






**Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän
vaimentamisessa (TÄRE)**

Maaperän värähtelymittaukset ja koerakenteen FEM-mallinnus

Kirjoittajat: Juha Kurkela

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Täre - Maaperän värähtelymittaukset ja koerakenteen FEM-mallinnus		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Projektin johtoryhmä, ks. alkusanat	Asiakkaan viite	
Projektin nimi Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän vaimentamisessa	Projektin numero/lyhytnimi TÄRE	
Raportin laatija(t) Juha Kurkela	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 31 s. + liitt. 27 s.	
Avainsanat traffic-induced vibration, vibration barrier, damping, FEM	Raportin numero VTT-R-04306-11	
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa suoritettiin värähtelymittaukset koekohteessa, kalibroitiin maapohjan materiaaliparametrit mittaustulosten perusteella ja simuloitiin erilaisten tärinäseinärakenteiden vaikutusta värähtelyyn. Rakenteen numeerinen simulointi ja värähtelyn leviämisen mallintaminen tehtiin kolmiulotteisesti elementtimenetelmään perustuvalla ABAQUS-ohjelmistolla.</p> <p>Tarkasteltu tärinäeste muodostuu kahdesta samansuuntaisesta, vanhoista painekyllästetyistä pylväistä tehdystä pylväseinämästä ja kumirouhetäytöstä, joka korvaa pylväiden välistä poistetun saven noin 4 m syvyyteen asti. Edellisen lisäksi tutkittiin pelkkien puupylväsrievien toimivuutta ja erilaisia täyttömateriaaleja. Pylväiden väliin jäävän kaivannon leveys on 500 mm ja esteen kokonaispituus 50 m. Savikerroksen paksuus on 7,0 m ja pylväät ulottuvat kovaan pohjaan 7,5 m syvyyteen.</p> <p>Tutkitun tärinäseinän toimivuudesta tarkasteltavissa maaperäolosuhteissa voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pelkkien puupylväiden maahan lyöminen ei pienennä maanpinnan värähtelyä. - Kumirouhe täytteenä pienentää värähtelyä sekä pysty- että poikittaissuunnassa vähintään 25 - 30 % ja vaimennus on keskimäärin noin 40 %. Kumirouheen jäykkyydellä on merkittävä vaikutus vaimennuksen suuruuteen. - Lähellä seinää, alle 10 m etäisyydellä, vaimennus on pienempi. - Vaimennus on voimakkainta 5,0 - 10 Hz taajuusalueella, jolla esiintyvät myös voimakaimmat värähtelyt. - FEM-laskenta soveltuu hyvin tärinäseinän toimivuuden arviointiin erilaisissa maaperäolosuhteissa. 		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 21.9.2011 Laatija  Juha Kurkela tutkija	Tarkastaja  Asko Talja erikoistutkija	Hyväksyjä  Eila Lehmus teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Projektin johtoryhmä, ks. alkusanat VTT/arkisto		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

Alkusanat

Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat savikkolaakso-painanteet, joita reunustavat kallioiset tai soraiset mäki-alueet. Tällaisilla, usein alle 10 metrin paksuisilla pehmeillä savikkoalueilla värähtely leviää tehokkaasti. Tärinä voi häiritä asukkaita ja rajoittaa maa-alueiden käyttöä. Oikein suunnitelluilla tärinäesteillä voidaan rajoittaa tärinän leviämistä ja pienentää tärinästä aiheutuvia haittoja.

Tutkimuksen alkuperäisenä tavoitteena oli koerakenteen tekeminen Vantaan Korsoon ja värähtelymittauksin selvittää koerakenteen vaikutus tärinän vaimenemiseen. Viereisen junaradan stabiliteettiongelmiensa vuoksi koerakennetta ei kuitenkaan uskallettu toteuttaa. Tämän takia tutkimussuunnitelmaa muutettiin siten, että tutkimuksessa simuloidaan numeerisesti vastaavanlaisen rakenteen vaikutusta tärinän leviämiseen ja vaimenemiseen koalueella. Koalueella jo tehdyt värähtelymittaukset raportoitiin ja niitä käytettiin hyödyksi numeerisen mallin kalibroinnissa.

Raportti liittyy VTT:n projektiin Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän vaimentamisessa (TÄRE) ja on jatkoa aikaisempaan raporttiin *Tärinäesteet liikennetärinän vaimentamisessa* (VTT Tutkimusraportti VTT-R-00963-09). Projektia on ohjannut rahoittajien edustajista ja asiantuntijoista koostuva johtoryhmä, johon ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

Tuomo Viitala	Liikennevirasto
Aarno Oinonen	Destia Oy
Antero Vattulainen	Kuusakoski Oy
Martti Mäkiranta	Vattenfall Verkko Oy
Martti Kallioniemi	Fortum Sähkösiirto Oy
Seppo Mäkelä	Kainuun Sähköverkko Oy
Mika Ahola	Järvi-Suomen Energia Oy
Matti Holtari	Vantaan kaupunki
Heikki Kangas	Vantaan kaupunki
Jorma Manninen	Ekokem Oy AB
Eila Lehmus	VTT
Kirsi Koivisto	Ramboll Finland Oy (asiantuntijajäsen)
Matti Hakulinen	Etelä-Karjalan AKK (asiantuntijajäsen)
Jouko Törnqvist	VTT (asiantuntijajäsen)

Johtoryhmän puheenjohtajana on toiminut ylitarkastaja Tuomo Viitala Ratahallintokeskuksesta. Tutkimuksen vastuullisena johtajana on VTT:ssä toiminut teknologiapäällikkö Eila Lehmus ja projektipäällikkönä erikoistutkija Asko Talja. Kiitän projektin rahoittajia, johtoryhmän jäseniä ja kaikkia työn suorittamiseen osallistuneita henkilöitä.

Espoo 21.9.2011

Juha Kurkela

Sisällysluettelo

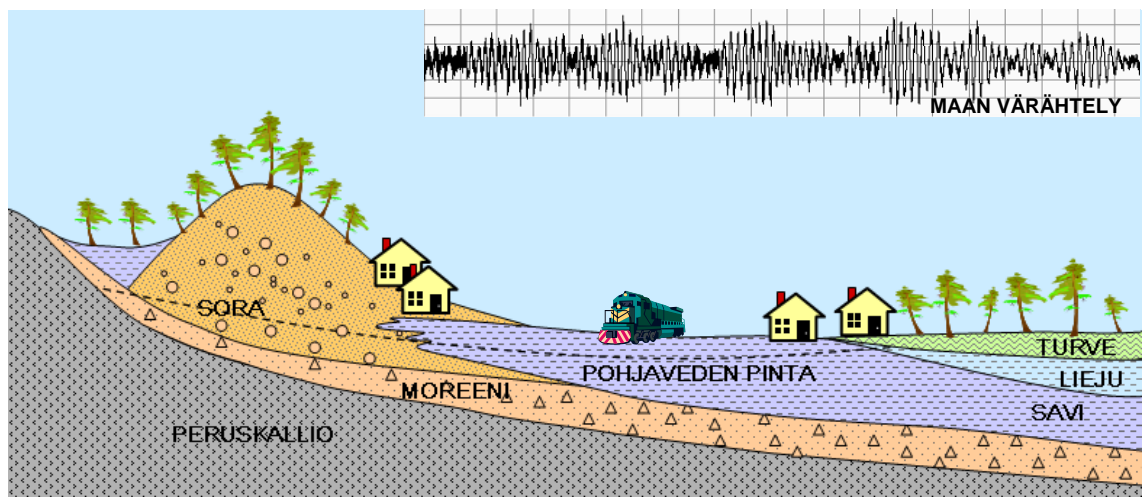
Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	4
1.1 Taustaa	4
1.2 Koerakenteen kuvaus.....	5
1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset	6
2 Maaperän värähtelymittaukset.....	7
2.1 Koekohde	7
2.2 Mittausmenetelmät ja -järjestelyt	8
2.3 Tulokset.....	10
2.4 Tulosten tarkastelu	14
3 Koekohteen FEM-mallinnus.....	16
3.1 Simulointimalli ja -menetelmät	16
3.2 Mallin kalibrointi	19
3.3 Tärinäesteen vaikutus tärinän leviämiseen.....	22
3.4 Tulosten tarkastelu	27
4 Yhteenveto ja johtopäätökset	29
4.1 Yhteenveto maaperämittauksista ja kalibroinnista.....	29
4.2 Yhteenveto tärinäesteen toimivuudesta.....	29
4.3 Johtopäätökset	30
Lähdeviitteet	31
Liite 1 - Mitatut taajuusjakaumat	
Liite 2 - Kalibroinnin herkkyystarkastelu	
Liite 3 - Tärinäesteiden vaimentava vaikutus	
Liite 4 - Tärinäesteiden vaikutus tehollisarvoon	
Liite 5 - Tärinäesteen vaikutus värähtelyn taajuusjakaumaan	
Liite 6 - Kumirouheen ominaisuuksien vaikutus	
Liite 7 - Tärinäeste ilman pylväsrivejä	

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Liikennetärinä on juna- tai tieliikenteen aiheuttamaa maan kautta välittyvää värähtelyä, jonka ihminen kokee joka suoraan kehossaan rakennuksen värähtelynä tai välillisesti astioiden ja esineiden helinänä. Liikennetärinän aiheuttama rakenteiden värähtely on voimakkuudeltaan usein niin vähäistä, että siitä ei aiheudu rakenneaurioita. Se voi kuitenkin häiritä nukkumista, haitata asumismukavuutta tai aiheuttaa epäilyksiä rakenneaurioista tai kiinteistön arvon alenemisesta.

Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat savikkolaakso-painanteet, joita reunustavat kallioiset tai soraiset mäki-alueet (kuva 1). Tällaisilla, usein alle 10 metrin paksuisilla pehmeillä savikkoalueilla värähtely leviää tehokkaasti. Tärinä voi häiritä asukkaita ja rajoittaa maa-alueiden käyttöä. Oikein suunnitelluilla tärinäesteillä voidaan rajoittaa tärinän leviämistä ja pienentää tärinästä aiheutuvia haittoja.



Kuva 1. Tyypillinen savikkoalue, joka on erityisen herkkä liikennetärinälle (Talja et al. 2009).

Asuinrakentamisen keskittäminen väylien läheisyyteen on lisännyt liikennetärinästä aiheutuvia ongelmia ja tärinäesteiden rakentamisen tarvetta. Joukkoliikenteen suosiminen ja tonttipula väylien läheisyydessä houkuttelevat rakentamaan asuntoja myös tärinän suhteen vaikeasti rakennettaville pehmeille savikkoalueille. Suomen rakentamismääräys RaMK B3/2004 edellyttää, että liikennetärinä on otettava huomioon ja se ei saa aiheuttaa vaurioita rakennukselle eikä kohtuutonta häiriötä asukkaille.

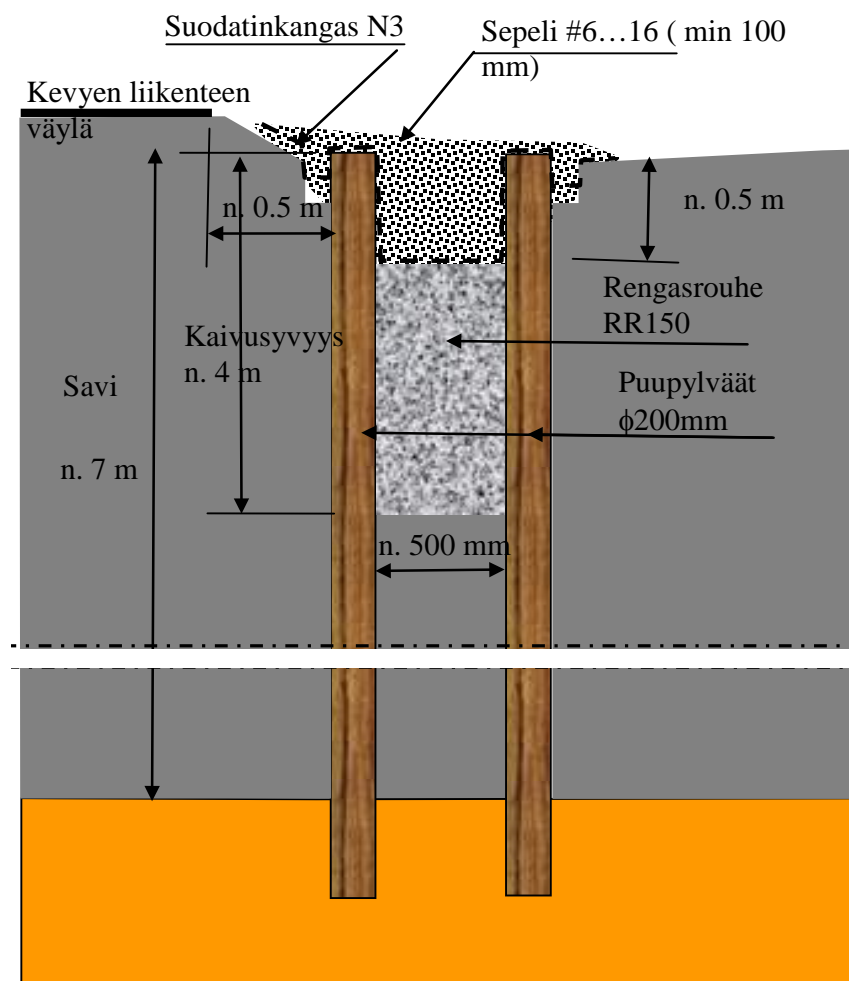
Tärinälle altistuvan alueen laajuus riippuu voimakkaasti alueesta. Pehmeillä alueilla junien tärinähaitat ulottuvat jopa satojen metrien päähän ja maanteilläkin haitat voivat ulottua kymmenien metrien etäisyydelle. Pelkästään rautateillä riskialuetta on Suomessa useita satoja ratakilometrejä. Yleisen käsityksen mukaan tärinäesteitä käyttämällä voidaan tärinän suuruus pienentää noin puoleen. Vaikutus on suuri, sillä tärinän puolittuminen puolittaa myös turvallisen rakentamisen

etäisyyden noin puoleen. Tärinäesteille on tarvetta sekä suunnitteilla olevilla uusilla että jo rakennetuilla vanhoilla alueilla.

1.2 Koerakenteen kuvaus

Seuraavassa esitetään periaatteellinen kuvaus suunnitellusta tärinän siirtymistä estävästä koerakenteesta, joka jäi kuitenkin rakentamatta. Koe-esteen tukirakenne muodostuu kahdesta samansuuntaisesta, vanhoista painekyllästetyistä pylväistä tehdystä pylväseinämästä ja kumirouhetäytöstä, joka korvaa pylväiden välistä poistetun saven noin 4 m syvyyteen asti (kuva 2). Pylväiden väliin jäävän kaivannon leveys on noin 500 mm ja esteen pituus on 50 m.

Koerakenne oli ajateltu rakennettavan kevyen liikenteen väylän ja maantien väliin jäävälle viherkaistaleelle. Savikerroksen paksuus on tärinäesteen kohdalla ja sen lähialueella noin 7 m, jonka alapuolella maan on arvioitu olevan silttiä tai löyhää hiekkaa. Lähialueelta mitattu saven siipikairausleikkauslujuus on alimmillaan noin 7 kN/m^2 , mutta keskiarvo on noin 10 kN/m^2 .



Kuva 2. Periaatekuva tärinäesteen rakenteesta (Talja et al. 2009). Alapään tunkeutumisen siltti- tai hiekkakerrokseen ei ole välttämätöntä.

Seinämään käytetään vanhoja, painekyllästettyjä puhelin- tai sähköpylväitä. Tutkimusten mukaan pylväiden keskihalkaisija on keskimäärin noin 200 mm. Taivutuslujuuden ominaisarvo on 22 MPa kuivana ja 24 MPa standardikosteudessa 12

%. Tässä tapauksessa pylvää on ajateltu lajiteltavaksi niin, että pylvään keskihalkaisija on 180 - 220 mm.

Kumirouheen kimmokerroin riippuu voimakkaasti sivupaineesta ja on paineella 50 kPa suuruusluokkaa 500 kPa. Kokoonpuristuvuusmoduuli (sekanttimoduuli) riippuu rouheen koosta. Rengasrouheella RR150 (maksimikoko 150 mm) kokoonpuristuvuusmoduuli on suuruusluokkaa 200 kPa, kun aksiaalipaineen muutos on 0 - 50 kPa. Tarkempi kuvaus tärinäesteestä ja lähdeviitteet löytyvät lähteestä Talja et al. (2009).

1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen alkuperäisenä tavoitteena oli koerakenteen tekeminen Vantaan Korsoon ja värähtelymittauksin selvittää koerakenteen vaikutus tärinän vaimenemiseen. Juuri ennen koe-esteen rakentamista havaittiin, että rakennettava este saattaa huonontaa noin 17 metrin etäisyydellä olevan radan stabiliteettia, eikä rakentamiseen liittyvää riskiä siksi uskallettu ottaa.

Tehdyt stabiliteetilaskelmat osoittivat todeksi aikaisemman käsityksen, että vanhojen ratojen stabiliteettia on laskennallisesti vaikea osoittaa nykyiselläänkään riittäväksi. Pelkona on, että pienikin heikennys maaperässä voi "katkaista kame-linselän" ja johtaa jonkinlaiseen radan perustuksen pettämiseen. Suunnitellussa koe-esteessä edes tolppien yläpäiden tukeminen toisiinsa ei ole riittävä parannustoimenpide, koska lupaa kyllästettyjen tolppien käyttöön ei naapuritilan omistajalta saatu.

Tämän takia tutkimussuunnitelmaa muutettiin siten, että tutkimuksessa simuloidaan numeerisesti vastaavanlaisen rakenteen vaikutusta tärinän leviämiseen ja vaimenemiseen koalueella. Ennen rakentamisen peruuntumista koalueella oli jo ehditty tehdä ensimmäiset värähtelymittaukset. Tehdyt värähtelymittaukset raportoitiin ja niitä käytetään hyödyksi numeerisen mallin kalibroinnissa maaperäparametrien ja kuormituksen osalta.

Koerakenteen numeerinen simulointi ja värähtelyiden leviämisen mallintaminen tehdään elementtimenetelmään (FEM) perustuvalla ABAQUS-ohjelmistolla. Mallinnus tehdään kolmiulotteisena. Mallinnuksen tuloksena saadaan tärinäesteen vaikutus värähtelyiden vaimenemiseen ja taajuuskomponentteihin.

2 Maaperän värähtelymittaukset

2.1 Koekohde

Suunniteltu koealue sijaitsee Vantaan Korsossa pohjoiseen kulkevan pääradan vieressä. Alueella tehtyjen maaperätutkimusten perusteella suunnitellun tärinäseinän ja mittausselinjan kohdalla on savea noin 7 m ja tämän alla silttiä 1 m. Kohteen ympäristössä saven paksuus vaihtelee 6 - 9 m välillä. Kuvassa 3 on esitetty suunnitellun tärinäseinän paikka ja savikerroksen paksuus lähialueella. Suunniteltu tärinäseinä olisi sijainnut kuvan mukaisesti maantien ja pyörätien välissä. Kuvassa 4 on koealue kesällä 2010.



Kuva 3. Suunnitellun tärinäseinän sijainti Vantaan Korsossa. Luvut kuvaavat maapohjan arvioitua savikerroksen paksuutta. Vasen kuva Talja et al. (2009).



Kuva 4. Koealue kesällä 2010.

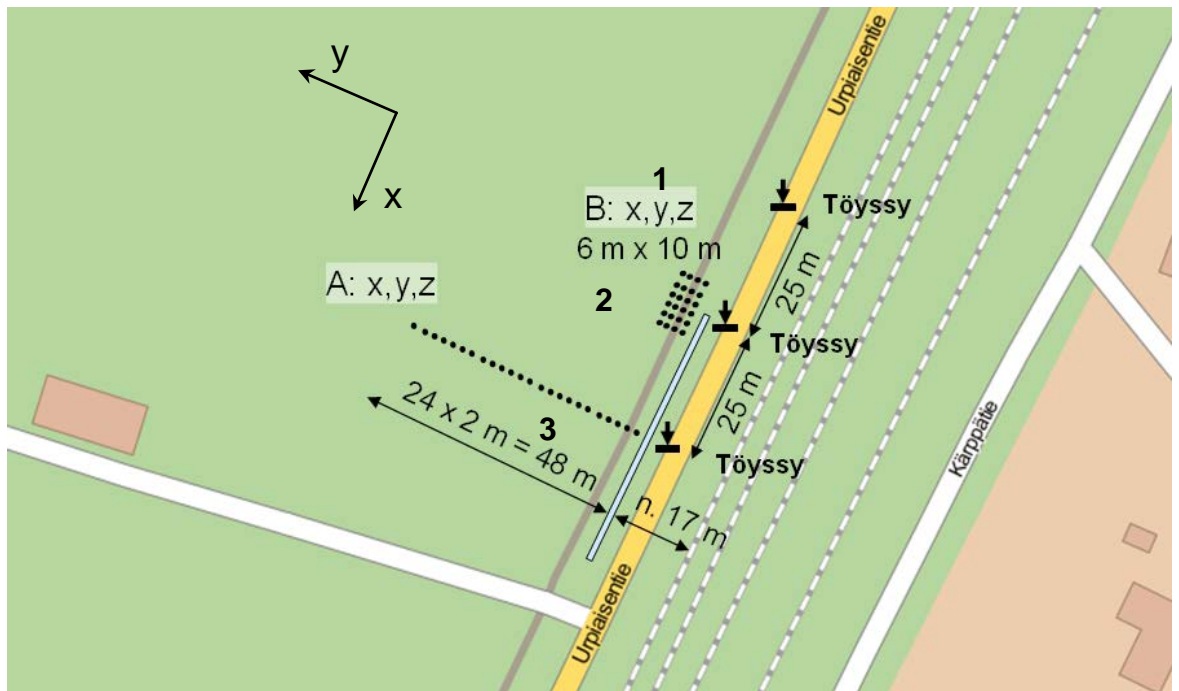
2.2 Mittausmenetelmät ja -järjestelyt

Kuvassa 5 on esitetty suunnitelma mittauspisteistä ja herätetyssyjen paikoista. Mittaukset käsittävät kaksi eri tapausta: Tapauksessa A mittausanturit asetetaan suoraan linjaan ja tapauksessa B anturit asetetaan esteen pään taakse ryhmäksi. Tapauksella A tavoitteena oli selvittää tärinäesteen toimivuutta ja tapauksella B värähtelyn kiertoilmiötä, jossa esteen edestä tuleva värähtely taittuu esteen pään kautta sen taakse.

Mittauspisteiden väli on 2 m, jolloin tulosten avulla voidaan visualisoida maaperässä etenevän värähtelyn muotoa. Kun maaperä on pehmeää savea (leikkausaallon etenemisnopeus $v = 40 - 80$ m/s) ja koska värähtelyssä hallitsee taajuus $f = 5$ Hz (Vantaan kaupungin mittaukset), dominoiva aallonpituus on $v/f = 8 - 16$ m. Värähtely mitataan kolmiaksisiaalisesti ja kutakin suuntaa tarkastellaan erikseen. Koska mittauksissa on käytössä vain 24 samanaikaisesti mittaavaa kanavaa, kukin värähtelysuunta mitataan erikseen. Kuvissa 6 ja 7 on esitetty mittausantureiden sijoitus molemmissa mittaustapauksissa.

Tärinäesteen toimintaa arvioidaan tässä mittauksessa keinotekoisien herätteen avulla. Keinotekoisella herätteellä saavutetaan etuja myös kokeiden suorittamiseen ja samanlaiseen toistettavuuteen liittyen.

Heräte aiheutetaan herätepisteisiin ajamalla kuorma-autolla tien reunaan sijoitettujen töyssyjen yli (kuva 8). Töyssyjä on ajosuunnassa kolme kappaletta kuvan 5 mukaisesti. Viimeinen töyssy 3 oli mittauslinjan A kohdalla. Töyssyn korkeus on 50 mm, pituus 100 mm ja kulmat viistetty. Kuorma-auton nopeus oli noin 30 km/h. Yksi mittaus käsittää yhden samaan suuntaan tehdyn ohiajon ja kukin mittaus toistetaan vähintään kolme kertaa. Kuorma-auto ajoi mittauksissa tyhjänä ja takimmainen teliakseli ylösnostettuna (kuva 8). Auton omapaino oli 10850 kg ja ensimmäisen ja toisen akselin väli 4100 mm.



Kuva 5. Yleiskuva mittausuunnitelma. Pisteet kuvaavat mittausantureiden sijaintia ja töyssyt tärinän aiheuttamispisteitä.



Kuva 6. Mittauslinja A kohtisuoraan tiehen nähden. Anturit on sijoitettu 2 m välein.



Kuva 7. Mittausalue B tärinäesteen päässä. Anturit on sijoitettu 2 m x 2 m ruudukkoon.



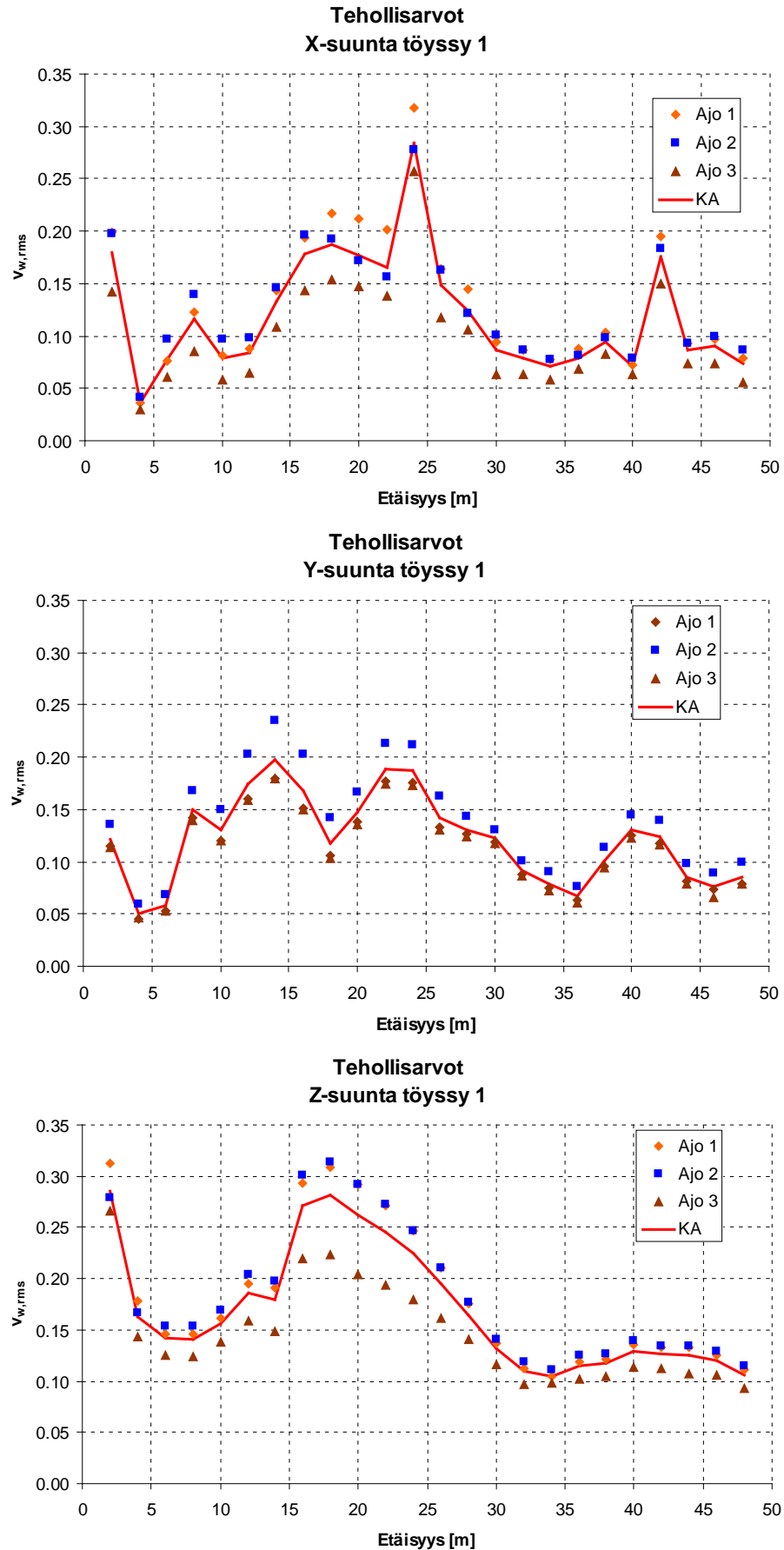
Kuva 8. Tärinälähteenä käytetty kuorma-auto ylittämässä töyssyä.

