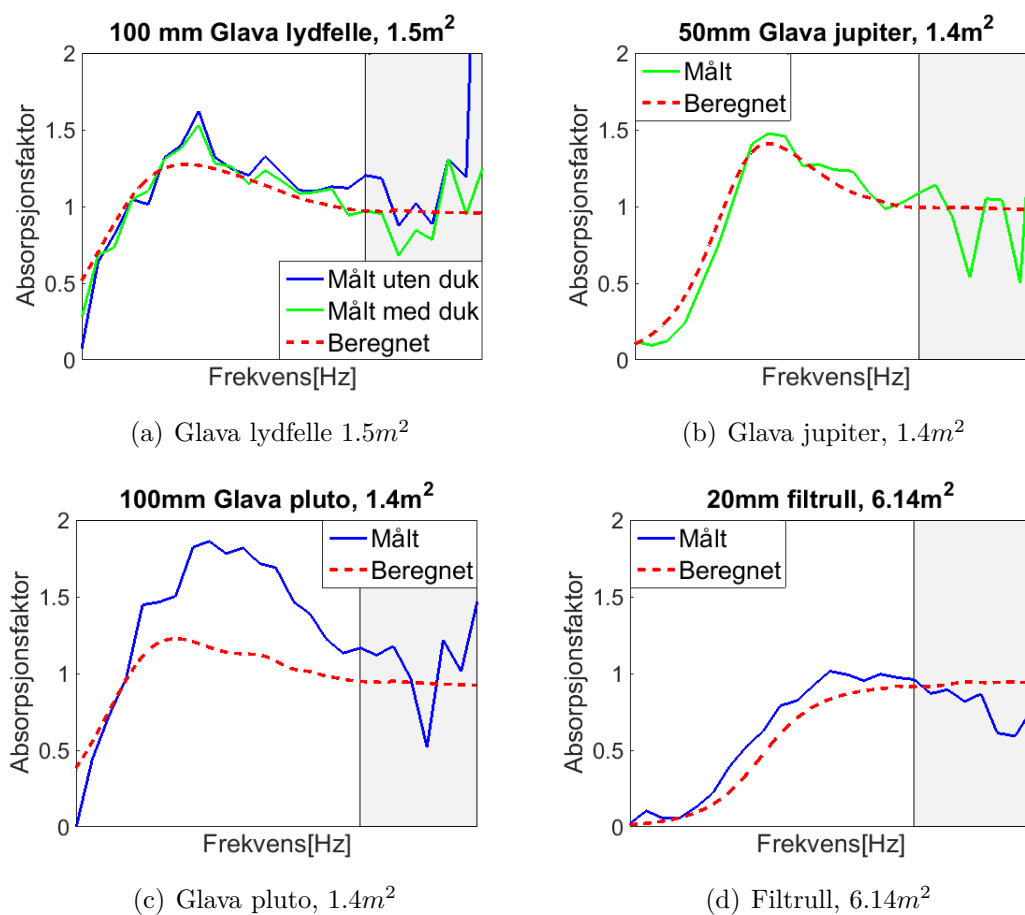
6.1.1 To-mikrofon-metode kontra fire-mikrofon-metode

Fra figurene 6.1, 6.2 og 6.3 ser en at målingene med to og fire mikrofoner er relativt like. De følger hverandre og viser at metodene gir ganske like resultater. En stor forskjell mellom metodene er at for to mikrofoner står prøven inntil en hard

bakvegg i røret, mens for fire mikrofoner står prøven fritt i røret og en simulerer en hard bakvegg. Av grafene ser vi at blå linje (fire mikrofoner) svinger mer enn grønn linje (to mikrofoner), spesielt for de spanske ullprøvene med høyest tetthet. Dette kan skyldes resonanser i prøvene fordi de er så stive. Siden de står fritt i røret med fire mikrofoner vil rammeverket svinge mer med lydbølgen enn for prøver som står inntil en vegg, som for to mikrofoner. Det samme ser vi for de mest fleksible ullprøvene, 3, 4 og 7: fire mikrofoner viser en topp i lave frekvenser, noe som mest sannsynlig skyldes at de svinger mer med lydbølgen når de står fritt i røret enn hvis de står inntil en hard bakvegg.

6.2 Rom-metode

Klangromsmålingene er vist i figur 6.4 sammen med simulerte data. Beregningene er gjort med Johnson/Allard-modell, rigid-situasjon og diffust lydinnfall.



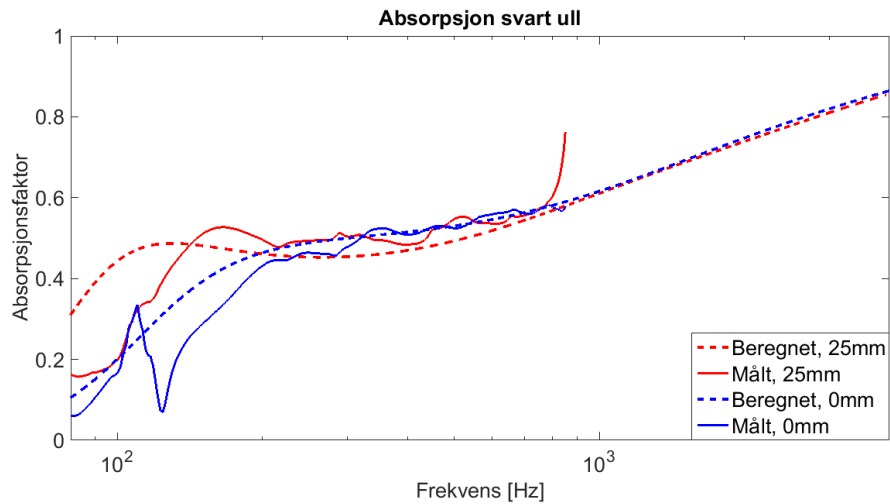
Figur 6.4: Målt og beregnet absorpsjon ved rom-metoden, grått område er usikkert

Ved måling på Glavaprøver er det brukt en treramme rundt kantene for å minke kanteffekter, beskrevet i kapittel 2.1. For Glava lydfelle er det gjort målinger med og uten en tynn, svart duk som er festet på den ene siden av materialet. De målte dataene med og uten duk er relativt like, med noen avvik i de høyeste frekvensene. Ved etterklangstid-måling er det vanlig å gjøre målinger opp til $4kHz$ da frekvenser over dette gir usikre målinger. Her er det gjort målinger opp til $20kHz$, men grått område på figurene er altså usikkert. For Glava jupiter er de målte verdiene meget like de simulerte opp til $4kHz$. Vi ser godt for Glavaprøvene at kanteffekter spiller inn på resultatet da absorpsjonsfaktoren er høyere enn 1 i noen frekvenser. Dette vises spesielt godt for Glava pluto med tykkelse $100mm$. Her er det store avvik mellom beregnede og målte verdier, dette skyldes at trerammen som ligger rundt materialet ved måling er $50mm$ tykk, slik at $50mm$ av prøven stikker over rammen. Arealet av prøveflaten blir altså større enn det geometriske arealet. For filtrullen på $6.14m^2$ har vi ikke like store kanteffekter, både fordi den har større areal og fordi den kun er $20mm$ tykk. Det ble ikke brukt noen ramme på denne da den er såpass tynn. Her ser en også at de målte verdiene passer godt med de simulerte opp til $4kHz$.

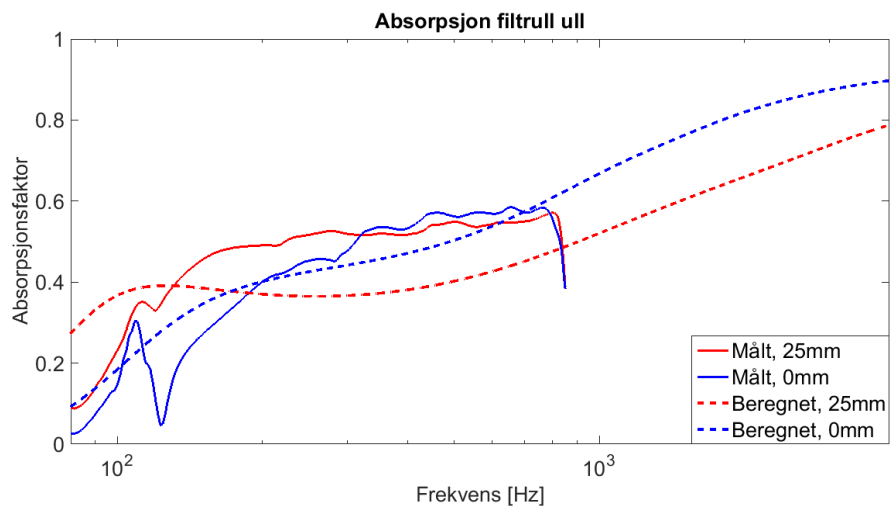
Klangromsmålinger gir gjerne måleresultater som ligger nærmere praktiske tilfeller i et rom. Fordelen er at en også får informasjon om hele frekvensspekteret, ikke bare de laveste frekvensene som for rør-metoden. I vårt tilfelle er ikke måleresultatene helt troverdige da vi har for små prøveobjekter. I ISO 354 er det spesifisert at prøvearealet må være mellom 10 og $12m^2$. Selv om prøvene er for små til å gjøre en klangromsmåling etter standarden, kan en likevel si at resultatene er gode da de ligger nære de beregnede verdiene. Standarden sier også at forholdet mellom lengden av sidene bør ligge mellom 0.7 og 1.0 for å minimalisere kanteffekter. Dette er oppfylt for Glavaprøvene, men for ullprøven er forholdet $1.89/3.25 = 0.58$, altså litt for lite. Da prøveobjektene ikke har likt areal eller tykkelse blir det vanskelig å sammenligne de, men basert på målinger i impedansrør ser en at Glavaprøvene gir bedre absorpsjon enn den mongolske ullprøven.

6.3 Ulik hulromsavstand til hard bakplate

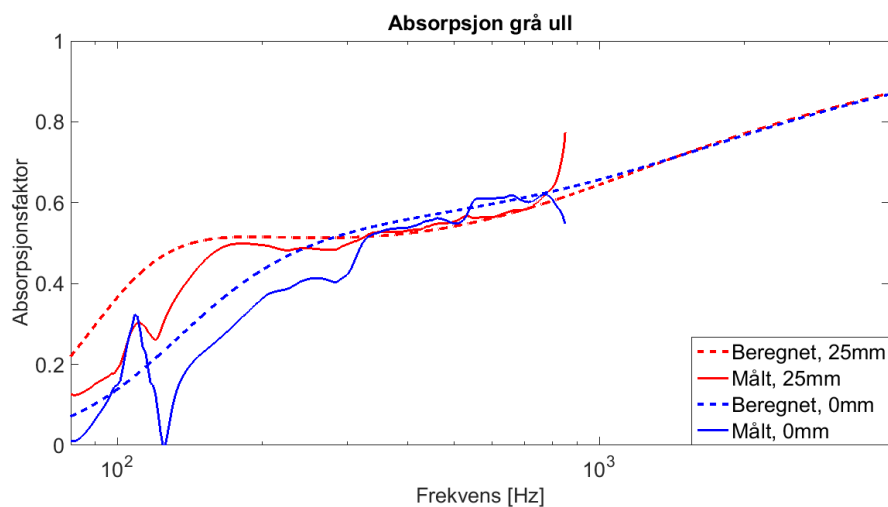
Figur 6.5, 6.6 og 6.7 viser absorpsjonsfaktoren for prøvene med ulik hulromsavstand til hard bakplate. Her går frekvensaksen opp til $4kHz$ for å se forventet oppførsel i litt høyere frekvenser enn for målingene i impedansrøret. Målingene er gjort med to mikrofoner og beregninger er gjort med Johnson/Allard-modell og limp-situasjon.



