



TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

Materiaali- ja kalliotekniikan koulutusohjelma

Jussi Haiko

**KALLIORAKENTAMISEN AIHEUTTAMAT TÄRINÄT JA
VÄRÄHTELYT HÄIRIÖTEKIJÄNÄ**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 29.9.2009.

Valvoja

Professori Mikael Rinne

Ohjaaja

Diplomi-insinööri Aimo Vuento

Helsinki 2009

ISBN 978-952-223-987-7

ISSN 1458-2198

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta

DIPLOMITYÖN

TIIVISTELMÄ

Tekijä:	Jussi Haiko		
Diplomityö:	Kalliorakentamisen aiheuttamat värähtelyt häiriötekijänä		
Päivämäärä:	29.9.2009	Sivumäärä:	74
Professuuri:	Kalliorakentaminen	Koodi:	Rak-32
Valvoja:	Professori Mikael Rinne		
Ohjaaja:	DI Aimo Vuento		
Avainsanat:	louhinta, räjäytys, runkomelu, ilmanylipaine, häiriö		
Työn tavoitteena oli selvittää louhinnan aiheuttaman ilmanpaineaallon etenemistä ja ennustamista sekä tunnelilouhinnan louhintaporauksen aiheuttaman runkomelun etenemistä maaperässä ja sen suuruutta eri etäisyyksillä porauksesta. Ilmanpaineaallon etenemistä ja ennustamista tutkittiin kirjallisuusselvityksellä. Runkomelua tutkittiin kirjallisuusselvityksellä ja mittauksilla. Työssä mitattiin louhintaporauksen aiheuttaman runkomelun suuruutta kalliotunnelissa tunnelilouhintatyömaan lähestyessä tunnelia, jossa mittaukset suoritettiin. Räjäytyksestä muodostuvan ilmanpaineaallon suuruutta voidaan arvioida useilla kirjallisuudesta löytyvillä empiirisillä kaavoilla. Myös vaurioarvoja on löydettävissä kirjallisuudesta. Tunnelilouhinnassa suuaukon ympärille aiheutuva ilmanpaineaalto on vaikeammin arvioitavissa ja arviointi vaatii tuekseen mittaustuloksia. Runkomelun mittaustulosten perusteella arvioitiin kalliossa tapahtuvaa vaimenemista. Vaimenemisen todettiin lyhyillä runkomelun kannalta merkitsevillä etäisyyksillä tapahtuvan lähinnä geometrisena vaimenemisena. Ehjän kallion materiaalivaimennus on niin pientä, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon. Lisäksi muodostettiin kaava runkomelun suuruuden arvioimiseksi tietyllä etäisyydellä kalliotilasta. Mittausten perusteella todettiin myös kallionlaadun huomattava vaikutus runkomelun vaimenemiseen. Kallion ruhjevyöhykkeillä voi olla hyvin suuri paikallinen vaikutus vaimenemiseen. Mittauksissa todettiin ruhjevyöhykkeen aiheuttama ~4 dB vaimennus mittaustuloksiin. Verrattaessa mittaustuloksia aikaisempiin mittauksiin asunnoista ja kellareista todettiin kalliolle perustettujen asuntojen perustuksissa tapahtuvan 5 – 10 dB vaimeneminen. Tämä vaimeneminen johtuu runkomelun taajuuden ja rakenteiden ominaistajuuksien suuresta erosta.			

HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Faculty of Engineering and Architecture

ABSTRACT OF THE
MASTER'S THESIS

Author:	Jussi Haiko		
Thesis:	Disturbance caused by vibrations from excavations		
Date:	September 29, 2009	Number of pages:	74
Professorship:	Rock Engineering	Code:	Rak-32
Supervisor:	Professor Mikael Rinne		
Instructor:	Aimo Vuento M. Sc.(Tech.)		
Key Words:	ground borne noise, drilling, air overpressure waves, blasting,		
The aim of this study was to determine how do the overpressure waves from blasting propagate and how can the magnitude of overpressure waves be predicted. In addition, this study examines the ground borne noise from drilling in tunnel excavations. The propagation of overpressure waves was studied as a literature research. The ground borne noise was studied using literature research and measurements. The magnitude of ground borne noise was measured in an existing rock tunnel when the excavations of a new utility tunnel approached the measuring point. The literature offers many equations for predicting the air overpressure resulting from blasts. Predicting the air overpressure from tunnel blasting is a much more complicated process compared to bench blasting, and reliable calculations require overpressure measurements from the field. The attenuation of ground borne noise in rock mass was studied using the measurement results. In relatively short distances (< 100 m), spreading is a major part of the attenuation. In a solid rock mass, the magnitude of material damping is negligible. As result of this study, a formula for calculating attenuation of ground borne noise in intact rock mass is formed. The measurement results show clearly that the rock quality can have a major impact on the ground borne noise attenuation: material damping of 4 dB was measured in one of the weak zones of the studied tunnel. When the noise measurement results were compared with the previous results measured in the basements of apartment houses with rock foundations, the calculations seem to indicate that foundations produce a damping effect of 5 – 10 dB. This happens since the frequency of ground borne noise from drilling exceeds the natural frequency of house structures a number of times.			

ESIPUHE

Tämän työ on tehty Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisen osaston tutkimustyönä. Kiitän mahdollisuudesta opinnäytetyön suorittamiseen.

Työn ohjausryhmään kuuluivat:

Professori Mikael Rinne, Teknillinen korkeakoulu

Professori Pekka Särkkä, Teknillinen korkeakoulu

Aimo Vuento, Geoneuvo

Toimistopäällikkö Pekka Holopainen, Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto

Projektipäällikkö Ilkka Satola, Helsingin kaupunki, kiinteistövirasto, geotekninen osasto

Toimitusjohtaja Jari Honkanen, Oy Finnrock Ab

Toimitusjohtaja Pertti Paavola, Kalliotekniikka Consulting Engineers Oy

Haluan kiittää kaikkia ohjausryhmän jäseniä kommenteista ja neuvoista joita sain työn aikana. Erityisesti haluan kiittää työn ohjaajaa Aimo Vuentoa. Lisäksi haluan kiittää Juha Tuovista avusta työn mittauksien suorittamisessa. Kiitoksia myös geoteknisen osaston henkilökunnalle sekä erityisesti kalliorakennustoimistolle.

Haluan kiittää myös Vuorimieskiltää ja Autokoulu Sompaveikkoa vastapainon tarjoamisesta opiskeluille. Teekkaritoiminta saattoi pidentää opiskeluaikaani, mutta teki siitä myös ikimuistoista.

Viiimeisenä haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni tuen tarjoamisesta opiskeluideni aikana.

Helsingissä 29.9.2009

Jussi Haiko

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT	5
Esipuhe.....	7
Symboliluettelo.....	11
1. Johdanto.....	13
1.1 Tutkimuksen taustaa.....	13
1.2 Tutkimusongelma.....	13
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	13
1.4 Työn raja.....	14
2. Tärinä kallio- ja maaperässä	14
2.1 Tärinäilmiön perusteet.....	14
2.1.1 P-aalto	16
2.1.2 S-aalto	16
2.1.3 Love-aalto	17
2.1.4 Rayleigh-aalto	17
2.2 Tärinän vaimeneminen teoriassa.....	18
2.3 Tärinän eteneminen maa – ja kallioperässä	20
2.3.1 Kivilajin ominaisuuksien vaikutus	20
2.3.2 Maaperän ominaisuuksien vaikutus.....	21
2.3.3 Kerroksellisuuden vaikutus.....	21
2.3.4 Rakoilun vaikutus	22
2.4 Tärinän vaimeneminen maa – ja kallioperässä	23
2.5 Tärinän siirtyminen rakenteisiin.....	25
2.6 Tärinän suuruuden arviointi.....	27
3. Louhintatyön runkomelu	27
3.1 Peruskäsitteitä äänestä	27
3.1.1 Ihmisen kuuloalue.....	28

3.1.2	Taajuuspainotus.....	28
3.1.3	Useiden äänilähteiden yhteisvaikutus.....	29
3.2	Runkomelun synty.....	30
3.3	Louhintaporauksen runkomelun mittaaminen	32
3.3.1	Yleistä äänen mittaamisesta	32
3.3.2	Mittauksissa huomioonotettavia tekijöitä	33
3.4	Runkomelua koskevat säädökset.....	33
3.4.1	Yleiset melusäädökset.....	33
3.4.2	Louhintaporausta koskevat määräykset	34
3.5	Runkomelun häiriöt ympäristölle.....	35
3.6	Louhintaporauksen runkomelun rajoittaminen	36
4.	Louhinnan ilmanpaineaalto	36
4.1	Ilmanpaineaallon syntymekanismit	36
4.1.1	Ilmanpaineaallon synty	36
4.1.2	Ilmanpaineaallon kulku ilmassa	37
4.1.3	Ilmanpaineaallon suuruuden arviointi	41
4.1.4	Ilmanympäristön paineen mittaaminen	44
4.1.5	Ilmanpaineaalto tunnelissa	44
4.2	Ilmanpaineaallon rajoittaminen.....	50
4.3	Ilmanpaineaaltoa koskevat säädökset.....	51
4.4	Häiriöt ympäristölle.....	52
5.	Kenttämittaukset	52
5.1	Yleistä	52
5.2	Mittauslaitteisto	53
5.3	Mittausjärjestely	53
5.3.1	Tärinän heräte.....	56
5.3.2	Tärinämittaukset	56
5.3.3	Äänenpaineen mittaukset	56
5.3.4	Porausetaisyysden määrittäminen	56
5.4	Mittaustulokset	57

5.5	Tulosten käsittely	61
5.5.1	Materiaalivaimennus.....	62
5.5.2	Geometrinen vaimennus	64
5.6	Vertailu aikaisempiin mittaustuloksiin	70
6.	Johtopäätökset ja suositukset.....	70
6.1	Louhintaporauksen aiheuttama runkomelu.....	70
6.2	Louhinnan aiheuttama ilmanpaineaalto.....	72
7.	Yhteenveto.....	72
	Lähdeluettelo	74

SYMBOLILUETTELO

A	siirtymäamplitudi	m	tehokkuuskerroin
A_r	tärinän siirtymäamplitudi etäisyydellä r	n	vaimenemiseksponentti
A_0	tärinän siirtymäamplitudi etäisyydellä r_0	n	tunnelin seinien kitkakerroin
		P	ilman ylipaine
A_s	geometrinen vaimeneminen	P	teho
A_d	materiaalivaimeneminen	P_r	heijastuspaine
a	heilahduskiiktyvyys	P_s	vapaa ilman ylipaine
c	p-aallon nopeus väliaineessa	P_0	normaali-ilmanpaine
d	tunnelin ekvivalentti halkaisija	p_1	mitattu äänenpaine
D	etäisyys räjäytyksestä	p_2	referenssiäänepaine
E	kimmomoduuli	Q	räjähteen massa panostilassa
E	iskuenergia	Q_a	yhellä hidasteajalla räjähtävän panoksen suuruus
f	taajuus	r	skaalattu etäisyys
f_i	ilmanpaineaallon heijastuskerroin	r	etäisyys lähteestä pisteessä r
G	leikkausmoduuli	r	ilmanpaineen alenemiskerroin
K	kokoonpuristuvuuskerroin	r	etäisyys tunnelin suuaukosta
k	olosuhteista riippuva kerroin	R	etäisyys räjähteestä
k	empiirinen kerroin	r_0	etäisyys lähteestä pisteessä r_0
L	äänenpainetaso	S	lähdetyypistä riippuva kerroin
L_{kok}	kokonaisäänenpainetaso	S_2	tunnelin poikkileikkauksen pinta-ala
L_n	äänilähteen n äänenpainetaso	s	reikäväli
L_{Aeq}	A-painotettu keskiäänitaso	T	hidasteaika
$L_{pA}(t)$	hetkellinen A-äänitaso	t	jakson aika

u	siirtymä	α	materiaalivaimennuskerroin
v	heilahdusnopeus	ΔP_x	ylipaine risteyksen jälkeen
v_i	referenssiheilahdusnopeus	ΔP	ylipaine ennen risteystä
v	aaltoliikkeen etenemisnopeus	ΔP_1	ylipaine suuremmassa poikkileikkauksessa
$v_{\max}$	heilahdusnopeuden huippuarvo	ΔP_0	ylipaine pienemmässä poikkileikkauksessa
V_P	P-aallon nopeus	ζ	materiaalin vaimennussuhde
V_S	S-aallon nopeus	λ	aaltoliikkeen aallonpituus
V_s	äänen nopeus ilmassa	ρ	tiheys
V_R	R-aallon nopeus	ν	Poissonin luku
W	nimellinen iskuenergia		

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen taustaa

Kalliorakentamisessa suoritettavat louhintatyöt voivat aiheuttaa jonkinlaisia häiriöitä lähiympäristön asukkaille. Louhintaporauksen runkomelu on havaittavissa asunnoissa, räjäytyksien aiheuttamat värinät välittyvät lähietäisyydellä rakenteisiin ja ilmanpaineaalto saattaa ”helistellä” ikkunoita etäälläkin. Kalliorakentamista tehdään Helsingissä tulevaisuudessakin kaupunkirakenteen tiivistyessä ja siksi on tarpeen arvioida rakentamisen aiheuttamia häiriöitä.

Ilmanpaineaallon tutkiminen tuli ajankohtaiseksi osittain myös siksi, että Suomen Rakennusinsinöörien Liitto Ry (RIL) on julkaisemassa uuden ohjeen rakentamisen aiheuttamista värinöistä. Tunnelin louhintaporauksen runkomelun tutkiminen alkoi Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen laskettua lupapäätöksensä louhintaporauksen ilta-ajan melurajaa 45 desibelistä 40 desibeliin. Tällä melurajan laskulla saattaa olla huomattava kustannusvaikutus tunnelirakentamisessa.

1.2 Tutkimusongelma

Louhintaporauksen aiheuttama runkomelu voi aiheuttaa häiriöitä asunnoissa lähietäisyydellä. Sen aiheuttama värinä on niin pientä, ettei rakenteille aiheudu vaurioita. Runkomelun suuruutta on yleensä mitattu vain yksittäisissä häiriötapauksissa.

Räjäytyksen aiheuttamalle ilmanpaineaallolle ei Suomessa ole asetettu rajoja ja se aiheuttaa häiriöitä asukkaille sekä saattaa aiheuttaa vahinkoja lähinnä ikkunoille. Myös ilmanpaineaallon suuruuden ennustaminen tunnelilouhintojen yhteydessä on ongelmallista.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Diplomityön tarkoituksena on selvittää louhinnan aiheuttaman ilmanpaineaallon etenemistä ja ennustamista sekä tunnelilouhinnan louhintaporauksen aiheuttaman runkomelun vaimenemista kallioperässä ja sen suuruutta eri etäisyyksillä porauksesta.

1.4 Työn rajaus

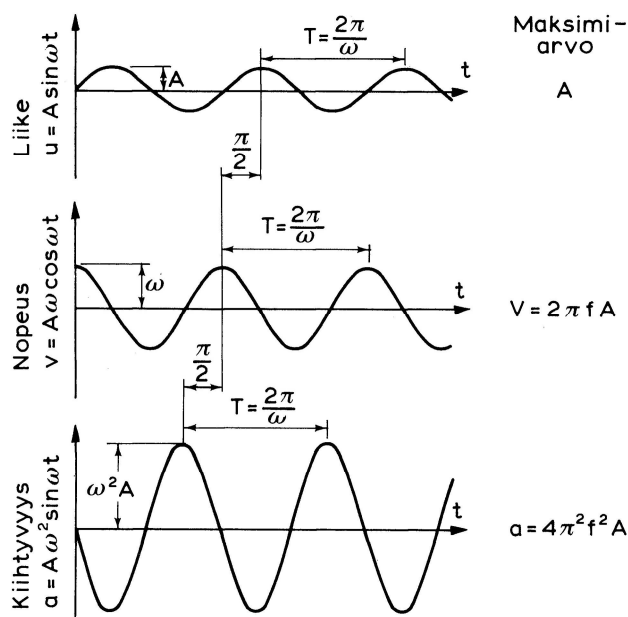
Tässä työssä tutkitaan kirjallisuusselvityksenä ilmanpaineaallon käyttäytymistä asutuskeskuslouhinnoissa. Tunnelilouhinnan louhintaporauksen aiheuttamaa runkomelua tutkitaan kirjallisuusselvityksenä sekä mittauksin. Työssä ei käsitellä räjäytystärinöiden aiheuttamia häiriöitä tai louheen kuljetuksen aiheuttamia meluhaittoja.

Ihmiset kokevat häiritsevyyden hyvin eri tavalla. Tässä työssä on keskitytty häiriötekijöiden teknisiin seikkoihin, eikä tutkita miten ihmiset kokevat erilaiset häiriöt.

2. TÄRINÄ KALLIO- JA MAAPERÄSSÄ

2.1 Tärinäilmiön perusteet

Tärinä on maanpinnan aaltoliikettä, jonka aiheuttavat maaperässä kulkevat seismiset aallot. Näitä aaltoja voidaan käytännön vaatimissa tarkkuuksissa pitää harmonisena aaltoliikkeenä, joka on yksinkertainen aaltoliike (Vuolio 1991). Sinimuotoinen harmoninen aaltoliike on esitetty Kuva 1.



Kuva 1. Harmoninen värähtely (Vuolio 1991).

Aaltoliikkeen aiheuttama siirtymä tietyllä jaksonajanhetkellä lasketaan kaavalla

$$u(t) = A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (1)$$

jossa u on siirtymä (m)
 A on siirtymäamplitudi (m)
 t on jakson aika (s)
 f on taajuus (Hz).

Siirtymän derivaattana saadaan heilahdusnopeus, jota käytetään louhintatärinöiden aiheuttamien riskien ja vaurioiden arvioinnissa. Heilahdusnopeus on myös useimmin mitattu värähtelyn suuruuden arvo. Heilahdusnopeus lasketaan kaavalla

$$v(t) = \frac{du}{dt} = A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (2)$$

kun $t = 0$, $v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot A$

jossa v on heilahdusnopeus (m/s)
 f on taajuus (Hz)
 t on jakson aika (s)
 A on siirtymäamplitudi (m).

Tärinän aiheuttama heilahduskiikkyvyys on heilahdusnopeuden derivaatta. Myös heilahduskiikkyvyyttä käytetään tärinöiden aiheuttamien riskien arvioinnissa. Varsinkin herkkien laitteiden tärinärajat on usein ilmoitettu kiikkyvyyden arvoina. Heilahduskiikkyvyys harmoniselle värähtelylle lasketaan kaavalla

$$a(t) = \frac{d^2u}{dt^2} = A \cdot 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot -\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (3)$$

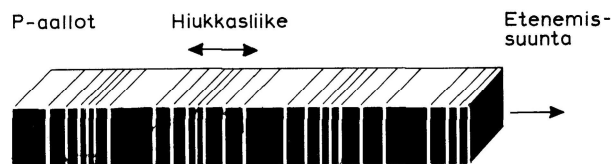
kun $t = 0$, $a = 4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot A$

jossa a on heilahduskiikkyvyys (m/s²)
 f on taajuus (Hz)
 t on jakson aika (s)
 A on siirtymäamplitudi (m).

Maa- ja kallioperässä värinä välittyy erilaisina kimmoaaltoina. Kimmoaallot jaetaan kahteen eri ryhmään, runkoaaltoihin ja pinta-aaltoihin. Runkoaaltotyyppinä on kaksi erilaista puristusaaltoa (P-aalto) ja leikkausaaltoa (S-aalto). Värinän lähteen ollessa maan alla syntyy lähteessä vain P- ja S-aaltoja. Maanpintaan saapuneista aalloista osa taipuu ja muuttuu pinta-aalloiksi. Pinta-aaltojen amplitudi vaimenee syvemmälle mentäessä. Pinta-aalloista tunnetuimmat ovat Rayleigh-aalto (R-aalto) ja Love-aalto.

2.1.1 P-aalto

P-aalto on puristusaalto, joka aiheuttaa aineen puristumista ja venymistä. Siinä hiukkaset värähtelevät aallon etenemissuunnassa. P-aallon etenemisen periaate on esitetty Kuva 2.



Kuva 2. P-aalto (Vuolio 1991).

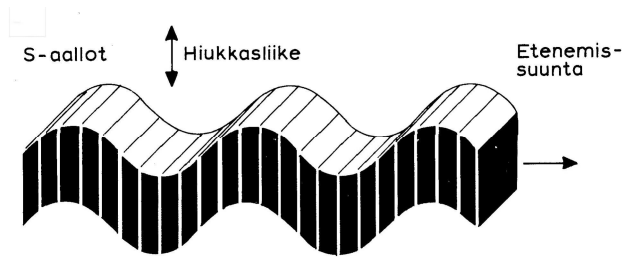
P-aallon nopeus riippuu väliaineen elastisista ominaisuuksista. P aallon nopeus saadaan kaavalla (Burger 2006)

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (4)$$

jossa V_p on P-aallon nopeus (m/s)
 K on kokoonpuristuvuuskerroin (Pa)
 G on leikkausmoduuli (Pa)
 E on kimmomodulaari (Pa)
 ρ on tiheys (kg/m^3)
 ν on Poissonin luku.

2.1.2 S-aalto

S-aalto on leikkausaalto, jossa ainehiukkaset värähtelevät kohtisuorasti aallon etenemissuuntaa vasten aiheuttaen leikkausjännitystä. S-aalto ei etene nesteissä eikä kaasuissa. Kuva 3 on esitetty S-aallon kulkuperiaate.



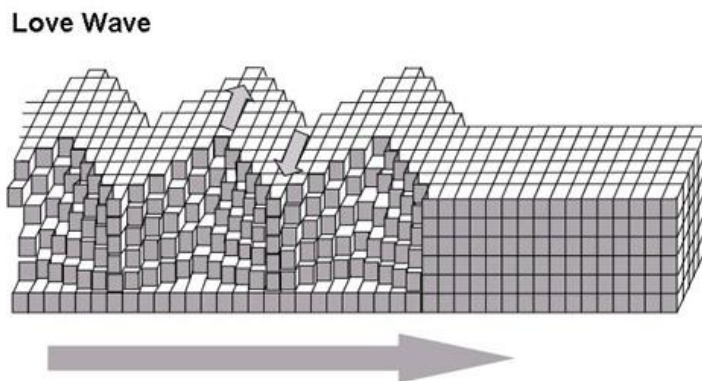
Kuva 3. S-aalto (Vuolio 1991).

S-aallon nopeus saadaan kaavalla (Burger 2006)

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \nu)}} \quad (5)$$

2.1.3 Love-aalto

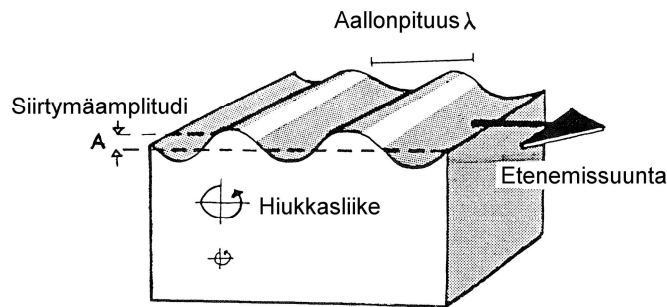
Love-aalto on pinta-aalto, joka etenee siirtämällä materiaalia etenemissuuntaansa nähden poikittaisessa suunnassa. Love-aallot ovat nopeampia kuin R-aallot, mutta hitaampia kuin P- ja S-aallot. Love-aalto vaimenee samoin kuin muutkin pinta-aallot. Kuva 4 on esitetty Love-aallon etenemisperiaate.



Kuva 4. Love-aalto (David 2007).

2.1.4 Rayleigh-aalto

Rayleigh-aalto (R-aalto) on pinta-aalto, joka syntyy, kun runkoaalto etenee maanpintaan ja taipuu. R-aalto aiheuttaa hiukkasten ellipsinmuotoisen liikkeen aallon etenemissuunnassa. R-aallon etenemisperiaate on esitetty Kuva 5.



