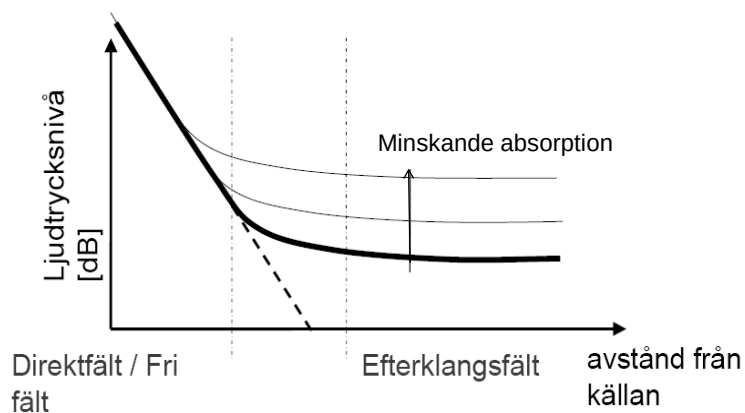




F10 – Rumsakustik, efterklangstid

Direkt- och efterklangsfält



Rumsakustik – 3 modeller över ljudet

- Statistisk rumsakustik
 - Diffust ljudfält, exponentiellt avtagande ljudtryck
- Vågteoretisk rumsakustik
 - Egenfrekvenser, stående vågor, interferens...
- Geometrisk rumsakustik
 - Strålgångsakustik, spegelkällor

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Statistisk rumsakustik

- Ljudfältet antas vara diffust, d v s jämnt fördelat över volymen
- Ljudtrycket avtar exponentiellt med tiden när ljudkällan tystnar
- Ljudet avtar i och med att en del av det som infaller absorberas mot väggar och andra ytor (golv, möbler, föremål, absorbenter och människor)
- Ju mer absorberande material desto snabbare avtar ljudet – efterklangstid

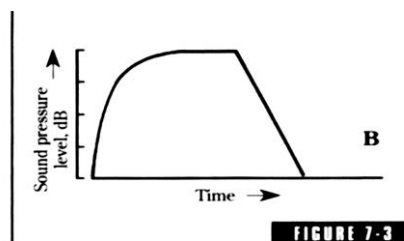
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Efterklangstid

- Oberoende hur starkt direktljudet är
- Ljudenergin i ett rum klingar av exponentiellt:

$$E(t) = E_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

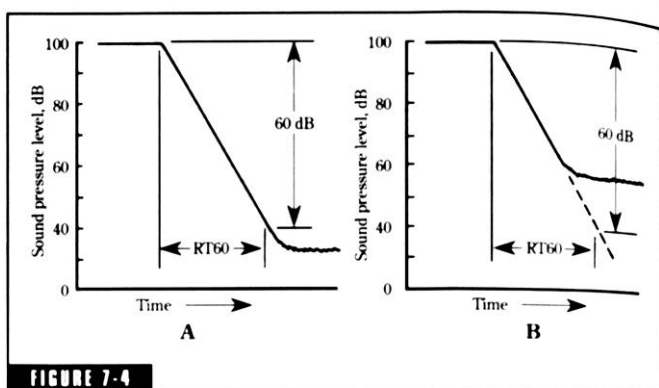
- T_{60} = tiden det tar för ljudnivån att sjunka med 60 dB efter att källan stängts av



The growth and decay of sound in a room. (A) Vertical scale in linear sound pressure units. (B) The vertical scale in logarithmic units (decibels).

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

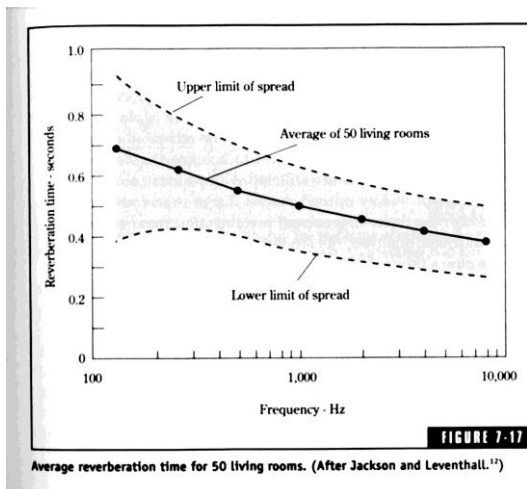
Mätning av efterklangstid



The length of the decay dependent on strength of the source and the noise level. (A) Rarely do practical circumstances allow a full 60-dB decay. (B) The slope of the limited decay is extrapolated to determine the reverberation time.