(a) Svart ull, $0mm$ og $25mm$ hulromsavstand



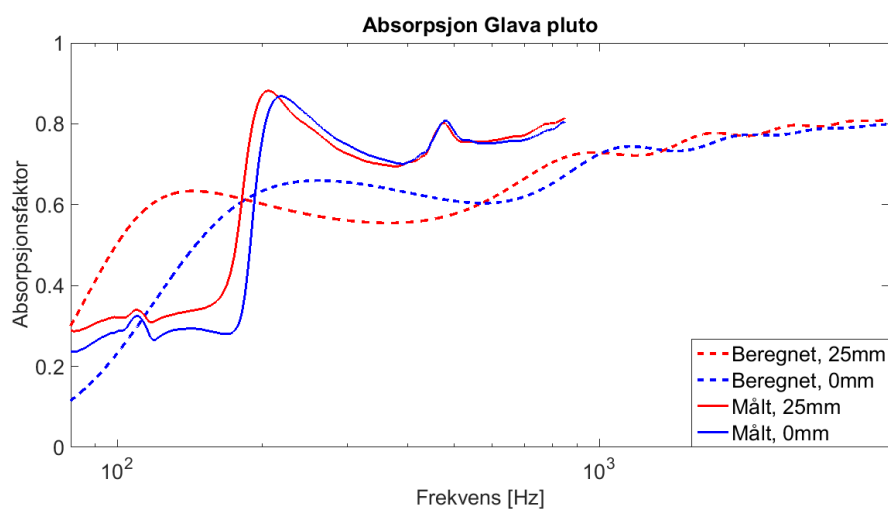
(b) Filtrull, $0mm$ og $25mm$ hulromsavstand



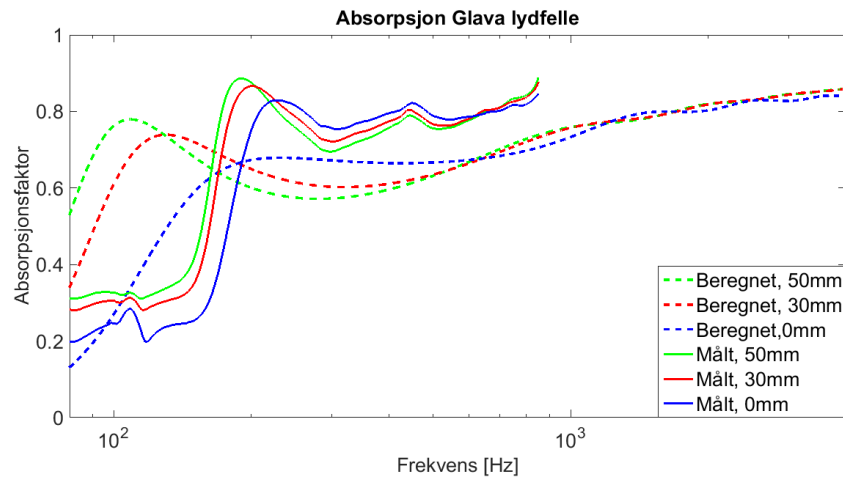
(c) Grå ull, 0mm og 25mm hulromsavstand

Figur 6.5: Absorpsjonsfaktor for mongolske ullprøver, med ulik avstand til hard bakplate

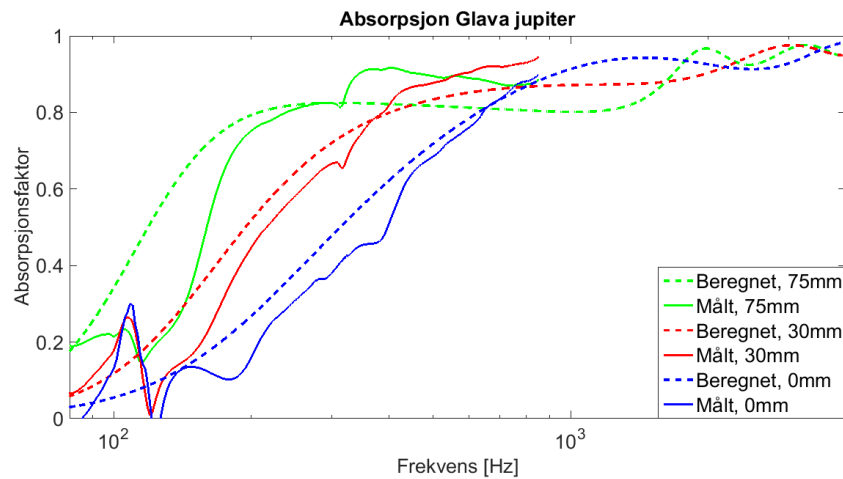
Med hulromsavstand skal absorpsjonsfaktoren øke i lave frekvenser, men da blir den gjerne dårligere i høye frekvenser. For de tre mongolske ullprøvene ser vi at målte verdier gir bedre absorpsjon i bass og bare litt dårligere absorpsjon i høyere frekvenser. Dette viker litt fra de beregnede verdiene som blir enda litt bedre i de laveste frekvensene og enda litt dårligere i høyere frekvenser. Større hulromsavstand ville ikke gitt noe bedre resultat da absorpsjonen vil synke i høye frekvenser og ikke øke så mye i lavere frekvenser. Med 25mm hulromsavstand blir altså de mongolske ullprøvene generelt bedre absorberende.



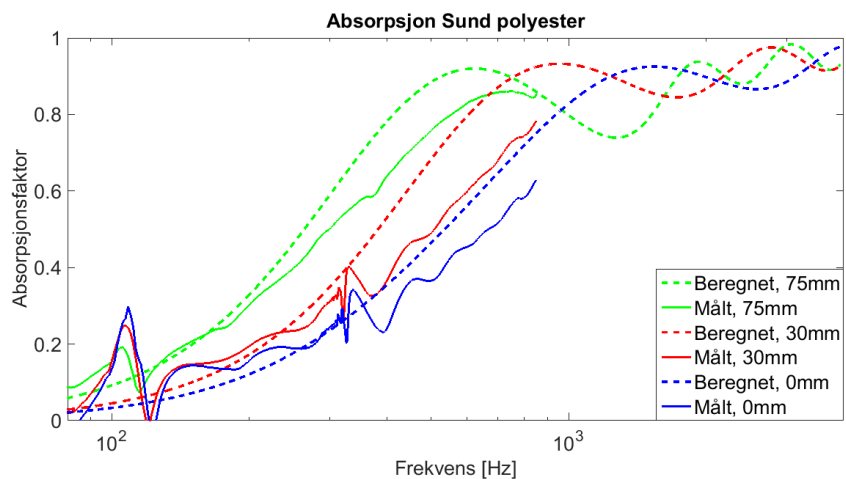
(a) Glava pluto, 0mm og 25mm hulromsavstand



(b) Glava lydfelle, 0mm, 30mm og 50mm hulromsavstand



(c) Glava jupiter, 0mm, 30mm og 75mm hulromsavstand

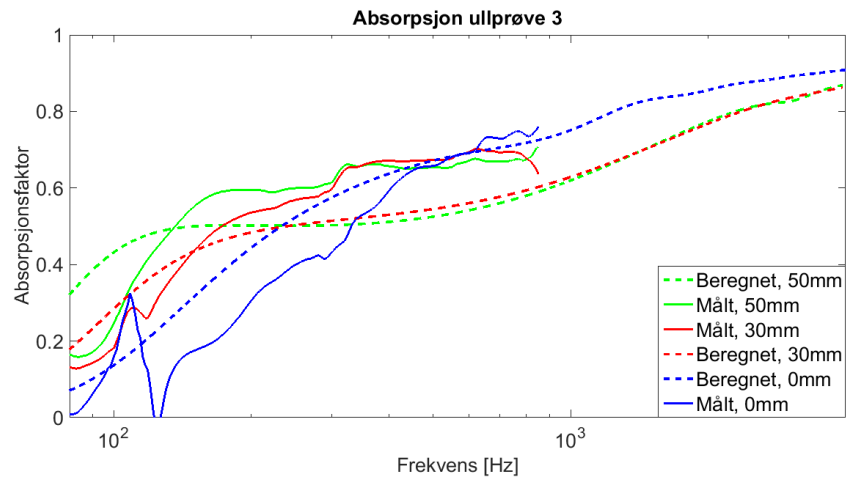


(d) Polyester, 0mm, 30mm og 75mm hulromsavstand

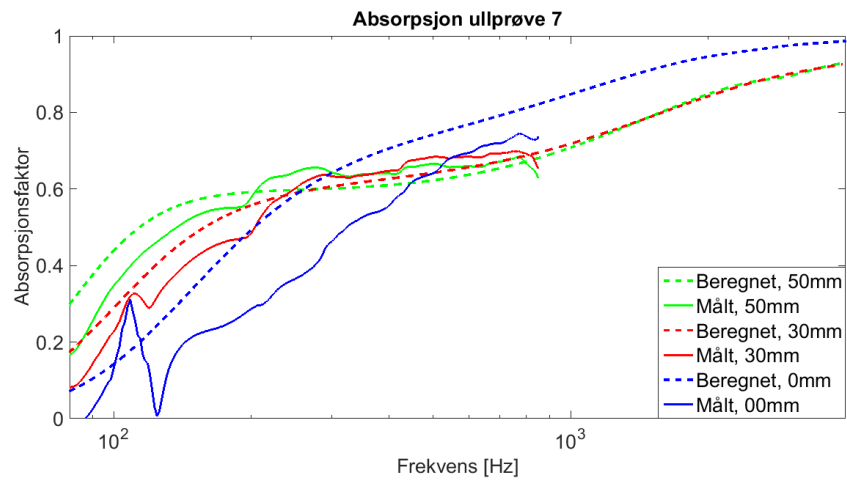
Figur 6.6: Absorpsjonsfaktor for Glava og Sund polyester, med ulik avstand til hard bakplate

For de to tykkeste Glavaprøvene, pluto og lydfelle, får vi samme tendens for større hulromsavstand som for de mongolske prøvene: absorpsjonen øker litt i bass, men holder seg relativt konstant i høyere frekvenser. I henhold til beregnede verdier gir 25mm hulrom for Glava pluto bedre absorpsjon i bass, litt dårligere mellom 200 og 550Hz og deretter bedre over 600Hz. Det samme gjelder for Glava lydfelle, men jo mer en øker hulromsavstanden jo bedre blir absorpsjonen i lavere frekvenser og jo dårligere blir den mellom 200 og 550Hz. Over 600Hz forblir den relativt lik som for uten hulromsavstand. For de målte kurvene blir disse to Glavaprøvene bedre absorberer med større hulromsavstand, hovedsakelig i bass.

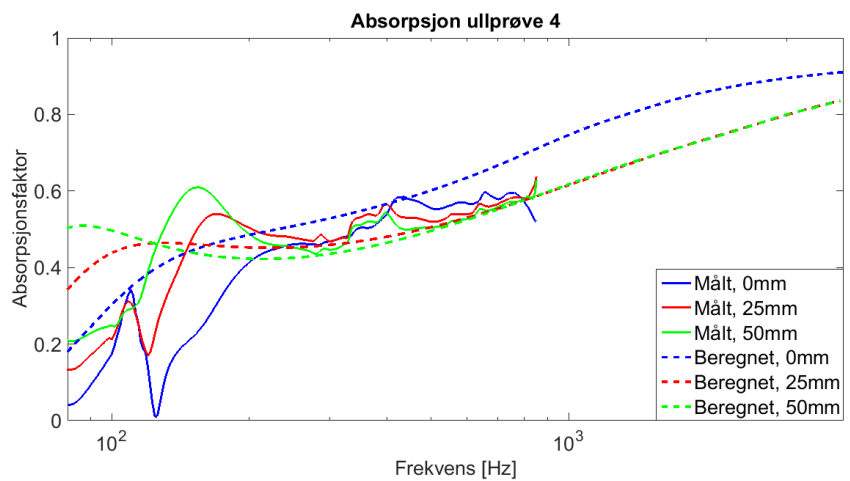
Glava jupiter gir mye bedre absorpsjon for hulromsavstand enn uten. For de målte verdiene ser vi godt at absorpsjonsfaktoren øker med større hulromsavstand og det går ikke så mye på bekostning i høye frekvenser. For de beregnede verdiene er det en del høyere absorpsjonsfaktor i de lave frekvensene og litt dårligere i frekvensene rundt 1kHz. Samme resultat gjelder for Sund polyester: de målte verdiene viser best absorpsjon for størst hulromsavstand, mens for de beregnede er det enda litt bedre absorpsjon i lavere frekvenser og dårligere rundt 1kHz. Vi ser at den dårligste verdien gir en "dupp" i grafen, en resonans, og denne forflytter seg mot lavere frekvenser og lavere absorpsjonsfaktor jo større hulromsavstanden blir. Resonans forekommer når to motgående bølger med samme fase interfererer. Ved større hulromsavstand får en flere resonanser og ved lavere frekvenser. Resonansfrekvensene finnes ved $f = \frac{Nc}{2d}$, der N er et heltall, c er lydfarten og d er avstanden mellom prøven og bakplaten.