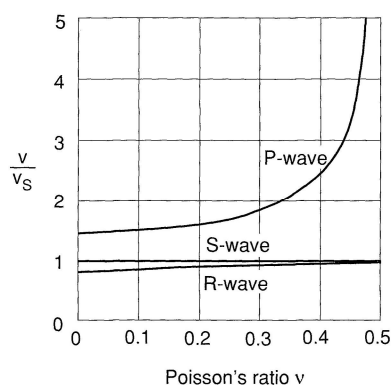
Kuva 5. Rayleigh-aalto (Persson 1994).

R-aaltojen nopeudelle ei ole tarkkaa laskukaavaa, mutta nopeutta voidaan arvioida likimäärin Poissonin luvun ja S-aaltojen nopeuden perusteella kaavalla (Persson 1994)

$$V_R \approx V_s \frac{0,86 + 1,14 \cdot \nu}{1 + \nu} \quad (6)$$

jossa V_R on R-aallon nopeus
 V_s on S-aallon nopeus (m/s)
 ν on Poissonin luku.

Poissonin luvun suurin mahdollinen arvo on 0,5. Tästä voidaan päätellä, että P-aalto on samassa väliaineessa aina huomattavasti nopeampi kuin S-aalto ja R-aalto. Kuva 6 on esitetty eri aaltotyyppien nopeus suhteessa toisiinsa ja Poissonin lukuun.



Kuva 6. Kimmoaaltojen nopeus suhteessa Poissonin lukuun (Klein & Rainer 1995).

2.2 Tärinän vaimeneminen teoriassa

Tärinän suuruus vaimenee aaltorintaman edetessä. Vaimenemisella on kaksi osatekijää. Geometrinen vaimeneminen, jonka aiheuttaa aaltorintaman laajentuminen sen edetessä

ja materiaalivaimeneminen, joka riippuu väliaineesta. Materiaalivaimeneminen johtuu maapartikkelien välisestä kitkasta ja koheesiosta. Teoreettinen vaimeneminen ideaalisissa olosuhteissa (materiaali elastinen ja isotrooppinen) voidaan laskea kaavalla (Klein & Rainer 1995)

$$A_r = A_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \cdot e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (7)$$

jossa A_r on värinän amplitudi etäisyydellä r (m)

A_0 on värinän amplitudi etäisyydellä r_0 (m)

n on vaimenemiseksponentti, joka riippuu värinälähteen muodosta ja aaltotyypistä

α on materiaalivaimennuskerroin.

Geometrisen vaimenemisen vaimenemiseksponentti n riippuu värinän aaltotyypistä ja aaltolähteestä. Tekijän n arvoja erilaisille lähteille ja aaltotyypeille on esitetty Taulukko 1. Viiva- tai pistelähteellä tarkoitetaan aaltolähteen muotoa. Viivalähteestä on kysymys esim. raideliikenteen aiheuttamissa värinöissä, pistelähteestä taas esim. räjäytystyössä.

Taulukko 1. Vaimenemiseksponentin n arvoja erilaisille aaltolähteille (Kim & Lee 2000)

Lähteen sijainti	Lähteen tyyppi	Aallon tyyppi	n
Maan pinnalla	Pistelähde	Pinta-aalto	0,5
Maan pinnalla	Pistelähde	Runkoaalto	2,0
Maan pinnalla	Viivalähde	Pinta-aalto	0
Maan pinnalla	Viivalähde	Runkoaalto	1,0
Maan alla	Pistelähde	Runkoaalto	1,0
Maan alla	Viivalähde	Runkoaalto	0,5

Esitetyistä vaimenemiseksponentin suuruuksista voidaan päätellä, että runkoaallot vaimenevat nopeammin kuin pinta-aallot eli samasta lähteestä lähtevät pinta-aallot kulkevat pidemmälle kuin runkoaallot.

Materiaalivaimennuskerroin α voidaan määrittää kaavalla (Klein & Rainer 1995)

$$\alpha = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \zeta \cdot f}{v} \quad (8)$$

jossa α on materiaalivaimennuskerroin
 ζ on materiaalin vaimennussuhde
 f on aaltoliikkeen taajuus (Hz)
 λ on aaltoliikkeen aallonpituus (m)
 v on aaltoliikkeen aallonnopeus (m/s).

Materiaalivaimennuskerroin kasvaa lineaarisesti taajuuden funktiona eli korkeat taajuudet vaimenevat nopeammin kuin matalat taajuudet. Korkeat taajuudet vaimenevat nopeammin, koska ne tekevät työtä samalla matkalla enemmän aallonpituuden ollessa lyhyempi.

Koska vaimentuminen jatkuu usein yli useiden kymmenen potenssien, voidaan hahmotamisen helpottamiseksi heilahdusnopeudesta käyttää desibeliarvoja SI-yksikön (mm/s) sijaan. Heilahdusnopeus (mm/s) voidaan muuttaa desibeleiksi kaavalla (Klein & Rainer 1995)

$$v(\text{dB}) = 20 \cdot \log\left(\frac{v}{v_i}\right) \quad (9)$$

jossa $v(\text{dB})$ on heilahdusnopeus (dB)
 v on heilahdusnopeus (mm/s)
 v_i on referenssiheilahdusnopeus $5 \cdot 10^{-8}$ mm/s.

2.3 Tärinän eteneminen maa – ja kallioperässä

2.3.1 Kivilajin ominaisuuksien vaikutus

Tärinän etenemiseen kallioperässä vaikuttaa hyvin monia eri tekijöitä. Rakoilemattomassa kivimassassa jota ei esiinny kuin laboratoriomittakaavassa etenemiseen vaikuttavat kivilaji, tekstuuri, tiheys, huokoisuus, anisotropia, jännitystila, vesipitoisuus ja lämpötila (Eitzenberger 2008). Seismisten aaltotyyppien nopeuksia eri kivilajeissa on esitetty Taulukko 2.

Taulukko 2. Seismisten aaltojen nopeus eri materiaaleissa (Jaeger 2007)

Kivilaji	v_p (m/s)	v_s (m/s)	ρ (kg/m ³)
Kuiva hiekka	400-1200	100-500	1500-1700
Märkä hiekka	1500-2000	400-600	1900-2100
Veden kyllästämä savi	1100-2500	200-800	200-2400
Huokoinen veden kyllästämä hiekkakivi	2000-3500	800-1800	2100-2400
Kalkkikivi	3500-6000	2000-3300	2400-2700
Dolomiitti	3500-6500	1900-3600	2500-2900
Graniitti	4500-6000	2500-3300	2500-2700
Basaltti	5000-6000	2800-3400	2700-3100
Gneissi	4400-5200	2700-3200	2500-2700
Hiili	2200-2700	1000-1400	1300-1800
Vesi	1450-1500	-	1000

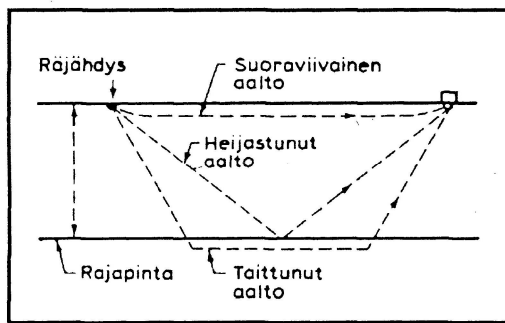
Seismisten aaltojen nopeuden vaihtelut kivilajien sisällä johtuvat esim. huokoisuudesta, jolla on merkittävä vaikutus muun muassa aallonnopeuteen kalkkikivessä.

2.3.2 Maaperän ominaisuuksien vaikutus

Maaperässä seismiset aallot ovat huomattavasti kallioperää hitaampia, koska kimmoduuli on pienempi. P-aaltojen nopeus kasvaa maalajien karkeuden kasvaessa. Karkearakeiset maalajit tiivistyvät paremmin ja kimmomoduli kasvaa tiiveyden kasvaessa. Pohjavedellä on huomattava vaikutus p-aaltojen nopeuteen, koska p-aallot voivat kulkea myös vedessä. S-aallot voivat kosteassa maaperässä vaimentua melkein kokonaan. Maaperässä pisimmälle välittyvät värinät, jotka ovat lähellä maalajin ominaistaajuutta. Ominaistaajuudet ovat savimailla yleensä 5-15 Hz ja kovemmillä moreenimailla 10 - 25 Hz taajuudet (Talja 2004).

2.3.3 Kerroksellisuuden vaikutus

Aallot voivat edetä maaperässä erilaisia reittejä. Kallio- ja maaperässä olevilla rajapinnoilla tapahtuu aaltojen heijastumista ja taittumista, joka vaikuttaa aaltojen kulkureittiin, taajuussisältöön ja nopeuteen. Aaltojen nopeuden kerroksessa määräävät kerroksen ominaisuudet. Kuva 7 on esitetty suoraviivaisen, heijastuneen ja taittuneen aallon periaatteelliset kulkureitit.



Kuva 7. Suoraviivainen aalto, heijastunut aalto ja taittunut aalto (Vuolio 1991).

Todellisuudessa tilanne on kuitenkin huomattavasti monimutkaisempi, koska heijastavia ja taittavia rajapintoja voi olla useita eivätkä ne kulje tietyssä suunnassa ja rajapinnoilla syntyy aina uusia heijastuneita ja taittuneita aaltoja.

Merkittävänä vaimennusta aiheuttavana tekijänä on kallio- ja maaperän rajapinta. Räjätystärinöitä käsiteltäessä on todettu, että pienillä alle 1,0 – 2,0 kg momentaanisilla panoksilla tärinä vaimenee kallion ja saven rajapinnassa lähes kokonaan (Vuolio 1991). Tällä huomiolla on merkitystä mietittäessä savipitoisten ruhjeiden vaikutusta tärinän etenemiseen.

2.3.4 Rakoilun vaikutus

Kallioperässä seismisten aaltojen etenemiseen vaikuttaa kivilajien ominaisuuksien lisäksi rakoilu. Kallioperässä on rakoja, joiden koko vaihtelee muutaman mikrometrin raoista kymmenien metrien siirroksiin. Rako koostuu kahdesta tasomaisesta karkeasta pinnasta, jotka ovat osittain yhteydessä toisiinsa. Tila rakojen välissä voi olla puhdas tai se voi sisältää rakotäytettä tai vettä.

Yleisesti rakoilu aiheuttaa P- ja S-aaltojen nopeuden laskua, koska kalliomassan kimmoduuli laskee, mutta se aiheuttaa myös vaimenemista, koska osa etenevän aallon energiasta heijastuu ja loppu energiasta etenee raon yli. Yleensä kivimassassa korkeat taajuudet vaimenevat ja kivimassan sanotaan toimivan alipäästösuodattimena. Raon aiheuttamaan vaimenemiseen vaikuttavat raon pituus, avauma, rakotäyte, normaalijännitys ja raon suunta verrattuna seismisen aallon kulkusuuntaan (Eitzenberger 2008). Käytännössä rakoilua on vaikea ottaa huomioon vaimenemista arvioitaessa. Käytettäessä vaimenemisen laskemiseen kaavaa (7) vain materiaalin vaimennussuhde tekijä ζ ottaa

—

huomioon materiaalin aiheuttaman vaimentumisen eikä sen avulla voida ottaa huomioon rakoilun muuttumista.

2.4 Tärinän vaimeneminen maa – ja kallioperässä

Eri maalajeille ja kalliolle löytyy tutkimuksista materiaalivaimennuskertoimen α arvoja, mutta niiden ongelmana on niiden suuri riippuvuus taajuudesta. Lisäksi on tutkittu vaimennussuhteen ζ arvoja, joita voidaan käyttää vaimenemisen arvioimisessa määrittäessä materiaalivaimennuskerrointa. Vaimennussuhteen arvoja on esitetty Taulukko 3.

Taulukko 3. Vaimennussuhteen arvoja maa- ja kallioperässä (Gutowski & Dym 1976)

Materiaali	ζ
Savi	0,5
Hiekka, Siltti, Sora	0,1
Kallio	0,01

Tärinän vaimenemista kallio- ja maaperässä voidaan lähestyä jakamalla vaimeneminen kahteen eri osaan ja laskemalla ne erikseen. Geometrinen vaimeneminen voidaan laskea kaavalla (Gutowski & Dym 1976)

$$A_s = S \log_{10} \left(\frac{r}{r_0} \right) \quad (10)$$

jossa A_s on geometrinen vaimeneminen (dB)
 r_0 on etäisyys lähteestä pisteessä r_0 (m)
 r on etäisyys lähteestä pisteessä r , $r > r_0$ (m)
 S on lähdetyypistä riippuva kerroin.

Kertoimen S arvoja erilaisten tärinälähteiden tapauksissa on esitetty Taulukko 4.

Taulukko 4. Kertoimen S arvoja (Gutowski & Dym 1976)

Lähteen sijainti	Lähteen tyyppi	Aallon tyyppi	S
Maan pinnalla	Pistelähde	Pinta-aalto	10
Maan pinnalla	Pistelähde	Runkoaalto	40
Maan pinnalla	Viivalähde	Pinta-aalto	0
Maan pinnalla	Viivalähde	Runkoaalto	20
Maan alla	Pistelähde	Runkoaalto	20
Maan alla	Viivalähde	Runkoaalto	10

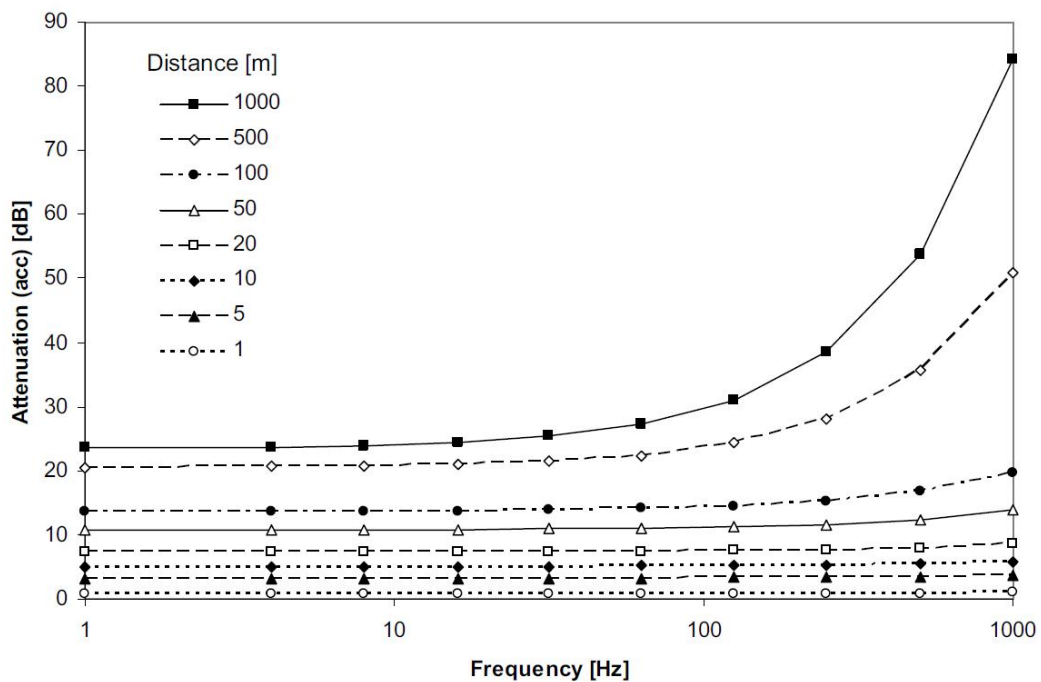
Materiaalivaimeneminen voidaan laskea kaavalla (Gutowski & Dym 1976)

$$A_d = -10 \log_{10} e^{-\frac{2\pi}{c} \zeta (r-r_0)} \quad (11)$$

jossa A_d on materiaalivaimeneminen (dB)
 c on p-aallon nopeus väliaineessa (m/s)
 ζ on materiaalin vaimennussuhde
 $r-r_0$ on pisteiden välinen etäisyys (m).

Kaavasta (11) voidaan päätellä, että materiaalivaimennus on verrannollinen aallon nopeuteen väliaineessa eli vaimeneminen on suurempaa maaperässä kuin kallioperässä.

Eitzenberger (2008) määrittä kaavojen 9 ja 10 perusteella tunnelissa kulkevasta raideliikenteestä aiheutuvan värinän vaimenemisen suhteessa taajuuteen laskemalla vaimenemisten summan ($A_s + A_d$). P-aallon nopeuden oletettiin olevan 4500 m/s ja materiaalin vaimennussuhteeksi 0,01. Tulos on esitetty Kuva 8.



Kuva 8. Vaimeneminen kallioperässä taajuuden funktiona eri etäisyyksillä (Eitzenberger 2008).

Kuva 8 nähdään, että ehjässä kalliossa alle 100 m etäisyyksillä suurin osa vaimenemisesta on geometrista vaimenemista ja materiaalivaimennus on merkityksetön alle 100 Hz taajuuksilla. Pidemmillä välimatkoilla ja yli 100 Hz taajuuksilla materiaalivaimennuksella voi olla huomattavaakin merkitystä. Kallion rikkonaisuusvyöhykkeet voivat kuitenkin aiheuttaa paikallisesti huomattavia vaimennuksia.

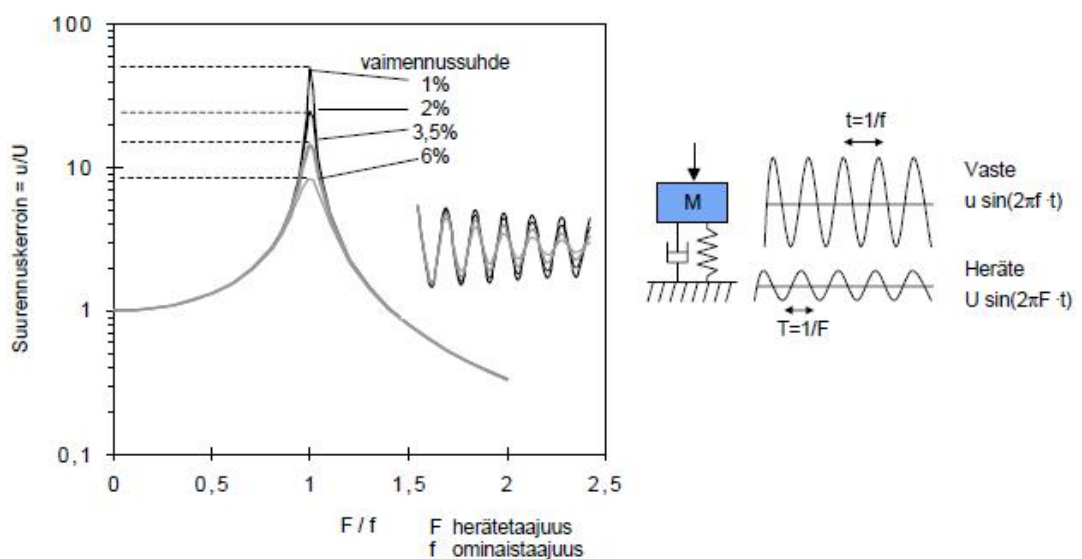
2.5 Tärinän siirtyminen rakenteisiin

Tärinän siirtymiseen maaperästä tai kallioista rakenteisiin vaikuttavat, tärinän suuruus, suunta ja taajuussisältö, rakennuksen mitat, perustamistapa, perustuksen jäykkyys ja rakennuksen massa.

Rakennuksen massa vaimentaa maaperän tärinää. Mitä massiivisempi rakennus, sitä suurempi on rakennuksen vaimennus. Rakennukset mitat vaikuttavat rakenteiden ominaistajuuuteen. Suuremmilla rakennuksilla on matalampi ominaistajuus. Yleensä ongelmia esiintyy pientaloissa joiden alimmat ominaistajuuudet vaihtelevat välillä 5-14 Hz. Pientalojen ominaistajuus vois siis olla lähellä saven ominaistajuutta. Tyypillisen 7-8 kerroksisen kerrostalon ominaistajuus on noin 2 Hz (Talja 2004).

Tärinän siirtymiseen rakenteisiin vaikuttaa voimakkaasti värinän taajuussisältö. Tärinä siirtyy voimakkaimmin rakennukseen jos värinän taajuussisältö on lähellä rakennuksen ominaistaajuutta. Tärinä saa tällöin rakenteen värähtelemään harmonisesti sen ominaistaajuudella ja resonanssi-ilmiö kasvattaa värinän suuruutta. Resonanssi-ilmiössä rakenne värähtelee voimakkaasti. Rakenteen voimakas värähtely johtuu siitä, että rakenteessa oleva värähtelysteemi saa koko ajan lisää energiaa siihen kohdistuvista ääniaalloista. Tällöin värinän amplitudi voi kasvaa jopa monikymmenkertaiseksi. Rakenteeseen kohdistuvan värinän ollessa taajuussisällöltään huomattavasti matalampaa kuin rakenteen ominaistaajuus siirtyy värinä rakenteeseen samansuuruisena. Jos taas värinä on huomattavasti korkeataajuisempaa, värinä vaimenee (Talja et al. 2008).

Rakenteisiin välittyvää värinää voidaan arvioida värinän suurennuskertoimella, joka riippuu värinän herätetaajuuden ja rakenteen ominaistaajuuden suhteesta. Lisäksi rakenteen vaimennussuhde vaikuttaa suurennuskertoimeen. Kuvassa Kuva 9 on esitelty värinän suurennuskertoimen herätetaajuuden ja ominaistaajuuden funktiona eri vaimennussuhteilla. Yleensä rakennuksista mitatut vaimennukset ovat 1 - 6 %. Vaimennus syntyy enimmäkseen rakenteiden liitoksissa. Kerrostaloille on suhteelliseksi vaimennukseksi mitattu 0,5 - 2,1 %. Vaimennussuhteella on suurin merkitys lähellä rakenteen ominaistaajuutta. Poikettaessa vähänkin ominaistaajuudesta vaimennuksen vaikutus pienenee huomattavasti.



Kuva 9. Värähtelyn suurennuskertoimen herätetaajuuden ja jousi-massa-systeemin ominaistaajuuden (F/f) funktiona (Talja 2004).

2.6 Tärinän suuruuden arviointi

Todellisuudessa tärinän vaimenemista on hyvin vaikea arvioida kaavalla 7. ja tärinän suuruuden arviointiin on kehitetty erilaisia empiirisiä kaavoja riippuen tärinälähteestä. Lähinnä näitä kaavoja on esitetty räjäytystärinöille ja iskumaisen kuormituksen aiheuttamille tärinöille. Louhintaporauksen aiheuttaman tärinän vaimenemiselle ei ole omaa empiiristä kaavaa olemassa, joten tässä esitellään iskumaisen tärinän suuruuden arvioinnissa käytetty kaava, jota voidaan mahdollisesti soveltaa työn mittaustuloksiin.

Iskumaisen tärinän suuruutta voidaan arvioida kaavalla (Athanasopoulos & Pelekis 2000)

$$v_{\max} = k \frac{\sqrt{W}}{r} \quad (12)$$

jossa $v_{\max}$ on tärinän heilahdusnopeus (mm/s)
 k on olosuhteista riippuva kerroin
 W on nimellinen iskuenergia (J)
 r on vaakasuuntainen etäisyys tärinälähteestä (m).

Tätä kaavaa käytetään yleensä maan pinnalla tapahtuvan kuormituksen yhteydessä, joten se ei suoraan sovellu maan alla tapahtuva porauksen tärinän vaimenemiseen, koska tärinän vaimeneminen tapahtuu näissä tapauksissa eri tavalla. Kertoimella k voidaan kuitenkin yrittää ottaa huomioon maaperäolosuhteiden lisäksi erilainen vaimeneminen.

3. LOUHINTATYÖN RUNKOMELU

3.1 Peruskäsitteitä äänestä

Ääni on aaltoliikettä elastisessa väliaineessa. Ihminen aistii tämän aaltoliikkeen äänenä. Ilmassa ääni on pitkittäistä aaltoliikettä P-aallon tapaan. Muissa väliaineissa ääni välittyy myös leikkausaaltoina S-aallon tavoin.

