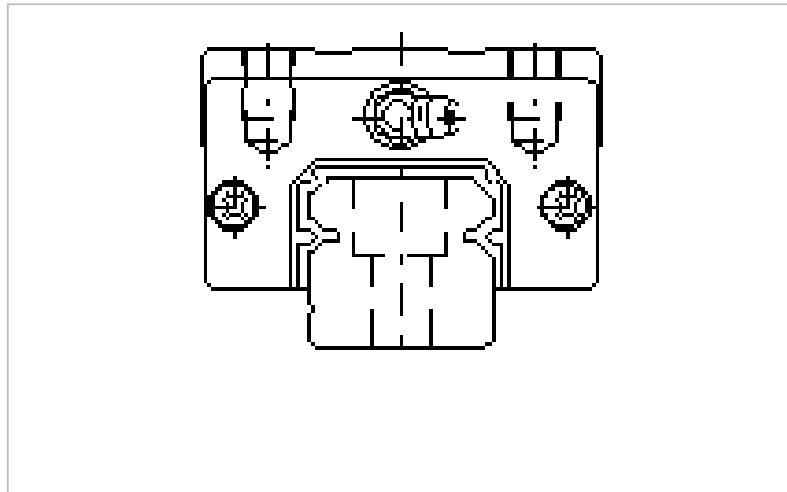


**Tutkimusraportti  
BVAL73-001059**

**LINEAARIJOHTEEN KUNNONVALVONTA  
AKUSTISEN EMISSION, VÄRÄHTELYN JA ÄÄNEN  
MITTAUKSIN**

Mikko Mustonen ja Jyrki Tervo



**Espoo 03.11.01**

		A Työraportti	
		B Julkinen tutkimusraportti	X
		Tutkimusraportti luottamuksellinen saakka	
Raportin nimi Linearijohteen kunnonvalvonta akustisen emission, värähtelyn ja äänen mittauksin			
Toimeksiantaja/rahoittaja ja tilaus pvm/nro TEKES, Teollisuus		Raportin numero BVAL73-001059	
Projektin nimi Koneiden ja laitteiden kunnon ja käyttöolosuhteiden monitorointi ja diagnostiikka		Suoritteen numero V9SU00658	
Laatija(t) Mikko Mustonen, Jyrki Tervo		Sivujen/liitesivujen lkm 18 / 1	
Avainsanat Linearijohde, Kunnonvalvonta, Värähtelymittaus, Akustinen emissio, Ääni			
Tiivistelmä Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mikä kunnonvalvontamenetelmä soveltuu parhaiten linearijohteen vaurioitumisen tunnistamiseen. Kokeillut menetelmät olivat värähtelymittaus, äänen mittaus mikrofonilla sekä akustisen emission mittaaminen. Mittaukset tehtiin käyttäen koelaitteessa ensin yhtä ehjää johdekelkkaa, sitten yhtä vaurioitunutta kelkkaa sekä lopuksi kahta kelkkaa, joista toinen oli ehjä ja toinen vaurioitunut.  Vaurioitunut linearijohde voidaan erottaa ehjästä johteesta akustisen emission, värähtelykiihtyvyyden tai äänen mittauksin tarkastelemalla mitattujen suureiden tasoja koko taajuusalueella ja selvemmin myös tarkastelemalla tasoja sopivilla taajuuskaistoilla. Vaurioituneen linearijohteen erottaminen usean yhteen kytketyn linearijohteen joukosta voi olla vaikeaa tässä tutkimuksessa käytetyillä menetelmillä.			
Allekirjoitukset, Espoo 11/03/01			
Kenneth Holmberg Tutkimuspäällikkö		Jyrki Tervo Erikoistutkija	Tarkastanut
VTT VALMISTUSTEKNIikka Käyttötieteikka, VAL73	Metallimiehenkuja 6, Espoo PL 1702, 02044 VTT	Puh.vaihe (09) 4561 Faksi (09) 460 627 WWW: <a href="http://www.vtt.fi/manu/">http://www.vtt.fi/manu/</a>	

## Alkusanat

Tämä raportti on laadittu projektissa " Koneiden ja laitteiden kunnan ja käyttövarmuuden monitorointi ja diagnostiikka", joka on osa "Käyttövarmuus kilpailutekijänä" -teknologiaohjelmaa. Raportin on pääasiassa kirjoittanut tutkija Mikko Mustonen, joka kuitenkin poistui VTT:n palveluksesta ennen kuin viimeistelytyö oli saatettu loppuun. Viimeistelyn suoritti Jyrki Tervo. Kirjoittajat haluavat kiittää Teknologian kehittämiskeskusta, sekä projektiin osallistuvia yrityksiä: Valmet Paperikoneet, Lillbacka Oy, Rautaruukki Oy Raahen Steel, Nordberg Lokomo Oy, sekä Outokumpu Poricopper.

Espoo, 11/03/01

Tekijät

## Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Menetelmät.....</b>	<b>4</b>
2.1	Mittausjärjestelyt.....	4
2.2	Värähtelymittaus.....	6
2.3	Äänimittaus.....	6
2.4	Akustisen emission mittaus .....	7
<b>3</b>	<b>Tulokset.....</b>	<b>8</b>
3.1	Akustinen emissio.....	8
3.2	Värähtely ja ääni.....	13
<b>4</b>	<b>Tulosten tarkastelu.....</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Johtopäätökset .....</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Yhteenveto .....</b>	<b>18</b>

# 1 Johdanto

Linearijohteita käytetään lineaarisen liikkeen ohjaamiseen ja laakerointiin. Linearijohde koostuu kahdesta osasta, kiskosta ja johdekelkasta. Johdekelkan vierintäelimet tai itse kisko voivat vaurioitua siten, että liikkeen kitka lisääntyy haitaten koneen toimintaa merkittävästi.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mikä kunnonvalvontamenetelmä soveltuu parhaiten linearijohteen vaurioitumisen tunnistamiseen. Kokeillut menetelmät olivat värähtelymittaus, äänen mittaus mikrofonilla sekä akustisen emission (lyhenteenä käytetään AE) mittaaminen.

# 2 Menetelmät

Kokeet tehtiin NSK LH 25Z lineaarikiskolla jossa käytettiin NSK LAH 25ANZ3N johdekelkkoja. Kiskon nimellisleveys on 25 mm. Kuvatun tyyppisiä linearijohteita käytetään työstökonesovelluksissa.

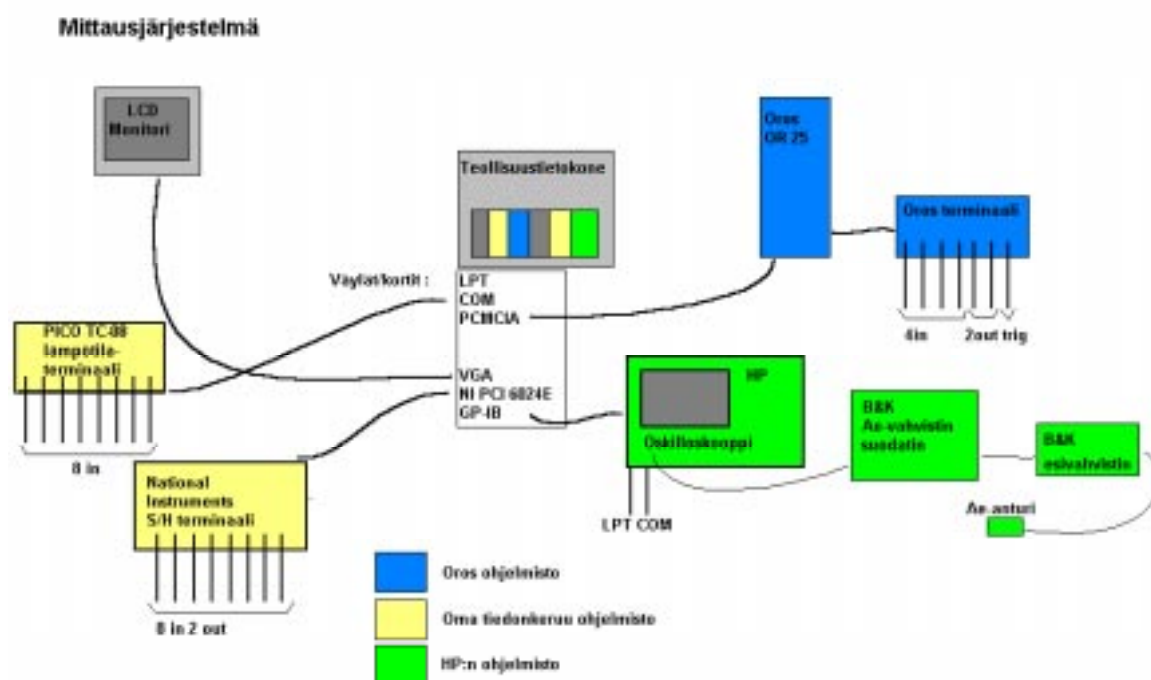
Koejärjestely antaa mahdollisuuden muuttaa kelkan päälle tulevaa kuormaa 4,40 - 34,02 kilogrammaa ja liikkeen nopeutta  $0,59 \pm 0,05$  m/s. Mittaukset pyrittiin tekemään vakionopeudella ja -kuormalla. Mittauksissa ainoa muuttuva parametri oli linearijohdekelkkojen määrä ja laatu. Mittaukset tehtiin käyttäen koelaitteessa ensin yhtä ehjää kelkkaa, sitten yhtä vaurioitunutta kelkkaa sekä lopuksi kahta kelkkaa, joista toinen oli ehjä ja toinen vaurioitunut.