(a) Ullprøve 3, 0mm, 30mm og 50mm hulromsavstand



(b) Ullprøve 7, 0mm, 30mm og 50mm hulromsavstand



(c) Ullprøve 4, 0mm, 25mm og 50mm hulromsavstand

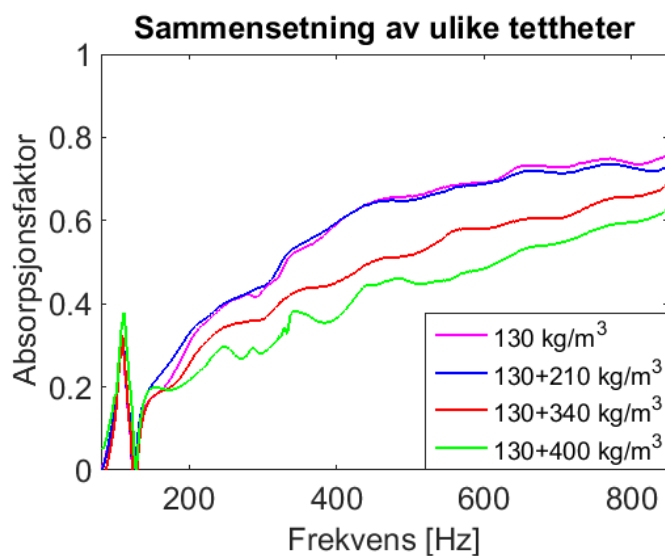
Figur 6.7: Absorpsjonsfaktor for spanske ullprøver, med ulik avstand til hard bakplate

Ullprøve 3 og 7, med samme tetthet, viser bedre absorpsjon i bass for større hulromsavstand, men stort sett like verdier i høyere frekvenser. For de beregnede verdiene ser en at 50mm avstand gir bedre absorpsjon enn 30mm opp til ca. 250Hz, over dette blir begge lavere enn kurven uten hulromsavstand. Ullprøve 4 viser best absorpsjon uten hulromsavstand for beregnede verdier i store deler av spekteret, bortsett fra i de aller laveste frekvensene. For målte verdier gjelder samme resultat som for ullprøve 3 og 7: absorpsjonen i lave frekvenser øker med økende hulromsavstand og forblir omtrent den samme i høyere frekvenser.

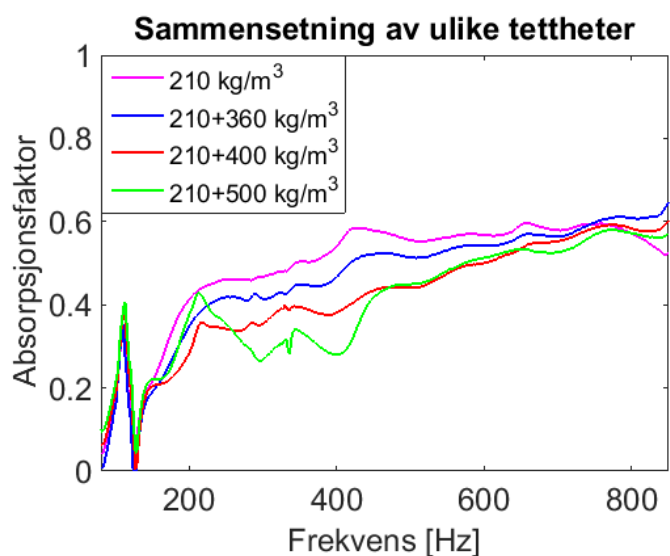
Generelt viser alle målte resultater at absorpsjonen øker i bass med økende hulromsavstand. Absorpsjonen blir litt dårligere i høyere frekvenser, men dette er såpass lite at det i den store sammenheng lønner seg med hulromsavstand, i hvert fall for ullprøvene. De tykkeste Glavaprøvene gir ikke så store variasjoner og bedring som for resten av materialene og hulromsavstand er ikke like nødvendig for disse.

6.4 Sammensetning av ulike tettheter

Sammensetninger av forskjellige tettheter er vist i figur 6.8. Her er en lav tetthet kombinert med en høyere tetthet, henholdsvis ullprøve 3 på $130\text{kg}/\text{m}^3$ og ullprøve 4 på $210\text{kg}/\text{m}^3$. Den lave tettheten er plassert først i impedansrøret etterfulgt av en høyere tetthet, dette for å se om absorpsjonsfaktoren kan bli bedre med en kombinasjon av ulike sjikt. Det er bare gjort målinger på de spanske ullprøvene da disse er laget av samme materialer og de eneste prøvene med stor forskjell i tettheter. Målingene er gjort med to mikrofoner og beregningene er gjort med Johnson/Allard-modell og limp-situasjon.



(a) Ullprøve 3 med tetthet 130kg/m^2 pluss en høyere tetthet



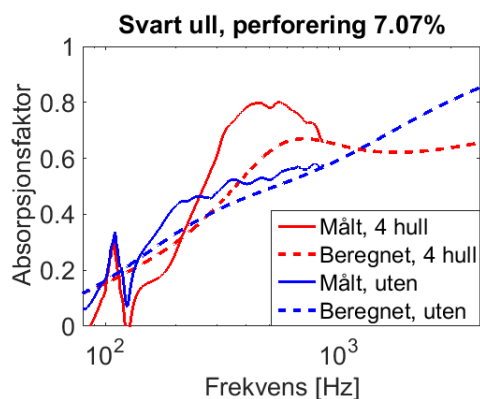
(b) Ullprøve 4 med tetthet 210kg/m^3 pluss en høyere tetthet

Figur 6.8: Sammensetning av ulike tettheter

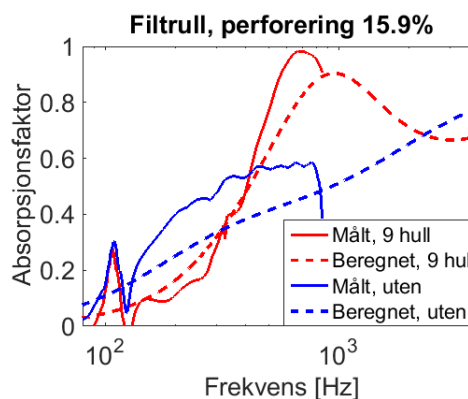
For tetthet 130kg/m^3 gir kombinasjon med tetthet 210kg/m^3 så og si lik absorpsjonsfaktor i alle frekvenser, men ved kombinasjon av høyere tettheter blir absorpsjonsfaktoren dårligere jo høyere tetthet som kombineres. Det samme skjer for kombinasjon av tetthet 210kg/m^3 med høyere tettheter. Dessverre er ikke dette pålitelige resultater da prøvene med de høyeste tetthetene ikke kan regnes som absorberende. For mer pålitelige resultater må en kunne kombinere tettheter for absorberende som oppfører seg som porøse materialer og ikke som harde plater.

6.5 Meso-perforering med ulik perforeringsgrad

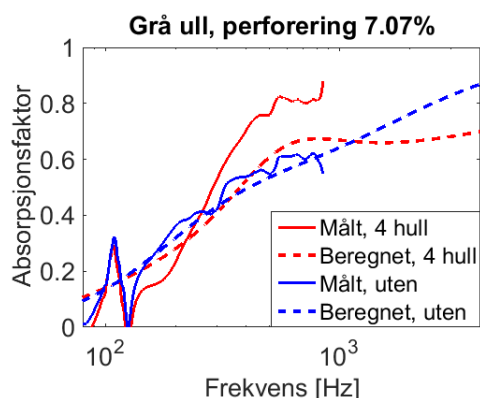
Absorpsjonsfaktor for prøvene med forskjellig perforeringsgrad er vist i figur 6.9. Hullene har diameter på 30mm og det er gjort målinger på perforering med 4 og 9 hull, henholdsvis perforeringsgrader på 7.07 og 15.9%. Målingene er gjort med mikrofoner og beregningene er gjort med Sgard-modell og rigid-situasjon.



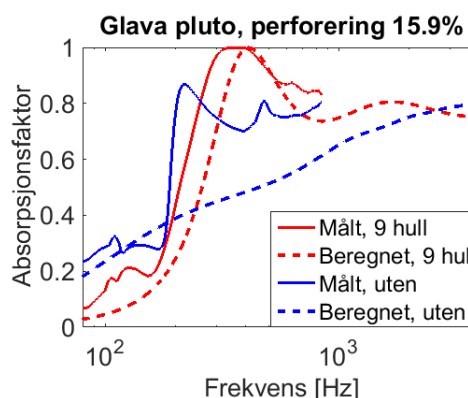
(a) Svart ull, 4 hull, 7.07% perforering



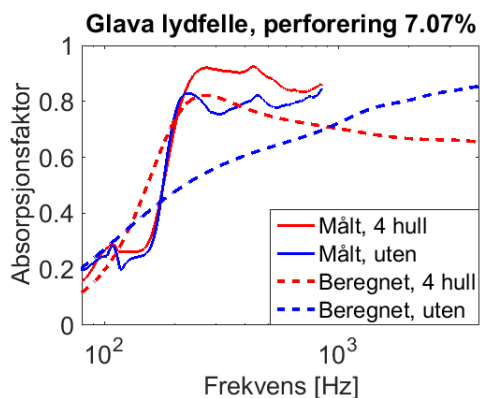
(b) Filtrull ull, 9 hull, 15.9% perforering



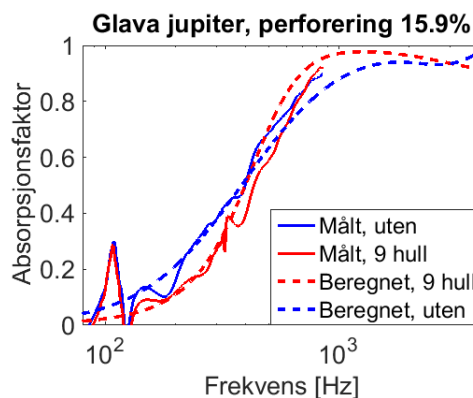
(c) Grå ull, 4 hull, 7.07% perforering



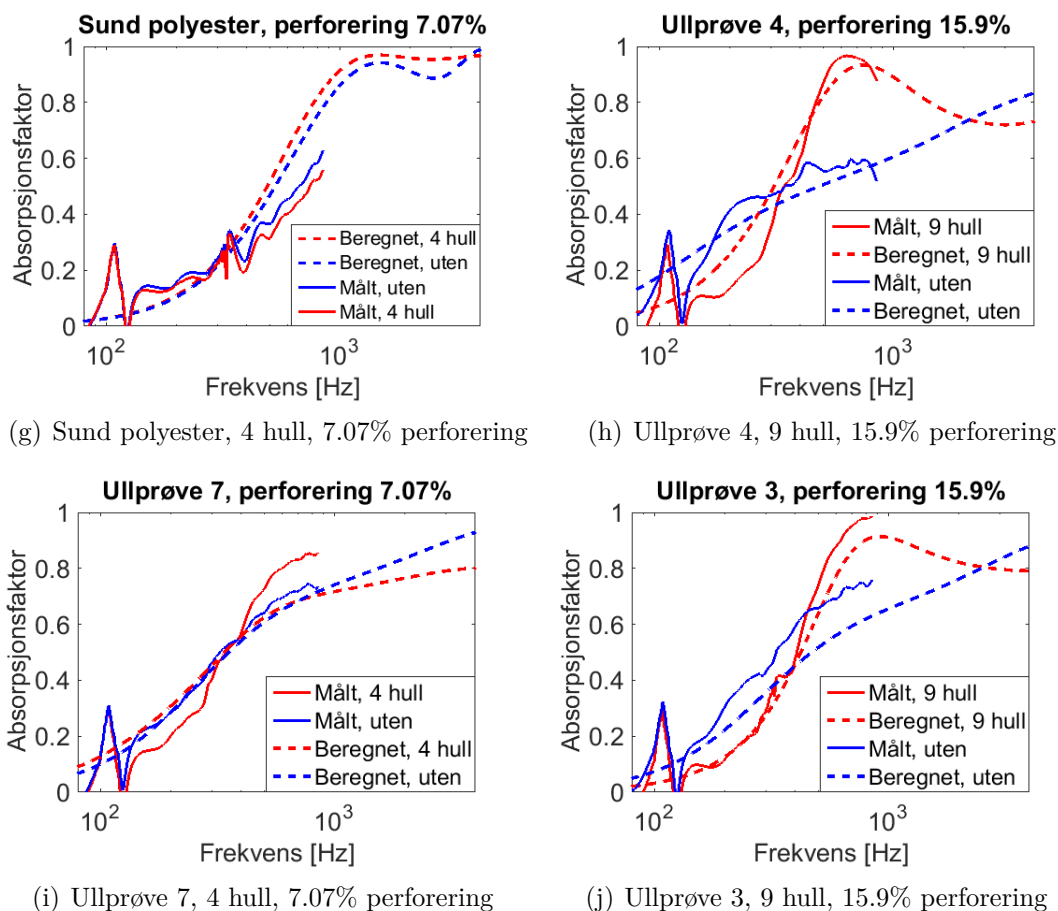
(d) Glava pluto, 9 hull, 15.9% perforering