Äänenpainetta mitataan yleensä desibeleissä, vaikka SI-järjestelmän paineen yksikkö on Pascal. Tähän on syynä äänenvoimakkuuden kasvun eksponentiaalinen luonne. Lisäksi asettamalla logaritmisin desibeliasteikon referenssipaineeksi ihmisen kuulokynnys

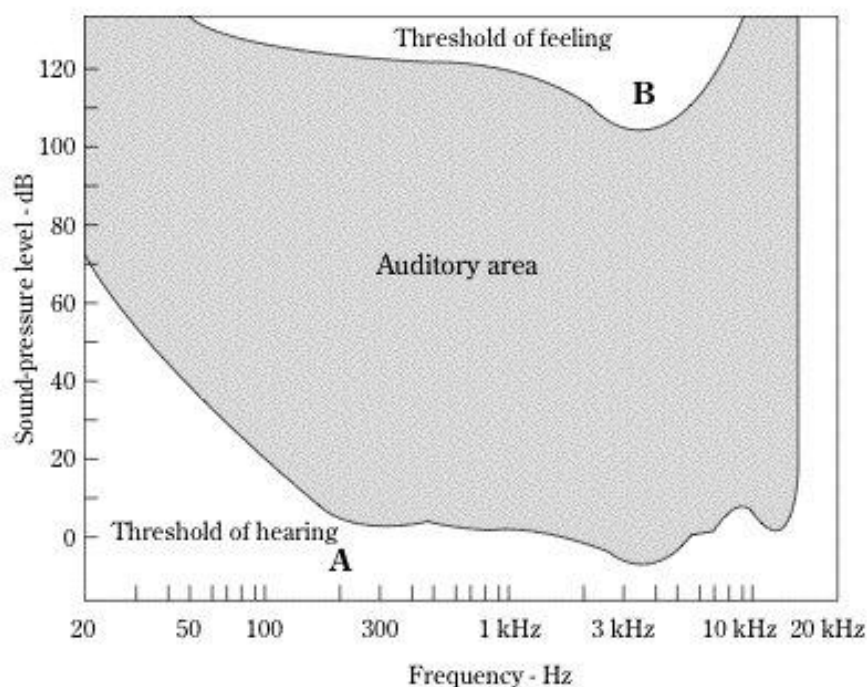
20µPa on ilmoitettu desibelimäärä aina osuus äänenpaineesta, joka on ihmisen kuulokynnyksen yläpuolella. Äänenpaine muutetaan desibeleiksi kaavalla (Everest 2000)

$$L = 20 \log_{10} \frac{p_1}{p_2} \quad (13)$$

jossa L on äänenpaineen suuruus (dB)
 p_1 on mitattu äänenpaine (Pa)
 p_2 on referenssiäänepaine 20 µPa.

3.1.1 Ihmisen kuuloalue

Ihmisen kuulokynnys on erilainen erilaisille taajuuksille. Ihmisen kuulo on herkimmillään 3 kHz kohdalla, jolloin 0 dB ääni on juuri ja juuri kuultavissa. Kuuloalue rajoittuu noin 120 - 130 dB äänenpaineeseen jolloin ihminen alkaa tuntea kutinaa korvissaan. Tätä suuremmat äänenvoimakkuudet kasvattavat tuntoaistimusta, kunnes aiheuttavat kipua. Ihmisen kuuloalue eritaajuuksilla on esitetty Kuva 10.

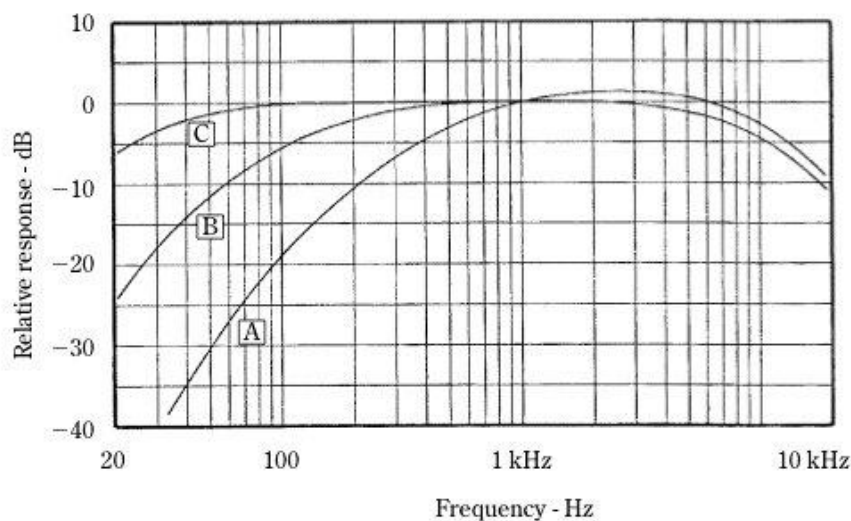


Kuva 10. Ihmisen kuuloalue (Everest 2000).

3.1.2 Taajuuspainotus

Äänenpaineen mittauksessa käytetään erilaisia taajuuspainotuksia. Taajuuspainotuksen valinta riippuu äänilähteestä ja mitattavasta äänenvoimakkuudesta. Taajuuspainotuksien

tarvitaan, koska ihmisen kuulon herkkyys vaihtelee taajuuden mukaan. Lisäksi ihmisen kuulon herkkyys eri taajuuksille vaihtelee äänenpaineen suuruuden mukaan. Äänen paineen suuruuden ollessa 20 - 55 dB käytetään A-taajuuspainotusta, 55 – 85 dB käytetään B-taajuuspainotusta ja 85 – 140 dB käytetään C-taajuuspainotusta. A-taajuuspainotusta käytetään lisäksi laajasti liikenne- ja teollisuusmelun mittauksessa (Everest 2000). Eri taajuuspainotukset on esitetty Kuva 11.



Kuva 11. Äänenpaineen taajuuspainotukset (Everest 2000).

3.1.3 Useiden äänilähteiden yhteisvaikutus

Useampi äänilähde yhdessä aiheuttaa äänenpainetason, joka ei ole äänenpainetason summa, vaan sitä kuvaava desibeliarvo on logaritminen suure, joka voidaan laskea kaavalla (Everest 2000, Mäkelä 1999)

$$L_{\text{kok}} = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_1}{10}} + 10^{\frac{L_2}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_n}{10}} \right) \quad (14)$$

jossa L_{kok} on kokonaisäänenpainetaso (dB)

L_1, L_2, L_n on yksittäisen äänilähteen äänenpainetaso (dB).

Jos tunnetaan kahden äänilähteen kokonaisäänenpainetaso ja toisen lähteen äänenpainetaso voidaan laskea tuntemattoman äänilähteen aiheuttama äänenpainetaso kaavalla (Everest 2000)

$$L_2 = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L_{\text{kok}}}{10}} - 10^{\frac{L_1}{10}} \right) \quad (15)$$

jossa L_2 on tuntemattoman äänilähteen äänenpainetaso (dB)

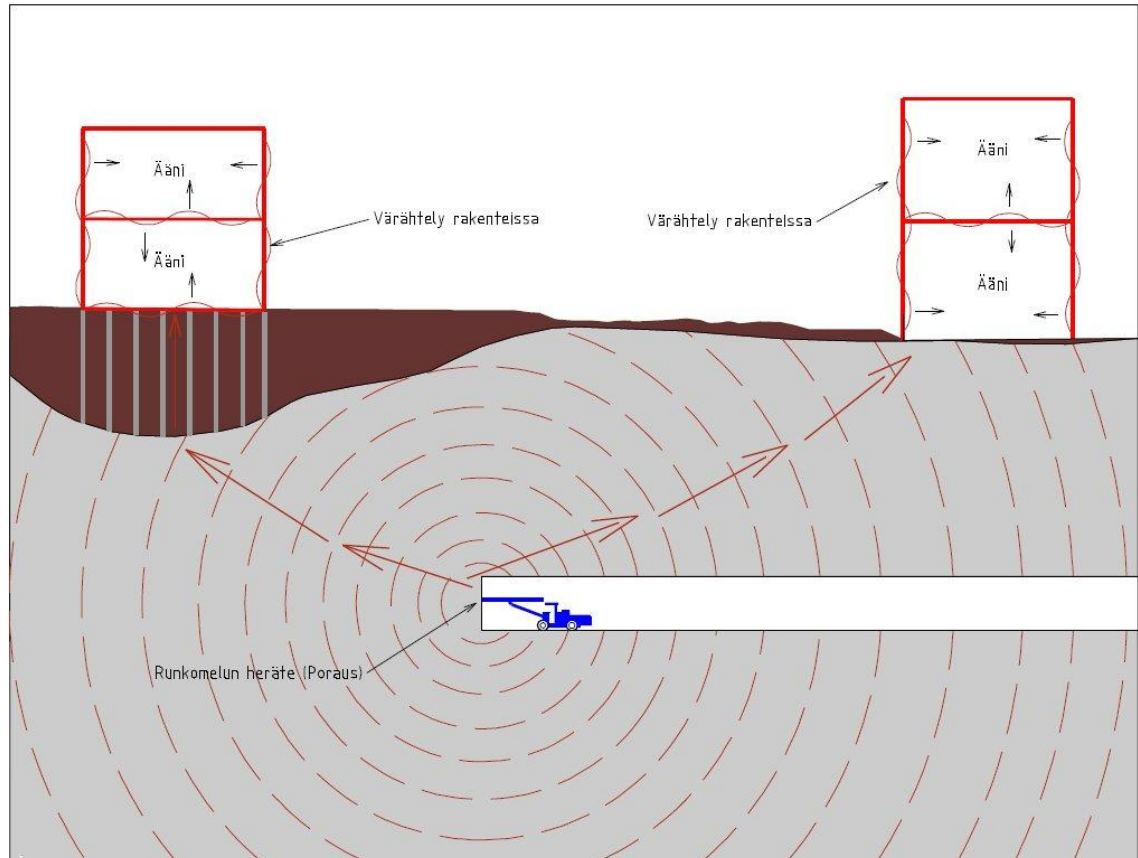
L_{kok} on kokonaisäänepainetaso (dB)

L_1 on tunnettu äänilähteen äänenpainetaso (dB).

3.2 Runkomelun synty

Runkomelulla tarkoitetaan kallio- ja maaperän kautta rakennuksen rakenteisiin siirtyvää tärinää, joka aiheuttaa kuultavaa ääntä. Tärinä etenee maa- ja kallioperässä aikaisemmin esitetyllä tavalla. Runkomelun aiheuttava tärinä on voimakkuudeltaan niin pientä, että sitä on häiriöiden vuoksi vaikea havaita tärinänä.

Louhintatyössä suurin pitkäaikainen runkomelun lähde on kallionporaus. Porauksen aiheuttama tärinä välittyy kallio- ja maaperän kautta rakennuksien perustuksiin ja rakenneseosien värähtely synnyttää ääntä, joka säteilee huonetilan pinnoista. Louhintaporaus aiheuttaman runkomelun kulku rakenteisiin on esitetty kuva 12.



Kuva 12. Runkomelun kulku maaperästä rakenteisiin.

Runkomelun suuruuteen vaikuttavat värähtelyn heräte (porauksen aiheuttama kallion värähtely), värähtelyn etenemisreitti (maa- ja kallioperäolosuhteet, kallion rikkonaisuus, rakennuksen perustamistapa ja etäisyys) ja huonetilan akustiset ominaisuudet (huonetilan pintarakenteet ja pintavaimennus) (Peltonen et al. 2005).

Kallioporakoneen iskutaajuus vaihtelee yleensä välillä 40 – 100Hz. Porakoneen iskuenergiasta saadaan arvio porakoneen tehon avulla kaavalla (Eskola et al. 2009)

$$E = \frac{P}{f} \quad (16)$$

jossa E on yhden iskun energia (J)
 P on porakoneen teho (W)
 f on iskutaajuus (Hz).

Tällä laskutavalla oletetaan kaiken porakoneen tehon muuttuvan iskuenergiaksi, mikä ei pidä paikkaansa, vaan porakoneessa tapahtuu energiahäviöitä. Kaavaa voitaneen kuitenkin soveltaa kallioporakoneen runkomelun herätettä arvioitaessa.

Runkomelun suuruus on yleensä noin 5 - 15 dB rakenteiden A-painotetun värinätason alapuolella. Runkomelun merkittävimmät taajuudet melunkannalta ovat yleensä alle 100Hz. Häiritseviä äänitasoja voi esiintyä korkeammillakin taajuuksilla, mutta tällöin rakennuksen pitää sijaita hyvin lähellä melun lähdettä ja olla perustettu kalliolle tai kitkamaalle (Talja & Saarinen 2009).

3.3 Louhintaporausrunkomelun mittaaminen

3.3.1 Yleistä äänen mittaamisesta

Runkoäänen mittaamisessa käytettävä mittaustapa riippuu mitattavasta äänestä ja määritetyistä raja-arvoista. Louhintaporausrunkomelun mittaamisessa käytetään A-taajuuspainotettua keskiäänitason, koska raja-arvot on määritetty keskiäänitasona.

Louhintaporausrunkomelua mitattaessa mittauksessa käytetään äänitasomittareita koskevissa standardissa IEC 61672 määriteltyä A-taajuuspainotusta ja ensisijaisesti standardin mukaista tarkkuusluokan 1 äänitasomittaria. Tarkkuusluokan kolme laitetta ei tule käyttää. Ekvivalenttitaso eli keskiäänitaso mittausaikaväliltä t_1 - t_2 määritetään kaavalla (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003)

$$L_{Aeq,t_1-t_2} = 10 \log \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \left(\int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_{pA}(t)}{10}} dt \right) \right]$$

jossa L_{Aeq,t_1-t_2} on A-painotettu keskiäänitaso (dB)

$L_{pA}(t)$ on hetkellinen A-äänitaso (dB).

Integroivat äänitasomittarit antavat tuloksensa suoraan keskiäänitasona. Mittauslaitteiden toiminta tulee tarkistaa ennen mittauksia käyttämällä standardin IEC 60942 mukaisista normaaliäänilähdettä.

VTT esittää uudessa julkaisussaan liikenteen aiheuttaman runkomelun mittauksessa käytettäväksi enimmäisäänitason mittaamista keskiäänitason sijasta. On mahdollista,

että tulevaisuudessa rakentamisessakin siirrytään enimmäisäänitason mittaukseen. Lisätietoa enimmäisäänitason mittaamisesta löytyy VTT:n julkaisusta maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi (Talja & Saarinen 2009).

3.3.2 Mittauksissa huomioonotettavia tekijöitä

Mittauspiste tulee valita siten, että tulokset kuvaavat asukkaisiin kohdistuvaa tyypillistä melualtistusta. Mittauspiste pitäisi sijoittaa mahdollisimman keskelle huonetta seinistä aiheutuvien heijastuksien välttämiseksi. Mittauspisteen pitäisi sijaita vähintään 1m päässä huoneen seinistä. Mittauksissa tulee kiinnittää huomiota siihen, että häiriöäänet eivät vaikuta mittaustuloksiin. Tällaisia ovat muun muassa asukkaan tai mittajaan aiheuttamat äänet esim. kävely tai vaatteiden kahina. Mikäli taustamelutason ja runkomelutason välinen ero on alle 10 dB vaikuttavat ne toisiinsa ja mittaustulosta on korjattava (Sosiaali- ja terveysministeriö 2003).

3.4 Runkomelua koskevat säädökset

3.4.1 Yleiset melusäädökset

Runkomelulle ei ole Suomessa erikseen annettu raja-arvoja. Valtioneuvosto on kuitenkin säätänyt päätöksessään 993/1992 meluntorjuntalain (382/1987) nojalla melutason ohjearvot, joista sisätilojen ohjearvot on esitetty Taulukko 5. Jos melu on luonteeltaan iskumaista tai kapeakaistaista, mittaus- tai laskentatulokseen lisätään 5 dB ennen vertaamista ohjearvoon.

Taulukko 5. Valtioneuvoston ohjearvot sisätilojen melutasolle

	Päiväohjearvo L_{Aeq} (dB)	Yöohjearvo L_{Aeq} (dB)
Asunto-, potilas- ja majoitushuoneet	35	30
Opetus- ja kokoontumistilat	35	
Liike- ja toimistohuoneet	45	

Lisäksi raja-arvoja melulle on esitetty Sosiaali- ja Terveysministeriön asumisterveysohjeessa, jonka valtuutussäännös on terveydensuojelulaki (763/94). Asunnoissa vallitsevalle melulle se antaa samat ohjearvot kuin valtioneuvoston päätös 993/1992, mutta lisäksi asumisterveysohjeessa on erilliset rajat pienitaajuiselle melulle tiloissa joissa nukutaan. Pienitaajuisen melun rajat on esitetty Taulukko 6. Päiväsaikaan pienitaajuisel-

le melulle voidaan käyttää noin 5 dB korkeampia ohjearvoja. Pienitaajuisten melun korkeammat rajat verrattuna normaaliin melutasoon johtuvat ihmisen kuulokynnyksen alemasta matalilla taajuuksilla. Asumisterveysohjeen ulkopuolelle jäävät kuitenkin ympäristönsuojelulain (86/2000) 60§:ssä tarkoitetut väliaikaiset melua ja tärinää aiheuttavat toimet, kun niistä on tehty ympäristönsuojelulain mukainen ilmoitus ja toiminta on ilmoituksessa annettujen ehtojen ja siitä tehdyn päätöksen mukaista.

Taulukko 6. Pienitaajuisten melun ohjearvot terssikaistoittain (STM 2003)

Kaista/Hz	20	25	31,5	40	50	63	80	100	125	160	200
$L_{Aeq, 1h}$ (dB)	74	64	56	49	44	42	40	38	36	34	32

VTT:n tiedotteessa maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi ((Talja & Saarinen 2009) esitetään suositus runkomelun ohjearvoiksi Suomessa. VTT:n suosituksen ohjearvot on esitetty Taulukko 7. Nämä rajat on kuitenkin tarkoitettu liikenteen aiheuttamalle jatkuvaa pitkäaikaista häiriötä aiheuttavalle melulle, eikä niitä voida suoraan käyttää rakentamisesta aiheutuvien lyhytaikaisten häiriöiden rajoittamiseen. Lisäksi rajat on määriteltä keskiäänitason L_{Aeq} sijaan enimmäisäänitasoina L_{pASmax} , koska keskiäänitaso ei sovellu liikenteen aiheuttamien nopeiden meluhuippujen häiritsevyyden mittaamiseen.

Taulukko 7. VTT:n suositus liikenteen runkomelutasojen ohjearvoksi (Talja & Saarinen 2009)

Rakennustyyppi	Runkomelutaso L_{prm} (dB)
Radio- tv ja äänitysstudiot konserttitalit	25-30
Potilashuoneet, majoitustilat, päiväkodit	30
Kokoontumis- ja opetustilat	30
Toimistot, kaupat, näyttelytilat, museot	40

3.4.2 Louhintaporausta koskevat määräykset

Ympäristönsuojelulain (86/2000) mukaan toiminnanharjoittajan on tehtävä ilmoitus kunnan ympäristöviranomaiselle tilapäistä melua tai tärinää aiheuttavasta toimenpiteestä. Viranomaisen on ilmoituksen johdosta annettava päätös, jossa voidaan antaa tarpeellisia määräyksiä ympäristön suojelemiseksi.

Helsingissä päätökset tekee Helsingin Kaupungin Ympäristökeskus. Päätökset perustuvat ympäristönsuojelulakiin (86/2000), ympäristönsuojeluasetukseen (169/2000) ja valtioneuvoston päätökseen melutason ohjearvoista (993/1992). Päätöksissä määritetään melutasonrajat louhintaporaukselle A-taajuuspainotettuna poraustyön aikaisena keskiäänitasona (L_{Aeq}). Taulukko 8 on esitetty melurajoja niille viimeaikaisille louhintaurakoille, joissa Helsingin kaupungin geotekninen osasto on ollut mukana. Poikkeuksellista näissä melurajoissa on se, että toiminnalle päiväaikaan ei aseteta melurajoja. Ympäristökeskus perustelee poikkeamistaan valtioneuvoston ohjearvoista sillä, että rakentamisesta aiheutuvat meluhaitat ovat väliaikaisia.

Taulukko 8. Ympäristökeskuksen asettamat rajat louhintaporaukselle

	Arkisin 7.00- 18.00	Arkisin 18.00- 22.00	Arkisin 22.00- 07.00	Viikonloppuisin ja juhapyhinä 07.00- 22.00
Myllypuron vesijohtotunnelin korjaus	-	45 dB	30 dB	35 dB
Meilahti-Pasila-Käpylä yhteiskäyttötunneli, urakkaosuus 3	-	40 dB	30 dB	35 dB
Maunula viemäritunnelin saneeraus	-	40 dB	30 dB	35 dB
Meilahti-Pasila-Käpylä yhteiskäyttötunneli, urakkaosuus 2	-	40 dB	30 dB	35 dB
Meilahti-Pasila-Käpylä yhteiskäyttötunneli, urakkaosuus 1	-	45 dB	30 dB	35 dB

3.5 Runkomelun häiriöt ympäristölle

Runkomelu aiheuttaa häiriöitä samaan tapaan kuin tavallinenkin melu. Häiritseväksi koettu melu saattaa vaikeuttaa nukahtamista tai estää sen. Melu voi myös heikentää unen syvyyttä, joka vaikuttaa unen virkistävään vaikutukseen. Unen häiriintymistä alkaa esiintyä, kun unenaikainen L_{Aeq} taso ylittää 25 – 35 dB.

Ihmisen reagointi meluun vaihtelee suuresti yksilöittäin ja myös ympäristö ja kellon aika vaikuttavat meluun reagointiin. Melun aiheuttamat reaktiot ilmenevät elintoimintojen tai käyttäytymisen muutoksina. Näitä ovat esimerkiksi verenkierron ja näköaistin

muutokset. Lisäksi melu saattaa lisätä aggressioita, masentuneisuutta sekä aiheuttaa päänsärkyä. Melu myös huonontaa työtehoa ja tarkkaavaisuutta.

3.6 Louhintaporauksen runkomelun rajoittaminen

Louhintaporauksen runkomelun suuruus riippuu käytetystä porauskalustosta. Runkomelun suuruutta on mahdollista pienentää hidastamatta porauksen tunkeutuvuutta. SveBeFo:n tutkimuksessa on todettu, että runkomelua voidaan pienentää jopa 7 dB kun pienennetään reikäkokoa ja syöttöpainetta. Porausnopeus laskee tällöin noin puoleen alkuperäisestä. Tällöin louhinta ei ole taloudellisesti kannattavaa, jos työ on jollakin muulla tavalla suoritettavissa (Dahlström & Walter 2006).

4. LOUHINNAN ILMANPAINEAALTO

4.1 Ilmanpaineaallon syntymekanismit

4.1.1 Ilmanpaineaallon synty

Yksinkertaisimmillaan ilmanpaineaalto syntyy räjähdysaineen räjähtäessä suoraan ilmassa tai pintapanoksena. Räjähtäessään räjähdysaineesta vapautuu hyvin lyhyessä ajassa suuri määrä energiaa ja räjähdysaine tuottaa hyvin nopeasti suuren määrän kaasua. Kemiallisessa reaktiossa vapautuvat kaasut puristavat kokoon ympäröivää ilmaa ja työntävät sitä ulospäin räjähdyspisteestä suurella nopeudella. Sama periaate pätee myös louhintatyöstä aiheutuvaan paineaaltoon johon tässä työssä keskitytään. Louhinnan yhteydessä syntyvän ilmanpaineaallon suuruutta pyritään kuitenkin rajoittamaan, koska suoraan ilmassa räjäytetyt panokset aiheuttavat hyvin suuren paineaallon ja jo hyvin pienet panokset aiheuttavat ikkunoiden hajoamista suurella alueella. Räjäytysalan normien mukaan pintapanosten käyttöä tulisi välttää ja asutulla alueella se on kielletty (Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö 1998).

