

Rak-43.3415 Building physical design 2 - Acoustical design

Autumn 2015

Exercise 1. Solutions.

1.

- a) Sound pressure of normal speech at 1 m distance is 0,02 Pa. Calculate sound pressure level.
b) What is the sound pressure corresponding to threshold of pain?
c) Calculate the corresponding sound power when the acoustical power of a loudspeaker is 0,8 W.
d) What is the intensity level of the loudspeaker at a 3 m² surface? What about when the surface area is 1 m²?

Solution.

a)

Äänenpainetason määritelmä:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

jossa

$p_0 =$	20	μPa	(vertailuäänepaine, joka vastaa osapuilleen hiljaisimman kuultavissa olevan äänen painetta)
$p =$	0,02	Pa	

saadaan puheen äänenpainetasoksi

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 60 \text{ dB}$$

b)

Ratkaistaan kipukynnystä vastaava äänenpaine, kun $L_p = 120$ dB:

$$20 \log \left(\frac{p}{p_0} \right) = 120 \Leftrightarrow \log p - \log p_0 = 6 \Leftrightarrow p = 10^{\log p_0 + 6}$$
$$= 20 \text{ Pa}$$

c)

Äänitehotason määritelmä:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

jossa

$W_0 =$	10^{-12}	W	(vertailuääniteho)
$W =$	0,8	W	

saadaan kaiuttimen äänitehotasoksi

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) = 119 \text{ dB}$$

d)

Intensiteettitason määritelmä:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

jossa

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \quad (\text{vertailuintensiteetti})$$

ja intensiteetti määritellään äänitehona pinta-alayksikköä kohti:

$$I = \frac{W}{S}$$

kun $S = 3 \text{ m}^2$ ja $W = 0,8 \text{ W}$, saadaan intensiteettitasoksi

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) = \mathbf{114 \text{ dB}}$$

Intensiteetti- ja tehotason välillä on yhteys:

$$L_W = L_I + 10 \log S$$

jossa S on äänilähteen sisäänsä sulkevan kuvitteellisen pinnan pinta-ala.

Kun tarkastellaan yhden neliön pinta-alaa, logaritmitermi menee nolaksi ja intensiteetti- ja tehotaso ovat yhtä suuret. Kun $S = 1 \text{ m}^2$, intensiteettitaso on siis yhtä suuri kuin c)-kohdassa, eli $L_I = \mathbf{119 \text{ dB}}$.

2.

Calculate the total sound level caused by sound sources having the following sound levels:

- a) 50 dB, 50 dB
- b) 59 dB, 61 dB and 72 dB
- c) 0 dB, 0 dB
- d) 1 dB, -10 dB

Solution.

Kokonaisäänitaso:

$$L_{p,tot} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{n=1}^N 10^{L_{p,n}/10} \right)$$

a) $L_{p,tot} = 53,0 \text{ dB}$

b) $L_{p,tot} = 72,5 \text{ dB}$

c) $L_{p,tot} = 3,0 \text{ dB}$

b) $L_{p,tot} = 1,3 \text{ dB}$

3.

What is the total sound power (linear and A-weighted) of a video projector when the linear sound power level in octave bands is as follows?

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Linear sound power level L_w [dB]	35	39	41	43	42	39

Solution.

Videoprojektorin äänitehotaso oktaavikaistoittain:

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Lineaarinen äänitehotaso L_w [dB]	35	39	41	43	42	39
A-painotus [dB]	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0
A-painotettu äänitehotaso L_{wA} [dB]	18,9	30,4	37,8	43,0	43,2	40,0

Lineaarinen kokonaisäänitehotaso:

$$L_{w_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{w_i}/10} = \quad \mathbf{48,3 \quad dB}$$

A-painotettu kokonaisäänitehotaso:

$$L_{wA_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{wA_i}/10} = \quad \mathbf{47,6 \quad dB}$$

4.

a) Calculate the sound pressure level of the loudspeaker in assignment 1 at 5 m distance outside at ground surface. Do the calculation in octave bands 125-4000 Hz and also calculate the total sound level. Show how much the SPL decreases when distance doubles. Assume that the loudspeaker is a point source and that the sound power level is equal at all frequency bands.

b) What is the A-weighted SPL of projector in assignment 3 in octaves 125-4000 Hz and the total SPL in an auditorium 4 m from the source. What about 8 m from the source? Assume that the projector acts as a point source, absorption area of the auditorium is 10 m²-Sab at all frequencies.