Mittausantureina oli 24 kappaletta PCB Piezotronics 393A03 ICP-anturia. Mittauslaitteena oli kannettavaan tietokoneeseen liitetty USB-liitäntäinen National Instruments NI cDAQ-9172-räkki, ja johon oli kytketty 6 kappaletta 24-bittistä National Instruments NI 9234 nelikanavaista ICP-vahvistinmoduulia. Anturit liitettiin mittauslaitteeseen 30 - 100 m koaksiaalikaapeleilla. Mittauslaite oli sijoitettu mittauksen ajaksi pakettiauton tavaratilaan.

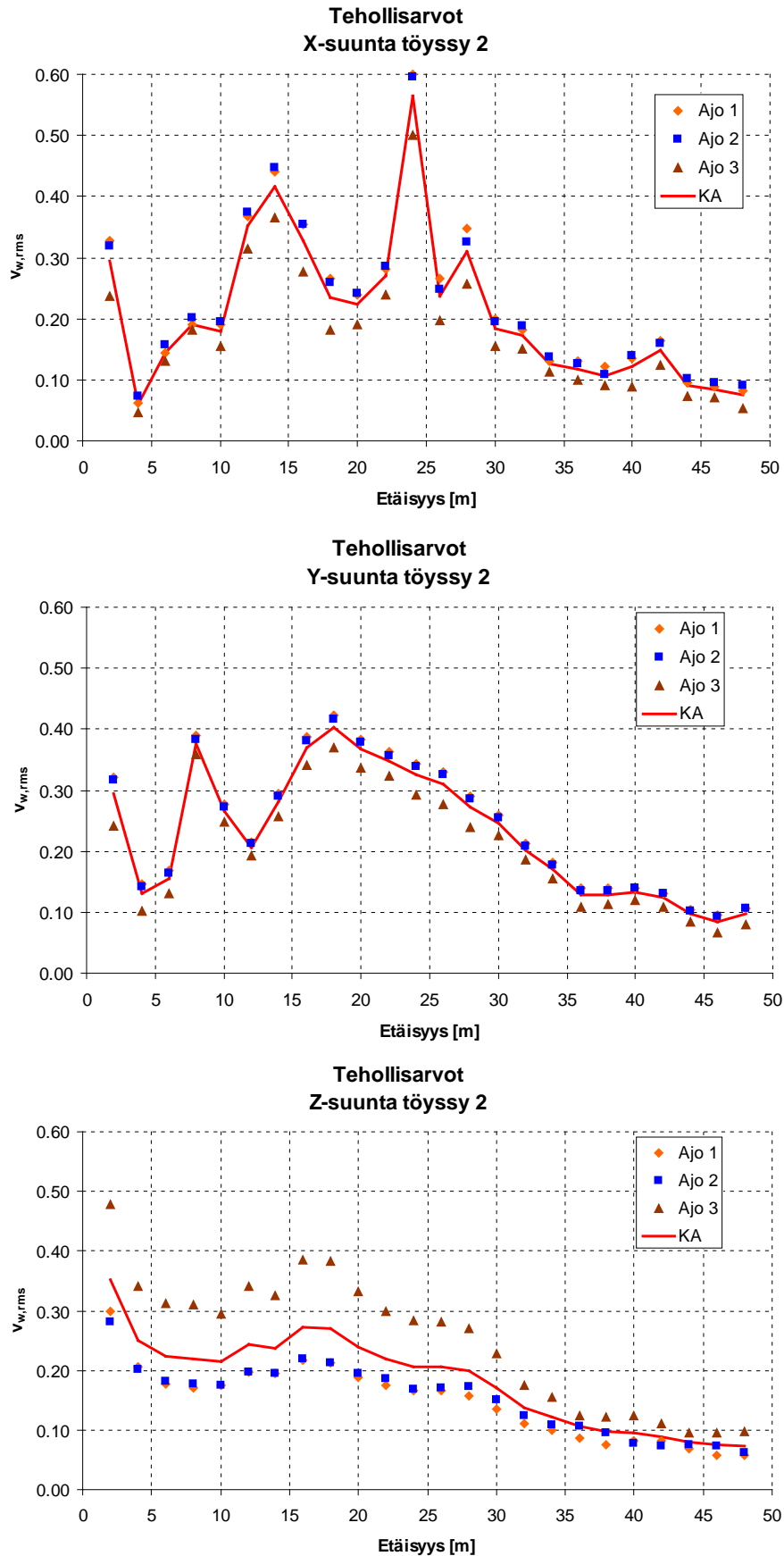
2.3 Tulokset

Tuloksissa esitetään värähtelyn suuruus etäisyyden funktiona ja taajuuskomponentit terssikaistoittain. Tulokset ilmoitetaan värähtelynopeuden painotettuna tehollisarvona $v_{w,rms}$ (mm/s). Mittauskanavat (anturit) on numeroitu välillä 1 - 24 siten, että kanava 1 on lähimpänä tärinäseinän oletettua paikkaa 2 m etäisyydellä. Kanava 24 on kauimmaisena seinästä 48 m etäisyydellä.

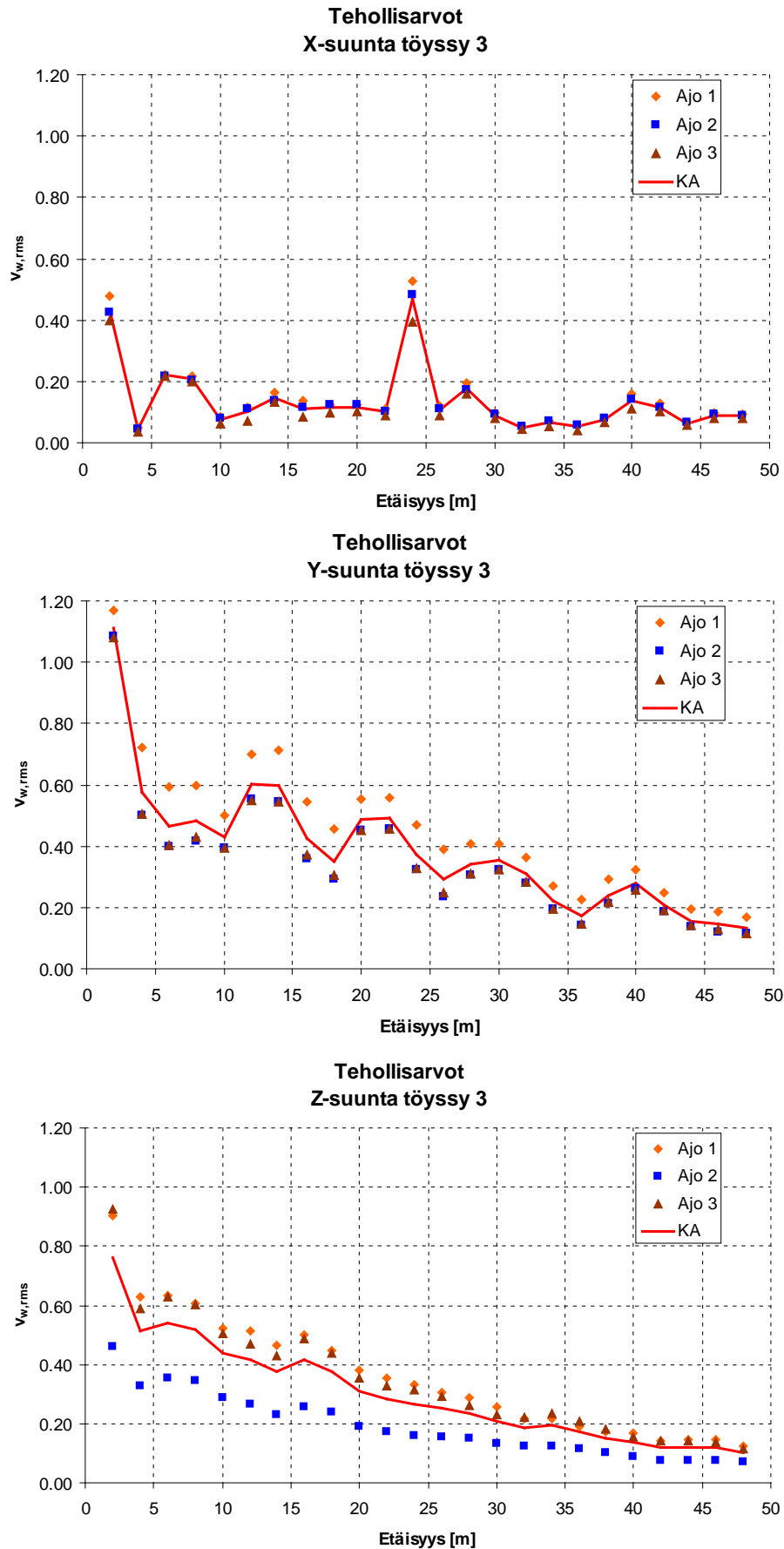
Suurin värähtely syntyi kuorma-auton takimmaisen akselin ylittäessä töyssyn. Kuvissa 9 - 11 on esitetty eri töyssyjen aiheuttamat x-, y- ja z-suuntaiset värähtelyt mittauslinjalla A. Z-suunta on pystysuunta ja x-suunta on tien suunta. Kuvassa 12 on vastaavasti töyssyn 3 (mittauslinjan kohdalla) aiheuttamat taajuusjakaumat mittauslinjan A ensimmäisessä ja viimeisessä anturissa. Suurimmat värähtelyt esiintyivät 6 - 16 Hz taajuusvälillä ja 10 Hz taajuus oli tyypillisesti määräävin. Liitteessä 1 on esitetty laajemmin kyseisen tapauksen taajuusjakaumia. Mittausalueen B tulokset olivat samantasoisia linjan A tulosten kanssa, mutta niitä ei käsitellä tässä yhteydessä laajemmin, koska niillä olisi ollut merkitystä vasta tärinäesteen rakentamisen ja jatkomittauksen jälkeen. Mittaustuloksista määritettiin myös pinta-aallon (Rayleigh-aalto) etenemisnopeus, joka oli noin 61 - 63 m/s.



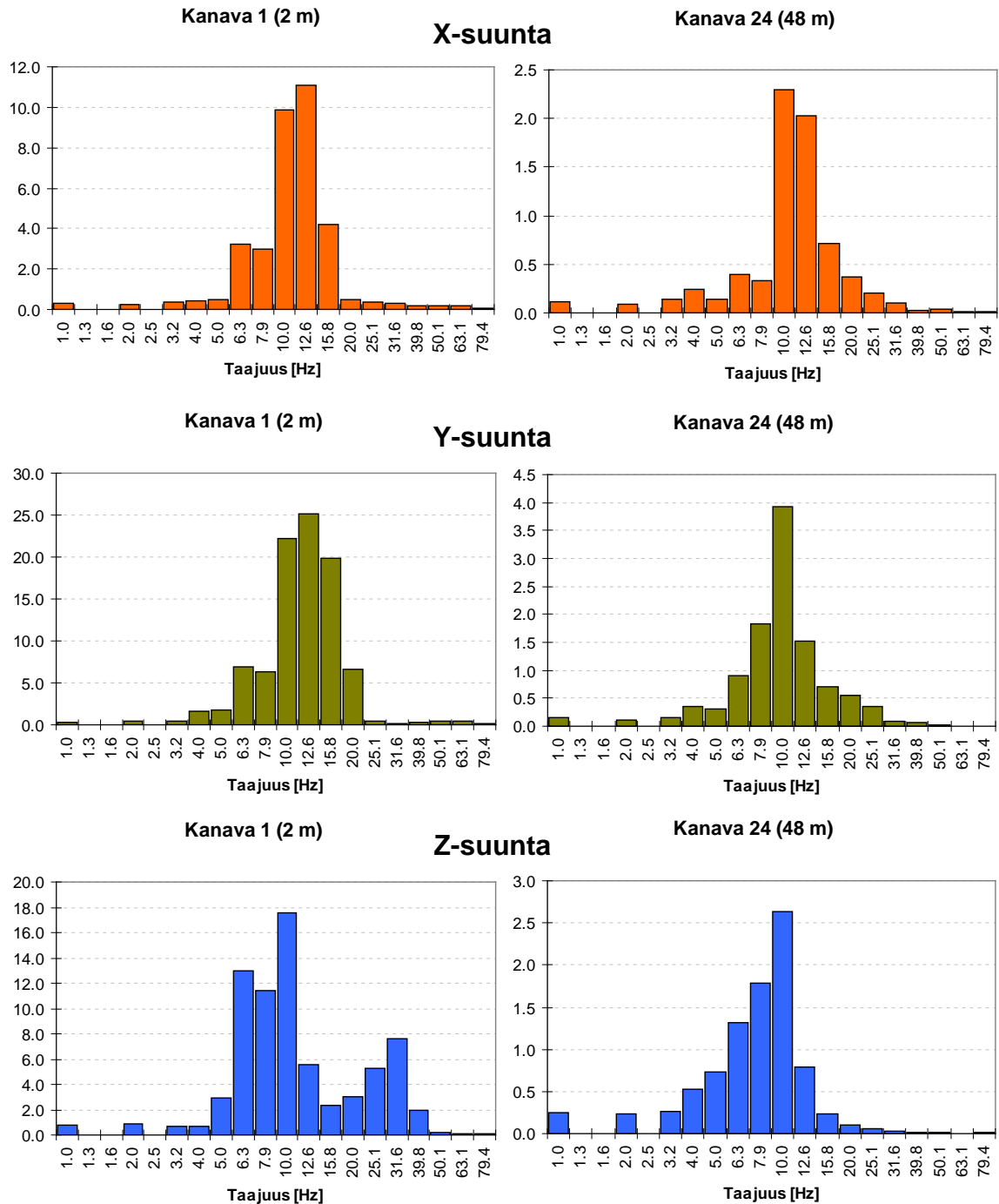
Kuva 9. Ensimmäisen töyssyn aiheuttama x-, y- ja z-suuntainen värähtely mittauslinjalla A. Värähtely on esitetty painotettuna nopeuden tehollisarvona $v_{w,rms}$ (mm/s).



Kuva 10. Toisen töyssyn aiheuttama x-, y- ja z-suuntainen värähtely mittausslinjalla A. Värähtely on esitetty painotettuna nopeuden tehollisarvona $v_{w,rms}$ (mm/s).



Kuva 11. Kolmannen töyssyn aiheuttama x-, y- ja z-suuntainen värähtely mittauslinjalla A. Värähtely on esitetty painotettuna nopeuden tehollisarvona $v_{w,rms}$ (mm/s).



Kuva 12. Värähtelyn taajuusjakauma mittauslinjan A ensimmäisessä ja viimeisessä anturissa. Värähtely on aiheutunut töyssystä 3. Värähtely on esitetty painotettuna kiihtyvyyden tehollisarvona (mm/s^2). Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo (mm/s) saadaan jakamalla arvot tekijällä 35,7. Taajuusjakaumat on esitetty laajemmin liitteessä 1.

2.4 Tulosten tarkastelu

Taajuuspainotettu tehollisarvo pieneni pääosin lineaarisesti etäisyyden mukaan y- ja z-suunnissa. X-suunnassa pieneneminen ei ollut selkeää ja lisäksi tuloksissa esiintyi merkittävää vaihtelua. Selitystä x-suunnan poikkeavaan käyttäytymiseen

on vaikea arvioida. Tulosten pieni vaihtelu eri ajojen välillä johtui todennäköisesti nopeuseroista.

Kolmessa ensimmäisessä mittauspisteessä (2 - 6 m) ja osin kauempanakin pyörätien pengerrakenteet vaikuttivat mittaustuloksiin erityisesti x- ja y-suunnassa, osin myös z-suunnassa. Pyörätie vaimensi erityisesti töyssyistä 1 ja 2 tulevaa värähtelyä sen kulkiessa pitkän matkan osin pyörätietä pitkin.

Suurin x-suuntainen värähtely syntyi töyssyn 2 ylityksestä. Tämä aiheutui siitä, että auton pyörän kulkiessa töyssyn ylitse, se synnytti tien suuntaisen tönäisyvoiman, joka vaikutti edelleen enemmän vasta mittauslinjalla.

Y-suunnassa (töyssy 3) tehollisarvon kuvaajassa esiintyi aaltoilua 9 - 10 m välein. Tämä aiheutui todennäköisesti värähtelyn heijastumisesta kovasta pohjasta savi-kerrosten alta. Vastaavaa käyttäytymistä on havaittavissa lievästi myös muissa suunnissa. Tulosten perusteella jo muutaman metrin etäisysero mittausanturin paikassa voi vaikuttaa mitattuun arvoon 20 - 30 %, pahimmillaan lähes 50 %.

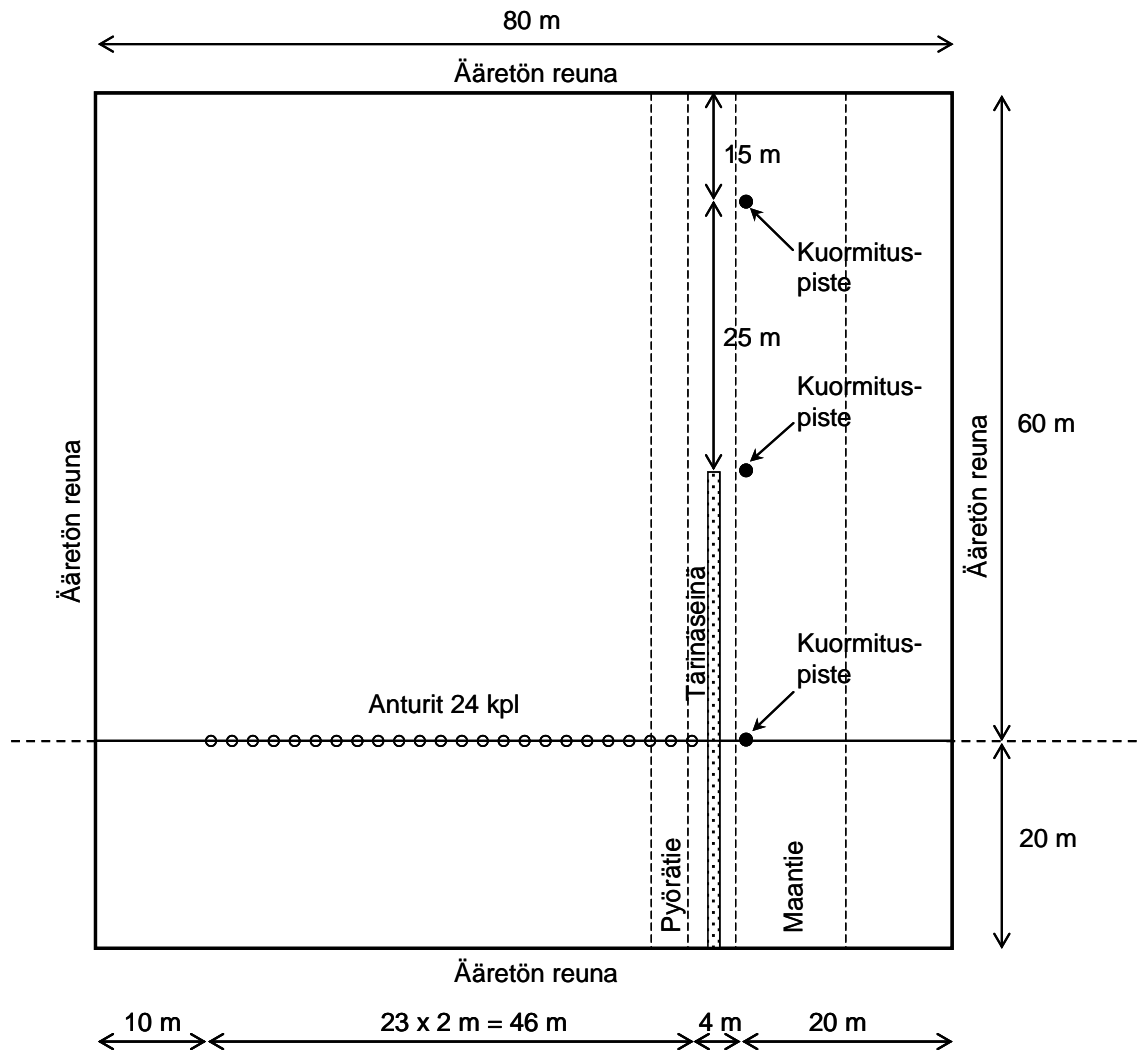
Voimakkain taajuusalue oli yleensä 6,3 - 12,6 Hz välillä kaikissa suunnissa ja määräävin taajuus esiintyi yleensä 10 Hz taajuudella. Kuitenkin vaakasuunnissa esiintyi myös joissain pisteissä merkittävästi korkeampia taajuuksia. Nämä tulokset eroavat aikaisemmin tehdyistä mittauksista, joissa määrääväksi taajuudeksi on ilmoitettu 5 Hz. Siirryttäessä kauemmaksi esteestä yli 20 Hz taajuudet pienenevät pystysuunnassa matalampia taajuuksia selvästi nopeammin, mutta muissa suunnissa ero ei ollut merkittävä.

3 Koekohteen FEM-mallinnus

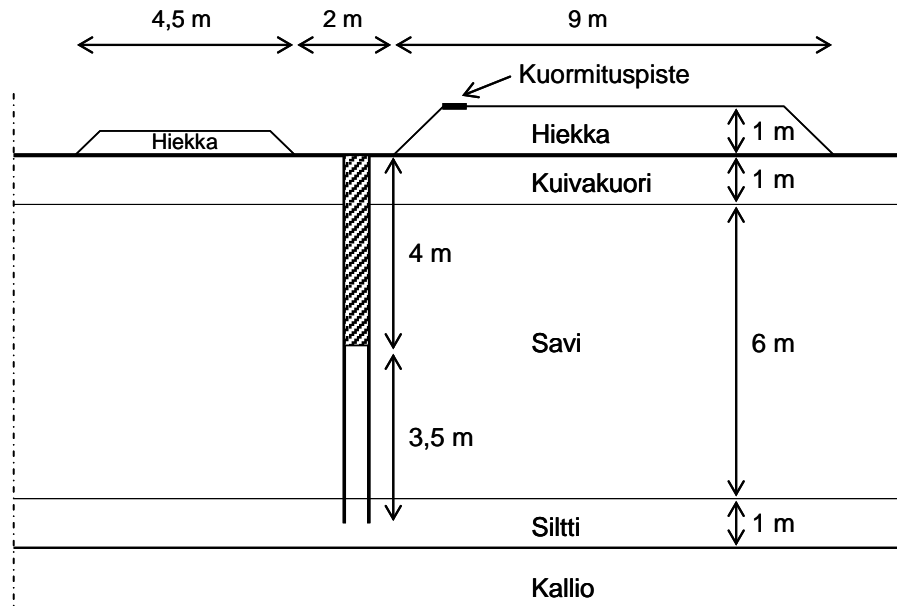
3.1 Simulointimalli ja -menetelmät

Kuvassa 13 on esitetty mallinnettu alue ja sen mitat. Tärinäseinä sijaitsee pyörätien ja maantien välissä. Herätteen paikka sijaitsee jossakin kuvan kuormituspisteissä. Mallin reunoissa on ääretön-elementit, jotka vaimentavat reunoille tulevan värähtelyn estäen näin takaisinheijastumisen.

Koekohde mallinnettiin kerroksellisena maaperänä, jonka pohjassa on kiinteä kalio. Kuvassa 14 on esitetty käytetty maapohja ja tärinäseinän paikka. Tiepenkereet sijaitsevat mallissa kuivakuorikerroksen päällä kuvan mukaisesti. Pylvässeinämät ulottuvat 7,5 m syvyyteen ja niiden välissä on kumirouhe-eriste 4 m syvyyteen asti. Malli kuvaa todellisen maapohjan tiedossa olevalla tarkkuudella.



Kuva 13. Mallinnettu alue, tärinäseinän ja mittausantureiden paikat. Alueen reunoilla on värähtelyä vaimentavat äärettämät reumat.



Kuva 14. Poikkileikkauskuva maapohjasta ja tärinäseinän paikasta. Tärinäseinän leveys on 0,5 m, tiepenkereiden paksuudet 0,5 m ja 1,0 m. Kallio kuvataan mallisaa jäykkänä alustana.

Kuormitus tehdään yhteen kuormituspisteeseen vaikuttavana lyhytaikaisena voimana, joka kasvaa nolasta maksimiarvoonsa ja pienenee takaisin nolnaan. Sen muoto ja kesto kalibroidaan mittaustulosten perusteella. Kuormituksen muoto on kolmio- tai sinikuorma ja sen kesto voi olla 0,05 - 0,30 s. Kuormituspisteessä voi olla erisuuntaisia samaan aikaan vaikuttavia kuormia. Kuormitusalueen koko on $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$.

Homogeenisessa maaperässä leikkausaallon nopeus v_S voidaan laskea kaavalla

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

missä ν on Poissonin luku
 G on leikkausmoduli [N/m^2]
 E on kimmomoduli [N/m^2]
 ρ on tiheys [kg/m^3].

Vastaavasti Rayleigh-aallon v_R nopeus on likimain

$$v_R \approx \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \times v_S \quad (2)$$

Korkein taajuus, jota tietyn kokoisella elementillä voidaan mallintaa on

$$f_{\max} = \frac{v_S}{8d} \quad (3)$$

missä f_{\max} on maksimitaajuus [Hz]
 v_S on leikkausaallon nopeus [m/s]
 d on elementin koko [m].

Värähtelymittauksissa saatiin Rayleigh-aallon nopeudeksi 61 - 63 m/s. Tämä vastaa kaavojen 1 ja 2 perusteella saven kimmomoduulia 18 MPa, kun saven Poissonin luvuksi oletetaan 0,45. Kuivakuorikerroksen vaikutus aallon nopeuteen on pieni, koska Rayleigh-aalto ei mahdu pelkästään kuivakuorikerrokseen. Nopeus määräytyy pääosin alla oleva saven ominaisuuksien perusteella.

Värähtelymittauksissa korkein merkittävä taajuus oli noin 16 Hz. Kaavan 3 perusteella voidaan laskea taulukon 1 mukaiset maksimitaajuudet erilaisille materiaaleille 0,5 m elementtikooalla. Muiden materiaalien ominaisuuksiksi on valittu tyypilliset arvot. Tulosten perusteella 0,5 m elementtikooalla päästään kohtuullisella tarkkuudella 16 Hz taajuuteen ja elementtikoko on siten riittävä malliin. Jäykemmällä pintamateriaaleilla (hiekkä ja kuivakuorisavi) taajuusalue ulottuu vielä korkeammalle.

Taulukko 1. Mallissa käytettyjä maaperän materiaaliominaisuuksia ja maksimitaajuudet, kun elementin koko 0,5 m. Materiaalit on oletettu homogeeniseksi.

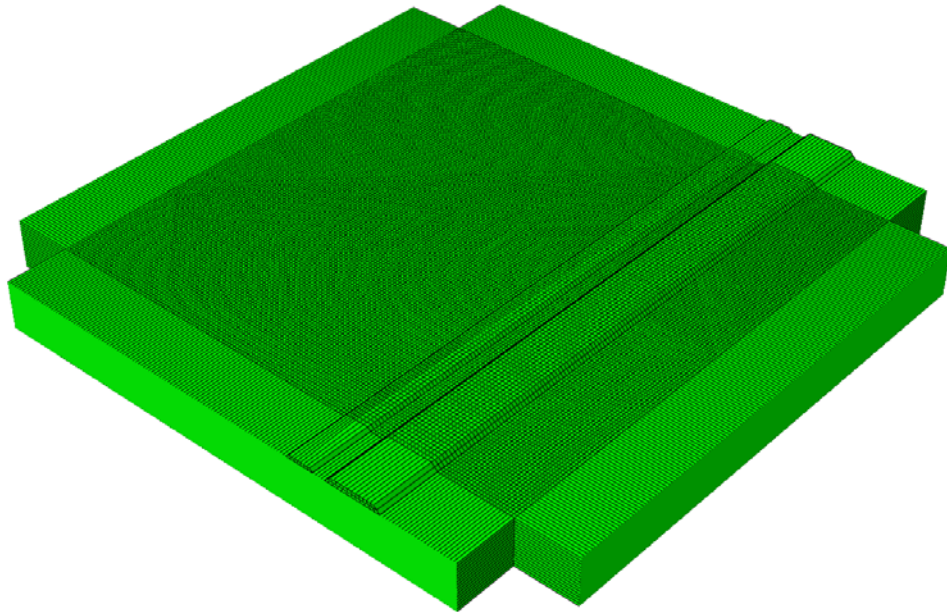
Suure	Savi	Kuivakuori	Siltti	Hiekka
ρ [kg/m ³]	1500	1700	1700	1900
ν [-]	0,45	0,45	0,4	0,35
E [MPa]	18	40	35	80
G [MPa]	6,2	13,8	12,5	29,6
v_S [m/s]	64,3	90,1	85,7	124,9
v_R [m/s]	61,0	85,4	80,7	116,7
f_{\max} [Hz]	16,1	22,5	21,4	31,2

Taulukossa 2 on vastaavasti värinäesteen puupylväille ja kumirouheelle lasketut maksimitaajuudet elementtikooosta riippuen. Puupylväillä 0,5 m elementtikoko on riittävä, mutta kumirouheella joudutaan pienestä kimmomoduulista johtuen käyttämään enintään 0,08 m elementtikokoa.

