





Tärinäesteet liikennetärinän vaimentamisessa

Kirjoittajat: Asko Talja, Ludovic Fulop, Juha Kurkela, Ari Vepsä, Jouko Törnqvist

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Tärinäesteet liikennetärinän vaimentamisessa	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Projektin johtoryhmä, ks. alkusanat	Asiakkaan viite
Projektin nimi Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän vaimentamisessa	Projektin numero/lyhytnimi 22439/TÄRE
Raportin laatija(t) Asko Talja, Ludovic Fulop, Juha Kurkela, Ari Vepsä, Jouko Törnqvist	Sivujen lukumäärä 58 s.
Avainsanat traffic-induced vibration, vibration barrier, damping, FEM	Raportin numero VTT-R-00963-09
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena on ollut kehittää valmiuksia tärinäesteiden laskennallisten arviointimenetelmien käyttöön, selvittää erilaisten tärinäesteiden periaateratkaisujen toimivuuseroja, kehittää uusia tärinäesteratkaisuja ja arvioida niiden käyttömahdollisuuksia. Tutkimus painottuu sellaisiin esteisiin, jotka soveltuvat Suomessa ongelmallisimman, pehmeille savimaa-alueille tyypillisen matalataajuuksisen värähtelyn vaimentamiseen.</p> <p>Raportin johdannossa kuvataan, mitä liikennetärinä on ja miten se leviää maaperässä. Kirjallisuusselvityksellä ja FEM-laskennalla on haettu erilaisten tärinäestetyyppien toimivuuseroja. Tulosten avulla on ideoitu uusia tärinäesteratkaisuja ja arvioitu niiden käyttömahdollisuuksia.</p> <p>Laskettujen tulosten perusteella tärinäesteillä on vaikea saavuttaa yli 50 %:n pienennystä. Parhaita tuloksia on saavutettu huomattavasti savea pehmeämmillä, vähintään 4 m syvyyteen ulottuvilla pystysuorilla tärinäseinillä, tai vaihtoehtoisesti jäykistämällä väylän alapuolista maaperää. Aikaisemman koerakentamiseen perustuvan kokemuksen perusteella tärinää vaimentavat myös huomattavasti savea jäykemmistä materiaalilista valmistetut syvät, teräspon-teista tai pilaristabiloinnilla valmistetut tärinäseinät.</p> <p>Tulosten perusteella kehitetty uudentyypinen, kierrätykseen menevistä sähköpylväistä ja ren-gasrouheesta valmistettava tärinäseinä, jonka toimivuus ehdotetaan varmistettavaksi koe-rakentamisen avulla.</p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 31.12.2009 Laatija  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 savikkolaaksopainanteet, 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.

Tutkimuksessa on aluksi selvitetty kirjallisuuteen ja numeeriseen tarkasteluun perustuen erilaisten tärinäesteperiaatteiden toimivuuseroja. Tulosten avulla on kehitetty uusia tärinäestepäätöksiä ja arvioitu niiden toteuttamiskelpoisuutta. Lopuksi tuloksien perusteella on arvioitu tärinäesteiden tuotekehitys- ja koerakentamisvaiheen käynnistämismahdollisuutta.

Raportti liittyy VTT:n projektiin Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän vaimentamisessa (TÄRE, 2007–2009). Projektia on ohjannut rahoittajien edustajista ja asiantuntijoista koostuva johtoryhmä, johon ovat kuuluneet seuraavat henkilöt:

Tuomo Viitala	Ratahallintokeskus
Aarno Oinonen	Destia
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
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.

Julkaisun kohdat, jotka käsittelevät kirjallisuus- ja patenttiselvityksiä, perustuvat Juha Kurkelan tekemiin erilliselvityksiin. FEM-laskelmiin perustuvat erilaisten periaateratkaisujen vertailut perustuvat Ludovic Fulopin ja Ari Vepsän tekemiin erilliselvityksiin. Jouko Törnqvist on osallistunut uusien tuotteiden ideointiin sekä tehnyt koe-esteen

suunnitteluun ja rakentamisen liittyvät geotekniset arvioinnit. Asko Talja on kirjoittanut raportin muut kohdat ja koonnut tämän yhteenvetoraportin.

Kiitän projektin rahoittajia, johtoryhmän jäseniä ja kaikkia työn suorittamiseen osallistuneita henkilöitä. Erityinen kiitos kuuluu Matti Holtarille, joka on nähnyt paljon vaivaa raportissa ehdotetun koe-esteen rakentamisen käynnistämiseksi.

Espoo 31.12.2009

Asko Talja

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1. Johdanto.....	5
1.1 Mitä liikennetärinä on.....	5
1.2 Aikaisemmat tutkimukset.....	6
1.3 Maaperän tärinän luonne.....	7
1.4 Tärinäesteen toiminta.....	8
1.5 Tutkimuksen rajaus.....	9
2. Kirjallisuus- ja patenttiselvitykset.....	11
2.1 Suomessa kokeillut ratkaisut.....	11
2.2 Kirjallisuusselvitys.....	13
2.2.1 Radan tai rakennuksen tärinäeristys.....	14
2.2.2 Radan tai rakennuksen maapohjan jäykistäminen.....	14
2.2.3 Pystysuorat tärinäseinät.....	15
2.3 Tärinäseiniin liittyvät patentit.....	16
3. Tärinäesteiden laskennallinen vertailu.....	22
3.1 Tarkastellut periaateratkaisut.....	22
3.2 Laskentamalli.....	23
3.3 Tulokset.....	24
3.3.1 Yleiset tulokset.....	25
3.3.2 Tarkastelu taajuusalueittain, tarkasteluperiaate.....	26
3.3.3 Taajuusalueen 5–8 Hz tulokset.....	26
3.3.4 Tulokset muilla taajuusalueilla.....	28
3.3.5 Arvio vesitäytteisen esteen toimivuudesta.....	31
3.3.6 Yhteenveto periaateratkaisujen tuloksista.....	33
4. Uusien tuotteiden ideointi.....	34
4.1 Materiaalien kovuuksia.....	34
4.2 Hintatietoja.....	35
4.3 Kehitettyjä tuoteideoita.....	36
4.4 Jatkotarkasteluun seuloit ratkaisut.....	36
4.5 Kuvaus koe-esteestä.....	39
4.6 Suunnitelma koe-esteestä tehtäviksi mittauksiksi.....	45
5. Yhteenveto.....	48
Lähdeluettelo.....	50
Liitteet	
Liite A: Nesterakoon syntyvä paine	
Liite B: Tärinäesteratkaisujen ideoinnin tulokset	

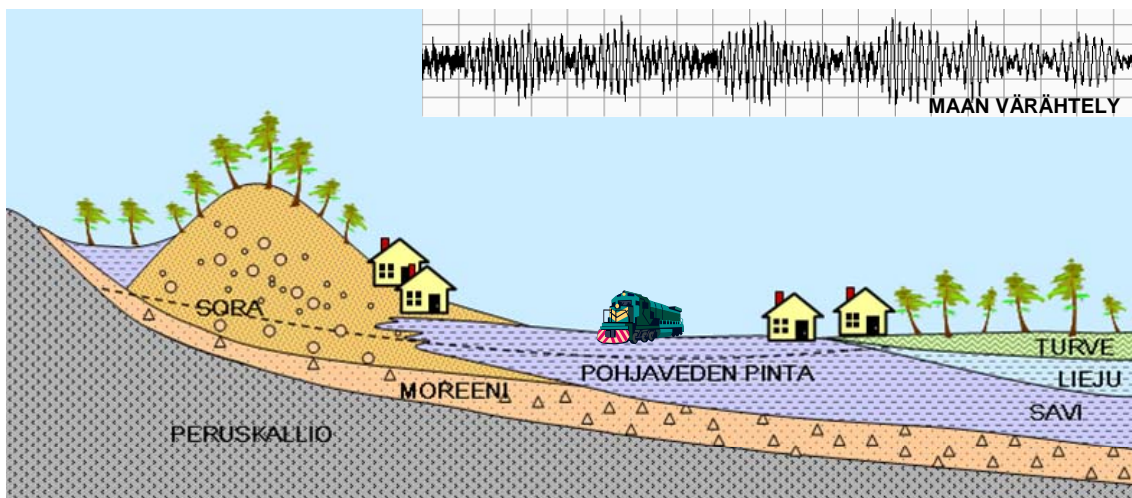
1. Johdanto

Asuinrakentamisen keskittäminen väylien läheisyyteen on lisännyt liikennetärinästä aiheutuvia ongelmia ja tärinäesteiden rakentamisen tarvetta. Valtakunnallisissa alueiden käyttötavoitteissa aluerakennetta esitetään kehitettäväksi monikeskuksisena, verkottuvana ja hyviin liikenneyhteyksiin perustuvana kokonaisuutena. 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.