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

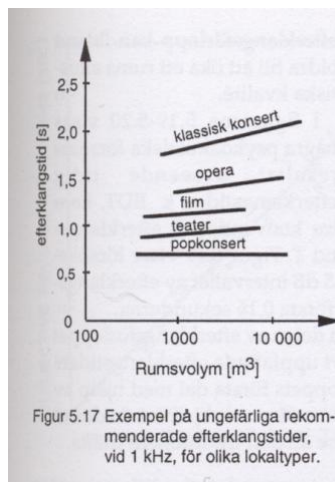
Typiska efterklangstider



Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

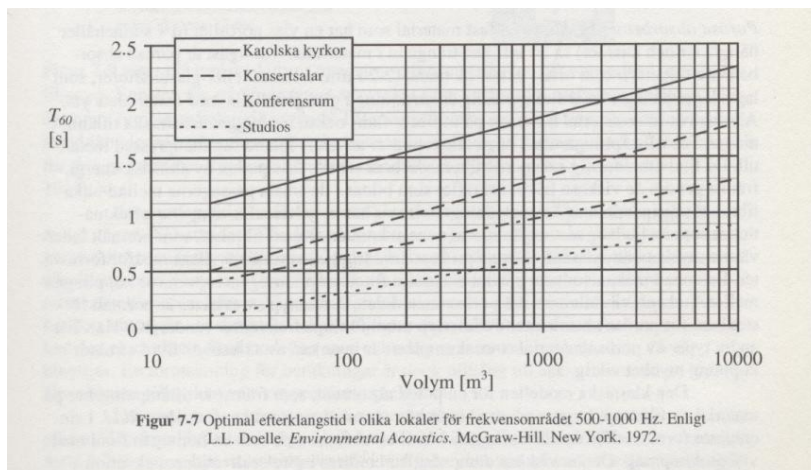
Rekommenderade efterklangstider

- Tal: $T_{60} < 0.8$ s
- Tolerans ± 0.1 s, eller $\pm 10\%$ över frekvensområdet
 $125 \text{ Hz} \leq f \leq 8 \text{ kHz}$



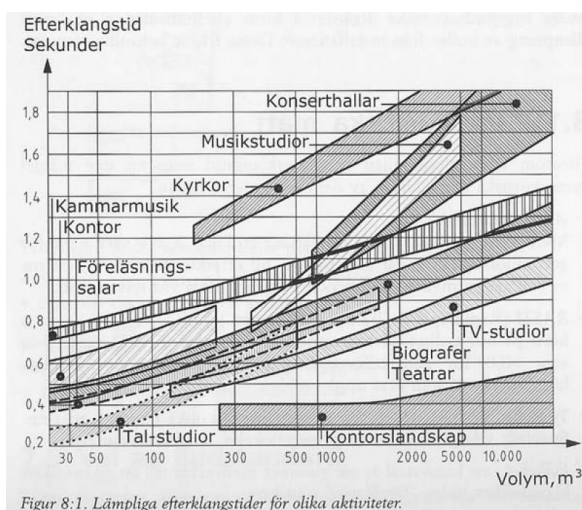
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Rekommenderade efterklangstider



Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Rekommenderade efterklangstider



Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Efterklangstider enl standard SS 25268:2007

Tabell 17 – Längsta efterklangtid i rum, T_{20} , för undervisningslokaler: skolor, förskolor och fritidshem