Taulukko 2. Mallissa käytettyjä värinäesteen materiaaliominaisuuksia ja niiden maksimitaajuudet valitun elementtikoon perusteella. Materiaalit on oletettu homogeeniseksi.

Suure	Puupylväs	Kumirouhe
ρ [kg/m ³]	500	1500
ν [-]	0,3	0,49
E [MPa]	5000	0,5
G [MPa]	1923	0,17
v_S [m/s]	1961	10,6
v_R [m/s]	1819	10,1
Elem. koko [m]	0,50	0,08
f_{\max} [Hz]	490	16,5

Simulointimallissa maamateriaalin kuvaamiseen käytetään kahdeksansolmuista redusoitua lineaarista kuutioelementtiä. Äärettömät reunat kuvataan vastaavalla kahdeksansolmuisella ääretön-elementillä. Värinäseinän tukirakenne (puupylväät) mallinnetaan toiseen suuntaan kantavana kuorioelementtinä. Kaikki materiaalit ovat lineaarisia. Simulointi suoritetaan Abaqus/Explicit 6.10 - simulointiohjelmistoa käyttäen eksplisiittistä ratkaisijaa. Kuvassa 15 on FEM-malli sisältäen reunoilla olevat ääretön-elementit.



Kuva 15. Simuloinnissa käytetty FEM-malli. Mallissa on noin 459000 - 722784 solmua ja 424000 - 646631 elementtiä simuloitavasta tapauksesta riippuen.

3.2 Mallin kalibrointi

Simulointimallin materiaaliominaisuudet kalibroitiin tehtyjen värähtelymittausten avulla. Tavoitteena oli saada koetuloksia vastaava etäisyyden mukaan vaimeneva taajuuspainotettu tehollisarvo ja samanlainen taajuusjakauma.

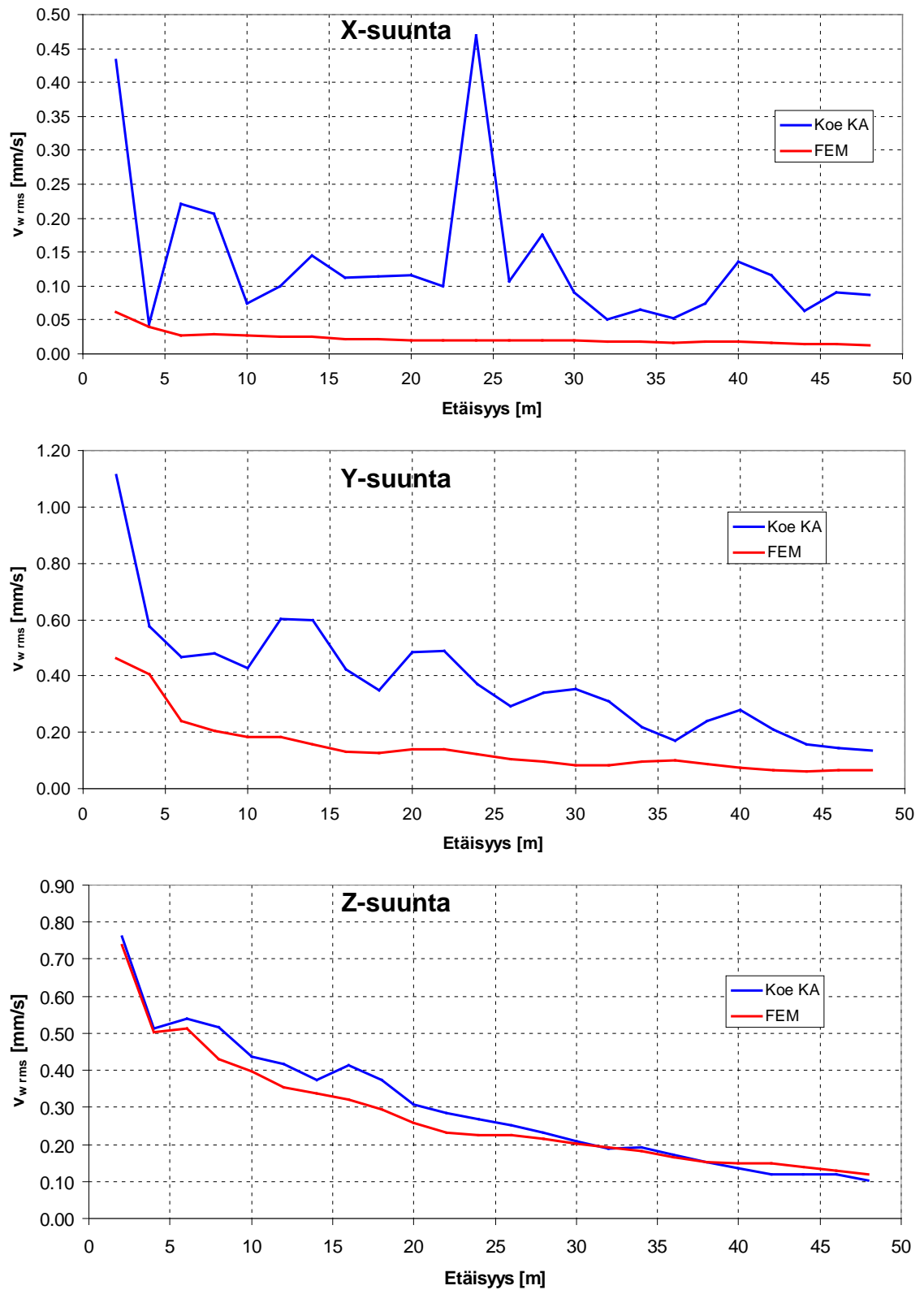
Saven kimmomoduli määräytyi pääosin mitatun pinta-aallonnopeuden perusteella, arvo osoittautui myös sopivaksi. Myös muiden materiaalien kimmomoduulit pidettiin oletusarvoissa. Merkittävien simulointituloksiin vaikuttavat parametrit olivat vaimennusparametrit α ja β . Parametrien perusteella säädettiin vaimeneminen vastaamaan koetuloksissa havaittua vaimenemista. Kuormituksen suuruus määräsi värähtelyn tason. Siniaaltomuotoinen 0,1 s pituinen pystysuuntainen pintakuorma 68 kN osoittautui sopivaksi. Lopulliset materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kalibroidut materiaaliparametrit ja kuormitus. Materiaalit ovat homogeenisia.

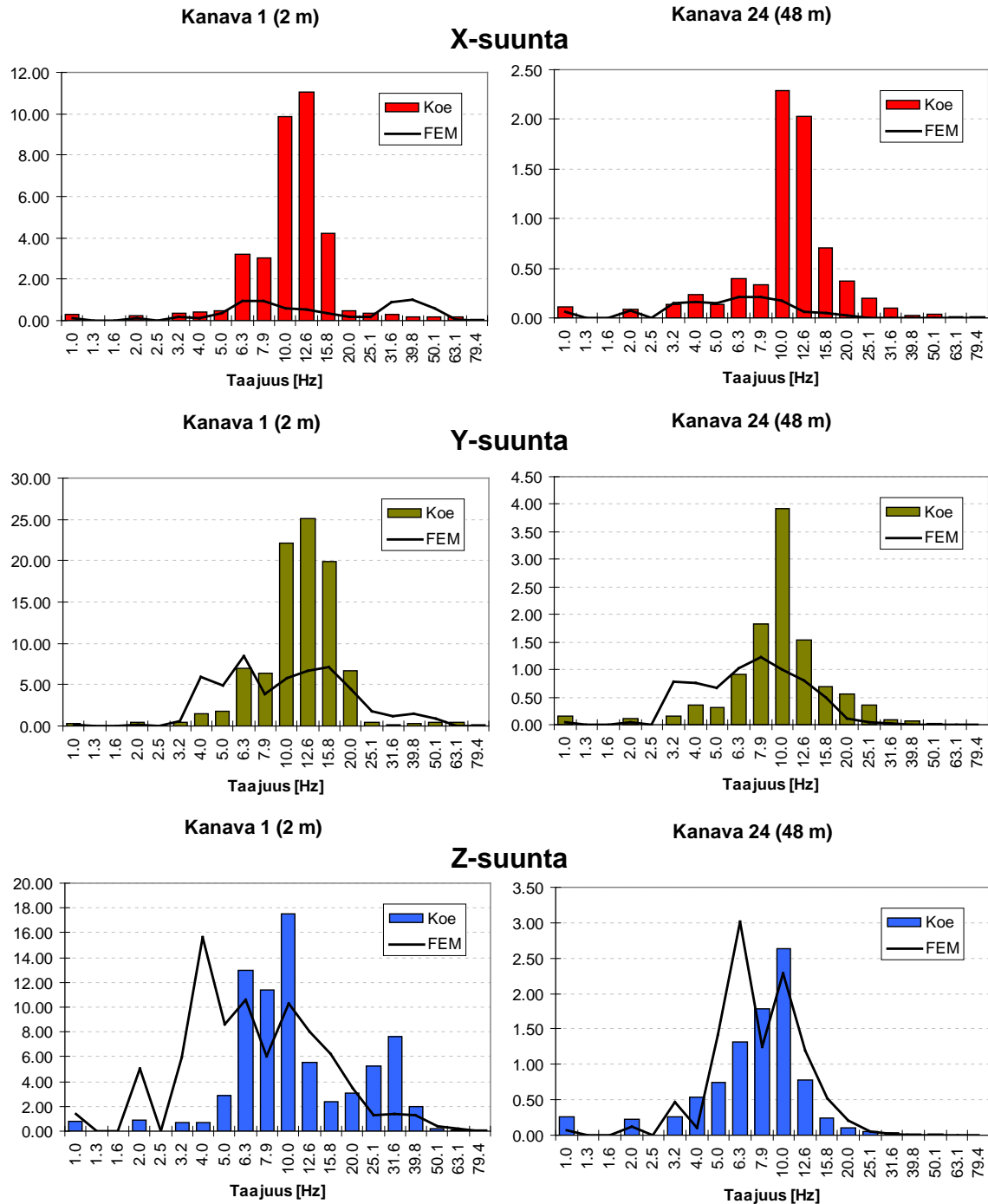
Suure	Savi	Kuivakuori	Siltti	Hiekka
ρ [kg/m ³]	1500	1700	1700	1900
E [MPa]	18	40	35	80
ν [-]	0,45	0,45	0,4	0,35
Vaimennus α [-]	0,425			
Vaimennus β [-]	0,00021			
Kuormitus, suunta x	ei			
Kuormitus, suunta y	ei			
Kuormitus, suunta z	Siniaalto 0,1 s, max voima = 68 kN			

Valittu vaimennus vastaa noin 1 % vaimennusta voimakkaimmalla 6 - 16 Hz taajuusalueella. Taajuusalueen ulkopuolella vaimennus oli suurempi, noin 2 - 4 %.

Kuvissa 16 ja 17 on esitetty simuloitujen tulosten vertailu koetuloksiin. Liitteessä 2 on esitelty eri parametrien muutosten vaikutusta tuloksiin.



Kuva 16. Töyssyn 3 aiheuttama taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo ja vastaavat FEM-mallin antamat tulokset. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



Kuva 17. Töyssyn 3 aiheuttama taajuusjakauma ja vastaavat FEM-mallin antamat tulokset. Y-akselilla taajuuspainotettu kiihtyvyyden tehollisarvo, yksikkö mm/s^2 . Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo (mm/s) saadaan jakamalla arvot tekijällä 35,7. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.

Tehdyllä mallilla laskettu pystyvärähtely vastaa hyvin mitattua värähtelyä. Valittavasti vaakavärähtelyjä ei saatu muunneltavilla parametreilla mittaustuloksia vastaaviksi, joten laskentamallissa on piirteitä, jotka eivät vastaa todellisuutta. Sekä x- että y-suunnassa lasketut värähtelyt ovat huomattavasti mitattuja arvoja pienemmät. Poikittaissuunnassa (y-suunta) mallin antamat tulokset ovat noin puolet mitatuista. Tien suunnassa (x-suunta) mallin tulokset ovat noin 10 - 20 % mitatuista arvoista.

Syytä erolle ei yrityksistä huolimatta ole pystytty selvittämään. Erityisesti tulosten ero y-suunnassa on merkittävä, koska mitattujen värähtelyjen suuruus siinä suunnassa on samaa suuruusluokkaa kuin pystysuunnassa. X-suunnassa värähtely on pienempää, jolloin eron merkitys ei ole niin suuri.

Jonkin verran tuloksiin voisi vaikuttaa käyttämällä saviille ortotrooppista materiaalimallia, mutta eroa se ei poistaisi kokonaan. Mallin elementtikoko rajoittaa mallin kykyä simuloida värähtelyä korkeammilla taajuuksilla (yli 16 Hz). Tämä vaikuttaa kuitenkin vain korkeampiin taajuuksiin. Eräs mahdollinen selitys eroille on se, että maapohja ei ole tien tai viereisen ratapenkan alapuolella homogeenista savea kuten mallia rakennettaessa oletettiin. Tämä voisi vaikuttaa syntyvään ja heijastuvaan värähtelyyn.

Simuloitu taajuusjakauma vastaa pääosin mittauksia. Malli antaa jonkin verran enemmän matalampia 4 - 6 Hz taajuuksia kaikissa suunnissa. Mallissa käytetty herätekuorman suuruus 68 kN on järkevässä suhteessa kuorma-auton painoon 106 kN nähden.

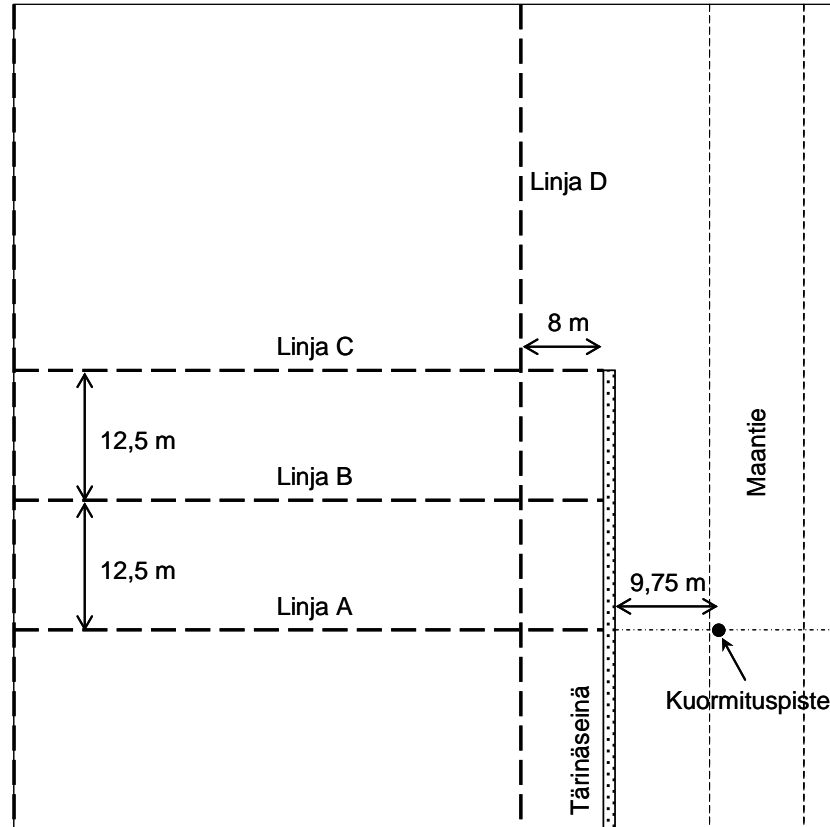
Huolimatta laskettujen ja mitattujen värähtelyjen eroista, voidaan kuitenkin uskoa, että malli antaa kohtuullisen hyvän arvion siitä, miten tärinäeste vaikuttaa maanpinnan värähtelyyn.

3.3 Tärinäesteen vaikutus tärinän leviämiseen

Tärinäeste mallinnettiin kuvan 2 mukaiseksi. Kuormituspiste ja maantie on tässä simuloinnissa siirretty 8 m kauemmaksi tärinäseinästä kuvan 13 malliin verrattuna. Tällöin tilanne vastaa paremmin todellisuutta. Kuormituspiste sijaitsee linjalla A ja sen etäisyys seinästä on 9,75 m. Pyörätie on poistettu mallista. Kuvassa 18 on esitetty tärinäesteen ja kuormituspisteen paikka sekä linjat, joilla tuloksia tarkastellaan.

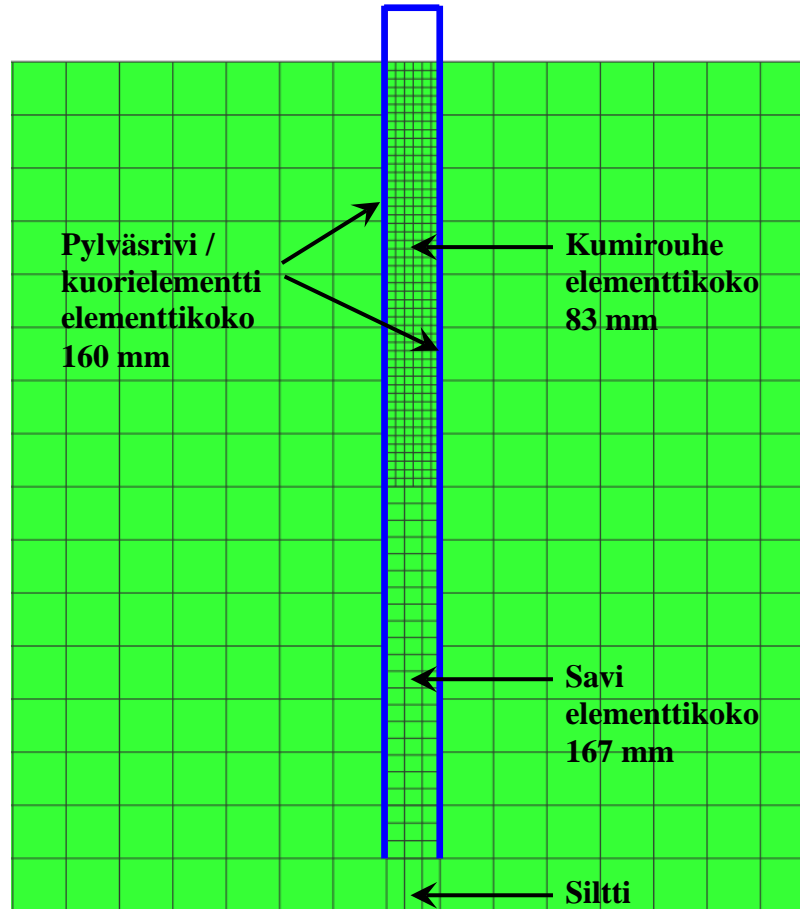
Tutkimuksessa simuloitiin seuraavat tapaukset:

- ei tärinäestettä
- yksi pylväsrivi asennettu
- kaksi pylväsriviä asennettu, väli 0,5 m, välissä savi
- kaksi pylväsriviä, välissä kumirouhe 4 m syvyyteen
- kaksi pylväsriviä, välissä kumirouhe 4 m syvyyteen, pylväsrivit kiinnitetty yläpästä toisiinsa
- kaksi pylväsriviä, ilmaväli 4 m syvyyteen
- kaksi pylväsriviä, ilmaväli 4 m syvyyteen, pylväsrivit kiinnitetty yläpästä toisiinsa.



Kuva 18. Tärinäesteen ja kuormituspisteen paikat sekä linjat, joilla tulokset esitetään. Muilta osin malli on samanlainen kuvan 13 kanssa.

Tärinäesteen materiaaliominaisuudet olivat taulukon 2 mukaisia. Pylvään halkaisija oli 200 mm ja pylväiden k-väli 250 mm. Pylväsrivit yksinkertaistettiin laskeutateknisistä syistä tasomaisiksi ortotrooppisiksi kuorielementeiksi, joilla ei ole paksuussuuntaista ulottuvuutta. Kuorielementit olivat 0,5 m etäisyydellä toisistaan. Kuorielementtien välissä oli täyte tai ilmatila. Kuvassa 19 on esitetty FEM-mallin verkotus ja elementtien koot tärinäseinän kohdalta.

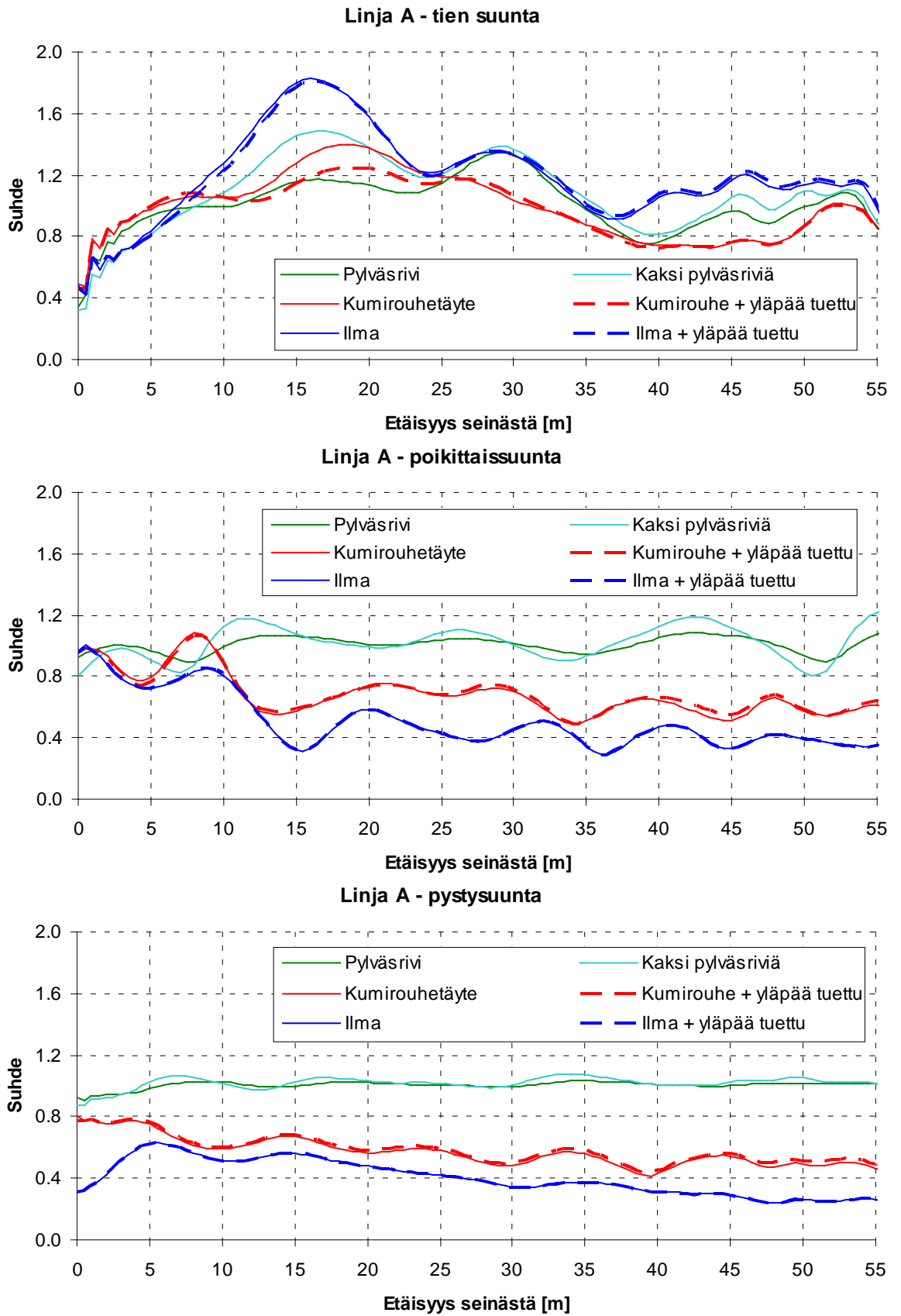


Kuva 19. FEM-malli tärinäesteen kohdalta, leikkaus poikittaissuunnassa (y-suunta). Mallin alareunassa on tuki.

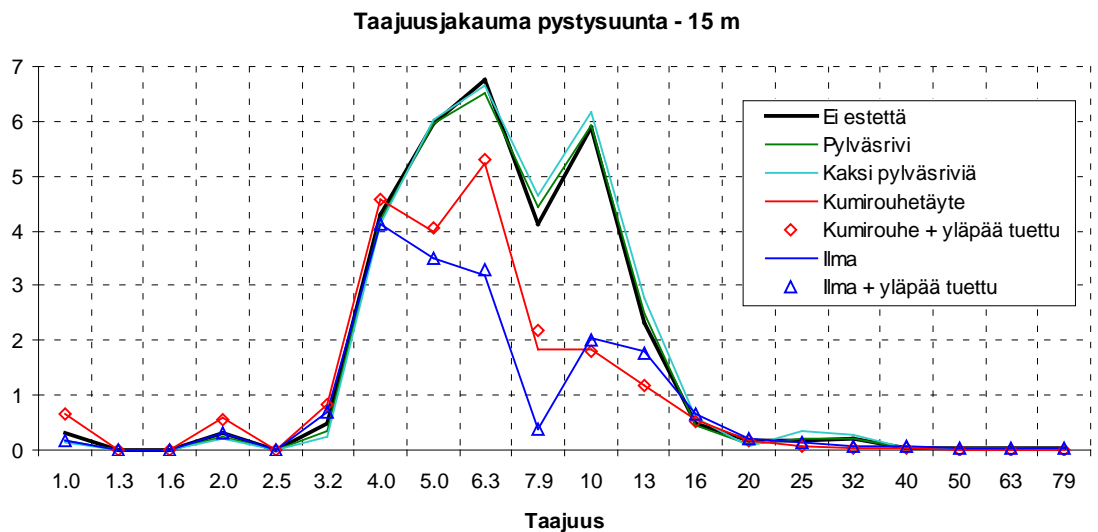
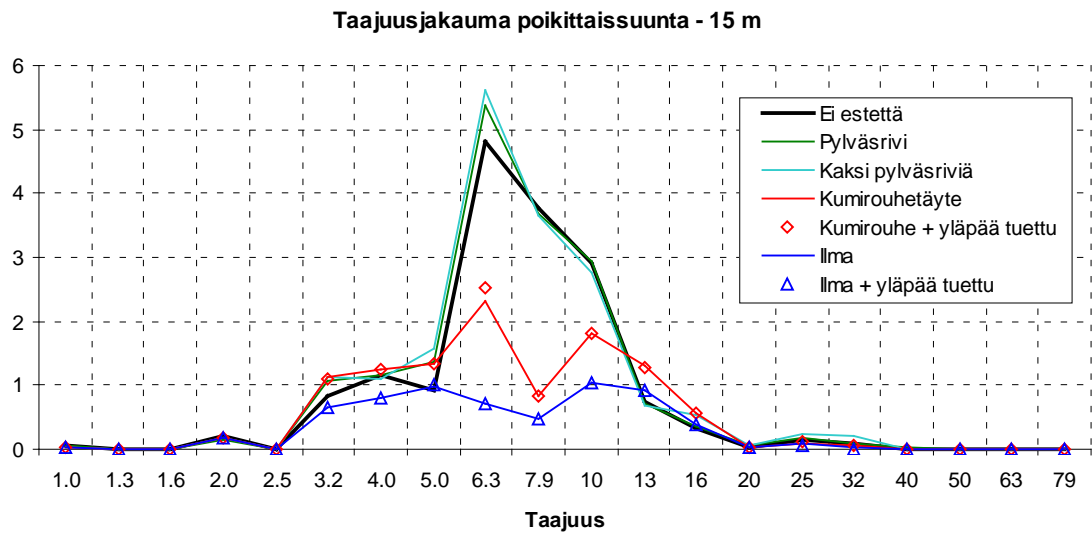
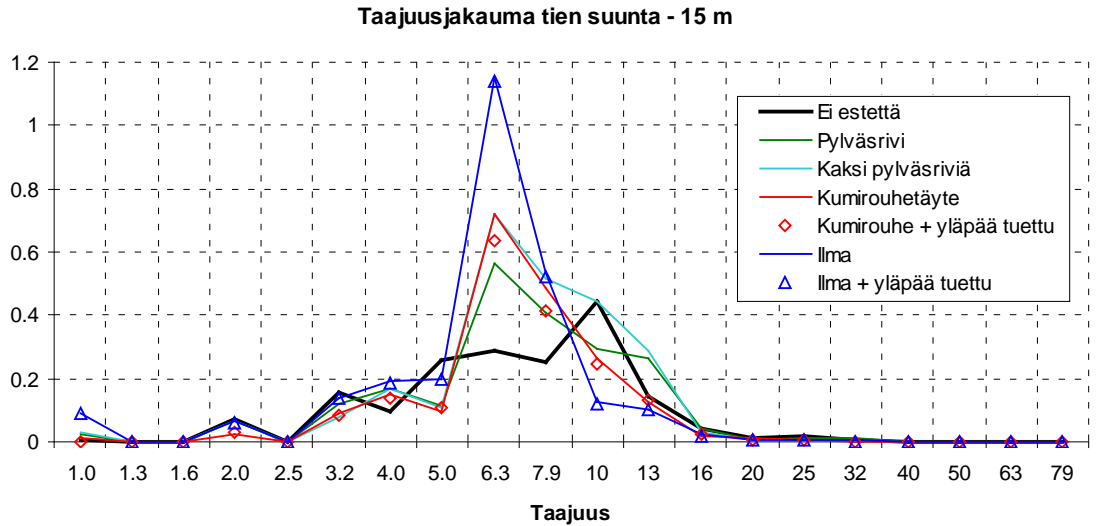
Pylväsriivin pystysuuntainen jäykkyys oli $EA = 6,283 \cdot 10^8$ N ja $EI = 1,571 \cdot 10^6$ Nm² seinäpituusmetriä kohden. Pylväsriivit kiinnitetään joissain laskentatapauksissa yläpäästä jäykästi toisiinsa. Tämän tuen jäykkyydeksi oletettiin arvot $EA = 1,571 \cdot 10^8$ N ja $EI = 9,817 \cdot 10^4$ Nm² seinäpituusmetriä kohden. Vaakasuunnassa pylväsriivin jäykkyys on hyvin pieni, arvoiksi oletettiin 1 % (EA) ja 0,1 % (EI) pystysuuntaisista arvoista.