1.1 Mitä liikennetärinä on

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 rakennevaurioita. Se voi kuitenkin häiritä nukkumista, haitata asumismukavuutta tai aiheuttaa epäilyksiä rakennevaurioista tai kiinteistön arvon alenemisesta.

Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat savikkolaaksopainanteet, joita reunustavat kallioiset tai soraiset mäki-alueet (kuva 1). Tällaisilla, usein alle 10 metrin paksuisilla pehmeillä savikkoalueilla värähtely leviää tehokkaasti ja leviämisen arviointi on vaikeaa. Lisäksi värähtelyssä hallitsevat matalat taajuudet, jotka voivat johtaa rakennuksen rungon resonanssiin.



Kuva 1. Tyypillinen savikkoalue, joka on erityisen herkkä liikennetärinälle.

Tärinälle altistuvan alueen laajuus riippuu voimakkaasti alueesta. Pehmeillä alueilla junien tärinähaitat ulottuvat jopa satojen metrien päähän ja maanteilläkin haitat voivat

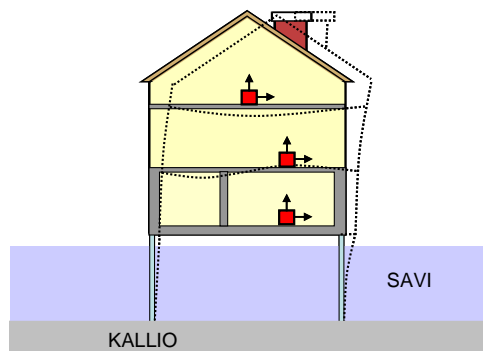
ulottua kymmenien metrien etäisyydelle. Pelkästään rautateillä riskialuetta on Suomessa useita satoja ratakilometrejä. Yleisen käsityksen mukaan tärinäesteitä käyttämällä voidaan tärinän suuruus pienentää noin puoleen. Vaikutus on suuri, sillä tärinän puolittuminen puolittaa myös turvallisen rakentamisen etäisyyden noin puoleen. Tärinäesteille on tarvetta sekä suunnitteilla olevilla uusilla että jo rakennetuilla vanhoilla alueilla.

1.2 Aikaisemmat tutkimukset

Liikennetärinän vaikutukset pyritään arvioimaan jo maankäytön suunnittelun yhteydessä. VTT on julkaissut sitä koskevan ohjeen (Talja et al. 2008). Ohje käsittää tärinän ohjearvot, maan tärinän arvioinnissa käytettävät menetelmät ja rakennuksen värähtelysuunnittelussa käytettävät arviointimenetelmät.

Liikennetärinän ohjearvo esitetään neljälle eri värähtelyluokalle. Luokkia A ja B käytetään vain erityisen häiriöttömiksi suunnitelluissa kohteissa. Luokka C on tavoite uusien asuinalueiden tai väylien suunnitteluun ja luokka D on jo rakennettujen alueiden tavoite. Mikäli D-luokan kriteerit eivät täyty, tulee arvioida liikennetärinän kohtuullisuus ja mahdollisuudet sen pienentämiseksi. Luokituksen perusteena on yhden viikon aikana mitatuista värähtelyistä määritetty värähtelyn tunnusluku, joka kuvaa asuintiloissa esiintyvää tilastollisesti suurinta värähtelytasoa.

Rakennuksen värähtelysuunnittelun lähtökohtana on, että maan värähtelyt siirtyvät ainakin samansuuruisena asuintiloihin. Lisäksi rakennuksen rungon ja lattian värähtely tulee arvioida maaperän värähtelyspektrin avulla siten, että rungon tai lattian resonanssi ei ole muodostu haitalliseksi. Ilman erityistä värähtelysuunnittelua on olemassa riski, että rakennuksessa värähtely kasvaa moninkertaiseksi maaperän värähtelyyn nähden (kuva 2).

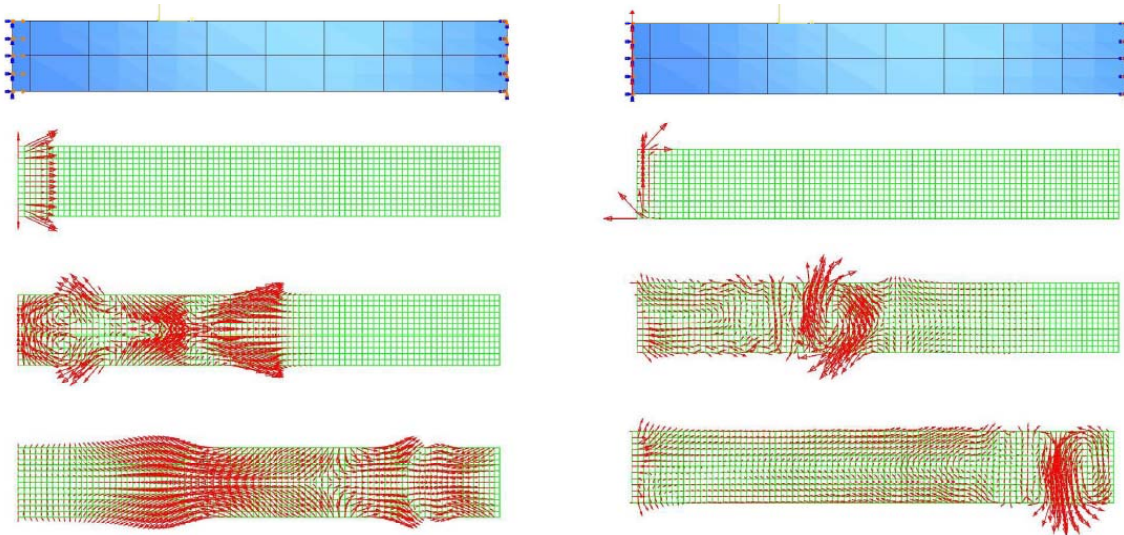


Kuva 2. Rungon ja lattian värähtely voi resonanssi-ilmiön vuoksi olla huomattavasti maaperän värähtelyä suurempi.

1.3 Maaperän värähtelyn luonne

Yleensä maaperän värähtelyä kuvataan kimmoisen aineen värähtelyinä ja maaperä oletetaan homogeeniseksi. Värähtelyn leviämistä kuvataan P-, S- ja R-aaltojen avulla. Nopeimmin leviävät P- ja hitaimmin R-aallot. Esimerkiksi räjäytystyön yhteydessä havaitaan ensin P-, sitten S- ja viimeisenä R-aallot.

P-aalloissa (primary wave, pressure wave, paineaalto, pitkittäisaalto) maaperän liike on paine-eroista aiheutuvaa kokoonpuristumisen vaihtelua (kuva 3). P-aaltojen eteneminen maaperässä vastaa ilmassa tapahtuvaa ääni- ja paineaaltojen etenemistä. S-aalloissa (secondary wave, shear wave, leikkausaalto, poikittaisaallo) ainehiukkaset liikkuvat leikkausmuodonmuutosten johdosta ilman kokoonpuristumista. R-aalto (Rayleigh wave, pinta-aalto) syntyy, kun P- ja S-aallot kohtaavat maanpinnan. Muodostuva R-aalto muistuttaa vedenpinnan aaltoilua. R-aaltojen suuruus on suurin maan pinnalla. R-aallon pituutta vastaavalla syvyydellä pystysuoran värähtelyn amplitudi on enää noin 30 % ja vaakasuoran värähtelyn amplitudi enää noin 15 % maan pinnan arvosta.



