



**KTH Bygghvetenskap**

KUNGLIGA TEKNISKA HÖGSKOLAN  
Institutionen för Bygghvetenskap  
Avdelningen för Byggnadsteknik

Examensarbete för  
Civilingenjörsexamen  
Väg- och Vattenbyggnadsteknik

## **Utredning av ljudabsorption hos spaltpanel - Mätning i efterklangsrum**

Thesis for the  
Degree of  
Master of Science  
Civil Engineering

## **Sound absorption of a slatted panel absorber - Reverberation room measurements**

**Matti Saarne**

*Handledare*  
Gunilla Sundin  
Folke Björk

Ingemansson Technology AB  
Institutionen för Byggnadsteknik, KTH

*Examinator*  
Gudni Johannesson

Institutionen för Byggnadsteknik, KTH

Stockholm  
November 2005  
Examensarbete nr 362



## Förord

Examensarbetet är utfört vid avdelningen för Byggnadsteknik, Institutionen för Bygghälsa, Kungliga Tekniska Högskolan i samarbete med Ingemansson Technology i Stockholm 2005.

Examensarbetet är ett led i arbetet hos Ingemansson Technology att utöka antalet värden i databasen för rumsakustiska parametrar.

Först och främst vill jag rikta ett stort tack till min handledare på Ingemansson Technology, Gunilla Sundin, för hennes engagemang och all den goda handledning och kunskap som hon gett mig under arbetets gång.

Vidare vill jag tacka min examinerare Professor Gudni Johannesson och min handledare på KTH, Folke Björk.

Jag vill också rikta ett stort tack till alla på Ingemansson Technology som ställt upp med tips och hjälp. Speciellt vill jag tacka Tobias, Torgny, Ramona, Olivier, Peter P, Sten, Siw, Monica, Bengt och sommarpraktikant Malin.

Ett speciellt tack vill jag också rikta till Sven Tyrland och Tor Erik Vigran för deras mycket värdefulla tankar och råd.

Sist men inte minst vill jag tacka Ida, Tiiu och Toomas för hjälpen jag fick under mätningarna i efterklangsrummet.



## English summary

The aim of this Master Thesis, is to obtain sound absorption data for different types of a slatted panel absorber. The relation between the absorption of the slatted panel absorber with porous damping and no damping at all, was to be examined. Measured absorption data were to be compared to calculations according to two theories, one derived by Pedersen [2] and the other by Kristiansen and Vigran [3]. Comparisons were also to be performed with calculations in two different computer programmes, WinFLAG 2.0 and Absorb.

The sound absorption of the slatted panel absorber was determined in series of reverberation room measurements according to the European Standard: *Acoustics- Measurement of sound absorption in a reverberation room (ISO 354:2003)*. Reverberation times were measured in the reverberation room with and without the test specimen mounted. From these reverberation times the absorption of the test specimen was determined in one-third-octave bands, in the frequency range between 100-5000 Hz.

Slatted panel absorbers with two different dimensions of slats, three different cases of damping and 6-8 different slot widths were examined.

The slat dimensions used in the test specimen were 16x70 mm and 34x34 mm.

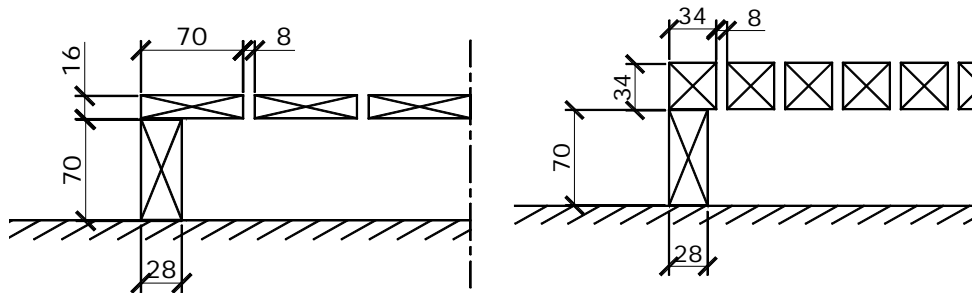


Figure 1: Slatted panel absorbers with slat dimensions 16x70 mm and 34x34 mm respectively, here with 8 mm slot width.

Series of measurements were carried out with the cavity behind the slats being filled with 50 mm of rock wool ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) resting on 20 mm of air, with 70 mm of glass wool ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ) and finally with no porous damping at all.

The absorption of the test specimen without porous damping was of special interest to determine since there is a lack of measurement data available for this kind of a slatted panel absorber.

In measurements where slats of dimension 16x70 mm were used the slot widths were varied between 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 and 128 mm and when slats of dimension 34x34 mm were used they were varied between 2, 4, 8, 16, 34, 64 and 128 mm.

A few measurements were also carried out with the surface area of the test specimen being divided into two or three sections, each covered by slots of one width, i.e. slatted panel absorbers with combinations of two or three different slot widths.

It is well known that the resonance frequency of the slatted panel absorber is obtained lower, the smaller the slot widths are, the deeper the slots are and the larger the volume of the back cavity is. In this examination the distance between the slats and the backing hard surface was kept constant.

Results of the measurements do show that the smaller slot widths the lower resonance frequency. With porous damping, the slatted panel absorber reaches even lower frequencies and it gives a much better broad band absorption, see figure II.

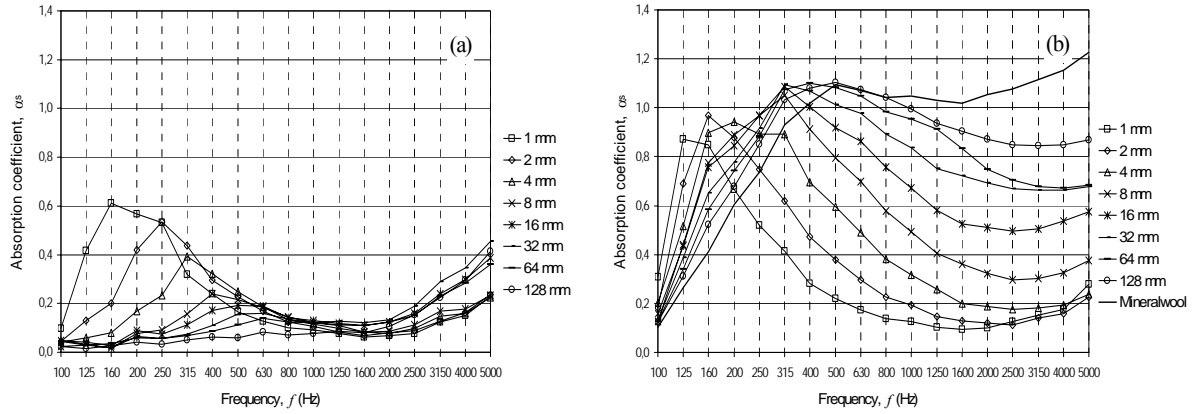


Figure II: Absorption of a slatted panel absorber with slats of dimension 16x70 mm and varying slot widths, (a) without porous damping, (b) damped with 50 mm of rock wool ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) resting on 20 mm of air.

Good agreement was obtained between calculated resonance frequencies and measured ones for the slatted panel absorber without porous damping, which confirms that this acoustic system works as a Helmholtz Resonator, see figure III for example.

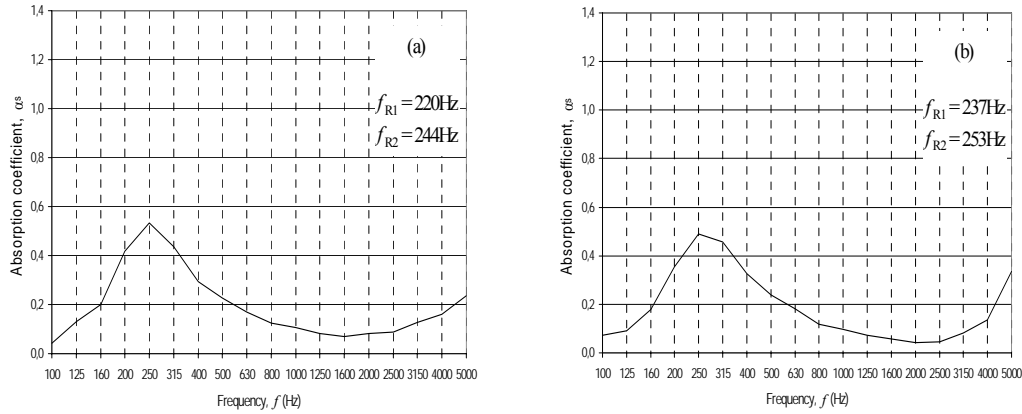


Figure III: Comparison between measured and theoretical resonance frequencies show good agreement. In these examples  $f_{R1}$  stands for the calculated resonance frequency according to Pedersen and  $f_{R2}$  according to Kristiansen and Vigran. (a) with slats of dimension 16x70 mm and slot width 2 mm, (b) with slats of dimension 34x34 mm and slot width 2 mm.

The relation between resonance frequencies of the slatted panel absorber with and without porous damping was determined to be approximately two one-third-octave bands. This relation might simplify approximate determination of resonance frequencies for similar slatted panel absorbers with porous damping.

Appropriate settings in WinFLAG 2.0 and Absorb were determined for obtaining good agreement with the measured absorption curves. No comparison was made between the two programmes.

Finally the fact that measurements should be performed on the diffusion characteristics of a slatted panel absorber was established, since it works as a diffusor at high frequencies.

# Sammanfattning

Syftet med examensarbetet är att erhålla absorptionsdata för olika varianter av spaltpanel. Sambandet mellan spaltpanelens absorption med och utan tillsatt porös dämpning ska utredas. Uppmätt absorptionsdata ska jämföras med beräkningar enligt två olika teorier, Pedersens [24] samt Kristiansen och Vigrans [13]. Jämförelse med beräkningsprogrammen WinFLAG 2.0 och Absorb ska utföras gentemot uppmätta värden på absorption.

Spaltpanelens ljudabsorption har bestämts i efterklangsrums enligt standard *Byggakustik – Mätning av ljudabsorption i efterklangsrums (ISO 354:2003)*. Efterklangstider uppmättes för det tomma efterklangsrums respektive för efterklangsrums med mätobjektet inmonterat, varefter mätobjektets absorption bestämdes med tersbands noggrannhet i frekvensområdet 100-5000 Hz.

Spaltpaneler har undersökts med två olika dimensioner på panelbräda, tre olika fall av dämpning samt 6-8 olika spaltbredder, beroende på bräddimension och dämpning. Spaltpanelens absorption utan porös dämpning, var av speciellt intresse att bestämma, då tillgång inte funnits till denna typ av mätvärden tidigare.

God överensstämmelse erhöles mellan teoretiska resonansfrekvenser och uppmätta resonansfrekvenser för spaltpanel utan porös dämpning, vilket bekräftar spaltpanelens funktion som Helmholtzresonator. Sambandet mellan spaltpanelens resonansfrekvens med och utan porös dämpning bestämdes till en förskjutning nedåt på ungefär 2 tersband. Lämpliga inställningar i beräkningsprogrammen WinFLAG 2.0 och Absorb bestämdes med utgångspunkt från överensstämmelsen med i examensarbetet uppmätta absorptionskurvor.

Slutligen konstaterades att mätning av spaltpanelens diffusionsegenskaper bör genomföras, då denna fungerar som en diffusor vid höga frekvenser.





# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>INLEDNING</b>	<b><i>sid 1</i></b>
1.1	BAKGRUND	
1.2	SYFTE	
1.3	METOD	
1.4	AVGRÄNSNINGAR	
<b>2</b>	<b>TEORI</b>	<b><i>sid 2</i></b>
2.1	BEGREPP	
2.1.1	Akustiska begrepp	
2.1.2	Symbolförteckning	
2.2	LITTERATURSÖKNING	
2.3	TEORI KRING SPALTPANELEN	
2.3.1	Porös absorption	
2.3.2	Resonansabsorption	
2.3.3	Diffusion	
2.3.4	Beräkning av resonansfrekvens för en spaltpanel	
2.3.5	Parametrars inverkan på resonansfrekvensen	
2.4	TIDIGARE MÄTNINGAR OCH UTREDNINGAR	
2.4.1	Bengt Fessé (1972), "Studium av spaltabsorbent"	
2.4.2	Karin Andersson och Åsa Nyström (1988), "Optimization ..."	
<b>3</b>	<b>MÄTNING AV ABSORPTION</b>	<b><i>sid 11</i></b>
3.1	VAL AV MÄTMETOD	
3.1.1	Rumsmetoden	
3.1.2	En alternativ mätmetod – impedansröret	
3.2	MÄTNING AV ABSORPTION I EFTERKLANGSRUM	
3.2.1	Standard (ISO 354:2003)	
3.2.2	Efterklangsrummet	
3.2.3	Mätprincip	
3.2.4	Beräkning av absorption	
3.2.5	Uppställd mätutrustning	
3.2.6	Mätobjekt	
3.2.7	Mätnoggrannhet	
<b>4</b>	<b>RESULTAT</b>	<b><i>sid 20</i></b>
	(Resultat finns återgivna i Bilaga B)	
<b>5</b>	<b>ANALYS OCH DISKUSSION</b>	<b><i>sid 21</i></b>
5.1	DISKUSSION KRING MÄTRESULTAT	
5.1.1	Överensstämmelse med teoretiska resonansfrekvenser	
5.1.2	Absorption med och utan porös dämpning	

- 5.1.3 Avvikande tendenser
- 5.1.4 Skillnader i absorption mellan de två olika brädddimensionerna
- 5.1.5 Olika spaltbredder i spaltpanelen
- 5.2 JÄMFÖRELSE MED BERÄKNINGSPROGRAMMET WINFLAG 2.0
  - 5.2.1 Varierbara parametrar
  - 5.2.2 Inställningar vid körning
  - 5.2.3 Stenull som dämpning
  - 5.2.4 Glasull som dämpning
  - 5.2.5 Utan porös dämpning
- 5.3 JÄMFÖRELSE MED BERÄKNINGSPROGRAMMET ABSORB
  - 5.3.1 Varierbara parametrar
  - 5.3.2 Inställningar vid körning
  - 5.3.3 Stenull som dämpning
  - 5.3.4 Glasull som dämpning
  - 5.3.5 Utan porös dämpning
- 5.4 BENÄMNING AV SPALTPANELEN
  - 5.4.1 Tänkbara benämningar
- 5.5 REFERENSOBJEKT
  - 5.5.1 Plenisalen
  - 5.5.2 Hörsal i Philips gamla kontorshus
  - 5.5.3 ”Happy New Ears”
  - 5.5.4 Konferenscenter Morskogen, Leksand

## **6 SLUTSATSER** *sid 36*

- 6.1 SLUTSATSER AV MÄTNING OCH BERÄKNING
  - 6.1.1 Porös dämpning
  - 6.1.2 Brädddimension
  - 6.1.3 Spaltpanelen som Helmholtzresonator
  - 6.1.4 Spaltpanelen som diffusor
  - 6.1.5 Överensstämmelse med WinFLAG 2.0
  - 6.1.6 Överensstämmelse med Absorb
  - 6.1.7 Uppskattning av resonansfrekvens
  - 6.1.8 Är det fördelaktigt att ha olika spaltbredder över samma spaltpanel
- 6.2 REKOMMENDATIONER FÖR FRAMTIDA UNDERSÖKNINGAR
  - 6.2.1 Effektivare mätning av spaltpanel
  - 6.2.2 Spaltpanel med tillräcklig dämpning utan poröst material
  - 6.2.3 Mätning av diffusion i efterklangsrum
  - 6.2.4 FEM-beräkning av spaltpanels absorption

## **REFERENSER** *sid 39*

## **BILAGOR**

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Ingemansson Technology arbetar med bl. a rumsakustisk dimensionering. För att kunna förutsäga rummets akustik, finns behov av att utöka databasen med material vars absorptions- och diffusionsegenskaper är kända.

Spaltpanelen är en form av ljudabsorbent, som ofta används av både akustiker och arkitekter, i två olika syften.

Dels används den i ett rent akustiskt syfte, för att bl a absorbera ljud vid låga frekvenser, t ex i en konsertsal.

Dels används den i syfte att uppnå god estetik eller för att skydda ett bakomliggande poröst material mot yttre påverkan, t ex i en gymnastiksal på en skola. I sådana fall vill man få en så bred absorption som möjligt.

De värden som i dagsläget finns på spaltpanelens absorption, i databasen, är uppmätta i ett examensarbete på KTH 1972 [1].

## 1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att erhålla absorptionsdata för olika varianter av spaltpanel både vid låga och medelhöga frekvenser.

Spaltpanelens fysikaliska egenskaper ska utredas ur akustisk synvinkel.

Sambandet mellan spaltpanelens absorption med och utan porös dämpning ska utredas.

Uppmätt absorptionsdata ska jämföras med beräkningar enligt två olika teorier, Pedersens [2] samt Kristiansen och Vigrans [3].

Jämförelse med beräkningsprogrammen WinFLAG 2.0 och Absorb ska utföras gentemot uppmätta värden på absorption.

## 1.3 Metod

Mätningar utfördes i standardenligt efterklangsrum.

Beräkningar utfördes i programmen WinFLAG 2.0 och Absorb, samt enligt två olika teorier för beräkning av resonansfrekvens.

Litteratursökning gjordes i databaserna LIBRIS, BYGGDOK, INSPEC och COMPENDEX.

## 1.4 Avgränsningar

Tekniska universitetsavhandlingar på området har endast sökts på Kungliga Tekniska Högskolan, Chalmers Tekniska Högskola och Lunds Tekniska Högskola.

## 2 Teori

### 2.1 Begrepp

#### 2.1.1 Akustiska begrepp

*Absorbent* (eg. *ljudabsorbent*), för att åstadkomma en viss efterklangstid i ett rum samt motverka oönskade reflexer används olika typer av ljudabsorbenter [4].

*Absorption* (eg. *ljudabsorption*), företeelse innebärande minskning av ljudenergin (beroende på att denna helt eller delvis upptas av det medium eller den yta som förmedlar eller reflekterar ljudet) [5]

*Absorptionsfaktor* (för ljud), ett mediums eller en skiljeytas ljudabsorberande förmåga. Den definieras som kvoten mellan skillnaden av infallande och reflekterad ljudeffekt samt den infallande ljudeffekten. Absorptionsfaktorn antas i de flesta fall ett värde mellan 0 och 1 [4].

*Akustik*, läran om ljudet [5]

*Akustiskt system*, system som kan alstra, överföra eller mottaga akustiska svängningar [5].

*Diffraktion* (eg. *böjning*), ändring av ljudets riktning när det passerar kanten av ett föremål [5].

*Diffust fält*, ljudenergin är densamma i ett helt rum och utbreder sig jämnt i alla riktningar [6].

*Efterklang*, ljudenergin klingar av efter att en ljudkälla tystnat [7].

*Efterklangstid*, tid det tar för ljudenergin att minska en faktor  $10^6$ , dvs. hastighetsnivån minskar 60 dB [4].

*Ekvivalent absorptionsarea* (hos ett rum eller ett föremål), storleken av den yta med absorptionsfaktorn lika med 1, som vid en given frekvens och energitäthet absorberar ljudenergin lika snabbt som rummet eller föremålet i fråga [5].

*Fas*, tidsläge inom en period av en vågrörelse [7].

*Frekvens*, periodens inverterade värde [5] som bestäms som kvoten mellan ljudets hastighet och dess våglängd [4].

*Frekvensband*, området mellan två angivna frekvenser i en frekvensskala [5].

*Helmholtzresonator*, akustiskt svängningssystem som motsvarar mekaniskt massa-fjädersystem [4].

*Impedans* (eg. *akustisk impedans*), kvoten mellan akustiskt tryck och volymflöde [4].

*Ljudeffekt* (hos en ljudkälla), total utstrålad akustisk effekt, i alla riktningar [5].

*Ljudfält*, rumsfördelningen av ljudtryck, partikelhastighet m.m. i ett medium där ljud finns i fysikalisk betydelse [5].

*Ljudkälla*, föremål som avger akustisk energi [5].

*Oktav*, frekvensförhållandet 2:1 [5].

*Oktavband*, frekvensband mellan två frekvensvärden med frekvensförhållandet 2:1 [5].

*Partikelhastighet*, hastighet relativt mediet i dess helhet hos en svängande partikel i ett ljudfält [5].

*Reflektionsfaktor* (för ljud), förhållandet mellan den från ett material reflekterade ljudeffekten och den infallande ljudeffekten vid en given frekvens och givna förhållanden i övrigt [5].

*Resonans*, fenomen hos ett svängningssystem som innebär att även en svag periodisk yttre störning inom ett snävt frekvensområde kan leda till att systemets svängningsamplitud ökar kraftigt. Amplitudökningen beror av frekvensen och blir maximal då frekvensen är nära lika med det odämpade systemets egenfrekvens [7].

*Resonansfrekvens*, den frekvens hos den drivande kraften vid vilken resonans uppstår i ett svängande system [5].

*Resonator*, anordning som har bestämd resonansfrekvens [5].

*Strömningsmotstånd*, ett mått på hur enkelt luft som luftflödet möter genom. [6].  
kan ta sig in i ett poröst material och på motståndet

## 2.1.2 Symbolförteckning

Här följer en förteckning över parametrar som använts i examensarbetet samt deras symbolbeteckning i kronologisk ordning efter uppkomst. För enhetlighet och en lättare förståelse, har den av referensen angivna symbolbeteckningen i några fall modifierats. I dessa fall återfinns den ursprungliga beteckningen inom parentes.

$f_{R1}$	resonansfrekvens enligt teori 1 ( $f_R$ ) [Hz]
$c$	ljudets utbredningshastighet [cm/s] eller [m/s]
$h$	spaltdjup enligt teori 1 [cm]
$b$	bredd på panelbräda enligt teori 1 [cm]
$2a$	spaltbredd enligt teori 1 [cm]
$K$	korrektionsterm för spaltdjup enligt teori 1
$l$	tjocklek på panelbrädan [cm]
$f_{R1A}$	ansatt resonansfrekvens enligt teori 1 ( $f$ )
$f_{R2}$	resonansfrekvens enligt teori 2 ( $f$ ) [Hz]
$\rho$	luftens densitet enligt teori 2 [kg/m <sup>3</sup> ]
$M$	akustiska massan per ytenhet av panelen enligt teori 2 ( $m$ )
$d$	avståndet från panelen till bakomliggande hård yta enligt teori 2 [m]
$\delta$	ändkorrektionsterm för spaltdjupet
$\varepsilon$	andelen exponerad area av bakomliggande luftvolym
$w$	spaltbredd enligt teori 2 [m]
$p$	ljudtryck [Pa]
$E(t)$	ljudtryckets försvagning [Pa]
$\tau$	tid [ms]
$T_{30}$	efterklangstid som utvärderats mellan nivåer 5 och 35 dB under normaliserad nivå för ljudtrycket [s]
$T$	efterklangstid enligt Sabines formel [s]
$V$	ett rums volym [m <sup>3</sup> ]
$A$	ett rums ekvivalenta ljudabsorptionsarea [m <sup>2</sup> ]
$m$	energidämpningsfaktor [m], som tar hänsyn till klimatförhållanden i ett rum
$A_1$	ekvivalenta ljudabsorptionsarean för det tomma efterklangsrumsrummet [m <sup>2</sup> ]
$V_{ER}$	efterklangsrumsrummets volym [m <sup>3</sup> ]
$c_1$	hastigheten för ljudets utbredning i tomma efterklangsrumsrummet [m/s]
$m_1$	energidämpningsfaktor som följer av klimatförändringar i det tomma efterklangsrumsrummet [m]
$t_1$	luftens temperatur i det tomma efterklangsrumsrummet [°C]
$\alpha_1$	luftens luddämpningsfaktor i det tomma efterklangsrumsrummet
$A_2$	ekvivalenta ljudabsorptionsarean för efterklangsrumsrummet med mätobjekt inmonterat [m <sup>2</sup> ]
$c_2$	hastigheten för ljudets utbredning i efterklangsrumsrummet med mätobjekt inmonterat [m/s]
$m_2$	energidämpningsfaktor som följer av klimatförändringar i efterklangsrumsrummet med mätobjekt inmonterat [m]
$t_2$	luftens temperatur i efterklangsrumsrummet med mätobjekt inmonterat [°C]
$\alpha_2$	luftens luddämpningsfaktor i efterklangsrumsrummet med mätobjekt inmonterat

$A_T$	ekvivalenta ljudabsorptionsarean för mätobjektet [ $\text{m}^2$ ]
$f_{rO}$	Syredämpningsfrekvensen [Hz]
$f_{rN}$	Kvävedämpningsfrekvensen [Hz]
$t_0$	referenstemperatur (=293,15 K)
$p_a$	atmosfärstrycket [kPa] sattes efter utvärdering till 101,325
$p_r$	referensvärde för det omgivande atmosfärstrycket [kPa], (=101,325)
$H$	molara koncentrationen av vattenånga [%]
$H_r$	uppmätt relativ luftfuktighet [%]
$p_{sat}$	mättnadsångstrycket för vattenånga [kPa]
$t_{01}$	temperaturen vid vattnets trippelpunkt [K] (273,16)
$f$	frekvensen [Hz]
$\alpha_S$	absorptionsfaktorn
$S_{MO}$	mätobjektets area [ $\text{m}^2$ ] ( $S$ )
$s_{\alpha_s}$	standardavvikelsen för absorptionsfaktorn
$s_{T_2}$	standardavvikelsen för efterklangstiden i efterklangsrummet när mätobjektet är inmonterat
$s_{T_1}$	standardavvikelsen för efterklangstiden i tomma efterklangsrummet
$T_E$	efterklangstid enligt Eyring [s] ( $T$ )
$\overline{S}$	är absorbenternas sammanlagda geometriska area i rummet
$\overline{\alpha}$	medelvärde av absorptionsfaktorn hos alla rummets ytor

## 2.2 Litteratursökning

Den litteratursökning som gjordes i examensarbetets första skede resulterade i en lista över intressanta artiklar, se bilaga A.

## 2.3 Teori kring spaltpanelen

Teorin som beskrivs i detta avsnitt är nödvändig för förståelsen av spaltpanelens funktion och utformning. En spaltpanel anses kombinera åtminstone fler än en av de nedan beskrivna mekanismerna. Helt säkert är i alla fall att den kombinerar porös absorption och resonansabsorption för att uppnå en så bredbandig absorption som möjligt vid de frekvenser som är av störst intresse för det mänskliga örat [6].

### 2.3.1 Porös absorption

Den mest typiska formen av ljudabsorbent är ett poröst material.

Den porösa absorbenten består oftast av mineral- eller glasullsfibrer som lagts lager på lager med slumpmässig fiberriktning i plan parallella med materialets yta [4].

När ljud faller in i ett material bestående av ihopkopplade porer tappar det energi [6]. Detta är först och främst en följd av de viskösa friktionskrafter som bildas i de smala porerna. Förutom viskösa effekter har även värmeledningsförluster betydelse [4]. De temperaturfluktuationer som en ljudvåg alstrar jämnas ut genom kontakten med fibreerna, som normalt leder värme bättre än luft.

#### 2.3.1.1 Porositet

Förhållandet mellan materialets luftvolym och dess totalvolym kallas porositet [8]. För god absorption bör porositeten ha ett värde mellan 0,7 och 0,9. En låg porositet hindrar ljudet att tränga in i materialet och därmed absorberas, medan en alltför hög porositet leder till att ljudet utan vidare tränger in materialet och därmed inte försvagas av någon friktion i porerna.

### 2.3.1.2 Strömningsmotstånd

Den viktigaste parametern hos en porös absorbent är strömningsmotståndet [6]. Det är den parameter som varierar mest hos olika porösa material. Strömningsmotståndet avslöjar hur mycket ljudenergi som förloras till följd av randeffekter inom materialet, eftersom det är ett mått på hur enkelt luft kan ta sig in i ett poröst material och på motståndet som luftflödet möter genom materialets struktur.

Det räcker alltså inte med att porositeten har lämplig storlek, om materialstrukturen är sådan att porerna t ex är isolerade från varandra [8].

Strömningsmotståndet hos den porösa absorbenten anpassas efter det frekvensområde, där man vill ha högst absorption och efter materialets tjocklek.

### 2.3.1.3 Materialets tjocklek

För att ett tunt skikt av ett poröst material ska ha en märkbar absorption, bör den ha ett relativt högt strömningsmotstånd. Absorptionen blir dock begränsad med tunna skikt, främst i de låga frekvenserna [8]. Ju tjockare materialet är desto bättre lågfrekvensabsorption erhålls.

För att erhålla en betydande absorption med en porös absorbent bör den placeras där partikelhastigheten är hög [6]. Den är noll vid rummets gränssytor, vilket leder till att den del av absorbenten som ligger närmast väggen eller taket absorberar minst medan den delen som vetter mot rummet absorberar mest.

För låga frekvenser, där ljudets våglängd är stor, krävs ett ordentligt avstånd från den hårda ytan för att finna punkten där partikelhastigheten är betydande.

Om det är möjligt att använda tjocka skikt, är det en fördel om materialet har ett lågt strömningsmotstånd.

### 2.3.1.4 Ytskikt

Porösa absorbenter har en tendens att samla åt sig damm och de är ofta besvärliga att rengöra. En ytbehandling av materialet kan medverka till en enklare rengöring. Dock är det inte möjligt att behandla alla typer av porösa material [8].

Ett ytskikt som förutom smutsskydd skyddar den porösa absorbenten från fysisk åverkan försämrar dess absorption vid höga frekvenser. Vid låga frekvenser, där ytskiktets akustiska massa är liten,

passerar ljudet oförändrat, förutom en mindre ökning av absorptionen som följd av tillskottet till akustiska massan. Ytskiktets akustiska massa är vid höga frekvenser stor och kan förhindra en stor del av den akustiska energin att ta sig in i den porösa absorbenten.

### 2.3.1.5 Glasull och stenull

Glasull och stenull skiljer sig åt vad gäller materialstruktur och densitet.