## 2.1 Mittausjärjestelyt

Linearijohde instrumentoitiin värähtelyn, äänen ja akustisen emission mittauksia varten. Yleisnäkymä mittausjärjestelyistä on esitetty kuvassa 1. ja mittausjärjestelmän kokoonpano on esitetty tarkemmin kuvan 2 kaaviossa. Koelaitte koostuu pöytään kiinnitetystä linearijohdekiskosta, kiskolla kulkevista linearijohdekelkoista, joita voi olla 1 tai 2 kpl, johdekelkkojen päälle asennettavasta kuormavaunusta, sekä kuormavaunua liikuttavasta paineilmasylinteristä. Releohjattu venttiili käyttää paineilmasylinteriä, joka liikuttaa kuormavaunua 20 cm liikematkalla edestakaisin. Liikkeen nopeutta säädetään käyttöilmanpaineella. Kokeissa nopeudeksi pyrittiin vakioimaan 88 edestakaista liikettä minuutissa, joka vastaa 0,59 m/s keskimääräistä liikenopeutta. Mittaukset tehtiin 4,40 kg kuormalla.



Kuva 1. Yleisnäkymä mittausjärjestelystä.



Kuva 2. Mittauksessa käytetty signaalin käsittely- ja tallennusjärjestelmä.

## 2.2 Värähtelymittaus

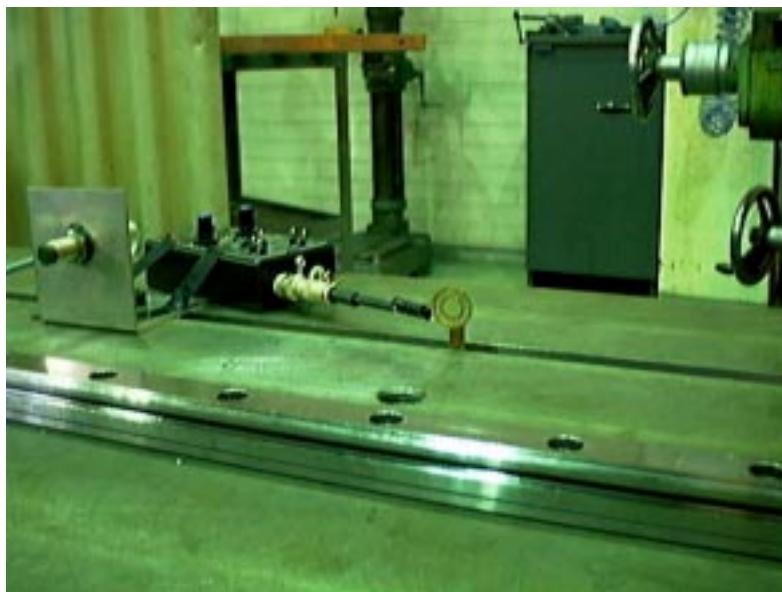
Värähtelymittauksiin käytettiin Kistler 8704 B50M1 kiihtyvyyssantureita, jotka kiinnitettiin lineaarijohteen päähän, katso kuva 3. Kiinnitykseen käytettiin liimattavaa sovitinta, johon anturi kiinnitetään ruuviliitoksella. Anturin herkkyys on  $102 \pm 2$  mV/g alueella 20 -10 000 Hz ja resonanssitaajuus 54 kHz. Anturit kytkettiin OROS PC-Pack -värähtelymittauslaitteeseen 2 metriä pitkällä koaksiaalikaapeleilla. Värähtelymittauslaitteessa on 2,4 mA vakiovirtasyöttö matalaimpedanssisille kiihtyvyyssantureille. OROS PC-Pack -mittauslaitteessa käytettiin vahvistusta 0 dB. Värähtelysignaalia tallennettiin taajuudella 51200 näytettä sekunnissa 1 sekunnin mittaisina jaksoina, 10 jaksoa kullakin johdekonstruktiolla.



*Kuva 3. Kiihtyvyyssantureiden kiinnitys lineaarijohteen päässä.*

## 2.3 Äänimittaus

Äänen mittaukseen käytettiin pienikokoista elektrettimikrofonia. Mikrofonin kytkettiin yleiskäyttöiseen Laplace Instruments VIP-20 instrumentointivahvistimeen jossa käytettiin 200-kertaista vahvistusta ja 2,4 mA virransyöttöä mikrofonille. Vahvistimelta saatu signaali tallennettiin OROS PC-Pack värähtelymittauslaitteelle taajuudella 51200 näytettä sekunnissa 1 sekunnin mittaisina jaksoina, 10 jaksoa kullakin johdekonstruktiolla. Mikrofonin sijoitus johdekiskoon nähden ilmenee kuvasta 4.



*Kuva 4. Mikrofonin ja instrumentointivahvistimen asennettuna johdekiskon viereen. Mikrofonin pyrittiin sijoittamaan kelkan liikematkan puoliväliin. Mittauksissa käytetty mikrofonin erillinen kuin kuvassa näkyvä.*

## 2.4 Akustisen emission mittaus

Akustisen emission mittaukseen käytettiin B&K:n 8313 anturia, jonka resonanssitaajuus on 200 kHz ja herkkyys resonanssitaajuudella  $1\text{V/ms}^{-1}$ . Anturi kytkettiin B&K 2637 esivahvistimeen 1,2 metriä pitkällä B&K AO0038 kaapelilla. Esivahvistimen vahvistus oli 40 desibeliä ja siinä käytettiin suodatinta, jonka päästökaista on oktaavin 200 kHz:n ympärillä (141 kHz - 282 kHz) 3db vaimennuksella ja -60 desibeliä / dekadilla päästökaistan ulkopuolella. Anturin ja suodattimen taajuusvasteet on esitetty liitteessä 1. Esivahvistimelta signaali johdettiin 1,2 metriä pitkällä B&K AO 0170 erikoiskaapelilla B&K 2638 suodatin / vahvistinyksikköön. B&K 2638 suodatin / vahvistinyksikössä käytettiin lineaarialuetta ilman suodatusta ja 0 desibelin vahvistusta. B & K suodatin/vahvistinyksiköltä signaali johdettiin 2,0 metriä pitkällä koaksiaalikaapelilla HP 54645 oskilloskoopille, jolla signaali tallennettiin. Tallennetut signaalijaksot siirrettiin tietokoneelle digitaalisesti GP-IB-väylän kautta.

AE-anturi asennettiin lineaarijohdekiskon päähän esijännitetyllä puristusliitoksella, jossa jännitysvoima tuotettiin PVC-muovinpalalla. Anturin ja kiskon välinen kosketus ja signaalitie vahvistettiin voitelemalla kosketuskohta vaseliinilla. AE-anturin kiinnitys on esitetty kuvassa 5. Anturi ja muovipala päällystettiin itsevulkanoituvalla kumiteipillä kiinnipysymisen varmistamiseksi. Lineaarijohdekiskon liike kiskolla ääriasemasta toiseen vie n. 0,35 sekuntia. Mahdollisimman suuri osa tästä syklistä pyrittiin tallentamaan AE-näytteeseen. AE-signaalia tallennettiin 0,2 sekunnin mittaisina jaksoina näytteenottotaajuudella 5 miljoonaa näytettä sekunnissa, 10 jaksoa kullakin johdekonstruktiolla.





Kuva 5. AE-anturin kiinnitys lineaarijohteen päässä.