Ylipaineaallon syntyyn louhintatyössä on neljä syytä: räjäytettävän kiven siirtymisen aiheuttama ilmanpaine, tärisevä maaperä, rakoilleesta kalliosta purkautuneet räjähdyskaasut ja etutäyteen alta purkautuneet räjähdyskaasut. Vastaavasti näiden tekijöiden aiheuttamia ilmanpaineen kasvun osatekijöitä kutsutaan tässä työssä ilmanpaineimpulsiksi (air pressure pulse APP), maanvärähtelyimpulssiksi (rock pressure pulse RPP),

kaasunpurkautumisimpulssiksi (gas release pulse GRP) ja etutäytteen vapauttamaksi impulssiksi (stemming release pulse SRP) (Siskind et al. 1980).

Ilmanpaineimpulssilla on yleensä suuri amplitudi ja sen aiheuttaa louhittavan kiven siirtymisen räjäytyksessä. Ilmanpaineimpulssin taajuus on huomattavasti matalampi kuin muiden räjäytyksen yhteydessä esiintyvien impulssien aiheuttaman ilmanpaineaallon taajuus. Hyvin suunnitellussa ja toteutetussa räjäytyksessä ilmanpaineimpulssi on teoriassa ilmanpaineaallon suurin osatekijä (Persson 1994).

Maanvärähtelyimpulssi syntyy räjäytyksestä aiheutuneesta pystysuuntaisesta maanvärähtelystä. Maaperä toimii teoriassa värähtelevänä mäntänä ja aiheuttaa ilmanpaineenkasvua. Maanvärähtelyimpulssilla on yleensä niin pieni amplitudi, ettei sitä tarvitse ottaa huomioon ilmanylipainetta tarkasteltaessa. Räjäytyksen ollessa optimaalinen ilmaan vapautuu pelkkä maanvärähtelyimpulssi eli maanvärähtelyimpulssi antaa ilmanylipaineen minimin.

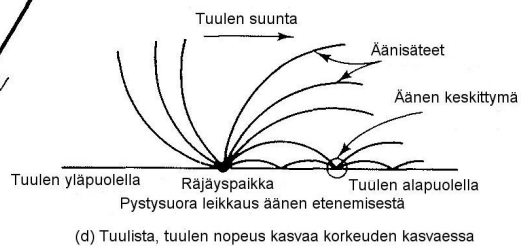
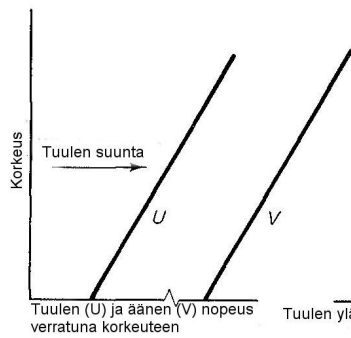
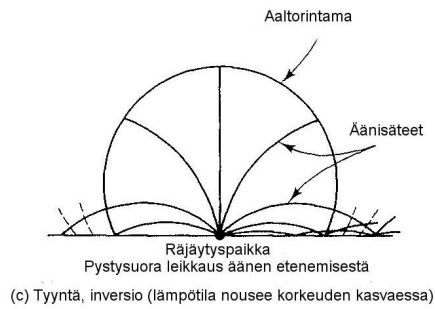
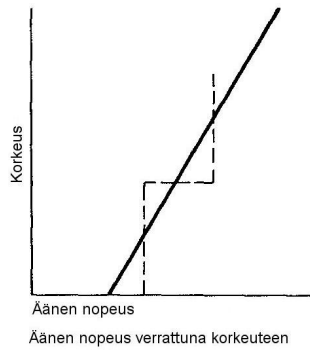
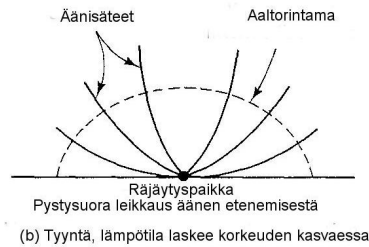
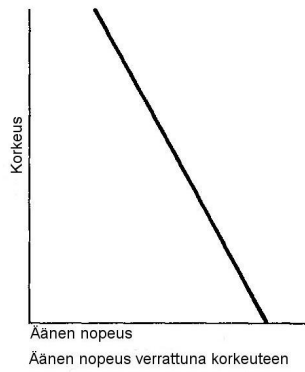
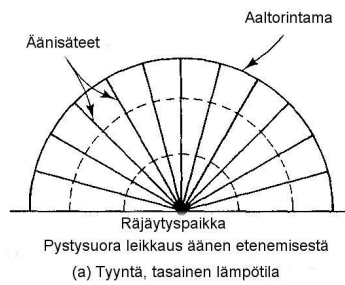
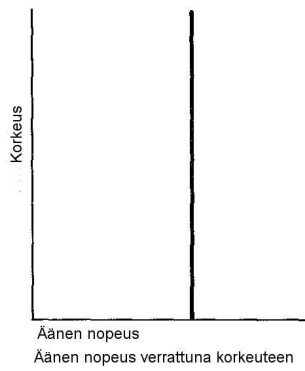
Kaasunvapautumisimpulssi aiheutuu räjähdyskaasuista jotka laajetessaan pääsevät purkautumaan kallion raoista. Etutäytteen vapauttama impulssi taas aiheutuu etutäytteen alta ilmaan purkautuneista räjähdyskaasuista. Näistä neljästä osatekijästä kaasunvapautumisimpulssi ja etutäytteen vapauttamaimpulssi ovat epätoivotuimmat, koska ne aiheuttavat korkeataajuisen ilmanpaineaallon, jolla on paljon energiaa. Energia on lähinnä häiritsevää ääntä, koska korkeataajuisena se ei välity matalataajuisen kohteeseen esim. rakennukseen. Ne ovat kuitenkin teoriassa helpoiten kontrolloitavia osia paineaallosta, koska niihin voidaan vaikuttaa muuttamalla räjäytyssuunnittelun parametreja ja tekemällä räjäytystyö huolellisesti.

4.1.2 Ilmanpaineaallon kulku ilmassa

Paineaalto kulkee ilmassa pitkiäkin etäisyyksiä, koska ilma väliaineena ei vastusta aallon kulkua. Lähellä räjäytystä paineaalto on ääntä nopeampi, mutta nopeus vaimenee pian äänennopeudeksi. Teoriassa paineaalto etenee laajentuvana pallomaisena aaltona, mutta ilma ei ole homogeeninen väliaine, vaan paineaallon etenemiseen vaikuttavat lämpötila, tuuli ja mahdolliset lämpötilainversiot.

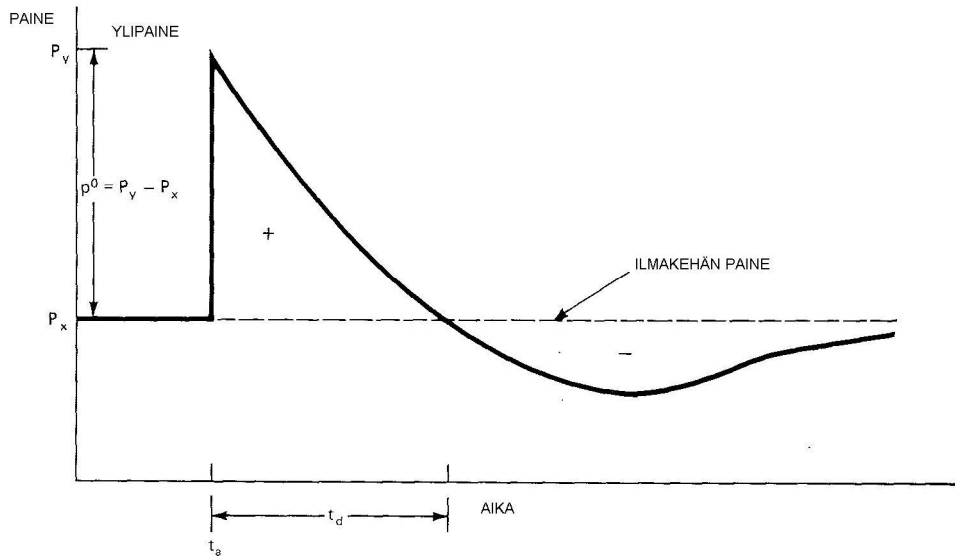
Lämpötilainversiossa lämpötila nousee ilmakehässä ylöspäin mentäessä. Normaalisti ilma jäähtyy ylöspäin mentäessä ja heijastaa paineaaltoa poispäin maanpinnasta. Lämpötilainversion vallitessa osa paineaallosta heijastuu takaisin maanpintaan paineaallon kohdatessa lämpimämmän ilman vyöhykkeen. Lämpötila inversion vaikutusta on havainnollistettu kuvan Kuva 13 kohdassa c. Lämpötilainversio aiheuttama ilmanpaineaallon heijastuminen voi aiheuttaa 10 dB kasvun ilmanpaineessa

Ilmanlämpötila vaikuttaa myös hieman äänennopeuteen ilmassa niin, että äänennopeus kasvaa lämpötilan noustessa. Erilaisten sääolosuhteiden vaikutuksia paineaaltoon on esitetty Kuva 13. Tuulen alapuolella ilmanpaineaallon suuruus voi kasvaa 10 – 15 dB normaalista (Siskind et al. 1980).



Kuva 13. Lämpötilan ja tuulen vaikutus paineaallon kulkuun. (Dowding 1985).

Paineaallon aiheuttama ilmanpaineen nousu on hyvin lyhytkestoinen. Räjähdyksissä ilmanpaineaallon edetessä ja puristaessa kokoon edellään olevaa ilmaa syntyy paineaallon taakse madaltuneen ilmanpaineen vyöhyke (Kinney & Graham 1985). Kuva 14 on esitetty räjähdyksestä aiheutuneen ilmanpaineen suuruus verrattuna aikaan.



Kuva 14. Paine-aika kuvaaja tyypilliselle räjähdyksestä aiheutuneelle paineaallolle. (Kinney & Graham 1985).

Ilmanpaineaallon törmätessä esteeseen osa sen energiasta heijastuu takaisin tulosuuntaansa ja osalle aallosta tapahtuu diffraktio eli taipuminen ja se jatkaa matkaansa esteen ohitse.

Edellä mainittujen tekijöiden vuoksi paineaallon kulkutapa ilmassa on hyvin monimutkainen ja tapauskohtainen. Asustuskeskuslouhinnoissa syntyvän ilmanpaineen suuruutta on olosuhteiden vuoksi vaikea ennustaa. Tiedyt periaatteet ilmanpaineen kulussa ovat kuitenkin selkeitä ja niiden sekä mittausten perusteella on luotu empiirisiä kaavoja. Ilmanpaine vaimenee etäisyyden kasvaessa, koska paineaalto laajenee. Tätä kutsutaan geometriseksi vaimentumiseksi. Lisäksi ilmanpaine kasvaa räjäytyspanoksen koon kasvaessa Näiden tekijöiden perusteella voidaan muodostaa skaalattu etäisyys r , joka lasketaan kaavalla (Persson 1994)

$$r = \frac{R}{Q^{1/3}} \quad (17)$$

jossa r on skaalattu etäisyys ($\text{m/kg}^{-1/3}$)
 R on etäisyys räjähteestä (m)
 Q on räjähteen massa (kg).

Skaalattua etäisyyttä käytetään ilmanpaineen suuruuden arvioinnissa.

4.1.3 Ilmanpaineaallon suuruuden arviointi

Ilmanpaineen suuruuden arviointiin tietyllä etäisyydellä räjäytyksestä on esitetty useita erilaisia kaavoja. Ilmanpaineaallon suuruutta tietyllä etäisyydellä ilmassa räjäytetystä räjähdyspanoksesta voidaan arvioida ainakin kaavoilla (18) (Hustrulid 1999) ja (19) (Persson 1994)

$$P = 185 \left(\frac{R}{Q^{1/3}} \right)^{-1,2} \quad (18)$$

$$P = 70 \frac{Q^{1/3}}{R} \quad (19)$$

joissa P on ylipaineen suuruus (kPa)
 R on etäisyys räjähteestä (m)
 Q on räjähteen massa (kg).

Kaavaa (19) voidaan käyttää arviona, kun $\frac{R}{Q^{1/3}} > 50$. Molemmat kaavat ovat samantyyppisiä eli ottavat huomioon skaalatun etäisyyden, mutta antavat hieman eri tuloksia.

Tämä kuvaa hyvin ilmanpaineensuuruuden arvioinnin hankaluutta.

Räjäytettäessä suljetussa panostilassa esim. porareiässä pienenee ilmanpaine huomattavasti. Ilmanpaineaallon suuruuden arviointiin suljetussa panostilassa voidaan käyttää kaavoja (20) (Hustrulid 1999) ja (21) (Vuolio 2001)

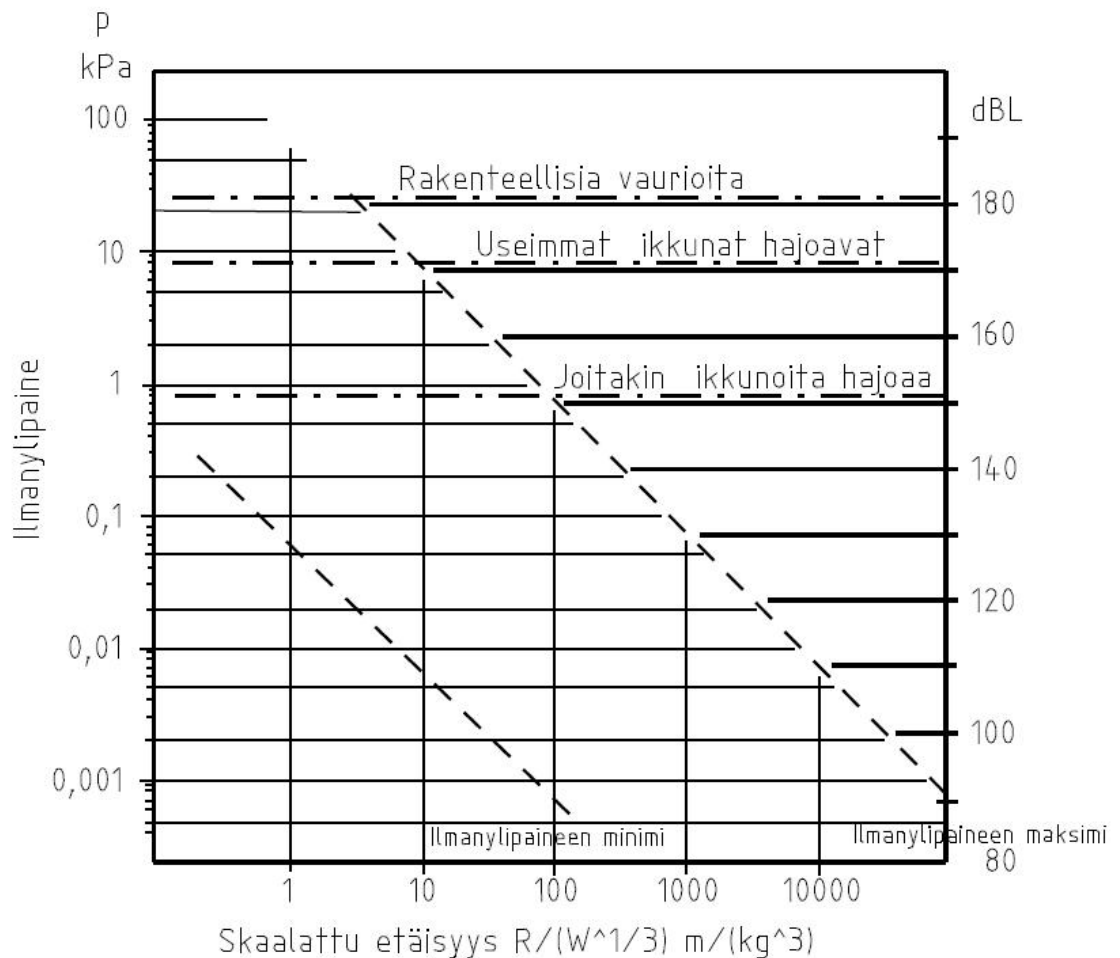
$$P = 3,3 \left(\frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \right)^{-1,2} \quad (20)$$

$$P = \left(70 \frac{\left(\frac{Q}{150} \right)^{\frac{1}{3}}}{R} \right) \quad (21)$$

joissa P on ylipaineen suuruus (kPa)
 R on etäisyys räjähteestä (m)
 Q on räjähteen massa (kg).

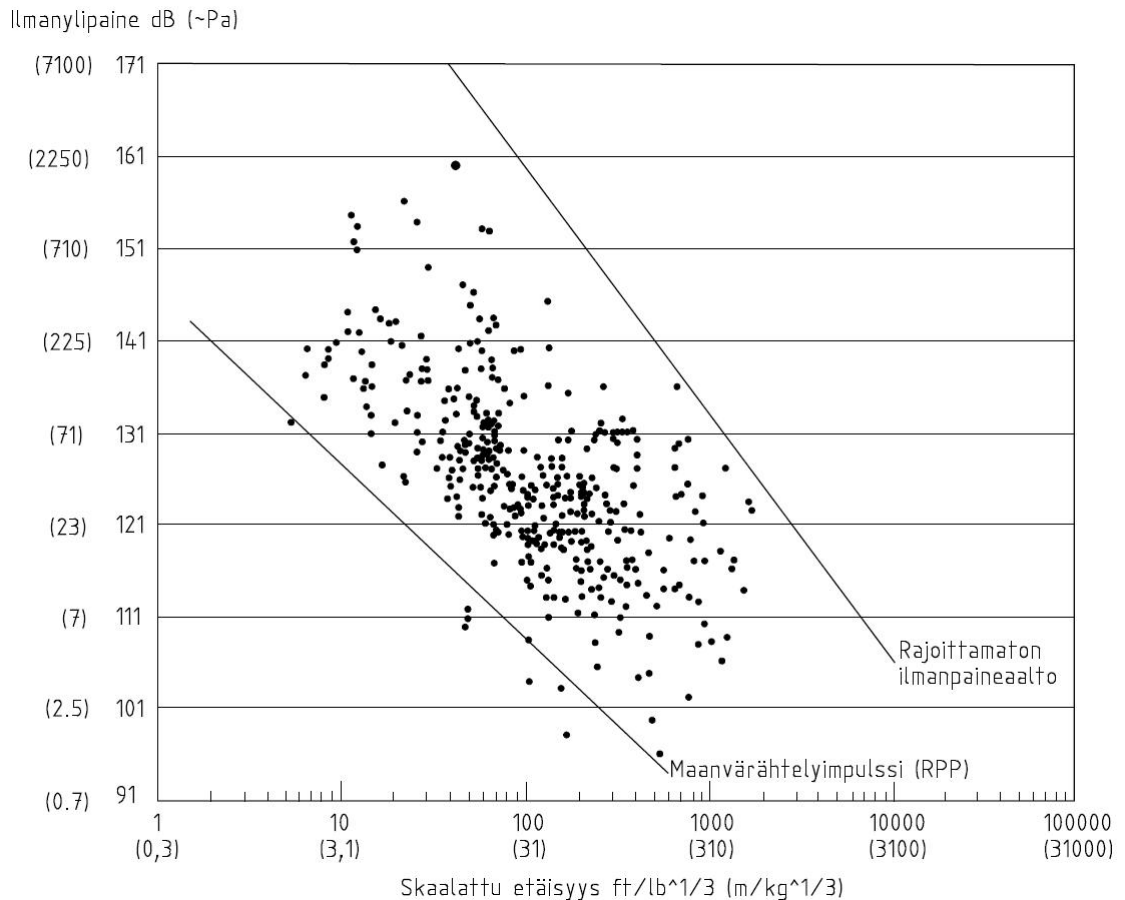
Näitä kaavoja käytettäessä on kuitenkin tärkeää muistaa, että kaavat on luotu mittaustuloksien perusteella empiirisesti. Nämä kaavat eivät ota kaikkia tekijöitä, kuten säätilaa huomioon. Räjätyspaikan maastonmuodot vaikuttavat ilmanpaineen jakautumiseen ja suuruuteen eri pisteissä. Ilmanpaineaalto etenee räjäytyspaikalta suurempaan suuntaan jossa ei ole esteitä. Myös räjäytettävän kallion geologiset ominaisuudet vaikuttavat ilmanpaineen suuruuteen. Jos räjäytettävässä kalliossa on rikkonaisuusvyöhykkeitä voi ilmanpaine päästä karkaamaan räjäytysreiästä rikkonaisuusvyöhykkeen kautta. Tämä voi johtaa huomattavaan ilmanpaineen kasvuun.

Laskemista nopeampana menetelmänä ilmanpaineen suuruuden arviointiin voidaan käyttää skaalattuun etäisyyteen perustuvia nomogrammeja. Kuva 15 on esitetty nomogrammi, jonka avulla voidaan arvioida ilmanpaineen suuruutta suhteessa skaalattuun etäisyyteen. Kuvaan on merkitty ilmanyli-paineen minimi ja maksimi. Minimillä tarkoitetaan pelkän maanvärähtelyimpulssin aiheuttamaa ilmanpaineaaltoa ja maksimilla tarkoitetaan kaavalla (19) laskettua ilmassa räjäytetyn räjähdyspanoksen aiheuttamaa ilmanpaineaaltoa. Todellinen ilmanyli-paine on siis tältä väliltä. Lisäksi nomogrammiin on merkitty ilmanyli-paineen suuruuksia joilla voi tapahtua vaurioita ympäristölle.



Kuva 15. Ilmanpaineen suhde skaalattuun etäisyyteen (yhdistetty lähteistä (Persson 1994, Siskind 2000)).

Ilmanpaineen minimi Kuva 15 on määritetty mittaustulosten perusteella. Kuva 16 on esitetty ilmanpaineaallon mittaustuloksia kaivosräjäytyksissä. Näiden tulosten perusteella on esitetty raja pelkälle maanvärähtelyimpulssille eli ilmanpaineaallon minimille. Mitatuissa räjäytyksissä ilmanpaineaallon rajoittaminen (etutäytteen määrä ja louhetäkäys) on vaihdellut tarpeen mukaan. Tämä ja sääolosuhteiden vaihtelu selittää mittaustulosten suuren hajonnan (Siskind 2000).



Kuva 16. Ilmanympäpaineen mittaustuloksia kaivosräjäytyksistä (Siskind 2000).

4.1.4 Ilmanympäpaineen mittaaminen

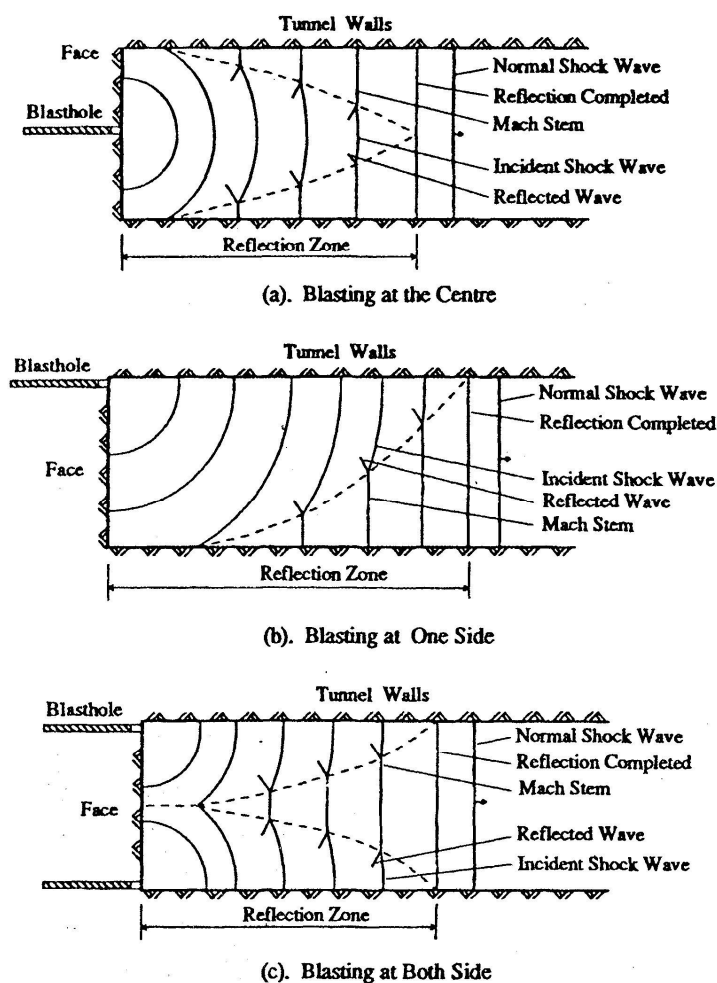
Ilmanympäpaineen mittaaminen suoritetaan värinämittariin liitettyllä mikrofonilla. Nykyisillä mittareilla on mahdollista mitata 2 – 250 Hz taajuusalueella, joka riittää kattamaan ilmanpaineaallon taajuusalueen. Mikrofonin sijoitettaessa tulisi ottaa huomioon seuraavat tekijät: Mikrofonin tulisi asettaa siten, ettei mikrofonin ja värähtelyn välissä ole esteitä esim. taloa tai autoa, jos tällaista estettä ei voida välttää, tulisi esteen ja mikrofonin välisen vaakasuoran etäisyyden olla suurempi kuin esteen mikrofonin yläpuolella olevan osan korkeus. Asetettaessa mikrofonin liian lähelle rakennusta saattaa ilmanpaine heijastua rakenteesta ja tallentuvat ilmanpaineet ovat todellista suurempia. Heijastus voidaan minimoida sijoittamalla mikrofonin lähelle rakennuksen kulmaa (ISEE 1999).