I detta examensarbete har två olika typer av porösa absorbenter använts. Valet av dessa och motivering därtill beskrivs i avsnitt 3.2.6 *Mätobjekt*.

## 2.3.2 Resonansabsorption

Den andra typen av absorbenter är de s.k. resonansabsorbenterna.

Resonansabsorbenter används för bättre absorption vid låga och medelhöga frekvenser, då tillräcklig absorption med endast porös absorbent skulle förutsätta mycket stora tjocklekar [6]. Det faktum att absorbenter oftast placeras vid rummets gränssytor, där partikelhastigheten är som lägst, gör den porösa absorbenten ineffektiv. Många resonansabsorbenter fungerar mest effektivt just vid gränssytorna, då de kräver en sluten volym, för att fungera.

### 2.3.2.1 Generell funktion

En resonansabsorbent fungerar som ett enkelt svängningssystem, bestående av en massa och en fjäder [8]. När massan i ett sådant system tillfälligt förskjuts från sitt jämviktsläge, utför systemet egensvängningar.

För alla svängningssystem bildas en resonans mellan massan och fjädern vid en viss frekvens. Vid denna resonansfrekvens sker resonansabsorbentens maximala absorption av ljud. Absorptionen sker endast i ett begränsat, relativt smalt frekvensområde runt resonansfrekvensen.

För att göra systemet mer användbart inom rumsakustiken måste storleken på absorptionsfaktorn och frekvensområdet där det absorberar öka [8]. Detta kräver större förluster av akustisk energi [6]. Genom att dämpa systemet med ett poröst material åstadkoms dessa förluster. Denna dämpning placeras i den del av systemet där

luftens partikelhastighet är störst, för att maximal nytta ska erhållas.

För att få absorption vid en önskad frekvens kan systemets resonansfrekvens justeras. Detta sker genom att den vibrerande massan och luftfjäderns styvhet ställs in.

Resonansabsorbenter kan delas upp i två olika typer, vars funktioner beskrivs mer utförligt i de två följande avsnitten.

### 2.3.2.2 Helmholtzresonator

I detta avsnitt beskrivs den enklaste typen av en s.k. Helmholtzresonator. Denna består av ett hål som via en hals med en viss längd leder till en kolv [8].



Figur 2.1: Enklaste formen av Helmholtzresonator består av en hals som leder till en kolv.

Mekanismen är lik den som uppstår när en luftström av en viss styrka passerar förbi en flaskhals så att en ton alstras [8]. Tonen uppstår av luftens egensvängningar i flaskans hals och kolv. En mindre störning vid flaskans mynning leder till en tillfällig förskjutning av luften i flaskhalsen. Det uppstår antingen ett under- eller övertryck i kolven som leder till en kraft. Denna kraft försöker få halsluften tillbaka till utgångsläget, som den dock passerar. En motkraft tvingar den tillbaka och den passerar utgångsläget igen. Det uppstår en växelsvängning.

I Helmholtzresonatorn utgörs systemets massa av halsluften och dess fjäder av kolvluften. Precis som i det generella fallet kan resonansfrekvensen ställas in genom att ändra den akustiska massan eller fjäderns styvhet.

Precis som i det generella fallet behövs en dämpning av Helmholtzresonatorn för att göra absorptionen större och bredare i frekvens. I detta fall åstadkoms det genom att öka friktionsförlusterna för halsluftens svängningar. Vanligast är att porös absorbent placeras i halsen. Hur dämpningen placeras kan ha stor betydelse för

absorptionen vid resonansfrekvensen, som riskerar att minska i storlek.

Helmholtzresonatorn omvandlar alltså först ljudenergin till svängningsenergi och därefter denna till värmeenergi, genom att öka friktionsförlusterna i halsen.

Hos den i praktiken vanligaste Helmholtzresonatorn har kolvarna ersatts av en gemensam luftvolym [6]. I ett sådant fall motsvaras fjädern i systemet av hela bakomliggande luftvolymen.

### 2.3.2.3 Membranabsorbent

Denna typ av absorbent består av en sluten platta, i t.ex. plywood, som monteras på regler, ett visst avstånd ifrån en hård yta [6].

Precis som i föregående typ av resonator, utnyttjas i membranabsorbenten ett resonanssystem för att omvandla ljudenergin i ett rum till svängningar i en del av systemet [8].

I detta fall utgörs systemets massa av den slutna plattans massa och fjädern av luftvolymen mellan plattan och en hård bakomliggande yta.

Följaktligen är det plattan som försätts i svängning. När dess tröghetskraft stämmer överens med fjäderkraften men är riktad åt motsatt håll, vilket sker vid resonansfrekvensen, blir plattans svängningsamplituder stora och därmed kan stor absorption erhållas.

Dämpningen som måste finnas också här, utgörs av porös absorbent som placeras bakom plattan, då partikelhastigheten är som störst där [6]. Den får dock inte placeras så nära att den förhindrar plattans rörelse.

## 2.3.3 Diffusion

Diffusion eller scattering som det ibland kallas är en annan egenskap hos ett material eller en yta.

Detta beskriver ytans förmåga att sprida reflekterat ljud för att oönskade effekter som t ex ekon inte ska uppkomma [6]. Ett eko kan lätt uppkomma om t ex bakre väggen i en stor sal är helt platt, och då speciellt när ett riktat ljud når den (t ex ljudet från en trumpet). Ett annat fenomen som bevisligen kan undvikas med diffusion är s.k. fladdereko som kan uppkomma mellan två parallella sidoväggar i t ex en stor konserthall.



Båda dessa fenomen kan undvikas också med absorption. Skillnaden då är att ljudenergi försvinner. När en orkester spelar på scenen i en konserthall är denna reducering av ljudenergin oftast inte önskvärd.

En diffusor på den bakre väggen skulle alltså sprida ut ljudet, men inte ta bort en del av ljudenergin.

Absorption är dock nödvändig om t ex ett utrymmes efterklang eller uppfattbarheten av tal i det måste ställas in.

Den vanligaste formen av diffusor är den s.k. Schröderdiffusorn, vars yta består av serier av håligheter med samma bredd, men olika djup. Håligheterna skiljs åt med tunna väggar. När en plan ljudvåg träffar dess yta, reflekteras den från botten på håligheterna och återstrålas vidare till rummet. Alla de diffust reflekterade strålarna har samma magnitud men olika fas, p.g.a. fasförändringar till följd av den tid det tar för den akustiska vågen att gå ner och sedan upp ur varje hålighet.

Ett annat exempel på en diffusor är en kombination av en absorberande och en reflekterande yta. Samtidigt som diffusion erhålls vid medelhöga till höga frekvenser, erhålls absorption under en viss bestämd frekvens. Den vanligaste typen av en sådan hybrid yta, som redan använts i många år, består av lappar av porös absorbent med mellanliggande reflekterande ytor.

I jämförelse med en absorbent, är diffusorn en relativt ny företeelse, som i många fall fortfarande saknar teoretiska belägg. Trots avsaknaden av dessa belägg används diffusorer redan flitigt och finns i stort utbud på den akustiska marknaden.

### 2.3.4 Beräkning av resonansfrekvens för en spaltpanel

För att jämföra, i examensarbetet uppmätta resultat med teori, har beräkningar av resonansfrekvensen för spaltpanelen utförts enligt två teorier, som skiljer sig något från varandra.

Den första av dessa härstammar från Pedersen [2] och den andra från Kristiansen och Vigran [3].

Båda teorier beskriver spaltpanelen som en speciell Helmholtzresonator där dess komponenter beskrivs enligt följande:

- Spalterna mellan panelbrädorna i spaltpanelen motsvarar Helmholtzresonatorns hals och därmed utgörs svängningssystemets massa av spalternas massa.
- Luftvolymen mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan utgör svängningssystemets fjäder.

Formlerna tar inte hänsyn till porös dämpning i spaltpanelen.

Resultat från beräkningar av dessa resonansfrekvenser återfinns i bilaga B.1.2 och B.2.2, tillsammans med uppmätta absorptionskurvor, och diskussion kring jämförelsen mellan teori och mätningar återfinns vidare i avsnitt 5.1.1 *Överensstämmelse med teoretiska resonansfrekvenser*.

Nedan beskrivs teorierna i varsitt avsnitt. En del modifieringar av beteckningar var nödvändiga för att skilja parametrar åt. Ursprungsbeteckningar för dessa återfinns i avsnitt 2.1.2 *Symbolförteckning*. Samtidigt har några parametrar olika beteckningar i de olika teorierna.

#### 2.3.4.1 Teori 1

Formler i detta avsnitt är tagna ur Brandts kompendium [8] och härleddes som tidigare nämnts av Pedersen [2].

Enligt denna teori, beräknas resonansfrekvensen  $f_{R1}$  med formel:

$$f_{R1} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\left( \frac{K}{h \cdot (b + 2a)} \right)} \quad (2-1)$$

där  $c$  är ljudets utbredningshastighet [cm/s],  $h$  är djupet på spalten [cm],  $b$  är bredden på panelbrädan [cm],  $2a$  är spaltbredden [cm] och  $K$  är en korrektionsterm för spaltdjupet.

En ansatt resonansfrekvens itereras i formeln för korrektionstermen:

$$\frac{1}{K} = \frac{l}{2a} + 0,7 + \frac{2}{\pi} \cdot \ln \left( \frac{c}{2\pi f_{R1} a} \right) \quad (2-2)$$

där  $l$  är panelbrädans tjocklek [cm] och  $f_{R1A}$  är ansatt resonansfrekvens [Hz].

När korrektionen  $K$  bestämts enligt formel (2-2) insätts den i formel (2-1) för resonansfrekvensen  $f_{R1}$ .

#### 2.3.4.2 Teori 2

Följande formler för beräkning av resonansfrekvens för en spaltpanel ställs upp av Cox och D'Antonio [6] och härstammar, som tidigare nämnts, från Kristiansen och Vigran [3].

Generellt formuleras resonansfrekvensen  $f_{R2}$  för en resonansabsorbent enligt:

$$f_{R2} = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{Md}} \quad (2-3)$$

där  $c$  är ljudets utbredningshastighet i luft [m/s],  $\rho$  är luftens densitet [kg/m<sup>3</sup>],  $M$  är akustiska massan per areaenhet av panelen och  $d$  är avståndet från panelen till bakomliggande hård yta [m].

För en spaltpanel används följande uttryck för beräkning av spaltens ändkorrektion:

$$\delta = -\frac{1}{\pi} \ln \left[ \sin \left( \frac{1}{2} \pi \varepsilon \right) \right] \quad (2-4)$$

där  $\varepsilon$  är andelen exponerad area av bakomliggande luftvolym.

När ändkorrektionen för spaltdjupet är känd, kan den akustiska massan beräknas enligt:

$$M = \frac{\rho}{\varepsilon} (t + 2\delta w) \quad (2-5)$$

där  $w$  är spaltbredden [m]

Insättning av den akustiska massan  $M$  (2-5) kan nu göras i den generella formeln för resonansfrekvensen  $f_{R2}$  (2-3).

#### 2.3.5 Parametrars inverkan på resonansfrekvensen

Enligt formler för spaltpanelens resonansfrekvens, kan olika parametrars inverkan på dess storlek fastställas. Det är vanligt att en spaltpanel används som lågfrekvensabsorbent.

Följande kan vara bra att känna till vid val av storlek på parametrar:

- Ju mindre spaltbredden är, desto lägre blir resonansfrekvensen.
- Ju större spaltdjupet är, desto lägre blir resonansfrekvensen. Detta innebär att tjockleken på panelbrädan ska vara så stor som möjligt för att en så lågfrekvent absorption som möjligt ska erhållas.
- Ju större volymen bakom panelen är, desto lägre blir resonansfrekvensen. Följaktligen bör både panelbrädans bredd och avståndet från panel till bakomliggande hård yta vara stora för att en så god lågfrekvensabsorption som möjligt ska erhållas. Detta avstånd är dock oftast begränsat av utrymmesskäl.

## 2.4 Tidigare mätningar och utredningar

I detta avsnitt beskrivs tidigare utredningar kring spaltpanelens absorption där mätdata finns tillgänglig.

### 2.4.1 Bengt Fessé, "Studium av spaltabsorbent"

Liknande mätningar gjordes i ett examensarbete 1972 på Institutionen för byggnadsakustik på KTH, av Bengt Fessé.

#### 2.4.1.1 Mätobjekt

Mätning av absorption utfördes på en spaltpanel bestående av en ram med 28 mm höga regler täckt av panelbrädor med dimension 13x70 mm [1]. Mellan panelen och den hårda bakomliggande ytan låg 30 mm stenull med densitet 70 kg/m<sup>3</sup>. Panelbrädorna hade längden 3 m och absorbentens totala yta var 10,5 m<sup>2</sup>.

#### 2.4.1.2 Syfte

Examensarbetet hade följande syften:

- Att studera ljudabsorptionens variation med spaltbredden.

- Att klarlägga absorptionens variation beroende på den porösa absorbentens exponeringsgrad.
- Att utreda om en spaltpanel kan konstrueras utgående från en given absorptionsfaktor.

#### 2.4.1.3 Mätningar

Mätningar utfördes i efterklangsrums enligt första utgåvan av standarden ISO 354 (1963), på:

- spaltpanel med spaltbredderna 1, 2, 4, 8, 16, 49, 102 och 270 mm samt för de två alternativen ”tätt” och ”öppet”, som innebar en panel utan spalter resp. den porösa absorbenten helt utan panel.
- spaltpanel med två olika spaltbredder, 2 och 8 mm, över samma yta, dels med varannan spalt 2 mm och varannan 8 mm men också med halva panelen täckt av den ena och andra halvan av den andra.

För att dessutom utreda om en absorbent med förutbestämd absorption kunde konstrueras, undersöktes en absorptionskurva med en frekvensoberoende absorptionsfaktor.

#### 2.4.1.4 Resultat och diskussion

Undersökningen visade att 102 mm var den största spalten som uppvisar ett väldefinierat absorptionsmaximum.

Med spalten 270 mm, som motsvarar 80 % exponering av mineralullen erhöles en större absorption vid frekvenser upp till 1600 Hz, än för endast mineralullen, trots att någon resonansverkan inte borde existera. Detta förklarades med ett avböjningsfenomen enligt Uno Ingård (1954).

De mätta kurvvidderna var större än beräknade. Orsaken ansågs vara att systemet var dämpat. En ny undersökning föreslogs på en likadan spaltpanel utan mineralull, för att undersöka mineralullens inverkan på absorptionen.

Maximal absorption i frekvensområdet för tal, ~2000 Hz, erhöles med 40 % exponering av mineralullen.

En viss skillnad erhöles mellan beräknat och uppmätt för panelen som bestod av spalter med olika bredd. Även på detta föreslogs vidare undersökningar.

Det föreslogs framtida undersökningar också på hur absorptionen i frekvensområdet närmast resonansfrekvensen påverkas av olika spaltbredder samt på panelens absorption längs kanterna.

Värden på absorptionsfaktorn för spaltpanel som finns i absorptionsdatabasen på Ingemansson Technology är uppmätta i Bengt Fessés examensarbete.

#### 2.4.2 Karin Andersson och Åsa Nyström (1988), ”Optimization of a slitted absorber in the low frequency range”

I ett examensarbete på Chalmers Tekniska Högskola, från 1988, gjordes absorptionsmätningar bl.a. på en speciell typ av spaltpanel [9].

##### 2.4.2.1 Mätobjekt

Spaltpanelen, som uppmättes i efterklangsrums, bestod av panelskivor med dimensionen 19x600 mm ovanpå en bakomliggande luftvolym. På undersidan av panelskivorna hade lister med tjockleken 31 mm monterats längs båda långsidor, vilket gjorde att det sammanlagda spaltdjupet blev 50 mm. Denna konstruktion uppmättes endast med luft bakom, dvs. utan porös dämpning.

##### 2.4.2.2 Mätningar

- Absorptionsmätning i efterklangsrums gjordes på den beskrivna spaltpanelen i låga frekvenser (40-400 Hz). Konstruktionen förväntades ha en resonansfrekvens på 50 Hz, enligt beräkningar. Den uppmätta resonansfrekvensen blev 90 Hz, vilket efter diskussion bedömdes vara en följd av de relativt breda skivornas membranverkan. Efter en ny beräkning som tog hänsyn till både spaltens samt också membranets akustiska massor erhöles ett betydligt bättre överensstämmande värde på resonansfrekvensen.
- Mätningar på mineralullens beteende bakom en spalt gjordes i ett impedansrör. Den eftertraktade resonansfrekvensen var 60 Hz och erhöles med en spaltbredd på 3 mm.
- Ytterligare mätningar gjordes på porösa absorbenter i efterklangsrums.

#### 2.4.2.3 Diskussion

Diskussion fördes bl.a. kring möjligheterna att erhålla två numeriskt lika värden vid mätning av efterklangstider i ett efterklangsrum, olika parametrars inverkan på spaltpanelens resonansfrekvens samt den inverkan bakomliggande volymens stora längd och bredd, i jämförelse med dess lilla djup, kunde tänkas ha på resonansfrekvensen.

#### 2.4.2.4 Slutsats

I korthet drogs följande slutsatser efter undersökningen:

- För att erhålla god absorption vid låga frekvenser är spaltpanelen en bra tillämpning av en Helmholtzresonatoren.
- Man bör noga överväga den inverkan olika parametrar hos spaltpanelen kan ha på dess resonansfrekvens och absorptionsfaktor innan konstruktion.
- Överhuvudtaget är det inte alltid enkelt att konstruera en spaltpanel och många av problemen med den är svåra att förutsäga.

## 3 Bestämning av absorption

### 3.1 Val av mätmetod

#### 3.1.1 Rumsmetoden

Mätningar gjordes i detta examensarbete enligt rumsmetoden.

En fördel med denna metod, gentemot andra metoder som kunde ha använts i examensarbetet, är att mätningar utförs med ett diffust ljudfält, d.v.s. under förhållanden som liknar verkligheten betydligt mer än förhållandena i t ex ett impedansrör [10].

##### 3.1.1.1 Absorption för slumpmässigt infall

Eftersom efterklangstiden för ett rum är beroende på hela rummets absorption, möjliggör mätning av efterklangstiden, före och efter mätprov ställs in, en beräkning av absorptionsfaktorn för slumpmässigt infall [6].

Denna typ av absorptionsfaktor är den parameter som används mest vid design av akustik hos ett utrymme, för att beskriva absorptionsbeteendet hos ett material. Den är dock svår att förutsäga.

##### 3.1.1.2 Efterklangsrummets diffussivitet

En förutsättning för att erhålla den nämnda typen av absorptionsfaktor, är att ljudfältet gjorts så diffust som möjligt.

Det är dock inte möjligt att göra efterklangsrummet helt diffust, vilket för med sig att efterklangstiderna blir positionsberoende. För att ytterligare reducera effekterna av ”icke-diffussivitet”, mäts efterklangstiderna i flera positioner varefter ett medelvärde tas ur dessa.

##### 3.1.1.3 Nackdelar med rumsmetoden

Nackdelar med denna metod är att den endast möjliggör mätning av absorptionsfaktor och inte impedans, den anses vara dyr och relativt tidskrävande p.g.a. mätprovets stora storlek och kravet på det speciellt utformade efterklangsrummet. Det kan också uppkomma besvärliga s.k. ”kanteffekter”, som beskrivs i avsnitt 5.1.3.1 *Absorptionsfaktor över 1,0*.

#### 3.1.2 En alternativ mätmetod – impedansröret

Ett alternativ till mätning av absorption i efterklangsrummet kunde ha varit metoden med impedansrör.

##### 3.1.2.1 Fördelar

Metoden kan tillämpas med relativt enkel utrustning och i ett vanligt rum.

Absorptionsfaktor för vinkelrätt infall och yt-impedansen erhålls [6]. Metoden är mycket användbar då den mäter de två parametrarna under väldefinierade och kontrollerade former.

Den passar utmärkt vid mätning av lokalt reagerande porösa absorbenter.

##### 3.1.2.2 Nackdelar

Den är dock inte speciellt lämplig vid mätning av absorption hos en resonansabsorbent, då mätprovet har en begränsad storlek och en cirkulär form. Detta mätprovs absorption skulle inte nödvändigtvis vara representativ för en större absorbent.

Dessutom måste absorptionsfaktorn för vinkelrätt infall konverteras till absorptionsfaktor med slumpmässigt infall, för att den ska kunna användas i praktiken, vid t ex geometrisk rumsakustisk förutsägningsmodellering. Denna konvertering kan vara aningen besvärlig.

### 3.2 Mätning av absorption i efterklangsrum

#### 3.2.1 Standard (ISO 354:2003)

Mätningar i detta examensarbete är utförda enligt den europeiska standarden *Byggakustik – Mätning av ljudabsorption i efterklangsrum (ISO 354:2003)*. Standarden innehåller riktlinjer för mätning av efterklangstider i ett standardiserat efterklangsrum och för beräkning av absorptionsfaktorn ur dessa efterklangstider.

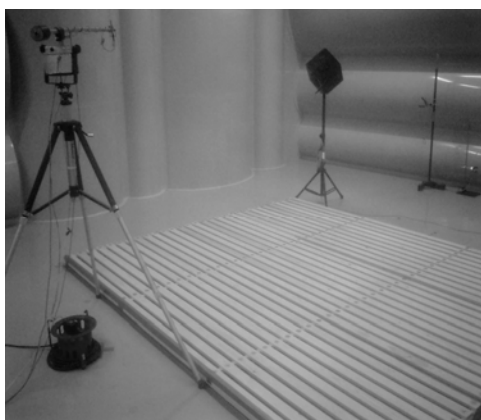
### 3.2.2 Efterklangsrummet

Mätningarna är utförda i efterklangsrum enligt ovan nämnda standard. Det använda efterklangsrummet ingår i ett ljudlaboratorium som byggdes år 2000 och är beläget på Electrolux Forum i Stockholm. Ingemansson Technology använder det sedan år 2003. Detta är första gången det används vid mätning av absorption.

Efterklangsrummet uppfyller standardens krav på storlek, form och diffussivitet.

### 3.2.3 Mätprincip

Enligt principen i standarden uppmäts ett medelvärde av efterklangstiderna för det tomma efterklangsrummet respektive efterklangsrummet med mätobjektet inmonterat. Ur dessa efterklangstider kan sedan mätobjektets ekvivalenta ljudabsorptionsarea beräknas med Sabines formel för efterklangtid.



Figur 3.1: Efterklangsrummet på Ingemanssons ljudlaboratorium på Kungsholmen med mätobjektet inmonterat.

#### 3.2.3.1 Val av metod för mätning av efterklangtid

I standarden beskrivs två olika metoder att mäta efterklangstider på i ett efterklangsrum, metoden med avbrutet brus och integrerade impulssvarsmetoden.

I detta examensarbete valdes integrerade impulssvarsmetoden. Denna metod är till skillnad från den andra inte beroende av standardavvikelsen.

#### 3.2.3.2 Mätssystem

Vid mätning av efterklangstiderna, i detta examensarbete, användes programmet WinMLS från Morset Sound Development [11].

När mätning av efterklangtid utförs, både genererar programmet en utsignal och spelar in en insignal. Det utför även den nödvändiga digitaliseringen av den inspelade signalen och filtrerar impulssvaret i tersband för att öka förhållandet mellan signal och bakgrundsbrus samt för att reducera störningar från mikrofoner, högtalare och själva efterklangsrummet [10]. Dessutom utför WinMLS utvärderingen av efterklangstiden.

#### 3.2.3.3 Ljudsignal

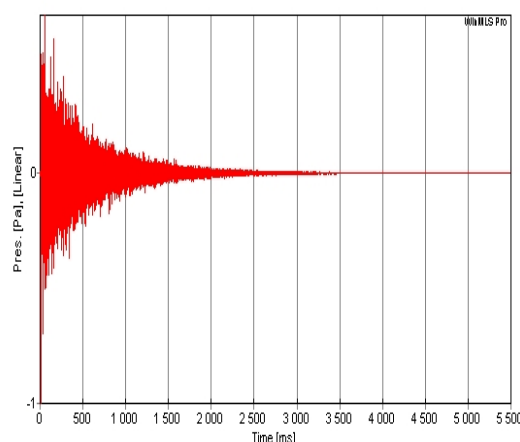
En speciell ljudsignal, sinussvepet, användes vid mätningarna. Den ger upphov till ett större förhållande mellan signal och bakgrundsbrus, vilket för med sig att betydligt lägre dynamiska krav ställs på ljudkällan.

#### 3.2.3.4 Integrering baklänges av impulssvaret

Impulssvaret för ett system är [10], enligt definition, signalen som erhålls vid systemets uteffekt efter att den exciterats av en kort energirik impuls, en s.k. Dirac- eller deltaimpuls.

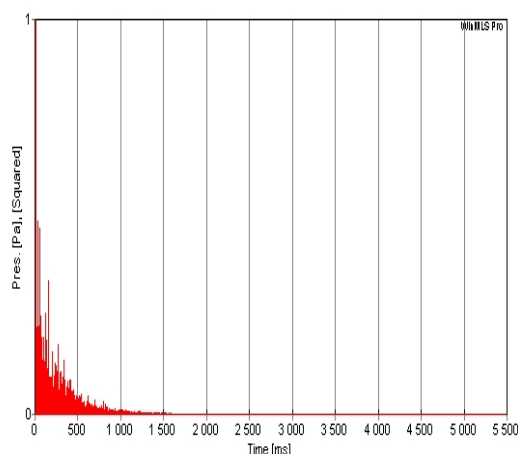
Efterklangstiden bestämd ur impulssvaret motsvarar ett oändligt antal mätningar för metoden med avbrutet brus som alternativt kunde ha använts enligt standarden.

Från den inspelade mikrofonsignalen utvärderar WinMLS impulssvaret, se figur 3.1, och filtrerar det i tersband.



Figur 3.2: Uppmätta impulssvaret [Pa] som funktion av tiden  $\tau$  [ms]. Graf utritad i WinMLS [20], vid tersbandet 1000 Hz, för en mätning på spaltpanel när bräddimension 16x70, spaltbredd 2 mm och 70 mm dämpning med glasull användes.

Vidare kvadreras impulssvaret, se figur 3.2.

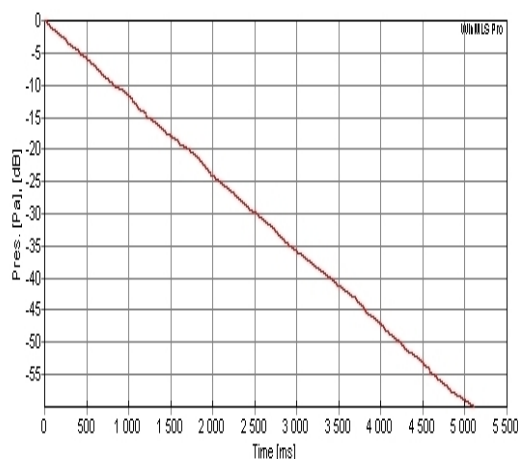


Figur 3.3: Det kvadrerade impulssvaret [Pa] som funktion av tiden  $\tau$  [ms]. Graf utritad i WinMLS [20], vid tersbandet 1000 Hz, för en mätning på spaltpanel när bräddimension 16x70, spaltbredd 2 mm och 70 mm dämpning med glasull användes.

Därefter integreras det kvadrerade impulssvaret baklänges. Genom denna integrering erhålls en kurva för ljudtryckets försvagning [12], Schröderkurvan, se figur 3.3, som betecknas  $E(t)$ :

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (3-1)$$

där  $p(\tau)$  är impulssvaret.



Figur 3.4: Ljudtryckets försvagning [dB] som funktion av tiden [ms], dvs. Schröderkurvan. Graf utritad i WinMLS [20], vid tersbandet 1000 Hz, för en mätning på spaltpanel när brädddimension 16x70, spaltbredd 2 mm och 70 mm dämpning med glasull användes.

### 3.2.3.5 Utvärdering av efterklangstider

Från Schröderkurvan (fig. 3.3) kan efterklangstiden i rummet utvärderas. I detta examensarbete

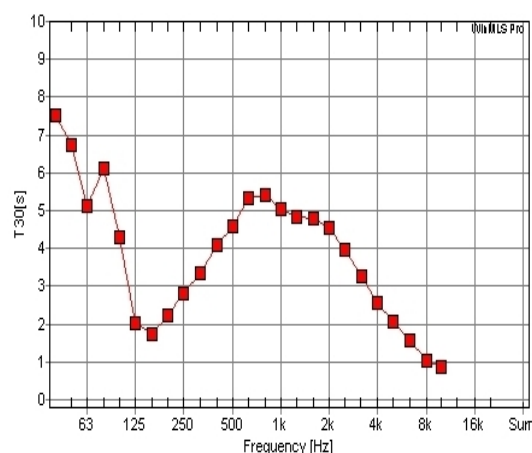
har efterklangstiden  $T_{30}$  använts, vid beräkning av spaltpanelens absorption.

Efterklangstiden  $T_{30}$ , bestäms genom att en rak linje passas in mellan -5 dB och -35 dB i Schröderkurvan, dvs. mellan nivåer 5 respektive 35 dB under normaliserade ljudtrycket. Denna linje dras sedan vidare till -60 dB, där efterklangstiden kan avläsas.

I exemplet i figur 3.3, för tersbandet 1000 Hz, avläses efterklangstiden  $T_{30}$  till 5,1 s.

WinMLS utför denna utvärdering av efterklangstiden för varje tersband, i frekvensområdet 50-10000 Hz [11].

En kurva för  $T_{30}$  ritas därefter ut mot frekvensen, se figur 3.4.



Figur 3.5: Kurva för efterklangstiden  $T_{30}$  [s] som funktion av frekvensen  $f$  [Hz]. Graf utritad i WinMLS [20], vid tersbandet 1000 Hz, för en mätning på spaltpanel när brädddimension 16x70, spaltbredd 2 mm och 70 mm dämpning med glasull användes.