Kumirouheen vaimennus on selvästi suurempi kuin muun maapohjan. Kirjallisuuden (Turer ja Özden, 2008) perusteella vanhojen autonrenkaiden kumin vaimennus on 2 - 14 % kuormitustapauksesta riippuen. Kumirouheesta ei vastaavaa tietoa löydy, mutta sen voi olettaa olevan samaa suuruusluokkaa. Kuitenkin pitää huomioida, että muodonmuutosten suuruus vaikuttaa myös vaimennuksen suuruuteen. Laskelmissa käytettiin vaimennusta 4 %, jota vastaavat kertoimet ovat $\alpha = 1,7$ ja $\beta = 0,00084$. Vaimennus on nelinkertainen maapohjan vaimennukseen verrattuna.

Kuvassa 20 on esitetty tärinäesteiden vaikutus taajuuspainotettuun tehollisarvoon linjalla A. ja kuvassa 21 vastaavasti tärinäesteiden vaikutus taajuusjakaumaan 15 m etäisyydellä seinästä (linja A). Liitteissä 3 - 5 on esitetty myös linjojen B-D tulokset sekä lasketut värähtelyn suuruudet ja taajuusjakautumat kaikilla linjoilla. Kumirouheen materiaaliominaisuuksien vaihtelun vaikutusta tutkittiin yhdellä seinätyypillä (kaksi pylväsriiviä ja kumirouhetäyte). Vaimennuksena käytettiin arvoja 1 %, 4 % tai 10 %. Kimmomoduuli oli 0,5 MPa, 1,0 MPa tai 2,0 MPa. Lisäksi laskettiin vaimennus ilman pylväsriivejä, olettaen maassa olevan pelkästään kumirouhetäyte. Nämä tulokset on esitetty liitteissä 6 ja 7.



Kuva 20. Tärinäesteiden vaikutus värähtelyn tehollisarvon suuruuteen, linja A. Arvo on tärinäesteen ja ilman estettä olevan tapauksen suhde. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



Kuva 21. Tärinäesteiden vaikutus taajuusjakaumaan. Värähtely on esitetty painotettuna kiihtyvyyden tehollisarvona (mm/s^2). Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo (mm/s) saadaan jakamalla arvot tekijällä 35,7. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta. Piste sijaitsee linjalla A 15 m etäisyydellä tärinäseinästä.

3.4 Tulosten tarkastelu

Tärinäesteen vaikutusta verrattiin ilman tärinäestettä olevaan tapaukseen. Vertailu tehtiin taajuuspainotetun tehollisarvon perusteella. Saveen lyödyillä pylväsriivillä (yksi tai kaksi riviä, pylväät 200 mm k 250) ei ollut vaikutusta värähtelyn etene- miseen. Sen sijaan kun kahden pylväsriivin välissä on kumirouhetäyte, este pie- nentää eli vaimentaa maanpinnan värähtelyä poikittaissuunnassa (y-suunta) vähin- tään 25 % ja pystysuunnassa (z-suunta) vähintään 30 %. Keskimäärin vaimen- nusta on noin 35 - 40 %. Aivan esteen takana (alle 12 m) vaimennus on pienem- pää ja poikittaissuunnassa värähtely voi jopa vahvistua. Nämä vaimennusarvot pätevät esteen keskilinjalla (linja A).

Ilmatäytteisellä esteellä vaimennus on vielä suurempaa, poikittaissuunnassa vähintään 40 % ja pystysuunnassa 45 %. Kahden pylväsriivin sitominen yläpääs- tään jäykästi toisiinsa ei huononna havaittavasti esteen vaimentavaa vaikutusta. Tien suuntaiseen (x-suunta) värähtelyyn esteellä ei ollut vaikutusta tai värähtely jopa voimistui. Mallin antamat värähtelytasot ovat kuitenkin niin pienet ja epä- luotettavat, että tämän suuntaisessa värähtelyssä arvio tärinäesteen vaimennusvai- kutuksesta ei ole luotettava.

Tärinäesteen vaimennusvaikutus on suurimmillaan esteen keskialueella (pituus- suunnassa). Esteen neljäsosapisteessä vaimennus on noin 15 % - 20 % eli noin 10 % keskilinjaa pienempi. Esteen pään kohdalla este vaimentaa ainoastaan pys- tysuuntaista värähtelyä noin 20 %. Värähtelylähde oli mallissa pistemäinen, tämän takia este vaimensi värähtelyä suhteellisen laajalta alueelta.

Kumirouhetäytteinen tärinäeste vaimensi merkittävästi voimakkaimpia 5,0 - 10 Hz taajuusalueita. Tämän alueen ulkopuolella vaimeneminen oli merkitykse- töntä. Tuloksista ei kuitenkaan voi päätellä mikä olisi esteen vaimennusvaikutus erilaisessa maapohjassa, jossa merkittävin taajuusalue olisi erilainen.

Kumirouhetäytteen materiaaliominaisuuksien vaikutusta tutkittiin yhdellä seinä- tyypillä. Tutkittavina ominaisuuksina olivat materiaalin vaimennus ja kimmo- moduuli. Vertailukohtana on tapaus vaimennus 4 % ja kimmomoduuli 0,5 MPa. Vaimennuksen pienentäminen 1 %:iin pienensi esteen vaikutusta 2 - 3 %, suuren- taminen puolestaan 10 %:iin kasvatti esteen vaimennusvaikutusta 3 - 5 %. Kim- momoduulin kasvattaminen kaksinkertaiseksi (1 MPa) pienensi esteen vaikutusta 5 - 10 %. Nelinkertaisella kimmomoduulilla (2 MPa) seinän vaikutus värähtelyyn jää jo hyvin pieneksi. Kumirouheen materiaaliominaisuuksien selvä vaikutus täri- näseinän toimivuuteen kertoo siitä, että merkittävä osuus värähtelystä siirtyy suo- raan seinän läpi.

Normaalitapausten lisäksi laskettiin tärinäesteen vaikutus ilman pylvässeinämiä, eli maassa on pelkästään kumirouhetäyte. Yllättävästi pelkän kumirouheen vai- mennusvaikutus värähtelyyn oli 15 - 20 % suurempi kuin jos esteessä olisi pylväs- rivit kumirouheen lisäksi. Tästä tapauksesta ei tehty laajempia laskelmia, joten tuloksen yleispätevyydestä ei ole varmuutta. Joka tapauksessa kumirouheen ympärille tarvitaan jokin este, jotta ympäröivä savi ei tunkeudu kumirouheeseen.

Tuloksia voidaan pitää arviona siitä miten tärinäseinä vaikuttaa tarkasteltavassa maaperässä. Tuloksiin vaikuttaa myös se, miten värähtely pääsee siirtymään kumirouhekerroksen alitse. Siihen taas vaikuttaa pehmeän maakerroksen paksuus

ja kuinka syvälle kumirouhetäyttö ulottuu. Tärinäesteen toimivuuden arviointi eri maaperäolosuhteissa edellyttää lisäselvityksiä.

4 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tutkimuksessa suoritettiin maanpinnan värähtelymittaukset koekohteessa, kalibroitiin maapohjan materiaaliparametrit mittaustulosten perusteella ja simuloitiin erilaisten tärinäseinärakenteiden värähtelyn vaimennusvaikutusta. Rakenteen numeerinen simulointi ja värähtelyiden leviämisen mallintaminen tehtiin kolmiulotteisesti elementtimenetelmään (FEM) perustuvalla ABAQUS-ohjelmistolla.

4.1 Yhteenveto maaperämittauksista ja kalibroinnista

Koekohteen maaperän värähtelymittauksissa taajuuspainotettu tehollisarvo pieneni pääosin lineaarisesti etäisyyden mukaan poikittais- ja pystysuunnissa. Voimakkain taajuusalue oli yleensä 6,3 - 12,6 Hz välillä ja määräävin taajuus oli yleensä 10 Hz. Tien suunnassa etäisyyden vaikutus ei näkynyt selkeästi ja lisäksi tuloksissa esiintyi merkittävää vaihtelua. Syy kyseisen suunnan poikkeavaan käyttäytymiseen ei selvinnyt.

Simulointimallin materiaaliominaisuudet kalibroitiin mittausten tulosten perusteella. Saven kimmomoduuli oli 18 MPa, joka määräytyi pääosin mitatun pinta-aallonnopeuden perusteella. Voimakkaimmin simulointituloksiin vaikutti materiaalien vaimennus. Mittaustuloksiin sovitettu materiaalin vaimennus vastaa noin 1 % vaimennusta voimakkaimmalla taajuusalueella. Kuormituksena käytettiin 0,1 s pituista siniaaltomuotoista tiehen vaikuttavaa pintakuormaa.

Kalibroinnin tarkkuus riippuu tarkasteltavasta värähtelysuunnasta. Pystysuunnassa simuloitu tehollisarvo vastaa kohtuullisen hyvin mitattuja tuloksia. Poikittais-suunnassa mallin antamat tulokset ovat noin puolet mitatuista. Tien suunnassa mallin tulokset ovat noin 10 - 20 % mitatuista arvoista. Selvää syytä tulosten eroon ei löydetty.

4.2 Yhteenveto tärinäesteen toimivuudesta

Tutkittu tärinäseinä muodostuu kahdesta samansuuntaisesta, vanhoista painekylälästetyistä pylväistä tehdystä pylväseinämästä ja kumirouhetäytöstä, joka korvaa pylväiden välistä poistetun saven noin 4 m syvyyteen asti. Edellisen lisäksi tutkitiin pelkkien puupylväsrivien toimivuutta ja erilaisia täyttömateriaaleja. Pylväiden väliin jäävän kaivannon leveys on 500 mm ja esteen kokonaispituus 50 m. Savi-kerroksen paksuus on 7,0 m ja pylväät ulottuvat kovaan pohjaan 7,5 m syvyyteen. Tärinäesteen vaikutusta arvioitiin töyssyä kuvaavalla herätteellä, joka sijaitsi esteen keskikohdalla 10 m etäisyydellä esteestä.

Tärinäesteen vaikutusta verrattiin ilman tärinäestettä olevaan tapaukseen. Vertailu tehtiin taajuuspainotetun tehollisarvon perusteella. Saveen lyödyillä pylväsriveillä (yksi tai kaksi) ei ole vaikutusta värähtelyn etenemiseen. Sen sijaan kun kahden pylväsrivin välissä on kumirouhetäyte, este pienentää värähtelyä poikittais- ja pystysuunnassa vähintään 25 - 30 % ja vaimennus on keskimäärin 35 - 40 %. Aivan esteen takana (alle 10 m) vaimennus on pienempää tai värähtely voi jopa vahvistua. Vaimennus oli voimakkainta 5,0 - 10,0 Hz taajuusalueilla.

Ilmatäyteisellä esteellä vaimennusvaikutus on vielä suurempaa (40 - 45 %). Kahden pylväsrivin sitominen yläpäästään toisiinsa ei heikennä havaittavasti vaimennusta. Tien suuntaiseen värähtelyyn esteellä ei ollut vaikutusta tai värähtely jopa voimistui huomattavasti. Mallin antamat värähtelytasot ovat kuitenkin niin pienet ja epäluotettavat, että tämän suuntaisessa värähtelyssä arvio tärinäesteen vaimennusvaikutuksesta ei ole luotettava.

Tärinäesteen vaimennusvaikutus on suurimmillaan esteen keskialueella. Esteen neljäsosapisteessä vaimennus on noin 10 % keskialuetta pienempi. Esteen pään kohdalla este vaimentaa ainoastaan pystysuuntaista värähtelyä (noin 20 %).

4.3 Johtopäätökset

Tutkitun tärinäseinän toimivuudesta voidaan tehdä tutkimuksen perusteella seuraavat johtopäätökset:

- Pelkkien puupylväiden maahan lyöminen ei pienennä värähtelyä.
- Kumirouhe täytteenä pienentää värähtelyä sekä poikittais- että pystysuunnassa vähintään 25 - 30 % ja keskimäärin vaimennus on noin 35 - 40 %. Vaimennus pystysuunnassa on hiukan suurempi kuin poikittaissuunnassa. Vaimennus myös pysyy vakiona etäisyyden kasvaessa esteestä.
- Kumirouheen jäykkyydellä on merkittävä vaikutus tärinäseinän vaimennuksen suuruuteen.
- Tien (seinän) suuntaisen värähtelyn vaimentuminen on epäselvää, koska värähtelytaso oli tarkasteltavassa tapauksessa pieni.
- Lähellä seinää, alle 10 m etäisyydellä, vaimennus on pienempi, erityisesti vaakasuunnassa.
- Suurin vaimennus on esteen keskellä (pistemäinen värähtelylähde esteen keskilinjalla). Seinän neljännespisteissä vaimennus on pienentynyt noin 10 %. Seinän pään kohdalla vaimennusta on vain pystysuunnassa.
- Vaimennus on voimakkainta 5,0 - 10 Hz taajuusalueella, jolla esiintyvät myös voimakkaimmat värähtelyt.
- Värähtely siirtyi merkittävältä osin kumirouhetäytteen läpi. Selvää kiertoilmiötä kumirouhetäytteen alta ei esiintynyt.
- Koska kumirouhetäyteinen pehmeä tärinäeste pienentää merkittävästi myös vaakavärähtelyä, sen käyttömahdollisuuksien selvittämistä kannattaa jatkaa, sillä kovien tärinäesteratkaisujen (ponttiseinä, pilaristabilointi) vaikutus vaakavärähtelyyn on todettu hyvin pieneksi.
- Tulokset osoittavat, että FEM-laskentaa voidaan hyödyntää tärinäseinän toimivuuden arvioinnissa erilaisissa maaperäolosuhteissa.

Tuloksista ei voi päätellä mikä olisi tärinäseinän toimivuus muunlaisissa maapohjissa. Tulosten yleistäminen muihin kuin tarkasteltaviin tapauksiin edellyttää lisälaskelmia.

Lähdeviitteet

Talja A, Fulop L, Kurkela J, Vepsä A ja Törnqvist J. 2009. Tärinäesteet liikennetärinän vaimentamisessa. VTT Tutkimusraportti VTT-R-00963-09. 50 s. + liitt. 8 s.

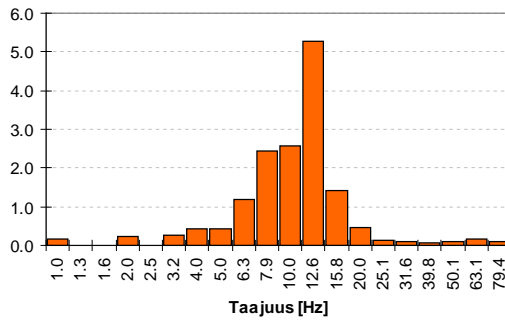
Turer A, Özden B. 2008. Seismic base isolation using low-cost Scrap Tire Pads (STP). *Materials and Structures* (2008) 41:891–908.

Liite 1 - Mitatut taajuusjakaumat

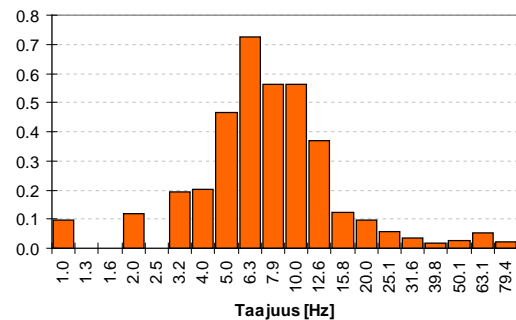
Mittauslinja A, taajuuspainotettu kiihtyvyyden tehollisarvo, yksikkö mm/s^2 . Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo (mm/s) saadaan jakamalla arvot tekijällä 35,7.

Töyssy 1, X-suunta

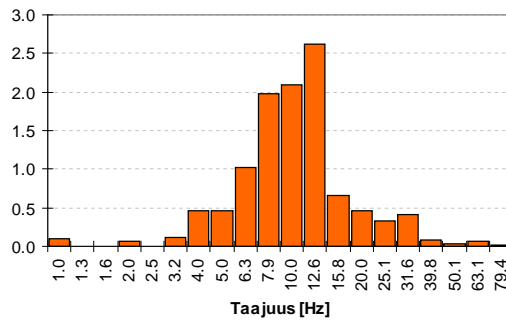
Kanava 1 (2 m)



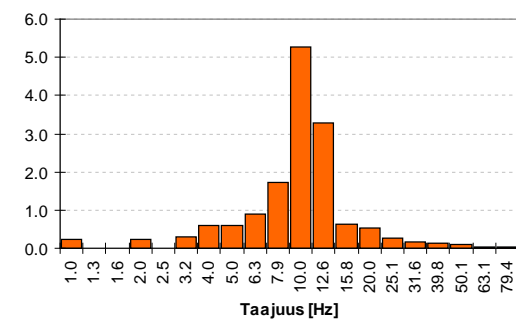
Kanava 2 (4 m)



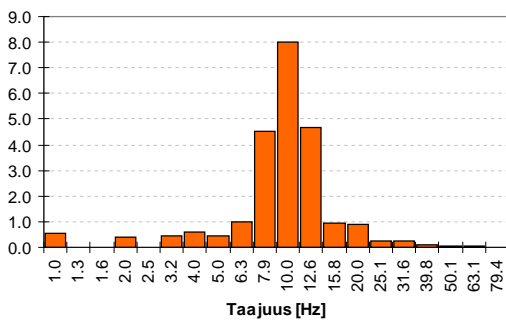
Kanava 4 (8 m)



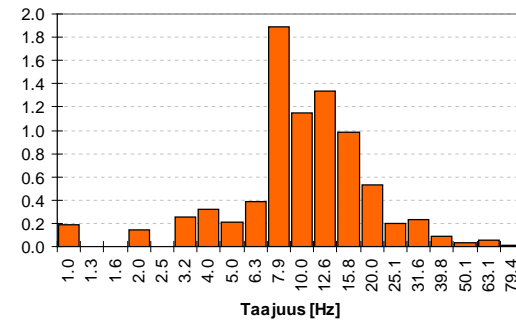
Kanava 8 (16 m)



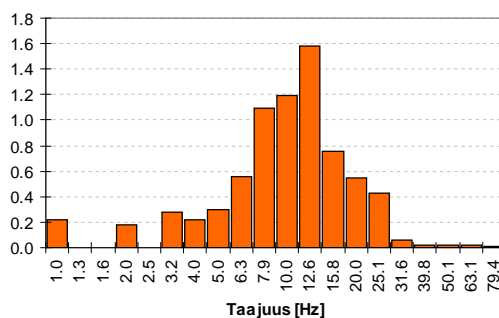
Kanava 12 (24 m)



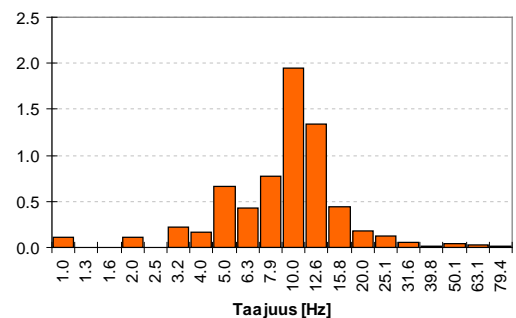
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

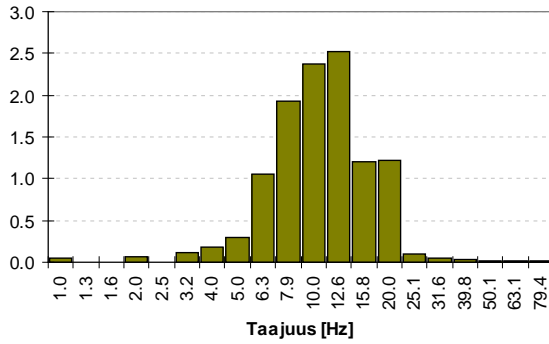


Kanava 24 (48 m)

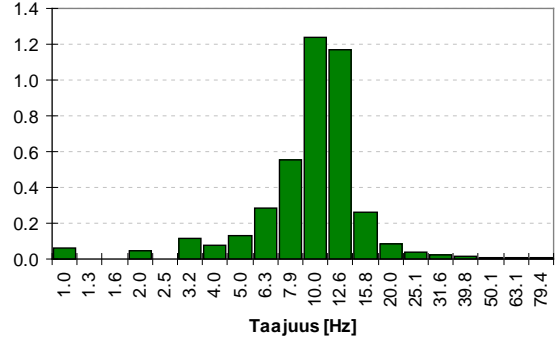


Töyssy 1, Y-suunta

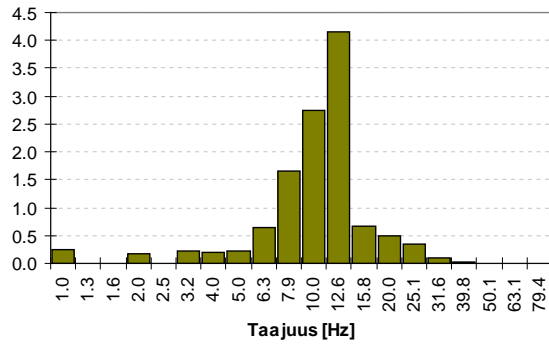
Kanava 1 (2 m)



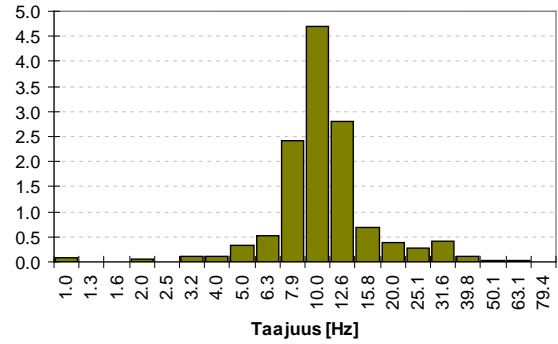
Kanava 2 (4 m)



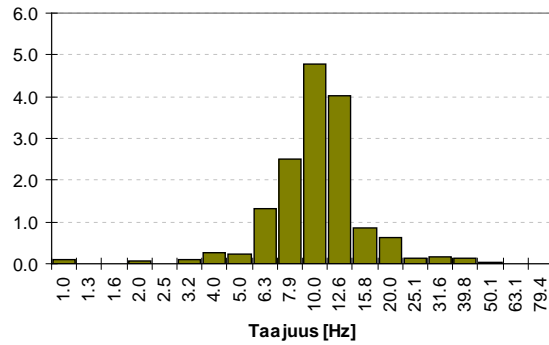
Kanava 4 (8 m)



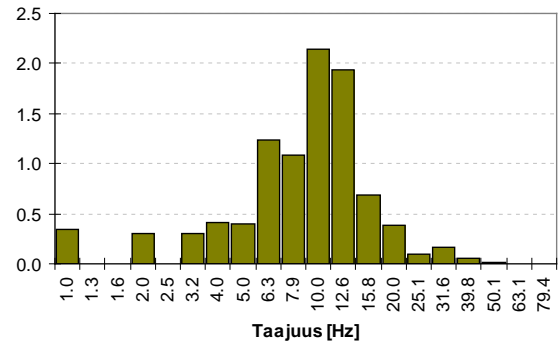
Kanava 8 (16 m)



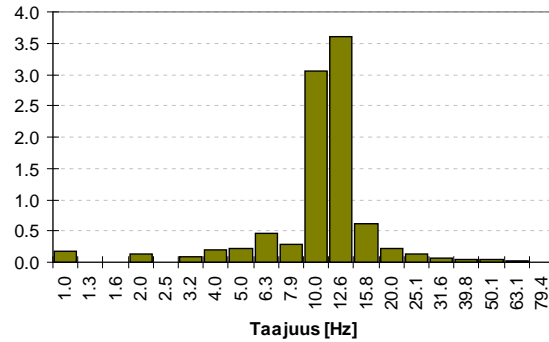
Kanava 12 (24 m)



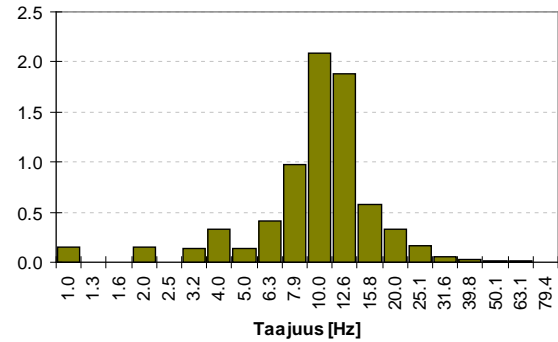
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

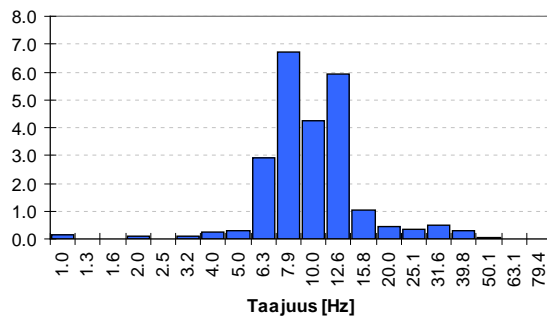


Kanava 24 (48 m)

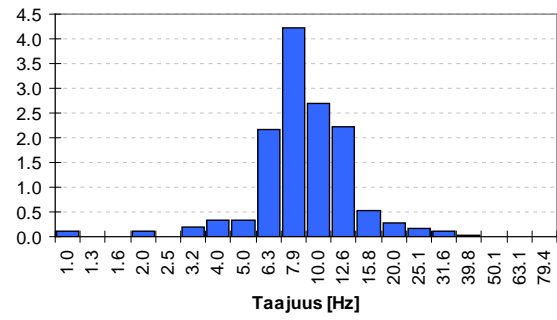


Töyssy 1, Z-suunta

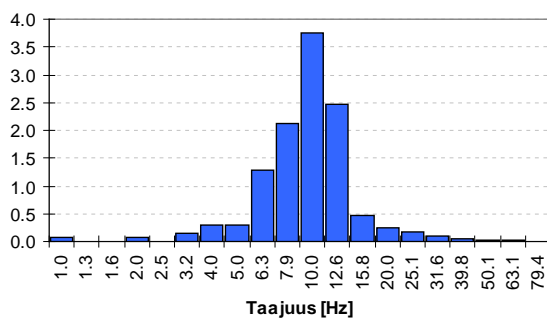
Kanava 1 (2 m)



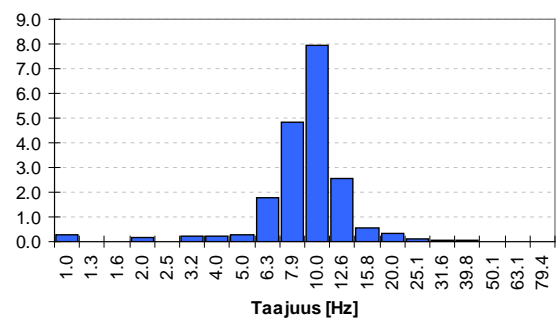
Kanava 2 (4 m)



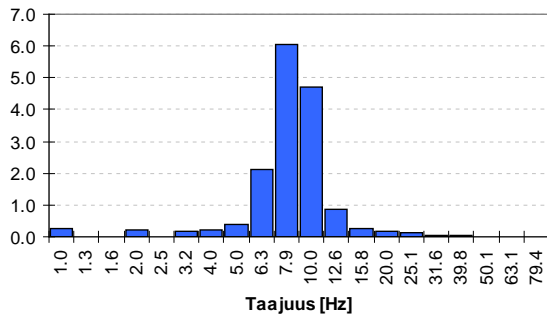
Kanava 4 (8 m)