Typ av utrymme	T_{20} s			
	Ljudklass			
	A	B	C	D
17a Utrymmen för gemensam undervisning exempelvis klassrum, lektionssalar	0,5	0,5	0,5	0,8
17b Utrymmen för undervisning eller elevarbete i mindre grupper exempelvis grupprum, hemvist, konferensrum, lekrum	0,4	0,5	0,5	0,6
17c Utrymmen för undervisning i musik exempelvis musiksäl, musikövningsrum	0,6	0,6	0,6	0,8
17d Stora utrymmen för idrott exempelvis gymnastiksal, idrottshall, simhall	1,0	1,2	1,2	2,0
17e Utrymme för samvaro eller matservering större än 100 m² samt utrymme för matlagning exempelvis uppehållsrum, matsal, cafeteria, storköksutrymme	0,4	0,5	0,5	0,6
17f Övriga utrymmen där människor vistas mer än tillfälligt exempelvis rum för vila, lärare, personal, kontor, expedition, studierum, bibliotek, mediatek	0,5	0,6	0,6	–
17g Utrymmen där människor vistas tillfälligt exempelvis korridorer, entréer, kopieringsutrymmen, omklädningsrum	0,5	0,5	0,5	0,8
17h – dock i trapphus	0,8	0,8	0,8	1,0

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Efterklangstider enl standard SS 25268:2007

Tabell 22 – Längsta efterklangtid i rum, T_{20} , för kontorslokaler

Typ av utrymme	T_{20} s			
	Ljudklass			
	A	B	C	D
22a Stort utrymme för enskilt arbete (mer än ca 20 personer) exempelvis öppen planlösning, kontorslandskap	0,4	0,4	0,4	0,8
22b Utrymme för arbete i grupp (upp till ca 20 personer) exempelvis storrum, projektyta, flerpersonskontor	0,4	0,5	0,5	0,8
22c Utrymme för samtal eller presentationer i grupp exempelvis mötesrum, samtalsrum, konferensrum	0,6	0,6	0,6	0,8
22d Utrymme för matservering större än 100 m² exempelvis matsal, cafeteria	0,5	0,6	0,6	0,8
22e Övriga utrymmen där människor vistas mer än tillfälligt exempelvis cellkontor, vilrum, personalrum, reception, avskilt rum i kontorslandskap	0,6	0,6	0,6	–
22f Utrymme där människor vistas tillfälligt exempelvis korridor, entré, kapprum, kopiering	0,6	0,8	0,8	–
22g – dock i trapphus	1,0	1,2	–	

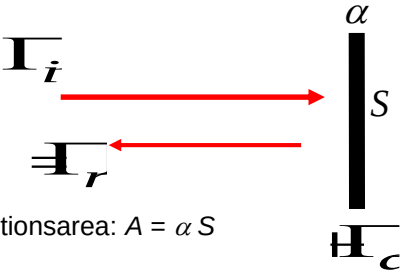
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Efterklangstider enl standard SS 25268:2007

Tabell 27 – Längsta efterklangstid i rum, T_{20} , för hotell och restauranger

Typ av utrymme	T_{20} s			
	Ljudklass			
	A	B	C	D
27a Gästrum	0,5	0,8	0,8	–
27b Utrymme för samtal i grupp exempelvis mötesrum, konferensrum	0,6	0,6	0,6	–
27c Utrymme för matservering större än 100 m ² exempelvis matsal, restaurang, cafeteria	0,5	0,6	0,6	–
27d Övriga utrymmen där människor vistas mer än tillfälligt exempelvis kontor, personalrum, reception	0,5	0,6	0,6	–
27e Utrymme där människor vistas tillfälligt exempelvis foajé, korridor, entré, hisshall, kapprum, vilorum	0,6	0,8	0,8	–
27f – dock i trapphus	1,0	1,2	1,5	–

Beräkning av efterklangstid – Absorptionsarea



$$\alpha = \Pi_a / \Pi_i$$

- Absorptionsarea: $A = \alpha S$

$[m^2]$ eller $[m^2S]$

Absorptionskoefficienter – α

	<u>125</u>	<u>250</u>	<u>500</u>	<u>1k</u>	<u>2k</u>	<u>4k</u>
<u>Väggar:</u>						
Betong	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Tegel	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Tegel, putsad	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Tegel, målad	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Gipsskivevägg	0,12	0,1	0,08	0,06	0,06	0,06
13 Gips på 25 regler	0,16	0,15	0,07	0,07	0,05	0,06
13 Gips på 25 regler med mineralull	0,26	0,2	0,1	0,07	0,04	0,07
13 Gips på 100 regler	0,29	0,1	0,05	0,04	0,07	0,09
50 Tråpanel	0,1	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Absorptionsareor – [m²S]