## 3 Tulokset

### 3.1 Akustinen emissio

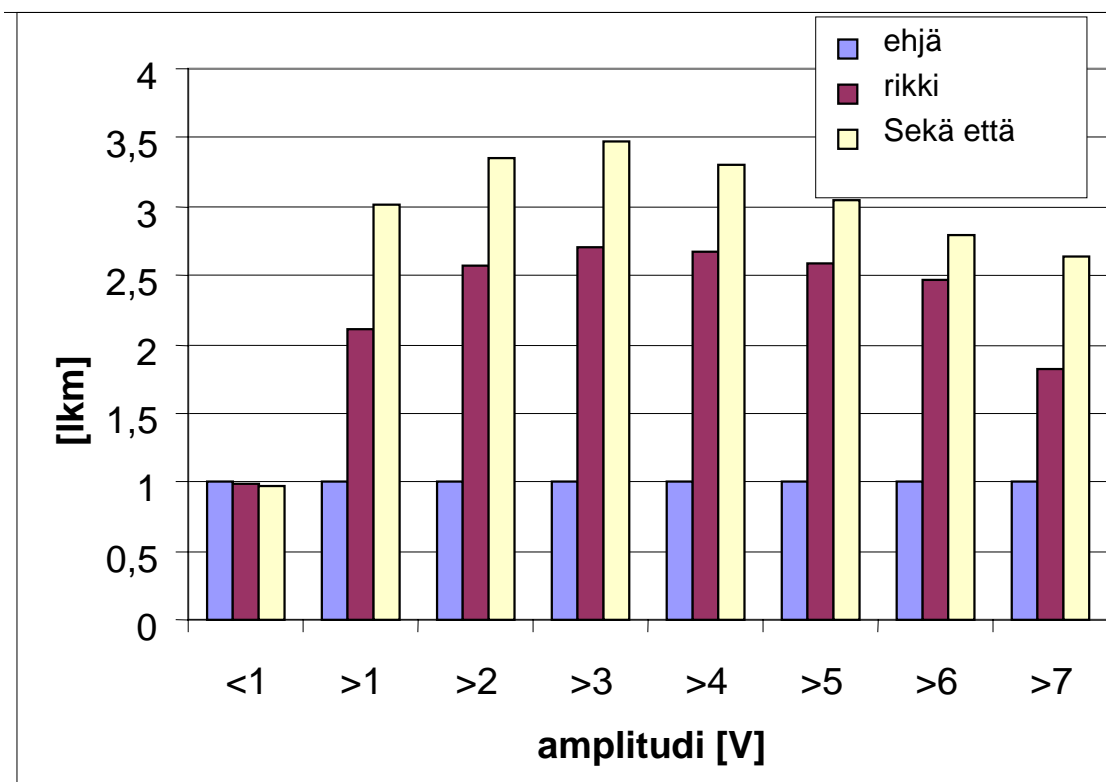
AE-signaalia tutkittiin aluksi laskemalla tietyt amplitudirajat ylittävien näytteiden lukumäärä. Signaalin maksimiarvot olivat kaikilla konstruktiolla samat, 8,5938 V ja minimi samoin -8,1250 V. Kullakin konstruktiolla tallennettiin 10 näytettä, joissa kussakin on 1 000 000 pistettä. Taulukossa 1 on esitetty signaalipisteiden jakautuminen amplituditasoille alle 1V, yli 1V, yli 2V, yli 3V, yli 4V, yli 5V, yli 6V ja yli 7V. Taulukossa 2. ja kuvassa 6. on esitetty amplitudijakauma normalisoituna.

	<1 V	>1 V	>2 V	>3 V	>4 V	>5 V	>6 V	>7 V
ehjä	9,86E+06	1,01E+05	2,34E+04	6,94E+03	4,00E+03	1,81E+03	1,23E+03	3,76E+03
rikki	9,68E+06	2,15E+05	6,01E+04	1,88E+04	1,07E+04	4,69E+03	3,05E+03	6,87E+03
sekäettä	9,56E+06	3,06E+05	7,83E+04	2,41E+04	1,32E+04	5,54E+03	3,43E+03	9,94E+03

Taulukko 1. AE-signaalien amplitudijakaumat.

	<1	>1	>2	>3	>4	>5	>6	>7
ehjä	1	1	1	1	1	1	1	1
rikki	0,982	2,118	2,568	2,714	2,664	2,585	2,476	1,829
sekäettä	0,970	3,014	3,347	3,469	3,304	3,054	2,785	2,646

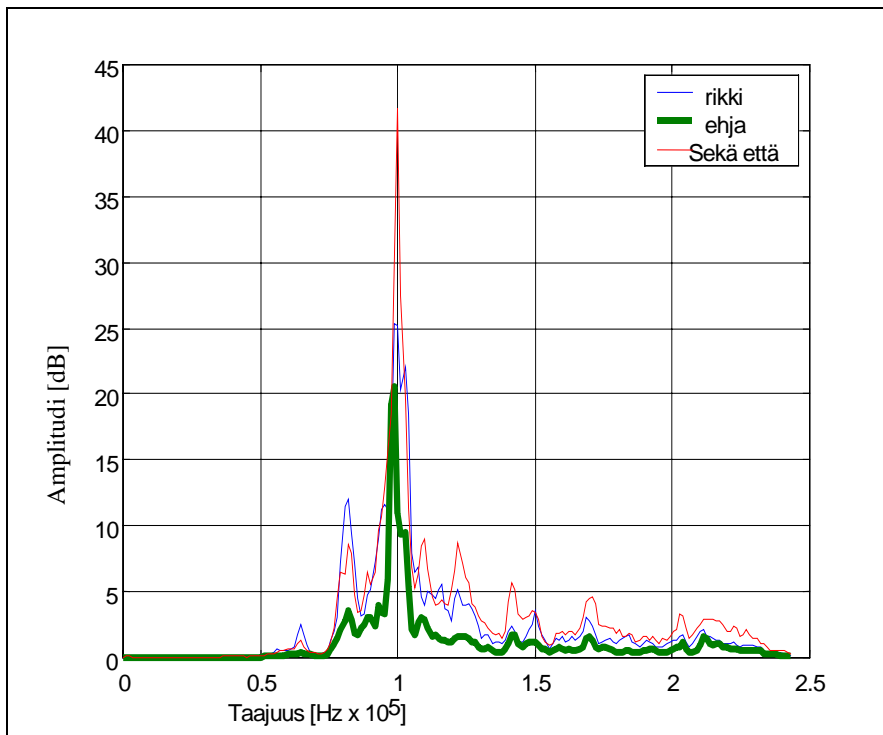
Taulukko 2. AE-signaalien amplitudijakaumat normalisoituna.



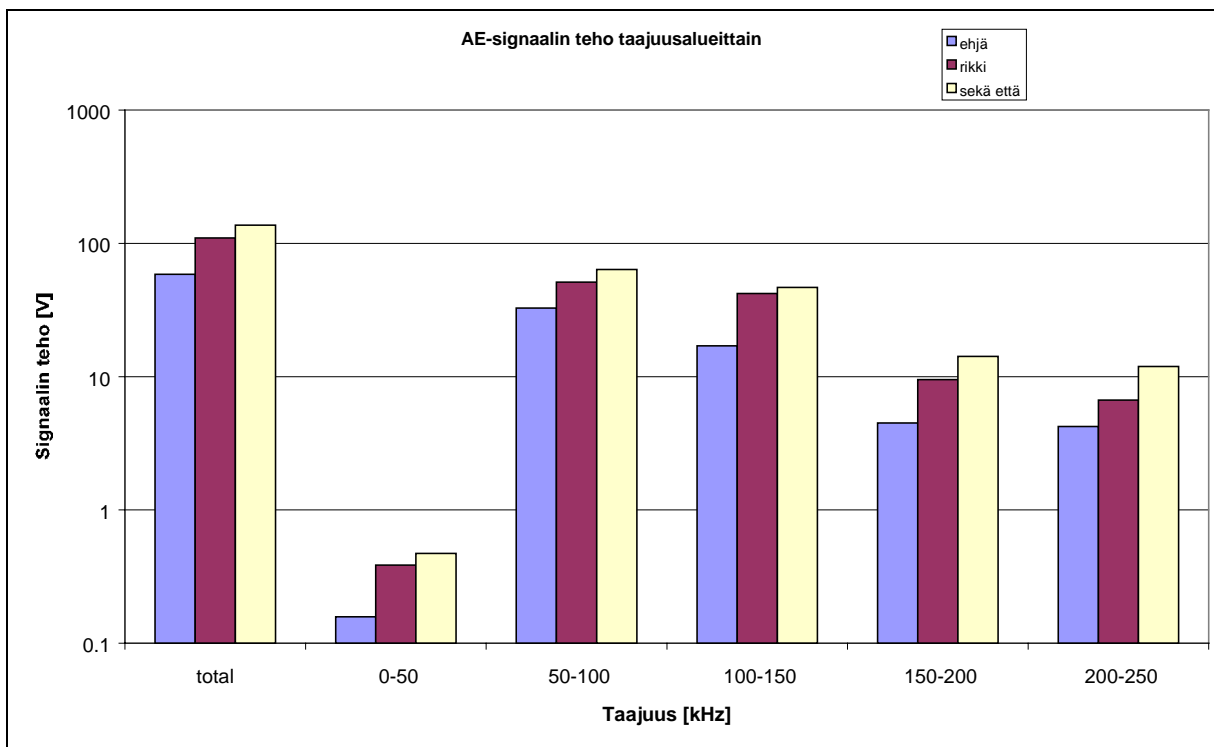
Kuva 6. AE-signaalien amplitudijakaumat normalisoituina.