I detta examensarbete har efterklangstider, som tidigare nämnts, undersökts i frekvensområdet 100-5000 Hz, i enlighet med standarden ISO 354:2003 [13].

Om ljudfältet i efterklangsrummet vore helt diffust [6], skulle en mätning av efterklangstiden räcka för varje försök, då denna inte skulle vara beroende av position. Eftersom det är svårt att åstadkomma ett helt diffust fält, blir efterklangstiden positionsberoende och måste följaktligen mätas i flera positioner.

Enligt standard ska tolv mätningar av efterklangstiden göras vid varje försök [13]. Kurvan i figur 3.4 är en av dessa mätningar för efterklangs-

rummet när spaltpanelen är inmonterad och består av brädor med dimension 16x70 mm, spaltbredd 2 mm och 70 mm glasull som dämpning.

Ur dessa tolv utvärderade kurvor, tas ett medelvärde som sedan används vid beräkningen av spaltpanelens absorption.

### 3.2.4 Beräkning av absorption

Som tidigare nämnts, uppmäts först efterklangstider för det tomma efterklangsrummet och sedan för efterklangsrummet med mätobjektet inmonterat.

För varje mätserie, uppmättes efterklangstider vid 12 olika kombinationer av mikrofon- och högtalarposition (Se vidare avsnitt 3.2.5 *Uppställd mätutrustning*). Ur värden från dessa tolv mätningar togs ett medelvärde för efterklangstiderna, som sedan användes vid beräkningen av absorptionen. Medelvärdet av efterklangstiderna för det tomma rummet betecknas här  $T_1$  och för rummet med mätobjektet inmonterat  $T_2$ .

Under hela mätperioden, uppmättes efterklangstider,  $T_1$ , för det tomma rummet med jämna mellanrum för att kontrollera att dessa inte ändrades märkbart.

För att bestämma den inverkan ljudets dämpning i luften har på den ekvivalenta ljudabsorptionsarean för det tomma efterklangsrummet, respektive efterklangsrummet med mätprov inmonterat uppmättes temperatur och relativ luftfuktighet för efterklangsrummet, vid varje mätseries början och slut. Medelvärdena av dessa användes vid beräkningen av ljudets dämpning i luften, se vidare avsnitt 3.2.4.2 *Ljudets dämpning i luften*.

Eftersom efterklangstiderna bestäms som medelvärden i varje tersband, kommer den uppmätta resonansfrekvensen att hamna i närmaste tersband. Därmed kan inte den exakta resonansfrekvensen utläsas ur uppmätta absorptionskurvor.

Formler i standarden är baserade på Sabines formel för efterklangstid:

$$T = \frac{55,3 \cdot V}{c(A + 4Vm)} = 0,163 \cdot \frac{V}{A + 4Vm} \quad (3-2)$$

där  $V$  är rummets volym [ $m^3$ ],  $c$  är hastigheten för ljudets utbredning [ $m/s$ ],  $A$  är rummets ekvivalenta ljudabsorptionsarea [ $m^2$ ] och  $m$  är en energidämpningsfaktor [ $m$ ], som tar hänsyn till klimatförhållanden i det tomma rummet

Här följer en beskrivning av hur formlerna används enligt standard för att beräkna absorptionen från uppmätta värden på efterklangstider. Som beräkningsverktyg användes Microsoft Office Excel 2003.

#### 3.2.4.1 Ekvivalent ljudabsorptionsarea

Det tomma efterklangsrummets ekvivalenta ljudabsorptionsarea,  $A_1$  [ $m^2$ ], beräknas:

$$A_1 = \frac{55,3V_{ER}}{c_1T_1} - 4V_{ER}m_1 \quad (3-3)$$

där  $V_{ER}$  är efterklangsrummets volym [ $m^3$ ],  $c_1$  är hastigheten för ljudets utbredning [ $m/s$ ] i det tomma efterklangsrummet och  $m_1$  är en energidämpningsfaktor [ $m$ ], som tar hänsyn till klimatförhållanden i det tomma efterklangsrummet.

Hastigheten för ljudets utbredning,  $c_1$ , i det tomma efterklangsrummet beräknas enligt:

$$c_1 = (331 + 0,6t_1 / ^\circ C) \quad (3-4)$$

där  $t_1$  är luftens temperatur [ $^\circ C$ ] i det tomma efterklangsrummet.

Energidämpningsfaktorn,  $m_1$  beräknas enligt:

$$m_1 = \frac{\alpha_1}{101g(e)} \quad (3-5)$$

där  $\alpha_1$  är luftens ljuddämpningsfaktor i det tomma efterklangsrummet, vars beräkning beskrivs i avsnitt 3.2.4.2 *Ljudets dämpning i luften*.

Den ekvivalenta ljudabsorptionsarean,  $A_2$  [ $m^2$ ], för efterklangsrummet när mätobjektet är inmonterat bestäms på liknande sätt:

$$A_2 = \frac{55,3V_{ER}}{c_2T_2} - 4V_{ER}m_2 \quad (3-6)$$

där  $c_2$  är hastigheten för ljudets utbredning [ $m/s$ ] när mätobjektet är inmonterat och  $m_2$  är en energidämpningsfaktor [ $m$ ], som tar hänsyn till



klimateförhållanden i efterklangsrummet med mätprovet inmonterat.

Ljudets utbredningshastighet i efterklangsrummet när mätprovet är inmonterat,  $c_2$ , beräknas enligt:

$$c_2 = (331 + 0,6t_2 / ^\circ\text{C}) \quad (3-7)$$

där  $t_2$  är luftens temperatur i efterklangsrummet [ $^\circ\text{C}$ ], när mätprovet är inmonterat

Energidämpningsfaktorn  $m_2$  beräknas enligt:

$$m_2 = \frac{\alpha_2}{10 \lg(e)} \quad (3-8)$$

där  $\alpha_2$  är luftens ljuddämpningsfaktor i efterklangsrummet med mätprovet inmonterat, vars beräkning beskrivs i avsnitt 3.2.4.2 *Ljudets dämpning i luften*.

När  $A_1$  och  $A_2$  är kända, kan vidare mätprovets ekvivalenta ljudabsorptionsarea,  $A_T$  [ $\text{m}^2$ ], beräknas enligt:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left( \frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (3-9)$$

### 3.2.4.2 *Ljudets dämpning i luften*

Vid varje mätning uppmättes temperatur och relativ luftfuktighet i efterklangsrummet. Speciellt som en följd av den relativa luftfuktighetens stora variation måste hänsyn tas till ljudets dämpning i luften. Denna bestäms, efter hänvisning från den aktuella mätstandarden, *ISO 354:2003*, enligt standarden *Dämpning av ljud under utbredning utomhus – Del 1: Beräkning av atmosfärens ljudabsorption (ISO 9613-1:1993)* [14].

Beräkningen av denna dämpningsfaktor utförs likadant för både det tomma efterklangsrummet och efterklangsrummet med mätprovet inmonterat, och beskrivs därför endast en gång nedan.

Ljudets dämpning till följd av atmosfärisk absorption beräknas som en funktion av två dämpningsfrekvenser. Syre- respektive kvävedämpningsfrekvenserna beräknas enligt:

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left( 24 + 4,04 \times 10^4 \cdot h \cdot \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \quad (3-10)$$

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-1/2} \times \left( 9 + 280h \cdot e^{-4,17 \cdot \left[ \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-1/3} - 1 \right]} \right) \quad (3-11)$$

där  $t$  är temperaturen [K] ( $t_1$  respektive  $t_2$ ),  $t_0$  är en referenstemperatur ( $t_0=293,15$  K),  $p_a$  är atmosfärstrycket [kPa]  $p_r$  är ett referensvärde för det omgivande atmosfärstrycket ( $p_r = 101,325$  kPa) och  $h$  är den masskoncentrationen av vattenånga [%].

Utvärdering av atmosfärstrycket  $p_a$ :s inverkan på absorptionens storlek visar att den är försumbar och följaktligen sätts den till  $p_a = 101,325$  kPa.

Masskoncentrationen av vattenånga,  $H$ , beräknas enligt:

$$H = H_r \cdot \frac{\left( \frac{p_{sat}}{p_r} \right)}{\left( \frac{p_a}{p_r} \right)} \quad (3-12)$$

där  $H_r$  är uppmätt relativ luftfuktighet [%],  $p_{sat}$  är mättnadsångstrycket för vattenånga [kPa].

Mättnadsångstrycket för vattenånga,  $p_{sat}$ , beräknas enligt:

$$p_{sat} = p_r \cdot 10^C \quad (3-13)$$

där exponenten  $C$  beräknas enligt:

$$C = -6,8346 \cdot \left( \frac{t_{01}}{t} \right)^{1,261} + 4,6151 \quad (3-14)$$

där  $t_{01}$  är temperaturen vid vattnets trippelpunkt (273,16 K)

Vidare kan dämpningsfaktorn  $\alpha$  (eg.  $\alpha_1$  och  $\alpha_2$ ) för atmosfärens absorption [dB/m] beräknas enligt

$$\alpha = 8,686 \cdot f^2 \cdot \left[ \left[ 1,84 \times 10^{-11} \cdot \left( \frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \cdot \left( \frac{t}{t_0} \right)^{1/2} \right] + \left( \frac{t}{t_0} \right)^{-5/2} \right] \times \\ \times \left\{ 0,01275 \cdot \left[ e^{\left( \frac{-2239,1}{1} \right)} \right] \cdot \left[ f_{rO} + \left( \frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} + \right.$$

$$+ 0,01068 \cdot \left[ e^{\left( \frac{-3352}{t} \right)} \right] \cdot \left[ f_{rN} + \left( \frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \Bigg\} \quad (3-15)$$

För att beräkna absorptionen insätts formel (3-15) i (3-5) respektive (3-8).

#### 3.2.4.3 Ljudabsorptionsfaktorn

När mätprovets ekvivalenta ljudabsorptionsarea,  $A_T$  [m<sup>2</sup>], är känd kan slutligen dess absorptionsfaktor för varje tersband i frekvensområdet 100-5000 Hz bestämmas enligt formel:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S_{MO}} \quad (3-16)$$

där  $S_{MO}$  är mätobjektets area [m<sup>2</sup>].

#### 3.2.4.4 Motivering till användandet av Sabines formel

Sabines formel för efterklangstid, som standarden är baserad på, har en viss osäkerhetsfaktor vid stora absorptionsfaktorer [1]. I dessa fall kan andra formuleringar användas, såsom t ex Eyrings (se avsnitt 5.1.3.1 Absorptionsfaktor över 1,0).

Att Sabines formulering använts i detta examensarbete förklaras med att detta är industripraxis. Absorptionsdatabaser på Ingemansson, precis som i största delen av industrin, är uppbyggda på absorptionsfaktorer, beräknade ur efterklangstiderna med Sabines formulering.

### 3.2.5 Uppställd mätutrustning

Mätutrustningen skall uppfylla vissa krav i standarden.

Följande utrustning användes vid mätningarna i efterklangsrummet:

- Dator med mätsystemet WinMLS, som uppfyllde standardens krav (MD005).
- Mikrofon av rundupptagande typ (MK064), vilket uppfyllde standardens krav. Efterklangstider uppmättes i 6 olika mikrofonpositioner.
- Mikrofonförstärkare (VF018)
- Ljudkälla av typen rundstrålande högtalare (H047), vilket uppfyllde

standardens krav. Efterklangstider uppmättes vid 2 olika positioner för ljudkällan.

- Effektförstärkare (FK038)

Krav som ställs i standarden på mätpositioner, vad gäller antal, deras inbördes avstånd samt deras avstånd till mätprov och rumsytor uppfylls.

### 3.2.6 Mätobjekt

Mätobjektet är en spaltpanel med varierbara spaltbredder.

#### 3.2.6.1 Val av parametrar

Absorption skulle, enligt syftet, bestämmas för olika varianter av spaltpanel. I detta avsnitt beskrivs motivering till varierade parametrar samt valet av dem.

Följande motiveringar ledde till de därefter beskrivna valen av varierade parametrar:

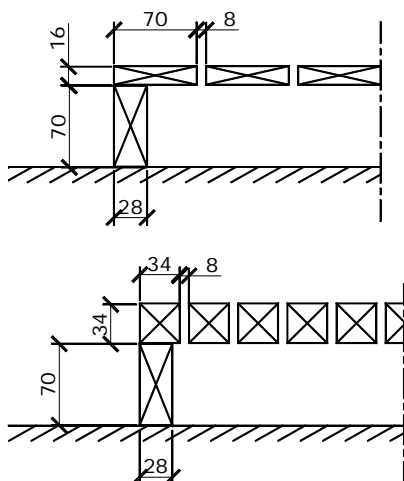
- Två olika brädor användes separat i undersökningen. Det första valet av bräddimension gjordes utifrån vad som kunde tänkas användas i verkliga byggsammanhang. Det andra valet gjordes efter att man i ombyggnadsprojektet av Plenisalen i Sveriges Riksdag valt just denna dimension på bräda, för en spaltpanel på den bakre väggen, se avsnitt 5.5.1 Plenisalen. Då Ingemansson ansvarar för akustiken i projektet ansågs det vara av intresse att se hur denna bräddimension skulle uppföra sig i spaltpanelen.
- För att erhålla en stor bredd av mätvärden uppmättes spaltpanelens absorption för 8 olika spaltbredder. För att kunna bestämma vid vilken spaltbredd spaltpanelens resonansverkan upphör, ställdes även ovanligt stora spaltbredder in.
- För att mätvärdena skulle vara användbara fick avståndet till bakomliggande hårda yta, av utrymmesskäl, inte vara för stort. Samtidigt var det viktigt för spaltpanelens funktion att avståndet inte var för litet. Dessutom ansågs det viktigt att detta avstånd kunde erhållas med en, i bygg-

sammanhang, väl använd dimension på regel.

- För att uppfylla syftet med att laboratoriskt utreda den porösa dämpningens inverkan på spaltpanelens funktion som absorberent gjordes mätningar dels med endast luft, i utrymmet mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan, och dels med porös dämpning. Två typer av porösa material användes separat, en tyngre stenullsskiva och ett lättare glasull. För att värdena skulle vara så praktiskt användbara som möjligt, valdes relativt vanliga och inte alltför dyra eller avancerade produkter.

På följande vis varierades parametrarna i spaltpanelen:

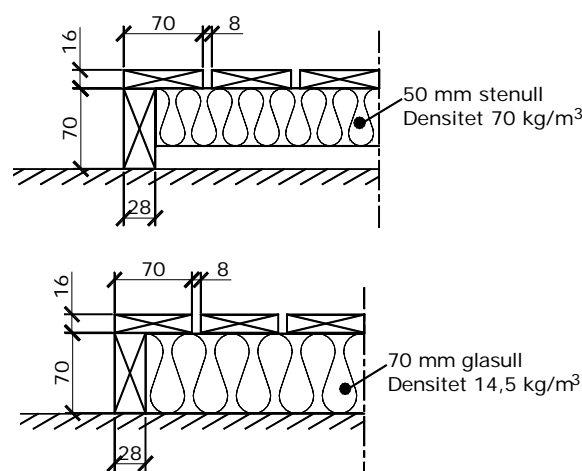
- Brädor med dimensionerna 16x70 mm och 34x34 mm användes.



Figur 3.7: Spaltpanel undersöktes med två olika dimensioner av panelbräda, 16x70 mm liksom 34x34 mm.

- För brädddimension 16x70 mm varierades spaltbredderna varierades mellan 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 och 128 mm. För brädddimension 34x34 mm varierades de mellan 2, 4, 8, 16, 34, 64 och 128 mm.
- Avståndet mellan baksidan av panelbrädorna och den bakomliggande hårda ytan sattes till 70 mm.
- Innehållet i utrymmet mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan varierades mellan luft, 50 mm stenull (Roxull Topas

Vit) med densitet 70 kg/m<sup>3</sup> kombinerat med 20 mm luftspalt och 70 mm glasull (Isover UNI-skiva) med densitet 14,5 kg/m<sup>3</sup>.



Figur 3.6: Spaltpanel undersöktes förutom det odämpade fallet med två olika porösa material som dämpning, 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) kombinerad med 20 mm luftspalt samt 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ).

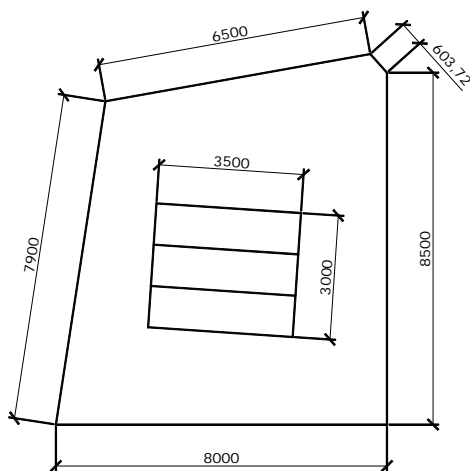
Alla ovan nämnda variationer av parametrar kombinerades i undersökningen med varandra. Detta innebär att mätningar utfördes, för båda brädddimensionerna, på spaltpanel med tre olika medier i utrymmet bakom panelen och för varje medium mätningar på 6-8 olika spaltbredder.

Förutom detta mättes absorptionen på de två olika porösa medierna och även på tre specialfall, med glasull bakom panelen, där panelytan innehöll spalter med olika bredder, för att erhålla en bredare resonanstopp. De tre specialfallen bestod av spaltpanel med brädddimension 16x70 mm och följande kombinationer av spaltbredder:

- Halva ytan av spaltpanelen ställdes in med spaltbredden 1 mm och andra halvan med 2 mm.
- Spaltpanelens yta delades in i tre sektioner med varsin spaltbredd. En tredjedel av ytan ställdes in med spaltbredd 1 mm, en tredjedel med 2 mm och en tredjedel med 4 mm.
- Spaltpanelens yta delades återigen in i tre delsektioner med varsin spaltbredd. En tredjedel av ytan ställdes in med spaltbredd 1 mm, en tredjedel med 2 mm och en tredjedel med 16 mm.

### 3.2.6.2 Montering i efterklangsrummet

I detta examensarbete valdes monteringsstyp A, i annex B till standarden. Spaltpanelen placerades på efterklangsrummets golv. Lufttätetheten mot golvet erhöles med silvertejp längs alla regelramens kanter.



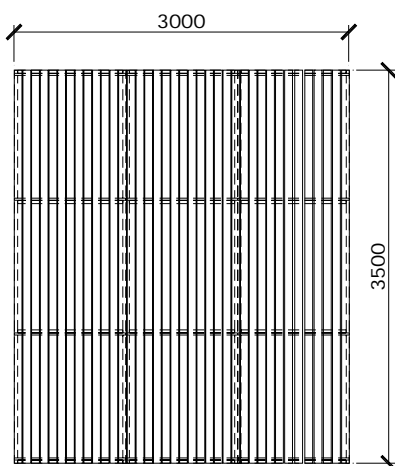
Figur 3.8: Montering av mätobjektet på efterklangsrummets golv.

För närmre inblick se annex B, ISO 354:2003 [13].

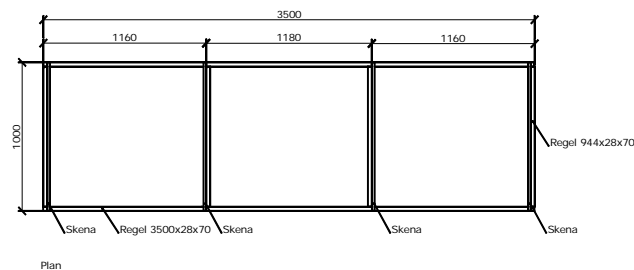
### 3.2.6.3 Konstruktion av spaltpanelen

Standarden kräver att mätobjektet ska ha en yta på 10-12m<sup>2</sup>, för att skillnaderna på mellan efterklangstiderna ska vara tillräcklig i efterklangsrummet med och utan mätobjekt inmonterat.

Mot den hårda ytan, golvet i efterklangsrummet, fästs tätt en ram, bestående av tre lika stora sektioner á 1,0x3,5 m<sup>2</sup> var. Mätobjektets sammanlagda yta var 10,5 m<sup>2</sup>.

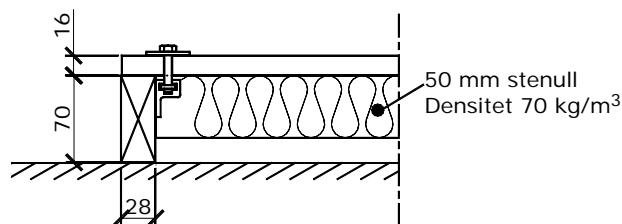


Figur 3.9: Mätobjektet med total area av 10,5 m<sup>2</sup> ovanifrån sedd.



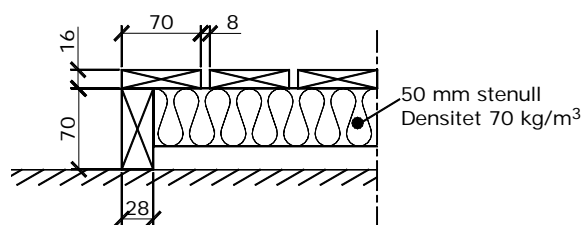
Figur 3.10: En tredjedel av den totala ramen till mätobjektet. Area på 3,5 m<sup>2</sup>.

Fyra s.k. rackskenor, i aluminium, är fästa parallellt med ramens kortsida. I skenorna löper fyrkantsmuttrar som med bult fixerar de 3,5 m långa panelbrädorna i ramen vid fyra punkter. Skenan är fast i ramen så att dess topp ligger 3 mm nedanför ramens topp för att åstadkomma bästa möjliga täthet mellan panelbräda och ram, och hindra listen att stiga ovanför ramens överkant om bulten måste vridas åt hårt för att t ex fixera en något böjd bräda.



Figur 3.11: Rackskena i aluminium möjliggör enkel omställning av spaltbredder. Figuren illustrerar ett fall med bräda av dimension 16x70 mm och stenull som dämpning.

Konstruktionen möjliggör en enkel omställning av spalterna mellan panelbrädorna vilket är av högsta intresse för examensarbetet. Omställningen av spalterna visade sig dock vara ett tidskrävande moment.



Figur 3.9: Spalter åstadkoms mellan panelbrädorna. Figuren illustrerar ett fall med bräda av dimension 16x70 mm och stenull som dämpning samt spaltbredden 8 mm.

Tätheten mot efterklangsrummets golv åstadkoms med tejp. Även eventuella andra springor som kan

tänkas påverka panelens resonansfrekvens, tejpas igen. Dessa springor uppstår främst mellan de två yttersta panelbrädorna och ramen.

### 3.2.7 Mätnoggrannhet

I samband med mätningen av efterklangstiderna har också deras standardavvikelse bestämts i WinMLS. Från denna har vidare standardavvikelsen för absorptionsfaktorn bestämts med formel [1]:

$$s_{\alpha_s} = \frac{\left( \left( \frac{s_{T_2}}{T_2^2} \right)^2 + \left( \frac{s_{T_1}}{T_1^2} \right)^2 \right)^{1/2}}{\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \cdot \alpha_s \quad (3-16)$$

där  $s_{T_2}$  är standardavvikelsen för efterklangstiden i efterklangsrummet när mätobjektet är inmonterat och  $s_{T_1}$  är standardavvikelsen för efterklangstiden i tomma efterklangsrummet.

## 4 Resultat

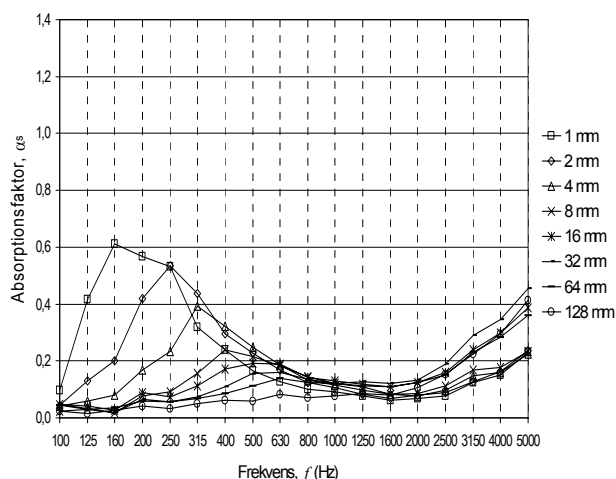
Samtliga resultat av uppmätt absorption finns grafiskt återgivna i bilaga B. I diskussionen nedan återfinns en del av dem för närmare förståelse.

Standardavvikelsen för uppmätt absorption finns redovisade i tabell, i bilaga C.

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion kring mätresultat

Allmänt konstateras av jämförelsen mellan absorptionskurvorna för olika spaltbredder, hos en spaltpanel utan porös dämpning, att ju mindre spaltbredden är, desto lägre är frekvensen där spaltpanelen har sin maximala absorption, dvs. resonansfrekvensen, och desto större är det maximala värdet för absorptionsfaktorn. Detta kan avläsas tydligt ur grafen i figur 5.1.



Figur 5.1: Uppmätt absorption för spaltpanel av bräda med dimension 16x70 mm, utan porös dämpning.

I detta avsnitt benämns de porösa materialen som använts i mätningarna, för enkelhetens skull, endast med glasull resp. stenull. För detaljer om materialegenskaper, tjocklek och placering, se avsnitt 3.2.6.1 Val av parametrar.

#### 5.1.1 Överensstämmelse med teoretiska resonansfrekvenser

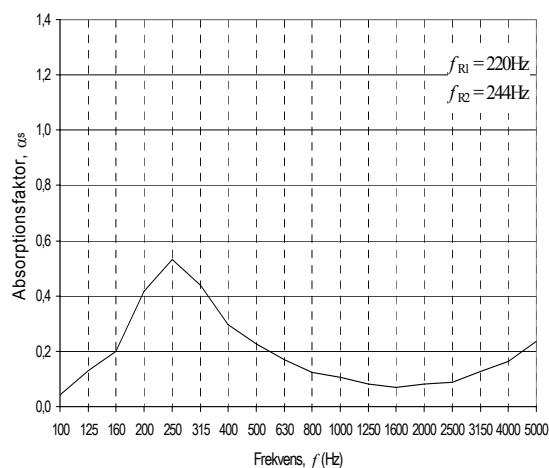
Resonansfrekvenser för spaltpanelen har beräknats för varje kombination av panelbräda och spaltbredd enligt två olika teorier, som beskrivs i avsnitt 2.3.4 Beräkning av resonansfrekvens för en spaltpanel. Dessa beräknade resonansfrekvenser har här jämförts med uppmätta resonansfrekvenser för spaltpanel utan porös dämpning.

För spaltpanel med bräddimension 16x70 mm konstateras följande angående beräknade överensstämmelsen:

- För teori 1 är den god vid spaltbredderna 1, 2 och 4 mm. Vid spaltbredder över 4

mm är den beräknade resonansfrekvensen enligt denna teori underskattad med 1-2 tersband i jämförelse med uppmätta resonansfrekvenser.

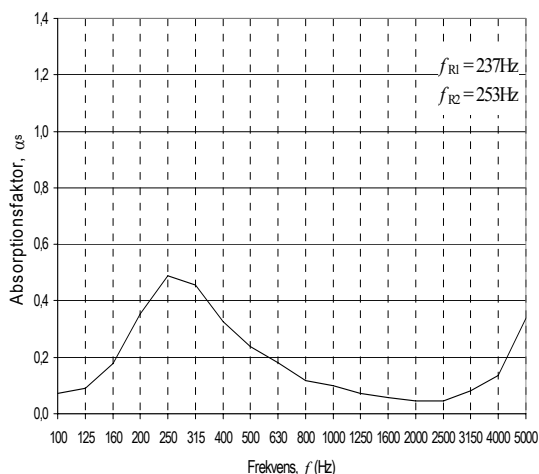
- För teori 2 är den mycket god vid samtliga spaltbredder, se exempel i figur 5.2.



Figur 5.2: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 2 mm, bräda med dimension 16x70 mm, utan porös dämpning, i jämförelse med beräknade resonansfrekvenser. I detta fall uppvisar jämförelsen med båda teorier god överensstämmelse.

På motsvarande sätt konstateras följande angående överensstämmelsen när bräddimension 34x34 mm används.

- För teori 1 är den god för spaltbredden 2 mm, medan den är underskattad med 1-2 tersband, vid övriga spaltbredder.
- För teori 2 är den relativt god även när spaltpanelen har bräddor med denna dimension. Vid de flesta spaltbredderna är den underskattad ungefär ett halvt tersband i förhållande till uppmätta resonansfrekvenser.



Figur 5.3: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 2 mm, bräda med dimension 34x34 mm, utan porös dämpning, i jämförelse med beräknade resonansfrekvenser.

### 5.1.2 Absorption med och utan porös dämpning

Ett av syftena i examensarbetet var att se på sambandet mellan spaltpanelens absorption med och utan porös dämpning.

Generellt konstateras att i jämförelse med det odämpade fallet, har spaltpanelen med porös dämpning större absorptionsfaktor och absorberar dessutom i ett bredare frekvensområde. Ju större spaltbredden är desto mer liknar spaltpanelens absorption den porösa absorbentens.

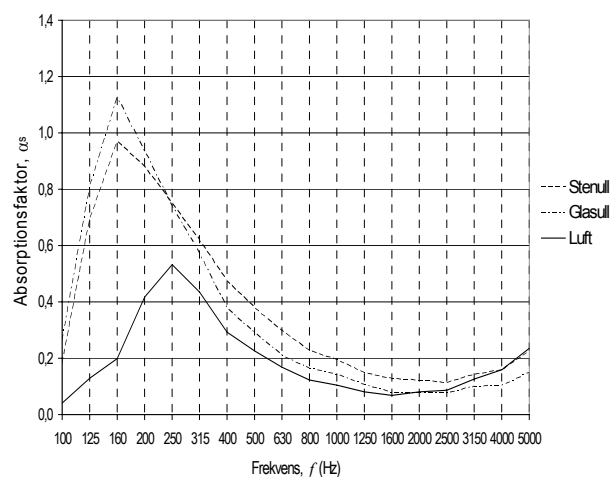
#### 5.1.2.1 Förskjutning av resonansfrekvens

De två porösa material som användes som dämpning i undersökningen gav ingen skillnad i resonansfrekvens vid någon av spaltbredderna för vare sig spaltpanel med bräddimension 16x70 mm eller 34x34 mm.