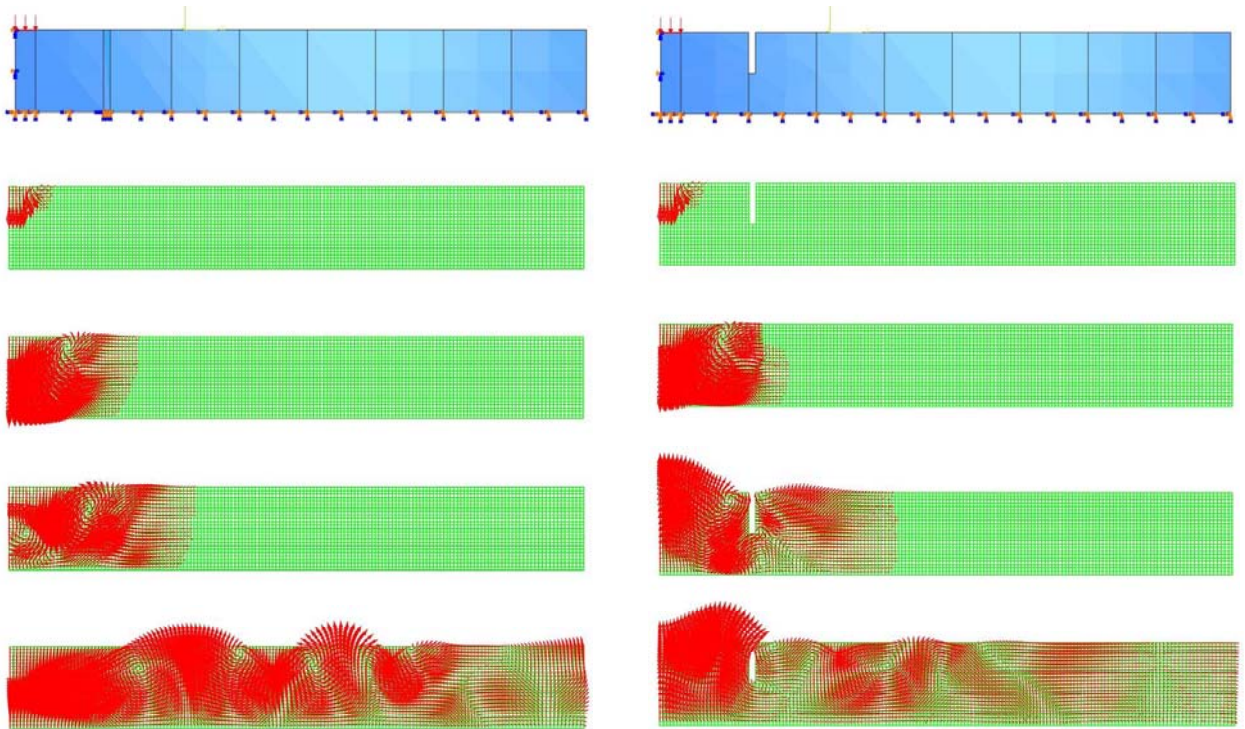
Kuva 3. Esimerkki ainehiukkasten liikkeestä P- ja S-aallon etenemisen aikana (Fulop 2007). Vasemmassa kuvasarjassa pitkittäinen (P) ja oikeassa poikittainen (S) iskuheräte. Heräte kohdistuu levymäisen kappaleen vasempaan reunaan.

Todellisissa olosuhteissa, kun maaperä ei ole puoliäretön, vaan sisältää paksuudeltaan vaihtelevia kerroksia ja peruskallion topografia vaihtelee, värähtelytarkastelu muuttuu monimutkaiseksi. Kun erityyppiset aallot kohtaavat toisen maakerroksen tai maanpinnan, aaltotyypeissä tapahtuu heijastumista ja taittumista, jolloin värähtelyssä tapahtuu P-aaltojen muuntumista S-aalloiksi ja päinvastoin. Kokemusperäiset havainnot osoittavat, että usein tehdystä teoreettisesta oletuksesta poiketen maan pinnan vaakavärähtely on useissa ongelmatapauksissa ollut suurempi kuin pystyvärähtely.

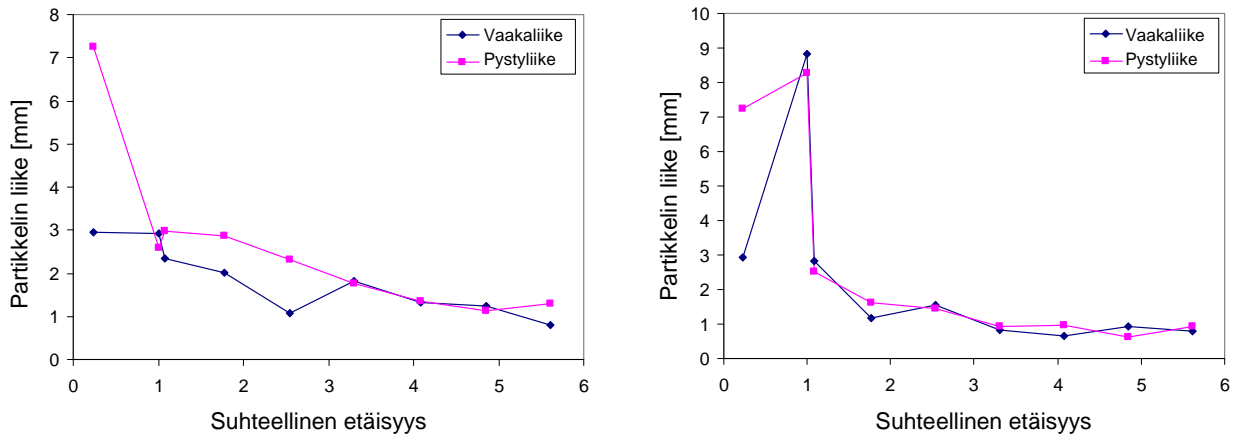
1.4 Tärinäesteen toiminta

Tärinäesteellä pyritään pienentämään ainehiukkasten liikettä tärinäesteen takana (kuva 4), samalla kuitenkin ainehiukkasten liike tärinäesteen etupuolella kasvaa (kuva 5). Tehokas tärinäesteen toiminta perustuu siihen, että niissä käytetyn materiaalin jäykkyys poikkeaa oleellisesti maaperän jäykkyydestä, seinä ulottuu riittävän syvälle ja värähtelyn heijastuminen vaimennusseinän alitse pintamaata kovemmasta kerroksesta on estetty.

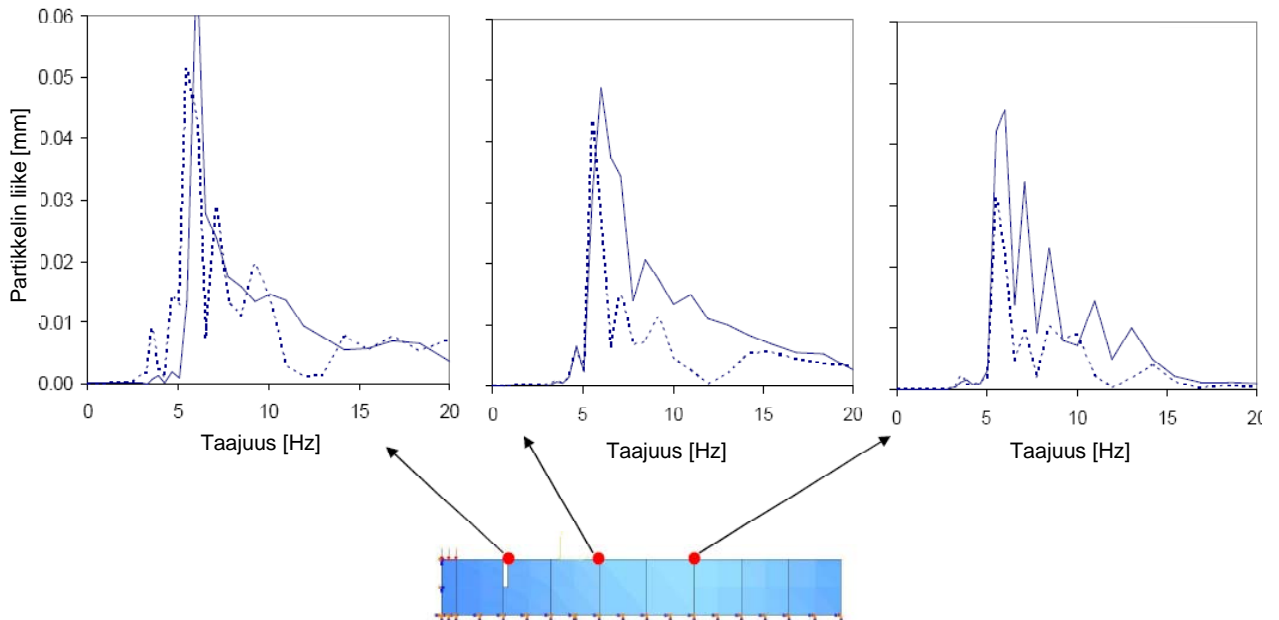
Koska tärinäeste vaikuttaa maakerroksen dynaamisiin ominaisuuksiin ja sille maaperälle ominaisiin värähtelymuotoihin, este vaikuttaa eri tavalla värähtelyn eri taajuuskomponentteihin, joista toiset heikkenevät ja toiset vahvistuvat (kuva 6).