(e) Glava lydfelle, 4 hull, 7.07% perforering



(f) Glava jupiter, 9 hull, 15.9% perforering



Figur 6.9: Absorpsjonsfaktor for alle prøver, med ulik perforeringsgrad

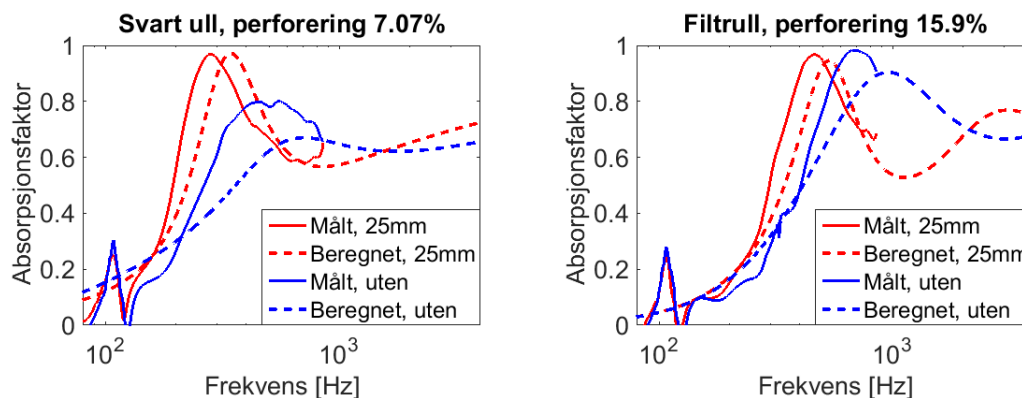
I alle tilfellene er det en del ulikheter mellom beregnede og målte verdier, men dette skyldes simuleringene i WinFlag. I egenskapsvinduet for dobbeltporøse materialer kan en ikke velge mellom rigid- eller limp-situasjon, den settes automatisk til rigid. Dette utgjør en forskjell siden en ikke kan anta at rammeverket står i ro under måling.

For de tre mongolske ullprøvene er det tydelig at absorpsjonsfaktoren øker i høye frekvenser med økende perforeringsgrad. Til gjengjeld synker absorpsjonen i lave frekvenser. Det samme gjelder for Glavaprøve pluto og lydfelle. For Glava jupiter og Sund polyester gir ikke perforering noe særlig bedring i absorpsjon, heller dårligere, spesielt i bass. For de tre spanske ullprøvene får vi samme resultat som for de mongolske: absorpsjonen synker i lave frekvenser og øker i høye frekvenser.

I tilfellene med 9 hull, 15.9% perforeringsgrad, går absorpsjonsfaktoren opp mot 1 for de høyeste frekvensene. Ved sammenligning av ullprøve 3 og 7, som i utgangspunktet skal være like, ser vi at en perforering på 9 hull gir mye bedre absorpsjonsfaktor i høye frekvenser enn en perforering på 4 hull. Det samme ser vi for sammenligning av svart mongolsk ull og filtrullen, og for Glava pluto og lydfelle. Selv om perforeringer gir dårligere absorpsjonsfaktor i lave frekvenser har det en fordel med at det gir bedre absorpsjon i høye frekvenser, det fjerner en del resonansfrekvenser og det er mer økonomisk med tanke på mengde materiale som må brukes.

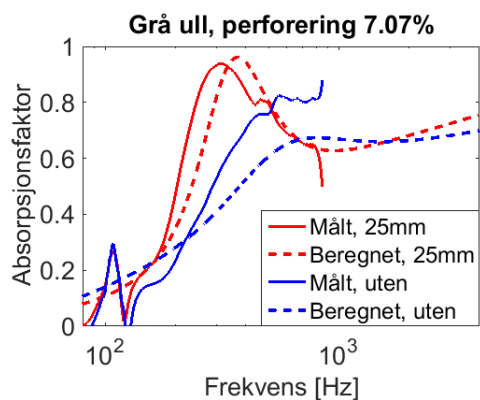
6.6 Kombinasjon av perforering og hulromsavstand

Et forsøk på kombinasjon av meso-perforering og hulromsavstand til hard bakplate er gjort for å se om en kan få bedre absorpsjon i lave frekvenser. Figur 6.10 viser resultatene, blå linjer viser perforering uten hulromsavstand og røde linjer viser perforering med hulromsavstand. Målinger er gjort med to mikrofoner og beregning er gjort med Sgard-modell og rigid-situasjon.

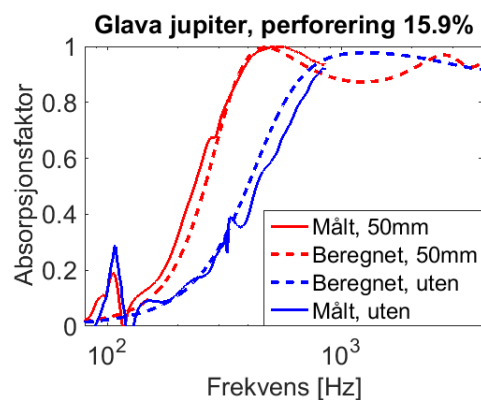


(a) Svart ull, 4 hull, 0 og 25mm hulrom

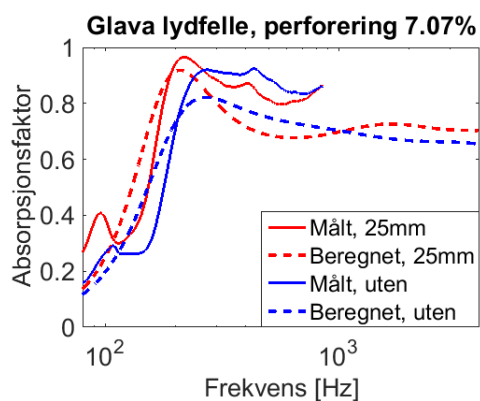
(b) Filtrull ull, 9 hull, 0 og 25mm hulrom



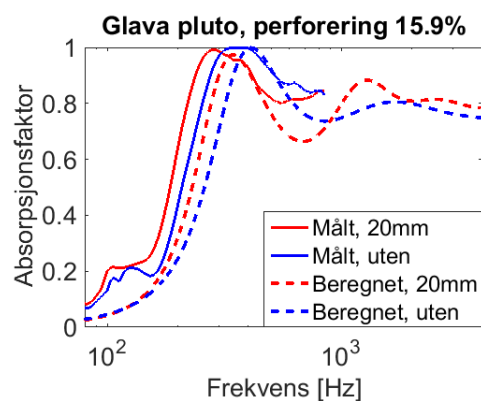
(c) Grå ull, 4 hull, 0 og 25mm hulrom



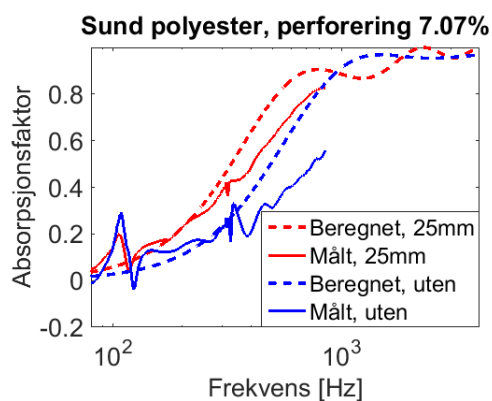
(d) Glava jupiter, 9 hull, 0 og 50mm hulrom



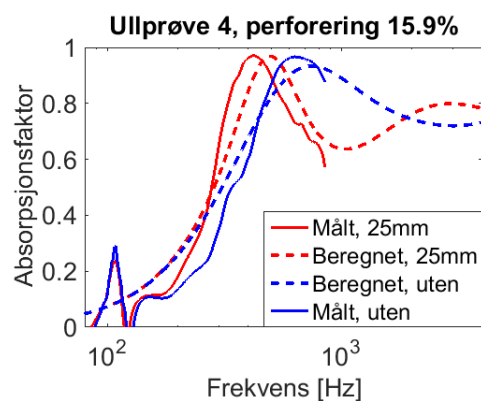
(e) Glava lydfelle, 4 hull, 0 og 25mm hulrom



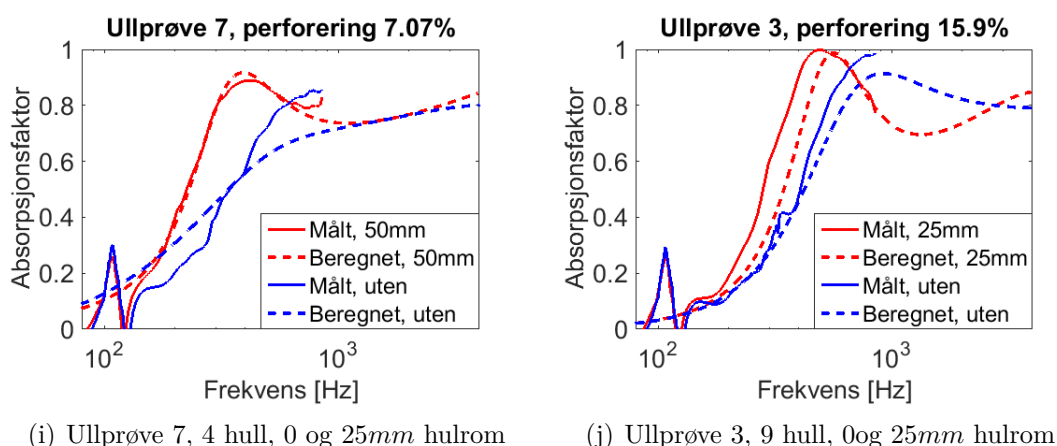
(f) Glava pluto, 9 hull, 0 og 20mm hulrom



(g) Polyester, 4 hull, 0 og 50mm hulrom



(h) Ullprøve 4, 9 hull, 0 og 25mm hulrom



Figur 6.10: Absorpsjonsfaktor for alle prøver med perforering, med og uten hulromsavstand

Kombinasjon av hulromsavstand og 15.9% perforeringsgrad gir resonanser og generelt mye dårligere absorpsjon i høye frekvenser. For Glava jupiter er ikke absorpsjonen like dårlig i høye frekvenser og veldig mye bedre i lave frekvenser, så hulromsavstand på 50mm og perforering med 9 hull gjør dette materialet til en bedre absorbent. For resten av prøvene med 9 hull får en bedre absorpsjon i litt lavere frekvenser, men betraktelig dårligere i høyere frekvenser.

Ved kombinasjon av perforeringsgrad 7.07% og hulromsavstand ser en at absorpsjonen blir bedre i lave frekvenser, men litt dårligere i høye frekvenser. Det er altså samme resultat som for 9 hull, men effekten er ikke like stor. For ullprøve 7 blir ikke absorpsjonsfaktoren like dårlig i høye frekvenser og en kan med fordel bruke 25mm hulromsavstand for å få bedre demping i lave frekvenser. Det samme gjelder for Sund polyester. For resten lønner det seg altså ikke å kombinere disse variablene da det går for mye på bekostning av dårligere demping i høye frekvenser.