Solution.

a)

Ulkona vapaassa kentässä (ei heijastuksia) äänenpainetaso ja äänitehotason välinen yhteys on:

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{k}{\Omega r^2} \right]$$

nyt

$$\begin{aligned} k &= 1 \\ \Omega &= 6,28 \quad \text{rad} \\ r &= 5 \quad \text{m} \end{aligned} \quad (\text{kun äänilähde on sijaitsee maan pinnalla, } \Omega = 2\pi)$$

Äänenpainetaso 5 m etäisyydellä kaiuttimesta:

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Lineaarinen äänitehotaso L_w [dB]	119	119	119	119	119	119
Logaritmitermi $10 \log(k/\Omega r^2)$	-22,0	-22,0	-22,0	-22,0	-22,0	-22,0
Äänenpainetaso L_p [dB]	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0	97,0

Kokonaisäänepainetaso:

$$L_{p_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{p_i}/10} = 104,8 \quad \text{dB}$$

Tarkastellaan yleisesti äänitasojen erotusta, kun etäisyys r kaksinkertaistuu:

$$\begin{aligned} \Delta L_p &= \left[L_w + 10 \log \left(\frac{k}{\Omega r^2} \right) \right] - \left[L_w + 10 \log \left(\frac{k}{\Omega (2r)^2} \right) \right] \\ &= 10 \log \left(\frac{1}{r^2} \right) - 10 \log \left(\frac{1}{4r^2} \right) \\ &= 10 \log(4) \approx 6 \text{ dB} \end{aligned}$$

Vapaassa kentässä äänenpainetaso siis laskee 6 dB, kun etäisyys äänilähteeseen kaksinkertaistuu. Tulos pätee käytännössä kuitenkin vain pistemäiselle äänilähteelle, joka säteilee ääntä palloaaltona tasaisesti koko avaruuteen. Jos äänilähde ei ole pistemäinen, vaimeneminen on hitaampaa. Esimerkiksi vilkasliikenteinen tie käyttäytyy viivamaisena äänilähteenä, joka säteilee sylinteriaaltoa. Äänitaso vaimenee tällöin vain noin 3 dB etäisyyden kaksinkertaistuuessa.

b)

Äänenpainetaso L_p ja äänitehotaso L_w yhteys etäisyydellä r äänilähteestä **huonetilassa**:

$$L_p = L_w + 10 \log \left[\frac{k}{\Omega r^2} + \frac{4}{A} \right]$$

jossa

- k = suuntakerroin (pistemäiselle äänilähteelle $k=1$)
- Ω = avaruuskulma ($\pi/2 \dots 4\pi$)
- r = etäisyys äänilähteestä
- A = tilan absorptioala

nyt

- k = 1
- Ω = 3,14 rad (π, seinällä katon rajassa)
- r_1 = 4 m
- r_2 = 8 m
- A = 10 m²-Sab

Äänitaso 4 m etäisyydellä projektorista:

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Lineaarinen äänitehotaso L_w [dB]	35	39	41	43	42	39
Absorptioala [m ² -Sab]	10	10	10	10	10	10
Logaritmitermi $10 \log(k/\Omega r^2 + 4/A)$	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8	-3,8
Lineaarinen äänenpainetaso L_p [dB]	31,2	35,2	37,2	39,2	38,2	35,2
A-painotus [dB]	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0
A-painotettu äänitaso L_{pA} [dB]	15,1	26,6	34,0	39,2	39,4	36,2