Kuva 4. Esimerkki avoimen kaivannon vaikutuksesta pehmeän maakerroksen ainehiukkasten liikkeeseen värähtelyn leviämisen aikana (Fulop 2007). Vasen kuvasarja ilman kaivantoa ja oikea kaivannon kanssa. Esimerkissä kovan kallion päällä olevan pehmeän maakerroksen paksuus on 12 m ja kaivannon syvyys 6 m. Herätteenä on iskuheräte mallin vasempaan yläreunaan.



Kuva 5. Esimerkissä 4 esitetyn avoimen kaivannon laskennallinen vaikutus vaaka- ja pystysuuntaiseen värähtelyyn (Fulop 2007). Vasen kuvasarja esittää värähtelyn suurinta arvoa ilman kaivantoa ja oikea kaivannon kanssa. Suhteellinen etäisyys 1,0 vastaa kaivannon etäisyyttä (13 m) herätteestä.



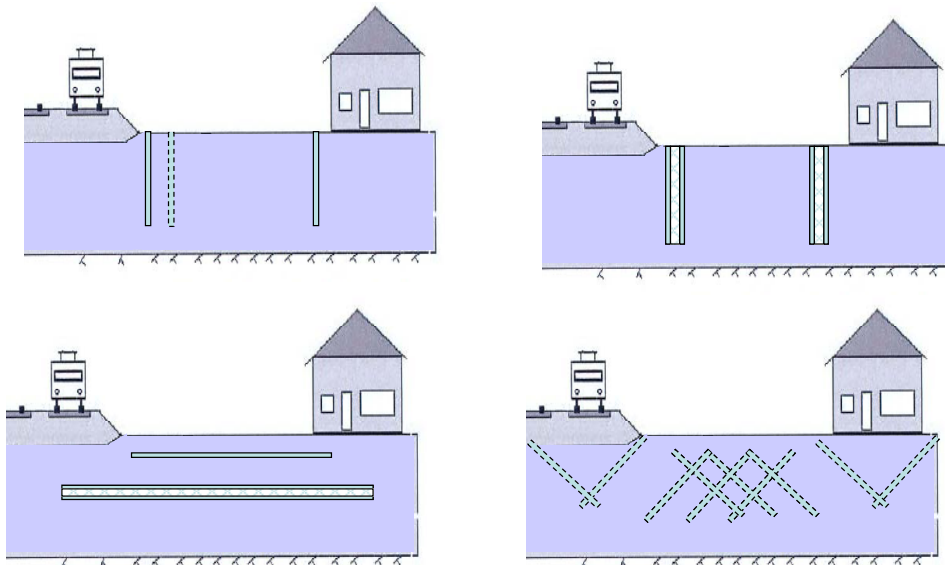
Kuva 6. Esimerkissä 4 esitetyn avoimen kaivannon laskennallinen vaikutus pystysuuntaisen värähtelyn eri taajuuskomponentteihin (Fulop 2007). Jatkuva viiva kuvaa värähtelyä ilman kaivantoa ja katkoviiva kaivannon kanssa.

1.5 Tutkimuksen rajaus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on kehittää valmiuksia tärinäseinien laskennallisten arviointimenetelmien käyttöön, selvittää erilaisten tärinäesteiden periaateratkaisujen toimivuuseroja, kehittää uusia tärinäesteratkaisuja ja arvioida uusien tärinäesteratkaisujen käyttömahdollisuuksia. Uusia rakenneratkaisuja ovat esimerkiksi uusiokäyttöön otettavista renkaista, ponttiseinistä tai puupylväistä rakennetut tärinäesteet.

Tärinäesteen toimivuutta arvioitaessa otetaan huomioon esteen vaikutus värähtelyn suuruuteen ja taajuussisältöön sekä pysty- että vaakasuunnassa, sillä molemmat suunnat vaikuttavat rakennuksen värähtelyyn.

Suomessa vaikeimmiksi ovat osoittautuneet pehmeät savi- ja turvealueet ja siksi tämä selvitys on rajattu sellaisiin värähtelyä vaimentaviin esteisiin (kuva 7), joiden uskotaan soveltuvan liikennetärinän eristämiseen erityisesti näillä pehmeikköalueilla. Tällöin värähtelyn hallitseva taajuus on usein 5–10 Hz.



Kuva 7. Esimerkkiä eri tavoista muuttaa maaperän värähtelyominaisuuksia.

Tarkasteltavan matalataajuuksisen liikennetärinän lisäksi maan kautta siirtyvä värähtely voi aiheuttaa korkeataajuisista runkomelua (taajuus 16–250 Hz). Runkomelun asukas kuulee ukkosen tai lentokoneen kumun kaltaisena äänenä. Runkomelu voi olla ongelma kovilla kallio- ja soramaa-alueilla. Myös runkomelun eristämisessä voidaan käyttää tärinäesteitä, vaikka ensisijaisesti runkomelua pyritään vaimentamaan radan alle sijoitetuilla pehmeillä materiaalikerroksilla. Runkomelun eristämisperiaatteita on kuvattu erikseen lähteessä (Talja et al. 2009) ja siksi tämä raportti ei käsittele runkomelun eristämistä.

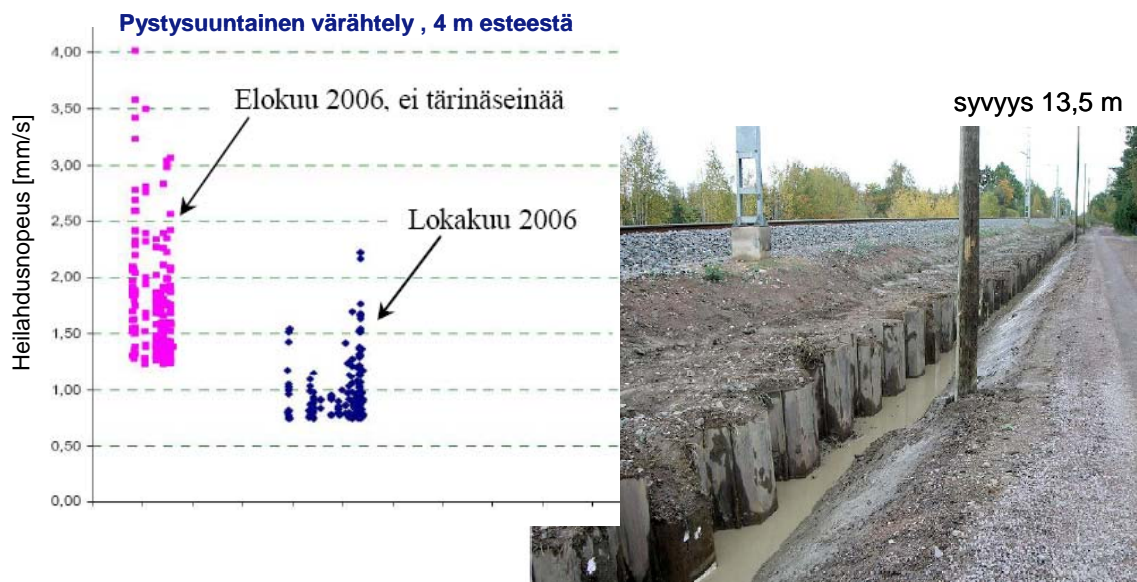
Tärinäesteiden laskennallinen arviointi tehdään elementtimenetelmään perustuvalla ABAQUS-ohjelmistolla. Vaikka mallien ei uskotakaan ilmiön vaikean mallinnettavuuden vuoksi olevan kvantitatiivisesti tarkkoja, niiden käyttö on perusteltua, sillä ilman mallintamista koekohteesta saadut tulokset voivat olla vaikeasti yleistettävissä muille pohjasuhdeolosuhteille ja maakerroksen paksuuksille. Lisäksi mallintamisella voidaan tarkastella myös sellaisia ratkaisuja, joiden kokeilu koerakentamisella edellyttää kalliita investointeja valmistus- ja asennusmenetelmiin. Koerakentamisen käyttö on kuitenkin tuotekehityksen loppuvaiheessa ainoa oikea tapa tärinäesteen todellisen toimivuuden osoittamiseksi.