6.7 Fibertykkelse

Tabell 6.1 viser gjennomsnittlig fibertykkelse for materialene i stigende rekkefølge, samt standardavvik for hvert materiale. Ullprøve 3 ble ikke målt da denne er lik ullprøve 7, forskjellen er at prøve 3 er limt og dette er uvesentlig ved måling av fibertykkelse. Vi ser tydelig av målingene at det er stor forskjell på tykkelsen fra fiber til fiber, spesielt på ullprøvene. Dette er forventet siden de er naturlige produkter, men for både Sund polyester og Glava lydfelle er avvikene for store med

tanke på at de er fremstilte. Fra standardavvikene ser vi at grå ull har størst avvik på 14.48, mens Glava pluto har minst avvik på 2.36.

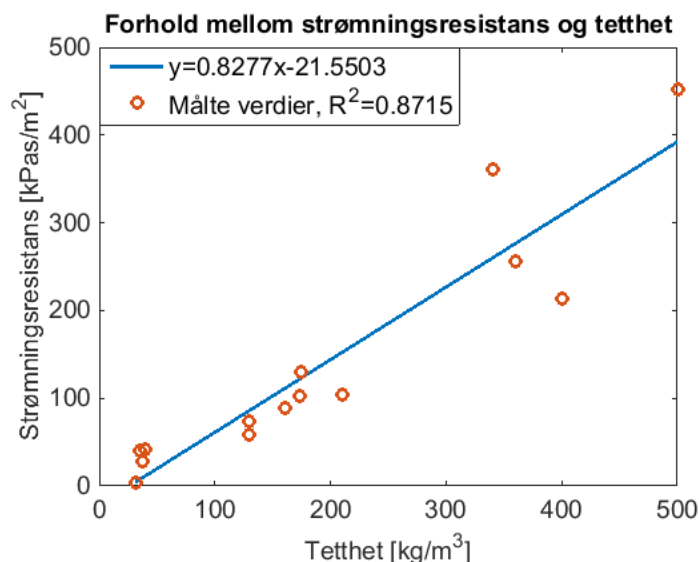
Glavaprøvene har minst tykkelse, mellom 18.3 og 24.2 μm , mens ullprøvene og polyester har større tykkelser, mellom 29.2 og 51.7 μm . For de mongolske ullprøvene, som har den groveste ullen, kan en se med det blotte øyet at fibre er tykkere enn for resten av ullprøvene. Dette ser vi stemmer fra tabellen for grå og svart ull, mens filtrullen skiller seg ut med litt smalere tykkelse. Selv om forskjellen på fibertykkelsene er såpass store får vi likevel en pekepinn på størrelsesordenen. Det vil være fordelaktig å gjøre flere målinger per prøve slik at en kan få en mer pålitelig middelværdi og et bedre sammenligningsgrunnlag. Ballagh[15] fant ut at absorpsjonsfaktoren øker med minkende fibertykkelse. Dette kan stemme til en viss grad for Glavaprøvene, men vi har ikke pålitelig nok informasjon til å konkludere med dette. En ser også at høye standardavvik på over 10 finnes blant alle kategoriene: mongolsk ull, spansk ull, polyester og glassfiber. Det blir da vanskelig å si hvilke materialer som varierer minst og mest i fibertykkelse.

Materiale	Måling 1 [μm]	Måling 2 [μm]	Måling 3 [μm]	Fiber- tykkelse[μm]	Std- avvik
Glava pluto	20	15	20	18.3	2.36
Glava jupiter	25	10	20	18.3	6.24
Glava lydfelle	32.5	30	10	24.2	10.07
Ullprøve 7	40	25	22.5	29.2	7.73
Ullprøve 1	50	25	40	38.3	10.27
Filtrtull ull	35	50	45	43.3	6.24
Polyester	40	60	30	43.3	12.47
Ullprøve 5	37.5	50	42.5	43.3	5.14
Ullprøve 2	50	50	35	45.0	7.07
Ullprøve 6	40	50	50	46.7	4.71
Ullprøve 4	65	35	50	50.0	12.25
Grå ull	70	35	47.5	50.8	14.48
Svart ull	47.5	47.5	60	51.7	5.89

Tabell 6.1: Målt gjennomsnittlig fibertykkelse og standardavvik

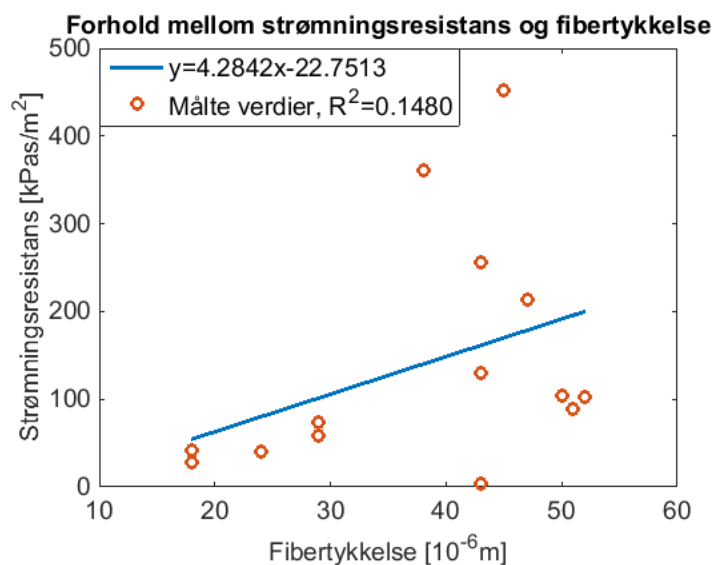
6.8 Regresjonsanalyse

Figur 6.11 viser forholdet mellom strømningsresistans og tetthet, og en kan se at de er relativt sterkt korrelerte da determinasjonskoeffisienten, R^2 , er lik 0.8715. En har sterk korrelasjon for R^2 nære 1 og svak korrelasjon for R^2 nære 0. For prøvene med tetthet på 500, 400 og 340 kg/m^3 passer linja dårligst, men det er også disse prøvene som har stivest rammeverk og har vært vanskelige å gjøre strømningsresistansmåling på. Siden de er så stive blir det vanskelig å skjære ut runde prøver til røret i måleriggen og det er ikke sikkert strømningsresistansen er riktig da de ikke passer nøyaktig i røret. Denne figuren viser tydelig at strømningsresistansen øker med økende tetthet, slik Ballagh fant ut, beskrevet i kapittel 4.2.



Figur 6.11: Forhold mellom strømningsresistans og tetthet, ved lineær regresjon

Figur 6.12 viser forholdet mellom strømningsresistans og fibertykkelse. Disse er svakt korrelerte, med kun $R^2 = 0.1480$, og vises å være lite avhengig av hverandre. Dette er ikke pålitelige resultater da det er gjort for få målinger med mikroskop per prøvemateriale og fibertykkelsen er veldig varierende for hver prøve.



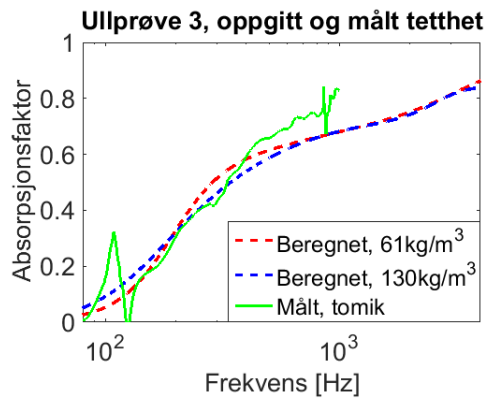
Figur 6.12: Forhold mellom strømningsresistans og fibertykkelse, ved lineær regresjon

6.9 Avvik mellom oppgitte og målte tettheter

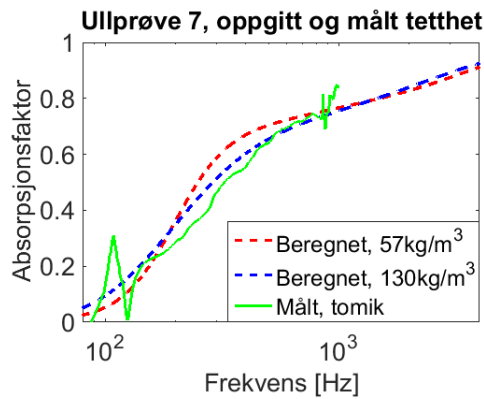
Tettheten på de spanske ullprøvene er blitt målt for å se forskjellen fra oppgitt tetthet fra produsenten. Avviket er veldig stort for enkelte prøver og er vist i tabell 6.2. For prøvene med størst avvik er forskjellen i absorpsjonsfaktor vist i figur 6.13.

Prøve	Oppgitt [kg/m^3]	Målt [kg/m^3]	Prosentavvik
Ullprøve 1	340	325	4%
Ullprøve 2	500	505	1%
Ullprøve 3	130	61	53%
Ullprøve 4	210	61	71%
Ullprøve 5	360	139	61%
Ullprøve 6	400	408	2%
Ullprøve 7	130	57	56%

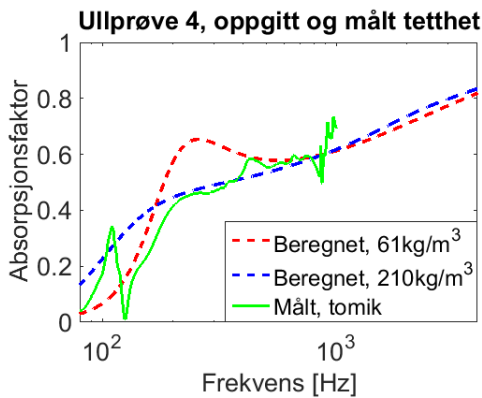
Tabell 6.2: Avvik mellom målt og oppgitt tetthet fra produsent



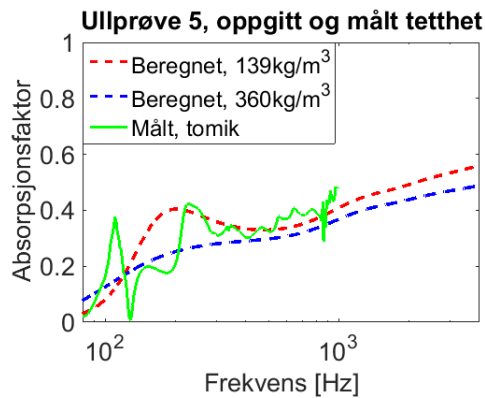
(a) Ullprøve 3, avvik 53%



(b) Ullprøve 7, avvik 56%



(c) Ullprøve 4, avvik 71%



(d) Ullprøve 5, avvik 61%

Figur 6.13: Absorpsjonsfaktor for målt(rød) og oppgitt(blå) tetthet

Tetthetene for ullprøve 1, 2 og 6 passer best med de målte verdiene og avviket er ikke studert videre. For ullprøve 3 og 7 er avviket på henholdsvis 53% og 56% og en ser av figurene at absorpsjonen for målte verdier ikke er veldig ulik fra absorpsjonen for oppgitte verdier. En skulle trodd at en forskjell i tetthet på over 50% påvirker absorpsjonsfaktoren mer enn den faktisk gjør. Men for ullprøve 4 og 5, med avvik på 71% og 61%, er forskjellene større. I alle tilfeller gir oppgitte tettheter bedre absorpsjon i bass enn målte tettheter, men til gjengjeld gir målte tettheter bedre eller like god absorpsjon fra mellom-frekvenser og oppover. En ser at jo større avviket er, jo større blir forskjellen i absorpsjon. Ved sammenligning med målt absorpsjonsfaktor i impedansrør er det vanskelig å se hvilken beregningskurve som passer best da de målte verdiene svinger så mye. Til tross for at produsentene har oppgitt tettheter som er såpass ulike fra faktiske tettheter blir ikke forskjellen i absorpsjon betydelig før en runder ca. 60% avvik.