	<u>125</u>	<u>250</u>	<u>500</u>	<u>1k</u>	<u>2k</u>	<u>4k</u>
<u>Ljudabsorption per föremål (m²/st):</u>						
Stående person i ytterkläder	0,17	0,41	0,91	1,3	1,43	1,47
Stående person i innekädder	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Sittande person	0,17	0,36	0,47	0,52	0,5	0,46
Trästol	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
Trästol med klädd sits	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Stol med klädd sits och rygg	0,17	0,23	0,23	0,22	0,19	0,18
Stoppad teaterstol, tom	0,17	0,24	0,31	0,37	0,36	0,31
Stoppad teaterstol, med en pers/stol	0,24	0,38	0,49	0,6	0,61	0,63

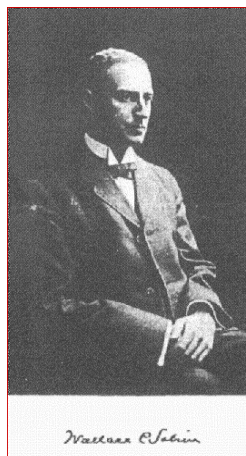
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Sabines formel [säj-bins formel]

- Koppling mellan efterklangstid och absorptionsarea:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{A}$$

- A = absorptionsarea
- V = rummets volym



Wallace C. Sabine (1868-1919)

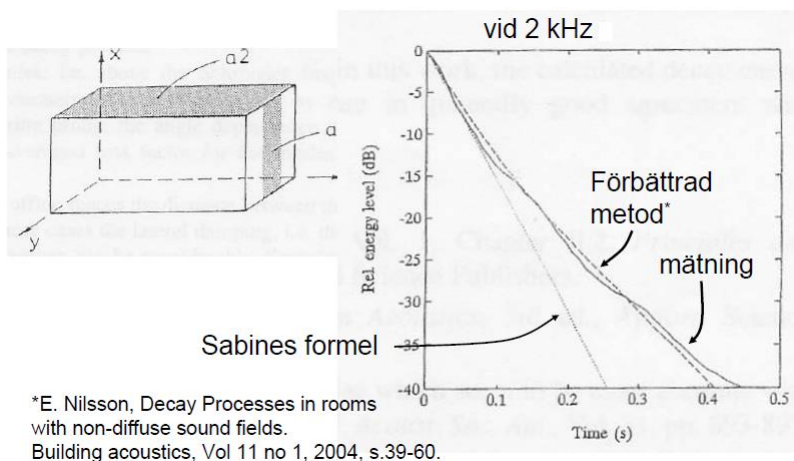
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Förutsättningar för Sabines formel

- Idealt, diffust ljudfält
- Medelabsorptionsfaktor $\alpha_d < 0.3$
- Ljudabsorberande ytor jämnt fördelade i rummet
- Rummet har inte alltför extrem form, d v s $L \sim B \sim H$
(ex på extrem form: korridor eller kontorslandskap)

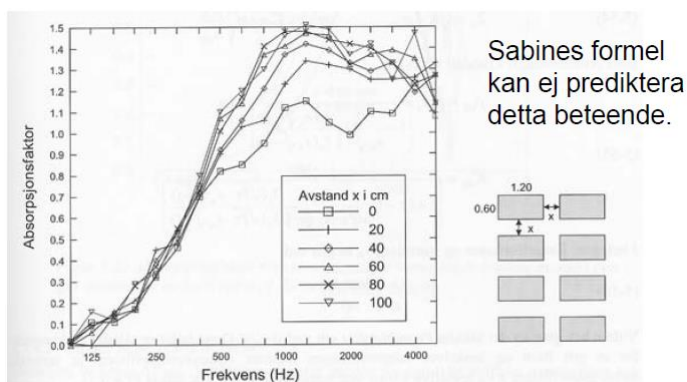
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ojämnt fördelade absorbenter



Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Uppdelade absorbenter



Figur 5-21 Absorpsjonsfaktor målt i klangrom for 8 stk. 25 mm matter av mineralull, totalt areal 5.8 m². Dimensjoner og konfigurasjon som vist i skisse. (Etter øvingsoppgave NTNU).