2. Kirjallisuus- ja patenttiselvitykset

Kirjallisuus- ja patenttiselvitysten tarkoituksena on antaa käsitys erilaisista tärinäestekorkeuksista ja niiden soveltuvuudesta, erityisesti kun tarkastellaan liikennetärinän eristämistä pehmeillä maa-alueilla. Yksityiskohtaiset tulokset ja kuvien alkuperäiset lähdeviittaukset on esitetty lähteissä (Kurkela 2008a) ja (Kurkela 2008b).

2.1 Suomessa kokeillut ratkaisut

Ratahallintokeskus ja Tieliikelaitos rakensivat vuonna 2006 Mellilään 210 m pitkän tärinäesteseinän. Rakenteen toimivuutta oli kokeiltu aikaisemmin v. 2005 Loimaalla 40 m pitkällä koe-seinällä. Kuvassa 8 on Mellilässä käytetty vaimennusseinä ja siitä saatuja tuloksia. Tärinävaimennusseinän etäisyys radasta on 9 m ja kokonaispituus 210 m. Käytetyt ponttityypit ovat Arbed PU8 ja Larsen L603.

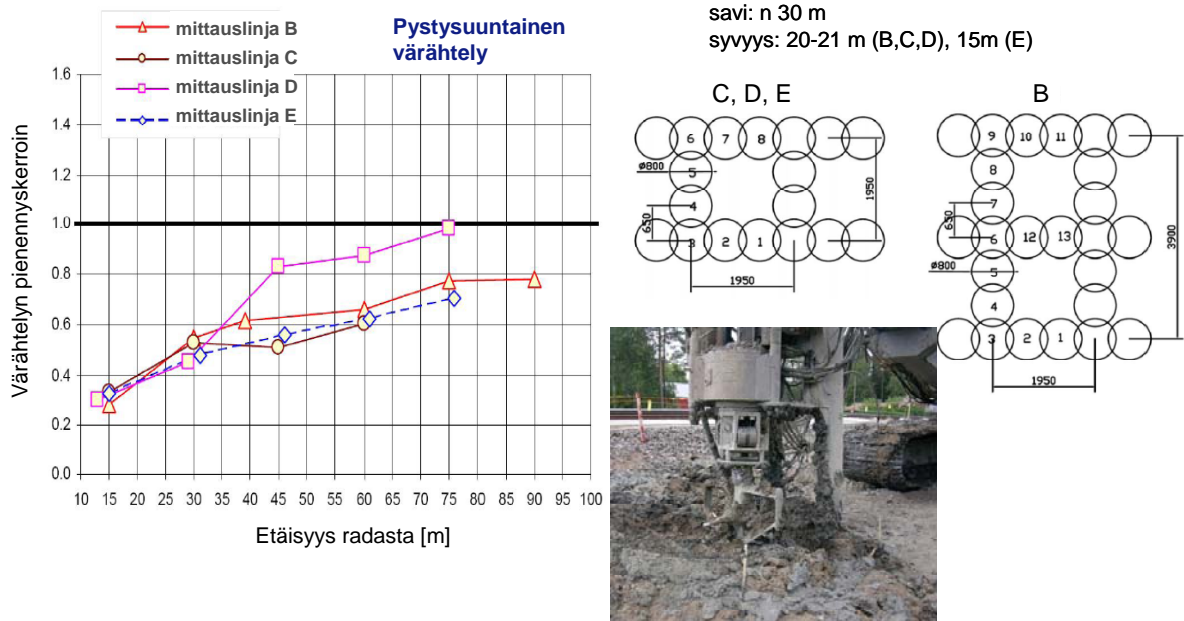


Kuva 8. Mellilän kohteen tärinävaimennusseinä ja junakohtaisten mittaustulosten vertailu, etäisyys 4 m tärinäseinästä (Ratahallintokeskus & Tieliikelaitos 2006).

Pääsääntöisesti tärinäeste vähensi tärinän pystysuuntaista komponenttia. Vaakasuuntaisen komponentin väheneminen oli pienempää, mutta kuitenkin havaittavaa. Tulosten perusteella 250 m pitkä tärinäseinä vaimensi pystysuuntaista värähtelyä lähellä estettä noin 75 % ja 20–30 metrin etäisyydellä noin 50 %. Tärinäseinän vaikutus on nähtävissä mittaustuloksista vielä 50 m etäisyydellä. Etäisyydellä 30–40 m radasta sijaitsevien talojen tärinän väheneminen oli 40–50 %. Kauempana, noin 60 m etäisyydellä sijaitsevaan taloon ei tärinäseinällä ollut vaikutusta.

Vuonna 2006 Ratahallintokeskus rakensi Korialle koekohteen, jossa tutkittiin syvästabiloimalla valmistettujen pilariseinien vaikutusta värähtelyn vaimentamiseen. Kohtee-

seen rakennettiin neljä erillistä tärinäseinää, joissa käytettiin kahta erilaista pilarijakoa (kuva 9).



Kuva 9. Korian kohteen tärinävaimennusseinät (B, C, D, E) ja mittaustulosten perusteella laskettu pystysuuntaisen värähtelyn pienennyskerroin (Koivisto et. al. 2007).

Mittaustulosten perusteella pystysuuntainen värähtely vaimeni tasaisesti kaikilla koerakenteilla (kuva 9). Mittauslinjoilla B, C ja E keskimääräinen pystysuuntaisen värähtelyn pienentyminen oli etäisyydellä 15–60 m noin 40–70 % ja yli 60 m etäisyydellä noin 20 %. Vaakasuorassa suunnassa värähtely pieneni noin 20 %. Mittauslinjan D suurilla etäisyyksillä tapahtui vähemmän vaimenemista kuin muilla kolmella koerakenteella. Tämän on arveltu johtuvan siitä, että mittauslinja D oli lähempänä vaimennusseinän päätä kuin muut linjat, jolloin osa värähtelyistä on voinut kiertää esteen. Paksumman vaimennusseinätyypin B tulokset eivät eronneet merkittävästi esteiden C ja E tuloksista. Myöskään pilariseinän syvyydellä (15 tai 21 m) ei havaittu vaikutusta.

Paras vaimennus pystysuunnassa oli taajuusalueella 5–10 Hz ja vaakasuunnassa yli 5 Hz:n taajuuksilla. Vaakasuunnassa vaimenevat taajuusalueet vaihtelivat eri rakenteilla. Sekä pysty- että vaakasuunnassa vahvistuivat yleensä taajuusalueet alle 5 Hz tai yli 13 Hz.

Vuonna 2009 Ratahallintokeskus on rakentanut Turkuun Raunistulan alueelle noin 500 m pitkän koe-esteen, josta puolet on toteutettu pilaristabiloimalla ja puolet teräsponteilla. Kohteesta on tehty mittauksia maasta ja rakennuksista sekä ennen koe-esteen rakentamista että esteen rakentamisen jälkeen. Johtopäätöksiä esteen toimivuudesta ei ollut käytössä tätä raporttia kirjoitettaessa.