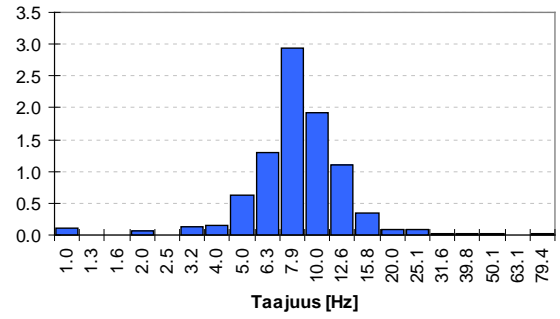
Kanava 8 (16 m)



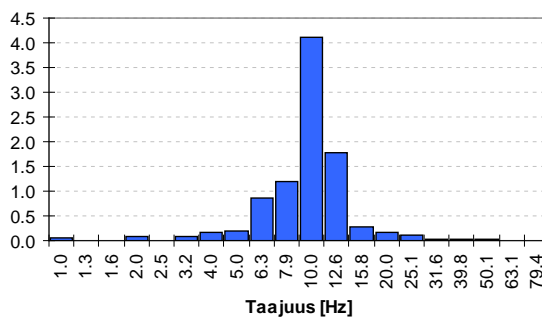
Kanava 12 (24 m)



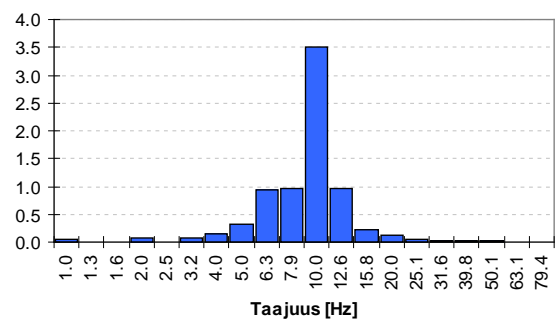
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

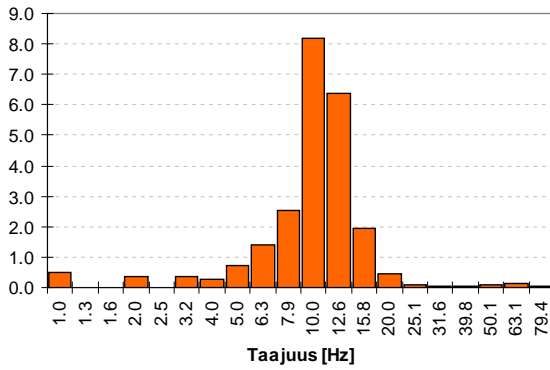


Kanava 24 (48 m)

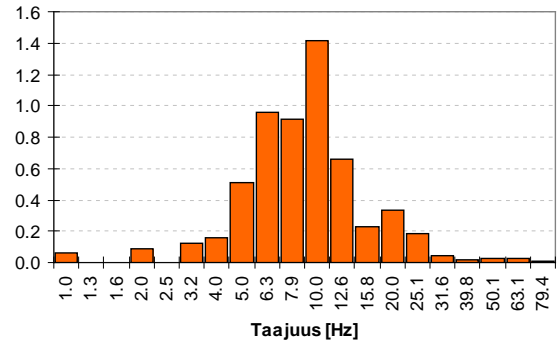


Töyssy 2, X-suunta

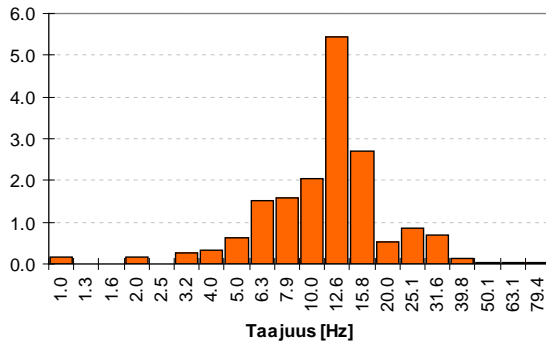
Kanava 1 (2 m)



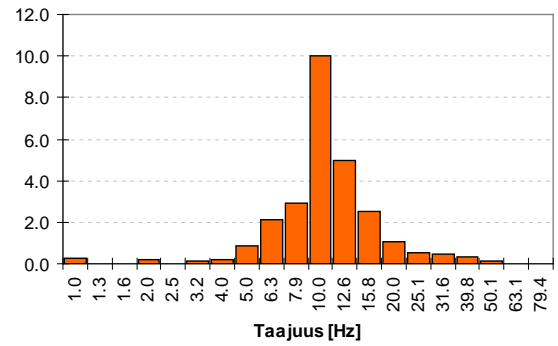
Kanava 2 (4 m)



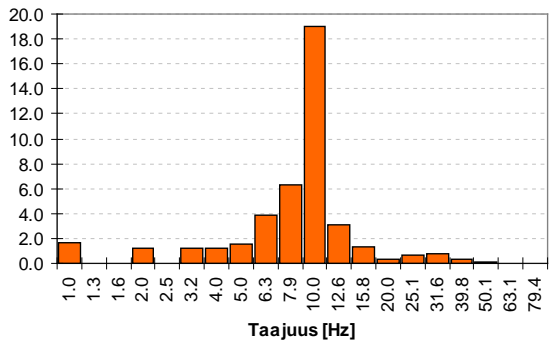
Kanava 4 (8 m)



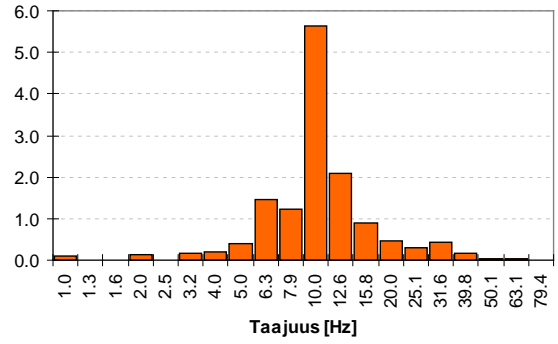
Kanava 8 (16 m)



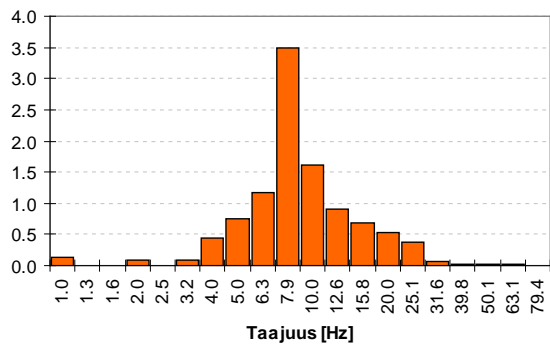
Kanava 12 (24 m)



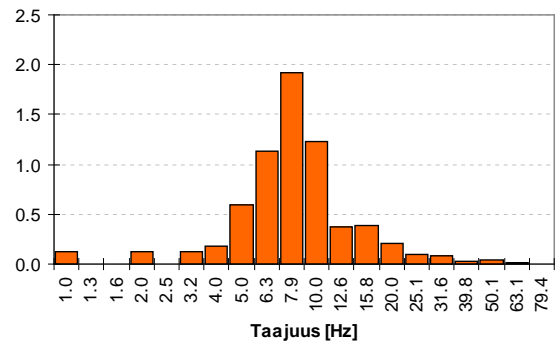
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

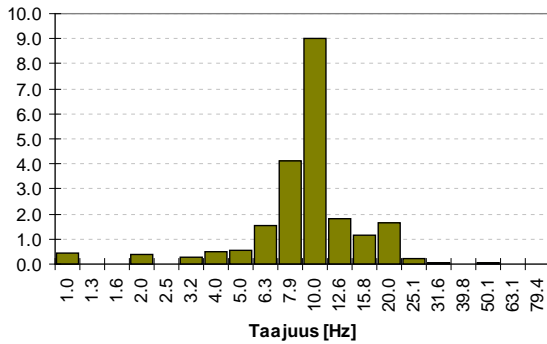


Kanava 24 (48 m)

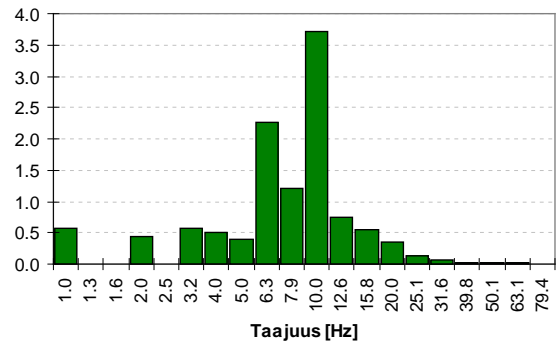


Töyssy 2, Y-suunta

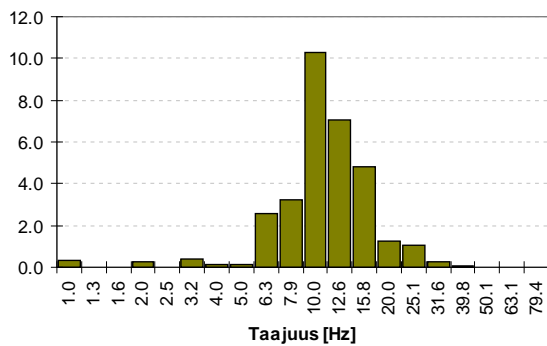
Kanava 1 (2 m)



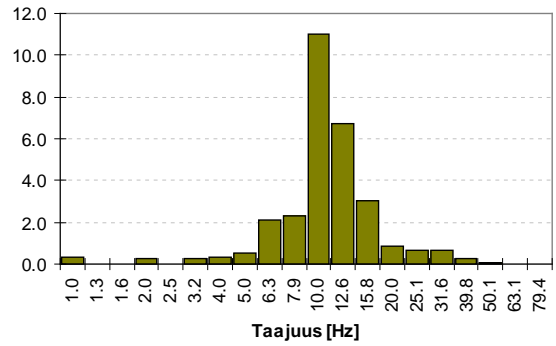
Kanava 2 (4 m)



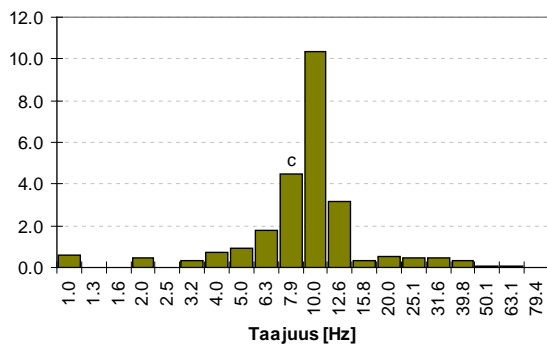
Kanava 4 (8 m)



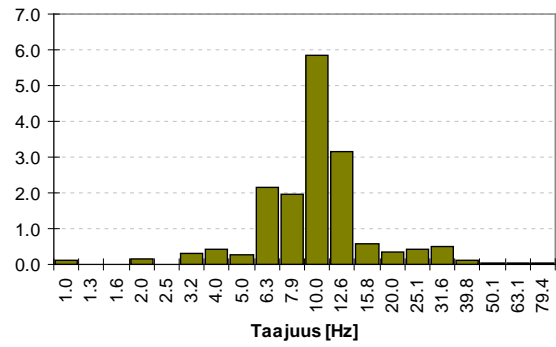
Kanava 8 (16 m)



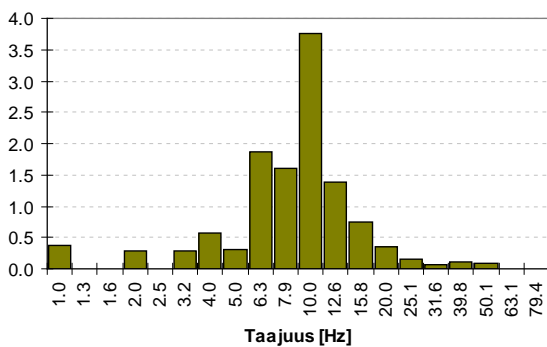
Kanava 12 (24 m)



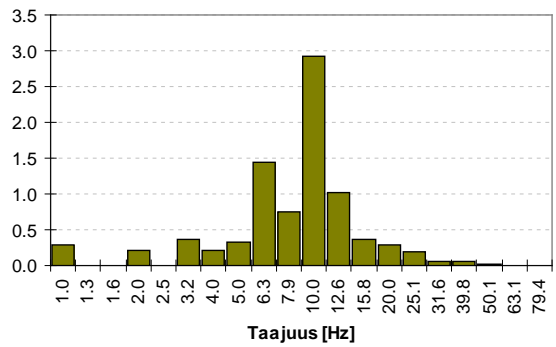
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

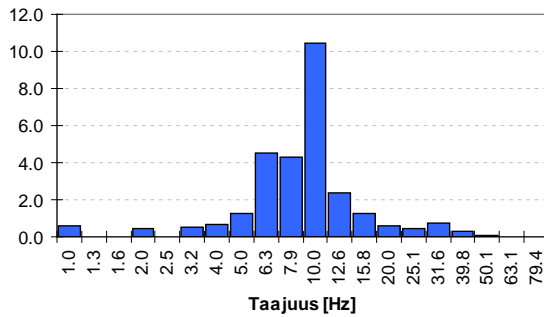


Kanava 24 (48 m)

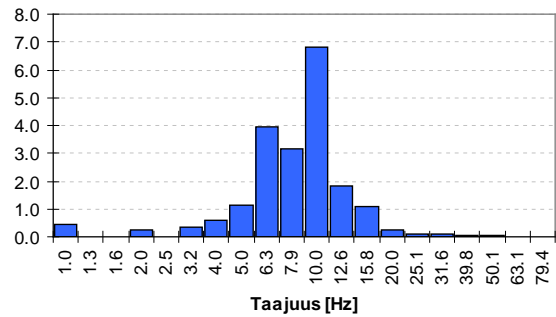


Töyssy 2, Z-suunta

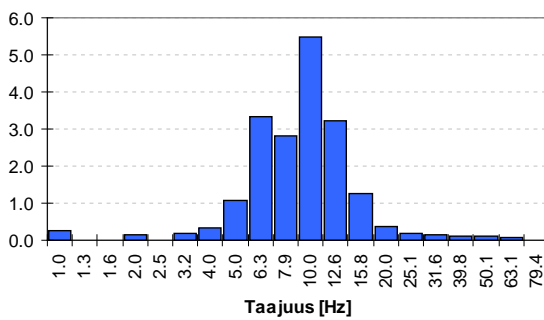
Kanava 1 (2 m)



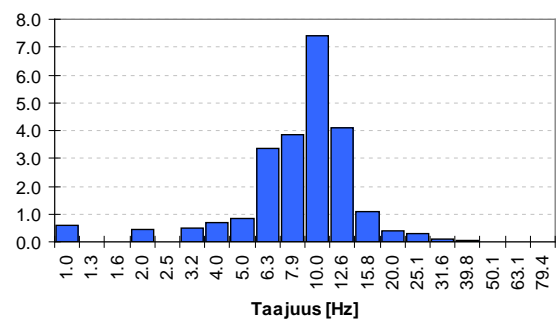
Kanava 2 (4 m)



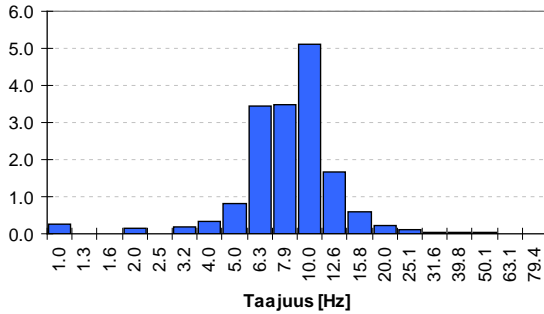
Kanava 4 (8 m)



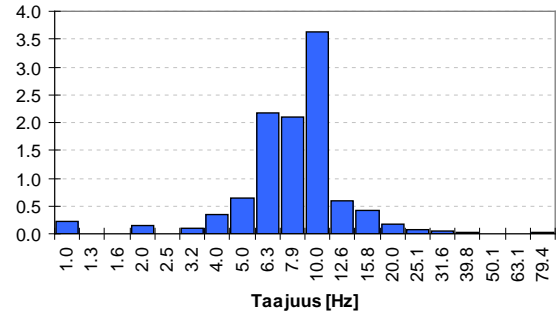
Kanava 8 (16 m)



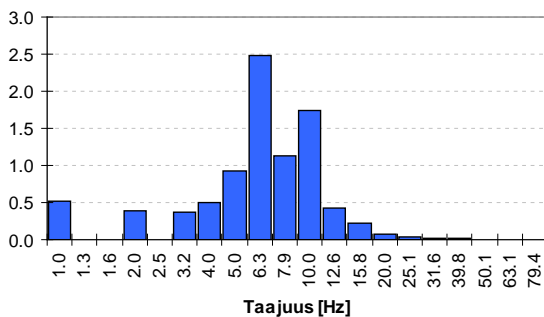
Kanava 12 (24 m)



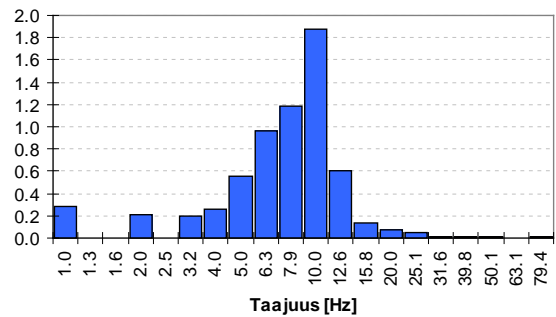
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

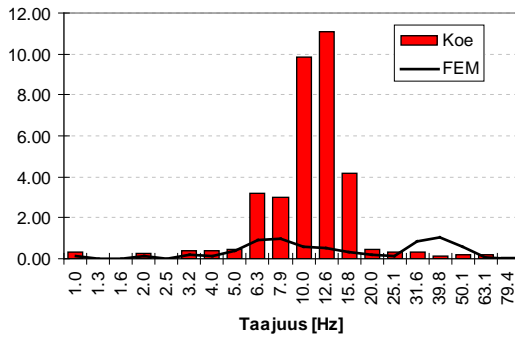


Kanava 24 (48 m)

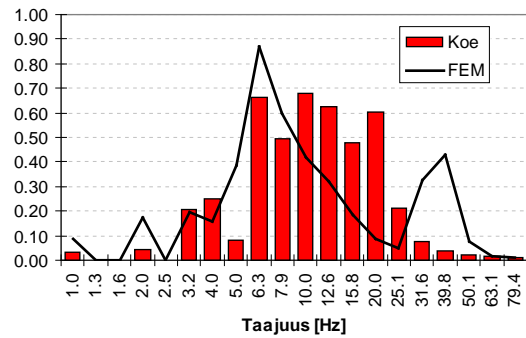


Töyssy 3, X-suunta

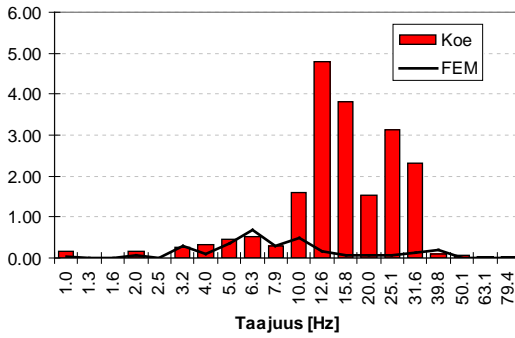
Kanava 1 (2 m)



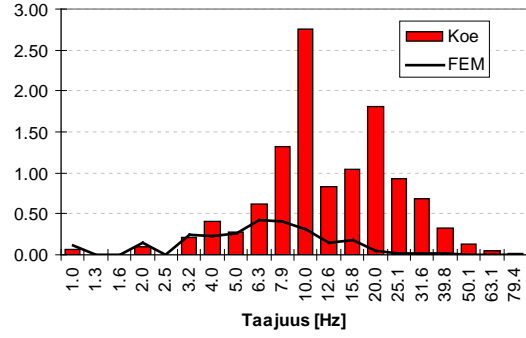
Kanava 2 (4 m)



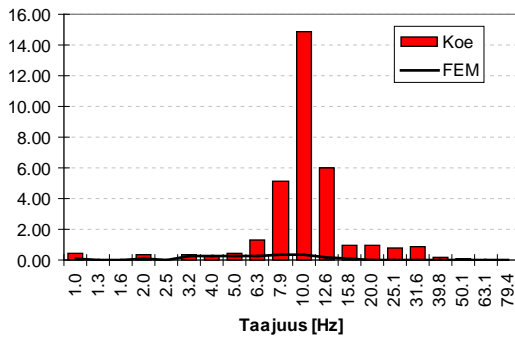
Kanava 4 (8 m)



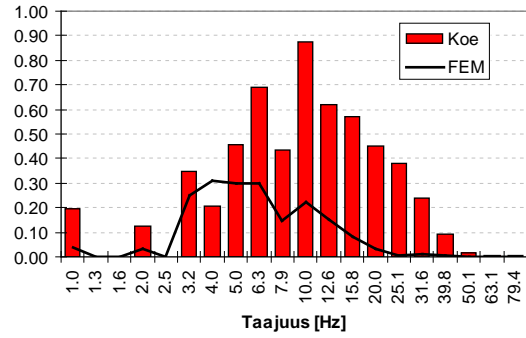
Kanava 8 (16 m)



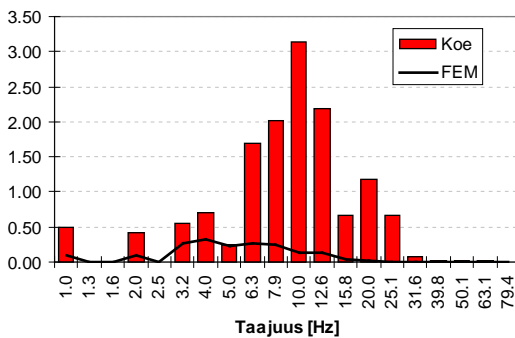
Kanava 12 (24 m)



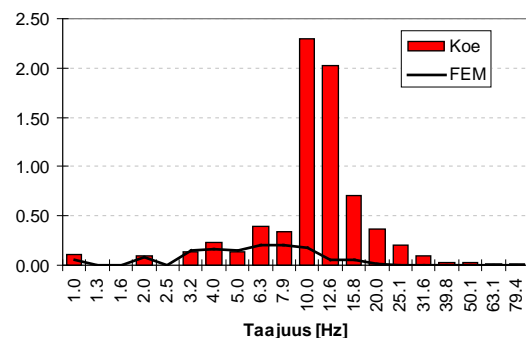
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

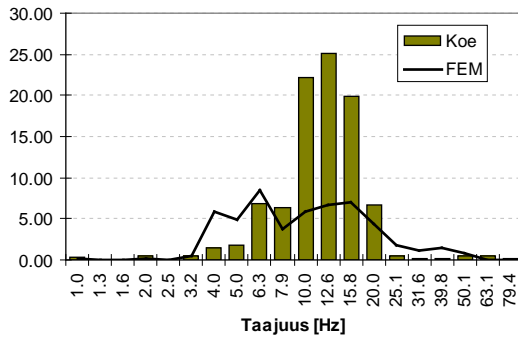


Kanava 24 (48 m)

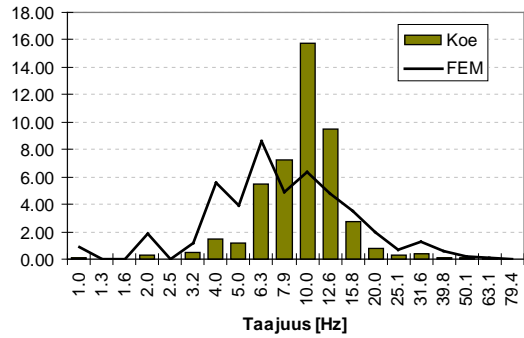


Töyssy 3, Y-suunta

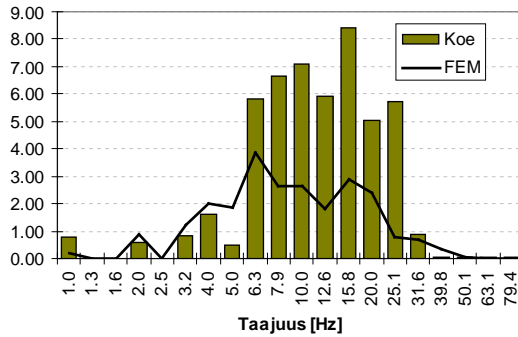
Kanava 1 (2 m)



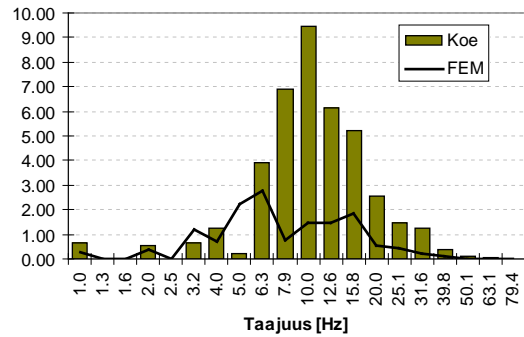
Kanava 2 (4 m)



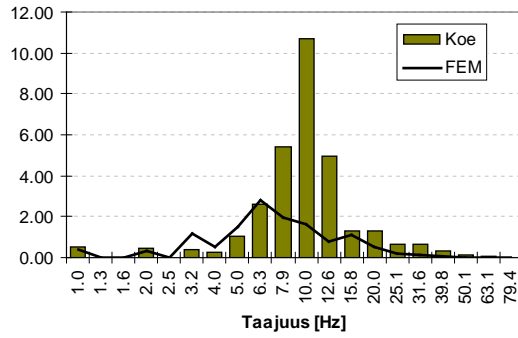
Kanava 4 (8 m)



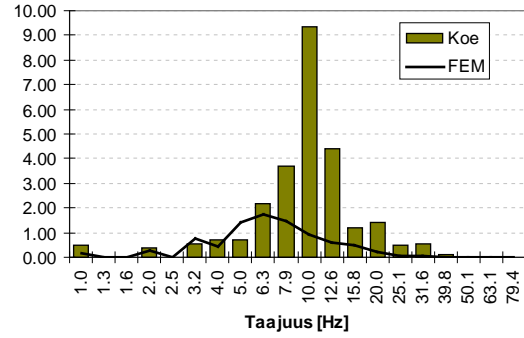
Kanava 8 (16 m)



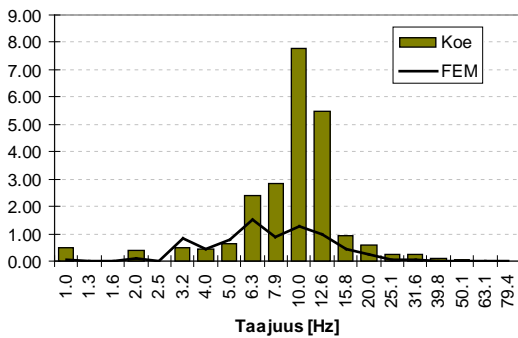
Kanava 12 (24 m)



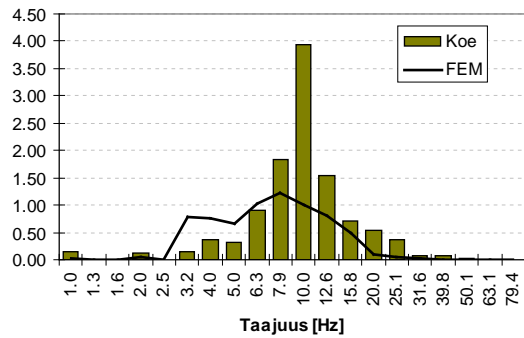
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

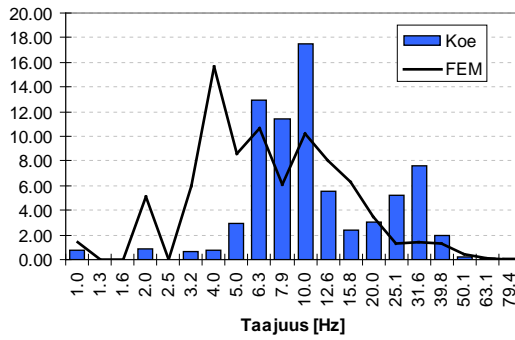


Kanava 24 (48 m)