Resonansfrekvensen som uppmätts för spaltpanel med porös dämpning ligger lägre än resonansfrekvensen för den odämpade spaltpanelen.

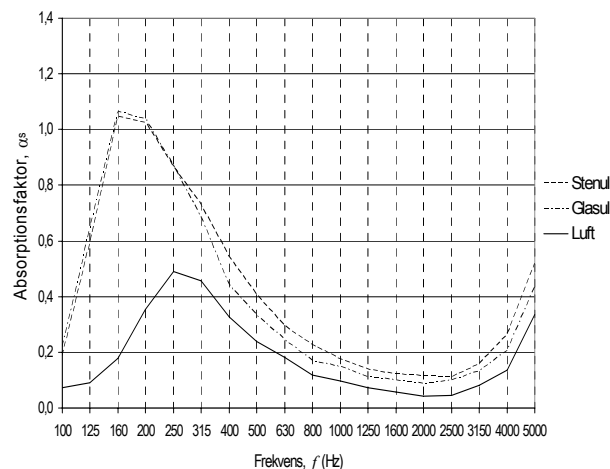
Denna förskjutning av resonansfrekvensen uppskattades till approximativt två tersband vid båda brädddimensioner och över samtliga spaltbredder. Då absorptionen uppmätts i tersband, kan givetvis inte den exakta förskjutningen bestämmas.

Förskjutningens storlek syns mest tydligt för spaltpanel med brädddimension 16x70 mm och spaltbredd 2 mm, se figur 5.4.



Figur 5.4: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 2 mm, bräda med dimension 16x70 mm, olika dämpning. Resonansfrekvensen för spaltpanel med porös dämpning är förskjuten 2 tersband nedåt jämfört med resonansfrekvensen för spaltpanel utan porös dämpning.

Med bräddimension 34x34 mm är förskjutningen av resonansfrekvensen inte fullt så lätt att uppskatta, då resonanstopparna inte är lika väldefinierade, se exempel vid spaltbredden 2 mm, figur 5.5.



Figur 5.5: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 2 mm, bräda med dimension 34x34 mm, olika dämpning. Resonansfrekvensen för spaltpanel med porös dämpning är även här förskjuten ca 2 tersband nedåt jämfört med resonansfrekvensen för spaltpanel utan porös dämpning.

#### 5.1.2.2 Skillnad i absorption mellan spaltpanel med de olika porösa dämpningarna

De två olika porösa dämpningar som använts i mätningarna ger vissa skillnader i absorptionens storlek.

Följande gäller för spaltpanel med brädddimension 16x70 mm:



- I frekvenser under och vid resonans ger spaltpanelen med glasullen bättre absorption. Vid resonansfrekvensen är absorptionsfaktorn då 0,1-0,2 större och vid lägre frekvenser ca 0,1 större.
- I frekvenser precis ovanför resonans erhålls med glasullen fortfarande något bättre absorption. Från frekvenser 2-3 kHz ovanför resonans erhålls istället 0,05-0,2 sämre absorptionsfaktor med glasull än med stenull som dämpning.

För spaltpanel med brädddimensionen 34x34 mm gäller istället följande skillnader:

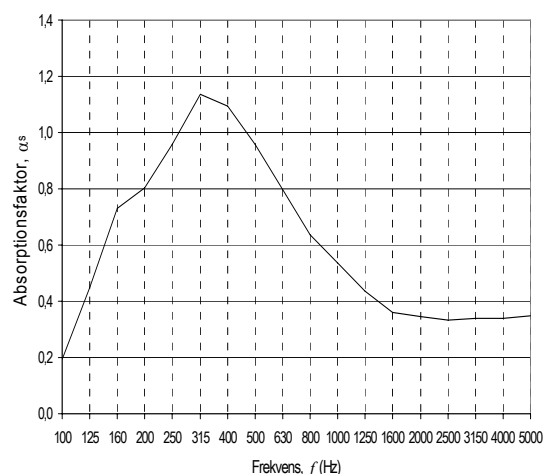
- I frekvenser under resonans ger glasull som dämpning aningen större absorption.
- Vid resonansfrekvensen är skillnaden, vid de tre smalaste spaltbredderna (2, 4 och 8 mm), mycket liten. För övriga spaltbredder ger stenullen som dämpning ca 0,1 större absorptionsfaktor.
- I frekvenser ovanför resonans ger stenullen som dämpning 0,1-0,2 större absorptionsfaktor vid samtliga spaltbredder.

### 5.1.3 Avvikande tendenser

#### 5.1.3.1 Absorptionsfaktor över 1,0

För en stor del av mätningarna har absorptionsfaktorn vid resonans ett värde över 1,0. Detta kan verka underligt då absorptionsfaktorn är andel ljud som absorberas och därför borde hamna mellan 0 och 1,0. Följande kan konstateras om absorptionens storlek vid resonansfrekvensen hos uppmätta spaltpaneler:

- För spaltpanel med brädddimensionen 16x70 mm och glasull som dämpning är absorptionsfaktorn större än 1,0 för samtliga spaltbredder vid resonans. Vid samma brädddimension och stenull som dämpning erhöles en absorptionsfaktor större än 1,0 vid spaltbredder större än 8 mm.



Figur 5.6: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 16 mm, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ). Ett exempel på absorptionsfaktor större än 1,0 ( $\alpha_{s315}=1,14$ ).

- För spaltpanel med brädddimensionen 34x34 mm är absorptionsfaktorn större än 1,0 med båda porösa dämpningarna och vid samtliga spaltbredder.
- För spaltpanel utan porös dämpning är absorptionsfaktorn mindre än 1,0 för samtliga spaltbredder, och båda brädddimensionerna.

Omfattande studier har tidigare gjorts om anledningen till att absorptionsfaktorn för slumpmässigt infall oftast är större än den absorptionsfaktor som beräknats m h a uppmätt akustisk impedans för materialet.

T.W. Bartel [15] gjorde i sin artikel 1980 en sammanställning av studier som gjorts på detta och undersökte även hur absorptionsfaktorn för slumpmässigt infall beror av absorbentens omkrets och form. Undersökningen visade att omkretsens storlek tydligt kan påverka mätprovets absorption. Storleken på denna påverkan är beroende av materialtyp och frekvens. Inverkan av mätprovets form på dess absorption var försumbar.

Ju större förhållandet är mellan omkretsen för absorbenten och dess geometriska yta, desto större absorptionsfaktor erhålls [6]. Då absorbenten är mindre till storleken i efterklangsrummet, än i det verkliga rummet, är detta förhållande större och följaktligen är absorptionsfaktorn större i efterklangsrummet än i det verkliga rummet.

Som orsak till detta, förklaras av T J Cox och P D'Antonio [6], att effekterna av kantdiffraktion i

efterklangsrummet är större än i det verkliga rummet. Problemet med dessa effekter vid kanterna skulle kunna elimineras genom att bestämma absorptionen för kanterna. Ett sätt att göra detta kunde vara att bestämma absorptionen hos ett mätprov, med konstant geometrisk area, uppdelad i olika antal fristående sektioner vid olika mätningar. Därmed skulle absorptionsfaktorn bestämmas för mätprovet med olika förhållande mellan geometrisk absorptionsarea och omkrets. Genom extrapolering av dessa värden skulle kanternas inverkan kunna bestämmas.

En annan viktig orsak till att storleken på absorptionsfaktorn är större än 1,0 är att Sabines formel, som används enligt standard för beräkning av absorption från uppmätta efterklangstider, anses vara ogiltig när absorptionen är hög. För motivering till dess användande i detta examensarbete, se avsnitt 3.2.4.4 *Motivering till användandet av Sabines formel*.

För att komma ifrån detta kan andra formuleringar av efterklangstid användas för beräkning av absorptionen.

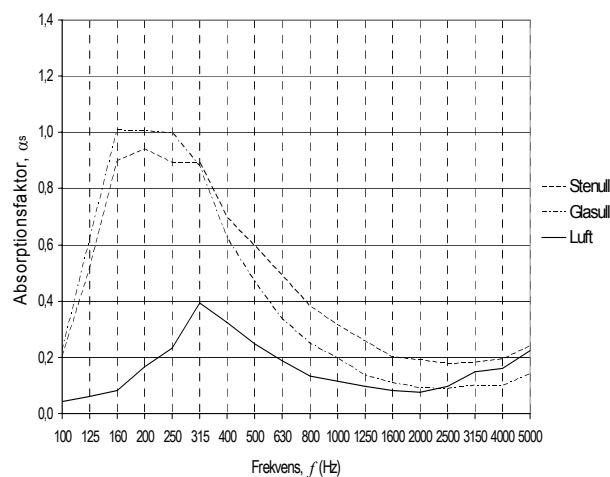
Ett av alternativen är Eyrings formel [10]:

$$T_E = -0,163 \cdot \frac{V}{S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) - 4Vm} \quad (5-2)$$

där  $S$  [m<sup>2</sup>] är absorbenternas sammanlagda geometriska area i rummet,  $\bar{\alpha}$  är medelvärdet av absorptionsfaktorn hos alla rummets ytor och övriga beteckningar har samma innebörd som i formel (3-1).

### 5.1.3.2 Bred resonanstopp med 4 mm spalt

Både med stenull och med glasull som dämpning i spaltpanelen med bräddimension 16x70 mm erhålls vid spaltbredden 4 mm en ovanligt flak topp och därmed stor absorption i ett bredare frekvensområde, se fig. 5.7.



Figur 5.7: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 4 mm, bräda med dimension 16x70 mm, olika dämpning. Bred resonanstopp.

Som figuren visar, erhålls den breda toppen inte för spaltpanel utan porös dämpning.

Att tendensen skulle bero på någon form av tillfällighet kan uteslutas, då absorptionen kontrollmättes för den aktuella spaltbredden i 7 försök, där också inställningar strax omkring 4 mm ledde till liknande resultat.

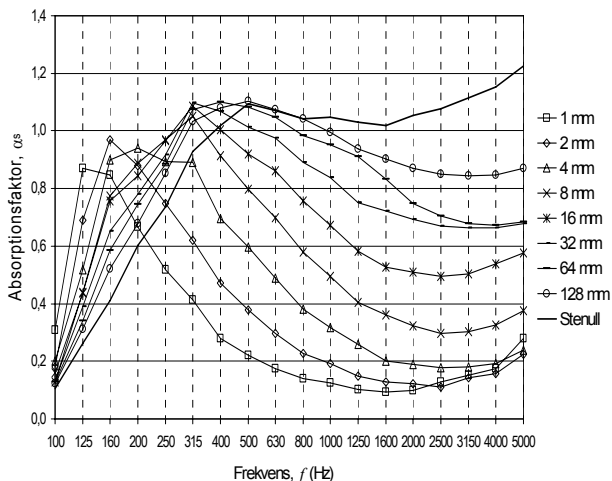
Den breda toppen börjar vid 160 Hz, där även spaltpanel med bräddimension 34x34 mm har sin början till en något bredare topp.

Enligt resonemanget i avsnitt 5.1.2.1 *Förskjutning av resonansfrekvens* borde spaltpanelen med bräddimension 16x70 mm med porös dämpning och spaltbredd på 4 mm ha sin resonansfrekvens vid 200 Hz. Det absorptionsmaximum som borde ha funnits där har uteblivit.

Troligen var impedansen större när denna spaltbredd var inställd, mer ljud har reflekterats och därmed mindre absorberats. Orsaken till den större impedansen är okänd.

### 5.1.3.3 Snabb stigning till 160 Hz

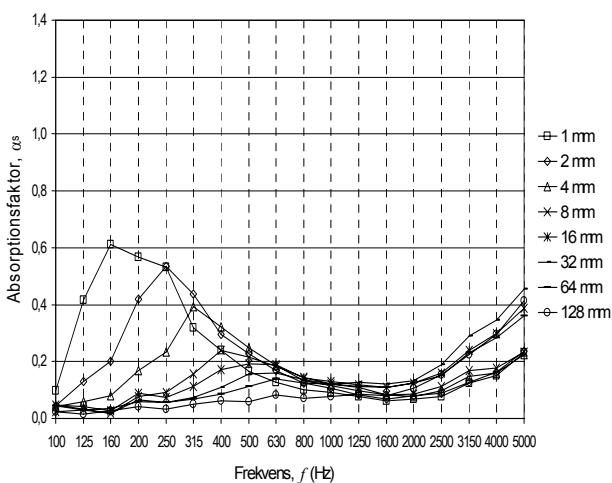
För samtliga kurvor kan en kraftig ökning av absorptionen upp till 160 Hz konstateras, för att sedan avta något upp till respektive resonansfrekvens. Speciellt tydligt är detta för spaltpanel med brädddimensionen 16x70 mm och med stenull som dämpning, se figur 5.8.



Figur 5.8: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredder, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt. Snabb stigning till 160 Hz.

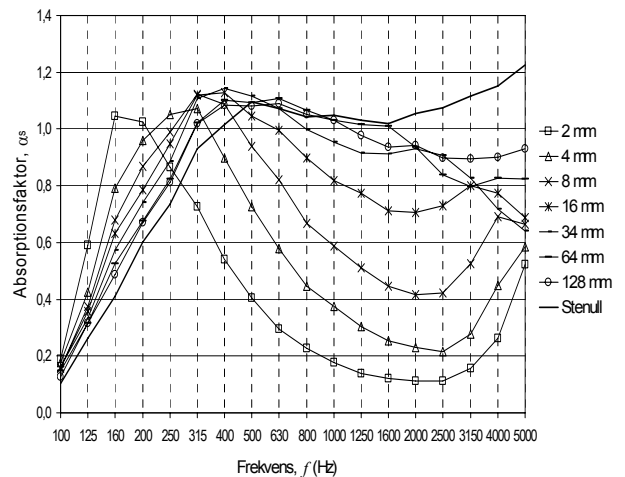
#### 5.1.3.4 Ökande absorption vid höga frekvenser

När spaltpanelen består av brädor med dimensionen 16x70 mm, tenderar absorptionen att stiga vid höga frekvenser med samtliga fall av dämpning. Tydligast syns detta utan porös dämpning, se figur 5.9.



Figur 5.9: Ökande absorptionsfaktor vid höga frekvenser. Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredder, bräda med dimension 16x70 mm, avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm, utan porös dämpning.

När spaltpanelen istället består av brädor med dimension 34x34 mm erhålls fortfarande tendensen men vid de bredare spaltbredderna är den något mer oregelbunden se figur 5.10 för spaltpanel med stenull som dämpning.



Figur 5.10: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredder, bräda med dimension 34x34 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt. Ökande absorptionsfaktor vid höga frekvenser, dock aningen mer oregelbundet än med den andra brädan.

Med glasull som dämpning är tendenserna väldigt lika dem i fallet med stenull, men inte identiska.

Eftersom tendensen även finns hos uppmätta absorptionskurvor för spaltpanelen utan porös dämpning kan inte mineralullens absorption förklara dem.

En möjlig orsak till tendenserna är *ojämnheter i temperatur och relativ luftfuktighet* inom rummet. Detta kan leda till en förhöjd eller förminskad absorption vid höga frekvenser. Eftersom formel (3-13), som beräknar storleken av atmosfärens absorption, är beroende av den kvadrerade frekvensen blir dess inverkan på ekvivalenta ljudabsorptionsarean för det tomma efterklangsrummet liksom för efterklangsrummet med mätprovet inmonterat, större ju högre frekvensen är. Absorptionsfaktorns storlek påverkas därmed mer av klimatförändringar, ju högre frekvensen är.

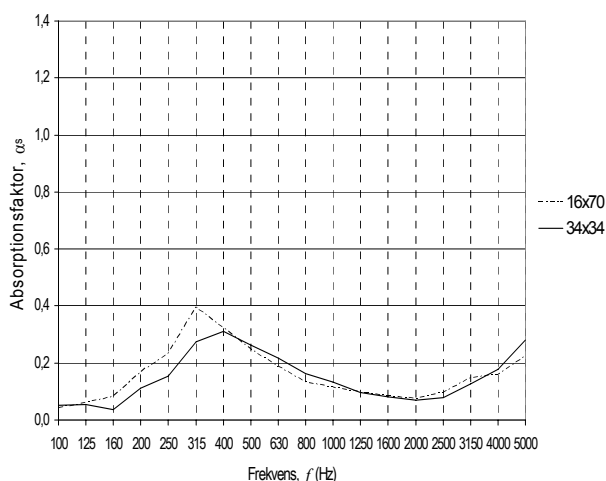
En annan möjlig orsak är *diffusion*, som i form av kantdiffraktion och hybriddiffusion medverkar till att ge förhöjningar av absorptionsfaktorn. För att säkerställa detta bör utförliga undersökningar göras på spaltpanelens egenskaper som diffusor, se avsnitt 6.2.2 Mätning av diffusion i efterklangsrum.

## 5.1.4 Skillnader i absorption mellan de två olika brädddimensionerna

### 5.1.4.1 Skillnader i absorptionens storlek

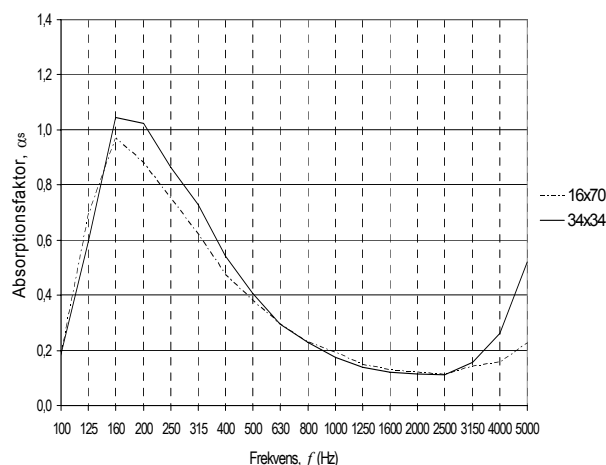
Följande skillnader har uppmätts kring resonansfrekvensen i absorptionsfaktorns storlek mellan spaltpanel med de två olika brädddimensionerna:

- I den *odämpade* spaltpanelen med spaltbredden 4 mm är den 0,1 större med brädddimensionen 16x70 mm än med 34x34 mm, se figur 5.11. Denna skillnad motsvarar nästan en tredjedel av absorptionsfaktorns storlek. Liknande skillnader finns med spaltbredderna 2 och 8 mm, men då endast av storleksordningen 0,05.



Figur 5.11: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 4 mm, bräda med dimension 16x70 mm resp. 34x34 mm, utan porös dämpning. Skillnader i absorptionens storlek mellan spaltpanel med olika brädddimensioner.

- När spaltpanelen är dämpad med stenull är den istället 0,1 större det vid spaltbredderna 2, 4 och 8 mm med brädddimensionen 34x34 mm än med 16x70 mm, se exempel vid spaltbredden 2 mm i figur 5.12.



Figur 5.12: Uppmätt absorption för spaltpanel med spaltbredd 2 mm, bräda med dimension 16x70 mm resp. 34x34 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt. Skillnader i absorptionens storlek mellan spaltpanel med olika brädddimensioner.

- När spaltpanelen är *dämpad med glasull* är den vid spaltbredderna 4 och 8 mm 0,05 större med brädddimension 34x34 mm än med 16x70 mm. Vid övriga spaltbredder är situationen helt omvänd.

I frekvensområden ovan och under resonans är skillnader i absorptionsfaktor mellan spaltpanel med de två olika brädddimensionerna följande:

- I den *odämpade* spaltpanelen är den vid spaltbredderna 2, 4 och 8 mm 0,05-0,1 större med brädddimension 16x70 mm än med 34x34 mm i frekvenser under resonans. I frekvenser över resonans är skillnaderna knappa.
- Med *stenull* som dämpning är den under resonansfrekvensen ca 0,05 större med brädddimension 16x70 mm än med 34x34 mm. I frekvenser ovanför resonans är skillnaden omvänd och dessutom betydligt större, i storleksordningen 0,1-0,2.
- Med *glasull* som dämpning är förhållandena de samma som med stenull som dämpning förutom vid låga frekvenser, där skillnaden är försumbar.

Vid höga frekvenser är absorptionen proportionell mot andelen öppen spaltarea, se figur 5.13.

Måtfall	Andel öppen spaltarea	Absorptionsfaktor, $\alpha_s$
Stenull (50 mm, $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ )	1	1,03
Spaltpanel, bräda 16x70 mm, 16 mm spaltbredd	0,19	0,58
Spaltpanel, bräda 34x34 mm, 16 mm spaltbredd	0,32	0,77
Spaltpanel, bräda 16x70 mm, 32 mm spaltbredd	0,31	0,75
Spaltpanel, bräda 34x34 mm, 34 mm spaltbredd	0,5	0,92

Figur 5.13: Jämförelse av förhållande mellan öppen area och absorptionsfaktorn  $\alpha_s$ , vid frekvensen 1250 Hz.

**5.1.4.2 Skillnad i absorptionstoppens tydlighet**  
Spaltpanelen med bräda av dimension 16x70 tenderar att ha något spetsigare absorptionstoppar vid resonansfrekvenserna än den med bräda av dimension 34x34.

- Denna tendens är tydlig med stenull som dämpning. Mest tydlig är den vid spaltbredderna 2 mm och 16 mm
- Med glasull som dämpning märks en liknande tendens endast vid den smalaste spaltbredden 2 mm.
- Utan porös dämpning är detta också ett faktum, främst vid spaltbredderna 4 och 8 mm.

#### 5.1.4.3 Resonansfrekvensens placering

Överlag har spaltpanelerna med de två olika bräddimensionerna sina absorptionsmaxima i samma tersband, dvs. deras resonansfrekvenser sammanfaller, med undantag för spaltbredderna 4 och 8 mm för det odämpade fallet. Vid båda dessa spaltbredder är resonansfrekvensen för spaltpanelen med brädddimensionen 34x34 mm, en ters större än för den med brädddimensionen 16x70 mm.

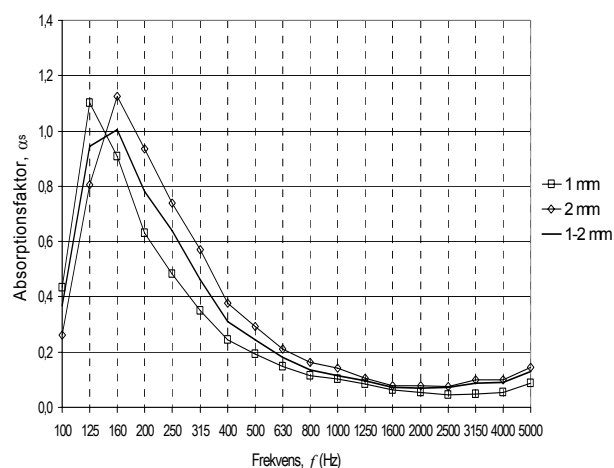
I och med de relativt bra överensstämmande resonansfrekvenserna för spaltpanelen med de två olika brädddimensionerna, kan konstateras att de egenskaper hos de båda brädorna som styr resonansfrekvensens storlek i princip tar ut varandra. Brädddimensionen 16x70 mm har en större bredd i förhållande till spaltbredderna än 34x34 mm, medan brädddimensionen 34x34 har ett större spalt djup i förhållande till spaltbredderna än 16x70 mm har.

### 5.1.5 Olika spaltbredder i spaltpanelen

Som en mindre sidundersökning gjordes i examensarbetet, enligt specifikationer i avsnitt 3.2.6 *Mätobjekt*, mätningar på spaltpaneler där den absorberande ytan delats in i två respektive tre delsektioner, vardera inställd med varsin spaltbredd.

#### 5.1.5.1 Kombination av spaltbredderna 1 och 2 mm

När halva ytan hos spaltpanelen var inställd med 1 mm breda spalter och halva med 2 mm breda spalter, erhöles en absorptionskurva med något bredare resonansstopp än absorptionskurvorna för spaltpanel med endast 1 mm respektive 2 mm breda spalter, se figur 5.13. Som följd av att den kombinerade spaltpanelens resonansstopp är något bredare, är dess maximala absorption lite lägre.

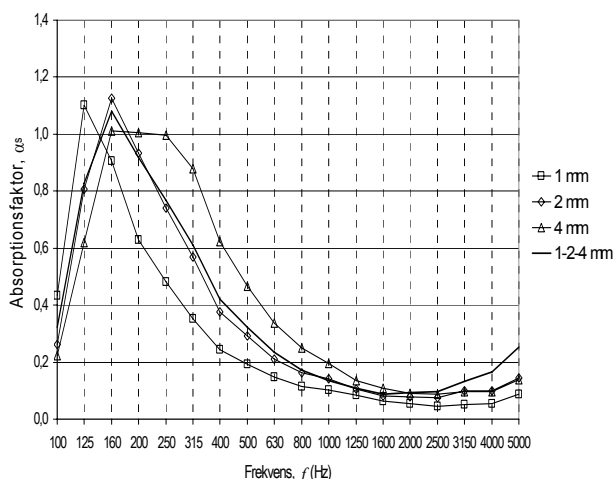


Figur 5.14: Uppmätt absorption för spaltpanel med kombination av de två spaltbredderna 1 och 2 mm, samt för spaltpanel med endast en av dessa spaltbredder över hela ytan, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Denna absorptionskurva är, även i övrigt, ett tydligt mellanting mellan kurvorna för spaltpanelen med spaltbredderna 1 och 2 mm respektive.

#### 5.1.5.2 Kombination av spaltbredderna 1, 2 och 4 mm

När spaltpanelens yta delades in i tre lika stora ytor, vardera inställd med en av spaltbredderna 1, 2 och 4 mm, blev dess absorptionskurva väldigt lik den för en spaltpanel med 2 mm spaltbredd över hela ytan, se figur 5.14.

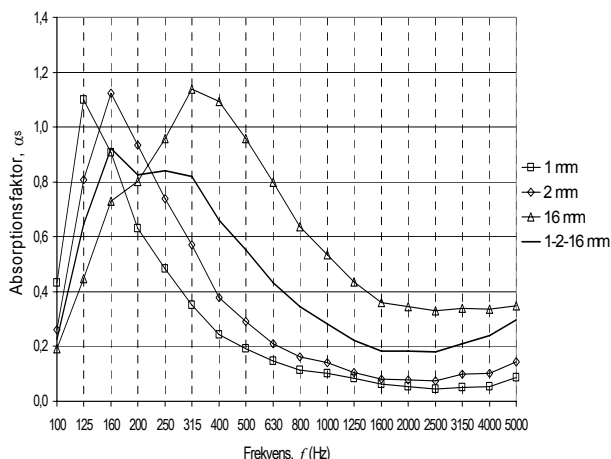


Figur 5.15: Uppmätt absorption för spaltpanel med kombination av de tre spaltbredderna 1, 2 och 4 mm, samt för spaltpanel med endast en av dessa spaltbredder över hela ytan, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ).

### 5.1.5.3 Kombination av spaltbredderna 1, 2 och 16 mm

När spaltpanelens yta delades in i tre lika stora ytor, vardera inställd med en av spaltbredderna 1, 2 och 16 mm, blev resultatet mer intressant ur användarsynpunkt.

Absorptionskurvan, för spaltpanelen med denna kombination, hade en betydligt bredare topp än de övriga. Den erhöles mellan frekvenserna 160 och 315 Hz. Absorptionsfaktorn är något större vid 160 Hz för att sedan vara ganska jämn över resten av toppen, se figur 5.15.



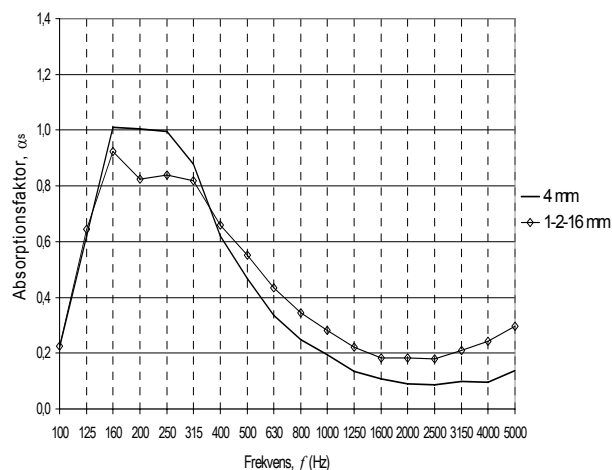
Figur 5.16: Uppmätt absorption för spaltpanel med kombination av de tre spaltbredderna 1, 2 och 16 mm, samt för spaltpanel med endast en av dessa spaltbredder över hela ytan, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ).

I jämförelse med absorptionen för spaltpanelerna med en av spaltbredderna 1, 2 respektive 16 mm

över hela ytan, hade denna kombinerade spaltpanel en betydligt lägre maximal absorptionsfaktor. Samtidigt erhöles en betydligt större absorption vid frekvenser under 200 Hz, än med spaltpanel med endast spaltbredden 16 mm samt en betydligt större absorption vid frekvenser över 250 Hz än för både spaltpanel med 1 mm breda spalter och 2 mm breda spalter över hela dess yta.

Om tid hade funnits kunde det ha varit intressant att försöka hitta en ultimat kombination av spaltbredder för en så bred absorption som möjligt.

Det konstateras att vid jämförelse med spaltpanelen med endast 4 mm spalter över hela dess yta var absorptionen för denna kombinerade spaltpanel något underlägsen, om målet är att uppnå en så god lågfrekvensabsorption som möjligt, se figur 5.16.



Figur 5.17: Uppmätt absorption för spaltpanel med kombination av de tre spaltbredderna 1, 2 och 16 mm i jämförelse med absorption för spaltpanel med 4 mm spalt över hela ytan, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ).

Figuren visar att spaltpanelen med spaltbredden 4 mm över hela dess yta har en något större absorptionsfaktor i det gemensamma området för de båda spaltpanelernas absorptionstopp, dvs. mellan frekvenserna 160 och 315 Hz.