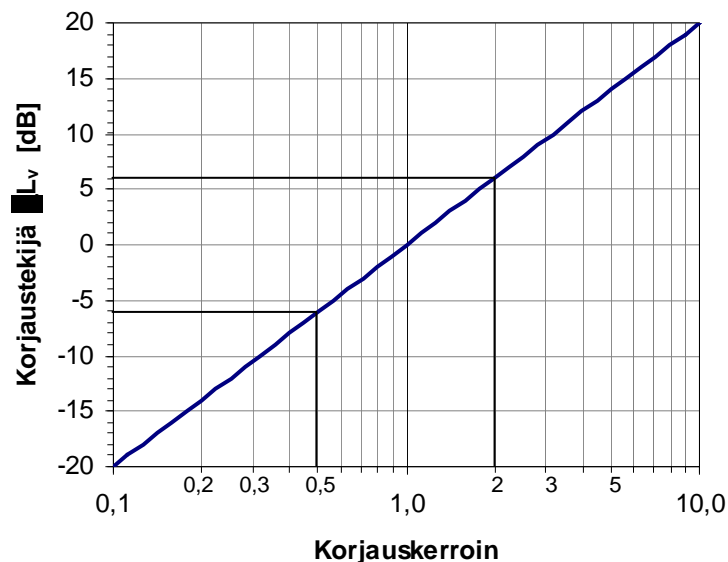
2.2 Kirjallisuusselvitys

Kirjallisuudesta löytyneet tärinän eristämiskäsit voidaan jakaa seuraaviin pääryhmiin:

- joustavat rakenteet radan tai rakennuksen alla
- jäykistävät rakenteet radan ja tien alla
- pystysuorat tärinäseinät.

Näiden lisäksi on kokeiltu maahan sijoitettuja massiivisia rakenneratkaisuja, joiden jäykkyys on huomattavasti maan jäykkyyttä suurempi. Suurten jäykkyyserojen on arveltu estävän värähtelyaaltojen etenemistä maaperässä. Tällaiset maanalaiset aaltovaimentimet (wave impeding block, WIB) on arveltu vaimentavan erityisesti niitä värähtelytaajuuksia, joilla aallonpituus on rakenteen kokoa pienempi. Maata jäykistävänä materiaalina voi olla betoni, paalut tai stabiloitu maa-aines.

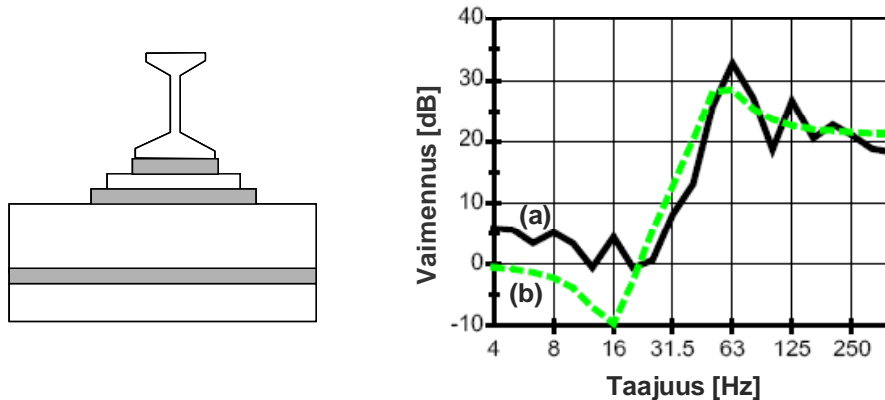
Kirjallisuudessa tärinäneristyksen vaikutus värähtelyn suuruuteen esitetään yleensä joko absoluuttista pienenemistä kuvaavalla korjauskertoimella tai suhteellista värähtelytason muutosta kuvaavalla korjaustekijällä (dB). Negatiivinen korjaustekijä (ΔL_v) kuvaa värähtelyn vaimenemista ja positiivinen värähtelyn vahvistumista (kuva 10). Esimerkiksi värähtelytason korjaustekijä -6 dB vastaa värähtelyn puolittumista ja +6 dB värähtelyn kaksinkertaistumista.



Kuva 10. Värähtelyn nopeustason korjaustekijän ΔL suhde värähtelynopeuden muuttumista kuvaavan korjauskertoimeen.

2.2.1 Radan tai rakennuksen tärinäeristys

Joustava tärinäeriste voidaan asentaa joko kiskojen, ratapölkkyjen tai sepelin alle. Keluvaksi rakennettu tukikerros voidaan toteuttaa joko betonilaatan tai erillisjousitetun betonikaukalon avulla. Mitä alempana joustava kerros on, sitä parempi on eristyksen toimivuus. Radan alle asennettavat joustavat elementit vaimentavat värähtelyä pääasiassa äänitaajuuksilla (kuva 11), eivätkä siksi toimi hyvin pehmeillä savimailla.

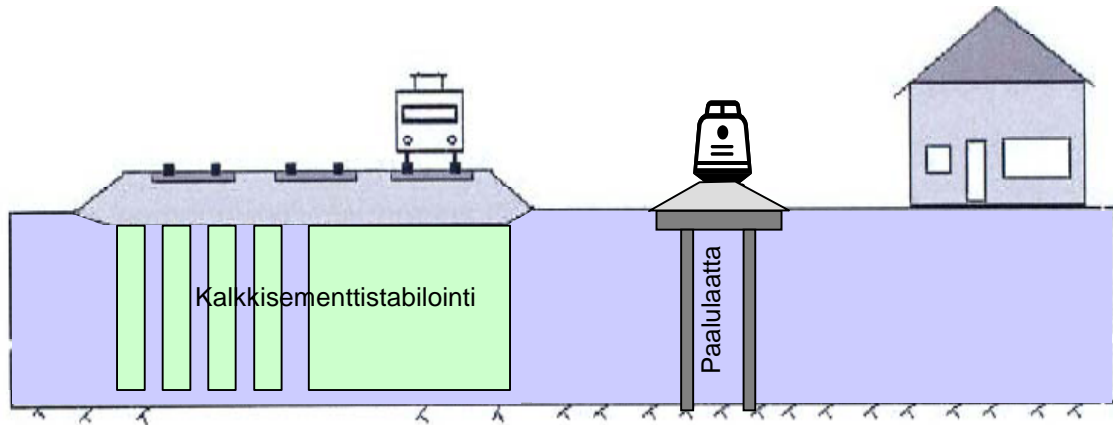


Kuva 11. Vasen kuva: Tärinäeristys voidaan sijoittaa rataan kiskon alle, pölkkyjen alle tai tukikerroksen alle. Oikea kuva: Esimerkki sepelipatjan alle asennetun vaimennusmaton vaimennuksesta terssikaistoittain. Mitattu tulos (a) ja laskennallinen arvio (b), (http://www.gudconsult.de/bilder/00047_e.pdf).

Myös perustuksissa käytettävällä joustavalla materiaalilla voidaan pienentää maasta rakennukseen siirtyvää värähtelyä. Toimintaperiaate on sama kuin radan alle asennetulla eristyksellä. Jousto toteutetaan yleensä levyeristyksellä tai erillisillä kumi- tai teräs-jousivaimentimilla. Rakennuksen toiminnallisista ja rakennusteknisistä syistä johtuen jousituksen ominaistaajuus ei yleensä voi olla pienempi kuin 5–10 Hz, joten eristys alkaa vaimentaa tehokkaasti vasta äänitaajuuksia. Savimailla, joilla hallitseva taajuusalue on usein 5–10 Hz, pehmeän jousituksen riskinä on, että resonanssi-ilmiö voi johtaa värähtelyn voimistumiseen.

2.2.2 Radan tai rakennuksen maapohjan jäykistäminen

Radan alla oleva pehmeä maakerros voidaan jäykistää kalkkisementtistabiloinnilla tai rakentamalla rata paalulaatalle (kuva 12). Lisääntynyt jäykkyys pienentää syntyvää värähtelyä. Stabilointi tehdään käyttäen sideaineena esimerkiksi kalkkia ja sementtiä. Stabiloinnin on havaittu pienentävän merkittävästi värähtelytasoa radan läheisyydessä, mutta kauempana radasta saadut kokemukset ovat ristiriitaisia. Botonipaalulaatta jäykistää maaperää radan alla stabilointia enemmän ja sen toimivuutta pidetään stabiloinnilla toteutettua ratkaisua parempana.



Kuva 12. Periaatekuva radan perustuksen jäykistämisestä kalkkimenttistabiloinnilla tai paalulaatalla.