Kuvassa 7. on esitetty AE-signaalien spektrit, jotka on keskiarvostettu kunkin konstruktion kaikista kymmenestä AE-näytteestä. 2048 viivan spektrit on laskettu taajuusalueelle 0-2,5 MHz, mutta kuvassa 7. niistä esitetään alue 0 - 250 kHz. Tämä johtuu siitä, että spektrin teho on lähes 0 yli 250 kHz alueella, eikä yli 250 kHz värähtelyjä täten ole havaittavissa. Spektrin laskennassa käytetty näytemäärä, 4096, antaa aikajakson pituudeksi 0,8192 millisekuntia ja alimmaksi havaittavaksi taajuudeksi 1220 Hz.

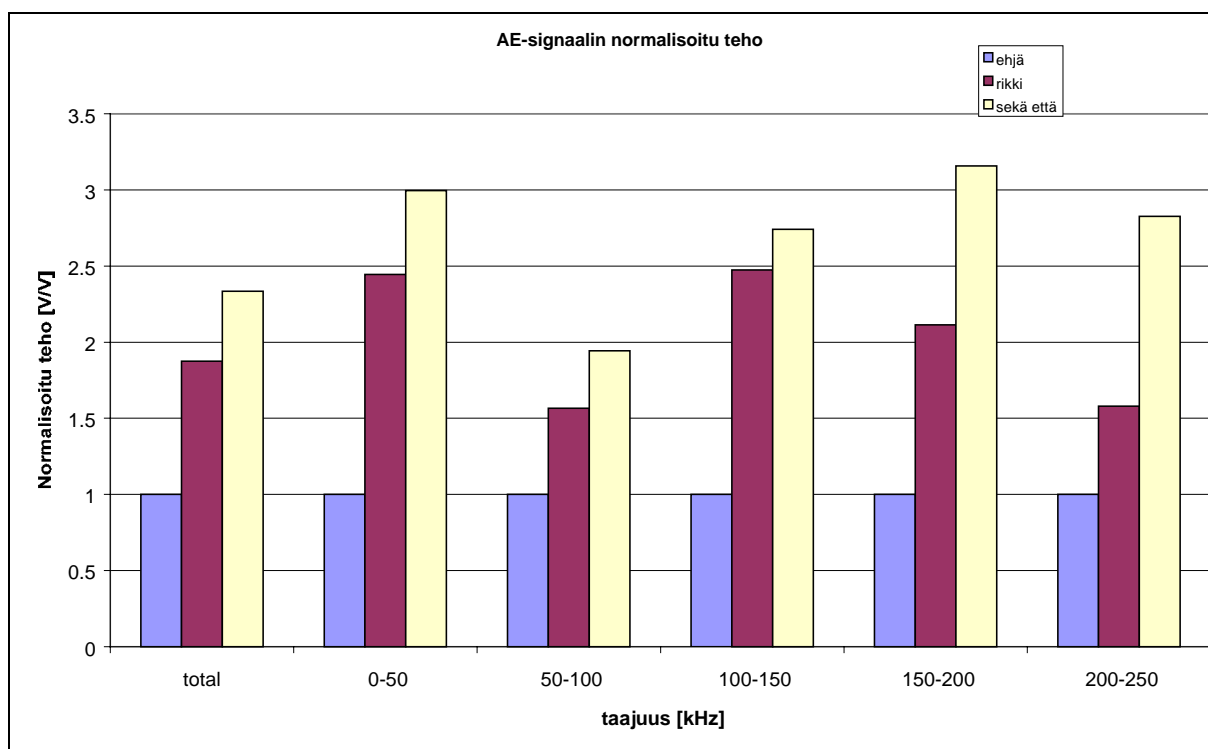
Kuvissa 8. ja 9. sekä taulukoissa 3. ja 4. esitetään AE-signaalien teho taajuusalueittain. Kuvissa 10.-12. on esitetty näytteet AE-signaaleista eri konstruktiolla. Näytesignaaleiksi on valittu kullakin konstruktiolla mitattujen kymmenen näytteen joukosta se, jolla on kyseisellä konstruktiolla suurin itseisarvon keskiarvo.



Kuva 7. AE-signaalin keskiarvostetut spektrit. Amplitudin referenssi on  $1 \text{ V/ms}^{-1}$ .



Kuva 8. AE-signaalin teho taajuusalueittain.



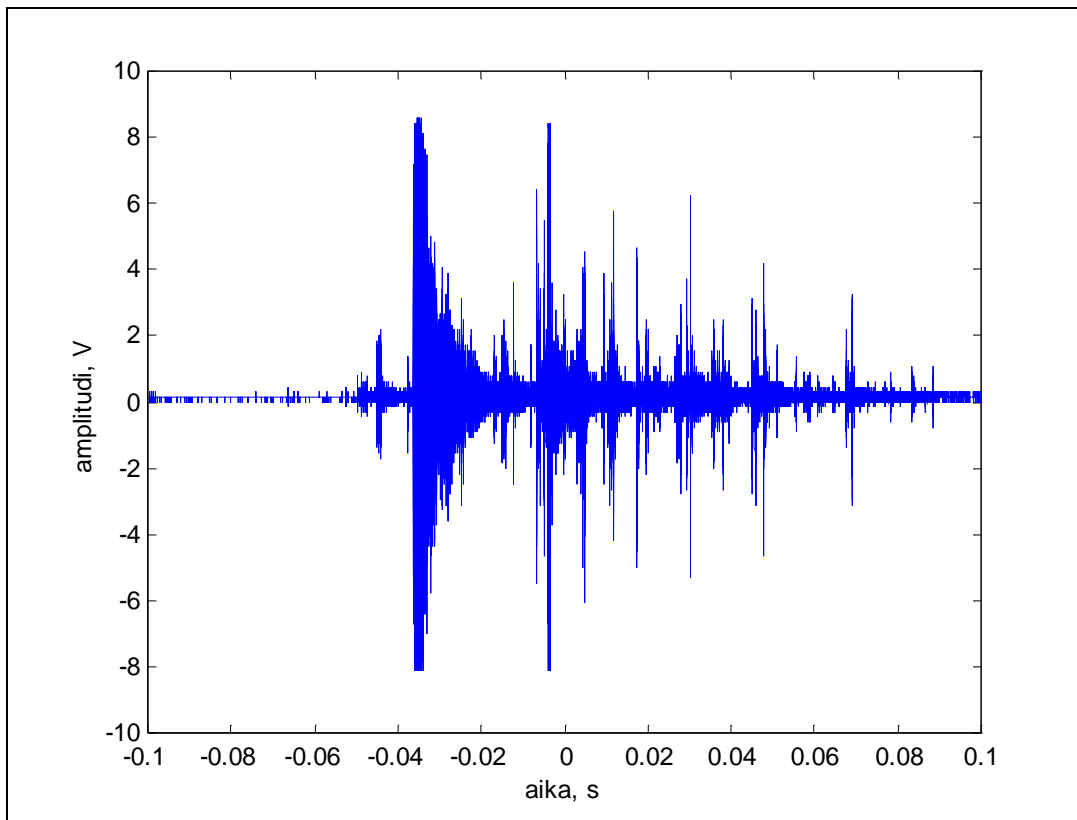
Kuva 9. AE -signaalin teho taajuusalueittain, normalisoituna.

	ehjä	rikki	Sekä että
total	58,5399	109,7464	136,6851
0-50	0,1577	0,3855	0,4725
50-100	32,679	51,1677	63,535
100-150	16,9897	42,0283	46,5677
150-200	4,4938	9,4973	14,1868
200-250	4,2197	6,6676	11,9231