4.1.5 Ilmanpaineaalto tunnelissa

Ilmanpaineaallon kulku louhittavassa tunnelissa on yksinkertaistettu tapaus tavallisesta asutuskeskuslouhinnasta, koska paineaalto ei pääse etenemään useisiin suuntiin. Tunnelilouhintojen ilmanpaineaalto on kuitenkin tärkeä käsiteltävä tekijä, koska varsinkin

louhintojen alussa ajotunneleita louhittaessa paineaalto suuntautuu voimakkaana tunnelin suuaukolta ulospäin.

Tunnelilouhinnassa ilmanpaineaalto heijastuu tunnelin seinistä ja muodostaa yhtenäisen ilmanpaineaallon. Yhtenäinen ilmanpaineaalto muodostuu, koska seinästä heijastunut paineaalto on nopeampi kuin alkuperäinen paineaalto ja saadessaan alkuperäisen paineaallon kiinni yhdistyvät paineaallot yhdeksi paineaalloksi (Kuzyk et al. 1993). Ilmanpaineaallon muodostuminen kolmelle erilaiselle räjäytysreiän sijainnille tunnelissa on esitetty Kuva 17.



Kuva 17. Ilmanpaineaallon muodostuminen tunneliräjäytyksissä (Kuzyk et al. 1993).

Tärkein huomio Kuva 17 on se, että heijastusmisvyöhykkeen jälkeen eri puolilla tunnelin perää sijaitsevat räjäytysreiät muodostavat yhtenäisen ilmanpaineaallon. Heijastusmisvyöhykkeen pituus on yleensä neljästä kahdeksaan kertaa tunnelin leveys. Tämän

vyöhykkeen jälkeen tunnelissa kulkee yhtenäinen ilmanpaineaalto. Ilmanpaineaallon suuruus vaimenee aallon kulkiessa eteenpäin tunnelissa tunnelin seinien kitkan takia. Ilmanpaineaallon suuruutta tunnelissa tietyllä etäisyydestä räjäytyksestä voidaan arvioida empiirisellä kaavalla (Kuzyk et al. 1993)

$$\Delta P = \left(2900 \frac{m \cdot Q_a}{D \cdot S} + 733 \sqrt{\frac{m \cdot Q_a}{D \cdot S}} \right) e^{-n \frac{D}{d}} \quad (22)$$

jossa ΔP on ilmanympärynpaine (kPa)

m on tehokkuuskerroin, joka määrittää mikä osa räjähdysaineesta muuttuu ilmanpaineaallosi

Q_a on yhdellä hidasteajalla räjähtävän panoksen suuruus (kg)

S_2 on tunnelin poikkileikkauksen pinta-ala (m^2)

D on etäisyys räjäytyksestä (m)

n on tunnelin seinien kitkakerroin

d on tunnelin ekvivalentti halkaisija, joka määritetään kaavasta $d = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}}$ (m).

Seinien kitkakertoimen n suuruus on 0,02 tasaisille seinille ja lattioille ja 0,03 - 0,04 karkeille seinille ja lattialle. Tehokkuuskerroin m riippuu räjäytyksen tyypistä, m on 0,3 rikkoräjäytyksille peitetyillä panoksilla, 0,1 – 0,15 kiilareille ja 0,05 – 0,1 muille rei'ille tunnelilouhinnassa. Myöhemmässä tutkimuksessa on todettu, ettei kerroin n ole vakio. Kertoimen n suuruus riippuu etäisyydestä D ja n on tapauskohtaisesti koeräjäytyksien avulla määritettävä, myös kertoimen m suuruus vaihtelee (Rodríguez et al. 2007).

Kaava (22) pätee käytettäessä räjähdysaineena anfoa. Käytettäessä jotakin muuta räjähdysainetta pitää laskea räjähdysaineen suhteellinen massa anfona kaavalla (Kuzyk et al. 1993)

$$Q_a = \frac{S_q}{100} Q_t \quad (23)$$

jossa Q_a on räjähteen suhteellinen määrä anfona (kg)
 S_q on käytetyn räjähteen voima painoyksikköä kohti
 Q_t on samalla hidasteella räjähtävän räjähdysaineen määrä (kg).

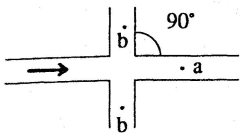
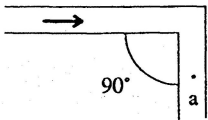
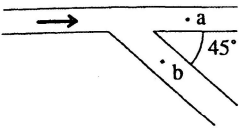
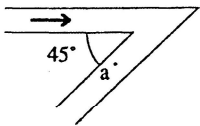
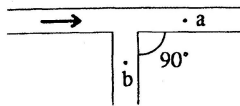
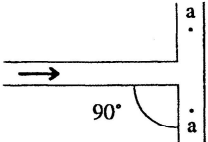
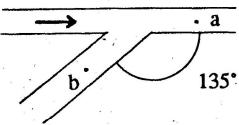
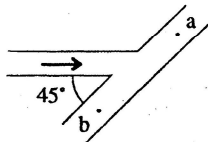
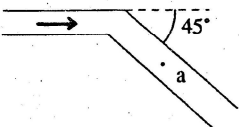
Muuttujan S_q arvoja eri räjähdysaineille löytyy räjähdysainevalmistajien luetteloista.

Jos tunnelissa on risteys tai mutka vaimenee paineaalto. Mutka vaimentaa paineaaltoa ja risteyksessä paineaalto jakautuu useampaan suuntaan. Paineaallon vaimeneminen voidaan laskea kaavalla (Kuzyk et al. 1993)

$$r = \frac{\Delta P_x}{\Delta P} \quad (24)$$

jossa r on ilmanpaineen alenemiskerroin
 ΔP_x on ylipaine mutkan tai risteuksen jälkeen (kPa)
 ΔP on ylipaine ennen risteystä (kPa).

Ilmanpaineen alenemiskerroin riippuu mutkan tai risteuksen tyypistä. Kuva 18 on esitelty alenemiskertoimia erilaisille mutkille ja risteyksille. Kuva 18 kertoimet ovat voimassa ylipaineen suuruuden ollessa alle 100 kPa. Kertoimet eivät ole samoja kuin maanalaisten tilojen ilmanvaihtoa suunniteltaessa. Ilmanvaihtoa suunniteltaessa yleensä oletetaan, että risteyksissä ei tapahdu painehäviötä. Lisäksi ilmanvirtausnopeudella on vaikutusta painehäviöihin tuuletusta suunniteltaessa ja ilmanpaineaallon nopeus on äänennopeus, joten sen häviöt poikkeavat tuuletussuunnittelun häviöistä.

Intersection	r Value	Intersection	r Value
	$r_a=0.42$ $r_b=0.23$		$r_a=0.77$
	$r_a=0.55$ $r_b=0.45$		$r_a=0.59$
	$r_a=0.63$ $r_b=0.34$		$r_a=0.49$
	$r_a=0.74$ $r_b=0.17$		$r_a=0.77$ $r_b=0.14$
	$r_a=0.87$		

Kuva 18. Ilmanpaineen alenemiskertoimen suuruus erilaisissa tapauksissa (Kuzyk et al. 1993).

Myös ilmanpaineaallon saapuessa erilaiseen tunnelin poikkileikkaukseen ylipaineen suuruus muuttuu. Paineaallon saapuessa pienemmästä poikkileikkauksesta suurempaan poikkileikkaukseen voidaan paineaallon suuruus laskea kaavalla (Kuzyk et al. 1993)

$$\Delta P_1 = \Delta P_0 \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{0.8} \quad (25)$$

jossa ΔP_1 on ylipaine suuremmassa poikkileikkauksessa (kPa)

ΔP_0 on ylipaine pienemmässä poikkileikkauksessa (kPa)

S_0 on pienemmän poikkileikkauksen pinta-ala (m^2)

S_1 on suuremman poikkileikkauksen pinta-ala (m^2).

Paineaalto muuttuu myös paineaallon saapuessa suuremmasta poikkileikkauksesta pienempään poikkileikkaukseen. Ilmanpaineen suuruuden muutosta tässä tapauksessa ei tunneta yhtä hyvin, eikä tälle muutokselle ole kehitetty laskukaavaa.

Myöhemmässä tutkimuksessa on kehitetty tapaa arvioida ilmanylipainetta tunnelin suuaukon ulkopuolella räjäytyksen tapahtuessa tunnelissa (Rodríguez et al. 2007). Ilmanpaine tunnelin suuaukolla lasketaan kaavalla (22) käyttäen kaavan termiä m vakiona, jonka suuruus on 0,4. Samalla on myös todettu vakion n suuruuden riippuvan etäisyydestä. Tutkimuksissa ylipaine tietyssä pisteessä tunnelin suuaukon ulkopuolella laskettiin empiirisellä kaavalla (Rodríguez et al. 2007)

$$\Delta P = \frac{\Delta P_0}{\frac{k_i \cdot r}{10^{20}}} \quad (26)$$

jossa ΔP on ylipaine halutussa pisteessä (Pa)

ΔP_0 on ylipaine tunnelin suuaukolla (Pa)

r on etäisyys suuaukosta (m)

k_i on empiirinen kerroin.

Kerroin k_i riippuu suuaukon keskilinjan ja laskentapisteen välisestä kulmasta. Kertoimeen vaikuttavat myös maaston muodot, jos paineaalto ei pääse kulkemaan johonkin suuntaan suurenee paineaalto muissa suunnissa. Käytettäessä kaavan (26) mallia ylipaineen arviointiin tarvitaan mittaustuloksia vähintään yhdestä räjäytyksestä kyseisellä paikalla, jotta empiiriset kertoimet voidaan määrittää. Muuten arvioidut tulokset voivat olla kaukana todellisista tuloksista. Tutkimuksen mukaan mallilla laskettujen tuloksien virhe on alle 10 dB, kun kertoimet on määritetty räjäytyksistä mitattujen tuloksien perusteella. Suurimmassa osassa tapauksista malli antaa suuremman kuin todellisen arvon, joka on hyvä asia turvallisuuden kannalta. Tämäkään malli ei ota huomioon sääolosuhteiden vaikutusta ilmanpaineaallon suuruuteen. Mallilla voidaan tosin määrittää tuloksia erilaisille sääoloille, jos mittauksia tehdään tällaisten olosuhteiden vallitessa.

4.2 Ilmanpaineaallon rajoittaminen

Tavanomaisessa huolellisesti suoritetussa avolouhinnassa asutuskeskuksessa ilmanpaineaallon suuruus ei aiheuta vaurioita rakenteille, kun räjäytys suunnitellaan niin, että tärinät eivät ylitä tärinärajoja (Vuolio 1991, Nicholls et al. 1971). Louhintaa suoritettaessa tulee kuitenkin kiinnittää huomiota huolelliseen etutäyttöön, louhetäkkäykseen ja kentän peittämiseen.

Pengerlouhinnassa merkittäviä tekijöitä ilmanpaineaallon suuruuden kannalta ovat edun suuruus, etutäytön määrä ja hidasteaikojen väli. Tietyt hidasteajat voivat johtaa ilmanpaineaallon vahvistumiseen pengerlouhinnan rivien suunnassa eri reikien aiheuttamien ilmanpaineaaltojen yhdistyessä. Tutkimuksessa on todettu, että ilmanpaineaallon vahvistumista ei tapahdu jos hidasteajat on laskettu kaavalla (Siskind et al. 1980)

$$T = 0,53 \cdot \frac{s}{V_s} \quad (27)$$

jossa T on hidasteaika
 s on reikäväli (m)
 V_s on äänen nopeus ilmassa (m/s).

Pengerlouhinnassa ilmanpainetta voidaan suhteellisen helposti rajoittaa räjäytysparametreja muokkaamalla. Ilmanpaineaallon suuruuden aiheuttaessa ongelmia, voidaan ominaisporausta kasvattaa ja pienentää kerralla räjähtävän räjähdysaineen määrää.

Tunnelilouhinnassa ilmanpaineaalto suuntautuu ja ajotunnelia louhittaessa ilmanpaineaallon suuruus voi olla rajoittava tekijä räjäytyksessä. Ilmanpaineaaltoa voidaan tunnelilouhinnassa rajoittaa etutäytteellä tai erilaisilla rakennetuilla hirsiseinillä ja kumimatoilla. Etutäytteellä on 30 – 50 % vaikutus ilmanpaineaallon suuruuteen, riippuen etutäytteen pituudesta ja täyttemateriaalista (Reidarman 1997). Reidarman (1997) on tutkinut myös rakennettujen hirsiseinien vaikutusta ilmanpaineaallon suuruuteen tunnelissa. Tutkimuksessa mitattiin 90 % tunnelin poikkileikkauksesta peittävän hirsiseinän vaimentavaa vaikutusta ja todettiin vaimentavan vaikutuksen olevan noin 50 % ilmanpaineen suuruudesta.

Tunnelilouhinnassa hankalia kohteita ovat ajotunnelien ensimmäiset katkot joissa räjähdys suuntautuu ja ilmanpaineaallon vaimentaminen on hankalaa. Ilmanpaineaallon vaimentamiseen ja kivenheiton estämiseen käytetään ripustettuja hirsi- tai kumimatoseiniä. Tällaisista räjäytyksistä ei kirjallisuudesta löydy tutkimusta ilmanpaineaallon käyttäytymisestä.

4.3 Ilmanpaineaaltoa koskevat säädökset

Suomessa ei ole asetettu rajoituksia räjäytystöiden aiheuttamalle ilmanpaineaallolle. Räjäytystöitä tehtäessä oikeuskäytännössä on kuitenkin vakiintunut ankara eli tuottamuksesta riippumaton vastuu. Työn suorittajan on korvattava räjäytystöiden aiheuttamat vahingot, vaikka olisi menetellyt moitteettomasti. Suomessa on oman säännösten puutteessa käytetty ruotsalaisia ilmanpaineen ohjearvoja jos tarvetta maksimin määrittelylle on ollut.

Ruotsissa ilmanpaineelle on annettu ohjearvo standardissa (SIS 1996). Standardissa määritellään kerroin f_i , jolla voidaan laskea ilmanpaineaallolle heijastuspaine, joka syntyy ilmanpaineen törmätessä kohtisuoraan esteeseen. Kerroin f_i voidaan laskea kaavalla

$$f_i = \frac{P_r}{P_s} = \frac{\left(8 \frac{P_r}{P_0} + 14\right)}{\left(\frac{P_s}{P_0} + 7\right)} \quad (28)$$

jossa f_i on ilmanpaineaallon heijastuskerroin

P_r on heijastuspaine (Pa)

P_s on vapaailmanyliopaine (ilmanyliopaineen suuruus aaltojen edetessä vapaasti) (Pa)

P_0 on normaali-ilmanpaine (Pa).

Alle 1000 Pa heijastuspaineille kertoimen f_i suuruus on likimäärin kaksi eli heijastuspaine on noin kaksi kertaa vapaa ilmanyliopaine. Heijastuspaineen maksimin ohjearvoksi räjäytystyössä standardissa annetaan 500 Pa, kun etäisyys räjäytyspaikasta ylittää 20 m. Tunneliräjäytyksissä etäisyys lasketaan tunnelin suuaukosta. Vapaailmanpaine saa siis olla noin 250 Pa, jolloin ilmanpaineen ei pitäisi aiheuttaa vaurioita.

4.4 Häiriöt ympäristölle

Räjäytyksen ilmanpaineaalto voi aiheuttaa häiriöitä ympäristön asukkaille, koska ihmiset pelkäävät vaurioita rakennuksille ja ilmanpaineaalto on selvästi havaittavissa oleva ilmiö. Puutteellisesti suoritettu etutäyttö, kentän peittäminen tai louhetäkkäys räjäytettäessä voi aiheuttaa ennakoimattoman voimakkaan ilmanpaineaallon. Ikkunoita alkaa hajota noin 800 Pa ylipaineella, jos ikkunat on huonosti kiinnitetty tai ne ovat valmiiksi säröillä. Ikkunoiden helinää tapahtuu jo noin 20 Pa ylipaineella, joka aiheuttaa närkästystä ihmisissä. Ihmisten reaktiota ikkunoiden helinä muuttuu niin, että ääntä luullaan puolitoista kertaa kovemmaksi kuin se todellisuudessa on (Schomer & Averbuch 1989). Näistä arvoista voidaan päätellä, että ilmanyli-paineaalto pelottaa ihmisiä huomattavasti enemmän kuin se todellisuudessa aiheuttaa vaurioita.

Siskind (1980) arvioi käyttökelpoiseksi ilmanpaineaallon rajaksi ~65 Pa (130 dB), kun ei haluta aiheuttaa häiriöitä ihmisille. Tällöin noin 5 % ihmisistä ärtyy pitkäaikaiseen räjäytystyöhön. Ihmisten ärtymiseen voidaan vaikuttaa huomattavasti tiedotuksella räjäytystyön kestosta ja tarkoituksesta. Tiedottamisella voidaan kertoa ihmisille ilmanpaineaallon vaikutuksista ja vahinkojen epätodennäköisyydestä, joka vähentää räjäytysten pelkoa ihmisissä.

Yhtenä tekijänä ilmanpaineaallossa häiriötekijänä ovat louhintatärinät, jotka lyhyillä etäisyyksillä saapuvat samanaikaisesti ilmanpaineaallon kanssa. Tällöin ihmiset eivät osaa erottaa osatekijöiden aiheuttamia tärinöitä toisistaan. Siksi onkin aina tarkoituksenmukaista tiedottaa molemmista tekijöistä.

5. KENTTÄMITTAUKSET

5.1 Yleistä

Mittauksien tarkoituksena on arvioida tunnelin louhintaporauksesta aiheutuvan runkomelun suuruutta etäisyyden funktiona.

Mittaukset suoritettiin mittaamalla tunnelin seinään porauksesta välittyvää tärinää tärinämittarilla ja tunnelissa kuuluvan runkomelun A-painotettua keskiäänitasoa äänenpainemittarilla. Tunnelityömaalla tehdään lisäksi rakennusgeologinen kartoitus, jonka perusteella pyritään arvioimaan kalliolaadun vaikutusta mittaustuloksiin.

5.2 Mittauslaitteisto

Tärinän mittaukseen käytettiin Instantelin Minimate plus tärinämittaria, joka oli varustettu X100 low-level anturilla. Mittari täyttää standardin DIN 45669-1 vaatimukset tärinämittarille. Tärinämittari on esitetty Kuva 19. Tärinämittarin mittaustarkkuus X100 anturilla on 0,000159mm/s.



Kuva 19. Instantel Minimate plus tärinämittari.



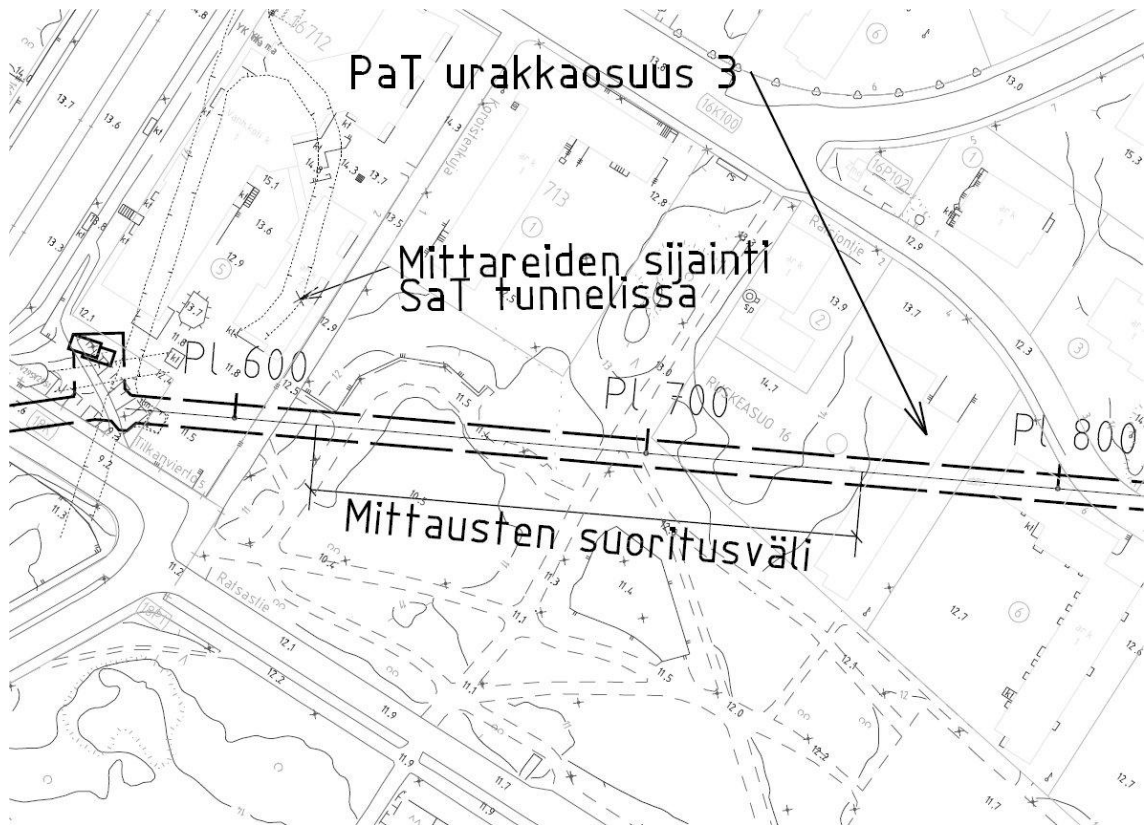
Kuva 20. Brüel & Kjær 2250 Äänenpainemittari.

Äänenpainetta mitattiin Brüel & Kjær 2250 äänenpainemittarilla. Mittari täyttää standardin IEC 61672-1 luokan 1 vaatimukset äänenpainemittarille. Mittarin omamelutaso on A-painotetulle mittauksille 16,6 dB. Äänenpainemittarin toiminta tarkistettiin ennen mittauksia käyttämällä standardin IEC 60942 mukaista normaaliäänilähdettä. Äänenpainemittari on esitetty Kuva 20.