6.10 Usikkerhet

Det finnes mye usikkerhet for målingene i impedansrøret med tanke på hvordan prøvene sitter i røret, spesielt for noen av ullprøvene som er veldig fleksible. Disse vil aldri stå nøyaktig rett i røret og lyden kommer ikke vinkelrett på prøveoverflaten. Glavaprøvene har et stivere rammeverk og en får ikke samme problemet med disse. Det er også et problem at ullprøvene ligger i lag og ikke er hele stykker. Det kan dannes uønskelig luft mellom lagene som kan påvirke måleresultatene, spesielt for de stiveste ullprøvene. For de fleksible prøvene er det mulig å presse de litt sammen for å unngå luftlag, og de mest fleksible prøvene har blitt sydd sammen, både for å unngå luft og for å rette de opp i røret. Noen prøver har limte lag, noe som vil påvirke måleresultatene. Det er usikkert hvordan limet innvirker på strømningsresistansen og absorpsjonen til materialet. Det er de spanske produsentene som har limt prøvene og vi har dermed ingen opplysninger om hva slags lim det er og hvor tykt lag som ligger mellom.

Det vil alltid være litt usikkerhet med tanke på prøvematerialer. Ett parti med prøver vil ikke gi samme resultater som et annet, spesielt for ullprøvene som er av naturlig ull. Fibertykkelsen er ulik for hver eneste sau og avhenger av sauerase og sauens fysiske tilstand. Fibertykkelsen er også ulik forskjellige steder på sauekroppen. Dette har dermed en innvirkning på strømningsresistansen. Det ville vært hensiktsmessig å sammenligne resultater fra ulike partier og anbefales for videre arbeid. En annen usikkerhet med tanke på fibertykkelse er at skalaen i okularet må leses av med det blotte øyet. Avlesning blir ikke nøyaktig og en vil få en feilmargin på ca. 1 strek på skalaen, som tilsvarer $5\mu m$. I tillegg har fibrene ulik tykkelse på selve fiberen og det er dermed usikkert hvor en skal lese av, ved den tynneste eller den tykkeste delen av fiberen.

Når det gjelder perforering av materialene ble Glavaprøvene skåret ut for hånd, noe som gir usikkerhet i målingene. Hullene står dermed ikke nøyaktig vinkelrett på prøven og lydbølgen vil treffe veggene i hullene når den treffer vinkelrett på prøven. De andre prøvene ble skåret ut med maskin, noe som gir mindre usikkerhet. For ullprøvene, som består av to separate lag, ble hvert lag skåret ut hver for seg og deretter lagt oppå hverandre. Dette gir en liten feilmargin da ikke hullene ligger nøyaktig på hverandre inne i impedansrøret. Denne ulempen får en ikke for

Glava eller polyester som består av ett stykke materiale.

De fire spanske ullprøvene med høyest tetthet kan som sagt ikke brukes som absorberende materiale. Dette gjør at vi står igjen med tre spanske og tre mongolske ullprøver å basere en konklusjon på. Dette er ikke optimalt antall prøver for å gi noen god konklusjon, det trengs mange flere, og da også flere av samme type, for å finne eventuelle usikkerheter innenfor ett materiale. De spanske ullprøvene er delt inn i karbonisert og ukarbonisert ull: ullprøve 1, 3, 6 og 7 er karbonisert og resten er ukarbonisert. Dessverre er det ikke mulig å se om dette utgjør noen forskjell for resultatene siden vi ikke har nok prøver å sammenligne.

Kapittel 7

Konklusjon og videre arbeid

7.1 Konklusjon

Flere aspekter som kan bestemme absorpsjonsegenskapene til porøse materialer er blitt undersøkt, med hovedfokus på naturlig ull. Materialene som er undersøkt er mongolsk ull, spansk ull, glassfiber og polyester. Faktorer som er studert med tanke på å forbedre absorpsjonsegenskapene er hulromsavstand mellom materiale og hard bakvegg, meso-perforeringer, fibertykkelse og tetthet. Ved bruk av rør-impedansmåling og klangromsmåling viser det seg at tykke glassfiberprøver, Glava, gir best absorpsjon i store deler av frekvensspekteret. Mongolske og spanske ullprøver, med tetthet under $250\text{kg}/\text{m}^3$, gir relativt god dempning jevnt over frekvensspekteret, mens Sund polyester og spanske ullprøver, med tetthet over $300\text{kg}/\text{m}^3$, er ubrukelige som absorberer.

Effekten av hulromsavstand mellom prøve og hard bakvegg gir, for alle materialer, bedre absorpsjon i bass, men litt dårligere for økende frekvenser. Til tross for dårligere absorpsjon i høye frekvenser er dette lite nok til at hulromsavstand lønner seg og gir bedre absorpsjonsegenskaper for materialene.

Ved hjelp av meso-perforering med hull på 30mm øker absorpsjonen med økende perforeringsgrad i høye frekvenser, men den synker tilsvarende i lave frekvenser. Hvis en ønsker bedre absorpsjon i bass lønner det seg altså å velge hulromsavstand fremfor perforering.

En kombinasjon av hulromsavstand og meso-perforering er undersøkt for å se om absorpsjonen blir god i både bass og diskant. Perforeringsgrader på 7.07 og 15.9% kombinert med hulromsavstand gir en del bedre absorpsjon i mellom-frekvenser, men betraktelig dårligere absorpsjon i høyere frekvenser. Denne effekten er størst for høyest perforeringsgrad, men i begge tilfeller lønner det seg ikke å kombinere disse faktorene.

Ved måling av fibertykkelse er det observert at tykkelsen varierer veldig for hvert materiale, der standardavviket er veldig høyt for enkelte prøver. Det er gjort for få målinger per prøve, så gjennomsnittlig fibertykkelse er ikke pålitelig og sammenligningsgrunnlaget blir for dårlig. En får likevel en følelse av størrelsesordenen til porøse materialer, men en kan ikke si noe om hvordan absorpsjonsfaktoren påvirkes av fibertykkelsen.

Det er gjort regresjonsanalyse på forholdet mellom strømningsresistans og tetthet som viser seg å være sterkt korrelerte; strømningsresistansen øker med økende tetthet. Strømningsresistans og fibertykkelse er derimot svakt korrelerte og lite avhengig av hverandre.

Naturlig ull er allergivennlig, hygroskopisk og flammehemmende, noe som gjør produktet mye mer attraktivt enn glassfiber og lignende materialer. Med tanke på akustiske egenskaper gir likevel glassfiber generelt bedre absorpsjon, men ull kan absolutt være et godt alternativ hvis ikke tettheten blir for høy. I bass er verken ull eller glassfiber gode absorbenter, men for vanlig tale i mellomfrekvenser og diskant kan naturlig ull brukes fremfor glassfiber.

7.2 Videre arbeid

For videre arbeid anbefales det å skaffe flere ullprøver for å få et større antall resultater å basere en konklusjon på. Både flere tettheter for sammenligning, og forskjellige tykkelser på prøvene. I tillegg er det fordelaktig å få flere partier av samme type materiale for å se på en eventuell usikkerhet innad i materialet, hovedsakelig grunnet at fibertykkelsen varierer mye. Da det ikke er gjort nok målinger på fibertykkelse per prøve er det ønskelig at dette gjøres så en kan kartlegge denne usikkerheten. Da kan en få mer pålitelige resultater på gjennomsnittlig fibertyk-

kelse og se hvordan absorpsjonsfaktoren påvirkes av fibertykkelsen. Det vil også være interessant å se om ulike tilvirkningsmetoder utgjør en forskjell for akustiske egenskaper, i hovedsak ull som er nålefiltet kontra ull som er tovet.

Absorpsjonsfaktoren avhenger av tykkelsen på materialet, noe vi ikke har kunnet teste i løpet av denne våren. Forsendelsen av prøvene inneholdt kun en minstetykkelse for å kunne gjøre målinger i impedansrør og det har derfor ikke vært mulig å gjøre målinger på tykkere prøver. Dette er absolutt noe som burde vært gjort og anbefales for eventuelt videre arbeid.

Klangromsmålingene gjort denne våren følger ikke standarden da de ikke har stort nok areal. Det anbefales å skaffe store nok prøver og foreta etterklangsmålinger for alle prøvematerialer. Det vil være spesielt interessant å undersøke de spanske ullprøvene da det ikke er gjort klangromsmåling på disse.

Den harde bakveggen i impedansrøret for to-mikrofon-metoden er av glass og det vil være mulig å måle vibrasjonen til materialene med en laser. En kan for eksempel finne ut ved hvilke frekvenser rammeverket påvirkes mest og hvordan lydbølgene setter det i sving.

Bibliografi

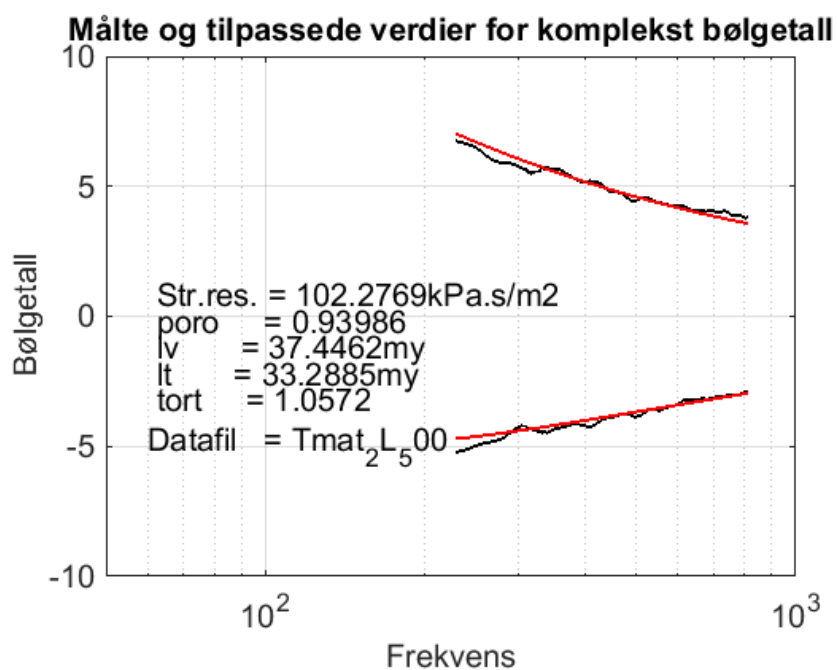
- [1] ISO 10534-2, *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method*, International Standard, 1998
- [2] ISO 9053:1991, *Acoustics - Materials for acoustical applications - Determination of airflow resistance*, International Standard, 1991
- [3] ASTM E2611-09, *Standard test method for measurement of normal incidence sound transmission of acoustical materials based on the transfer matrix method*, ASTM International, 2009
- [4] ISO 354:2003, *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*, International Standard, 2003
- [5] T. E. Vigran, *Bygningsakustikk - et grunnlag*, Tapir akademisk forlag, Trondheim, 2002, kap. 5
- [6] A. Homb, *Innvendig kledning - Lydabsorberende egenskaper til materialer og konstruksjoner*, Byggforskserien - byggdetaljer 543.414, 1996
- [7] Y. Champoux, M. R. Stinson, G. A. Daigle, *Air-based system for the measurement of porosity*, J. Acoust. Soc. Am, 89, 1991, 910-916
- [8] T. E. Vigran, *Manual for Winflag, version 3.0*, Trondheim, 2011
- [9] D. L. Johnson, J. Koplik og R. Dashen, *Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media*, J. Fluid Mech. vol 176, 1987, 379-402
- [10] J. F. Allard, *Propagation of sound in porous media. Modelling sound absorbing materials*, Elsevier Applied Science, New York, 1993

- [11] R. Panneton, *Comments on the limp frame equivalent fluid model for porous media*, J. Acoust. Soc. Am. 122, EL217, 2007
- [12] F. C. Sgard, X. Olny, N. Atalla, F. Castel, *On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials*, Applied Acoustics, 2005, 66: 625-651
- [13] E. Gourdon, M. Seppi, *On the use of porous inclusions to improve the acoustical response of porous materials: Analytical model and experimental verification*, Applied Acoustics, 2009, 71: 283-298
- [14] T. E. Vigran, *Normal incidence sound transmission loss in impedance tube - Measurement and prediction using perforated plates*, Applied Acoustics, 2012, 73: 454-459
- [15] K. O. Ballagh, *Acoustical Properties of Wool*, Applied Acoustics, 1996, 48: 101-120