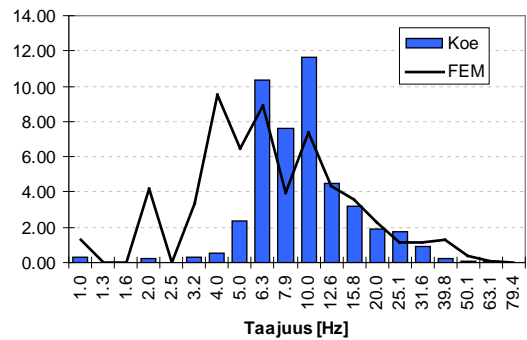


Töyssy 3, Z-suunta

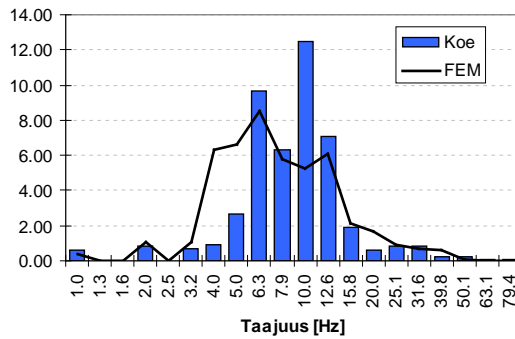
Kanava 1 (2 m)



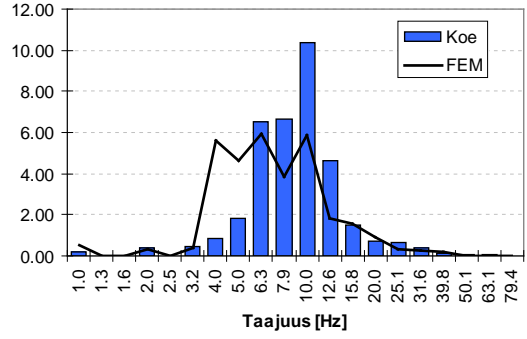
Kanava 2 (4 m)



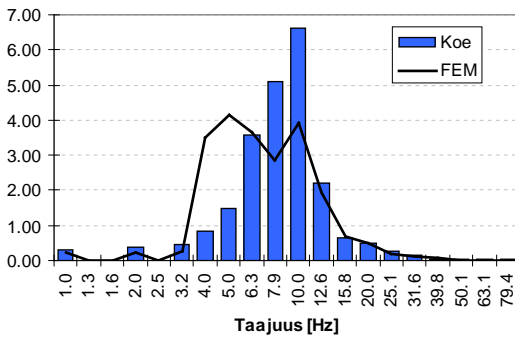
Kanava 4 (8 m)



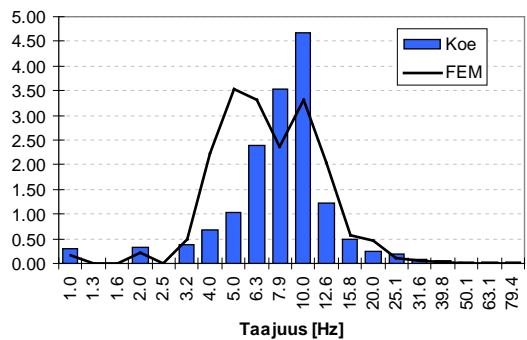
Kanava 8 (16 m)



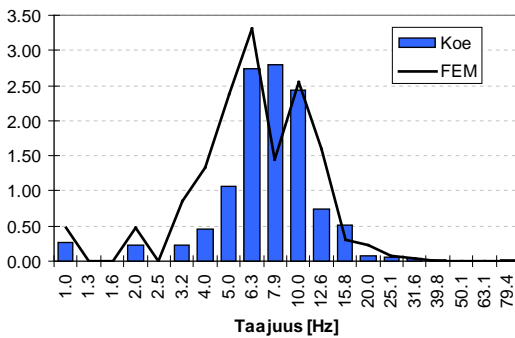
Kanava 12 (24 m)



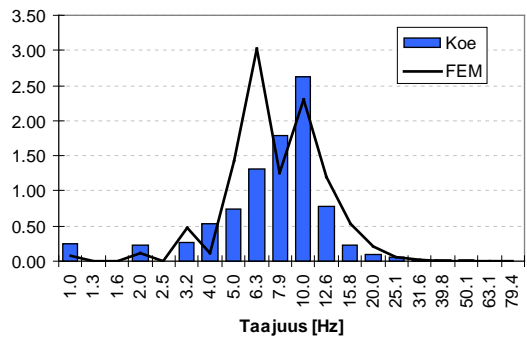
Kanava 16 (32 m)



Kanava 20 (40 m)

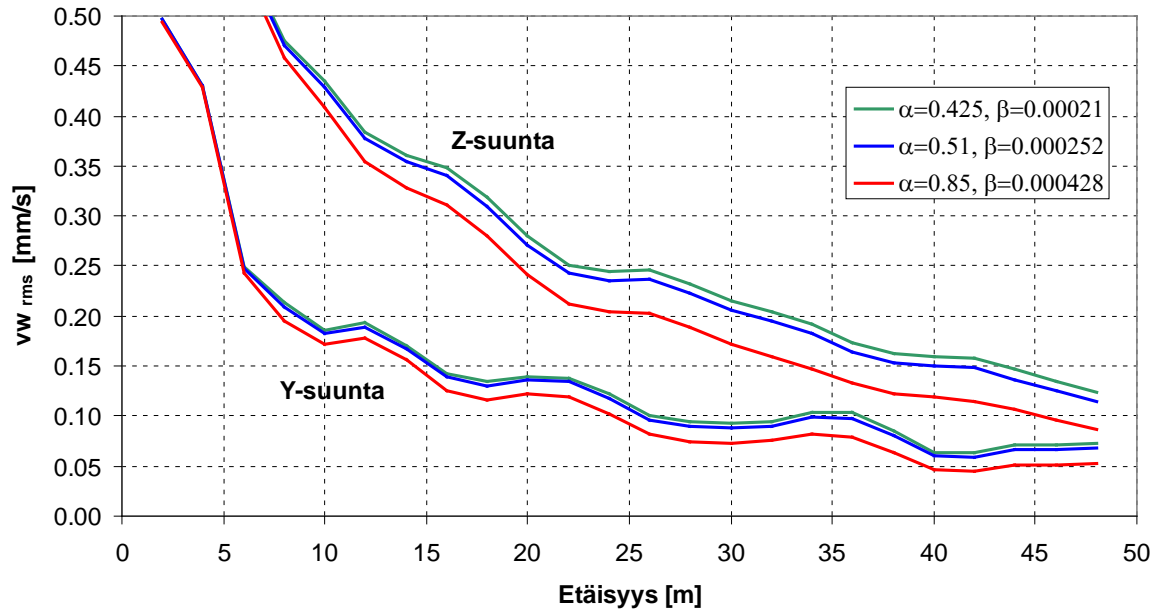


Kanava 24 (48 m)



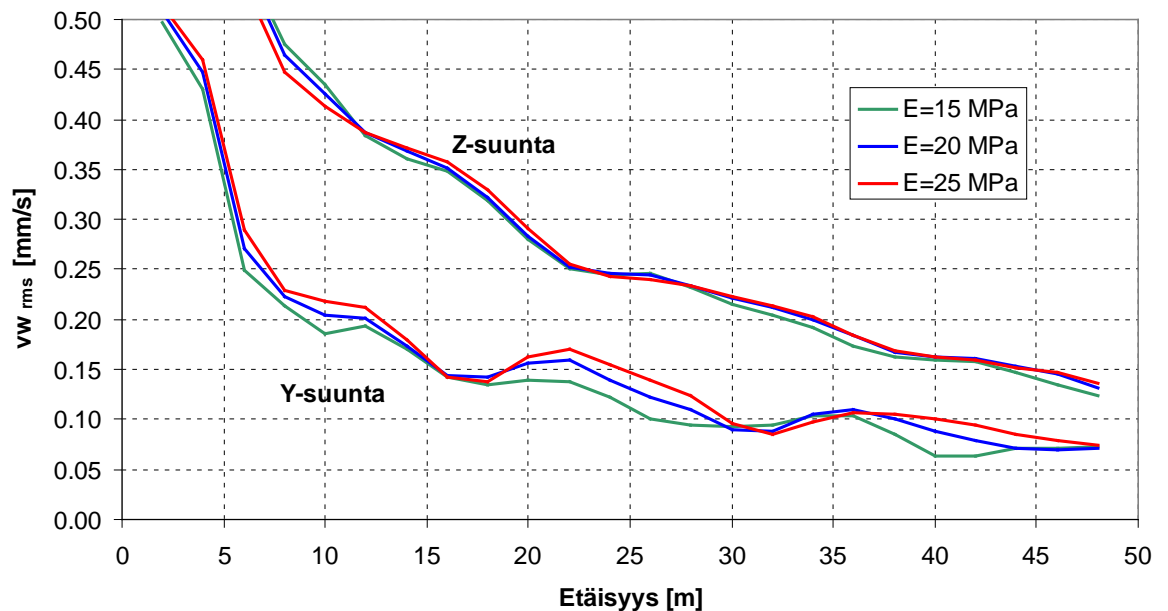
Liite 2 - Kalibroinnin herkkyytarkastelu

Vaimennuksen vaikutus



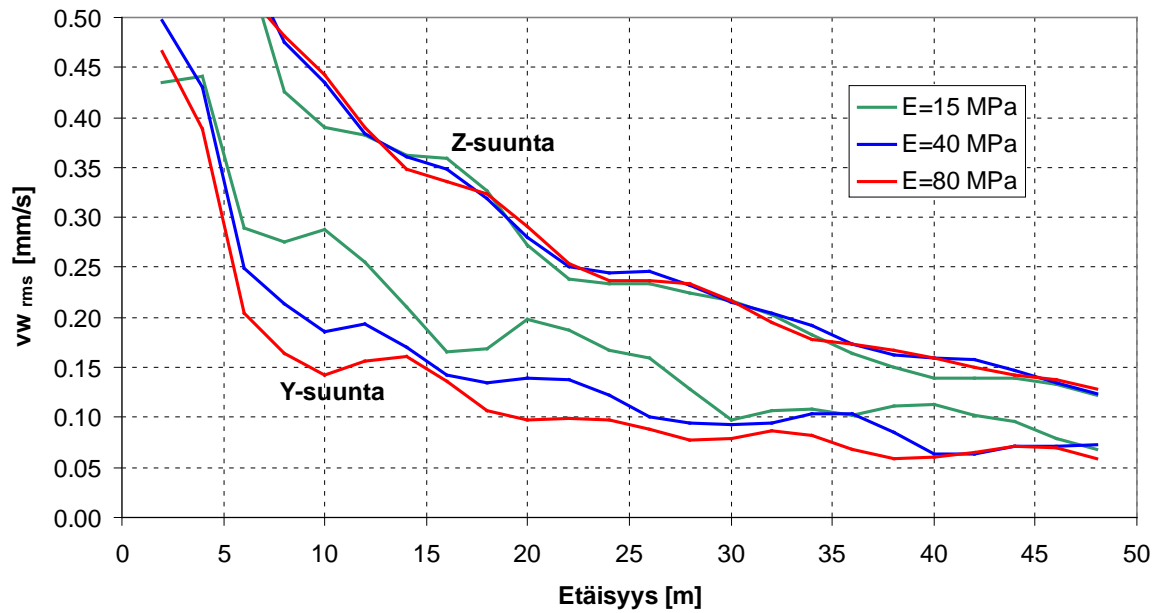
Kuva 22. Materiaalien vaimennuksen vaikutus värähtelyn vaimenemiseen ($Savi E = 15 \text{ MPa}$, muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Saven kimmomodulin vaikutus



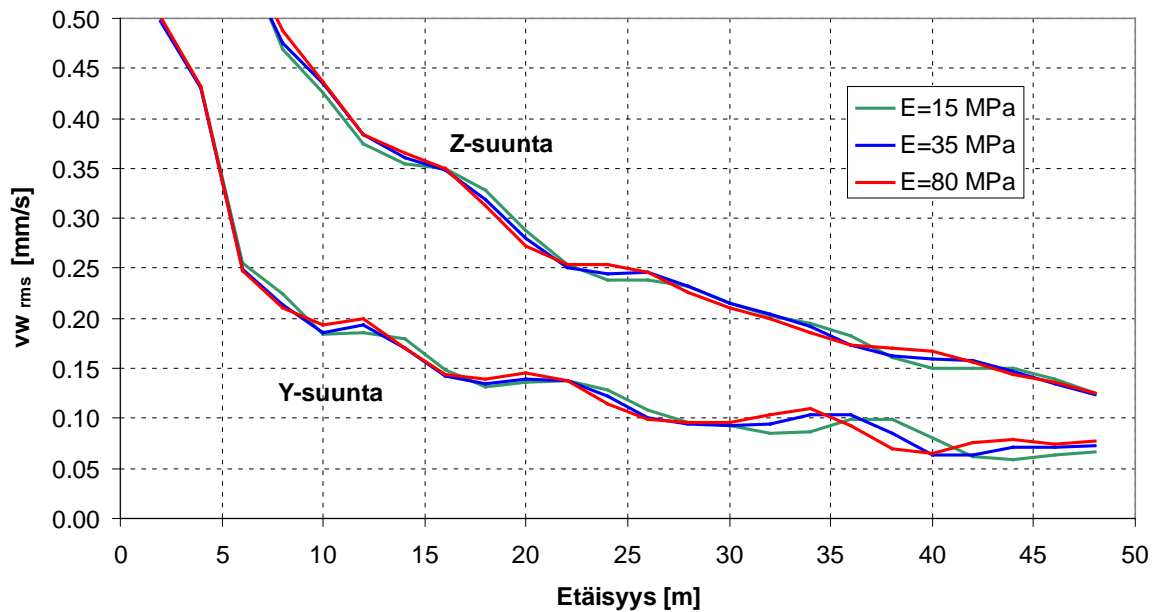
Kuva 23. Saven kimmomodulin vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Kuivakuorisaven kimmomodulin vaikutus



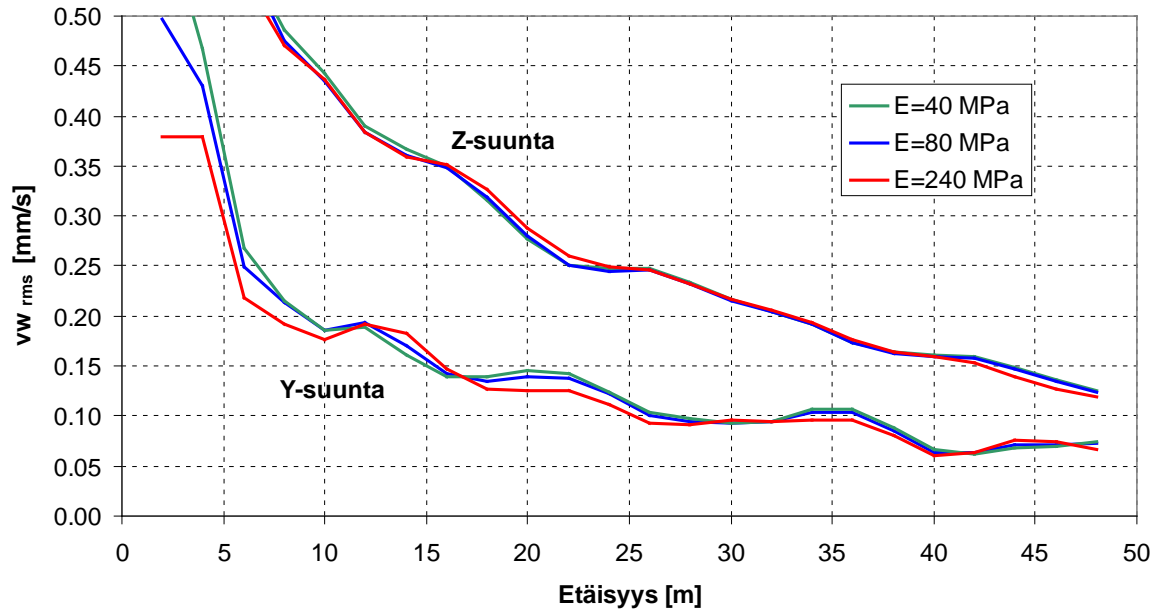
Kuva 24. Kuivakuorisaven kimmomodulin vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (Savi $E = 15$ MPa, muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Siltin kimmomodulin vaikutus



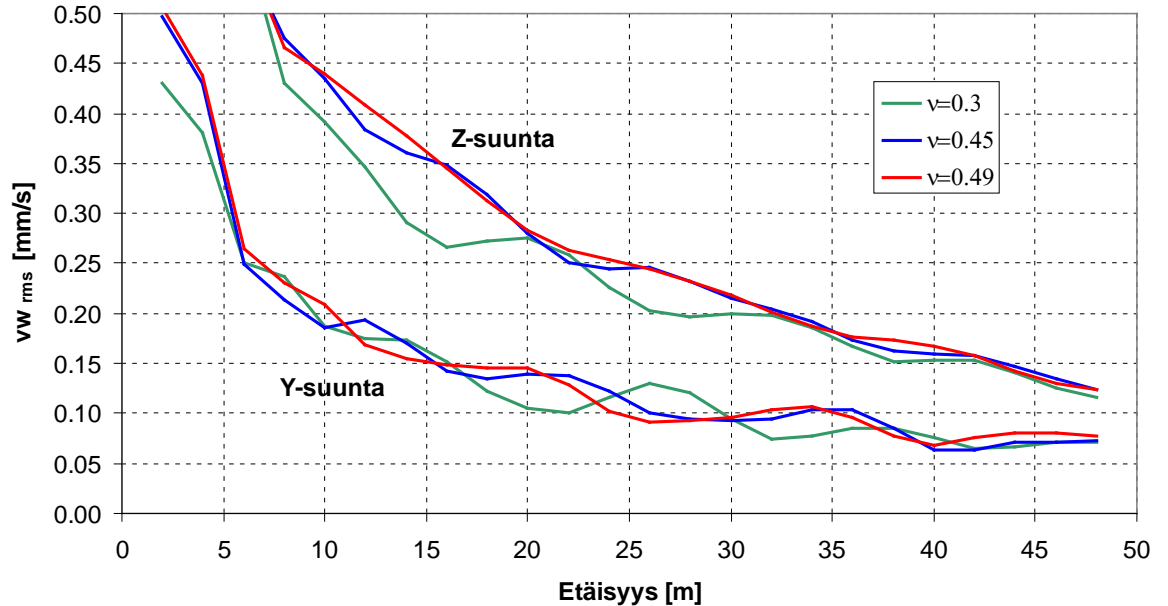
Kuva 25. Siltin kimmomodulin vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (Savi $E = 15$ MPa, muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Hiekan kimmomodulin vaikutus



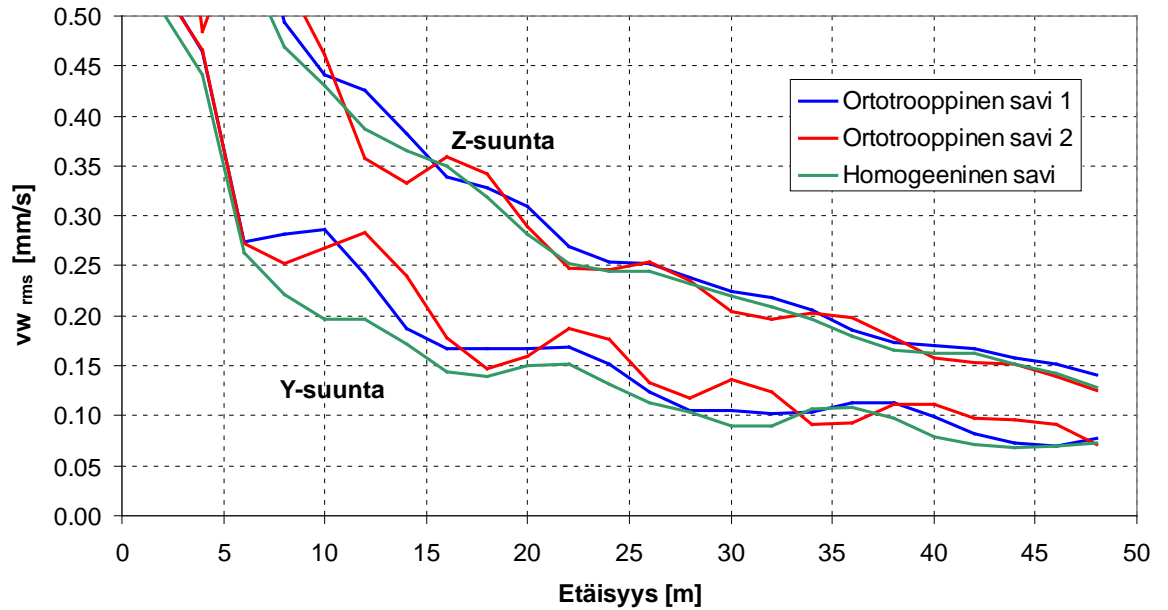
Kuva 26. Tiepenkereen (hiekkä) kimmomodulin vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Saven Poissonin luvun vaikutus



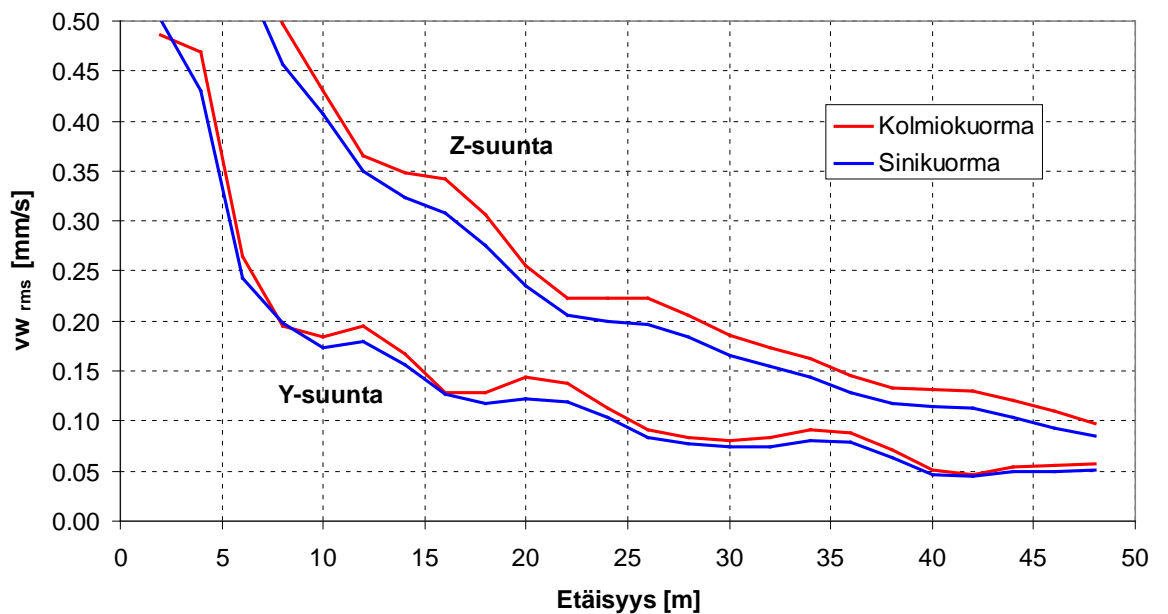
Kuva 27. Saven Poissonin luvun vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (Savi $E = 15$ MPa, muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Saven ortotrooppisuuden vaikutus



Kuva 28. Saven ortotrooppisuuden vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (Ortotrooppinen savi 1: vaakasuuntainen jäykkyys 67 % pystysuuntaisesta, Ortotrooppinen savi 2: vaakasuuntainen jäykkyys 50 % pystysuuntaisesta, muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

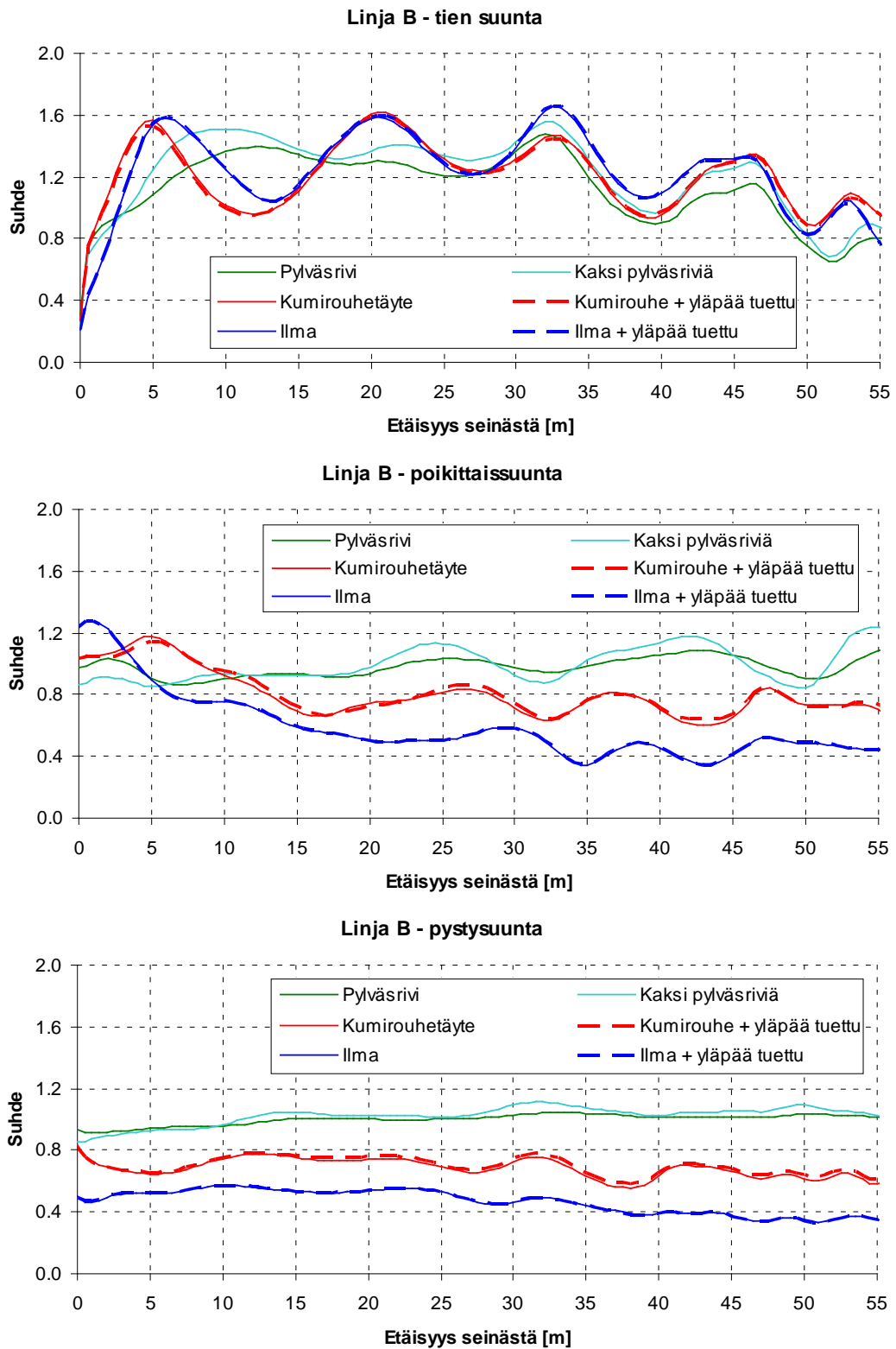
Kuormituksen muodon vaikutus



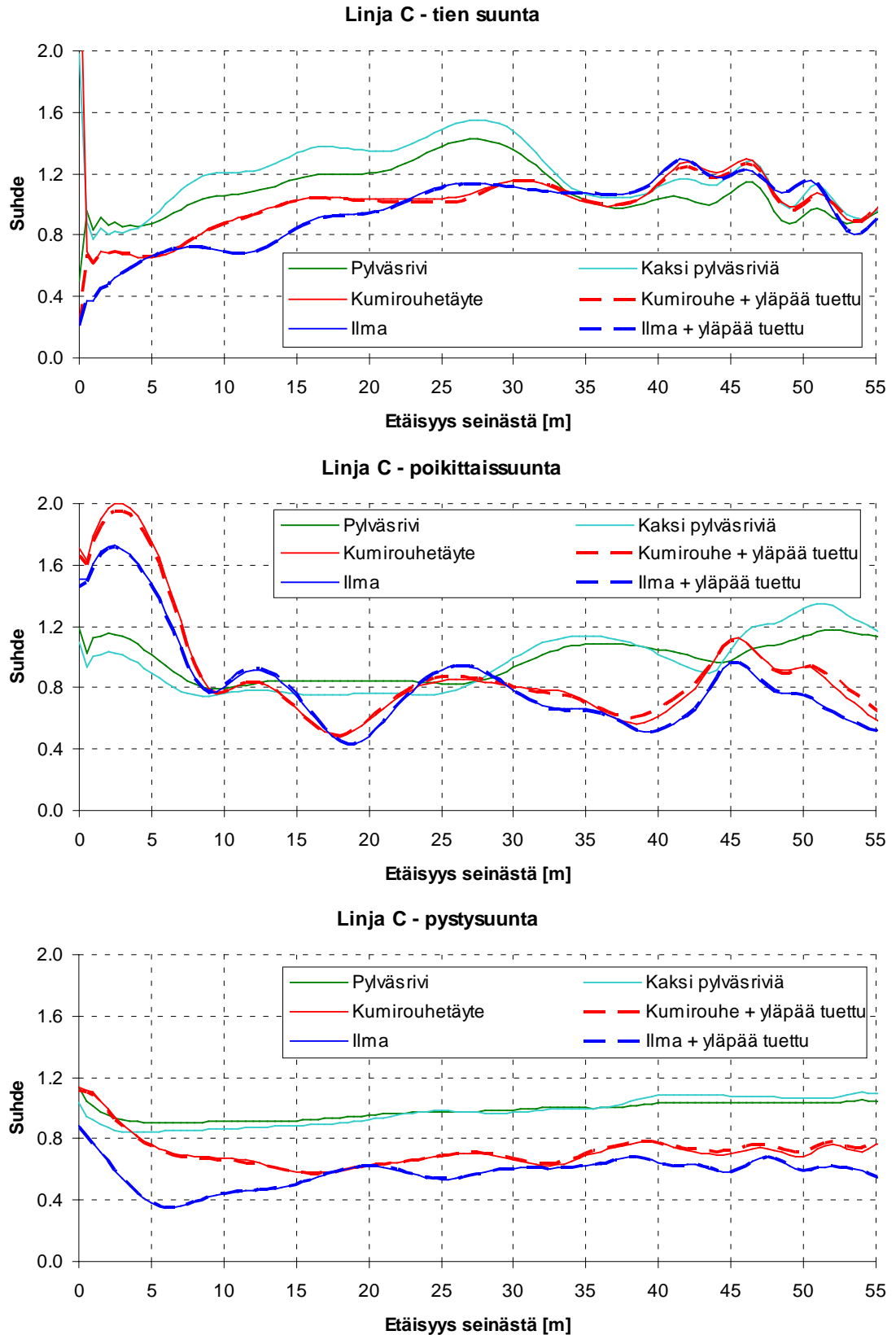
Kuva 29. Kuormituksen muodon ja keston vaikutus värähtelyn vaimenemiseen (Savi $E = 15 \text{ MPa}$, $\alpha = 1.2$ $\beta = 0,00028$, muut parametrit taulukon 3 mukaisia).