5.3 Mittausjärjestely

Mittaukset suoritettiin Salmisaari – Kamppi - Ruskeasuo yhteiskäyttötunnelin (SaT) Tilkan ajotunnelissa, kun louhinnat Meilahti – Pasila - Käpylä yhteiskäyttötunnelin (PaT) urakkaosuudella kolme etenivät kohti SaT yhteiskäyttötunnelia. Mittauspaikaksi valittiin taustamelultaan mahdollisimman hiljainen paikka tunnelissa. Hiljaisin mahdollinen mittausta paikka oli Tilkan ajotunnelissa, SaT yhteiskäyttötunneli on vielä lähempänä PaT yhteiskäyttötunnelin louhintoja kuin Tilkan ajotunneli, mutta tunnelin runsaat vuotovedet ja pumppaamo lähellä mahdollista mittauspistettä olisivat olleet liian suuri häiriötekijä runkomelun mittauksissa.

Mittauspisteeksi valittiin syvennys ajotunnelissa johon mittarit oli helppo sijoittaa. Mittauspaikan etäisyys ajotunnelin suuaukosta määritettiin mittanauhalla ja mittauspaikan korkeusasema arvioitiin tämän mittauksen perusteella tunnelin tarkemittaustiedoista. Työmaalta saatiin louhintaporauksen suoritusajat ja sijainti tunnelin paalulinjalla. Kuva 21 on esitetty louhittavan tunnelin linjaus ja mittauspaikka sekä paaluväli, jolla mittaukset suoritettiin.



Kuva 21. Kartta mittausjärjestelystä.

Mittaustuloksiin aiheutui häiriöitä tunnelissa kulkevasta huoltoliikenteestä. Mittauksien aikana ajotunnelissa tehtiin myös kuilun louhintaa valmistelevia varustuksen purku- ja rakennustöitä. Näiden vaikutusta mittauksiin pyrittiin vähentämään seuraamalla kulku- raporteja ja työmaapäiväkirjoja.

Mittaukset aloitettiin, kun louhintaperästä oli n. 146 metriä valittuun mittauspisteeseen ja mittaukset lopetettiin tunnelityömaan aloitettua kuilun valmistavat työt, jotka estivät mittaukset. Louhintaperä oli tällöin n. 46 metrin päässä mittauspisteestä. Uusi tunneli ohitti lähimmillään mittauspisteen n. 45 metrin päästä eli mittauksien keskeytymisen takia ei jäänyt juurikaan mittauksia saamatta.

Melumittaria sijoitettiin tunneliin jalustalla. Mittaria ei voitu sijoittaa aivan ohjeiden mukaisesti keskelle tilaa, koska ajotunnelissa kulkevan huoltoliikenteen piti päästä kulkemaan mittauspaikan ohitse. Tärinämittarin geofoni asennettiin kulmaraudalla tunnelin seinään, kohtaan jossa ruiskubetoni oli kiinni kalliossa. Mittausjärjestely on esitetty Kuva 22.



Kuva 22. Mittausjärjestely Tilkan ajotunnelissa.

Mittaukset olivat käynnissä jatkuvasti lukuun ottamatta taukoja, jotka aiheutuivat mittausdatan tyhjentämisestä. Mittausdata oli tyhjennettävä Kalliotekniikka Oy:n tiloissa Pasilassa, joten datan tyhjentymisestä aiheutui noin puolentoista tunnin tauko mittauksiin.

5.3.1 Tärinän heräte

Työmaalla poraukset suoritettiin Atlas Copcon COP 1838HE porakoneella. Porakoneen iskuenergia on 19 kW, iskutaajuus 42 – 50 Hz ja pyöritysnopeus 0 – 140 kierrosta minuutissa.

5.3.2 Tärinämittaukset

Tärinämittauksen laukaisuarvoksi asetettiin 0,01 mm/s. Ensimmäisten mittausten jälkeen laukaisuarvo nostettiin 0,02 mm/s, koska aikaisemmalla arvolla saatiin tuloksiksi runsaasti muuta kuin runkomelusta johtuvaa tärinää. Ongelmaksi tärinän mittaamisessa muodostui ympäristöstä aiheutuvat häiriöt. Runkomelun aiheuttavan tärinän suuruus on niin pientä, ettei mittauspisteessä sitä ollut käytetyllä mittaustavalla mahdollista havaita. Asetetuilla heilahdusnopeuden laukaisuarvon suuruuksilla mittarille välittyi satunnaisesti tärinää, joka aloitti mittauksen. Laukaisuarvoa ei kuitenkaan voitu nostaa, koska nostamalla arvoa olisi runkomelun aiheuttava tärinä jäänyt mittausalueen ulkopuolelle. Tällä mittausmenettelyllä ei saatu käyttökelpoisia tärinämittaustuloksia.

5.3.3 Äänenpaineen mittaukset

Äänenpainetta mitattiin ajotunnelissa A-taajuuspainotettuna keskiäänitasona. Mittauksissa kokeiltiin 1s, 30 s ja 5 min mittausaikoja joista 30 s todettiin sopivimmaksi. 30 s mittausajalla tuloksista pystyttiin helposti erottamaan tunnelissa liikkumisesta ja työskentelystä aiheutuneet häiriöt. Näistä tuloksista laskettiin 5 min keskiarvo porausmelulle. 5 min aikajaksolla tuloksista löytyi riittävästi jaksoja joissa poraus oli jatkuvaa. Pidemmillä aikajaksoilla tuloksiin olisivat vaikuttaneet porauksen tauot, joita aiheutuu kaluston kulumisesta ja porakoneiden siirroista porattavien reikien välillä. Porausmelun lisäksi tuloksista määritettiin taustamelun suuruus.

5.3.4 Porausetäisyyden määrittäminen

Urakoitsijalta saatiin tiedot porauksen sijainnista louhittavan tunnelin paalutuslinjalla 10 cm tarkkuudella. Mittauspisteen sijainti määritettiin puolen metrin tarkkuudella ajotunnelintarkekuvien ja etäisyysmittauksen perusteella. Piirustuksista määritettiin paalutuslinjalla piste, joka on kohtisuorassa mittauspisteeseen nähden. Kun tiedettiin mittauspisteen sijainti ja porauksen sijainti paalutuslinjalla voitiin laskea todellinen etäisyys mittauspisteestä pythagoraan lauseella. Laskettu tulos on etäisyys mittauspisteen ja paalutuslinjan välillä. Tämä tarkoittaa, että etäisyys on laskettu tunnelin tasausviivan korkeu-

delle ja keskelle katkoa. Todellinen porauksen etäisyys vaihtelee jokaisessa louhittavassa katkossa. Katkon reikiä porattaessa reiän sijainti vaihtelee maksimissaan kolme metriä sivusuunnassa ja 4 metriä korkeussuunnassa. Lisäksi etäisyys paalutuslinjalla vaihtelee porauksen aikana nolasta kuuteen metriä riippuen siitä, mitä osaa reiästä ollaan poraamassa. Näitä vaihtelua ei mittauksissa ollut mahdollista ottaa huomioon.

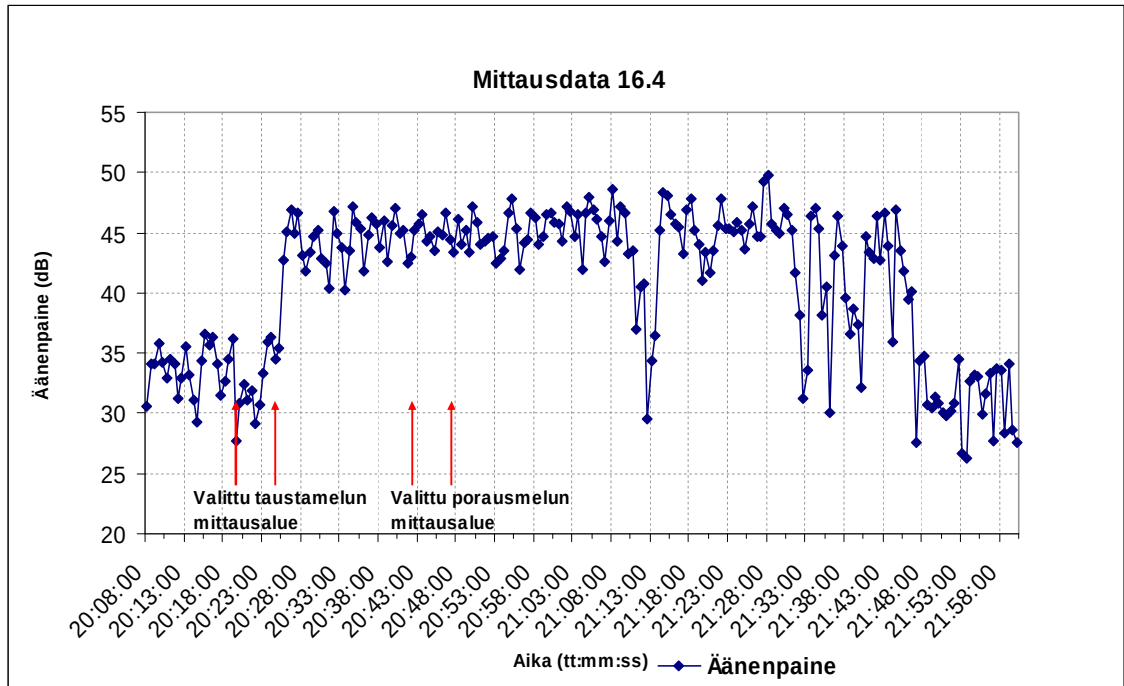
5.4 Mittaustulokset

Häiriöttömiä melumittauksia eri etäisyyksiltä saatiin 20 kpl. Mittauksiin tuli muutamia taukoja johtuen tunnelissa tehdyistä töistä ja tapahtuneesta äänenpainemittarin akun loppumisesta. Mittaustulokset on esitetty Taulukko 9. Porausmelulla tarkoitetaan louhintaporauksen aikana mitattua äänenpaineen suuruutta tunnelissa. Porausmelun mittaustulokset sisältävät myös taustamelun. Porauksen aikaista taustamelun suuruutta arvioitiin taustamelun suuruudella, joka on mitattu ennen porauksen alkua tai porauksen loputtua.

Taulukko 9. Poraus- ja taustamelun mittaustulokset

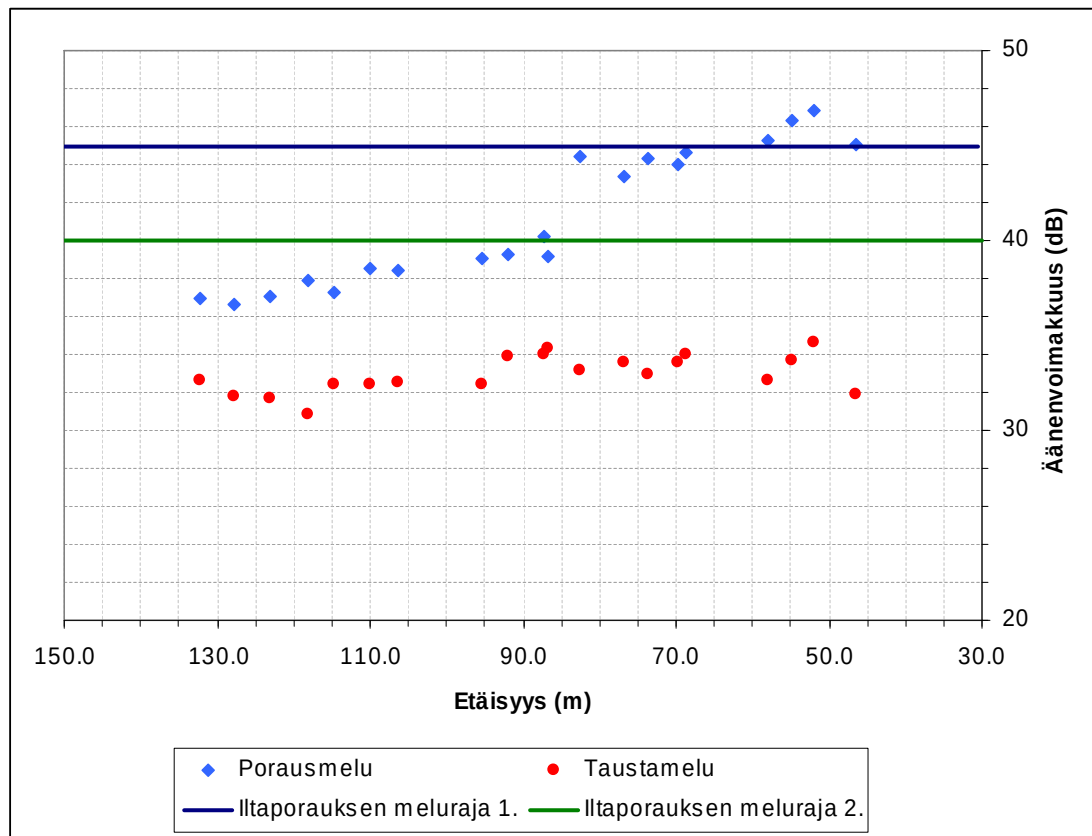
Pvm	Klo	Paaluluku tunnelissa	Todellinen etäisyys (m)	Porausmelu L_{Aeq} 5 min (dB)	Taustamelu L_{Aeq} 5 min (dB)	Porausmelu L_{Aeq} 5min (Pa)	Taustamelu L_{Aeq} 5 min (Pa)
12.3	7.00 - 11.50	737,7	132,3	36,9	32,6	0,0014	0,00085
12.3	18.00 - 21.30	732,9	127,8	36,6	31,8	0,00135	0,00078
13.3	7.30 - 13.40	727,9	123,2	37,1	31,7	0,00143	0,00077
16.3	7.00 - 9.40	722,5	118,2	37,9	30,8	0,00157	0,00069
16.3	16.00 - 20.30	718,8	114,8	37,3	32,4	0,00147	0,00083
17.3	10.50 - 15.20	713,5	109,9	38,5	32,4	0,00168	0,00083
18.3	7.30 - 13.30	709,5	106,3	38,4	32,5	0,00166	0,00084
27.3	15.00 - 17.20	697,3	95,4	39,1	32,4	0,00180	0,00083
30.3	7.00 - 10.30	693,4	92,0	39,3	33,9	0,00185	0,00099
30.3	16.00 - 21.20	687,2	86,6	39,2	34,3	0,00182	0,00104
31.3	12.10 - 15.10	687,8	87,1	40,2	34,0	0,00205	0,00100
1.4	7.00 - 9.40	682,3	82,5	44,4	33,2	0,00332	0,00091
1.4	16.30 - 18.10	675,4	76,8	43,4	33,6	0,00295	0,00096
6.4	7.00 - 9.30	671,3	73,6	44,4	32,9	0,00328	0,00088
6.4	15.50 - 19.00	666,2	6,6	44,0	33,6	0,00317	0,00096
8.4	15.20 - 18.00	665,1	68,8	44,6	34,0	0,00340	0,00100
9.4	7.00 - 9.10	649,5	58,0	45,3	32,6	0,00368	0,00085
9.4	15.00 - 17.20	644,1	54,8	46,3	33,7	0,00413	0,00097
14.4	7.00 - 10.10	638,6	51,9	46,8	34,6	0,00438	0,00107
16.4	19.50 - 21.40	624,1	46,6	45,1	31,9	0,00360	0,00079

Kuva 23 on esitetty yhdeltä illalta mittausdataa ja taustamelun sekä porausmelun mitta-alueiden valintaa. Taustamelu on tässä tapauksessa valittu juuri ennen porausta. Porausmelua valitessa on pyritty etsimään mahdollisimman jatkuva kohta porauksen ollessa käynnissä.



Kuva 23. Esimerkki mittausdatasta.

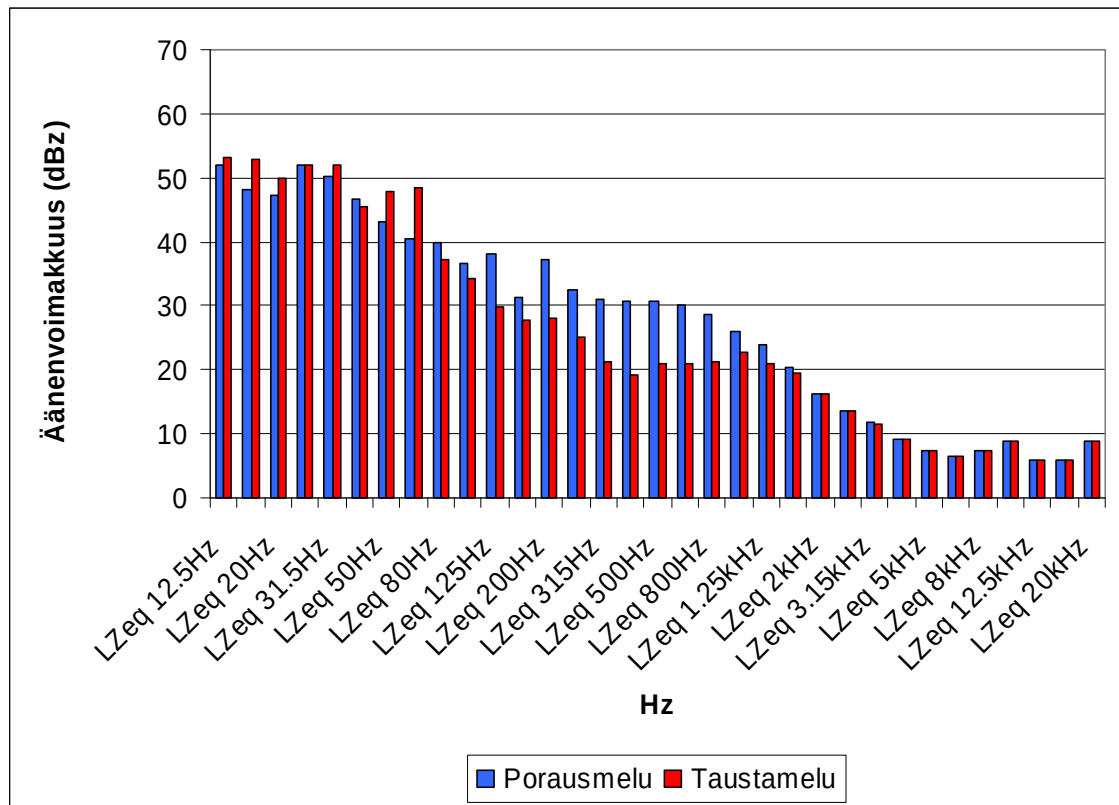
Kuva 24 on esitetty porausmelun suuruus verrattuna etäisyyteen mittauspisteestä. Lisäksi kuvaajaan on piirretty illalla suoritettavan porauksen melurajat. Kuvasta nähdään, että 45 dB melurajaa ei ylitetä ennen kuin etäisyys pienenee alle 60 metrin. 40 dB rajan ylityksestä ei saada näistä mittauksista yhtä selkeää kuvaa. Tuloksista on kuitenkin nähtävissä, että 5 dB rajan tiputuksella on huomattava vaikutus etäisyyteen, jolla porausta voidaan suorittaa. Yli 40 dB mittauksia saatiin jo n. 85 metrin päässä mittauspisteestä. Meluraja on kuitenkin asetettu asuinhuoneistossa vallitsevalle melulle ja mittauksien tulokset ovat suoraan kalliosta välittyvän runkomelun tuloksia. Teoreettisesti runkomelun pitäisi vaimentua rakenteissa, joten melun todellisen suuruuden pitäisi olla pienempiä kuin nämä mittauksien tulokset. Vaimenemisen suuruus rakenteissa riippuu värinän taajuudesta. Näistä mittauksista saadaan lähinnä maksimi mahdolliselle asunnossa vallitsevalle melulle. Todellisuudessa runkomelu on asunnossa pienempi.



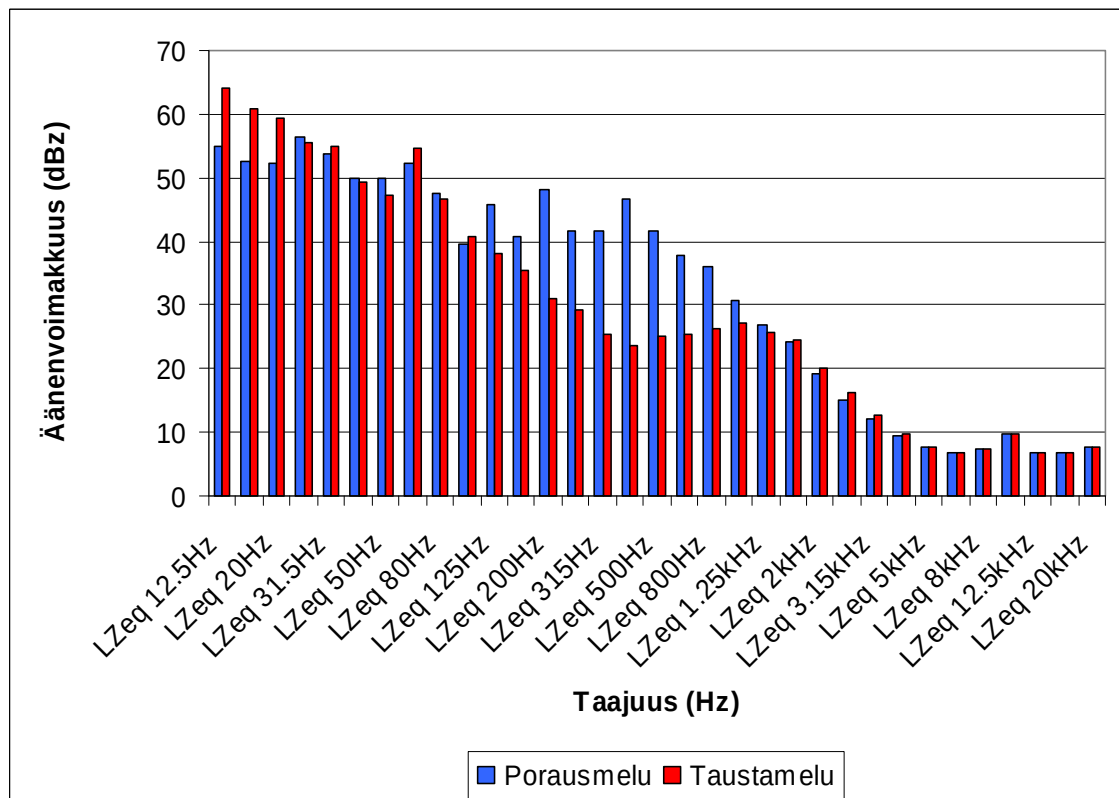
Kuva 24. Poraus- ja taustamelun suuruus sekä illalla suoritettavan porauksen melurajat.

Kuva 25 ja Kuva 26 on esitetty poraus- ja taustamelun taajuusjakaumat mittausten alussa ja lopussa. Melun suuruus on tässä esitetty taajuuskaistoittain painottamattomana Z jakaumana. Tuloksista on havaittavissa, että porausmelu on havaittavissa kalliotilassa 125 Hz – 1,6 kHz taajuuksilla. Mittaustulosten perusteella melun taajuusjakauma ei riipu etäisyydestä, vaan melua välittyy samalla taajuusalueella läpi koko mittausalueen.

Havaittua porausmelun taajuusjakaumaa on vaikea selittää tärinän herätteellä. Iskevän porauksen iskutaajuus on ollut 42 – 50 Hz ja pyöritysnopeus 0 -140 kierrosta minuutissa. Havaitut taajuudet ovat kuitenkin huomattavasti korkeampia.



Kuva 25. Poraukset- ja taustamelun taajuusjakauma 128 m etäisyydellä mittauspisteestä.