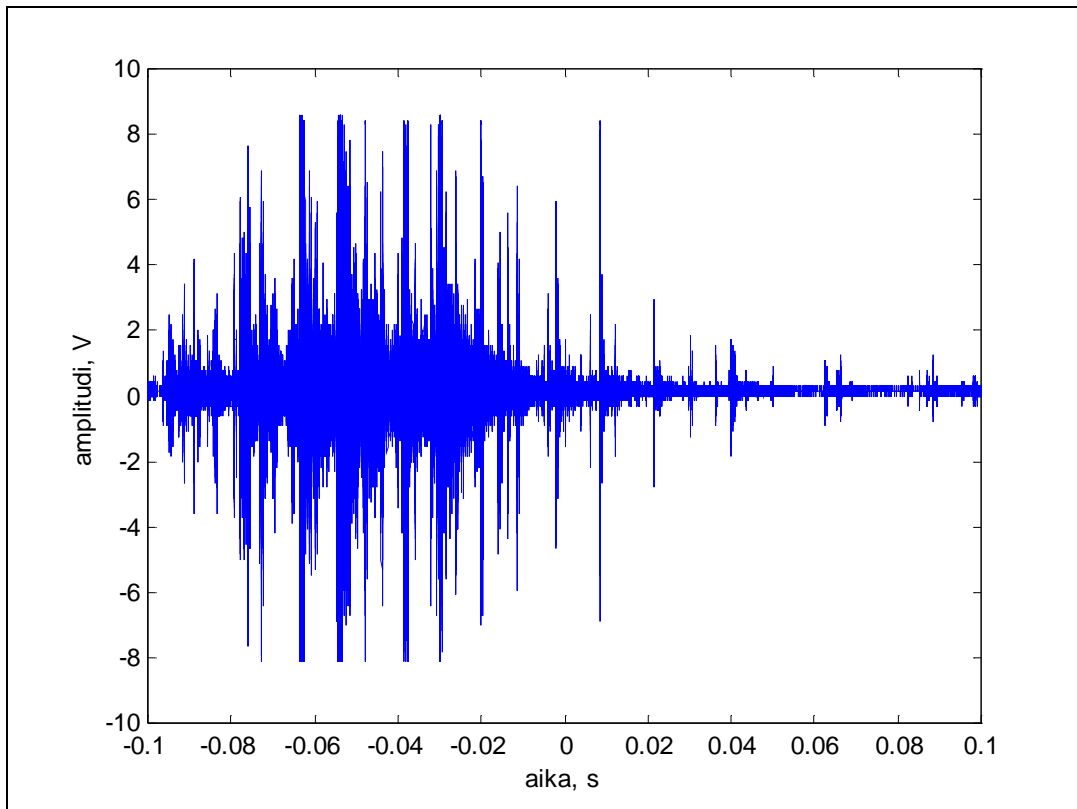
Taulukko 3. AE-signaalin teho taajuusalueittain.

	ehjä	rikki	Sekä että
total	1	1,87	2,33
0-50	1	2,44	3,00
50-100	1	1,57	1,94
100-150	1	2,47	2,74
150-200	1	2,11	3,16
200-250	1	1,58	2,83

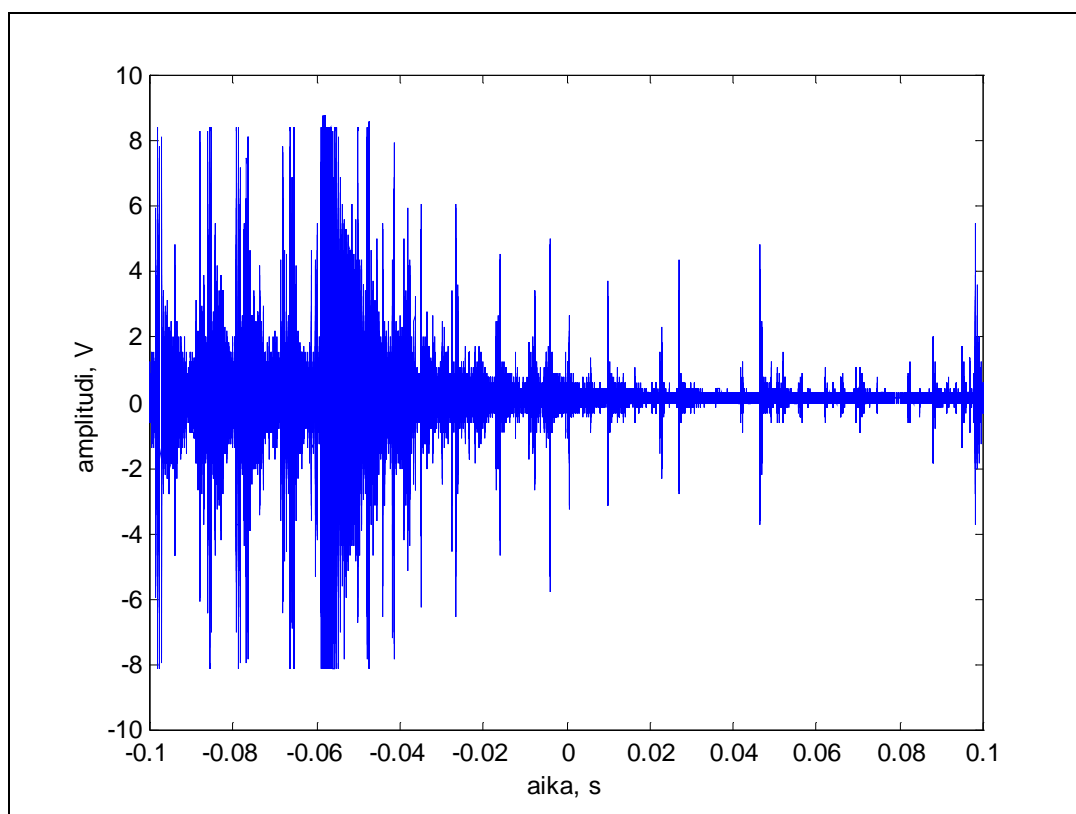
Taulukko 4. AE-signaalin teho taajuusalueittain, normalisoituna.



Kuva 10. AE-signaali, ehjä johdekelkka.



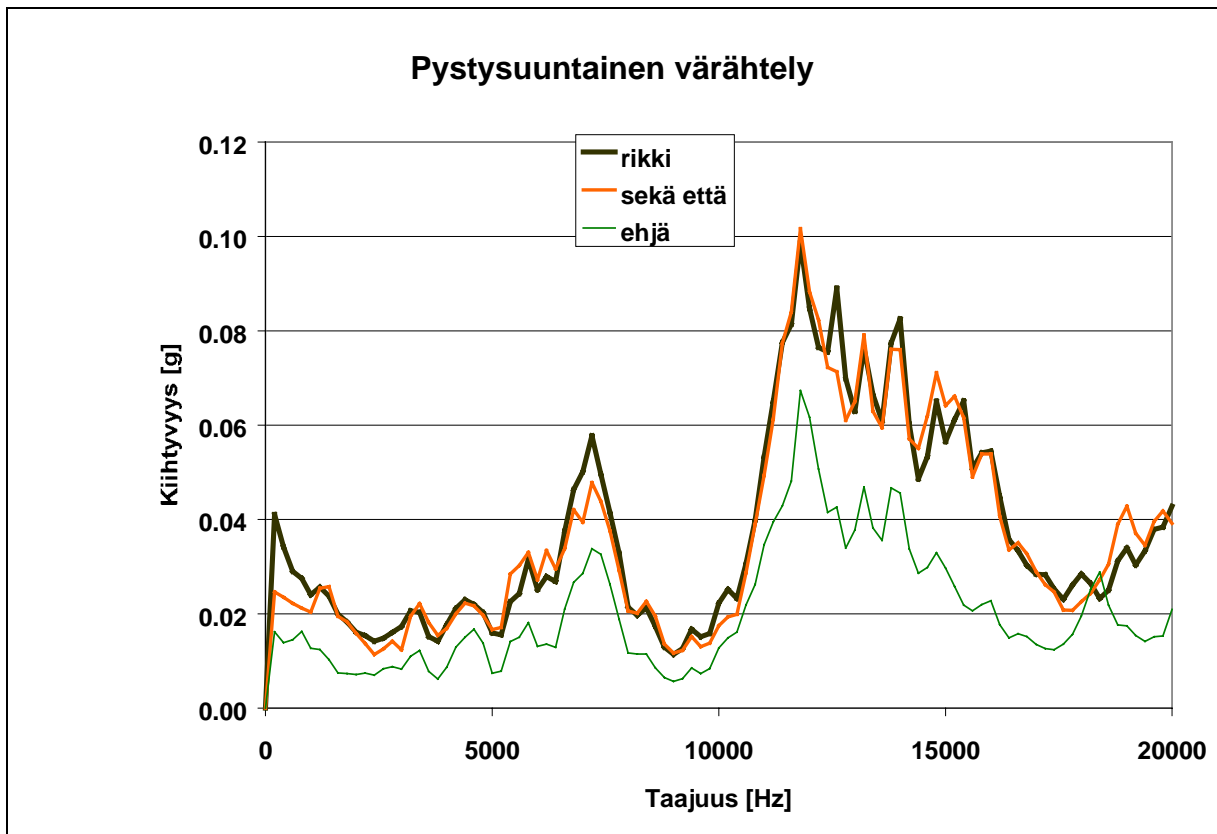
Kuva 11. AE-signaali, viallinen johdekelkka.