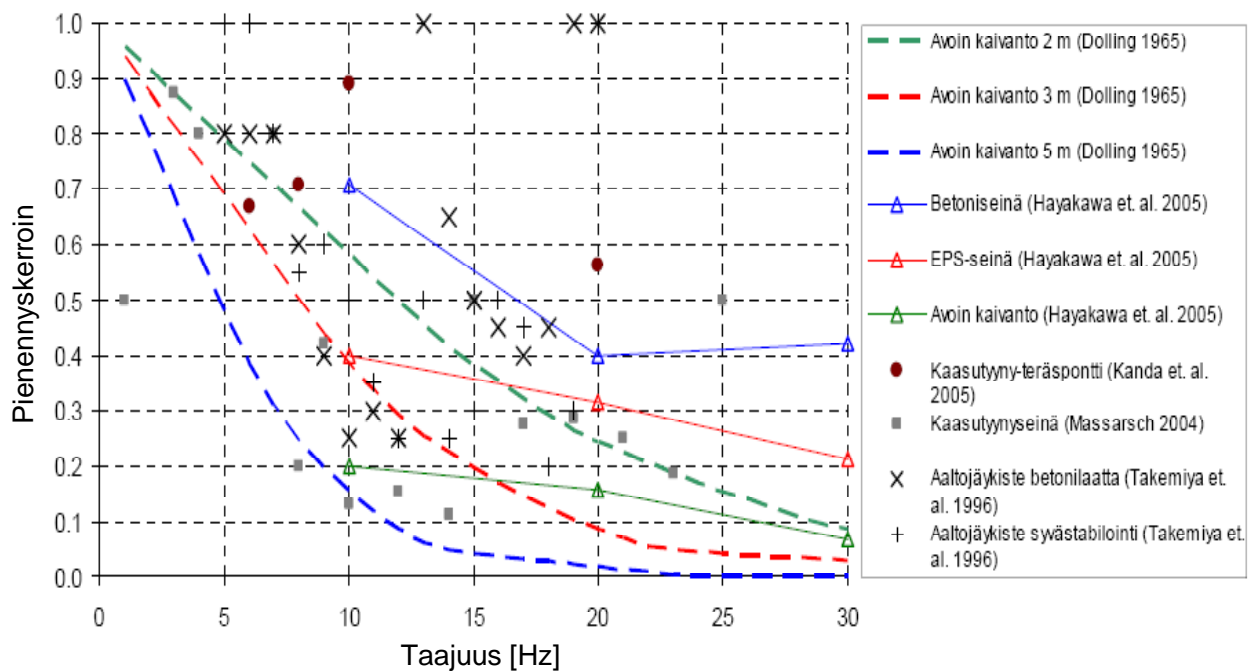
Myös rakennuksen perustuksen paalutuksella voidaan pienentää maaperän pystyvärähtelyn siirtymistä rakennukseen, jos rakennus on riittävän massiivinen ja sokkeli on hyvin irti maasta. Paalut eivät kuitenkaan estä maaperän vaakavärähtelyn siirtymistä rakennukseen, joka on usein savimailla pystyvärähtelyä merkittävämpi tekijä.

2.2.3 Pystysuorat tärinäseinät

Pystysuoria tärinäseinäitä (kuva 7) voi olla seuraavia tyyppisiä:

- avoin kaivanto (kuva 4)
- betoniseinä
- teräsponsittiseinä (kuva 8)
- puupaaluista tehdyt seinät
- kumirouheesta tehty seinä
- kevyet muovieristeseinät
- kaasutyynyihin perustuvat seinät
- syvästabiloidut kalkki-sementtipilariseinät (kuva 9)
- erilaiset muoviset vaimennuselementit.

Pystysuoria tärinäseinäitä on kokeiltu liikennetärinän eristämiseen myös pehmeillä savi-maa-alueilla, joilla dominoivat matalat värähtelytaajuuudet. Erilaisilla seinäratkaisuilla saadaan matalataajuuksinen värähtely pienennettyä tyypillisesti enintään puoleen (kuva 13), vaikka äänitaajuuksilla pienennys voi olla huomattavasti suurempi. Tehokkain vaimennus on avoimella kaivannolla. Pehmeillä aineilla täytetyillä tai jäykillä tärinäseinillä pienennys on avointa kaivantoa huonompi. Pienennys riippuu täytteen dynaamisesta joustavuudesta, tärinäesteen korkeudesta ja pehmeän maapohjan syvyydestä. Mitä syvemmälle vaimennuseinä ulottuu, sitä alempia taajuuksia seinä vaimentaa.



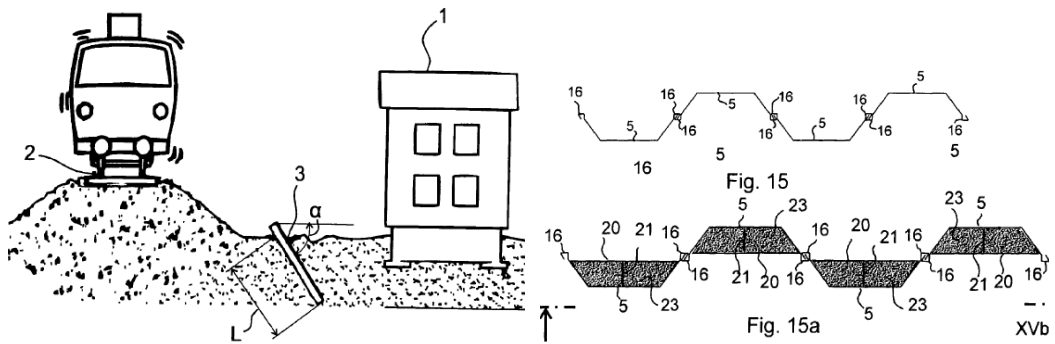
Kuva 13. Tärinäneristysratkaisun vaikutus eritaajuuksisen värähtelyn vaimenemiseen etäisyydellä 10–20 m seinästä. Avoimen kaivannon katkoviivakäyrät perustuvat teoreettisiin laskelmiin puoliäärettömällä mallilla.

2.3 Tärinäseiniin liittyvät patentit

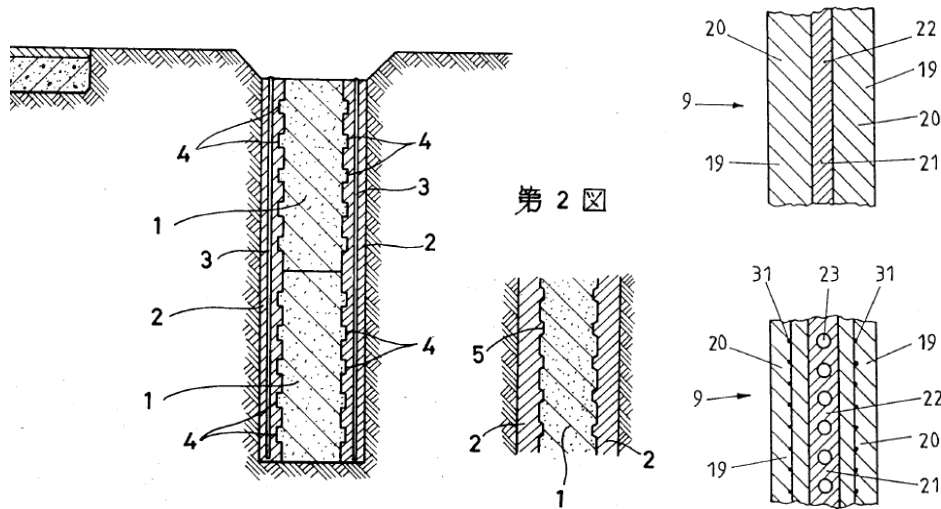
Tärinäesteisiin ja tärinän vaimentamiseen liittyvät patenttihakemuksia, voimassa olevia patenteja ja lopetettuja patenteja on haettu internetistä löytyvistä patenttietokannoista, joita ylläpitävät Patentti- ja Rekisterihallitus (www.prh.fi) ja esp@cenet (fi.espacenet.com). Patenttietokannoista löytyy runsaasti värähtelyn eristämiseen ja vaimentamiseen liittyviä patenteja, mutta niistä vain pieni osa koskee matalataajuuksista liikennetärinää. Yleensä patenteissa esitetään vain periaateratkaisuja. Yksityiskohdaisia ja käytännössä testattuja ratkaisuja löytyy vähän.

Lähes kaikissa patenteissa, joissa tärinäeste on väylän ja rakennuksen välissä, ratkaisuna on kevyen ja joustavan materiaalin yhdistäminen kovaan ja raskaaseen materiaaliin (kuvat 14–21). Rakenteen keskiosa voi olla joustavaa kumia, kumirouhetta tai vaahdotettua muovieristettä ja reunat betonia, terästä tai muuta raskasta materiaalia. Joustava kerros voi olla tehty myös ilmatyynyistä.