Liite 3 - Tärinäesteiden vaimentava vaikutus

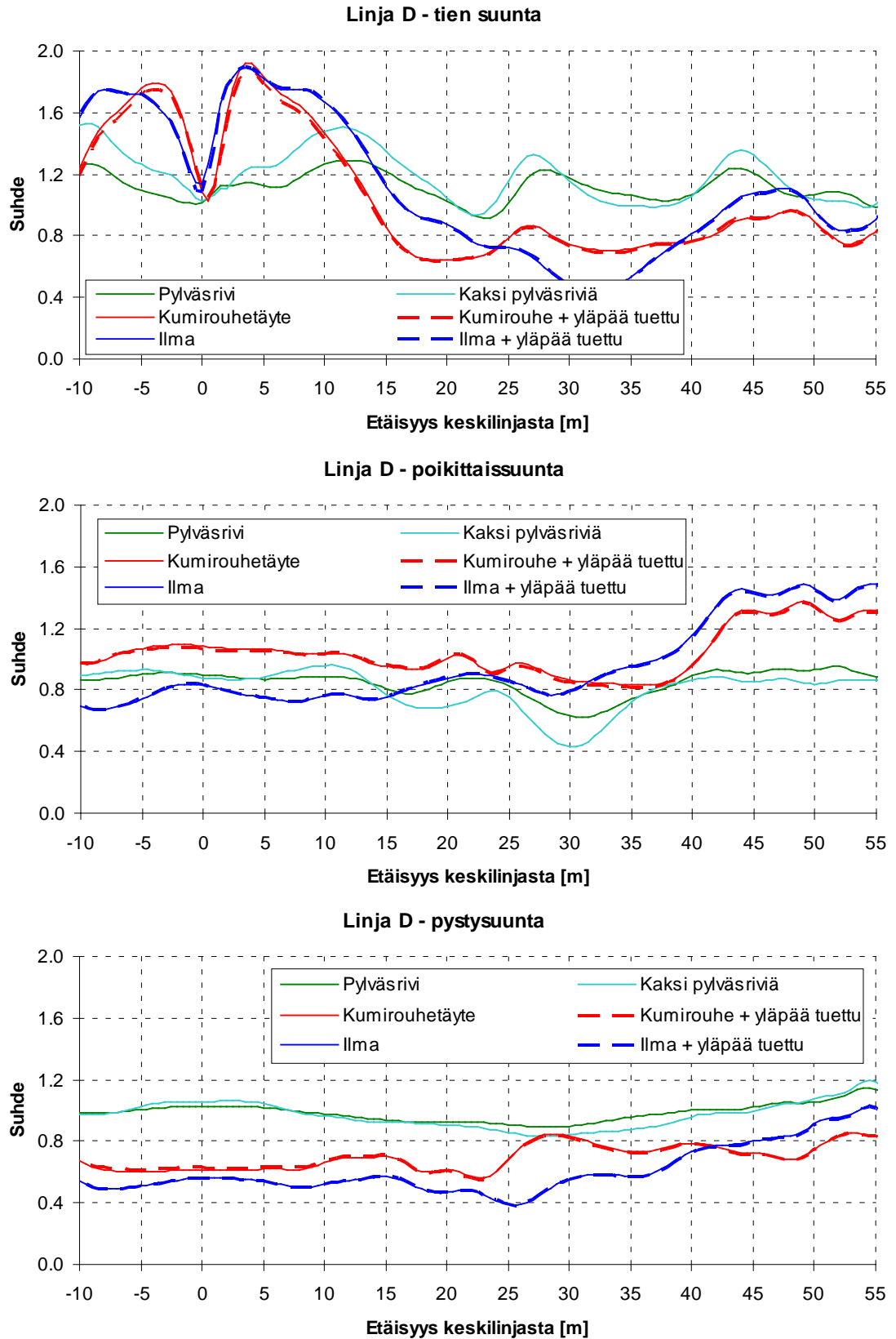
Suhteelliset arvot, tehollisarvo esteen takana verrattuna ilman estettä olevaan tapaukseen. Linjat B - D.



Kuva 30. Tärinäesteiden vaikutus tehollisarvon vaimenemiseen, linja B. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



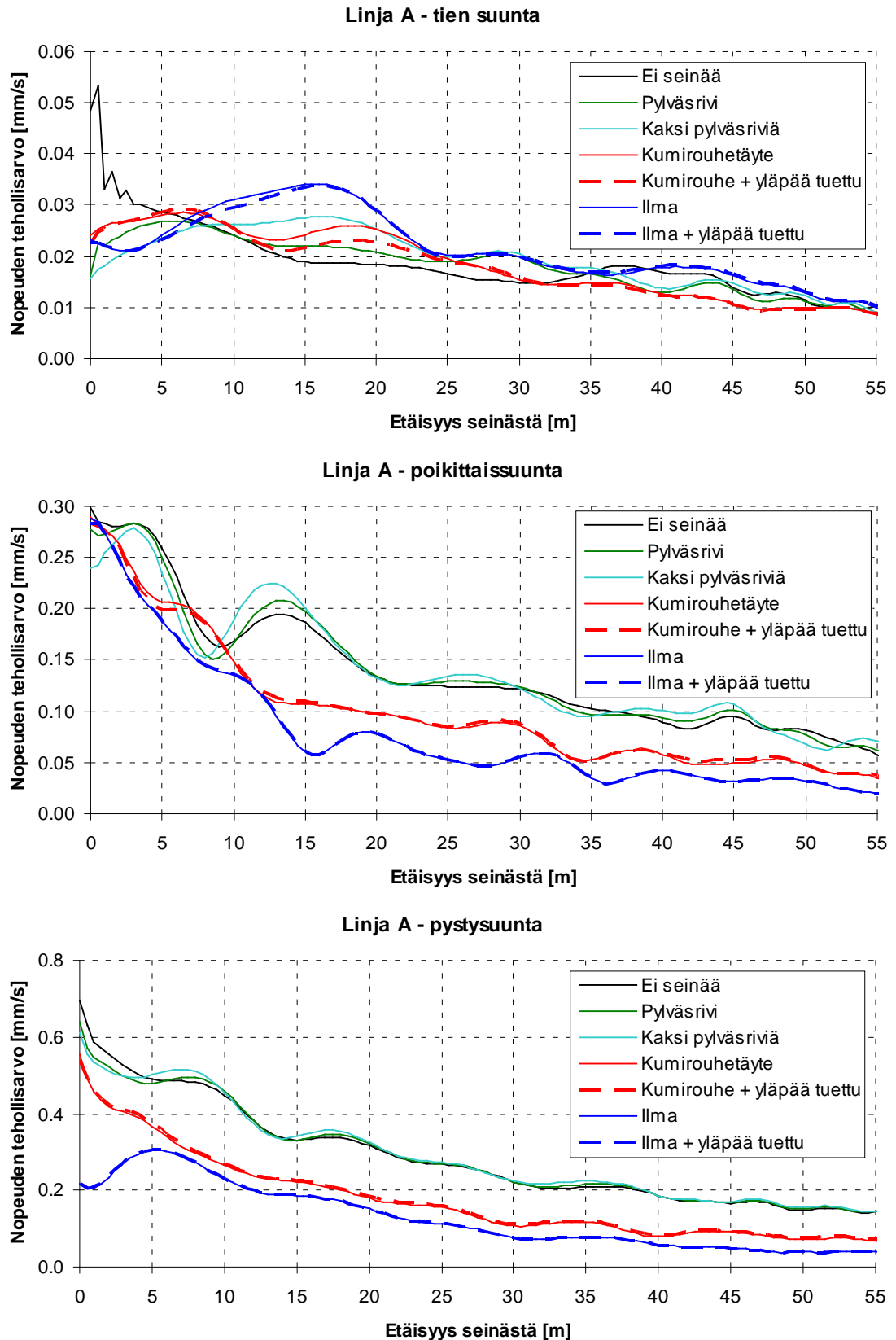
Kuva 31. Tärinäesteiden vaikutus tehollisarvon vaimenemiseen, linja C. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



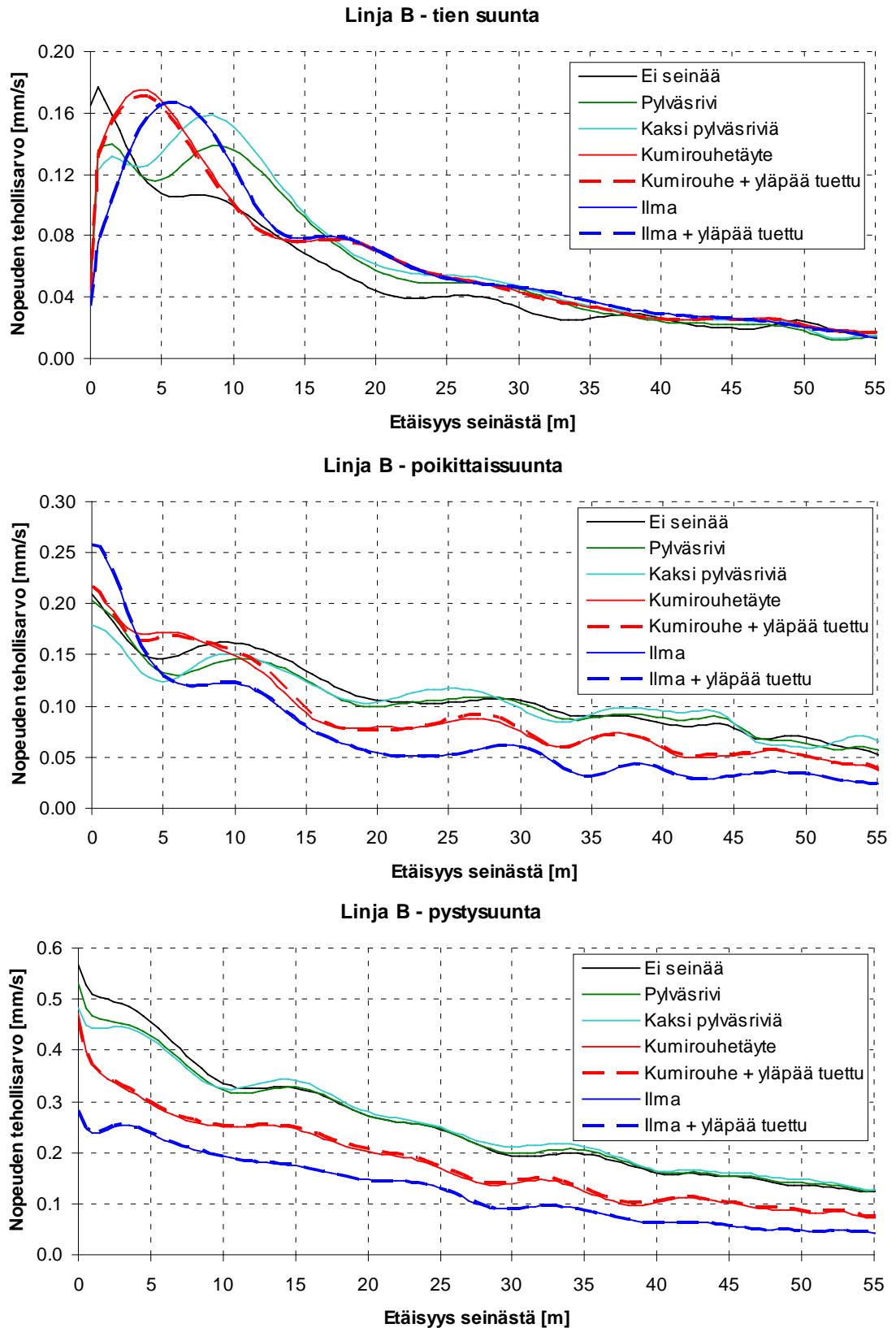
Kuva 32. Tärinäesteiden vaikutus tehollisarvon vaimenemiseen, linja D. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.

Liite 4 - Tärinäesteiden vaikutus tehollisarvoon

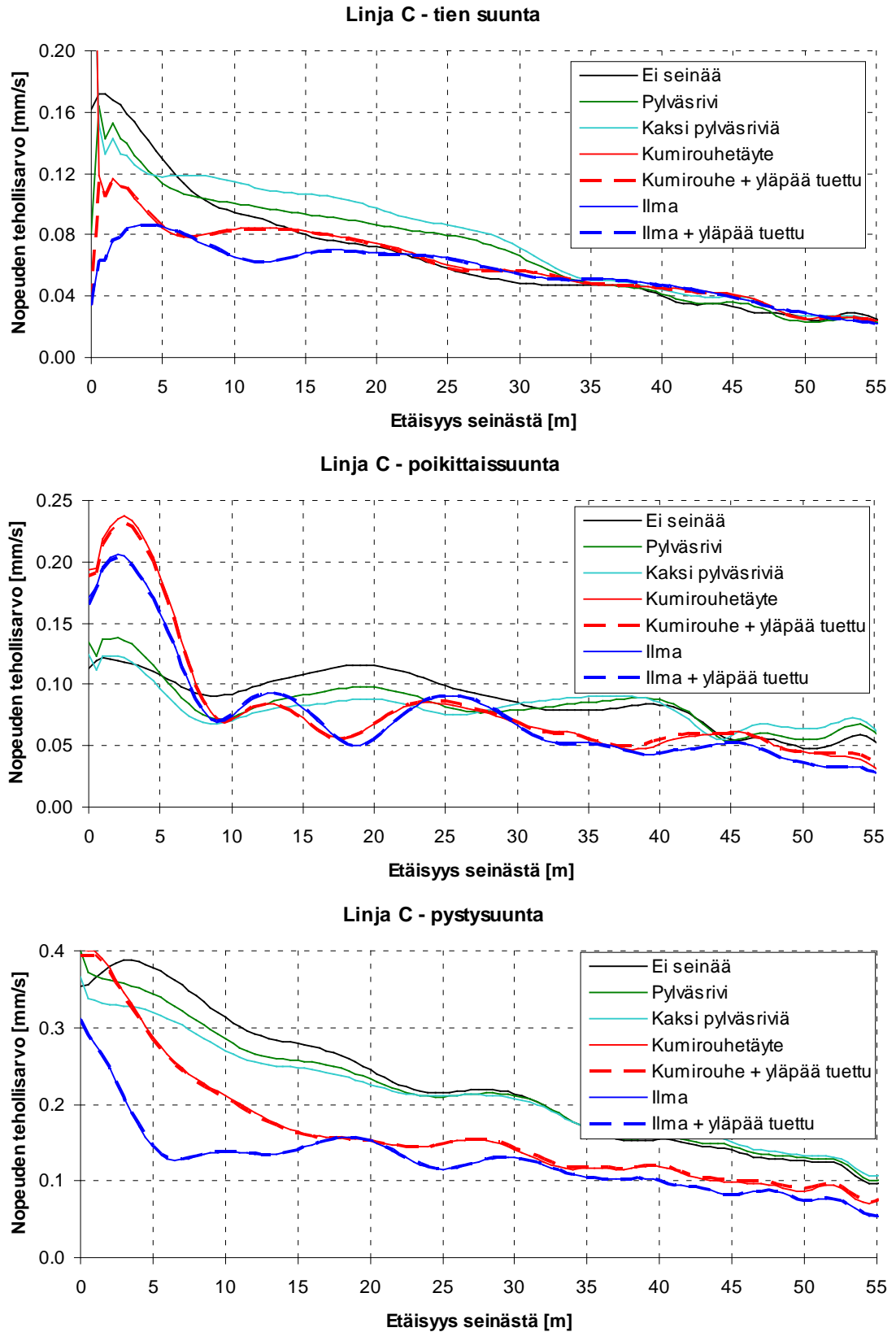
Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo, yksikkö mm/s.



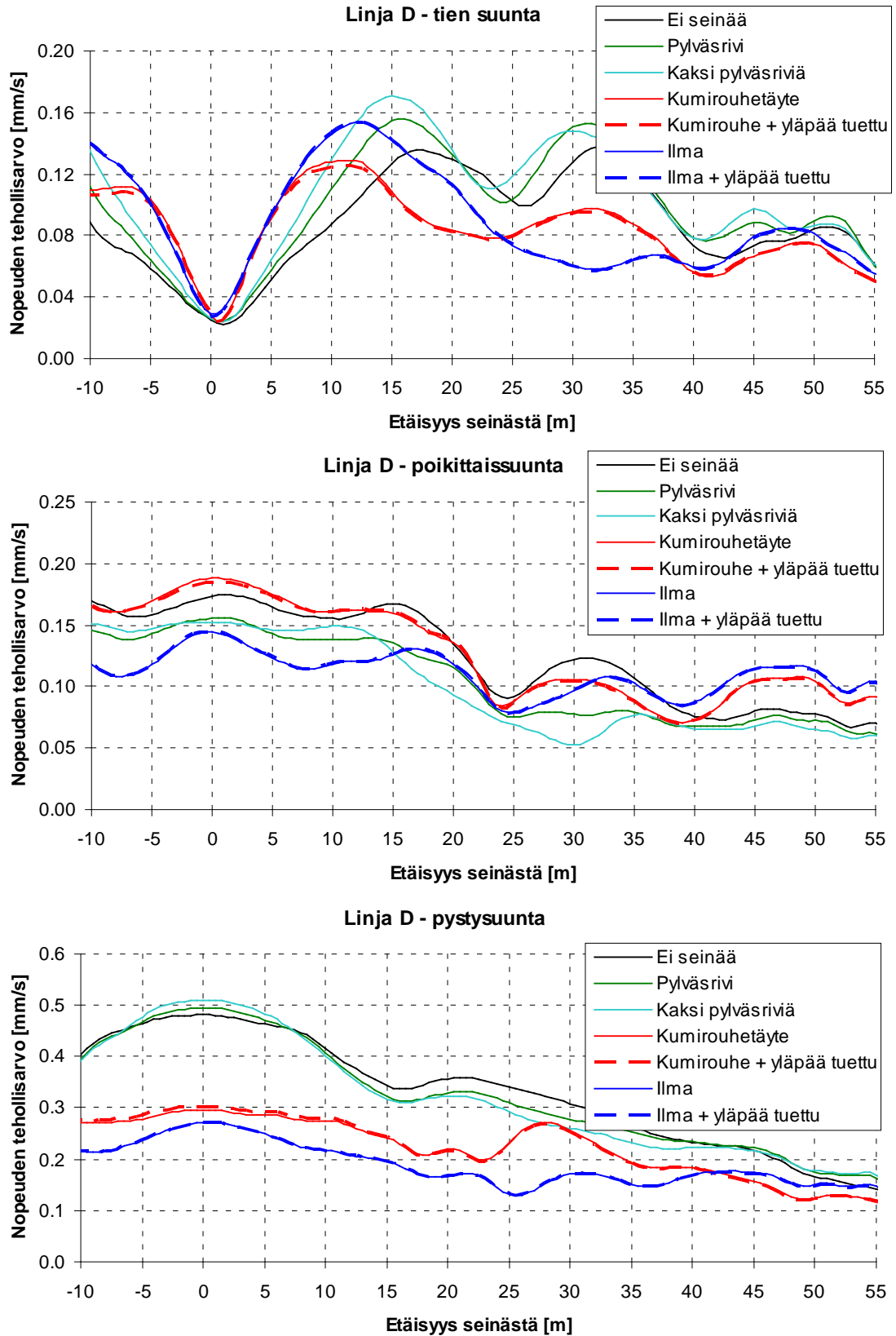
Kuva 33. Taajuuspainotettu tehollisarvo ilman tärinäestettä ja erilaisilla tärinäesteillä, linja A. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



Kuva 34. Taajuuspainotettu tehollisarvo ilman tärinäestettä ja erilaisilla tärinäestteillä, linja B. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



Kuva 35. Taajuuspainotettu tehollisarvo ilman tärinäestettä ja erilaisilla tärinäes-teillä, linja C. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



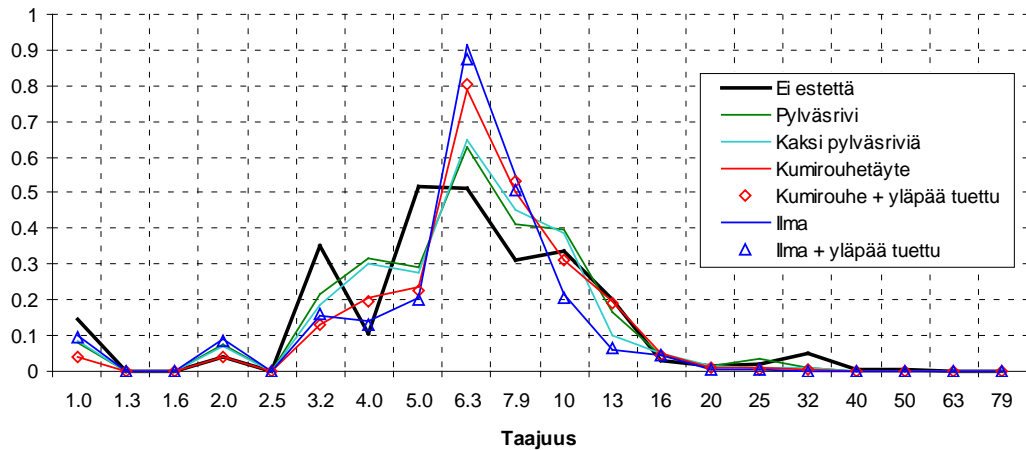
Kuva 36. Taajuuspainotettu tehollisarvo ilman tärinäestettä ja erilaisilla tärinäes-teillä, linja D. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.

Liite 5 - Tärinäesteen vaikutus värähtelyn taajuusjakaumaan

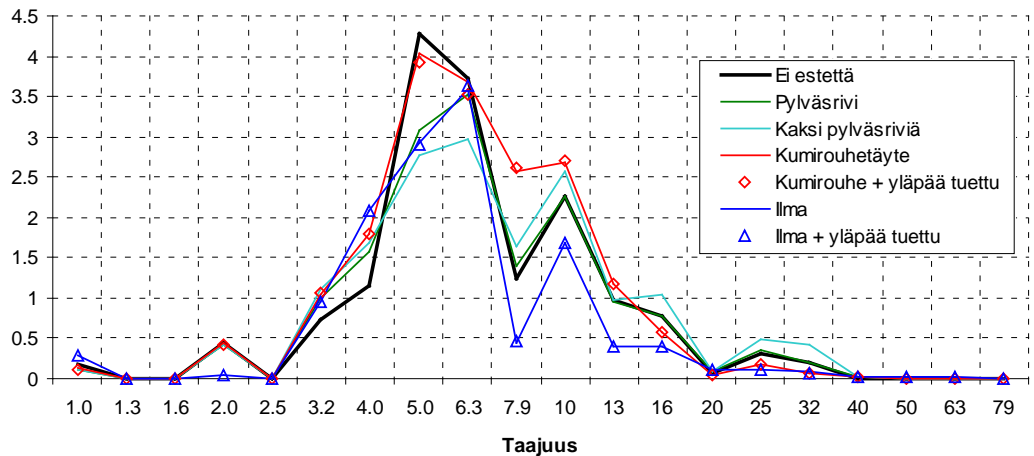
Taajuuspainotettu kiihtyvyyden tehollisarvo, yksikkö mm/s^2 . Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo (mm/s) saadaan jakamalla arvot tekijällä 35,7.