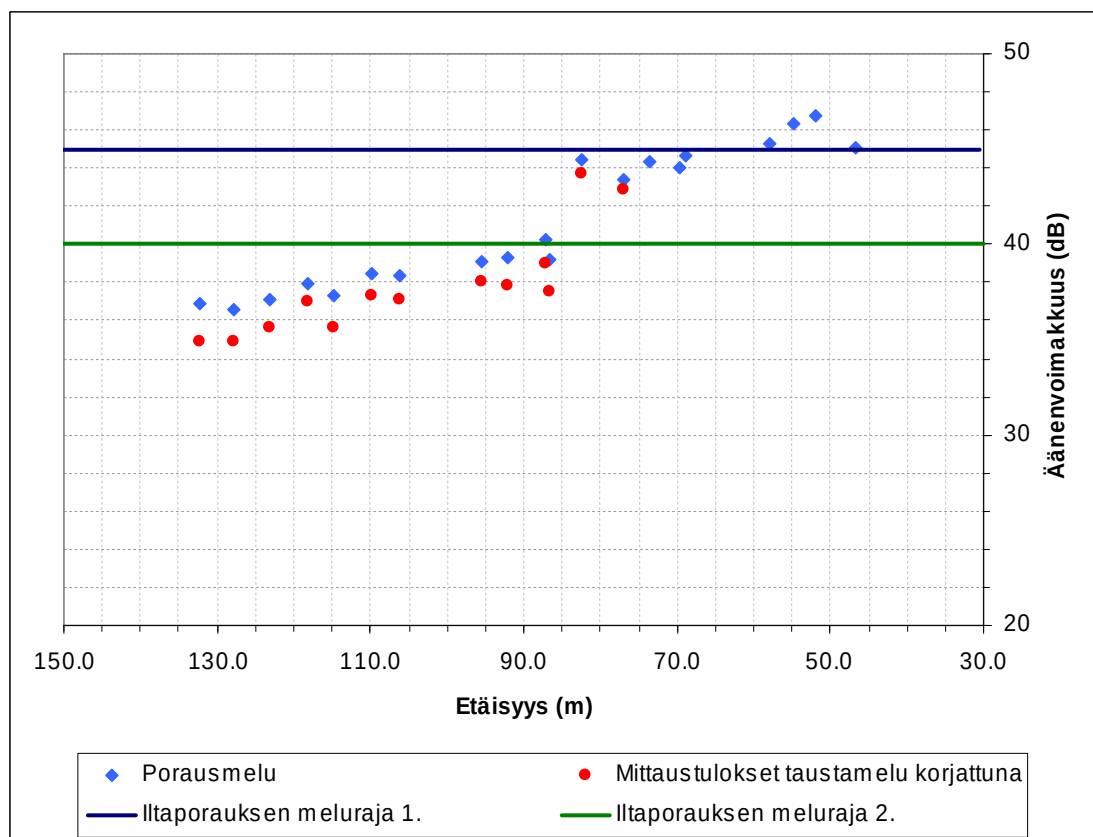


Kuva 26. Poraukset- ja taustamelun taajuusjakauma 55 m etäisyydellä mittauspisteestä.

Työssä havaitut runkomelun taajuudet ovat huomattavasti korkeampia kuin rakennusten ominaistaajuudet, jotka vaihtelevat 2 – 14 Hz välillä. Herätetaajuus (runkomelun taajuus) jaettuna rakenteen ominaistaajuudella on likimäärin kymmenen. Teorian (Kuva 9) mukaan huomattavasti pienemmilläkin herätetaajuuden ja ominaistaajuuden eroilla tärinän pitäisi rakenteessa vaimentua alle puoleen talon rakenteissa.

5.5 Tulosten käsittely

Taustamelun ja porausmelun voimakkuuden eron ollessa alle 10 dB vaikuttaa taustamelu mittaustulokseen. Verrattaessa mittaustuloksia melurajaan tällä yhteisvaikutuksella ei ole merkitystä, koska ympäristökeskus määrittää melurajan porauksen aikaiselle äänenpainetasolle. Porausmelun vaimenemista tutkittaessa on kuitenkin syytä korjata mittaustuloksista taustamelun vaikutus. Taustamelu vaikuttaa tuloksiin 75 m etäisyydelle asti ja tätä kauempaa mitatuista tuloksista korjataan äänilähteiden yhteisvaikutus kaavalla (15). Kuva 27 on esitetty mittaustulokset ja ääni lähteiden yhteisvaikutuksen osalta korjatut mittaustulokset.

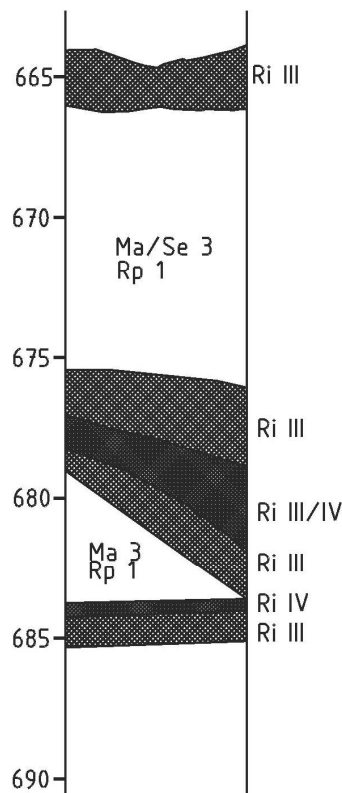


Kuva 27. Mittaustulokset äänilähteiden yhteisvaikutus korjattuina.

Mittaustuloksista on havaittavissa äänenvoimakkuuden vaihtelua eli mittaustulokset eivät aina kasva lähestyttäessä mittauspistettä. Tätä selittää osaltaan mittausolosuhteiden vaihtelu. Mittauspisteeseen kuului liikenteen ja muun ympäristön aiheuttamaa taustamelua ja taustamelun suuruus vaihteli mittauksittain. Suurimmat vaihtelut taustamelussa olivat ruuhka-aikojen ja muiden aikojen välillä. Taustamelun vaikutusta mittaustuloksiin on pyritty korjaamaan ottamalla huomioon äänilähteiden yhteisvaikutus. Korjaus ei kuitenkaan välttämättä ole riittävä, koska juuri poraushetkellä vallinneen taustamelun suuruutta ei voida tietää. Taustamelun suuruus mitattiin mahdollisimman läheltä porausaikaa, mutta esim. aamu seitsemältä alkaneissa porauksissa liikenteen määrä ja taustamelun suuruus kasvavat porauksen ollessa käynnissä.

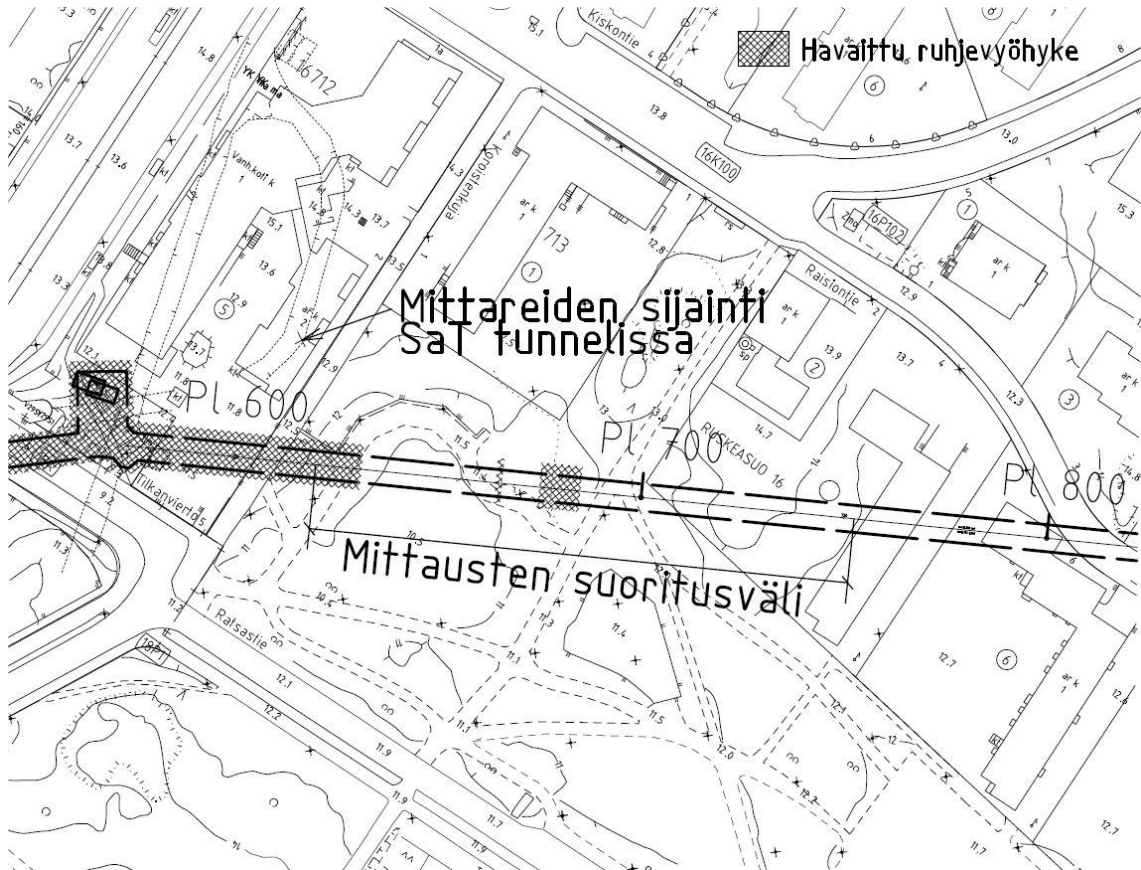
5.5.1 Materiaalivaimennus

Mittaustuloksista on huomattavissa porausmelun voimakkuudessa suuri kasvu etäisyyden lyhentyessä alle 85 metrin. Tällainen suuri kertamuutos muutos ei ole teorian mukaista geometrasta vaimenemista, vaan syytä mitattuun porausmelun nousuun on etsittävä materiaalivaimennuksesta eli kallion laadusta. Tunnelin paalutuslinjalla muutos mittaustuloksissa tapahtuu paalujen 687 ja 682 välillä. Rakennusgeologisessa kartoituksessa havaittiin tällä välillä rikkonaisuusvyöhyke. Todennäköisesti suurimman osan vaimenemisesta on aiheuttanut noin paalulle 684 sijoittunut paksuhko rikkonaisuusvyöhyke, jossa oli rakotäytteinä savea (rakennusgeologisessa luokituksessa luokkaa Ri IV). Rakennusgeologisen kartoituksen paalulukemat ovat likimääräisiä, koska kartoitus on tehty louhintatyön aikana, eikä tunneliin ollut merkitty paalulukuja. Paalut on siis arvioitu peränpaaluluvun perusteella. Kuva 28 on esitetty tunnelin rakennusgeologinen kartoitus kyseisen rikkonaisuusvyöhykkeiden osalta.



Kuva 28. Rikkonaisuusvyöhyke urakkaosuudella PaT 3 (paalulukemat likimääräisiä).

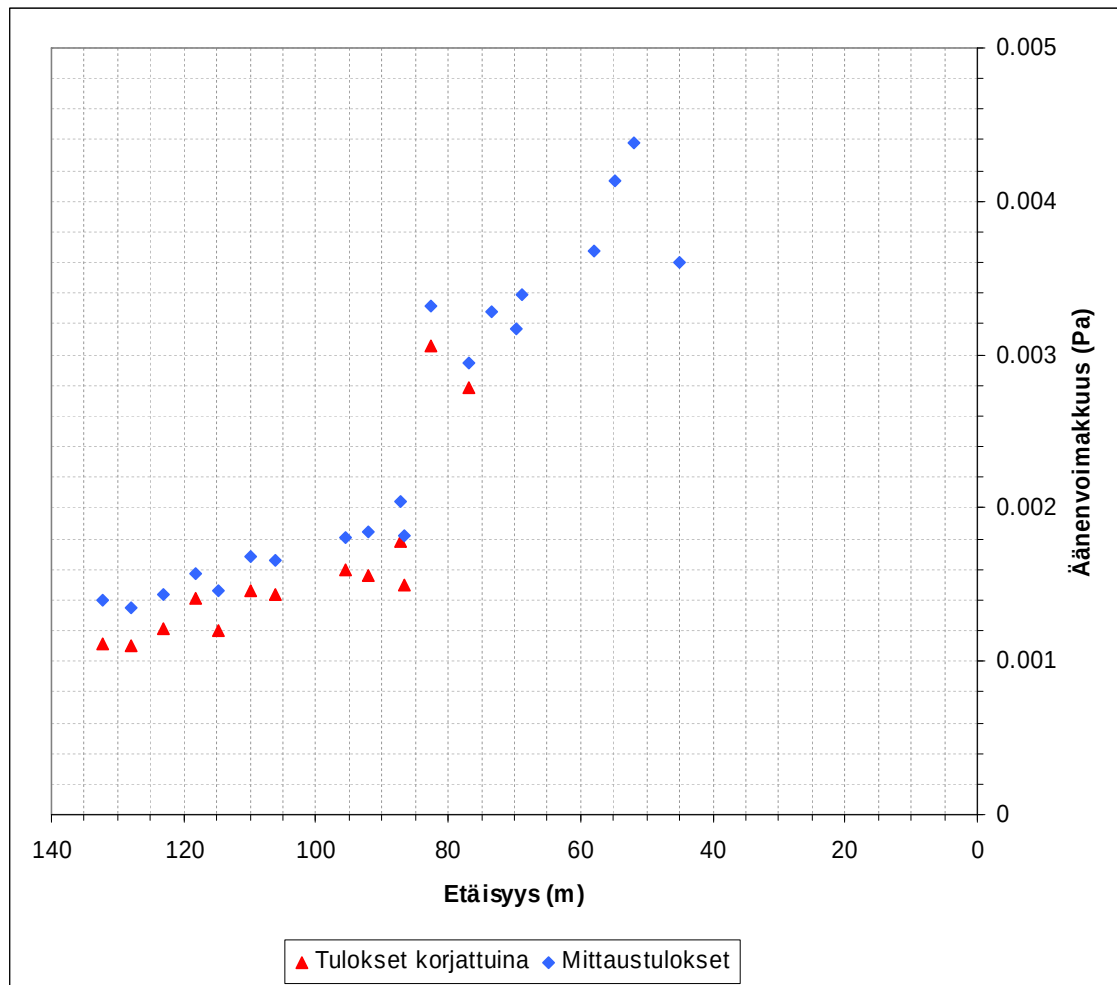
Muita merkittäviä ruhjeita ei tunnelilinjalle mittausten aikana ollut ennen paalua 632. Paalulta 632 alkaa melko jatkuva rikkonaisuusvyöhyke (vaihtelevasti rakennusgeologisen kallioluokituksen luokkaa Ri III - V), joka jatkuu mittauspisteen ohitse. Tämän ruhjeen vaikutusta ei ole havaittavissa mittaustuloksissa lukuun ottamatta mahdollista vaikutusta lähimpään mittaustulokseen paalulla 624. Paalulta 624 saatiin matalampi mittaustulos kuin kauempaa paalulta 638. Ruhjeen vaikutusta mittaustuloksiin on kuitenkin vaikea arvioida, koska tunnelinja on huomattavasti mittauspistettä alempana ja sivussa mittauspisteestä eikä ruhjeen jatkuvuudesta ole tietoa. On siis mahdollista, että ruhje ei osu runkomelua välittävän tärinän kulkureitille. Ruhjeiden sijainti tunnelilinjalla on esitetty Kuva 29.



Kuva 29. Ruhjeiden sijainti PaT 3 tunnelissa.

5.5.2 Geometrinen vaimennus

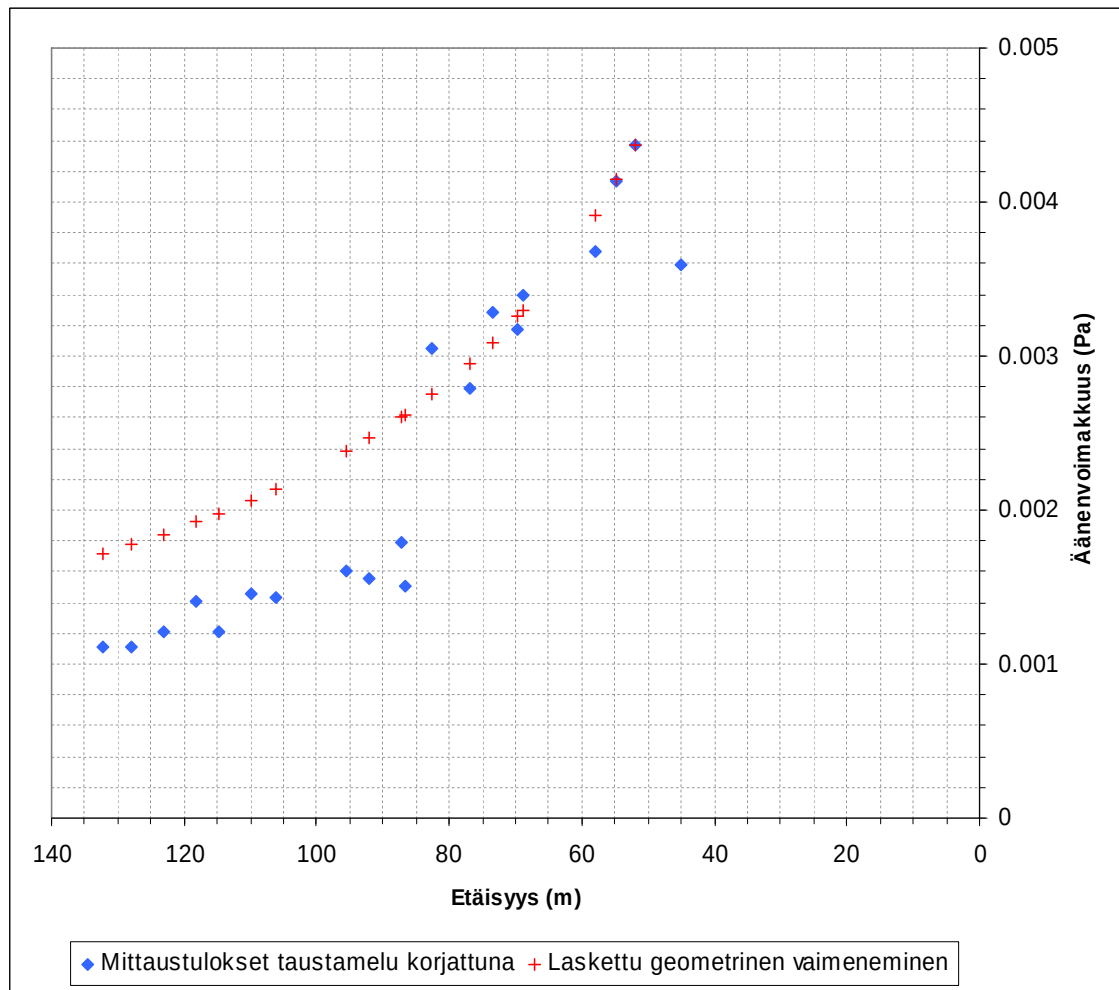
Mittaustuloksia desibeleinä tarkasteltaessa näyttäisi, että porausmelu vaimenisi suoraan suhteessa etäisyyteen. Desibeliasteikko on kuitenkin logaritminen asteikko, joten vaimenemista käsiteltäessä on kuvaavampaa käyttää äänenpaineen yksikkönä Pascaleita, jolloin vaimenemisen luonne on selkeämmin havaittavissa. Mittaustulokset on esitetty Pascaleina Kuva 30.



Kuva 30. Mittaustulokset Pascaleina.

Geometrinen vaimeneminen tapahtuu suhteessa etäisyyden muutokseen. Mittaustuloksiin voisi sovittaa potenssifunktiota, mutta kauempaa olevat mittaustulokset ovat materiaalivaimennuksen takia huomattavasti alentuneet, joten geometrinen vaimeneminen ei voida sovitettuna käyrällä suoraan kuvata.

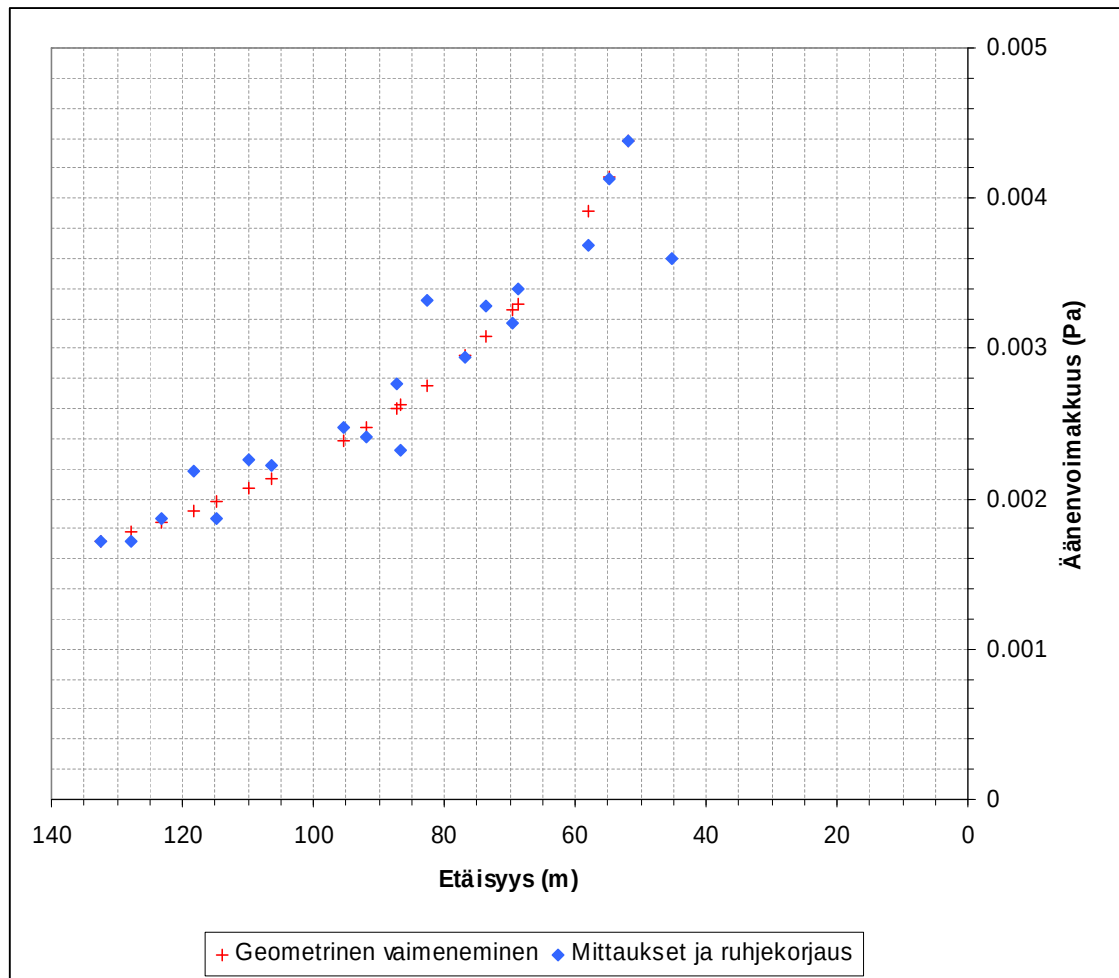
Oletetaan, että runkomelu on suoraan suhteessa ääninään, joka sen aiheuttaa. Lasketaan geometrinen vaimeneminen suurimmasta mitatusta arvosta geometrisen vaimenemisen kaavalla 7. Materiaalivaimennusta ei oteta huomioon vaan sen termin oletetaan olevan yksi. Kuva 31 on lasketut tulokset ja mittaustulokset samoilla etäisyyksillä. Kuvasta nähdään, että mittaustulokset vaihtelevat molemmiin puolin geometrisen vaimenemisen käyrää, mutta ovat kohtuullisen lähellä laskettuja tuloksia, jos ei oteta huomioon kauempaa mitattuja ruuhkeita takia vaimentuneita tuloksia.



Kuva 31. Mittaustulokset ja geometrinen vaimeneminen.

Tästä voidaan päätellä, että ehjässä kalliossa lyhyillä etäisyyksillä materiaalivaimennuksella ei ole juurikaan merkitystä, vaan melun vaimenemista voidaan arvioida pelkän geometrisen vaimenemisen avulla. Savea sisältävillä ruuhjevyöhykkeillä on kuitenkin hyvin suuri runkomelua vaimentava vaikutus.