A-painotettu kokonaisäänitaso:

$$L_{pA_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{pA_i}/10} = \mathbf{43,9 \text{ dB}}$$

Äänitaso 8 m etäisyydellä projektorista:

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Lineaarinen äänitehotaso L_w [dB]	35	39	41	43	42	39
Absorptioala [m ² -Sab]	10	10	10	10	10	10
Logaritmitermi $10 \log(k/\Omega r^2 + 4/A)$	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9
Lineaarinen äänenpainetaso L_p [dB]	31,1	35,1	37,1	39,1	38,1	35,1
A-painotus [dB]	-16,1	-8,6	-3,2	0,0	1,2	1,0
A-painotettu äänitaso L_{pA} [dB]	15,0	26,5	33,9	39,1	39,3	36,1

A-painotettu kokonaisäänitaso:

$$L_{pA_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{pA_i}/10} = \mathbf{43,7 \text{ dB}}$$

Huom:

- suora ääni ei vaikuta äänitasoon juuri lainkaan, kun ollaan huoneen kaiuntakentässä etäällä äänilähteestä, näin ollen olisi riittänyt huomioida pelkkä huonevaimennustermi $10 \log(4/A)$

- tästä syystä äänitaso ei laske huonetilassa vaikka etäisyys kaksinkertaistuu. Tässä kuitenkin oletettiin, että äänikenttä tilassa on diffuusi, joka ei käytännön huoneissa pidä tarkasti paikkansa. Käytännön tiloissa ääni vaimenee tehokkaammin kuin diffuusissa tilassa. Esimerkiksi hyvin vaimennetussa avotoimistossa äänen ns. leviämismuunnos etäisyyden kaksinkertaistuessa voi olla luokkaa 11 dB.

5.

Manufacturer states that the noise level caused by its mechanical input and extract ventilation unit (LTO-kone) is $L_{p,A,10m2} = 29 \text{ dB}$. To which space can the unit be positioned in an apartment so that the noise level regulations are satisfied? Use the permitted noise levels given in RakMK D2-2010 (Finnish Building Code, see www.ymparisto.fi). Absorption areas are given in brackets.

- a) makuuhuone / bed room (10 m²)
- b) kylpyhuone / bath room (1 m²)
- c) kodinhoituhuone / utility room (4 m²)
- d) keittiö / kitchen (4 m²)
- e) olohuoneeseen aukeava avokeittiö / kitchen opening to living room (4 m²)

Solution.

$$L_p = L_w - 10 \log\left(\frac{A}{4}\right)$$

$$L_p = L_w - 10 \log\left(\frac{10}{4}\right) = 29 \text{ dB} \Rightarrow L_w = 33 \text{ dB}$$

	Absorptioala	L _{p,A} [dB]	Määräys/ohjearvo [dB]	Voidaanko sijoittaa?
Makuuhuone	10	29	28	Ei
Kylpyhuone	1	39	38	Ei
Kodinhoituhuone	4	33	33	Kyllä
Keittiö	4	33	33	Kyllä
Avokeittiö ¹⁾	4	33	28	Ei

¹⁾aukeaa olohuoneeseen

RakMK D2-2010 ohjearvot:

Asuinhuoneet	0,5		28 / 33 *	0,20	*C1 määräys
Keittiö	#S	8 #A	33 / 38 *	0,20	*C1 määräys
- käyttöajan tehostus	#S	25	33 / 38	0,20	
Vaatehuone, varasto	#S	3	33 / 38		
Kylpyhuone	#S	10 #B	38 / 43	0,20	
- käyttöajan tehostus	#S	15	38 / 43	0,20	
WC	#S	7 #B	33 / 38		
- käyttöajan tehostus	#S	10	33 / 38		
Kodinhoituhuone	#S	8	33 / 38	0,30	
- käyttöajan tehostus	#S	15	33 / 38	0,30	

Huom.