## 5.2 Jämförelse med beräkningsprogrammet WinFLAG 2.0

WinFLAG 2.0 är ett program som används för beräkning av absorptionsfaktor, ytimpedans och ljudreduktionsindex för konstruktioner som består av kombinationer av olika lager av material [16].

Beräkningar kan göras vid en viss frekvens eller som medelvärde i ett tersband.

Användaren kan välja mellan 3 modeller för olika typer av ljudfält:

- *fritt fält* där beräkningen görs för en specifik infallsvinkel
- *diffust fält* där ett medelvärde för alla infallsvinklar beräknas
- ett fält som ska motsvara *ljudfältet i ett efterklangsrum*.

Användaren kombinerar själv befintliga lager av material, för att bygga upp den konstruktion man önskar undersöka. Egenskaper för varje lager kan också ändras efter behag.

Resultat presenteras grafiskt i ett diagramfönster.

I detta examensarbete har de uppmätta värdena på absorption hos spaltpanelen jämförts med absorptionsberäkningar i WinFLAG 2.0.

Olika inställningar testades i programmet för att erhålla bästa möjliga överensstämmelse med de uppmätta mätvärdena. Följaktligen kan resultaten av jämförelsen tolkas som förslag på lämpliga inställningar vid körning av programmet.

Analys av orsaken till att just dessa inställningar leder till bättre överensstämmelse med det uppmätta har inte inrymts i examensarbetet.

## 5.2.1 Varierbara parametrar

### 5.2.1.1 Spaltpanelens dimensioner

Precis som för det verkliga mätobjektet kan geometriska parametrar och egenskaper hos porösa material ställas in.

### 5.2.1.2 "Slotted plate"

Lagret som motsvarar själva panelen av brädor i det verkliga fallet, kallas i programmet för "slotted plate".

Det bör nämnas att "slot" lika gärna kunde beteckna en slits med en viss längd. I programmet antas den dock vara oändligt lång precis som alla ytor i programmet. För diskussion kring olika benämningar på spaltpanel, se avsnitt 5.5.1 *Tänkbara benämningar*.

### 5.2.1.3 Modeller för porös dämpning

Det finns möjlighet att välja mellan fyra olika teoretiska modeller för beräkning av det porösa lagrets dämpande verkan i spaltpanelen. Dessa representeras av varsitt lager under "Add layer".

### 5.2.1.4 "Resistance correction"

I ett fall där det porösa lagret ligger an panelen antingen på fram- eller baksidan kan parametern "resistance correction" ställas in. Detta är ett tillägg till det porösa lagrets dämpande förmåga, som ska ändras efter erfarenhet.

## 5.2.2 Inställningar vid körning

På följande sätt ändrades inställningar under beräkningarna:

- Geometriska parametrar hos spaltpanelen varierades efter det verkliga fallet.
- Ljudinfallet varierades mellan "reverberation room" och "diffuse". När modellen för efterklangsrummet, "reverberation room", används antas mätobjektet ha kvadratisk form. Dess sida ställdes in på 3,24 m som motsvarar roten ur den area som mätprovet hade i verkligheten.
- Två av de fyra modellerna för porösa lagrets dämpande verkan i spaltpanelen användes, "Delany och Bazleys" samt "Mechels" modeller.
- Med båda modellerna för porösa lagrets dämpande verkan i spaltpanelen prövades tre värden på parametern "resistance correction". Den ställdes in på  $RC=0$ ,  $RC=0,5$  respektive  $RC=1,0$ .

För spaltpanel, med de båda porösa bakgrunderna, undersöktes för varje spaltbredd vilken av de två modellerna för beräkning av porös absorption, samt vilket värde på "resistance correction" som leder till bäst överensstämmelse med, de i examensarbetet, uppmätta värdena.

För spaltpanel, med endast luft i utrymmet mellan panel och bakomliggande hårda yta, gjordes en beräkning för varje spaltbredd.

Det bör nämnas att WinFLAG 2.0 inte klarar av att beräkna en trovärdig absorption för spaltpaneler

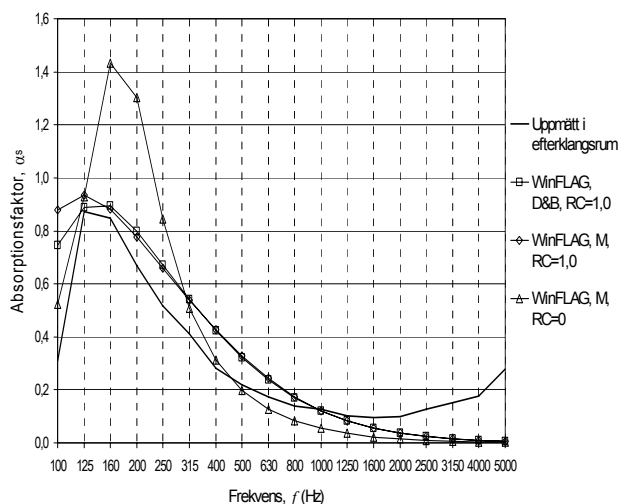
med större spaltarea än ca 40 % av totala arean. Trots detta har beräkningar i detta examensarbete utförts även med spalter på 32 mm, vilka i själva verket motsvarar en spaltarea på ~46% av den totala arean.

### 5.2.3 Stenull som dämpning

I detta fall bestod det 70 mm tjocka utrymmet mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan av ett 50 mm tjockt lager av stenull med densitet  $70 \text{ kg/m}^3$ , liggande an mot panelen, ovanpå en 20 mm tjock luftspalt, precis som i den verkliga spaltpanelen.

”Reverberation room” som val av modell för ljudinfall ger betydligt bättre överensstämmelse med uppmätta resultat än ”diffuse”. Följaktligen gäller följande iakttagelser om överensstämmelse med uppmätta resultat för beräkningar med ”reverberation room”:

- Bästa överensstämmelse med uppmätta värden för både resonansfrekvens och absorptionens storlek erhålls vid spaltbredderna 1 och 32 mm, se exempel i figur 5.17, medan sämsta överensstämmelse erhålls vid spaltbredderna 8 och 16 mm.



Figur 5.18: Jämförelse mellan uppmätt absorption och beräknad absorption i Winflag 2.0. Spaltbredd 1 mm, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

- Av de två testade modellerna för det porösa lagret gav ”Delany och Bazleys” modell bäst överensstämmelse med uppmätta värden.

- Av testade värden på ”resistance correction”, erhålls bästa överensstämmelse med uppmätta resultat, vad gäller resonansfrekvens och maximala absorptionens storlek när  $RC=1,0$ . Denna inställning ger dock en överdriven absorption vid frekvenser under resonans. När den istället ställs in på  $RC=0$  ser man tydligare var spaltpanelen börjar absorbera, men denna inställning ger å andra sidan en överskattning av absorptionsmaximum med ca 0,4 och en förskjutning uppåt av resonansfrekvensen med ca 1 tersband, och bör i detta fall kombineras med ”Mechels” modell för det porösa lagret, se figur 5.17.

### 5.2.4 Glasull som dämpning

I detta fall innehöll utrymmet mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan ett 70 mm tjockt lager av glasull med densitet  $14,5 \text{ kg/m}^3$ , som följaktligen fyllde hela utrymmet precis som i den verkliga spaltpanelen.

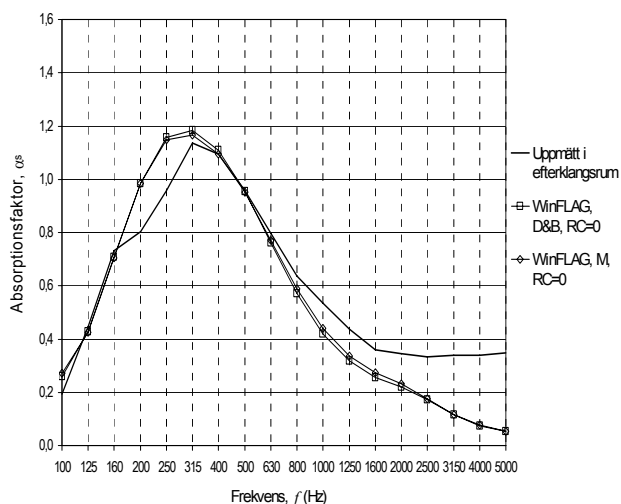
Även här är ”reverberation room” det val av ljudinfall, som ger bäst överensstämmelse med uppmätta resultat.

Med glasull som dämpning, erhålls resultat som skiljer sig väldigt lite från varandra när olika modeller för den porösa absorptionen samt olika värden på parametern ”resistance correction” använts, samtidigt som de skiljer sig mer från de uppmätta resultaten än när dämpningen bestod av stenull.

Vid små spaltbredder överskattar WinFLAG värdet på absorptionsfaktorn. Detta kan förklaras med att Thomassons formel för ”kanteffekter”, som använts vid programmeringen av ”reverberation room”-modellen egentligen är begränsad till att gälla endast för lokalt reagerande ytor [16,17]. Faktum är att när den formulerades, utfördes mätningar endast på porösa absorbenter. Detta leder till en något överskattad absorptionsfaktor för resonansabsorbenter som t ex spaltpanelen.

- Bästa överensstämmelse med uppmätta värden på både resonansfrekvens och absorptionens storlek erhålls vid spaltbredden 16 mm, se figur 5.18, och den sämsta vid spaltbredderna 1, 2 och 4 mm.





Figur 5.19: Jämförelse mellan uppmätt absorption och beräknad i Winflag 2.0. Spaltbredd 16 mm, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ). Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

- För parametern "resistance correction", erhålls bäst överensstämmelse med uppmätta värden när  $RC=0$  används, både vad gäller resonansfrekvensens och absorptionsfaktorns storlek. Från 800 Hz och uppåt underskattas dock absorptionen något.
- Som redan nämnts var skillnaderna mellan de olika modellerna för porös absorption väldigt små. "Mechels" beräkningsmodell leder dock till aningen bättre överensstämmelse.
- Även med glasull som dämpning ger WinFLAG en överskattad absorption under resonansfrekvensen, i jämförelse med uppmätta värden.

## 5.2.5 Utan porös dämpning

Med endast luft bakom panelen underskattar WinFLAG absorptionsfaktorns storlek ordentligt gentemot uppmätta resultat. Däremot stämmer de flesta resonansfrekvenserna överens väldigt bra med de uppmätta.

Valet av "reverberation room" eller "diffuse" spelar ingen roll vid beräkning av absorptionen hos spaltpanelen utan porös dämpning. Båda ger i stort sett samma resultat.

## 5.3 Jämförelse med beräkningsprogrammet Absorb

Absorb är ett program från Marshall Day Acoustics som används för beräkning av absorption hos konstruktioner uppbyggda med kombinationer av olika lager av material [18].

I detta program kan absorptionsfaktorn beräknas för två olika typer av ljudinfall:

- "normal incidence absorption coefficient" är absorptionsfaktorn när ljudet faller in 90 grader mot absorbentytan
- "random incidence absorption coefficient" motsvarar absorptionsfaktorn uppmätt i ett efterklangsrum.

Programmet är användarvänligt med dess illustrativa och tydliga upplägg.

Alla egenskaper hos vardera lager skrivs in direkt i aktuell figur i programfönstret.

I examensarbetet har en jämförelse även med detta, relativt nya program, utförts i syfte att bestämma lämpliga inställningar på parametrar som går att variera.

### 5.3.1 Varierbara parametrar

#### 5.3.1.1 Spaltpanelens dimensioner

Även i Absorb kan geometriska parametrar och egenskaper hos porösa material ställas in. Användaren fyller i dessa direkt i figurer som illustrerar de olika lagren.

#### 5.3.1.2 "Slatted plate"

Även i detta program finns ett lager som kallas "slotted plate". För detta lager ställs dock en längd in för parametern "slot", som med andra ord här betecknar en slits. För uppbyggnad av en spaltpanel ska inte detta alternativ väljas utan istället det som kallas "slatted plate". För närmare inblick i tänkbara benämningar, se avsnitt 5.5.1 *Tänkbara benämningar*.

#### 5.2.1.3 Modeller för porös dämpning

Det finns 8 olika beräkningsmodeller för porös absorption i detta program. I dessa kan inga andra egenskaper ställas in än densitet eller alternativt strömningsmotstånd.

### 5.3.2 Inställningar vid körning

- Precis som i WinFLAG ställdes i Absorb spaltpanelens geometriska parametrar in efter den verkliga spaltpanelen.
- Ljudinfallet ställdes in på "random incidence absorption coefficient".
- Fyra av åtta beräkningsmodeller för porös absorption har prövats i denna undersökning: "Allard och Champoux", "Delany och Bazley", "Mechel" samt "Rayleigh".

För spaltpanel, med stenull respektive glasull som dämpning, undersöktes för varje spaltbredd vilken av de fyra modellerna för beräkning av porös absorption som gör att överensstämmelsen med de uppmätta värdena blir bäst.

För spaltpanel, med endast luft i utrymmet mellan panel och bakomliggande hård yta, gjordes en beräkning för varje spaltbredd.

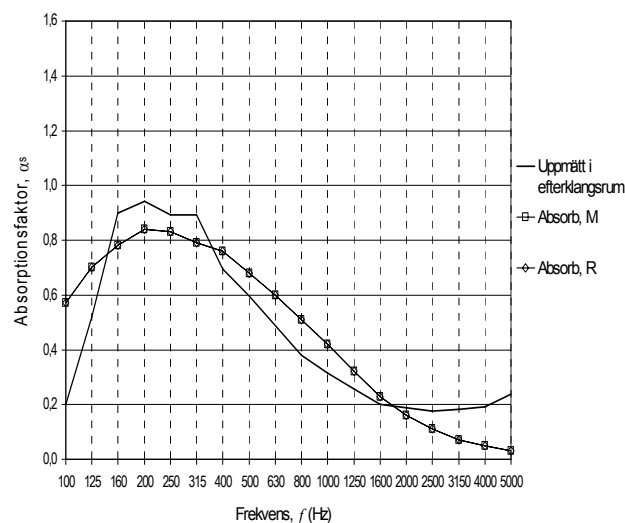
### 5.3.3 Stenull som dämpning

Precis som i den verkliga spaltpanelen bestod i detta fall det 70 mm tjocka utrymmet mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan i programmet av ett 50 mm tjockt lager av stenull med densitet  $70 \text{ kg/m}^3$  liggande an mot panelen och ovanpå ett 20 mm tjockt lager av luft.

Resultat av beräkningar med de olika modellerna för det porösa lagret skiljer sig ytterst lite från varandra, förutom vid låga frekvenser. Beräknade resonansfrekvenser vid de flesta spaltbredderna stämmer bra överens med de uppmätta. Överlag verkar dock de beräknade kurvorna vara aningen underskattande vad gäller absorptionsfaktorns storlek vid resonansfrekvensen, i jämförelse med uppmätta värden.

- Bäst överensstämmelse med avseende på både resonansfrekvens och absorptionsfaktor erhålls för spaltbredden 4 mm. Storleken på den beräknade absorptionsfaktorn är dock ungefär 0,1 mindre än den uppmätta i frekvensområdet 160-315 Hz och vid frekvenser lägre och högre än detta område är den ungefär lika mycket överskattad.

- Bästa överensstämmelsen mellan de uppmätta och de beräknade kurvorna erhålls, vid stenulldämpning, med Rayleighs modell för det porösa lagret.



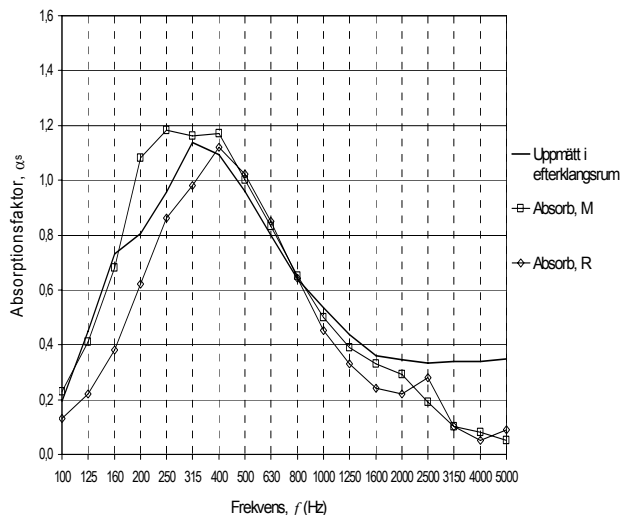
Figur 5.20: Jämförelse mellan uppmätt absorption och beräknad i Absorb. Spaltbredd 4 mm, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

### 5.3.4 Glasull som dämpning

I detta fall innehöll utrymmet mellan panelen och den bakomliggande hårda ytan ett 70 mm tjockt lager av glasull med densitet  $14,5 \text{ kg/m}^3$ , som därmed fyllde hela utrymmet precis som i det verkliga mätobjektet samt under körningen i WinFLAG.

- Med glasull som dämpning, är även den i Absorb beräknade absorptionsfaktorn vid resonansfrekvens något överdriven för de fyra smalaste spaltbredderna, i jämförelse med uppmätta värden, när modellen för det porösa lagret är någon av "Delany och Bazley", "Mechel" eller "Allard och Champoux".
- Överensstämmelsen är bäst vid spaltbredden 16 mm, se figur 5.20. Överhuvudtaget är absorptionskurvorna väldigt lika de kurvor i WinFLAG som bäst stämde överens med de uppmätta.
- När Rayleighs modell för det porösa lagret används är absorptionsfaktorn överdriven endast vid spaltbredderna 1 och 2 mm, varefter den successivt avtar i storlek för

att vara något underskattad från spaltbredderna 8 mm och uppåt. För Rayleighs beräkningsmodell är formen på kurvorna väldigt lik de uppmätta kurvorna, men resonansfrekvensen är hela tiden förskjuten ett tersband uppåt i frekvens, i jämförelse med de uppmätta kurvorna. Störningar erhålls för kurvorna vid höga frekvenser, för de större spaltbredderna.



Figur 5.21: Jämförelse mellan uppmätt absorption och beräknad i Absorb. Kurvan för den beräkning där Mechels porösa modell använts stämmer väl överens med den uppmätta i storlek, för de flesta frekvenser, medan Rayleighs kurva stämmer bra till formen. Spaltbredd 16 mm, bräda med dimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ). Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

### 5.3.5 Utan porös dämpning

Med endast luft bakom panelen underskattar Absorb absorptionens storlek, samtidigt som resonansstoppen blir förskjuten nedåt i frekvens. Störningar uppstår vid höga frekvenser, redan för de smalaste spaltbredderna.

## 5.4 Benämning av spaltpanelen

Benämningen på den typ av resonansabsorbent som i detta examensarbete undersökts kan diskuteras. Det är inte alltid helt enkelt och tydligt vad som åsyftas med en viss benämning i en teknisk artikel. Detta gäller också i litteratur om spaltpanelen. Den har genom åren haft många olika benämningar, både i svensk- och engelskspråkig litteratur. Syftet med att göra en mindre undersökning av detta i examensarbetet är

helt enkelt att göra det enklare för läsaren att tolka referenserna.

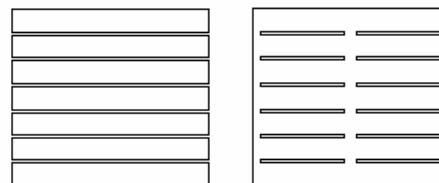
Nedan följer tänkbara benämningar på det aktuella systemet, och en mindre diskussion om deras lämplighet och motiv.

### 5.4.1 Tänkbara benämningar

Nedan följer redogörelse över några av de vanligaste benämningarna i litteraturen, samt kommentarer till dessa. Dessutom omnämns några andra möjliga benämningar.

#### 5.4.1.1 Redogörelse över parametrar

Systemet består som tidigare nämnts av brädor som fästs sida vid sida så att spalter bildas mellan dem, se bilden till vänster i figur 5.21. En liknande konstruktion av akustiskt system använder istället en platta med viss tjocklek, i vilken slitsar sågats, se bilden till höger i figur 5.21. Den sistnämnda konstruktionens funktion har i detta examensarbete inte berörts.



Figur 5.22: Bilden till vänster illustrerar det man på svenska benämner spalter och den till höger illustrerar slitsar.

Benämningarna till de i figuren illustrerade parametrarna skiljer sig således tydligt åt på svenska.

På engelska är dock benämningen på spalt och slits inte lika tydliga. "Slit" och "slot" används i litteratur både vid beskrivning av slitsar och spalter.

Något som också kan vara förvirrande är att panelbrädorna som illustreras till vänster i figur 5.21 på engelska benämns "slats".

#### 5.4.1.2 Redogörelse kring benämningar för systemet på svenska

I examensarbetet har jag valt att kalla systemet för *spaltpanel*, som är den vanligaste benämningen inom rumsakustiken. Spaltpanel innefattar både systemets absorberande och diffuserande

egenskaper, samtidigt som den inte nämner dessa. På så vis varken utesluter den eller fastställer någon av systemets funktioner. Kanske är det detta faktum som gör spaltpanel till den mest lämpliga svenska benämningen.

*Spaltabsorbent*, används av O. Brandt [8]. Benämningen beskriver tydligt systemets absorberande egenskaper, medan den försummar dess diffusionsegenskaper.

*Spaltresonator*, skulle kunna vara en möjlig benämning. Den kan dock vara aningen vilseledande då en resonator egentligen förstärker ljudet, medan resonansen i detta fall sker inne i systemet. Inte heller denna benämning tar hänsyn till diffusionsegenskaperna.

#### 5.4.1.3 Redogörelse kring tänkbara benämningar för systemet på engelska

*Slitted panel absorber* (eng.), är en benämning på en slitsad panelabsorbent [21].

*Resonant absorber using a slotted plate* (eng.), används i första hand för att beskriva en slitsad panel absorbent [3]. Benämningen kan lika gärna användas för en spaltpanel.

*Slit resonator* (eng.), är en benämning på en slitsad panelabsorbent [20].

*Slatted panel absorber* (eng.), är en benämning av spaltpanelen [22].

*Slat absorber* (eng.), är en benämning av spaltpanelen [18].

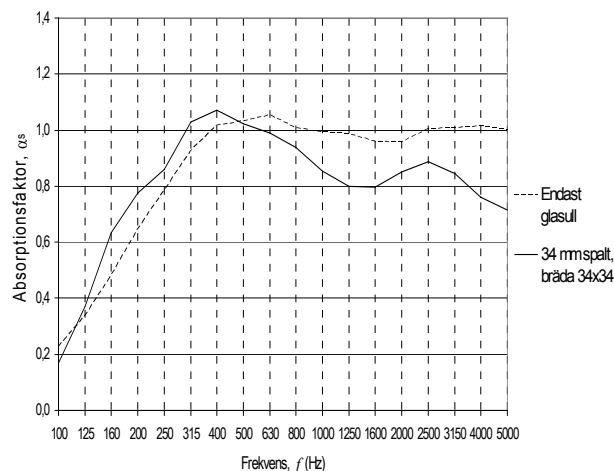
## 5.5 Referensobjekt

### 5.5.1 Plenisalen

En av orsakerna till att absorption skulle uppmätas för spaltpanel med bräda av dimension 34x34 mm var att Ingemansson är inblandad i renoveringen av Plenisalen i Sveriges Riksdag. Bakre väggen ska där vara täckt av spaltpanel med bräda av dimension 34x34 mm och spalter med bredden 34 mm. Bakom skall finnas 60 mm glasull med en densitet på ca 20 kg/m<sup>3</sup>.

Resultatet av mätning på spaltpanel med bräda av dimension 34x34 mm, 34 mm spaltbredd och

porös dämpning i form av 70 mm glasull med densitet  $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ , redovisas grafiskt i figur 5.22.



Figur 5.23: Absorption hos spaltpanel av bräddimension 34x34 mm, med 34 mm spaltbredd och 70 mm porös dämpning i form av glasull med densitet  $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ . Här i jämförelse med absorption hos 70 mm glasull med densitet  $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ .

Figuren visar att denna spaltpanels absorption liknar glasullens absorption. Detta är en följd av den stora exponeringsgraden av den porösa dämpningen.

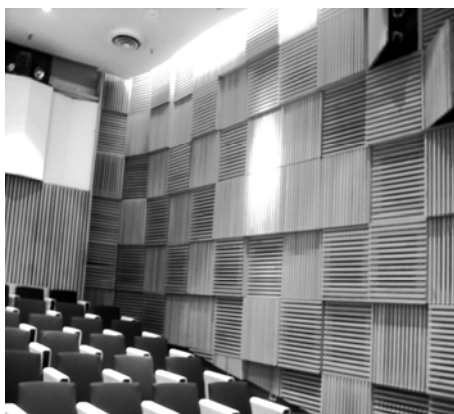
### 5.5.2 Hörsal i Philips gamla kontorsbyggnad

I examensarbetet gjordes en mätning av efterklangstiden i en hörsal, byggd 1963 åt Philips.

Lokalen har både akustiskt och estetiskt spännande spaltpaneler på samtliga väggytor.

På bakre väggen sitter en spaltpanel av brädor med dimensionen 40x40 mm, spaltbredden 30 mm och varierande dämpning.

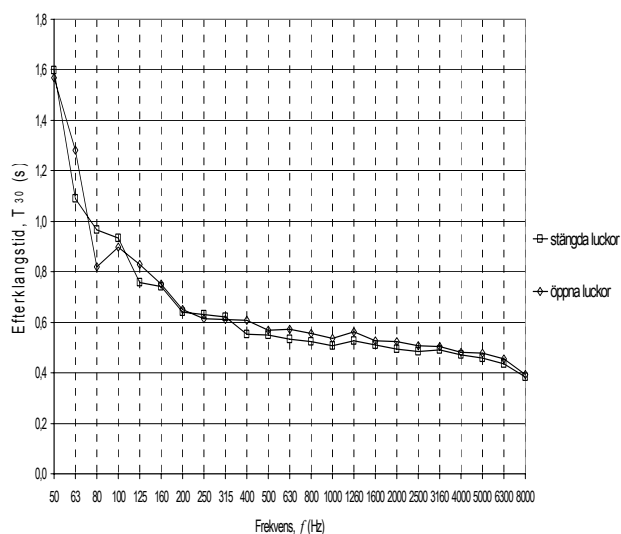
Salens båda sidoväggar är täckta av spaltpaneler i sektioner om ungefär 0,55 m<sup>2</sup>, bestående av brädor med dimensionen 25x25 mm, spaltbredden 25 mm och varierande dämpning.



Figur 5.24 : Spaltpanel av två olika typer i hörsal byggd åt Philips 1963, Tegelhuddsvägen, nuvarande fastighetsägare Vasakronan.

På bakre väggen finns också möjlighet att öppna luckor som bildar volymdiffusorer.

Mätningar av efterklangstiden i denna hörsal gjordes både med dessa luckor stängda och öppna. Resultaten redovisas nedan grafiskt i figur 5.24.



Figur 5.25: Efterklangstider i hörsalen på Tegelhuddsvägen, med luckor stängda respektive öppna.

### 5.5.3 "Happy New Ears"

Spaltpanelen som byggts och varit mätobjekt i detta examensarbete, används nu som ljudabsorbent för låga frekvenser i ett rum som planerats och konstruerats av Philip Zalyaletdinov

från Luleå Tekniska Universitet, i samarbete med Ingemansson Technology.

Utställningen "Happy new ears" på Wetterlings Galleri i Stockholm, består av ett rum byggt för auralisering. Ljudkonst ställs ut i rummet i samband med *Designåret 2005*.

Den aktuella spaltpanelen har bräddimension 16x70 mm och en spaltbredd på 4 mm. Direkt bakom panelen ligger 70 mm glasull med densitet 14,5 kg/m<sup>3</sup> och därefter 50 mm stenull med densitet 70 kg/m<sup>3</sup> och sedan en ca 50 mm tjock luftspalt innan den hårda bakomliggande väggen. Den är täckt av ett sammetliknande draperi

### 5.5.4 Konferenscenter Morskogen

Det finns många exempel på att spaltpanel används av arkitektoniska skäl. Taket till restaurangen på konferenscentret Morskogen i Leksand är försett med spaltpanel bestående av brädor med ungefärlig dimension 16x70 mm, se figur 5.25. Denna spaltpanel fungerar dock inte riktigt som den i examensarbetet undersökta, då den är försedd med en tät plastduk bakom panelbrädorna, vilket också ger den en funktion som membranabsorbent.



Figur 5.26: Spaltpanel i taket till restaurangen på Konferenscentret Morskogen i Leksand, bestående av brädor med ungefärlig dimension 20x90 mm och dämpning med flätad plastduk (foto Tobias Kirchner).

## 6 Slutsatser

### 6.1 Slutsatser av mätning och beräkning

Det diskuteras ofta kring spaltpanelens funktion. Examensarbetet visar att den består av ett system med samverkande mekanismer som porös absorption, resonansabsorption och diffusion.

#### 6.1.1 Porös dämpning

Av de två varianterna på porös dämpning som använts i mätningarna bör stenullen ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ , 50 mm på 20 mm luftspalt) väljas för att uppnå så bred absorption som möjligt med spaltpanelen.

Om syftet är att absorbera i låga frekvenser är glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ , 70 mm) som dämpning något mer fördelaktig.

#### 6.1.2 Bräddimension

Spaltpanel med brädddimension 34x34 mm ger en något större absorptionsfaktor med både stenull och glasull som dämpning.

Med brädddimension 16x70 erhålls en skarpare absorptionstopp, vilket kan ha med brädans bredd i förhållande till spaltens bredd att göra.

I frekvenser över 1000 Hz är spaltpanelens absorptionsfaktor i princip proportionell mot andel öppen area.

#### 6.1.3 Spaltpanelen som Helmholtz-resonator

Som följd av den goda överensstämmelsen mellan uppmätta och beräknade resonansfrekvenser kan slutsatsen dras att spaltpanelen fungerar som en Helmholtzresonator vid låga frekvenser, eftersom de teorier som använts i beräkningarna utgår från att spaltpanelen är en typ av Helmholtzresonator.