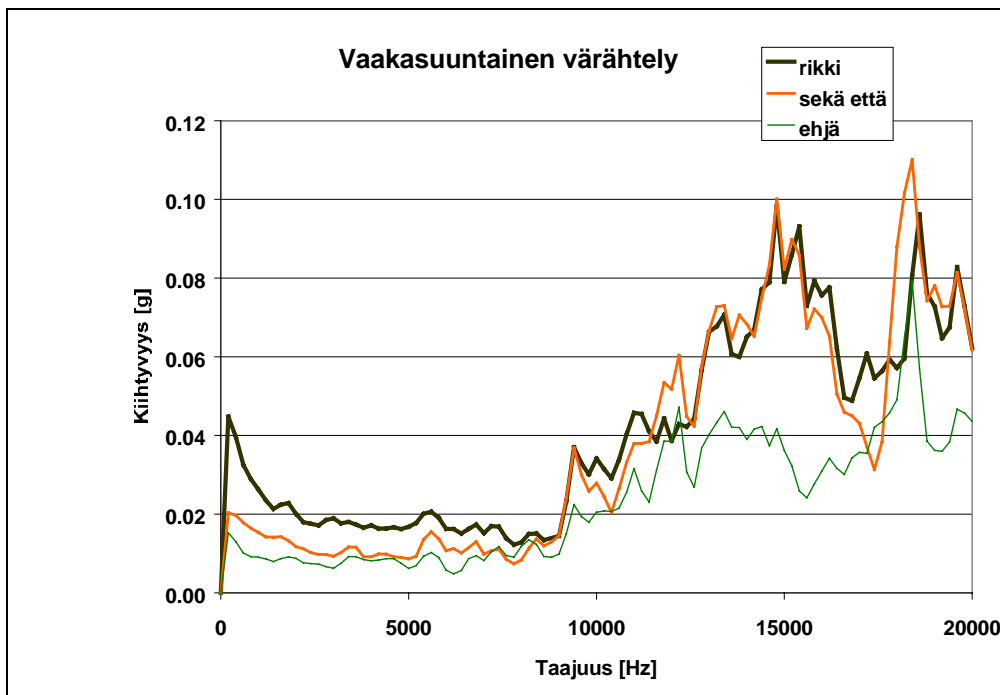
*Kuva 12. AE-signaali, 2 johdekelkkaa, joista toinen vaurioitunut ja toinen ehjä.*

### 3.2 Värähtely ja ääni

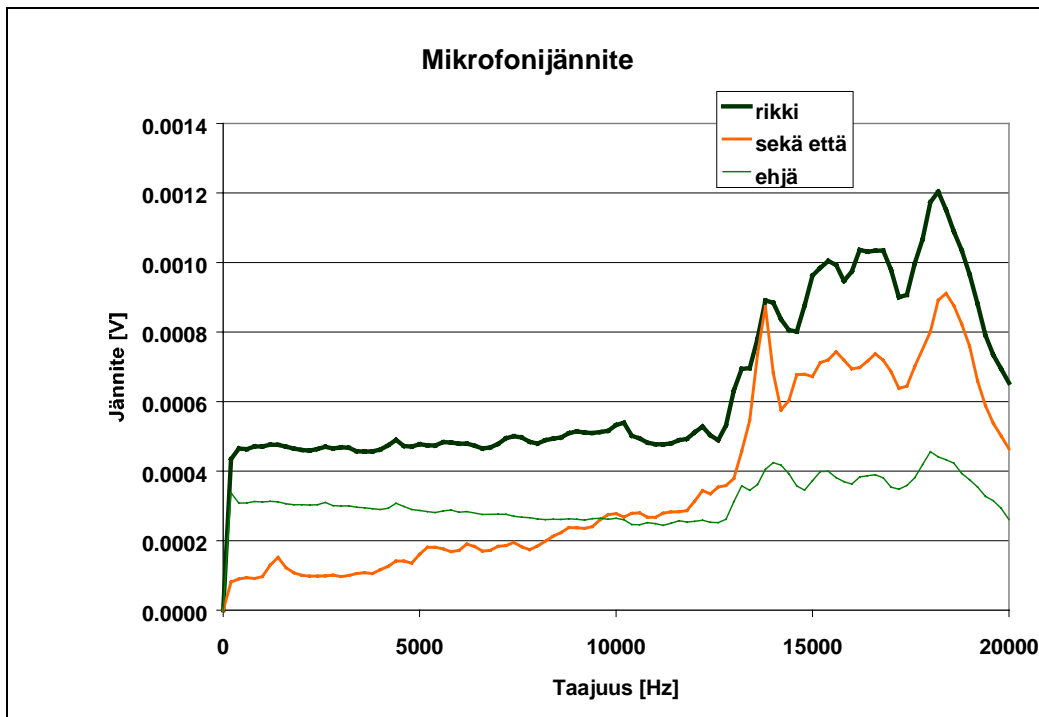
Värähtely- ja äänimittausten tulokset analysoitiin OROS- spektrianalysointilaitteella. Vaaka- ja pystykihtiyyden, sekä mikrofonin jännitteen spektreistä laskettiin tehot taajuuskaistoille 0-5 kHz, 5-10 kHz, 10-15 kHz, 15-20 kHz, sekä koko alueen 0-20 kHz spektrin teho. Kuvissa 13., 14. ja 15 esitetään pystysuuntaisen ja vaakasuuntaisen värähtelykihtiyyden, sekä mikrofonijännitteen keskiarvostetut spektrit eri lineaarijohdinkonstruktioille. Spektritehojen laskentatulokset esitetään normalisoituina kuvissa 16., 17. ja 18.



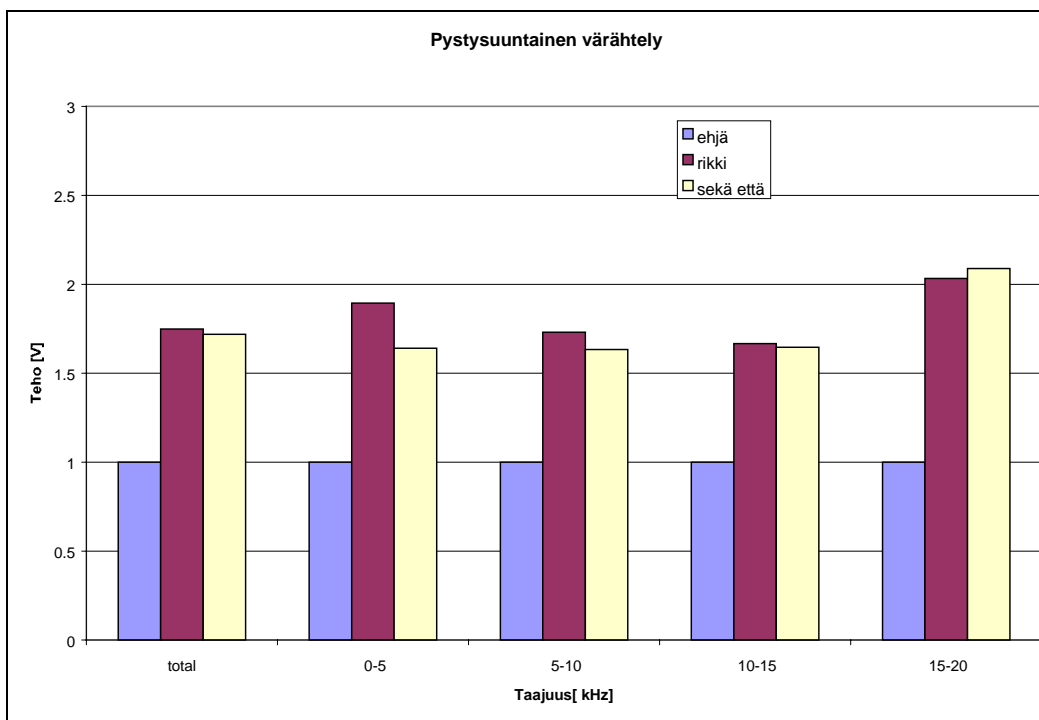
Kuva 13. Pystysuuntaisen värähtelykiihtyvyyden keskiarvostetut spektrit.



Kuva 14. Vaakasuuntaisen värähtelykiihtyvyyden keskiarvostetut spektrit.