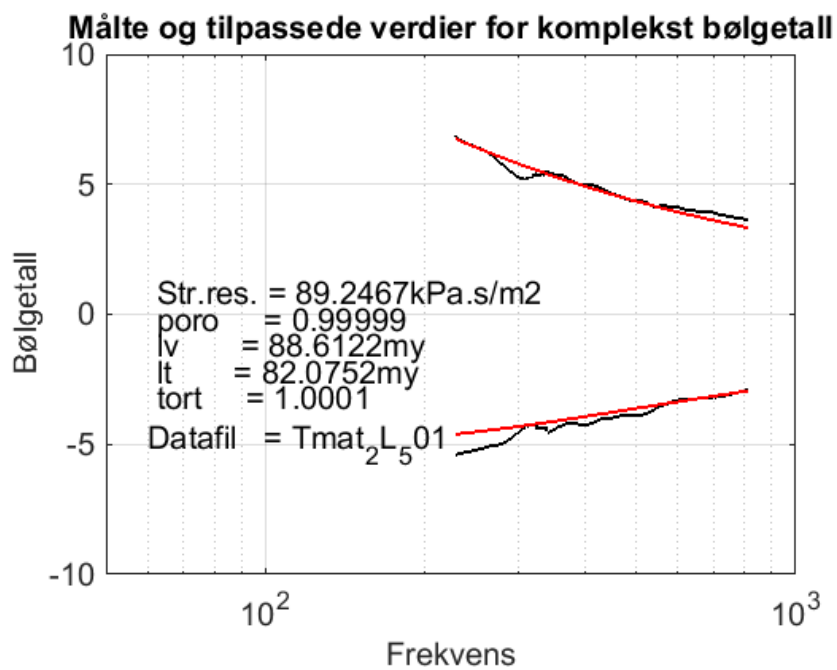
- [16] Rom & Tonik AS: Wool felt - A unique material [06.02.2015]
- [17] Store Norske Leksikon: Ull [02.02.2015]
- [18] Textil Learner: Carbonizing process of wool [09.04.2015]
- [19] Fibersource: Rayon Fiber[15.04.2015]
- [20] Rom & Tonik AS: Spesifikk etterklangsmåling [12.03.2015]

Vedlegg A

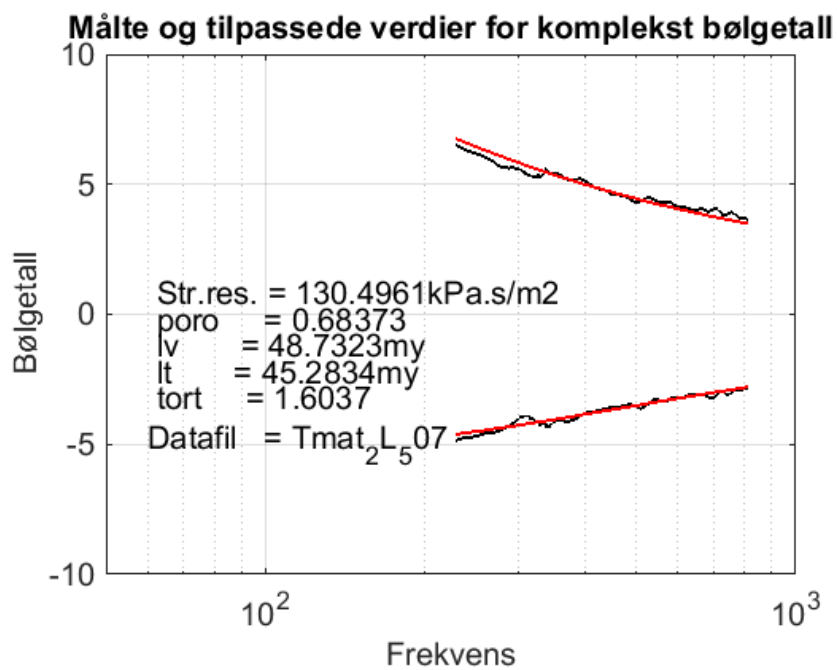
Målte og tilpassede verdier for kompleks bølgetall



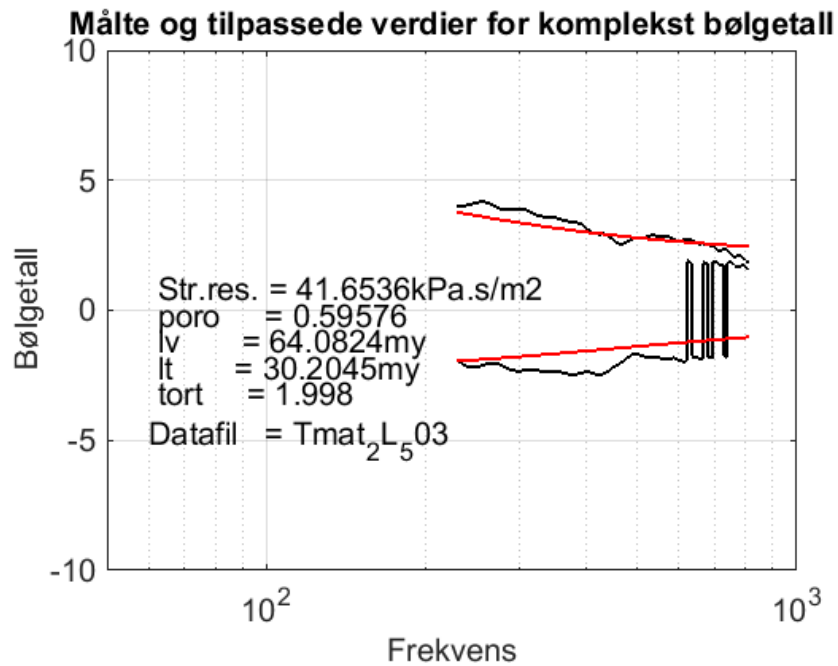
(a) Svart ull, $173\text{kg}/\text{m}^3$