- Asuinhuonetta ja keittiötä koskevat arvot ovat määräyksiä (C1-1998)
- Silloin, kun muu kuin asuinhuone muodostaa yhteistilan asuinhuoneen kanssa, sovelletaan asuinhuoneen vaatimusta

6.

Your assignment as an acoustician is to choose the most silent compressor of three models when you are given the following acoustic data from the manufacturers:

Compressor A: "Sound power level is 95 dB."

Compressor B: "Sound level measured at a distance of 10 m from the source is 80 dB. Measurement conducted outside."

Compressor C: "Sound level is 80 dB. Measurement conducted in a 250 m³ room with a reverberation time of 1,6 s."

Which compressor would you choose?

The frequency distribution of all compressors is reported to be as follows:

Frequency [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Correction in octave bands [dB]	-2	-4	-6	-8	-10	-20

Solution.

Määritetään kaikkien laitteiden kokonaisäänitehotasot ja vertaillaan näitä keskenään.

Compressor A

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Äänitehotaso L_w [dB]	93	91	89	87	85	75

Laitteen A kokonaisäänitehotaso:

$$L_{w_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{w_i}/10} = 96,9 \text{ dB}$$

Compressor B

Äänenpainetaso ulkona etäisyydellä $r = 10$ m tunnetaan. Oletetaan että mittaus on tehty siten, että äänilähde on maanpinnalla, jolloin $\Omega = 2\pi$. Lisäksi voidaan olettaa, että ulkotila vastaa vapaata kenttää, jossa ei tapahdu äänen heijastumista.

Äänenpainetason lausekkeeksi saadaan:

$$L_p = 80 \text{ dB} = L_w + 10 \log \left[\frac{k}{\Omega r^2} \right] = L_w + 10 \log \left[\frac{1}{2\pi \cdot 10^2} \right]$$

josta saadaan ratkaistua äänitehotasoksi

$$L_w = 108,0 \text{ dB}$$

Huomioidaan taajuuskaistaiset painotustermit, jolloin saadaan äänitehotasoksi oktaavikaistoittain:

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Äänitehotaso L_w [dB]	106,0	104,0	102,0	100,0	98,0	88,0

Laitteen B kokonaisäänitehotaso:

$$L_{w_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{w_i}/10} = 109,9 \text{ dB}$$

Compressor C

Äänenpainetason ja äänitehotason välinen yhteys huonetilassa (oletuksena diffuusi äänikenttä):

$$L_p = L_w + 10 \log\left(\frac{4}{A}\right) = L_w + 10 \log\left(\frac{4}{0,16V/T}\right) = L_w + 10 \log\left(\frac{25T}{V}\right)$$

Termiä $10 \log(4/A)$ kutsutaan huonevaimennukseksi.

Absorptioala A ratkaistiin tässä ns. Sabinein kaavasta, jolla voidaan laskea tilan jälkikaiunta-aika:

$$T = 0,16 \frac{V}{A}$$

Ratkaistaan L_w , kun jälkikaiunta-aika on $T = 1,6$ s, huonetilavuus $V = 250 \text{ m}^3$ ja $L_p = 83 \text{ dB}$:

$$L_w = 91,0 \text{ dB}$$

Äänitehotaso oktaavikaistoittain:

Taajuus [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Äänitehotaso L_w [dB]	89,0	87,0	85,0	83,0	81,0	71,0

Laitteen C kokonaisäänitehotaso:

$$L_{w_tot} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{L_{w_i}/10} = 92,9 \text{ dB}$$

Summary of results:

Compressor	Total sound power level L_{w_tot} [dB]
A	96,9
B	109,9
C	92,9

Todetaan kokonaisäänitehotasojen perusteella, että laite C on hiljaisin. Meluntorjunnan näkökulmasta se kannattaa valita kohteeseen.