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Mätning av α i efterklangsrums

- Rum utan absorbent:

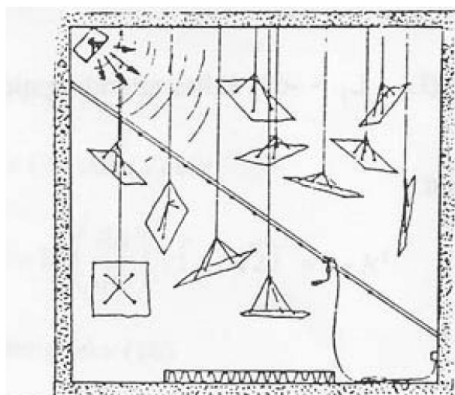
$$T_{60}^I = 0,16 \frac{V}{A^I}$$

- Rum med absorbent:

$$T_{60}^{II} = 0,16 \frac{V}{A^{II}}$$

- Tillsatt absorptionsarea:

$$A = A^{II} - A^I = 0,16V \left(\frac{1}{T_{60}^{II}} - \frac{1}{T_{60}^I} \right)$$



Figur 7. Ljudhårt rum med diffusorer.

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: från boken

- I ett efterklangsrums med volymen $V = 200 \text{ m}^3$ och efterklangstiden $T_{60} = 12 \text{ s}$ för alla frekvenser lägger man in absorbentmaterial på en yta av $S = 10 \text{ m}^2$ (standardförfarande). Den nya efterklangstiden mäts upp till $T_{60} = 8 \text{ s}$ vid $f = 100 \text{ Hz}$ och $T_{60} = 2 \text{ s}$ vid $f = 2 \text{ kHz}$. Beräkna absorptionskoefficienten α för de båda frekvenserna.

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Önskade efterklangstider:

Frekvens Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Efterklangstid, s	2,6	2,0	1,7	1,7	1,7	1,7

- Rummets volym: $23 \times 7.7 \times 46 \approx 8000 \text{ m}^3$
- Antal åhörare: 1000 pers

$$T_{60} = K \cdot \frac{V}{A} \Rightarrow A = K \cdot \frac{V}{T_{60}} \begin{cases} T_{60} = 2,6 \Rightarrow A \approx 500 \text{ m}^2 \\ T_{60} = 2,0 \Rightarrow A \approx 650 \text{ m}^2 \\ T_{60} = 1,7 \Rightarrow A \approx 750 \text{ m}^2 \end{cases}$$

Frekvens Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m²	500	650	750	750	750	750

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Absorptionsarea för en person

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m²	0,17	0,36	0,47	0,52	0,50	0,46

- Absorptionsarea för 1000 pers:

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m²	170	360	470	520	500	460

- Återstående absorptionsarea

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionsyta A, m²	330	290	280	230	226	230

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Golv (1058 m²): trägolv på regel

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionskoefficient α	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Absorptionsyta A, m²	158	116	105	77	63	77
Återstående absorptionsyta A, m²	330-158 = 172	290-116 = 174	280-105 = 175	230-77 = 153	226-63 = 163	230-77 = 153

- Sido- och podieväggar (900 m²): plywood

Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Absorptionskoefficient α	0,28	0,22	0,17	0,09	0,10	0,11
Absorptionsyta A, m²	250	198	153	81	90	97
Avvikelse från önskat A, m²	172-250 = -78	174-198 = -24	175-153 = 22	153-81 = 72	163-90 = 73	153-97 = 56

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Ex: Absorptionsmaterial i konsertsal

- Slutresultat:

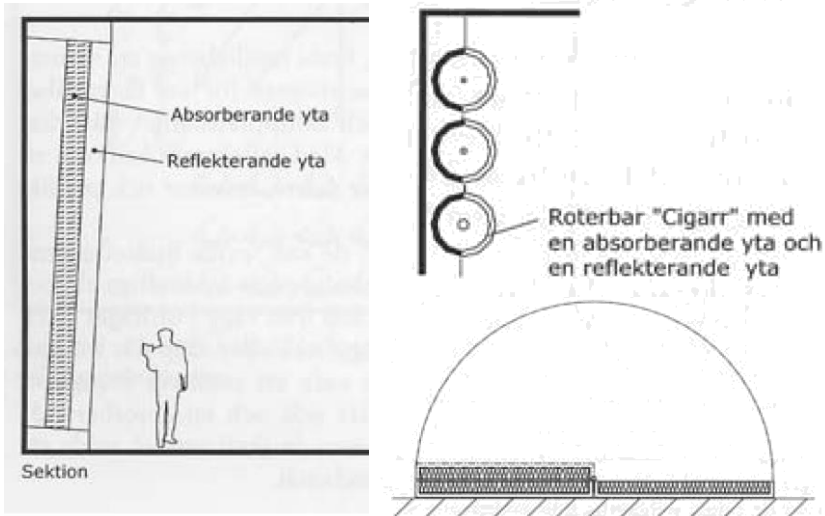
Frekvens, Hz	125	250	500	1000	2000	4000
Önskad absorptionsarea, m²	500	650	750	750	750	750
Erhållen absorptionsarea, m²	578	674	728	678	677	687
Önskad efterklangtid (s)	2,6	2,0	1,7	1,7	1,7	1,7
Erhållen efterklangtid (s)	2,2	1,9	1,8	1,9	1,9	1,9