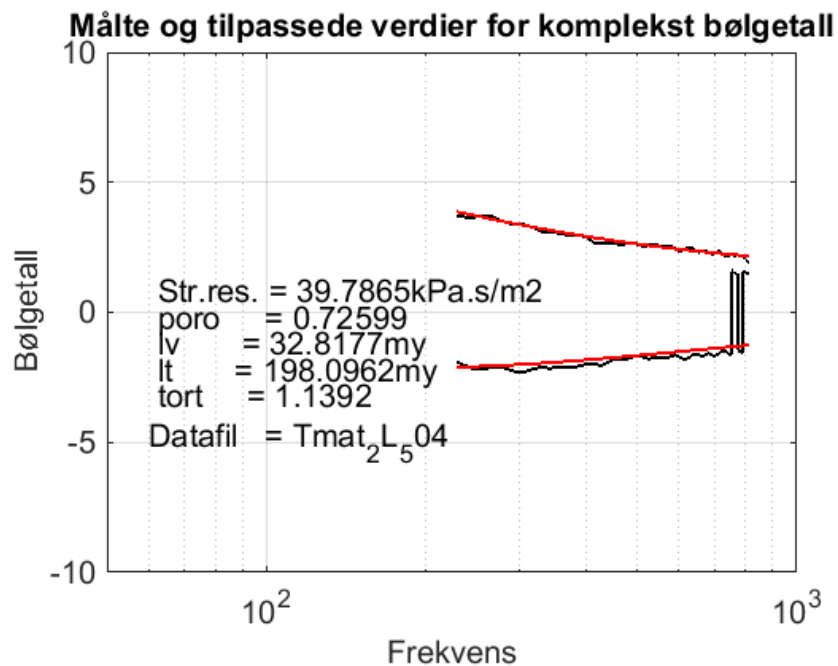
(b) Grå ull, 161.1kg/m³



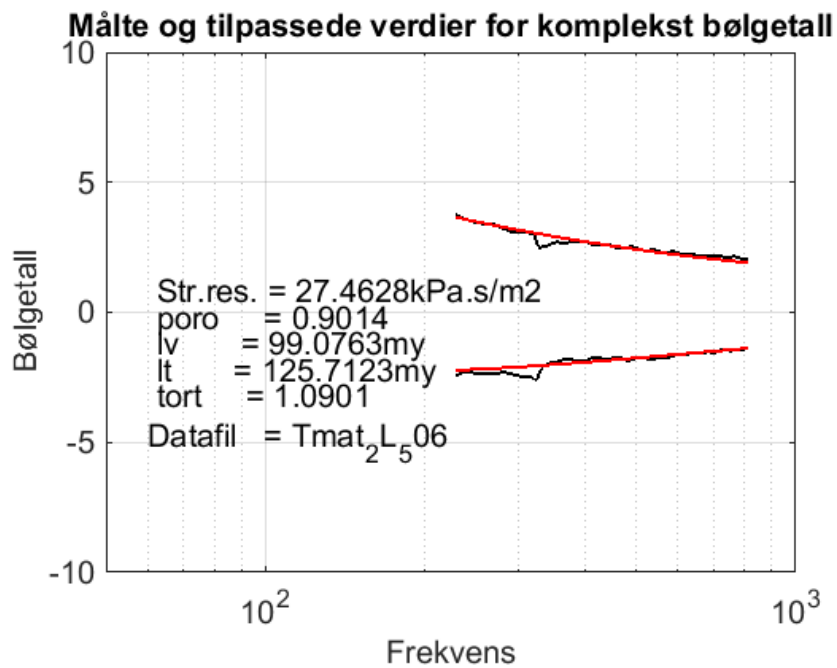
(c) Filtrull, 175kg/m³



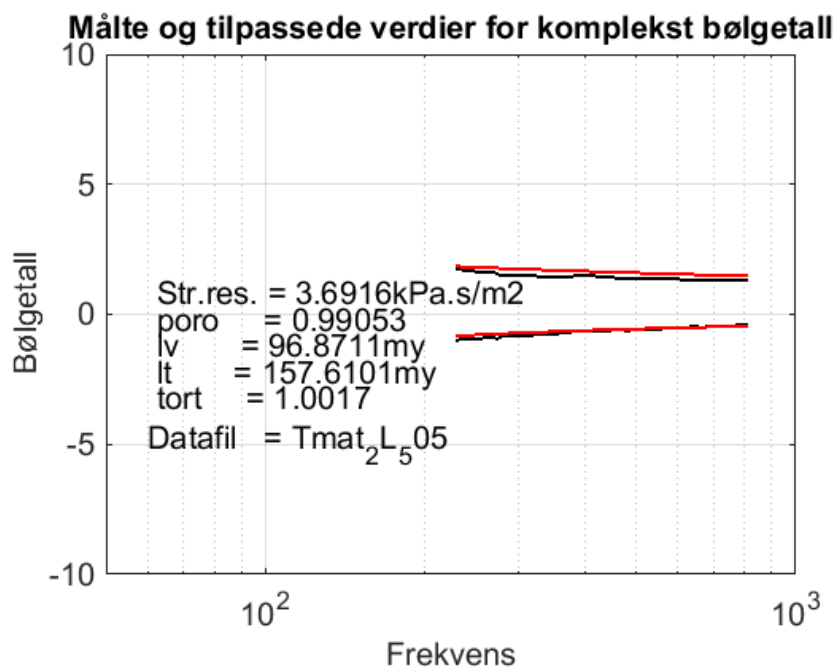
(d) Glava pluto, 40kg/m³



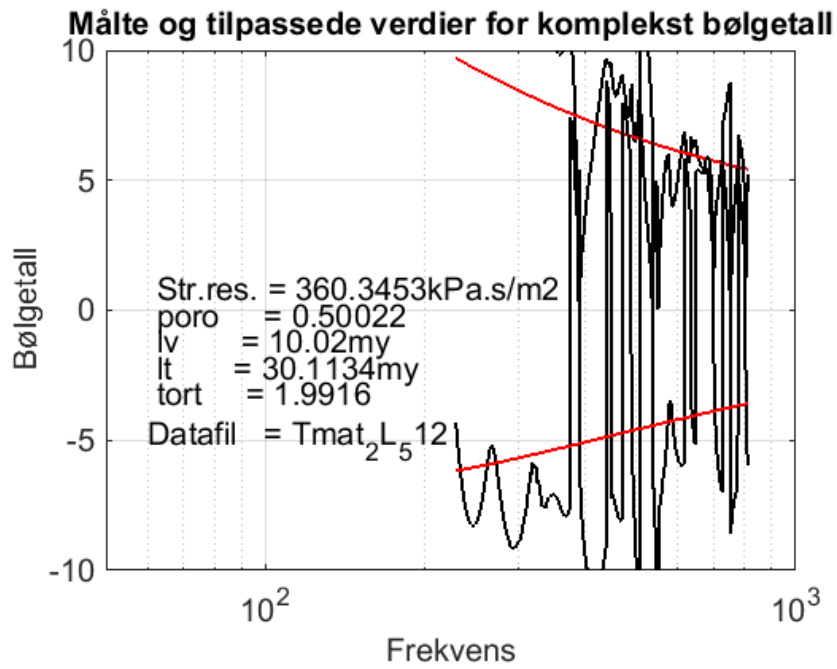
(e) Glava lydfele, 35kg/m³



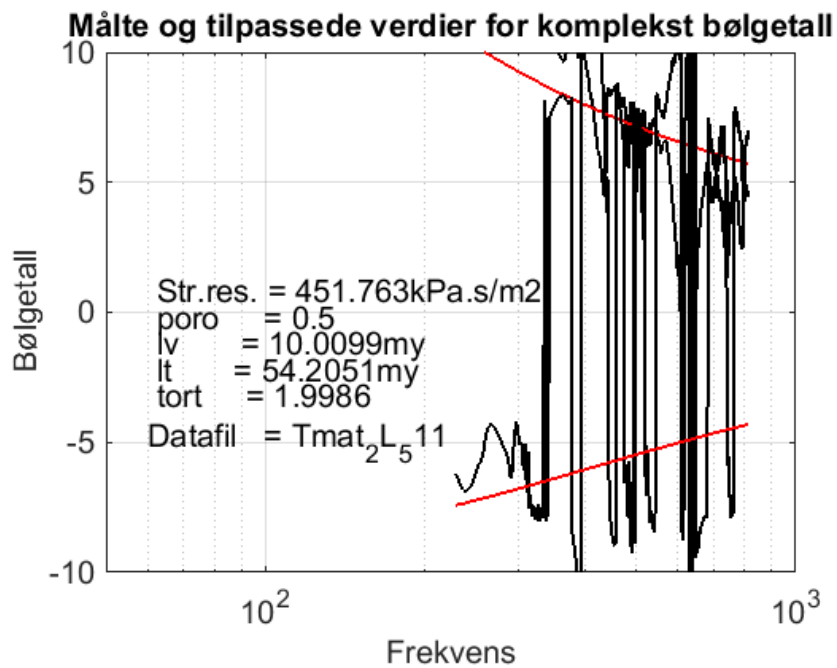
(f) Glava jupiter, 37.5kg/m³



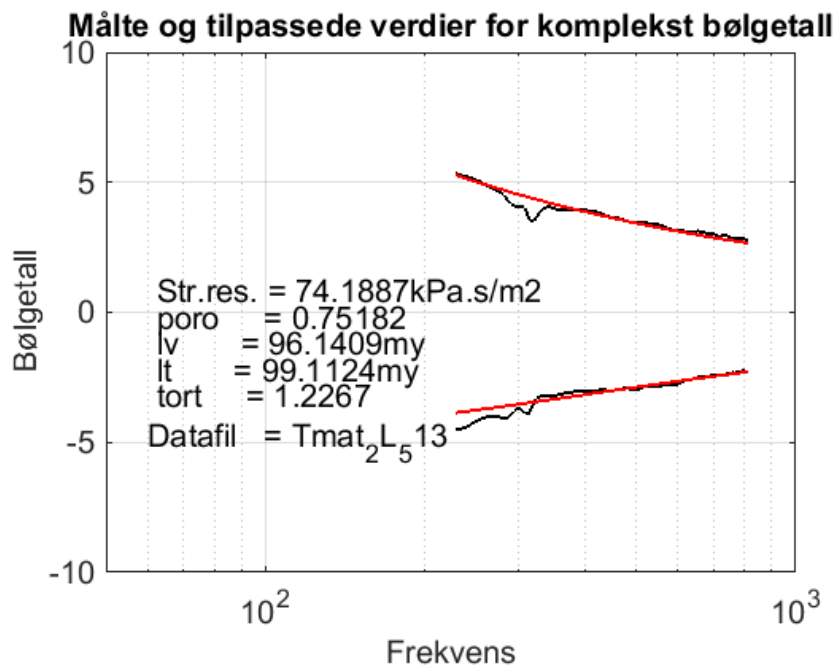
(g) Sund polyester, 31.4kg/m³



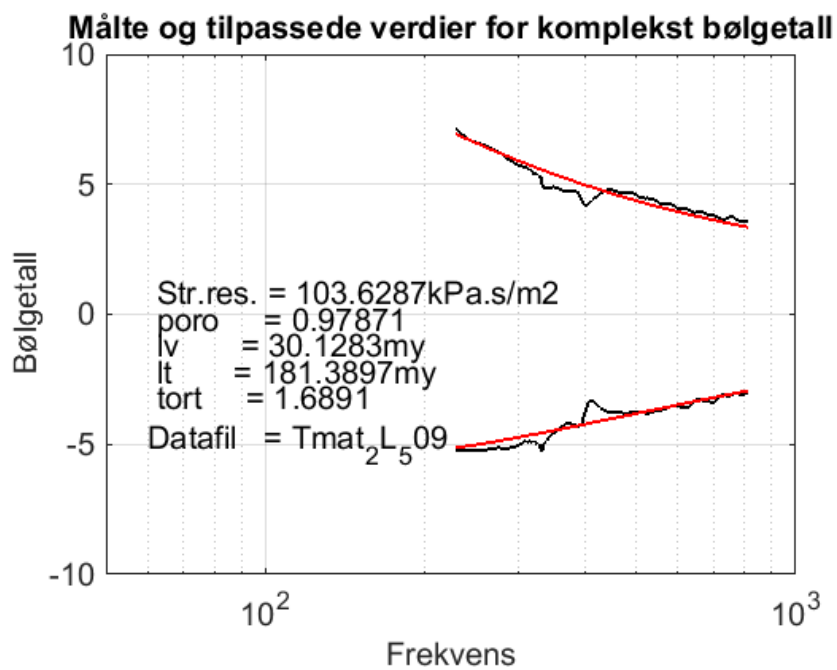
(h) Ullprøve 1, 340kg/m³



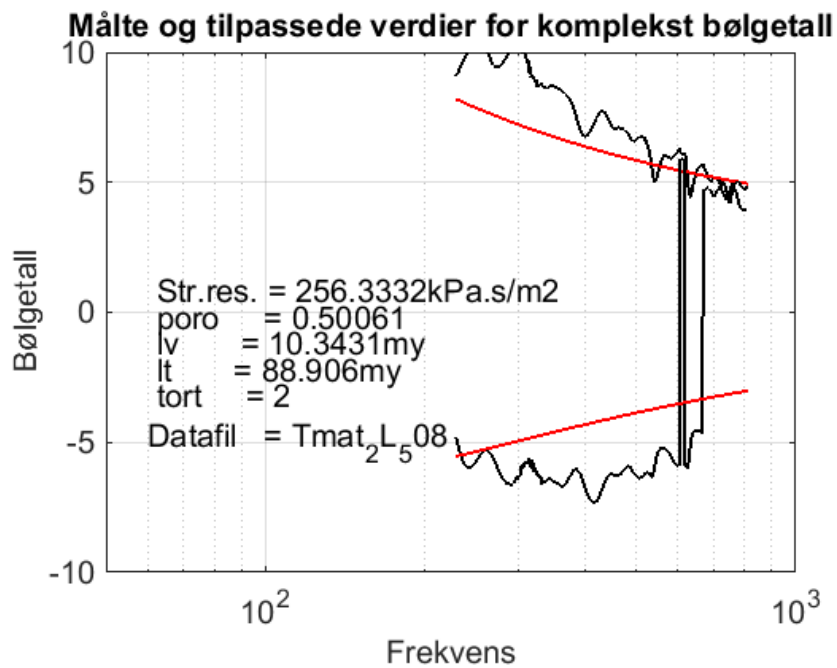
(i) Ullprøve 2, 500kg/m³



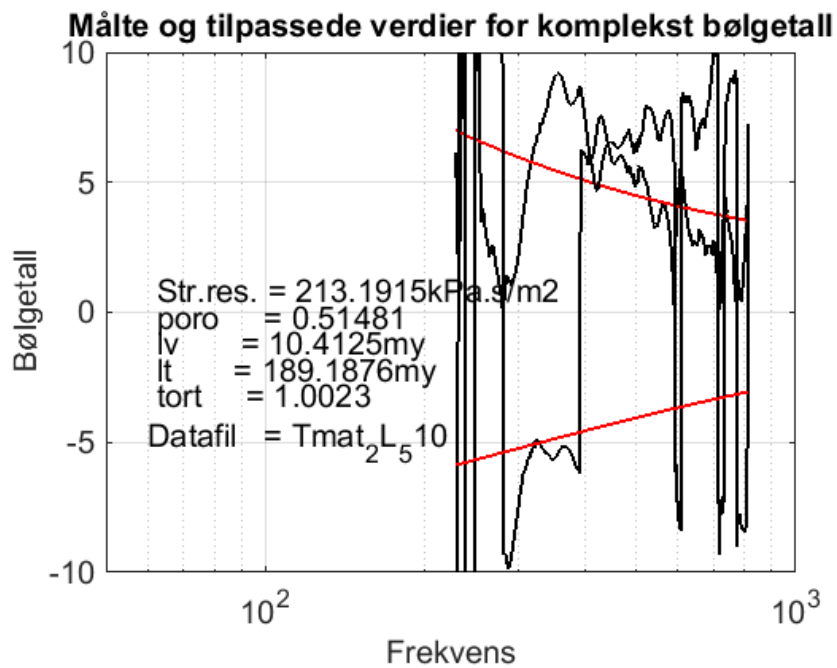
(j) Ullprøve 3, 130kg/m³



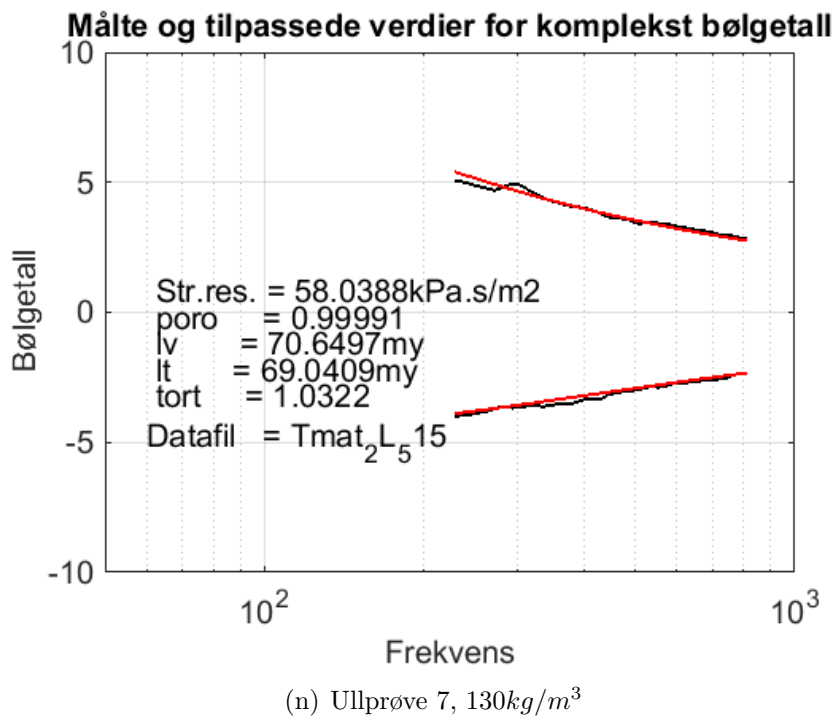
(k) Ullprøve 4, 210kg/m³



(l) Ullprøve 5, 360kg/m³



(m) Ullprøve 6, 400kg/m³



Figur A.1: Målte og tilpassede verdier for komplekst bølgetall