Linja A, etäisyys 8 m

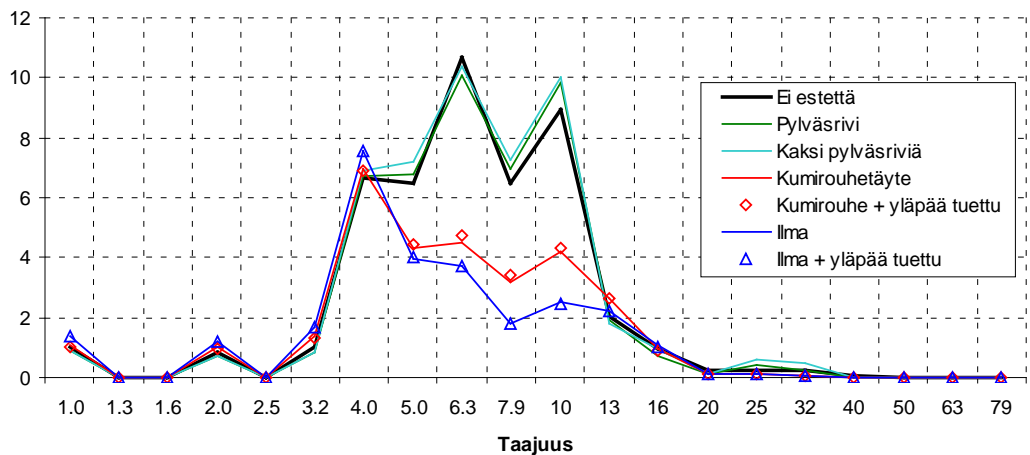
Taajuusjakauma tien suunta - 8 m



Taajuusjakauma poikittaissuunta - 8 m

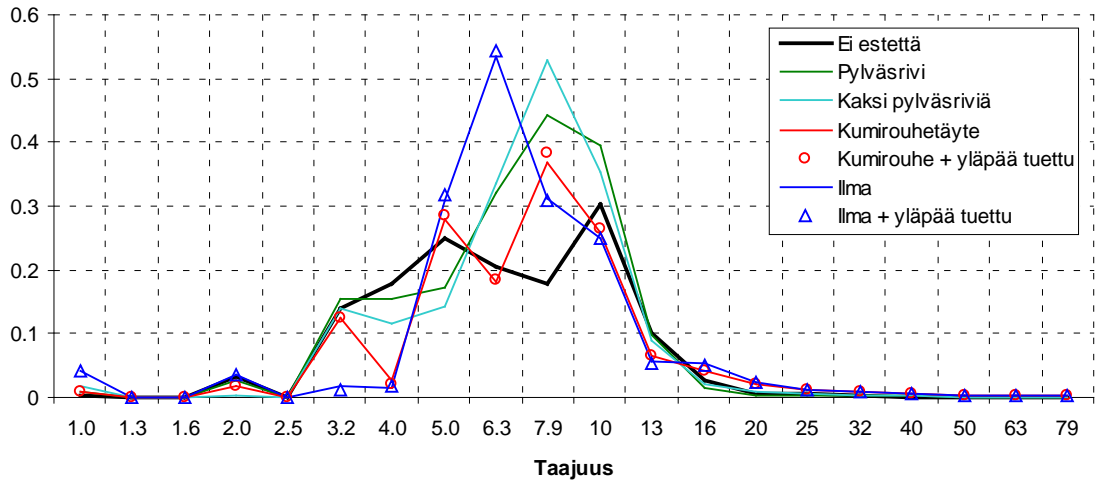


Taajuusjakauma pystysuunta - 8 m

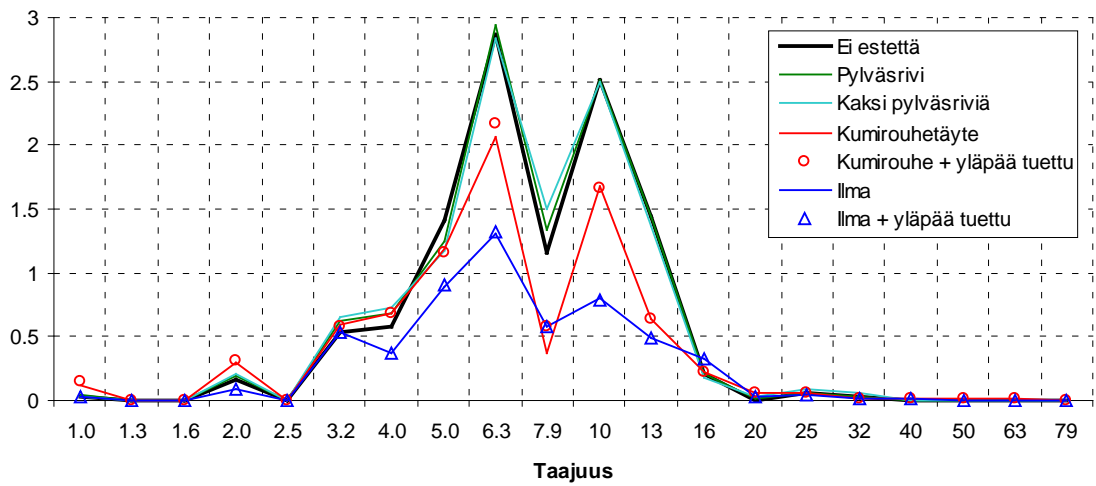


Linja A, etäisyys 30 m

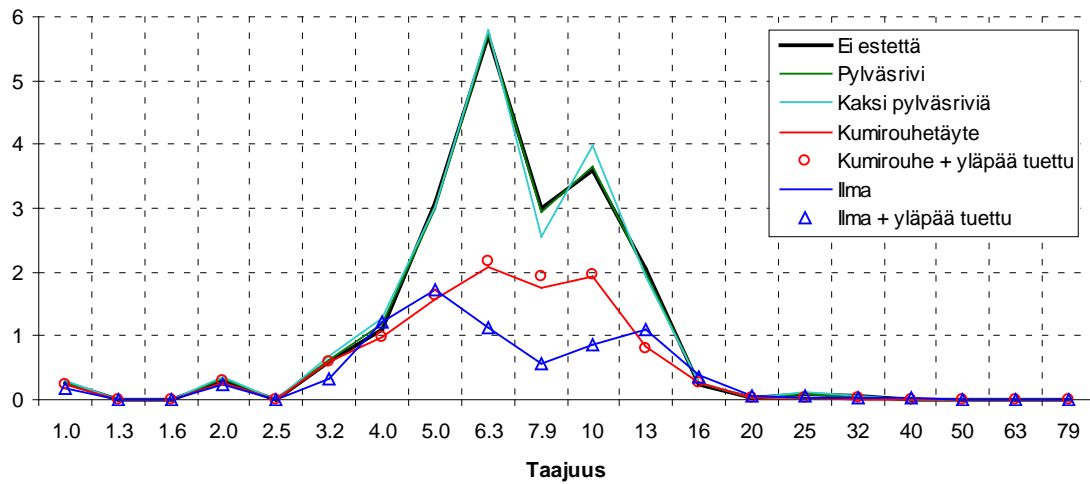
Taajuusjakauma tien suunta - 30 m



Taajuusjakauma poikittaissuunta - 30 m

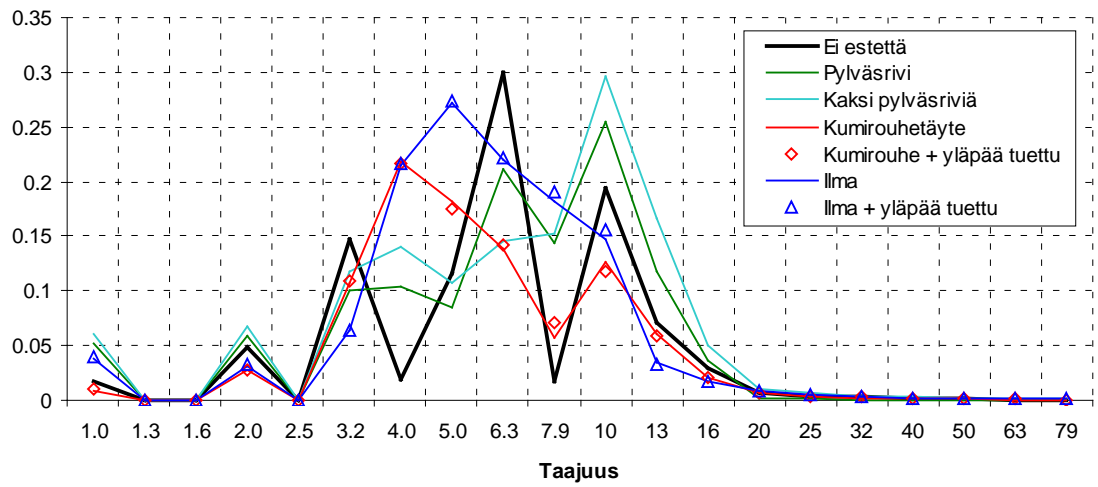


Taajuusjakauma pystysuunta - 30 m

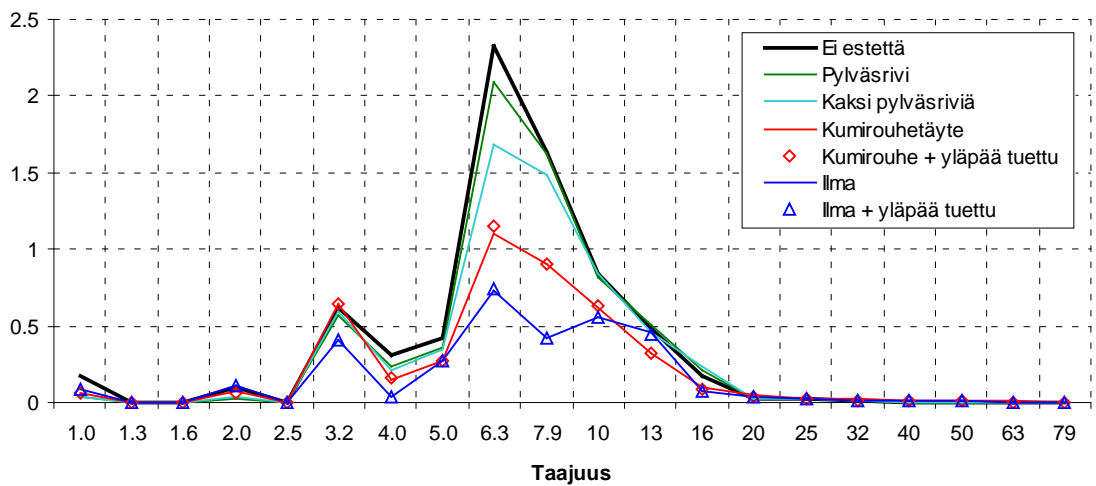


Linja A, etäisyys 50 m

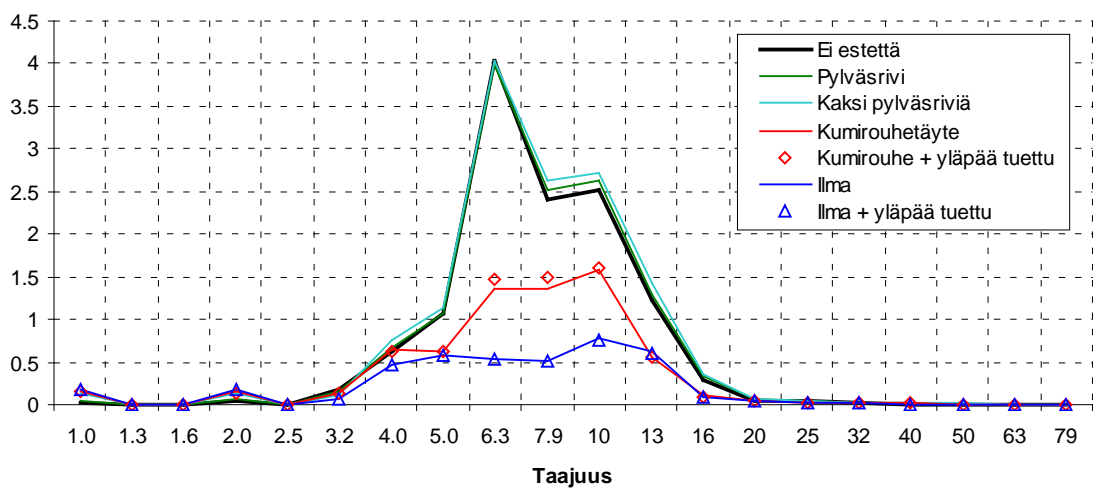
Taajuusjakauma tien suunta - 50 m



Taajuusjakauma poikittaissuunta - 50 m

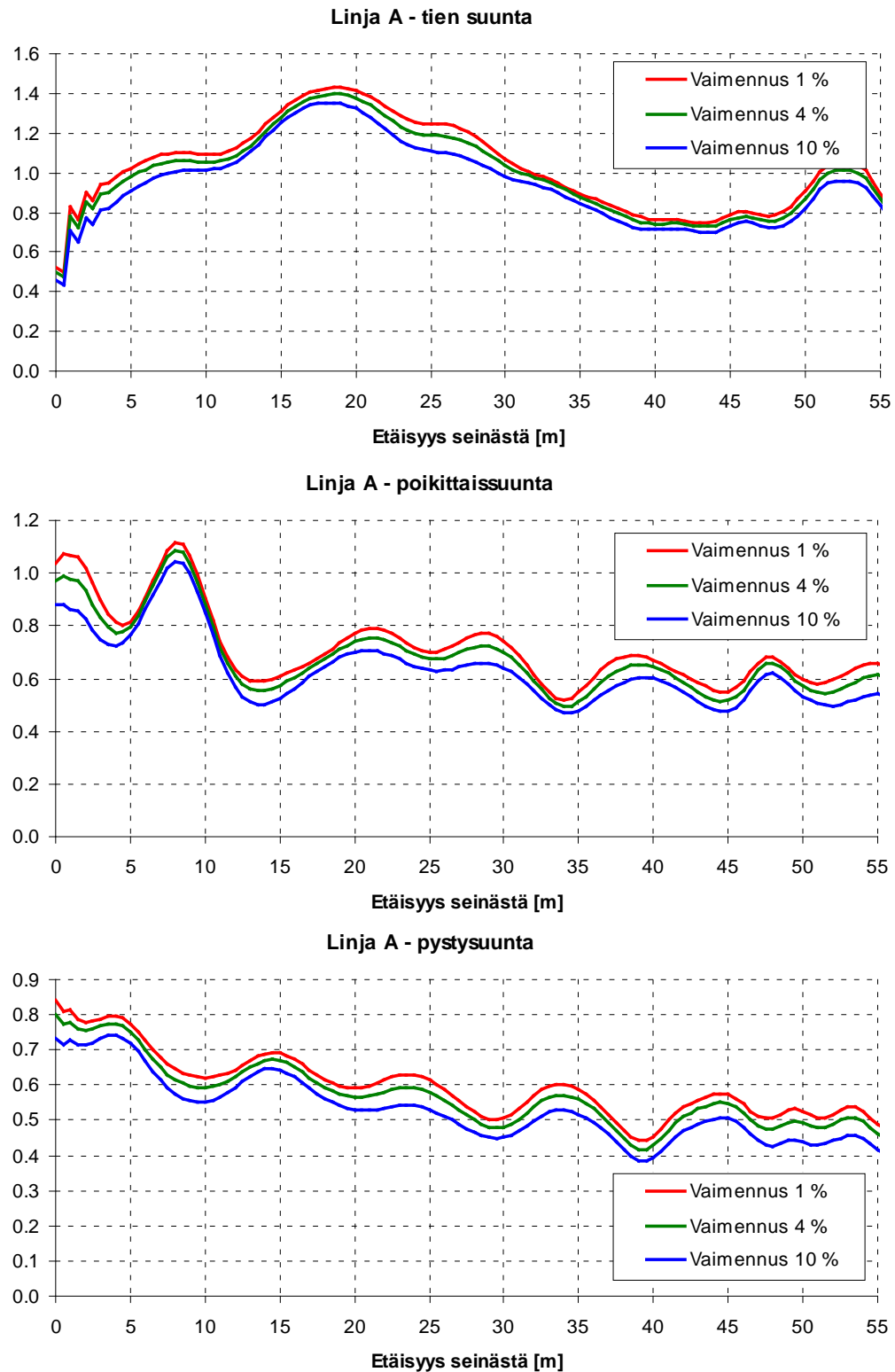


Taajuusjakauma pystysuunta - 50 m

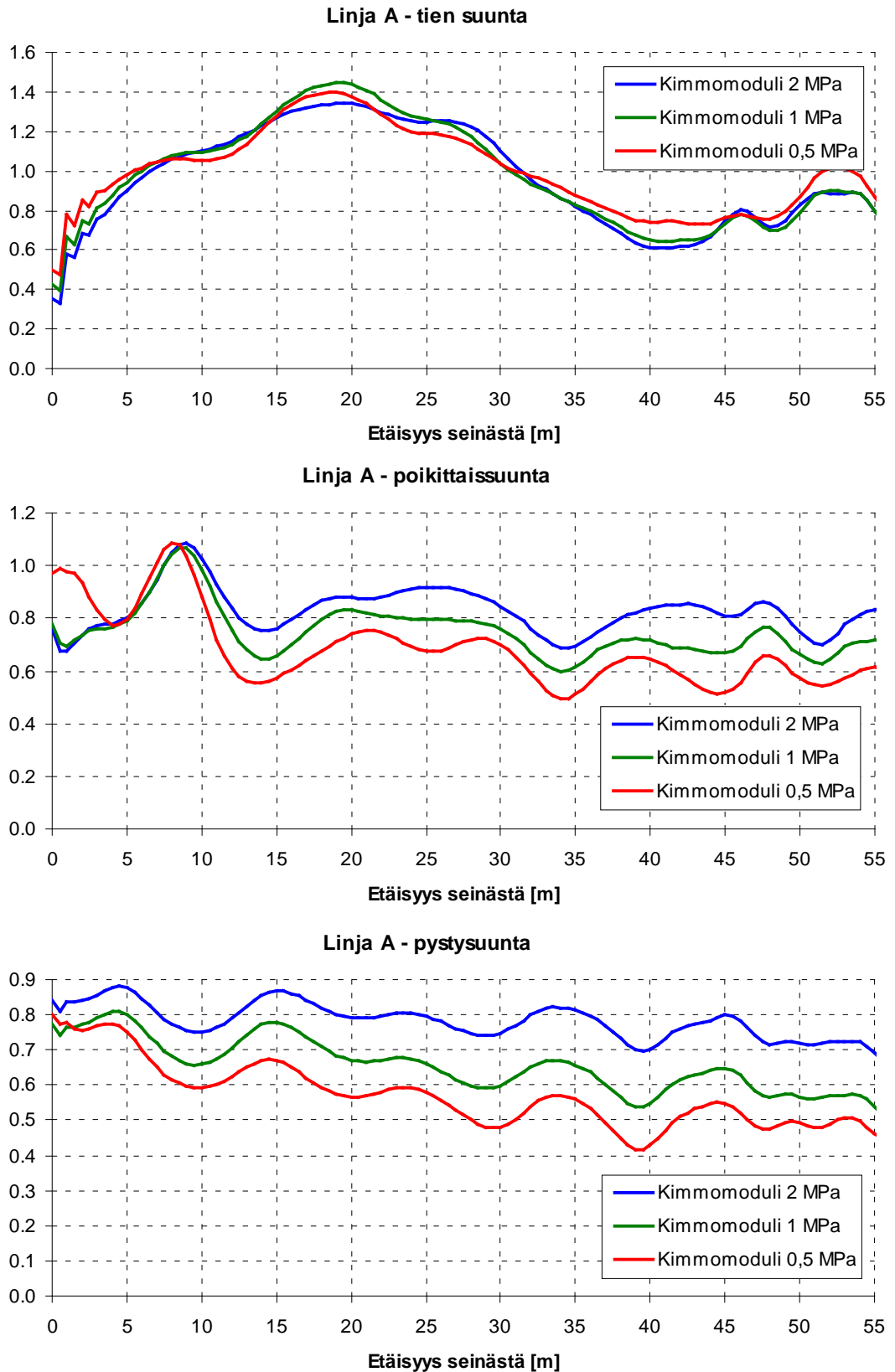


Liite 6 - Kumirouheen ominaisuuksien vaikutus

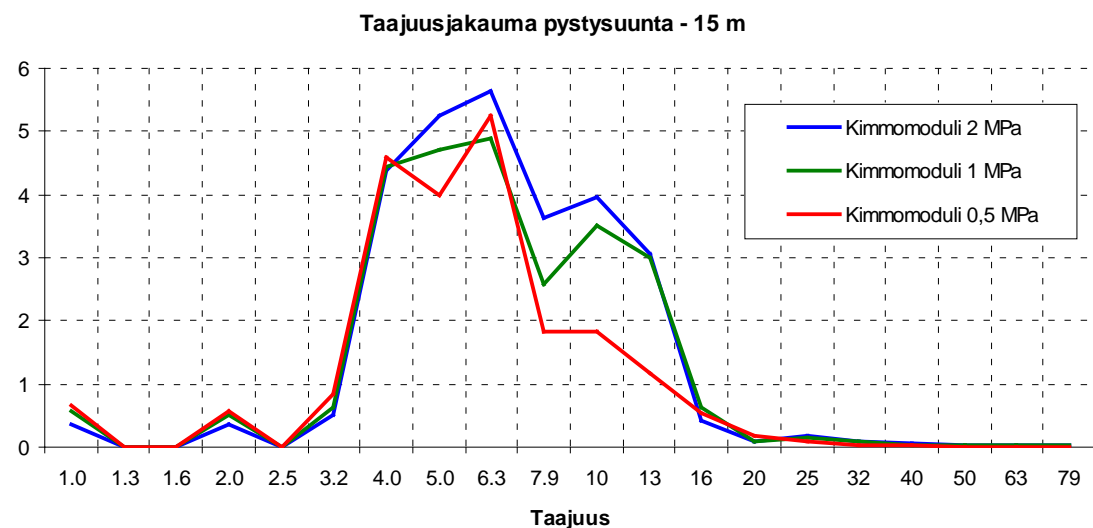
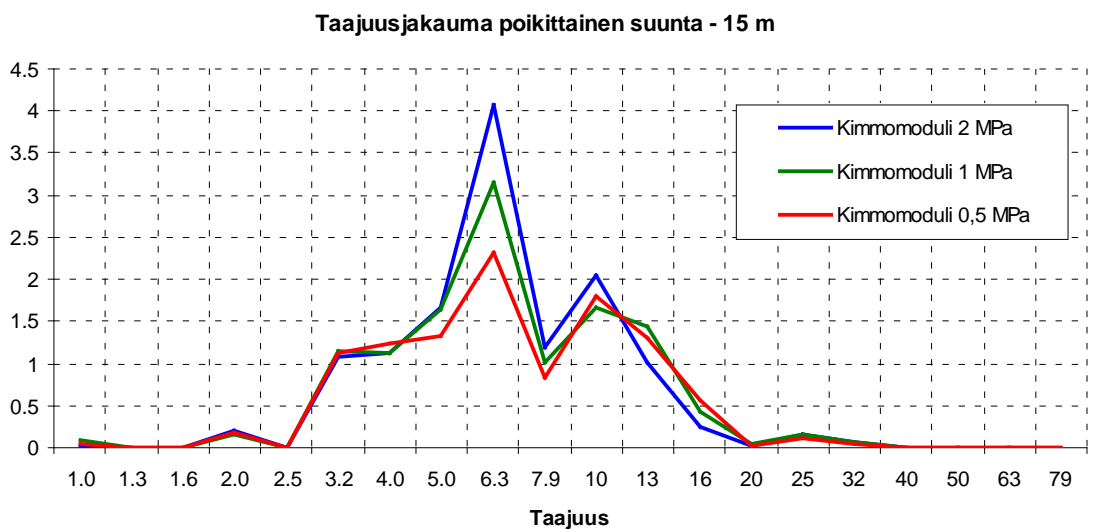
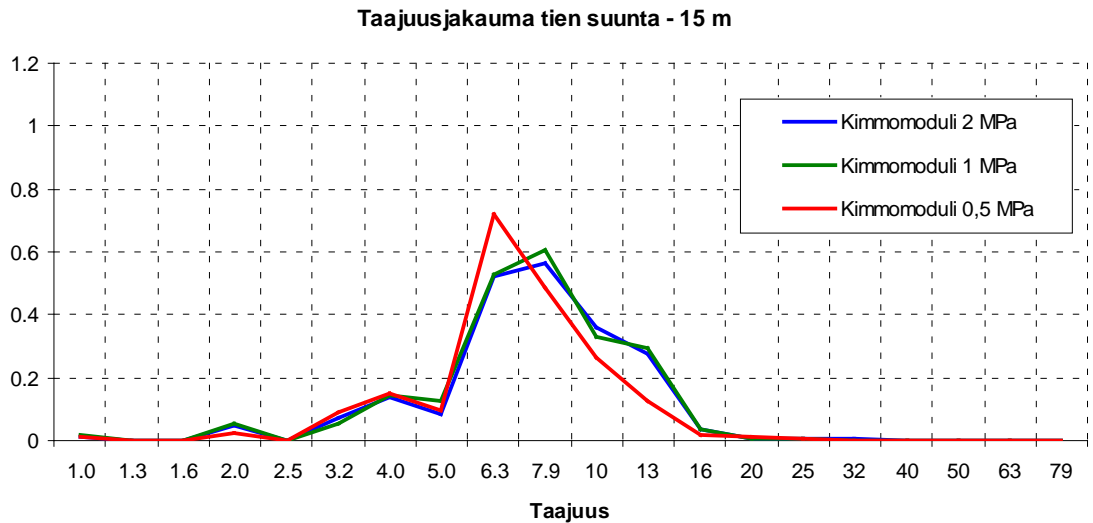
Kuvissa 37 ja 38 tulokset on esitetty suhteellisina arvoina. Kuvassa 39 tulokset on esitetty taajuuspainotettuina kiihtyvyyden tehollisarvoina, yksikkö mm/s^2 . Linja A.



Kuva 37. Tärinäeste kaksi pylväsriiviä ja kumirouhe. Kumirouheen vaimennuksen vaikutus tehollisarvoon suhteessa ilman estettä olevaan tapaukseen, linja A. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



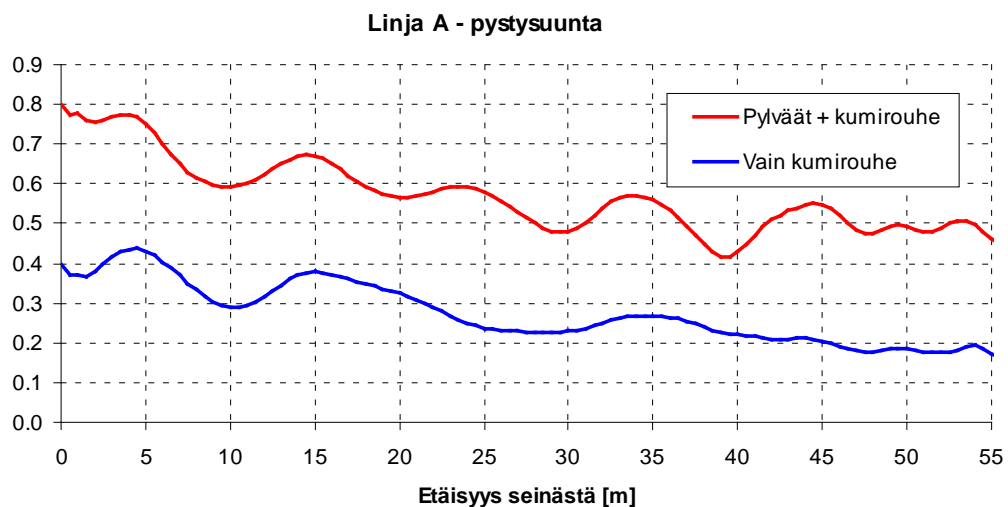
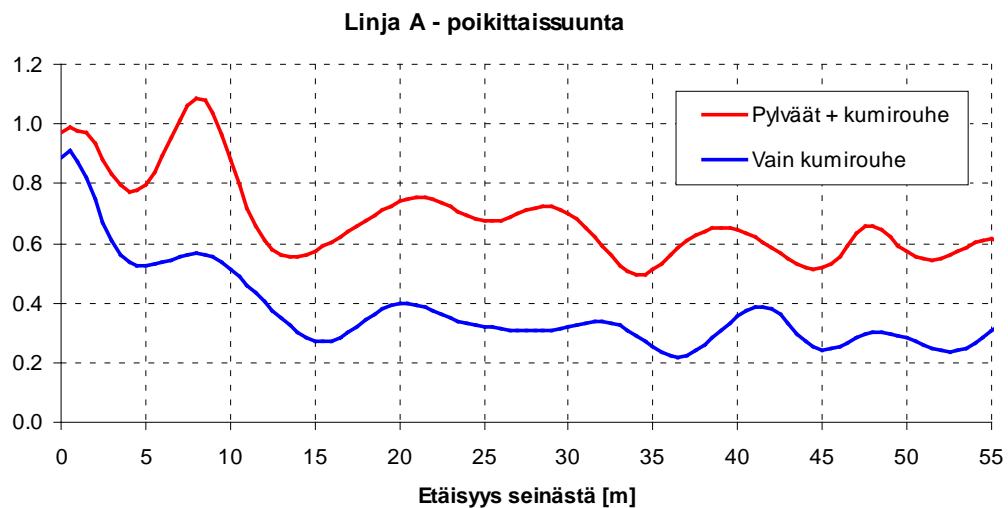
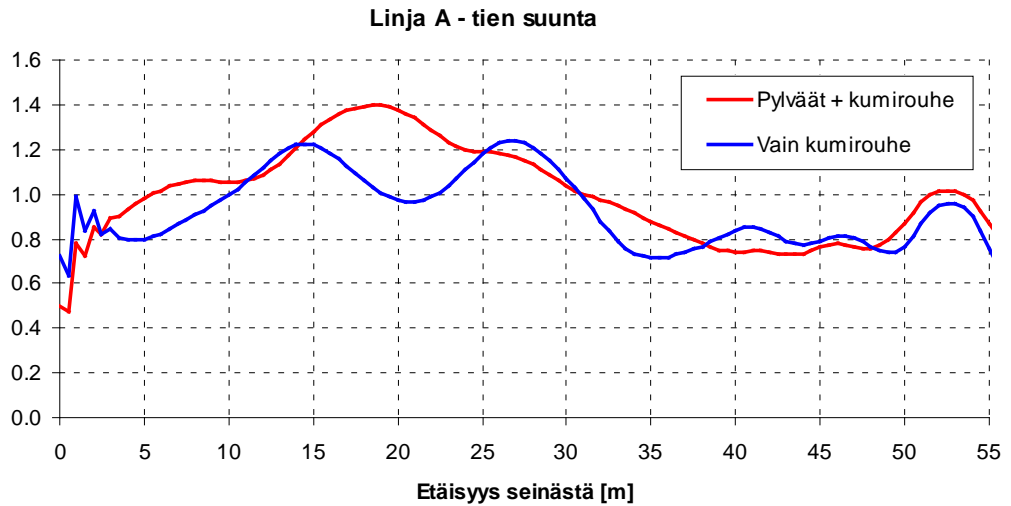
Kuva 38. Tärinäeste kaksi pylväsriiviä ja kumirouhe. Kumirouheen kimmomodulin vaikutus tehollisarvoon suhteessa ilman estettä olevaan tapaukseen, linja A. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.



Kuva 39. Tärinäeste kaksi pylväsriiviä ja kumirouhe. Kumirouheen kimmomodulin vaikutus taajuusjakaumaan, linja A. Y-akselilla taajuuspainotettu kiihtyvyyden tehollisarvo, yksikkö mm/s^2 . Taajuuspainotettu nopeuden tehollisarvo (mm/s) saadaan jakamalla arvot tekijällä 35,7. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.

Liite 7 - Tärinäeste ilman pylväsrivejä

Suhteelliset arvot, tehollisarvo esteen takana verrattuna ilman estettä olevaan tapaukseen. Linja A.



Kuva 40. Tärinäeste kumirouheella. Pylväsrivien vaikutus tehollisarvoon suhteessa ilman estettä olevaan tapaukseen, linja A. Ylhäällä x-, keskellä y- ja alhaalla z-suunta.