Hos de uppmätta absorptionskurvorna för spaltpanelen utan porös dämpning, se figur 5.1, syns tydliga tendenser till toppar vid en viss frekvens. Dessa är följder av resonanssvängningar hos systemet.

#### 6.1.4 Spaltpanelen som diffusor

Resultat från mätningar visar att spaltpanelen fungerar som en diffusor vid höga frekvenser, se avsnitt 5.1.3.4 *Ökande absorptionsfaktor vid höga frekvenser*.

Vid vilken frekvens dessa effekter börjar, måste studeras vidare, men uppenbart är att den beror på spaltpanelens dimensioner.

#### 6.1.5 Överensstämmelse med WinFLAG

Efter jämförelse mellan uppmätt absorption i efterklangsrummet och beräkningsprogrammet WinFLAG 2.0 dras slutsatsen att överensstämmelsen skiljer sig betydligt beroende på hur lagret bakom panelen ser ut, d.v.s. om det är stenull, glasull eller luft.

- Alternativet "reverberation room" för modellering av ljudfältet, bör användas vid denna typ av jämförelse eftersom den, förutom något överdrivna effekter av kantdiffraktion, leder till den bästa överensstämmelsen med, i examensarbetet, uppmätta värden.
- När stenull, av den undersökta typen, ska användas som dämpning i spaltpanelen, bör beräkningar utföras med "Delany och Bazleys" modell för det porösa lagret samt parametern "resistance correction" inställd på RC=1,0. Det ska dock kännas till att programmet vid dessa inställningar ger än något bredare absorption än det uppmätta. För att se vid vilken frekvens spaltpanelen börjar absorbera ger "Mechels" modell för det porösa lagret och "resistance correction" inställd på RC=0, ett bättre överensstämmande resultat, men då ska man känna till att absorptionsmaximum är överskattat med ca 0,4 och resonansfrekvensen är förskjuten uppåt ca 1 tersband.
- När glasull ska användas som porös dämpning spelar valet av modell för det porösa lagret mindre roll medan parametern resistance correction bör ställas in på RC=0. Det bör beaktas att

WinFLAG i detta fall ger en överskattning av absorptionsfaktorn på ca 0,3-0,4 vid resonansfrekvensen, för de smalaste spaltbredderna.

### 6.1.6 Överensstämmelse med Absorb

Jämförelsen som gjordes mellan uppmätt absorption och beräkningsprogrammet Absorb visar att följande inställningar bör användas:

- När stenull ska användas som dämpning i spaltpanelen bör "Rayleighs" modell för det porösa lagret väljas för bästa möjliga överensstämmelse med uppmätt absorption. Man bör känna till att även med denna inställning är absorptionen bredare än den uppmätta. Främst vid låga frekvenser är den överskattad.
- När glasull ska användas som porös dämpning i spaltpanelen bör "Mechels" modell för det porösa lagret användas. Dock ger denna inställning ett överskattat absorptionsmaximum med ca 0,2-0,4 för spaltbredder upp till 8 mm.

### 6.1.7 Uppskattning av resonansfrekvens

För att bestämma resonansfrekvensen hos en spaltpanel bör Kristiansen och Vigrans formler, se avsnitt 2.3.4.2 *Teori 2*, användas. Med dessa formler beräknas en resonansfrekvens för spaltpanel utan porös dämpning.

Vidare kan en resonansfrekvensen för spaltpanel med någon av de två porösa dämpningarna, som använts i detta examensarbete, uppskattas ligga ca 2 tersband lägre.

För att uppskatta absorptionen i övriga frekvenser bör något av beräkningsprogrammen WinFLAG 2.0 eller Absorb användas. För lämpliga inställningar i dessa program, se avsnitt 6.1.5 *Överensstämmelse med WinFLAG 2.0* eller 6.1.6 *Överensstämmelse med Absorb*.

Absorptionskurvan har två olika lutningar för spaltpaneler som har sin resonansfrekvens ovanför 160 Hz. Lutningen är kraftig upp till 160 Hz för att sedan avta något upp till respektive resonansfrekvens.

### 6.1.8 Är det fördelaktigt att ha olika spaltbredder över samma spaltpanel

Av mätningarna som beskrivs i avsnitt 5.1.8 *Olika spaltbredder i spaltpanelen*, att döma kan kombinationer av olika spaltbredder över en spaltpanel vara fördelaktigt, om skillnaden mellan spalterna är relativt stor, så att absorptionen påverkas av alla spaltbreddernas starka egenskaper. På så vis kan en så bred absorption som möjligt erhållas.

## 6.2 Rekommendationer för framtida undersökningar

### 6.2.1 Effektivare mätning av spaltpanel

#### 6.2.1.1 MDF-Board

För att effektivisera variationen av spaltbredderna kunde det vara intressant att eliminera "byråldseffekten" vid förflyttning av panelbrädorna. Ofta uppkommer denna effekt när panelbrädan är aningen böjd. Om man istället använde sig av sågade "brädor" av en hårt sammanpressad träfiberskiva, t ex MDF-board, kunde större styvhet och därmed effektivare hantering av panelen erhållas.

Ur brandsynpunkt skulle det också vara en fördel att använda denna typ av material istället för trä.

Däremot kunde de längder som här skulle vara aktuella löpa större risk att knäckas, vid t ex transport.

#### 6.2.1.2 Löstagbar panel av brädor

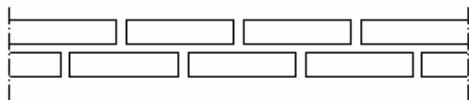
Den största tidsbesparingen skulle erhållas om panelen av brädor kunde lyftas av för att byta dämpning. Också i detta examensarbets början diskuterades möjligheter till detta. Men utan att inse storleken på besparing av tid och kraft, detta skulle innebära, valdes att utföra konstruktionen enligt avsnitt 3.2.6.3 *Konstruktion av spaltpanelen*.

### 6.2.2 Spaltpanel med tillräcklig dämpning utan poröst material

Numera har det blivit allt vanligare med studier kring möjligheterna att erhålla den nödvändiga dämpningen i en resonansabsorbent utan porösa material [6]. Det har blivit något av en utmaning

att finna naturliga förlustmekanismer som går att applicera på dessa typer av konstruktioner.

En typ av resonansabsorbent som använder naturliga förluster som dämpning i systemet är en spaltpanel [19] som använder sig av förlängda laterala spalter för att åstadkomma en större dämpning.



Figur 6.1: Ett exempel på spaltpanel med tillräcklig dämpning utan porösa material är den som använder naturliga förluster i lateralt förlängda spalter.

### 6.2.3 Mätning av diffusion i efterklangsrum

Under examensarbetets gång diskuterades möjligheterna till mätning av diffusion hos spaltpanelen.

Detta skulle i så fall ha utförts enligt SS-ISO 17497-1 *Mätning av spridningskoefficient vid diffust ljudinfall i efterklangsrum* [23].

Mätobjektet i detta examensarbete hade fel storlek och en för hög absorptionsfaktor.

### 6.2.4 FEM-beräkning av spaltpanels absorption

Möjligheterna att jämföra mätning med en modell uppbyggd av finita element för den typ av spaltpanel som undersökts i detta examensarbete har diskuterats.

Utrymme för denna typ av studier fanns dock inte i detta examensarbete som främst skulle åstadkomma uppbyggnad och uppmätning i efterklangsrum.

Det finns redan färdiga FEM-program för akustisk planering, som kunde tänkas användas i syfte att undersöka spaltpanelens funktion. Detta skulle kräva ett tilläggsprogram, BEM, för speciella gränsvärdesproblem.



## Referenser

- [1] Bengt Fessé (1972), *Studium av spaltabsorbent*, Byggnadsakustik, Kungliga Tekniska Högskolan
- [2] P.O. Pedersen (1940), *Lydtekniske undersøgelser*, Ingeniørvidenskabelige skrifter, Nr 5
- [3] U.R. Kristiansen & T.E. Vigran (1994), *On the design of Resonant Absorbers Using a Slotted Plate*, Applied Acoustics, Vol. 43, 39-48
- [4] H Bodén, U Karlsson, R Glav, H P Wallin & M Åbom (2001), *Ljud och Vibrationer*, Norstedts Tryckeri AB
- [5] SEN 01 15 01, *Akustisk ordlista – Allmän akustik och elektroakustik (SEN 01 15 01:1966)*
- [6] T.J. Cox & P D'Antonio (2004), *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*, Spon Press
- [7] *Nationalencyklopedin* (1994), Bokförlaget Bra Böcker AB, Höganäs
- [8] O. Brandt (1958), *Akustisk planering - Handbok nr 1*, Statens nämnd för byggnadsforskning
- [9] K. Andersson & Å Nyström (1988), "Optimization of a slitted absorber in the low frequency range", Teknisk Akustik, Chalmers Tekniska Högskola
- [10] Heinrich Kuttruff (2000), *Room acoustics – fourth edition*, Spon Press
- [11] WinMLS (2004), Morset Sound Development, Lars Morset
- [12] SS-EN ISO 3382, *Mätning av efterklangstid i rum, med hänvisning till andra akustiska parametrar (ISO 3382:1997)*
- [13] SS-EN ISO 354, *Mätning av ljudabsorption i efterklangsrum (ISO 354:2003)*
- [14] SS-ISO 9613-1, *Dämpning av ljud under utbredning utomhus – Del 1: Beräkning av atmosfärens ljudabsorption (ISO 9613-1:1993)*
- [15] T. W. Bartel (1981), *Effect of absorber geometry on apparent absorption coefficient as measured in a reverberation chamber*, Journal of the Acoustic Society of America, Vol. 69, 1065-74
- [16] T.E. Vigran (2004), *Manual for WinFLAG version 2.0*, Morset Sound Development
- [17] S. I. Thomasson (1980), *On the absorption coefficient*, Acustica 44, 265-273
- [18] Keith Ballagh, *Absorb* (computer software), Marshall Day Acoustics Ltd.  
([www.marshallday.com](http://www.marshallday.com))
- [19] R T Randeberg (2000), *A Helmholtz Resonator with Lateral Elongated Orifice*, Acustica, Vol. 86, 77-82
- [20] T. E. Vigran, Professor Emeritus, Norges Tekniske-Naturvetenskaplige Universitet: Personlig kommunikation
- [21] J.M.A Smits & C.W. Kosten (1951), *Sound absorption by slit resonators*, Acustica, Vol. 1, 114-122
- [22] Dah-You Maa (1987), *Microperforated-Panel Wideband Absorbers*, Noise Control Engineering Journal, Nov-Dec 1987
- [23] R T Randeberg (2002), *Adjustable Slitted Panel Absorber*, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 88, 507-512
- [24] T. E. Vigran, Professor Emeritus, Norges Tekniske-Naturvetenskaplige Universitet: Personlig kommunikation, 2005-09-05
- [25] SS- ISO 17497-1, *Byggnadsakustik – Egenskaper hos ljudspridande ytor – Del 1: Mätning av spridningskoefficient vid diffust ljudinfall i efterklangsrum (ISO 17497-1:2004)*

## Bilaga A - Litteraturlista

Detta är en lista av genomförd litteratursökning över intressanta artiklar.

**Ackerman U., Fuchs H.V. & Rambašek N.** – *Sound absorbers of a novel membrane construction*, Applied Acoustics, v 25, n 1, 1988, p 197-215

**Bartel T.W.** – *Effect of absorber geometry on apparent absorption coefficient as measured in a reverberation chamber*, Journal of the Acoustic Society of America, v 69, 1981, p 1065-74

**Bradley, J.S.** - *Sound Absorption of theatre chair components*, Building research note 208, Ottawa Canada 1984

**Fuchs, H.V.** - *Helmholtz Resonators Revisited*, Acta Acustica United With Acustica, v 86, 2000, p 581-83

**Ingard, U.** - *Acoustic nonlinearity of an orifice*, Journal of the Acoustical Society of America, v 42, n 1, Feb. 1967, p 6-17

**Ingard, U.** – *On the Theory and Design of Acoustic Resonators*, Journal of the Acoustical Society of America, v 25, n 6, Nov. 1953, p 1062-67

**Ingard, U.** - *The near field of a Helmholtz Resonator exposed to a plane wave*, Journal of the Acoustical Society of America, v 25, n 6, Nov. 1953, p 1037-61

**Kleiner, M & Petersson, B.** - *Absorption coefficient measurements on two types of expanded polythene plastics ('porolon')*, Chalmers tekniska högskola. Avd för byggnadsakustik, Report 80-20, Göteborg 1980

**Kristiansen, U.R., Vigran, T.E.** – *On the design of absorbers using a slotted plate*, Applied Acoustics, v 43, n 1, 1994, p 39-48

**Luo, C., Huang, X.Y., Nguyen, N.T.** - *Effect of resonator dimensions on nonlinear standing waves*, Journal of the Acoustical Society of America, v 117, n 1, Jan. 2005, p 96-103

**Maa, D-Y.** – *Potential of microperforated panel absorber*, Journal of the Acoustical Society of America, v 105, n 5, Nov. 1998, p 2861-66

**Mechel, F.P.** – *Computational Optimisation of Absorbers*, Acta Acustica United With Acustica, v 87, n 4, July-Aug 2001, p 513-18

**Mechel, F.P.** – *Helmholtz Resonators covered by Foils*, Acustica, v 80, 1994, p 478-489

**Mechel, F.P.** – *Helmholtz Resonators with Added Porous Absorbers*, Acustica, v 80, n 3, May-June 1994, p 268-79

**Mechel, F.P.** – *Helmholtz Resonators with Slotted Neck Plates*, *Acustica*, v 80, n 4, July-August 1994, p 321-31

**Mechel, F.P.** - *Panel absorber*, *Journal of Sound and Vibration*, v 248, n 1, 15 Nov. 2001, p 45-72

**Mechel, F.P.** – *Sound fields at periodic absorbers*, *Journal of Sound and Vibration*, v 136, n 3, 8 Feb. 1990, p 379-412

**Moreland J.B.** – *Low frequency noise reduction of acoustic enclosures*, *Noise Control Engineering Journal*, Nov-Dec. 1994, p 140-149

**Randeberg, R.T.** - *A Helmholtz resonator with a lateral elongated orifice*, *Acta Acustica*, v 86, n 1, January/February 2000, p77-82

**Randeberg, R.T.** - *Adjustable slitted panel absorber*, *Acta Acustica United With Acustica*, v 88, n 4, July/August 2002, p 507-12

**Smits J.M.A & Kosten C.W.** – *Sound absorption by slit resonators*, *Acustica*, v 1, 1951, p 114-122

**Sum, K.S.** - *Use of statistical energy analysis for the prediction of Sabine absorption coefficient of modally reactive panels*, *Journal of the Acoustical Society of America*, v 116, n 3, Sept. 2004, p 1596-606

**Thomasson S-I**, – *On the absorption coefficient*, *Acustica*, v 44, 1980, p 265-273

**Thomasson, S-I.** - *Theory and experiments on the sound absorption as function of the area*, Tekniska högskolan. Inst för teknisk akustik, Report TRITA-TAK-8201. Stockholm 1982

**Wassilieff, C.** – *Sound absorption of wood-based materials*, *Applied Acoustics*, v 48, n 4, Aug. 1996, p 339-56

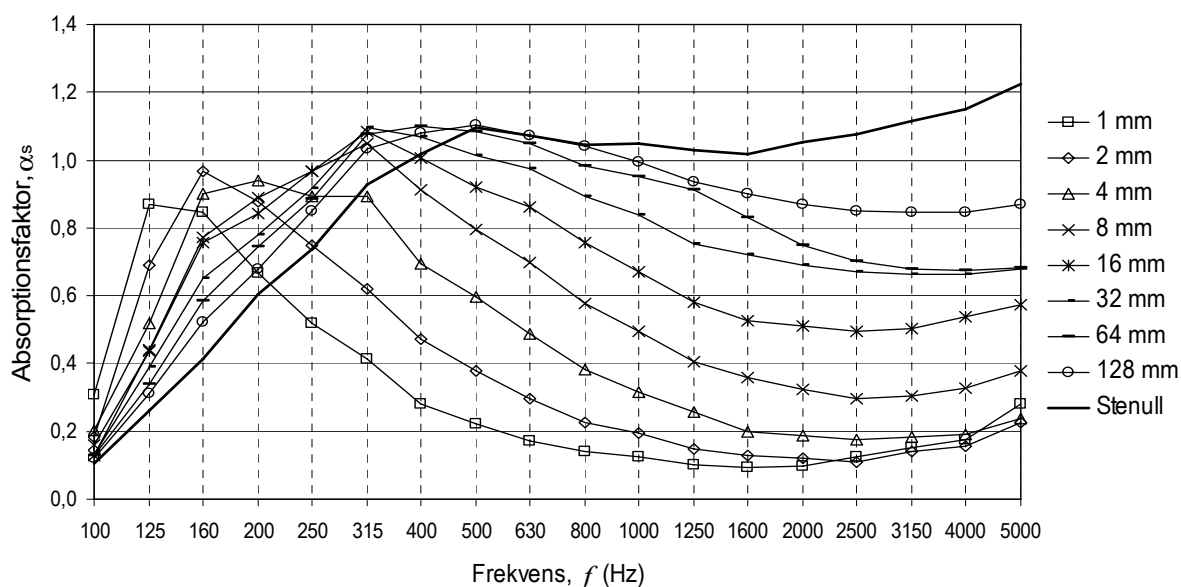
**Watson, R.B.** – *Acoustical features of the addition to the physics building at the university of Texas*, *Journal of the Acoustical Society of America*, v 32, n 8, Aug. 1960, p 1034-37

## Bilaga B – Uppmätt absorption för spaltpanel

### B.1 Bräda med dimension 16x70

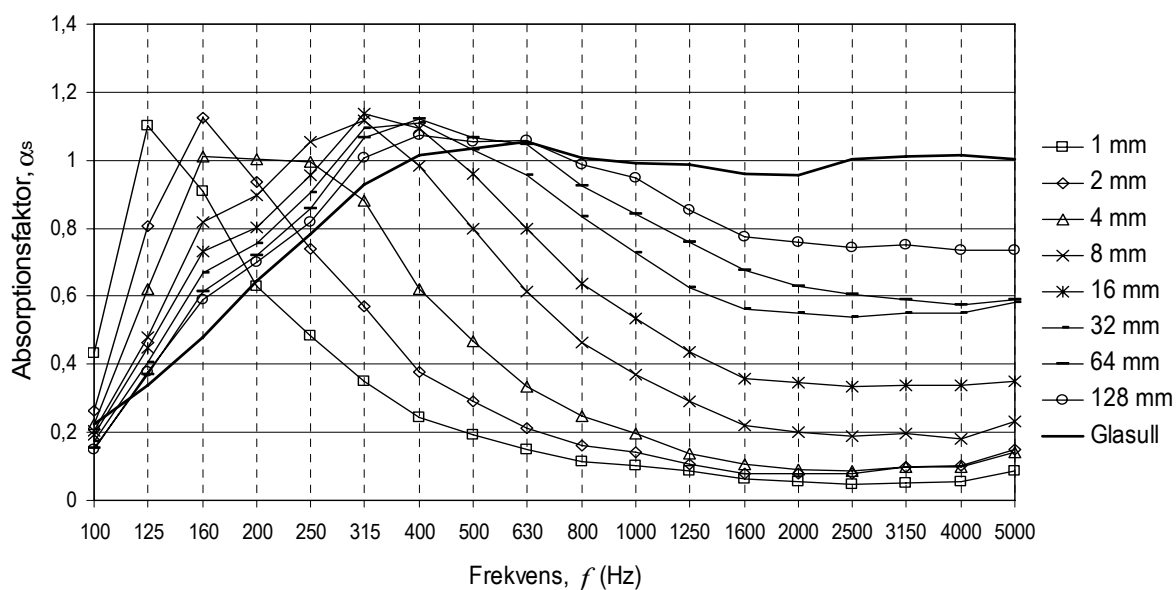
#### B.1.1 Jämförelse spaltbredder emellan

##### B.1.1.1 Stenull som porös dämpning



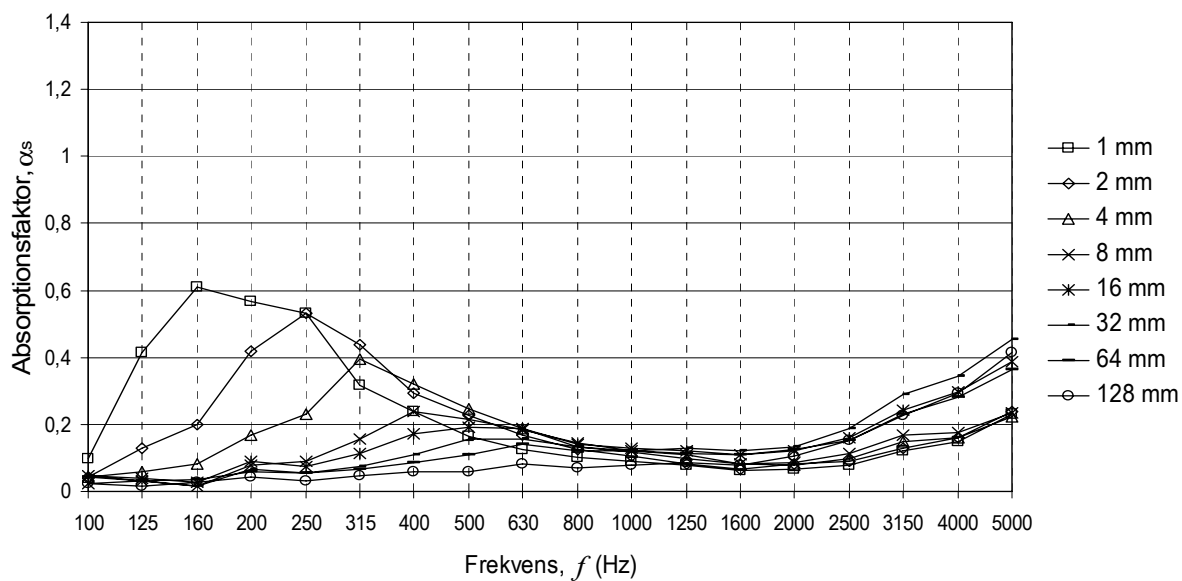
Figur B.1: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredd, bräddimension 16x70 mm, 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel, ovanpå 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

##### B.1.1.2 Glasull som porös dämpning



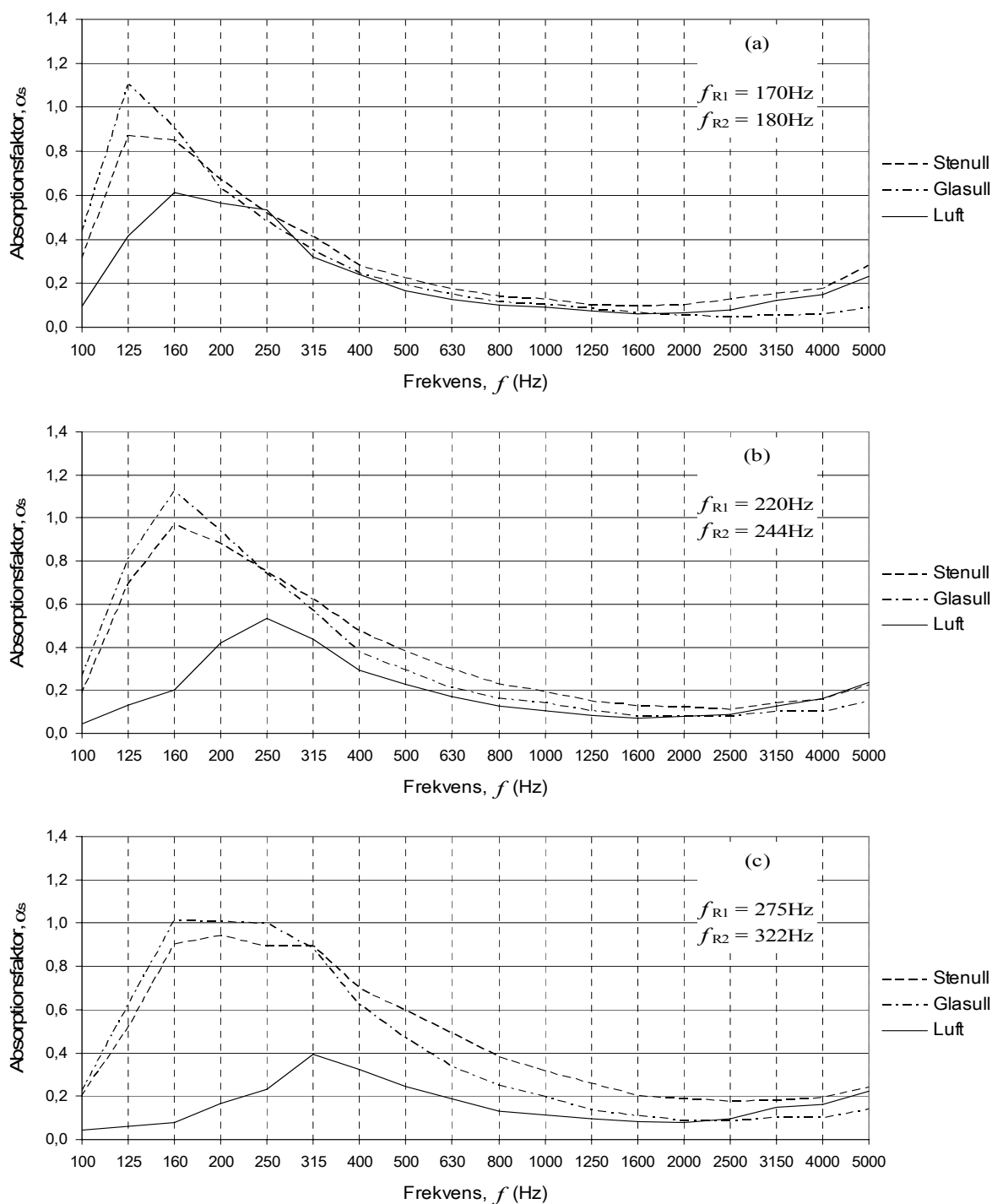
Figur B.2: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredd, brädddimension 16x70 mm, 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

### B.1.1.3 Utan porös dämpning



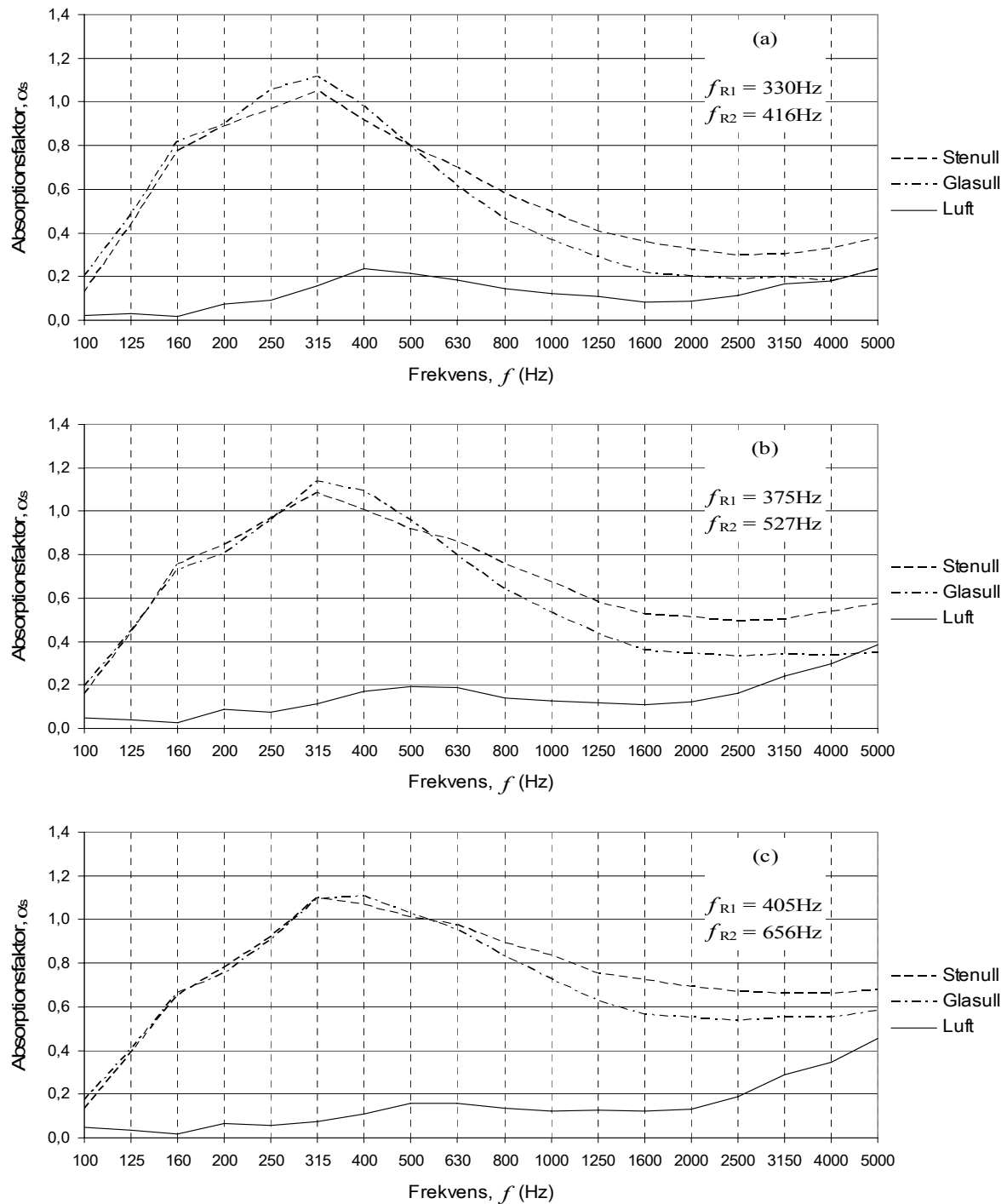
Figur B.3: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredd, bräddimension 16x70 mm, utan porös dämpning. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

## B.1.2 Spaltpanel med olika dämpning i jämförelse med teoretiska resonansfrekvenser



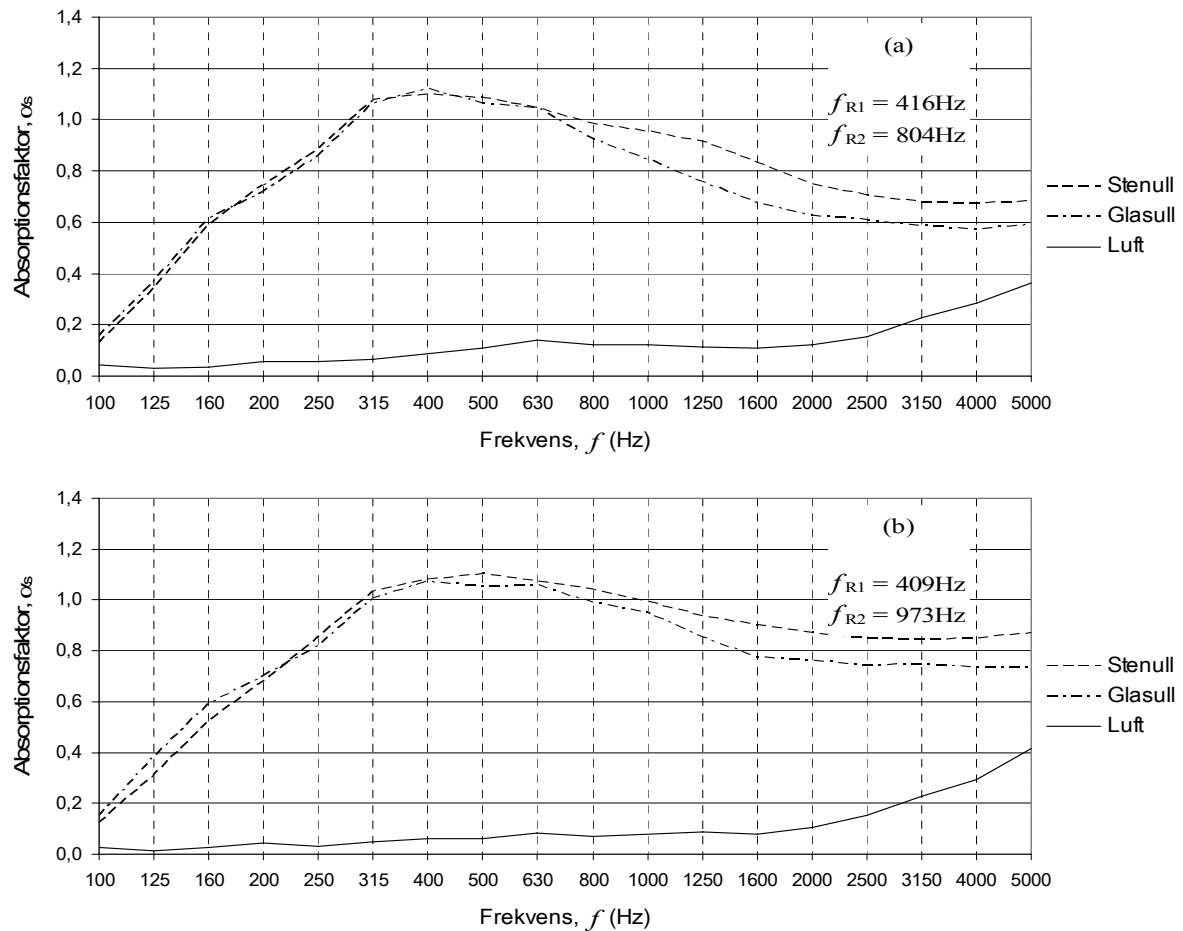
Figur B.4: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika dämpning, bräddimension är 16x70 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm,  $f_{R1}$  och  $f_{R2}$  beräknad resonansfrekvens enligt teori 1 resp. 2 (se avsnitt 2.3.4).