- En bit på väg, men uppfyller fortfarande inte kraven!

Hur kan man variera T_{60} i en befintlig lokal?

Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Variabla absorbenter



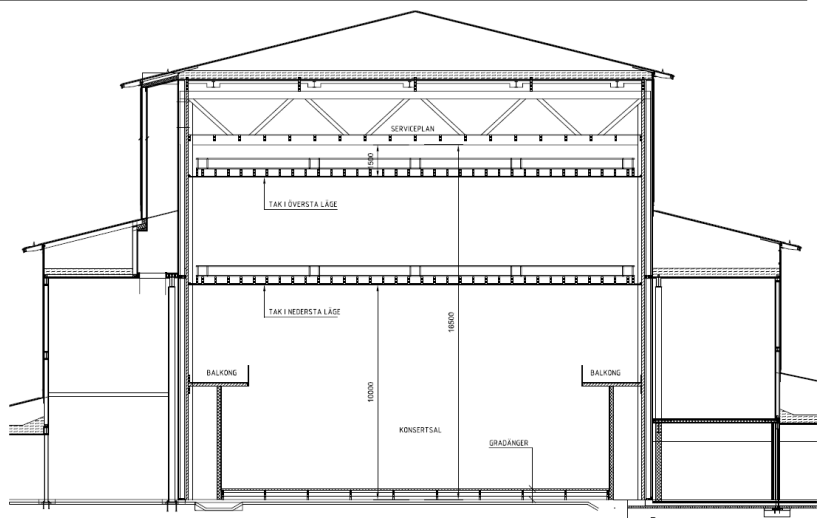
Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Studio acusticum i Piteå $T_{60} = 1.1 - 2.5$ s



Kristian Stålné / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Studio acusticum



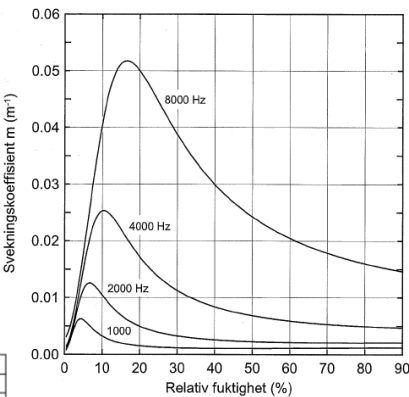
Kristian Stålne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01

Luftabsorption

- Sabines formel
korrigeras till

$$T_{60}=0,16 \frac{V}{A+4mV}$$

- Endast stora salar



	m in 10 ⁻³ Neper per metre, for octave bands with centre frequency in Hz						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
10 °C, 30 % - 50 % humidity	0,1	0,2	0,5	1,1	2,7	9,4	29,0
10 °C, 50 % - 70 % humidity	0,1	0,2	0,5	0,8	1,8	5,9	21,1
10 °C, 70 % - 90 % humidity	0,1	0,2	0,5	0,7	1,4	4,4	15,8
20 °C, 30 % - 50 % humidity	0,1	0,3	0,6	1,0	1,9	5,8	20,3
20 °C, 50 % - 70 % humidity	0,1	0,3	0,6	1,0	1,7	4,1	13,5
20 °C, 70 % - 90 % humidity	0,1	0,3	0,6	1,1	1,7	3,5	10,6

Kristian Stålne / Ljud i byggnad och samhälle / VTAF01