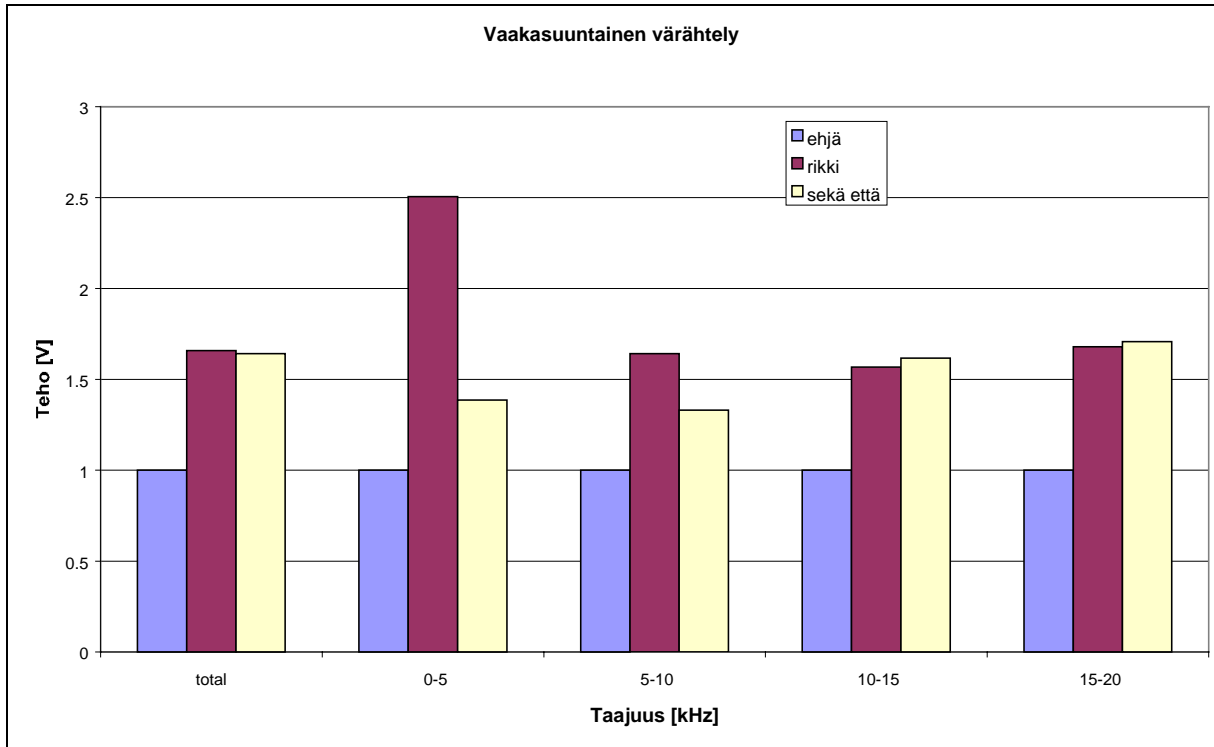


Kuva 15. Mikrofonijännitteen keskiarvostetut spektrit.

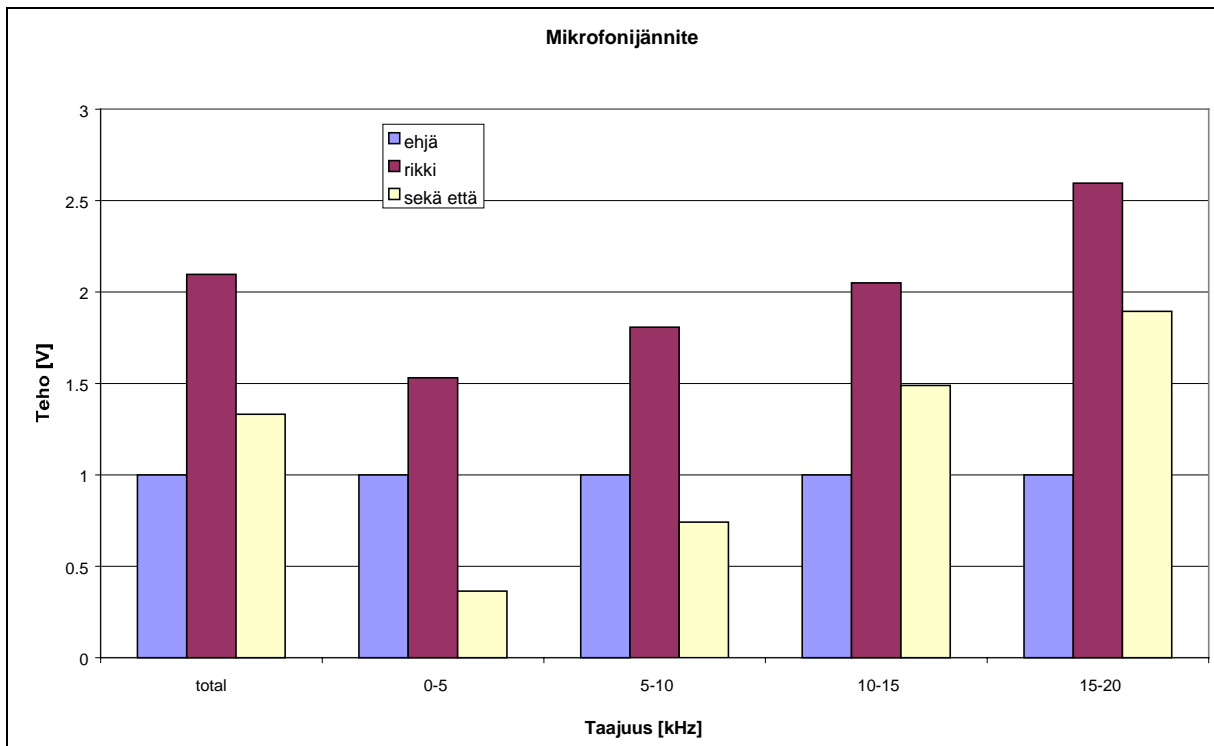


Kuva 16. Pystysuuntaisen värähtelykihtyvyyden spektritehot taajuusalueittain.





Kuva 17. Vaakasuuuntaisen värähtelykiihtyvyyden spektritehot taajuusalueittain.



Kuva 18. Mikrofonijännitteen spektritehot taajuusalueittain.

## 4 Tulosten tarkastelu

AE-signaalissa suurimmat erot ehjän ja vaurioituneen lineaarijohteen välillä näkyvät 100-150 kHz taajuusalueella, jolla vaurioituneesta johteesta mitattu teho on 2,47 -kertainen ehjään nähden. Taajuusalueella 0-50 kHz tehojen suhde on 2,44, joka sekin antaa vahvan indikaation. Spektrikuvaajasta, kuva 7., voidaan havaita eroja myös kapealla taajuusalueella n. 75 kHz - 100 kHz. Tämä ero voisi olla havaittavissa kapeamman taajuusalueen tehotarkastelussa. Signaalin amplitudijakaumassa johteen vaurioituminen kasvattaa eniten keskiampplitudeja 2-4 V, maksimiampplitudeja esiintyy vauriotapauksessa vain 1,8 -kertainen määrä ehjään johteeseen verrattuna. Merkillepantavaa on, että AE-signaalin teho on jakautunut laajalle taajuusalueelle. Vaikka mittauksissa käytettiin 200 kHz resonanssitaajuuden omaavaa AE-anturia ja oktaavisuodatinta, jonka päästökaista on oktaavin 200 kHz:n ympärillä (141 kHz - 282 kHz), esiintyivät suurimmat spektritehot 100 kHz ympäristössä. Tämä on selitettävissä anturin taajuusvasteella, jossa on havaitaan resonanssityyppinen vahvistus mainitulla alueella.

Kuvista 10., 11. ja 12. voidaan havaita, että akustisen emission signaalissa on nähtävissä noin 0,1 sekunnin pituinen purske, joka esiintyy laitteen työsyklissä, kun kelkka liikkuu. Tämä purske on nähtävissä kaikilla konstruktiolla, sekä ehjällä, että viallisella lineaarijohteella.

Pystysuuntaisessa värähtelykiihtyvyydessä vaurio erottuu parhaiten taajuusalueella 15-20 kHz, kun taas vaakasuuntaisessa värähtelykiihtyvyydessä parhaimman indikaation antaa taajuusalue 0-5 kHz. Mikrofonin signaalissa amplitudien ero on suurin alueella 15-20 kHz.

Kun mekanismissa on kaksi lineaarijohdetta, joista toinen on ehjä ja toinen vaurioitunut, on akustisen emission taso likimain ehjän ja vaurioituneen johteen erikseen mitattujen tasojen summa. Kukin johde aiheuttaa sille ominaisen määrän akustisen emission impulssitehoa.

Johdekiskosta mitattu värähtelykiihtyvyys ei korreloi johteiden määrän kanssa. Matalilla taajuuksilla 0-15 kHz värähtelyn taso pienenee, kun vaurioituneen johteen rinnalle kytketään toinen, ehjä johde. Ilmiö korostuu erityisesti vaakasuuntaisen kiihtyvyyden taajuusalueilla 0-10 kHz, joilla viallisen ja ehjän johteen yhdistelmän värähtelytaso on lähes yksittäisen ehjän johteen tasolla, katso Kuva 17. Mikrofonilla tallennetussa äänisignaalissa tulokset ovat samansuuntaiset.