(a) spaltbredd 1 mm, (b) spaltbredd 2 mm, (c) spaltbredd 4 mm.



Figur B.5: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika dämpning, bräddimension är 16x70 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm,  $f_{R1}$  och  $f_{R2}$  beräknad resonansfrekvens enligt teori 1 resp. 2 (se avsnitt 2.3.4).

(a) spaltbredd 8 mm, (b) spaltbredd 16 mm, (c) spaltbredd 32 mm.

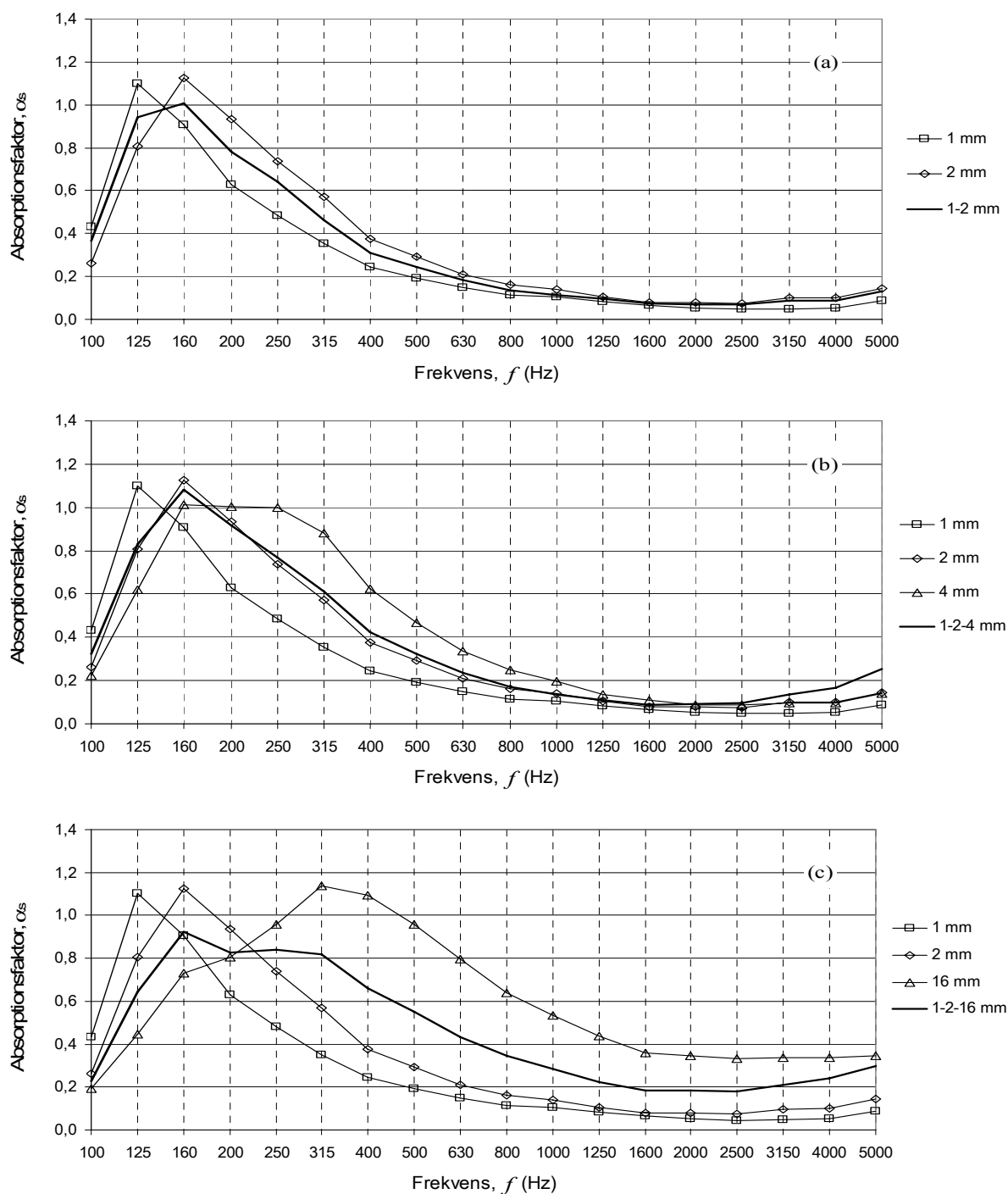


Figur B.6: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika dämpning, bräddimension är 16x70 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm,  $f_{R1}$  och  $f_{R2}$  beräknad resonansfrekvens enligt teori 1 resp. 2 (se avsnitt 2.3.4).

(a) spaltbredd 64 mm, (b) spaltbredd 128 mm.



### B.1.3 Kombination av olika spaltbredder



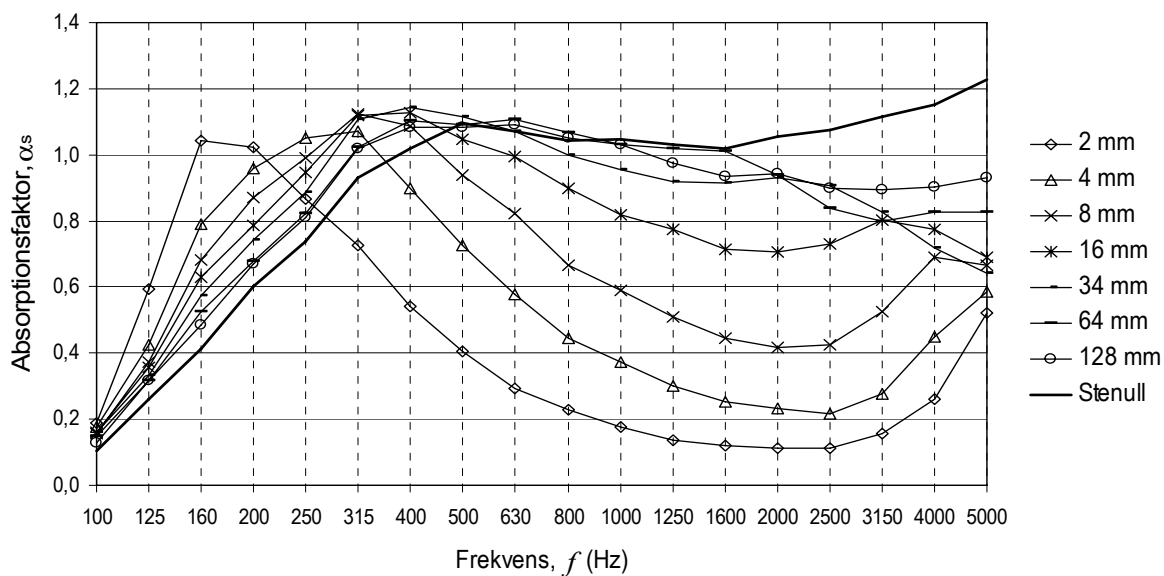
Figur B.7: Uppmätt absorption för spaltpanel med kombination av olika spaltbredder, brädddimension är 16x70 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ )

(a) spaltpanel med halva ytan inställd på spaltbredd 1 mm och halva på 2 mm, (b) spaltpanel med en tredjedel av ytan inställd på vardera 1, 2 och 4 mm, (c) spaltpanel med en tredjedel av ytan inställd på vardera 1, 2 och 16 mm.

## B.2 Bräda med dimension 34x34

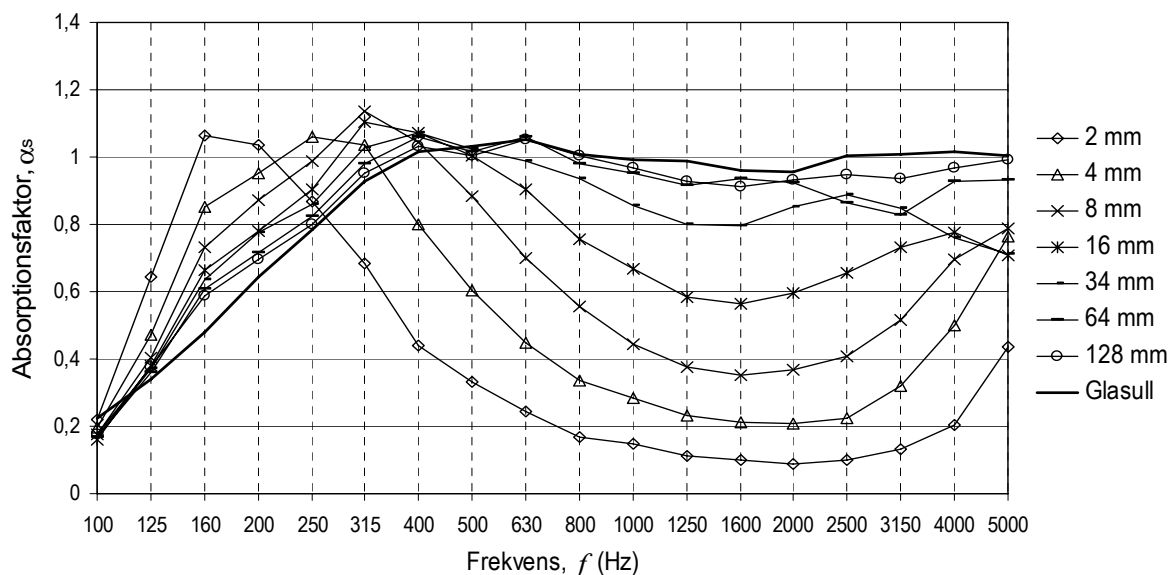
### B.2.1 Jämförelse spaltbredder emellan

#### B.2.1.1 Stenull som porös dämpning



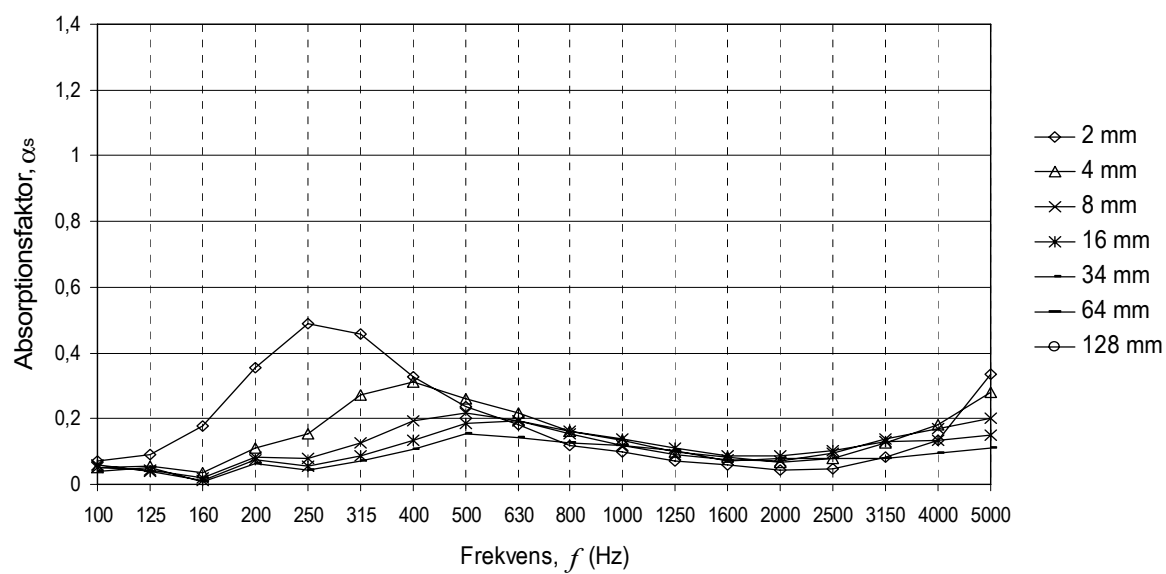
Figur B.8: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredd, bräddimension 34x34 mm, 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel, ovanpå 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

#### B.2.1.2 Glasull som porös dämpning



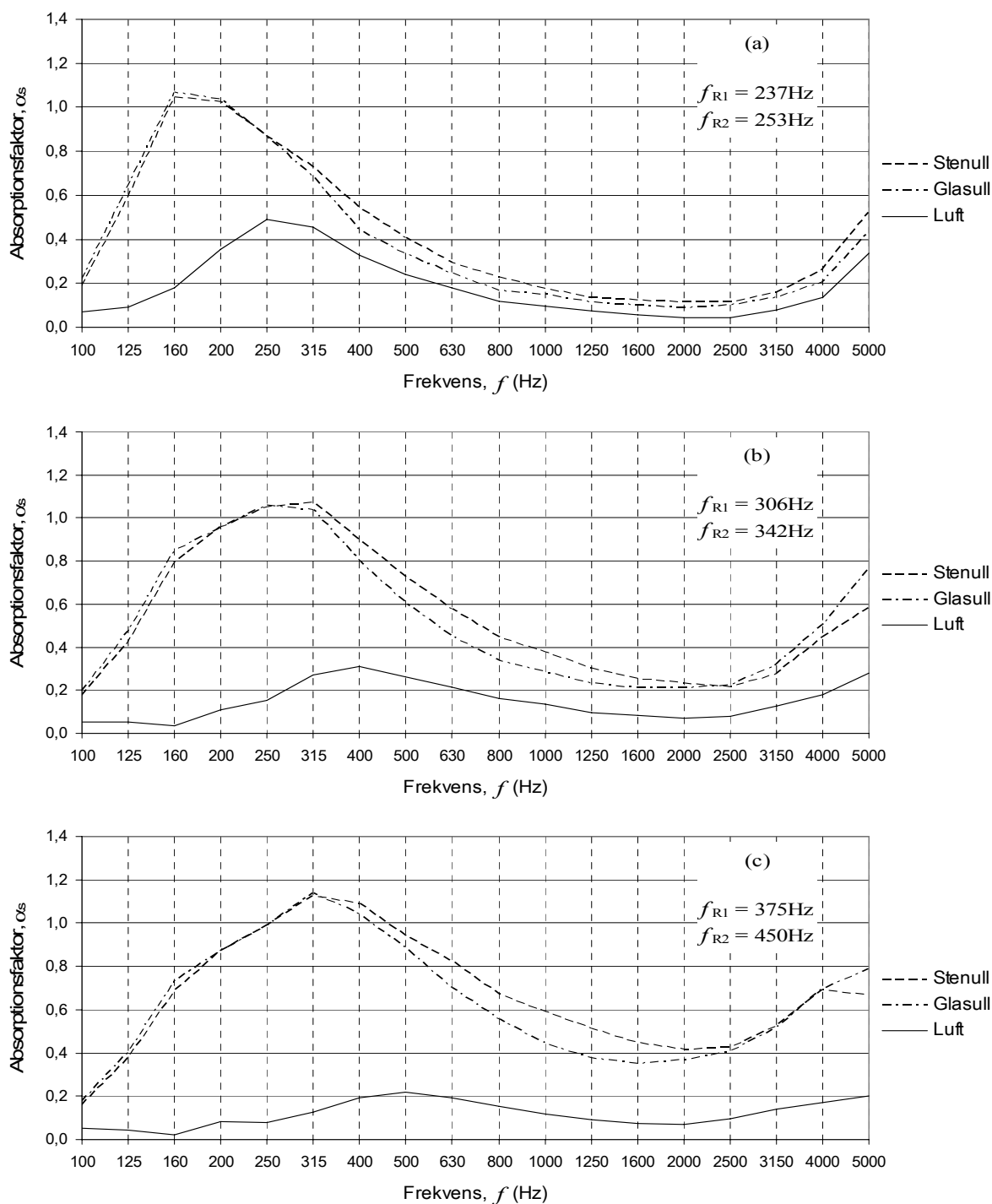
Figur B.9: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredd, brädddimension 16x70 mm, 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

### B.2.1.3 Utan porös dämpning



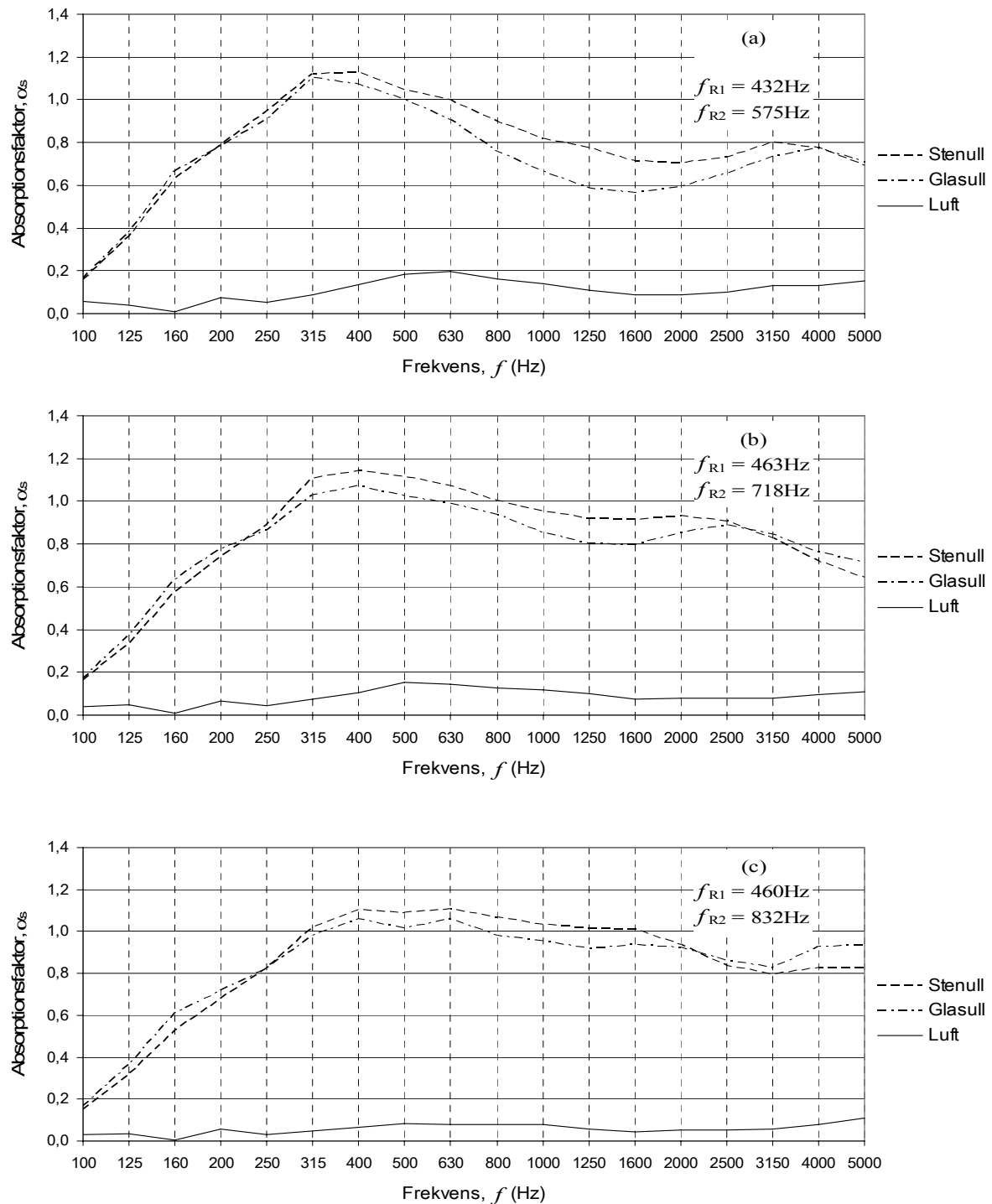
Figur B.10: Uppmätt absorption för spaltpanel med varierande spaltbredd, bräddimension 16x70 mm, utan porös dämpning. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

## B.2.2 Spaltpanel med olika dämpning i jämförelse med teoretiska resonansfrekvenser



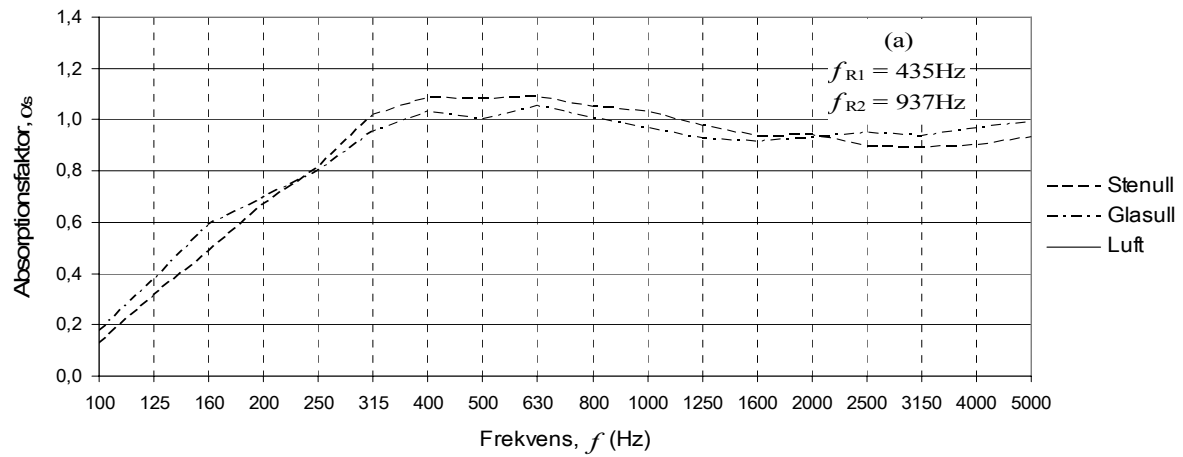
Figur B.11: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika dämpning, bräddimension är 34x34 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm,  $f_{R1}$  och  $f_{R2}$  beräknad resonansfrekvens enligt teori 1 resp. 2 (se avsnitt 2.3.4).

(a) spaltbredd 2 mm, (b) spaltbredd 4 mm, (c) spaltbredd 8 mm.



Figur B.12: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika dämpning, brädddimension är 34x34 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm  $f_{R1}$  och  $f_{R2}$  beräknad resonansfrekvens enligt teori 1 resp. 2 (se avsnitt 2.3.4).

(a) spaltbredd 16 mm, (b) spaltbredd 34 mm, (c) spaltbredd 64 mm.

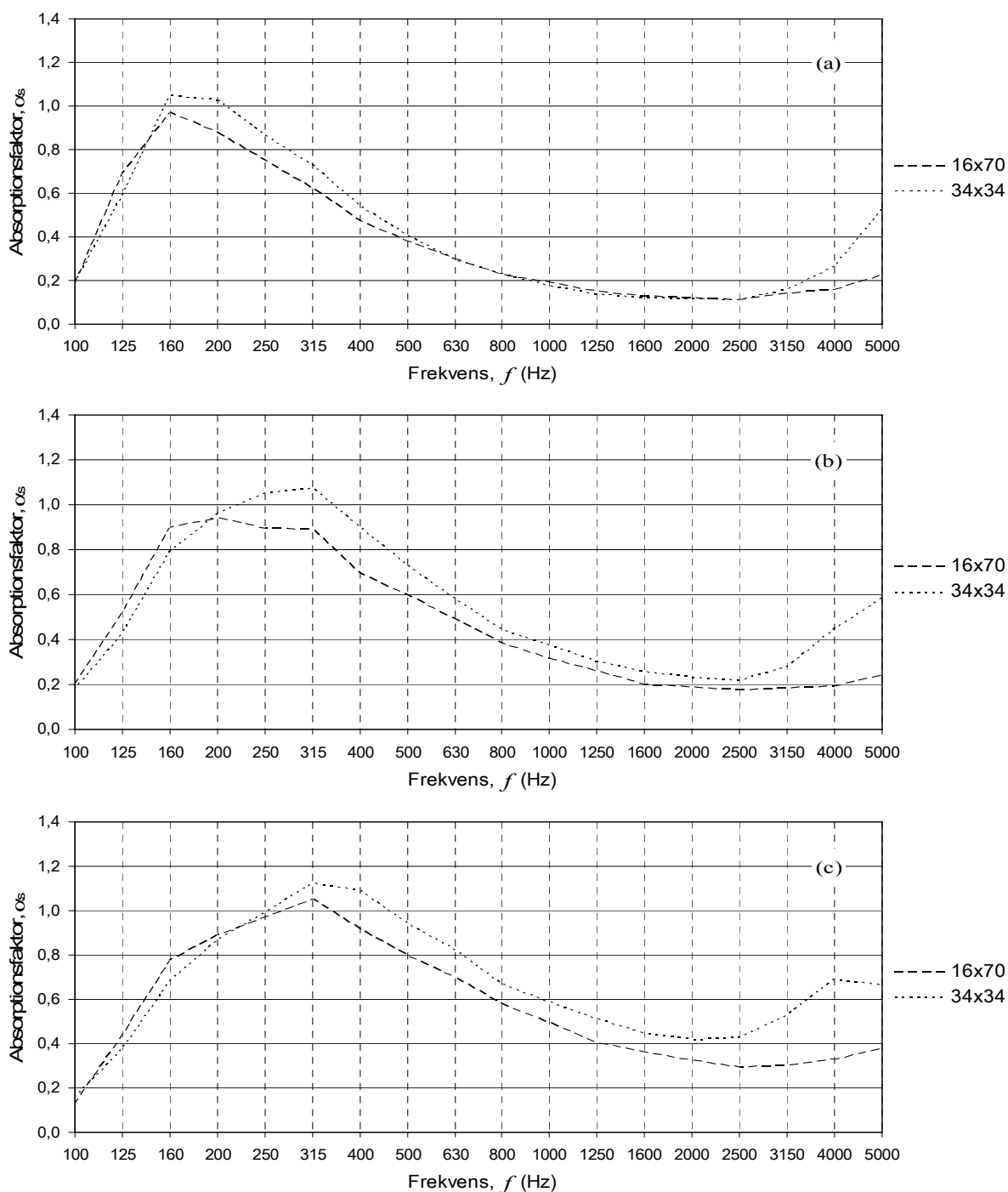


Figur B.13: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika dämpning, brädddimension är 34x34 mm, avstånd från panel till bakomliggande hårda yta är 70 mm,  $f_{R1}$  och  $f_{R2}$  beräknad resonansfrekvens enligt teori 1 resp. 2 (se avsnitt 2.3.4).