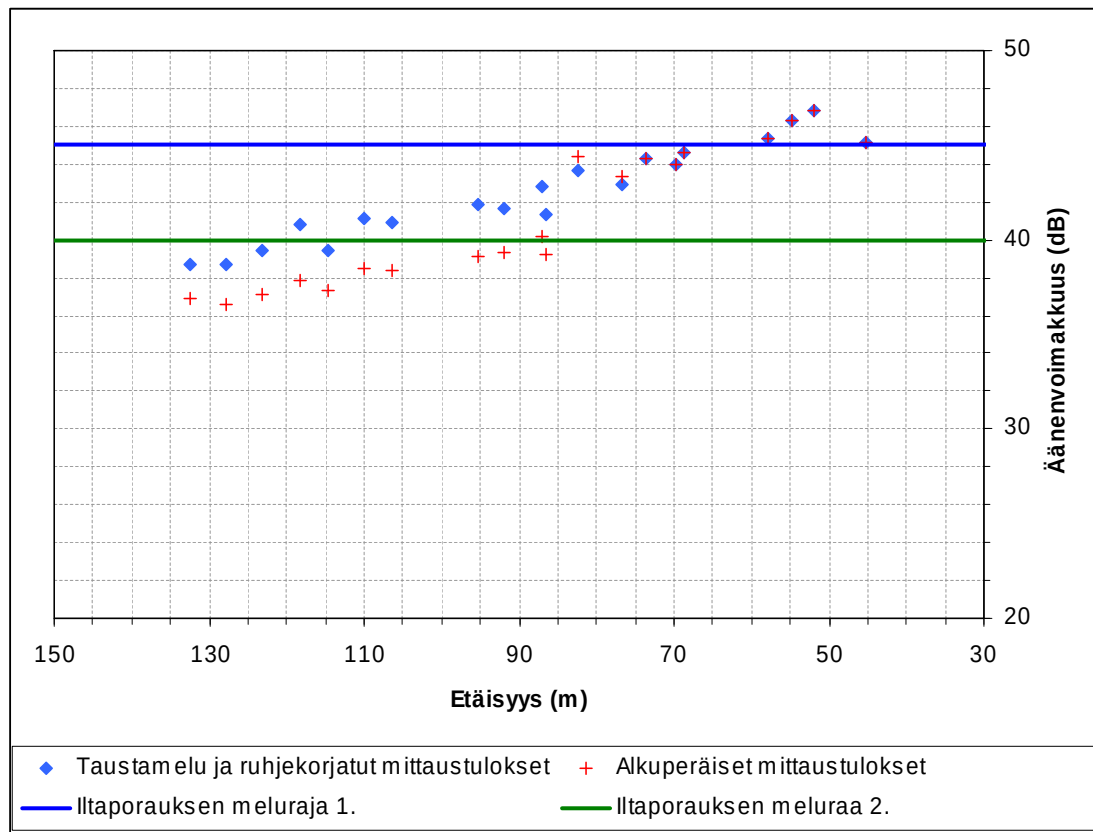
Oletetaan, että noin paalulla 685 sijainnut savivyöhyke vaimensi kaikkia sen takaa mitattuja mittaustuloksia yhtä paljon. Verrattaessa savivyöhykkeen molemmilta puolilta olevia mittaustuloksia voidaan todeta noin 3,8 dB hyppäys äänenvoimakkuuden suuruudessa, kun rikkonaisuusvyöhyke läpäistään. Lisäämällä kaikkiin savivyöhykkeen takaa mitattuihin tuloksiin 3,8 dB saadaan Kuva 32 kuvaaja.



Kuva 32. Geometrinen vaimeneminen ja ruhjekorjaus

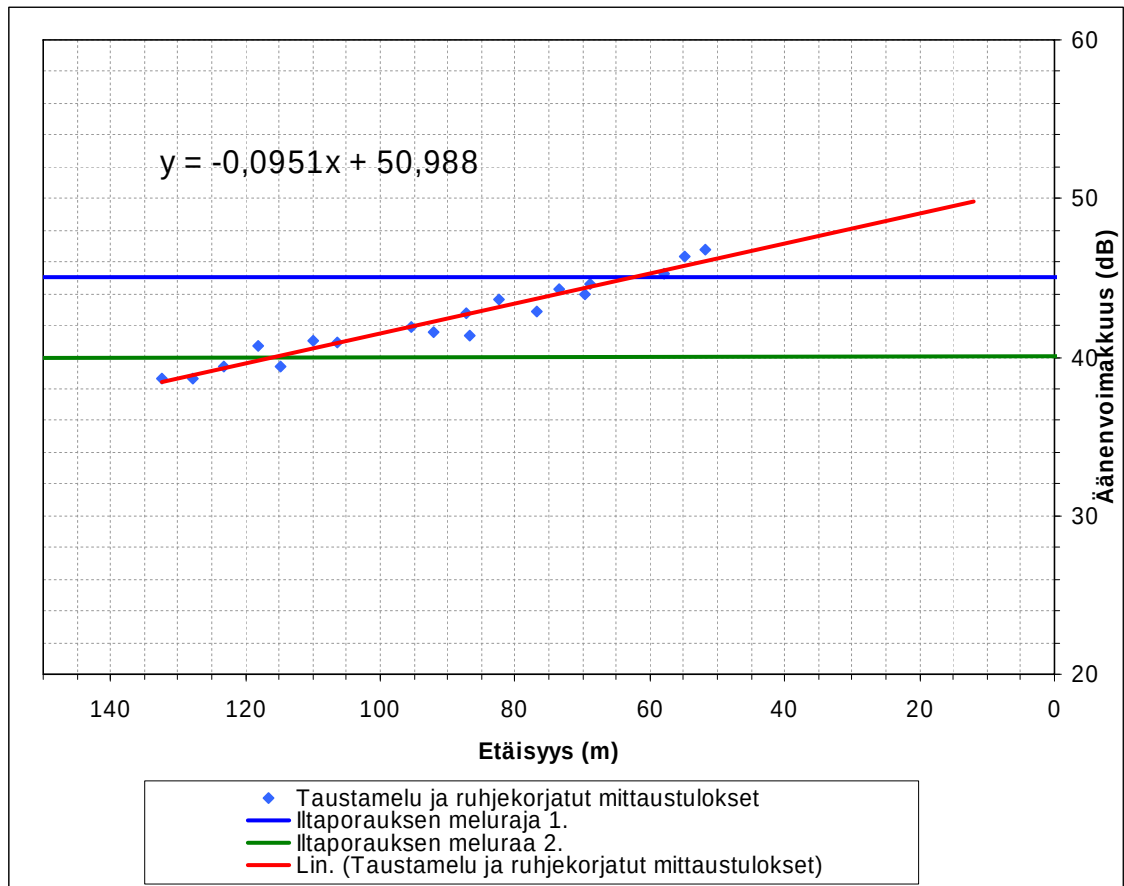
Kuvan perusteella on hyvin todennäköistä, että savivyöhyke on vaimentanut kaikkia vyöhykkeen takaa mitattuja tuloksia saman verran. Lisätyllä korjauksella mittaustulokset ovat lähellä laskettuja geometrisen vaimenemisen tuloksia.

Tarkasteltaessa korjattuja ja alkuperäisiä mittaustuloksia vielä desibeleinä havaitaan, että korjatut tulokset ovat nyt huomattavasti paremmin samalla suoralla lukuun ottamatta lähintä mittauspistettä, joka sijaitsee noin 45 m etäisyydellä (Kuva 33). Tämä piste on kuitenkin ruhjevyöhykkeen alueella.



Kuva 33. Alkuperäiset ja korjatut mittaustulokset desibeleinä.

Kuva 34 on esitetty mittaustulokset ilman viimeistä vaimentunutta pistettä ja pisteisiin sovitettu trendisuora. Sovitus voitaisiin tehdä myös eksponenttikäyränä Pascaleina oleviin mittaustuloksiin. Eksponenttikäyrälle ja suoralle ei kuitenkaan tullut yli 0,2 dB suuruuseroja eri pisteissä, joten on perusteltua käyttää suoraa, josta tulokset saadaan suoraan desibeleinä ja ne ovat helpommin verrattavissa melurajoihin.



Kuva 34. Mittaustulokset ja trendisuora.

Työn mittaustulosten perusteella runkomelun suuruutta ehjässä kalliossa voidaan arvioida kaavalla

$$L_{Aeq} = -0,0951 \cdot r + 50,988 \quad (29)$$

jossa L_{Aeq} on A-painotettu keskiäänitaso (dB)

r on etäisyys kalliotilasta (m).

Kaavan luotettavuutta voidaan pitää suhteellisen hyvänä 50 – 130 m etäisyyksillä. Pienemmiltä etäisyyksiltä tarvittaisiin lisää mittaustuloksia luotettavuuden saavuttamiseksi.

Verrattaessa korjattuja mittaustuloksia melurajoihin havaitaan, että tunnelissa 40 dB meluraja saavutetaan 115 m etäisyydellä ja 45 dB meluraja saavutetaan 60 m etäisyydellä. Melurajan viiden desibelin muutoksella on siis hyvin huomattava vaikutus. Tässä

pitää kuitenkin muistaa, että mitatut tulokset ovat suoraan kalliosta välittyneen runkomelun mittaustuloksia.

5.6 Vertailu aikaisempiin mittaustuloksiin

Soininen on insinööritöössään mitannut louhintaporauksen runkomelun suuruuksia muutamissa eri asuinkiinteistöissä (Soininen 2007). Soinisen tulokset on esitetty Taulukko 10. Mittaustulokset ovat A-taajuuspainotettuja keskiäänitasoja.

Taulukko 10. Runkomelun mittaustuloksia (Soininen 2007)

Etäisyys (m)	Taustamelu (dB)	Porausmelu (dB)	Muuta
50	28,8	32,3	Kalliolle perustettu betonielementitalo. Toinen kerros.
40	31,7	39,2	Väestönsuoja 1,5m maan alla. Kalliolle perustettu talo.
45	34,5	40,7	Kalliolle perustettu tiilirunkoinen talo. Mittaukset kellarissa.

50 m etäisyydellä asuinkerroksesta oli mitattu 32,3 dB porausmelun äänenvoimakkuus, kun tunnelissa saatiin 51,9 m etäisyydellä 46,8 dB äänenvoimakkuus. Kellaritilassa oli mitattu 45 m etäisyydellä 40,7 dB äänenvoimakkuus, kun taas tunnelissa saatiin 46,6 m etäisyydellä 45,1 dB. Porausmelu ei ylittänyt 40 dB melurajaa edes kerrostalon väestönsuojassa 40 m etäisyydellä.

Verrattaessa Soinisen tuloksia tämän työn mittauksiin voidaan todeta, että mittaustulokset kellaritiloissa ja asuintiloissa ovat 5 – 10 dB matalampia kuin tässä työssä tunnelissa tehtyjen mittausten tulokset. Mittaustuloksia ei kuitenkaan ole riittävästi eri kohteista, jotta voitaisiin olla varmoja rakennuksissa tapahtuvasta vaimenemisesta. On myös mahdollista, että Soinisen matalammat mittaustulokset johtuvat mittausalueen geologisista olosuhteista. Vähäiset mittaustulokset kuitenkin tukevat teoriaa, jonka mukaan korkeat taajuudet vaimenevat talojen rakenteissa nopeasti.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET

6.1 Louhintaporauksen aiheuttama runkomelu

Louhintaporauksen aiheuttaman runkomelun vaimenemisessa merkittävin tekijä on geometrinen vaimennus. Kallion ollessa hyvälaatuista materiaalivaimennus on lyhyillä

alle 100 m etäisyyksillä merkityksetöntä. Savea sisältävät rikkonaisuusvyöhykkeet ovat kuitenkin hyvin merkittävä tärinän vaimentaja ja mittauksissa todettiin yhden rikkonaisuusvyöhykkeen aiheuttama ~4 dB vaimennus, joka on todella huomattava. Samansuuruinen vaimennus geometrisena vaimentumisena voi vaatia kymmenien metrien matkan riippuen etäisyydestä. Etäisyyden kasvaessa geometrinen vaimeneminen on hidasta, joka selittää sitä, että runkomelu voi olla havaittavissa pitkilläkin etäisyyksillä. Runkomelu voi olla havaittavissa asunnoissa jo ennen sille annettuja melurajoja.

Verrattaessa Soinisen mittaustuloksia asunnoista ja kellareista tämän työn mittaustuloksiin on havaittavissa, että talojen rakenteissa tapahtuu huomattavaa vaimenemista. Asunnoissa ja kellareissa mitatut tulokset ovat 5- 10 dB matalampia kuin tässä työssä mitatut tulokset. Näiden tulosten perusteella näyttäisi ilmeiseltä, että asuntojen rakenteissa tapahtuu huomattavaa vaimenemista. Tämä johtuu siitä, että louhinnan aiheuttaman runkomelun taajuuudet ovat huomattavasti korkeampia kuin rakennusten ominaistaajuuudet.

Työssä mitatut louhintaporauksen aiheuttaman runkomelun havainnot ylittävät osittain nykyiset melurajat. On kuitenkin muistettava, että mittauksen tehtiin kalliotunnelissa, jonne runkomelu välittyy huomattavasti voimakkaampana kuin asuntoihin. Nykyisillä louhintaporauksen melurajoilla poraus on useimmiten mahdollista kahdessa vuorossa. Tämän työn mittaustulosten perusteella ongelmia 40 dB melurajan suhteen voi esiintyä alle 60 m etäisyyksillä ja 45 dB melurajan suhteen alle 50 m etäisyyksillä. Nämä arviot etäisyyksistä on määritetty kalliotunnelissa tehtyjen mittausten perusteella, jos mittaustuloksia asunnoista olisi enemmän, voitaisiin sanoa varmemmin millä etäisyydellä lähestytään melurajoja. Louhinnan aiheuttamaa runkomelua käsiteltäessä on muistettava suuri riippuvuus geologisista olosuhteista. Kallion heikkousvyöhykkeet ovat huomattava runkomelua vaimentava tekijä. Runkomelulle on vaikeaa luoda yhtenäistä mallia, joka kertoisi suoraan milloin melu ylittää sille asetetun melurajan.

Runkomelun häiritsevyyttä tutkiessa olisi tarvetta mittaustuloksille, jotka ovat lähempää asuntoja kuin tässä työssä mitatut tulokset tai Soinisen työssä mitatut tulokset. Alle 50 m etäisyyksillä mitattuja tuloksia tarvittaisiin runkomelun aiheuttaman meluhaitan arvi-

ointiin. Geometrinen vaimeneminen on lyhyillä etäisyyksillä nopeaa ja nykyisten tulosten perustella on vaikea arvioida runkomelun suuruutta porattaessa lähempänä asuntoja.

6.2 Louhinnan aiheuttama ilmanpaineaalto

Louhinnan aiheuttama ilmanpaineaalto ei ole vaurioiden kannalta ongelma asutuskeskuksissa tehtävissä avolouhinnoissa, jos etutäytöstä, louhetäkkäyksestä ja kentän peittämisestä on pidetty huolta. Rakennuksille asetetut värinärarajat rajoittavat kerralla räjähtävän räjähdysaineen määrää, niin paljon ettei ilmanpaineaalto ole ongelma.

Räjäytyksestä muodostuvan ilmanpaineaallon suuruutta voidaan arvioida useilla empiirisillä kaavoilla. Myös vaurioarvoja on löydettävissä kirjallisuudesta. Tunnelilouhinnassa suuaukon ympärille aiheutuva ilmanpaineaalto on vaikeammin arvioitavissa ja arviointi vaatii tuekseen mittaustuloksia.

Ilmanpaineaalto voi olla ongelma louhittaessa ajotunnelien suuaukkoja. Tällöin ilmanpaineaalto suuntautuu voimakkaasti. Tällaisien räjäytyksien aiheuttamasta ilmanpaineaallosta tarvittaisiin mittaustuloksia, jotta voitaisiin arvioida niiden aiheuttamaa häiriötä.

7. YHTEENVETO

Kalliorakentaminen aiheuttaa monenlaisia häiriöitä lähiympäristölle. Tässä työssä on keskitytty tutkimaan louhintaa porauksen ja ilmanpaineaallon vaikutuksia. Työssä on yritetty selvittää ilmanpaineaallon vaikutuksia kirjallisuustutkimuksella.

Louhintaporauksen aiheuttamassa runkomelussa huomio on kiinnittynyt ohjearvojen määrittämiseen ja runkomelun vaimenemisen tutkimiseen. Runkomelun mittauksissa oli tarkoitus selvittää 45 dB melurajan 5 dB alentamisen vaikutusta louhintaporaukseen työaikoihin.

Kappaleessa kaksi on käsitelty värinän välittymiseen kallio- ja maaperässä liittyvää teoriaa. Kappaleessa käydään läpi tärkeimmät vaimenemiseen liittyvät seikat, kuten materiaalivaimennus ja geometrinen vaimennus. Lisäksi selitetään kallion ominaisuuksien vaikutuksia värinän välittymiseen ja värinän siirtymistä rakenteisiin sekä rakenteissa tapahtuvaa vaimenemista.

Runkomeluun liittyvää teoriaa on käsitelty kappaleessa 3. Kappaleessa käydään läpi perusasioita äänestä ja äänenpaineen mittaamisesta. Lisäksi selitetään runkomelun syntyä ja siihen liittyviä säädöksiä. Kappaleessa on esitetty louhintatyöstä aiheutuvaa melua koskevat voimassaolevat säädökset. Kunnan ympäristöviranomaisen määrittää melurajat rakennustyölle.

Kappaleessa neljä on käsitelty asutuskeskuslouhintojen aiheuttamaa ilmanpaineaaltoa ja esitellään ilmanylipaineen suuruuteen vaikuttavia tekijöitä. Kappaleessa kerrotaan myös ilmanylipaineen suuruuden arvioinnista. Louhintatöiden aiheuttama ilmanpaineaalto ei asutuskeskuksissa suoritettavissa avolouhinnoissa ole merkittävä ongelma, koska louhintatyöt ovat yleensä pieniä ja lähellä olevat rakennukset rajoittavat kerralla räjähtävän räjähdysaineen määrää.

Kappaleessa viisi käsitellään työssä tehtyjä mittaustuloksia ja arvioidaan niiden perusteella runkomelun vaimenemista kallioperässä. Vaimenemisessa suurin merkitys on geometrisella vaimenemisella ja rikkonaisuusvyöhykkeillä, jotka paikallisesti saattavat vaimentaa runkomelua huomattavasti. Työn mittaustuloksia ei voida suoraan käyttää mahdollisen porausetaisyyden arvioinnissa aikoina, jolloin runkomelun suuruutta on rajoitettu, koska mittaukset on tehty kalliotunnelissa ja runkomelun suuruus on asunnoissa matalampi kuin kalliotunnelissa.

LÄHDELUETTELO

- Athanasopoulos, G.A. & Pelekis, P.C. 2000. Ground vibrations from sheetpile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 19:5. S. 371-387.
- Burger, H.R. 2006. *Introduction to applied geophysics: exploring the shallow subsurface*. W.W. Norton. New York.
- Dahlström, R. & Walter, P. 2006. Stomljud vid tunneldrivning, borra för mindre stomljud? Pilotstudie. Stiftelsen Svensk bergteknisk forskning. Stockholm.
- David, L. 2007. *Seismology Introduction*. Geological Sciences at Brown University. Saatavilla:
<http://www.geo.brown.edu/People/Grads/abt/Tools/Seismology/SeismoIntro.htm>
(Luettu: 15.6.2009).
- Dowding, C.H. 1985. *Blast vibration monitoring and control*. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ.
- Eitzenberger, A. 2008. *Inventory of geomechanical phenomena related to train-induced vibrations from tunnels*. Luleå University of Technology; Department of Civil, Mining and Environmental Engineering; Division of Mining and Geotechnical Engineering.
- Eskola, I., Kaukinen, P., Niiranen, S. & Räsänen, H. 2009. Poraustyöt ja kalusto. Teoksessa: A. Hakanpää & P. Lappalainen (toim.). *Kaivos- ja louhintatekniikka*. Kaivannaisteollisuus Ry ja Opetushallitus. Helsinki. S. 137-164.
- Everest, F.A. 2000. *Master handbook of acoustics*. Fourth edition edn, McGraw-Hill Professional Publishing. Blacklick, OH, USA.
- Gutowski, T.G. & Dym, C.L. 1976. Propagation of ground vibration: a review. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 49:2. S. 179-193.

- Hustrulid, W. 1999. *Blasting principles for open pit mining*. Balkema. Rotterdam.
- ISEE 1999. *Field practice guidelines for blasting seismographs*. , International society of explosives engineers.
- Jaeger, J.C. 2007. *Fundamentals of Rock Mechanics*. Blackwell Pub. Malden, MA.
- Kim, D. & Lee, J. 2000. Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 19:2. S. 115-126.
- Kinney, G.F. & Graham, K.J. 1985. *Explosive shocks in air second edition*. Springer-Verlag New York Inc. New York.
- Klein, G. & Rainer, J.H. 1995. *Wave propagation teoksessa Vibration problems in structures*. 1st edn, Birkhäuser. Basel;Boston;Berlin.
- Kuzyk, G.W., Onagi, D.P. & Liu, Q. 1993. Overpressure generation and control in tunnel blasts. *Innovative mine design for the 21st century*. Bawden & Archibald (toim.). Balkema. Rotterdam. S.813.
- Mäkelä, S.(toim.) 1999. *Tekninen eristäminen*. Suomen Eristysyhdistys ry ja Opetushallitus. Helsinki.
- Nicholls, H.R., Johnson, C.F. & Duvall, W.I. 1971. Blasting vibrations and their effect on structures, USBM bulletin 656. United States Bureau of Mines.
- Peltonen, T., Lahti, L. & Backholm, M. 2005. *"Raideliikenteen melu- ja värinäutkimuksia", Akustiikkapäivät 2005*. Akustinen Seura Ry. Saatavilla: <http://www.vantaa.fi/binary.asp?path=1;135;221;222;2394;2452;2691;2660;28948&field=FileAttachment&version=3> (Luettu: 3.3.2009).
- Persson, P. 1994. *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press. Boca Raton (FL).

- Reidarman, L. 1997. Reducering av luftstöt våg vid sprängning under mark, del 2. Stiftelsen svensk bergteknisk forskning. Stockholm.
- Rodríguez, R., Toraño, J. & Menéndez, M. 2007. Prediction of the airblast wave effects near a tunnel advanced by drilling and blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 22:3. S. 241-251.
- Schomer, P.D. & Averbuch, A. 1989. Indoor human response to blast sounds that generate rattles. *Journal of the Acoustical Society of America*. Vol. 86:2. S. 665-673.
- SIS 1996. *Svensk standard SS 02 52 10, Vibration och stöt - Sprängningsinducerade luftstöt vågor - Riktvärden för byggnader*. 1996-03-13 edn, Standardiseringen i Sverige. Stockholm.
- Siskind, D.E. 2000. *Vibrations from blasting*. International society of explosives engineers. Cleveland, Ohio.
- Siskind, D.E., Stachura, V.J., Stagg, M.S. & Kopp, J.W. 1980. Structure response and damage produced by airblast from surface mining, Report of investigations 8485. United States Bureau of Mines.
- Soininen, H. 2007. *Maanalaisen porauksen runkomelun välittyminen rakennuksiin. Opinnäytetyö*. Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulu.
- Sosiaali- ja terveysministeriö 2003. *Asumisterveysohje, asuntojen ja muiden oleskelutilojen fyysiset, kemialliset ja mikrobiologiset tekijät*. Sosiaali- ja terveysministeriö. Helsinki.
- Sosiaali- ja terveysministeriö 1998. *Räjäytysalan normeja*. Tampere.
- Talja, A. 2004. Suositus liikennetälinän mittaamisesta ja luokituksesta, VTT Tiedotteita 2278. VTT. Espoo.
- Talja, A. & Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. VTT. Espoo.

Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi, VTT Tiedotteita 2425. VTT. Espoo.

Vuolio, R. 2001. *Räjäytysopas 2001*. SML:n maarakentajapalvelu. Helsinki.

Vuolio, R. 1991. *Räjäytystyöt*. Suomen maarakentajien keskusliitto. Helsinki.