## 5 Johtopäätökset

Vaurioitunut lineaarijohde voidaan erottaa ehjästä johteesta akustisen emission, värähtelykiihtyvyyden tai äänen mittauksin tarkastelemalla tuloksia sopivilla taajuuskaistoilla. Vaurioituneen ja ehjän lineaarijohteen ero näkyy signaaleissa mitatun alueen kokonaisvärähtelytasossa, mutta selvimmin sopivasti valittujen taajuuskaistojen tasoissa.

Työsyklin kohdassa, jossa johdekelkan liikenopeus on suurimmillaan, esiintyy akustisen emission signaalissa purske. Käytännön kunnonvalvontasovelluksessa akustisen emission mittaus on syytä tahdistaa purskeeseen sopivalla liipaisulla. Tuloksissa havaittiin, että käytetyillä antureilla ja vahvistimilla korkeimmat akustisen emission taajuudet olivat 250 kHz

tässä sovelluksessa. Riittävä näytteenottotaajuus olisi siten jo 500 kHz ja näytepisteiden määrä voidaan valita vapaasti, esimerkiksi 128 tai 4096 pistettä/näyte.

Värähtelykiihtyvyyden mittauksissa vaurioitunut lineaarijohde voitiin helposti erottaa ehjästä tarkastelemalla värähtelyn tasoa koko mitatulla taajuusalueella. Erot värähtelyn tasossa olivat suurimpia matalilla taajuuksilla 0-5 kHz. Käytännön sovelluksissa käytetään kuitenkin useita lineaarijohteita peräkkäin, jolloin vaurioituneen johteen erottaminen ehjien joukosta voi olla vaikeaa tai mahdotonta.

Mikrofonilla mitatun ilmaäänän avulla voitiin erottaa viallinen ja ehjä lineaarijohde. Sen sijaan kun viallinen ja ehjä johde asennetaan peräkkäin ovat tulokset vaikeasti selitettävissä. Signaalin taso laskee jopa alle yksittäisen ehjän johteen tason. Yksi mahdollinen syy tähän on se, että kahden johteen konstruktio on paremmin linjassa ja vakaampi kiskolla. Paineilmasy-linterin voima voi aiheuttaa yhden johteen konstruktiossa ylimääräisiä sivuttaisvoimia ja ylimääräistä kitkaa, jotka ilmenevät suurempana äänitasona kuin kahden johteen konstruktiossa. Värähtelykiihtyvyydessä ja akustisessa emissiossa ei tätä ilmiötä havaittu.

## 6 Yhteenvedo

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mikä kunnonvalvontamenetelmä soveltuu parhaiten lineaarijohteen vaurioitumisen tunnistamiseen. Kokeillut menetelmät olivat värähtelymittaus, äänen mittaus mikrofonilla sekä akustisen emission mittaaminen. Mittaukset tehtiin käyttäen koelaitteessa ensin yhtä ehjää johdekelkkaa, sitten yhtä vaurioitunutta kelkkaa sekä lopuksi kahta kelkkaa, joista toinen oli ehjä ja toinen vaurioitunut.

Vaurioitunut lineaarijohde voidaan erottaa ehjästä johteesta akustisen emission, värähtelykiihtyvyyden tai äänen mittauksin tarkastelemalla mitatun suureen tasoa koko taajuusalueella ja selvemmin myös tarkastelemalla tasoja sopivilla taajuuskaistoilla. Vaurioituneen lineaarijohteen erottaminen usean yhteen kytketyn lineaarijohteen seasta voi olla vaikeaa tässä tutkimuksessa käytetyillä menetelmillä.

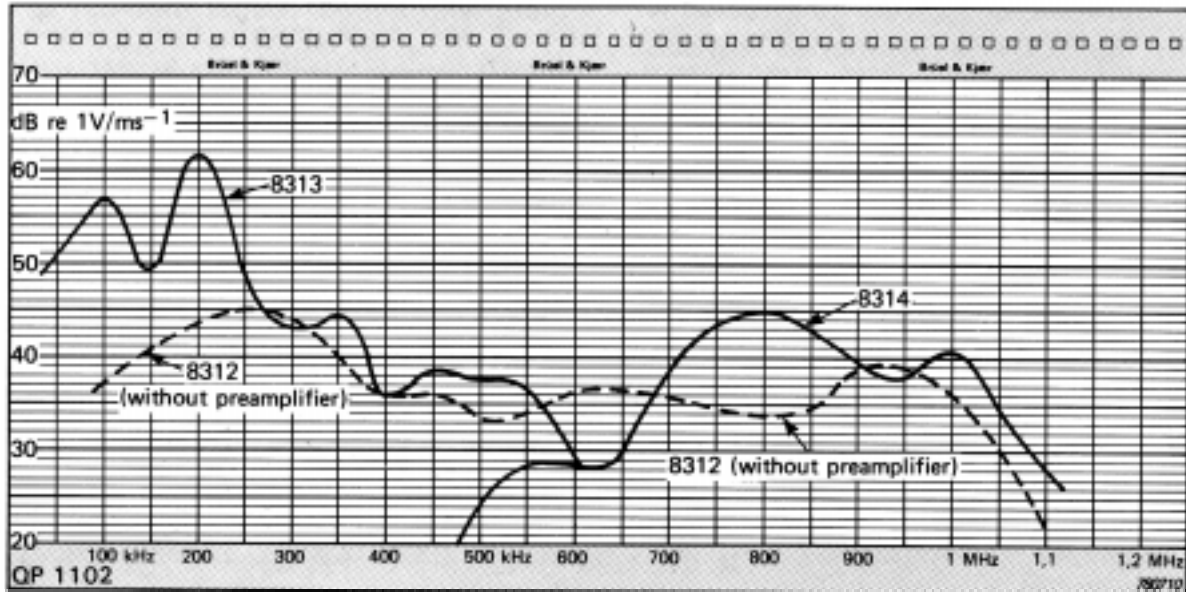


Fig.1. Typical frequency response curves for the acoustic emission transducers

Kuva L1. Akustisen emission mittauksessa käytetyn anturin (8313) taajuusvastekäyrä.

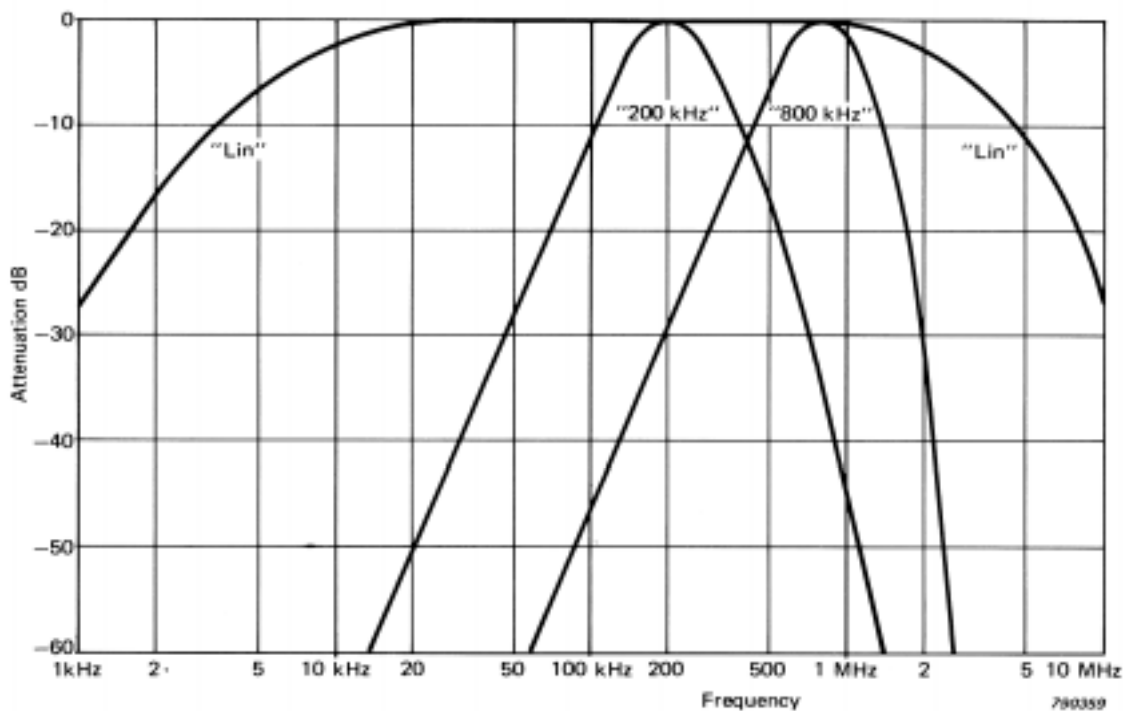


Fig.3.2. Typical frequency response of Preamplifier Type 2637 fitted with each of the three circuit boards supplied

Kuva L2. Akustisen emission mittauksessa käytetyn esivahvistimen (200 kHz) taajuusvastekäyrä.