(a) spaltbredd 128 mm

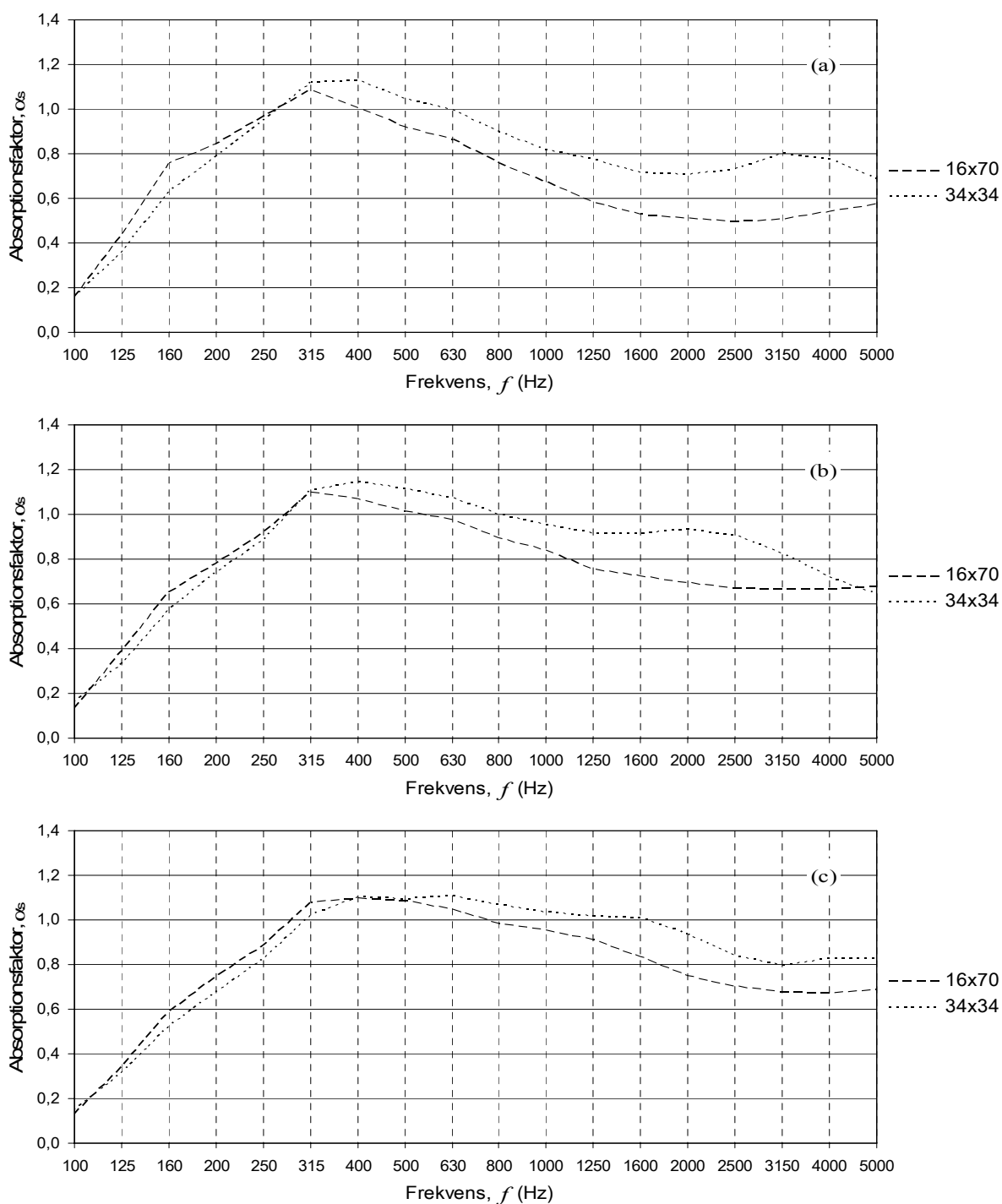
## B.3 Jämförelse mellan spaltpanel med brädddimension 16x70 och 34x34

### B.3.1 Stenull som porös dämpning



Figur B.14: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika brädddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm. Dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel, ovanpå 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

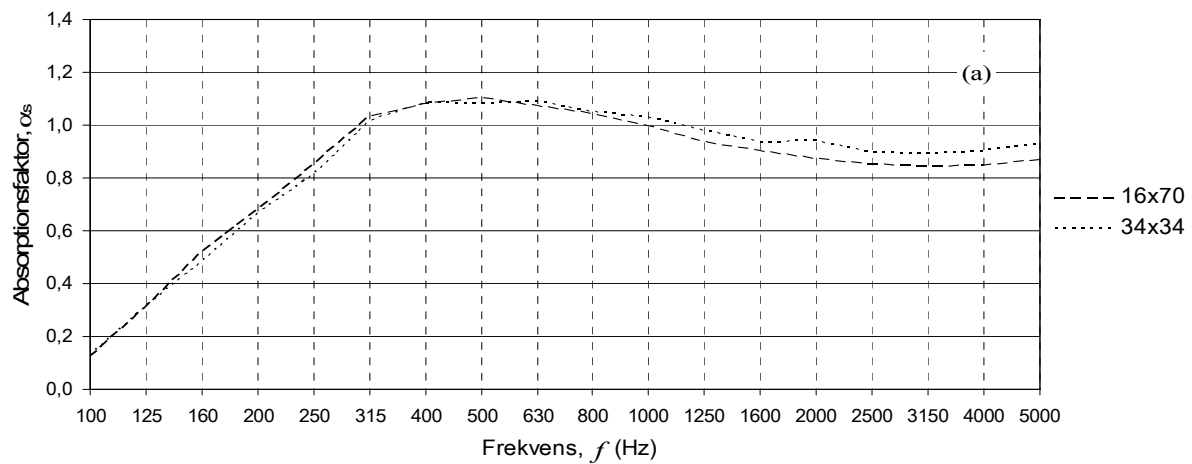
(a) spaltbredd 2 mm, (b) spaltbredd 4 mm, (c) spaltbredd 8 mm.



Figur B.15: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika bräddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm . Dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel, ovanpå 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

(a) spaltbredd 16 mm, (b) spaltbredd 32 resp. 34 mm, (c) spaltbredd 64 mm.

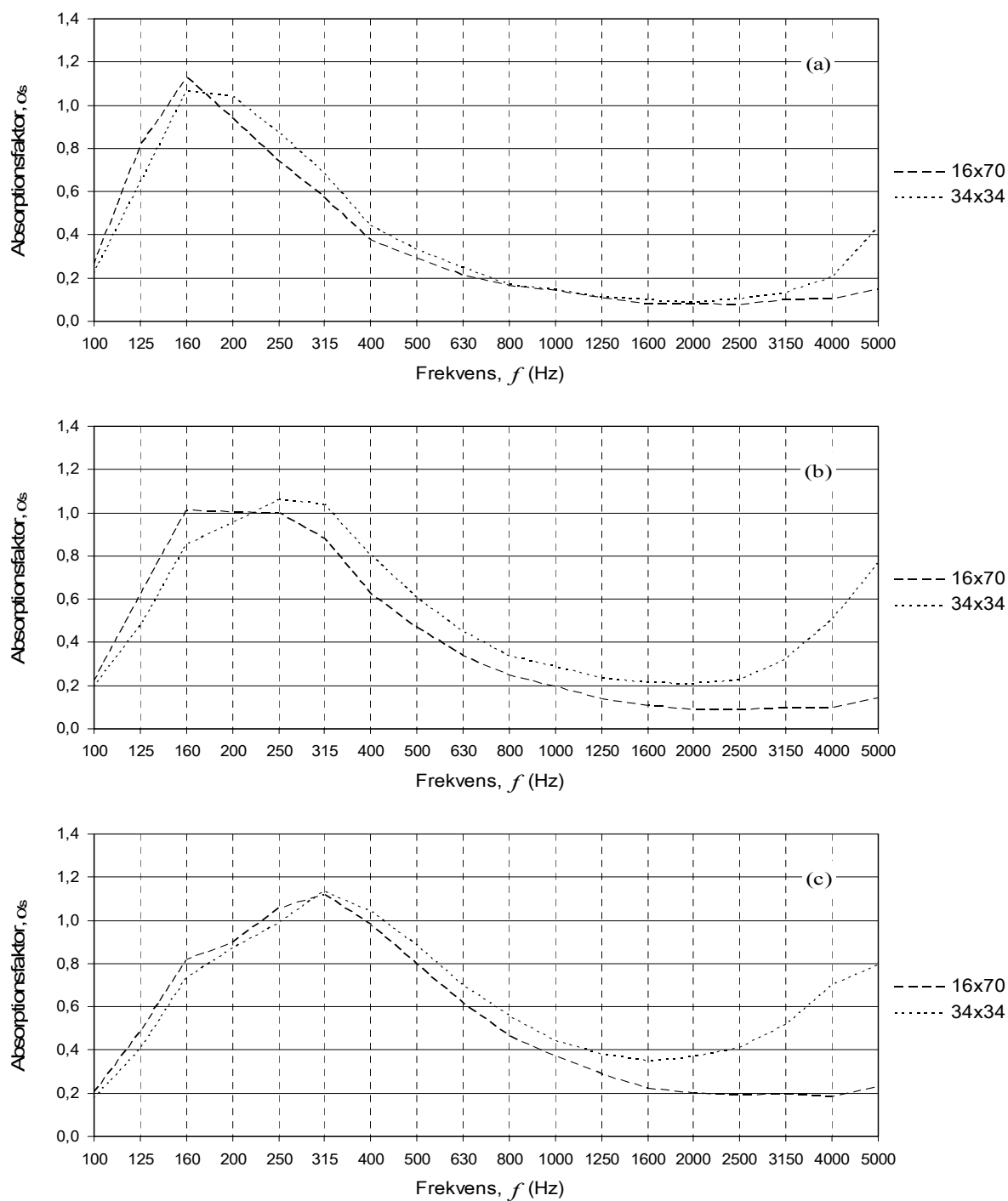




Figur B.16 Uppmätt absorption för spaltpanel med olika bräddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm . Dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel, ovanpå 20 mm luftspalt. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

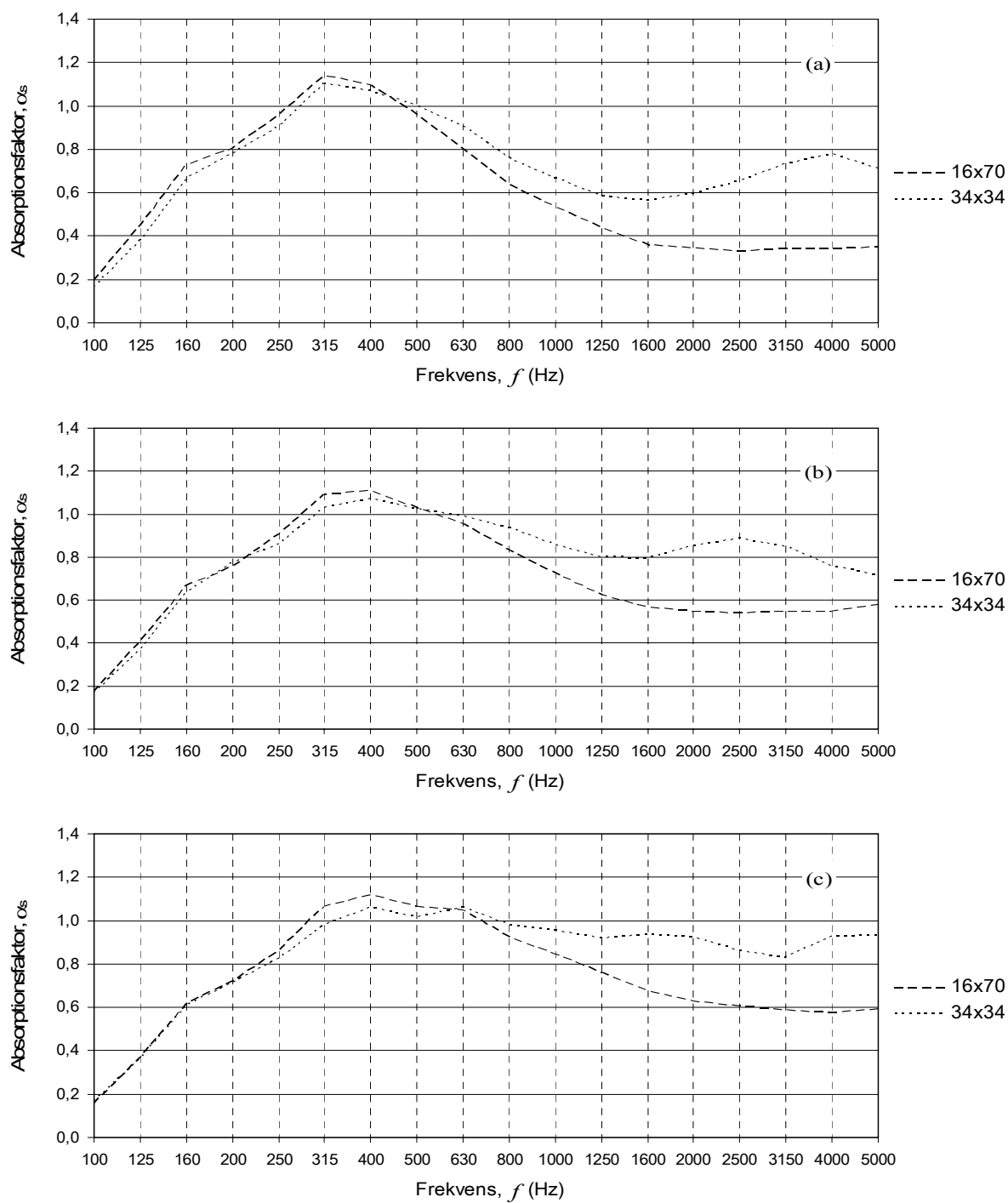
(a) spaltbredd 128 mm.

### B.3.2 Glasull som porös dämpning



Figur B.17: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika brädddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm. Dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

(a) spaltbredd 2 mm, (b) spaltbredd 4 mm, (c) spaltbredd 8 mm.

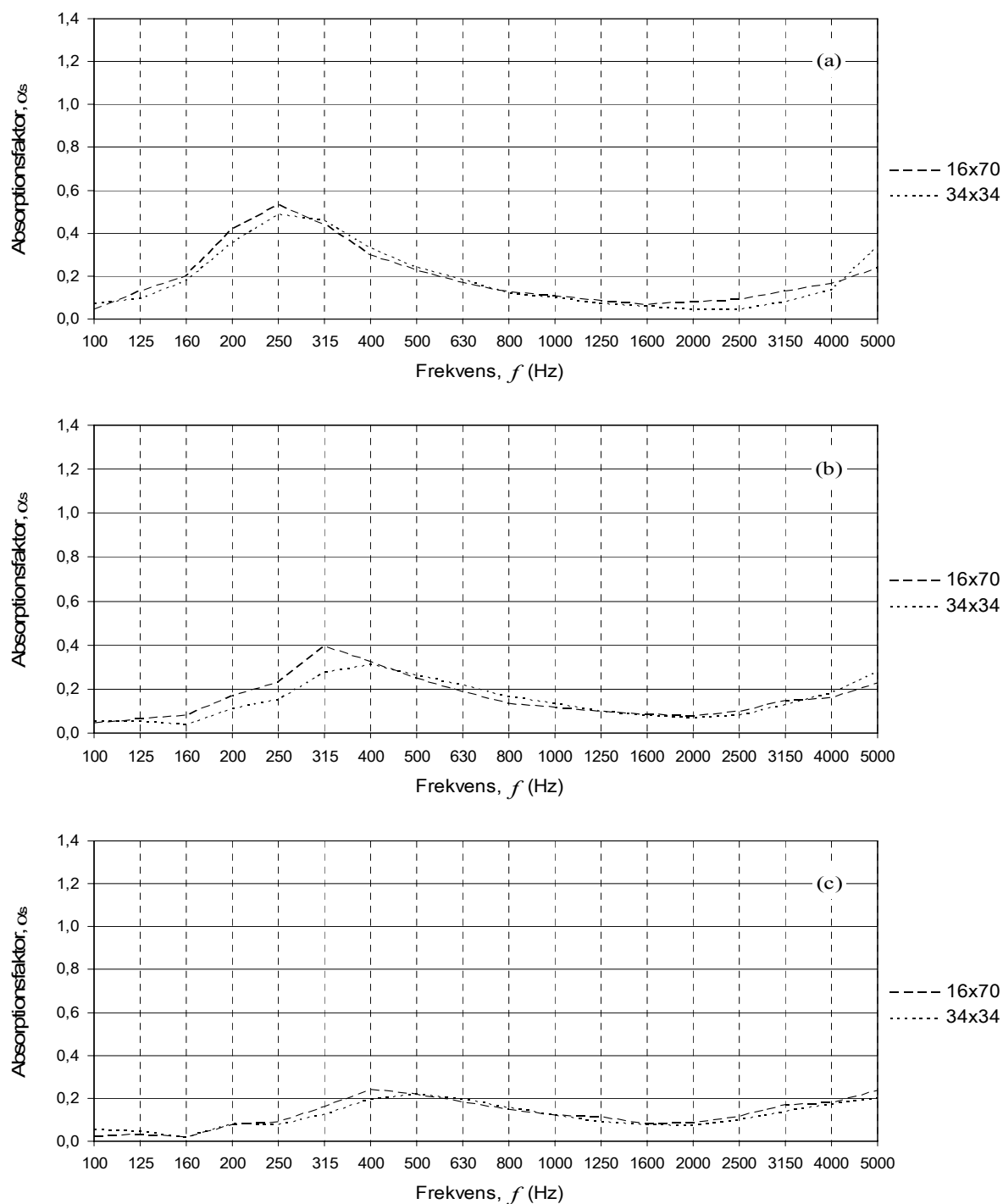


B.18: Figur B.15: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika bräddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm. Dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ) direkt bakom panel. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

(a) spaltbredd 16 mm, (b) spaltbredd 32 resp. 34 mm, (c) spaltbredd 64 mm.

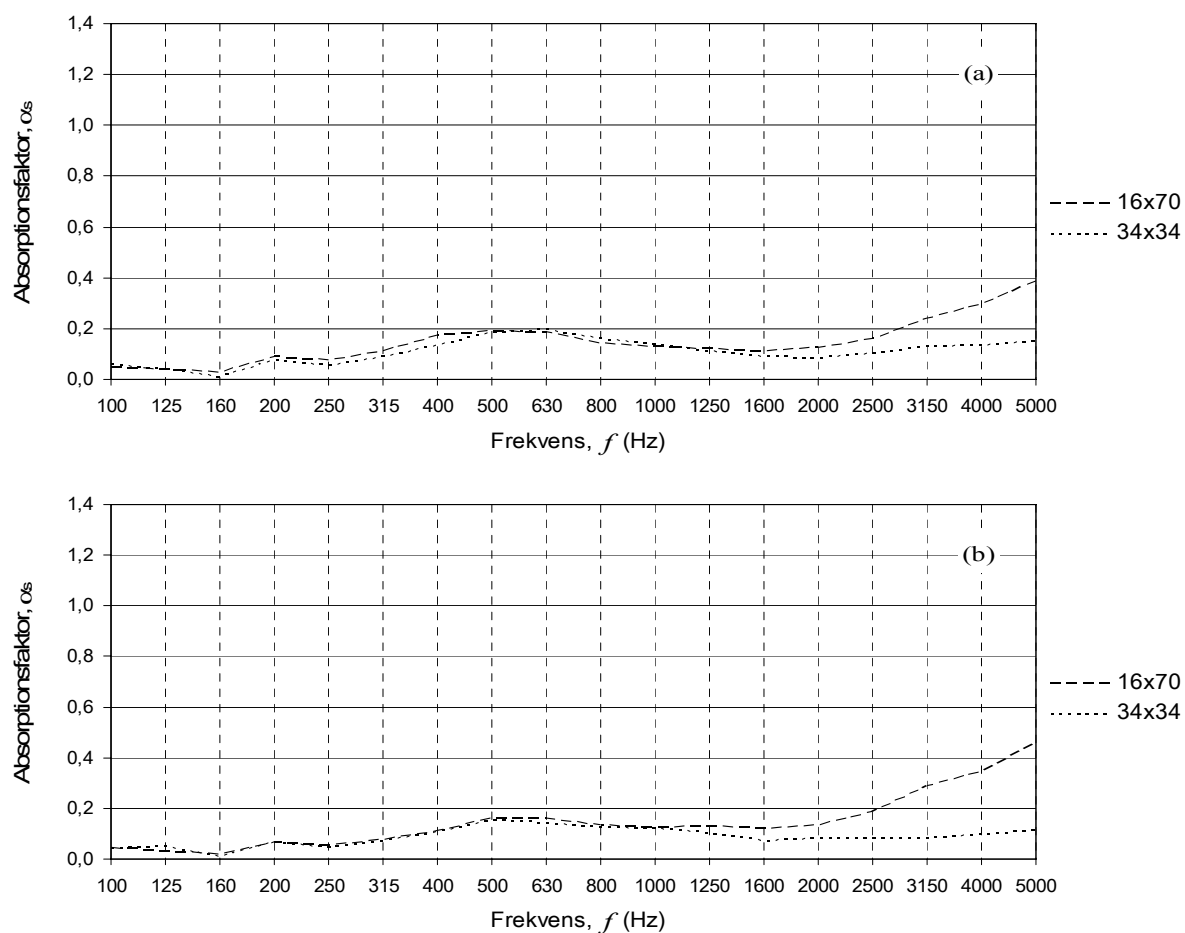
### B.3.3 Utan porös dämpning

#### B.3.3.1 Spaltbredd 2 mm



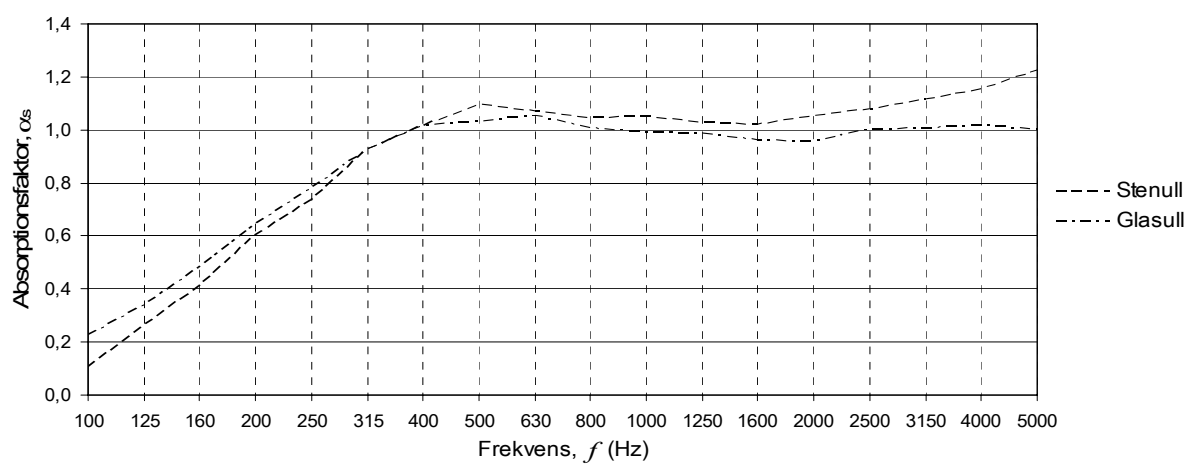
Figur B.19: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika brädddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm. Utan porös dämpning. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm.

(a) spaltbredd 2 mm, (b) spaltbredd 4 mm, (c) spaltbredd 8 mm.



Figur B.20: Uppmätt absorption för spaltpanel med olika bräddimension, 16x70 mm respektive 34x34 mm . Utan porös dämpning. Avstånd från panel till bakomliggande hård yta är 70 mm. (a) spaltbredd 16 mm, (b) spaltbredd 32 resp. 34 mm

## B.4 Jämförelse mellan absorption hos stenull och glasull



Figur B.21: Uppmätt absorption för 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) ovanpå 20 mm luftspalt samt 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ). Båda ligger i 70 mm hög låda av regler, på golvet i efterklangsrummet

## Bilaga C – Uppmätt standardavvikelse

### C.1 Spaltpanel med bräddimension 16x70 mm

#### C.1.1 Stenull som dämpning

Spaltbredd (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<b>1</b>	0,26	0,15	0,15	0,09	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,08
<b>2</b>	0,19	0,16	0,21	0,13	0,06	0,06	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
<b>4</b>	0,16	0,16	0,18	0,17	0,11	0,07	0,05	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,06
<b>8</b>	0,2	0,19	0,24	0,11	0,1	0,07	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
<b>16</b>	0,16	0,15	0,13	0,1	0,1	0,05	0,04	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,09	0,12
<b>32</b>	0,14	0,11	0,12	0,1	0,08	0,07	0,05	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04
<b>64</b>	0,14	0,11	0,11	0,08	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,03	0,04	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
<b>128</b>	0,14	0,11	0,09	0,07	0,08	0,06	0,05	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05

Figur C.1: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 16x70 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt, varierande spaltbredd.

#### C.1.2 Glasull som dämpning

##### C.1.2.1 Samma spaltbredd över hela ytan

Spaltbredd (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<b>1</b>	0,22	0,18	0,1	0,09	0,06	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,03	0,03
<b>2</b>	0,17	0,15	0,25	0,08	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,07	0,12
<b>4</b>	0,16	0,12	0,19	0,12	0,06	0,06	0,04	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,1	0,05	0,02	0,01
<b>8</b>	0,16	0,12	0,14	0,12	0,15	0,08	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,07	0,08	0,05
<b>16</b>	0,15	0,12	0,13	0,09	0,07	0,08	0,08	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,13	1,63
<b>32</b>	0,15	0,11	0,11	0,09	0,08	0,08	0,06	0,05	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,05	0,07
<b>64</b>	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
<b>128</b>	0,14	0,11	0,1	0,07	0,05	0,07	0,05	0,05	0,04	0,06	0,05	0,03	0,02	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06

Figur C.2: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ), varierande spaltbredd.

### C.1.2.1 Samma spaltbredd över hela ytan

Kombination (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<b>1+2</b>	0,19	0,13	0,23	0,09	0,05	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,05	0,77	0,62
<b>1+2+4</b>	0,18	0,12	0,17	0,1	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,29	0,09	0,09
<b>1+2+16</b>	0,17	0,06	0,08	0,07	0,04	0,06	0,07	0,04	0,04	0,05	0,05	0,08	0,12	0,21	0,44	0,78	2,75	7,26

Figur C.3: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 16x70 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ), Kombinationer av olika spaltbredder över samma yta.

### C.1.3 Utan porös dämpning

Spaltbredd (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<b>1</b>	0,14	0,11	0,16	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04
<b>2</b>	0,13	0,09	0,05	0,09	0,04	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
<b>4</b>	0,12	0,09	0,07	0,05	0,03	0,05	0,05	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
<b>8</b>	0,12	0,1	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05
<b>16</b>	0,12	0,09	0,05	0,05	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05	0,07	0,1
<b>32</b>	0,12	0,09	0,06	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
<b>64</b>	0,12	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
<b>128</b>	0,12	0,09	0,07	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,06	0,09

Figur C.4: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 16x70 mm, utan porös dämpning, varierande spaltbredd.



## C.2 Spaltpanel med bräddimension 34x34 mm

### C.2.1 Stenull som dämpning

Spaltbredd (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
2	0,15	0,12	0,17	0,12	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05	0,06	0,05
4	0,17	0,12	0,13	0,11	0,09	0,04	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,08
8	0,16	0,11	0,09	0,1	0,09	0,05	0,07	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,12
16	0,16	0,11	0,08	0,08	0,09	0,07	0,07	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05
32	0,15	0,12	0,09	0,09	0,07	0,06	0,05	0,06	0,03	0,04	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,04	0,06
64	0,15	0,11	0,08	0,06	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,02	0,03	0,04	0,05
128	0,14	0,11	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,09	0,22

Figur C.5: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 34x34 mm, dämpning med 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt, varierande spaltbredd.

### C.2.2 Glasull som dämpning

Spaltbredd (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
2	0,16	0,13	0,23	0,13	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04
4	0,16	0,11	0,14	0,1	0,1	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04
8	0,15	0,11	0,12	0,11	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04
16	0,15	0,11	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06
32	0,14	0,1	0,1	0,08	0,07	0,08	0,06	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06
64	0,15	0,11	0,09	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04	0,05	0,03	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
128	0,16	0,1	0,1	0,09	0,04	0,06	0,04	0,05	0,03	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04

Figur C.6: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 34x34 mm, dämpning med 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ), varierande spaltbredd.

### C.2.3 Utan porös dämpning

Spaltbredd (mm)	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
2	0,13	0,1	0,07	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,22	0,02	0,02	0,03	0,1
4	0,13	0,1	0,07	0,06	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,09	0,17	0,07	0,04	0,03
8	0,13	0,1	0,08	0,06	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,31	0,07	0,03	0,01
16	0,13	0,1	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,1	0,1	0,02	0,01
32	0,11	0,12	0,04	0,07	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,11	0,02	0,01	0,01
64	0,13	0,09	0,03	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01

Figur C.7: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för spaltpanel med brädddimension 34x34 mm, utan porös dämpning, varierande spaltbredd.

### C.1 Endast mineralull

Mineralull	Frekvens (Hz)																	
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
<b>Stenull</b>	0,13	0,1	0,07	0,09	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,22	0,02	0,02	0,03	0,1
<b>Glasull</b>	0,13	0,1	0,07	0,06	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,09	0,17	0,07	0,04	0,03

Figur C.8: Standardavvikelse hos absorptionsfaktor för 50 mm stenull ( $\rho=70 \text{ kg/m}^3$ ) på 20 mm luftspalt resp. 70 mm glasull ( $\rho=14,5 \text{ kg/m}^3$ ).