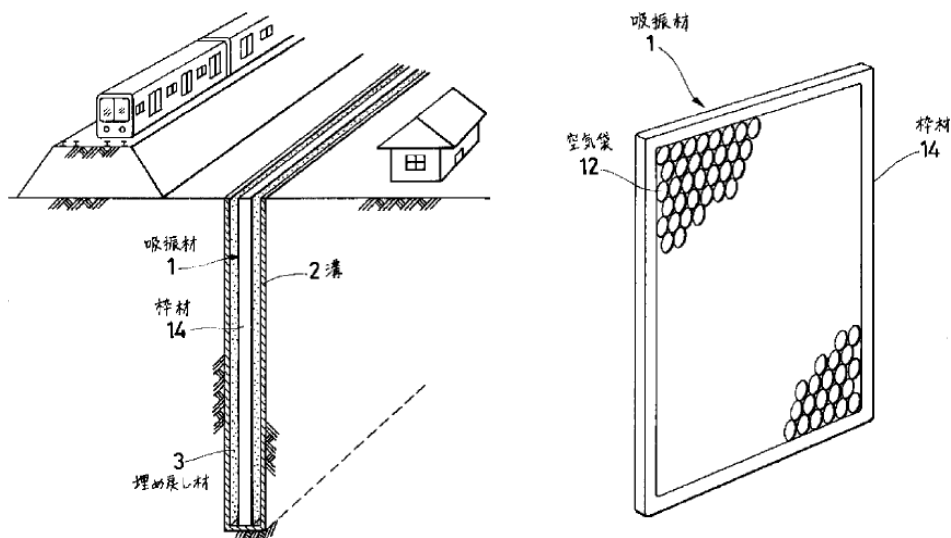
Myös radan alle (kuvat 22–24) tai rakennuksen alle (kuva 25) sijoitettuja ratkaisuja on esitetty. Pehmeällä tärinäeristeellä radan tai rakennuksen alla voidaan yleensä vaikuttaa vain äänitaajuuksiin, joten pehmeillä savimailla ne eivät yleensä toimi (vrt. s. 14, kohta 2.2.1).



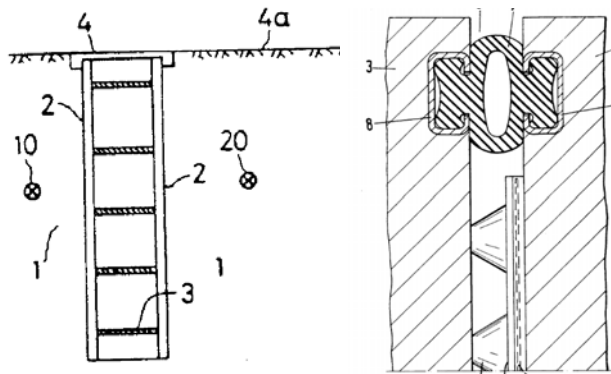
Kuva 14. Teräsonttiseinän käyttö tärinäseinänä.



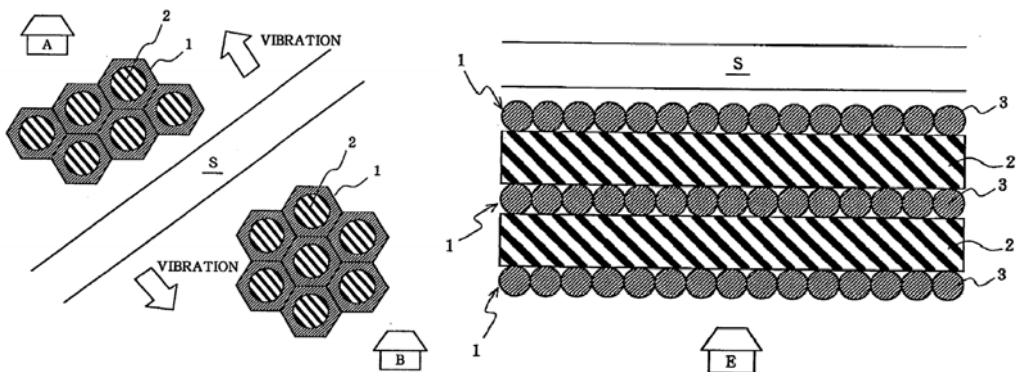
Kuva 15. Tärinäseinä, joka perustuu kovan ja joustavan materiaalin yhdistämiseen. Seinän keskiosa on kumia tai vaahdotettua muovieristettä ja reunat betonia tai terästä.



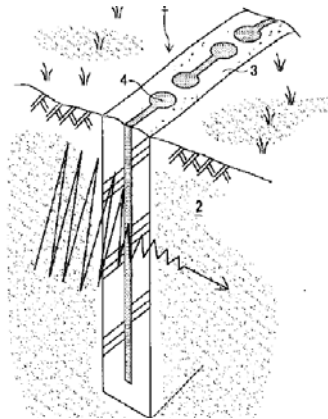
Kuva 16. Ilmatyynyistä ja kumista valmistettu eristelevy, joka on sijoitettu kahden betonisseinän väliin.



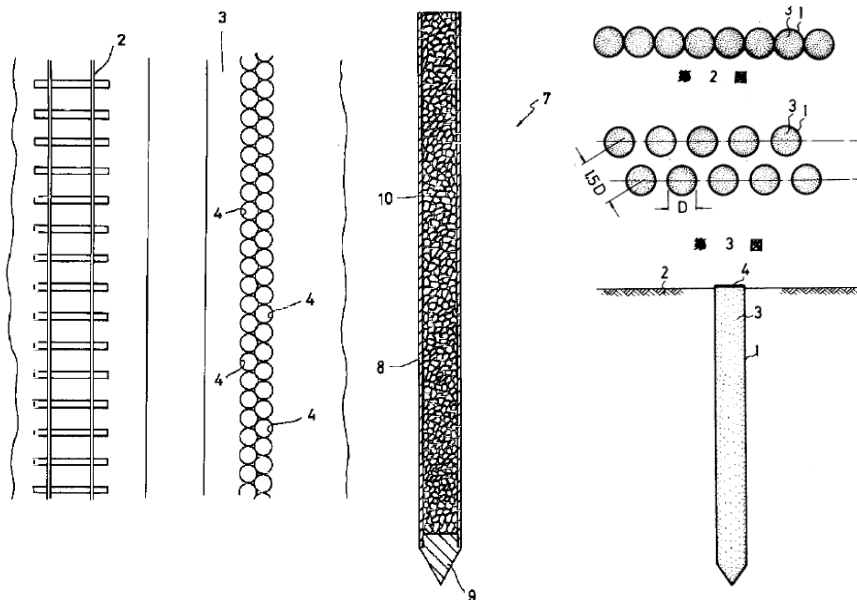
Kuva 17. Tärinäeste, joka on tehty kahdesta jäykästä seinästä, jotka on erotettu toisistaan erityisillä joustavilla eristimillä.



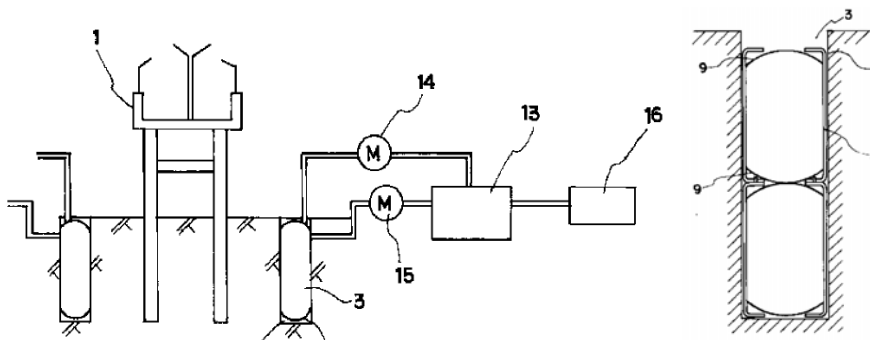
Kuva 18. Tärinäseinä, joka on rakennettu kenoista. Kannot on valmistettu kovasta materiaalista (esim. betoni) ja sisäosan täyttö on pehmeää kimmoista materiaalia (esim. kumirouhe).



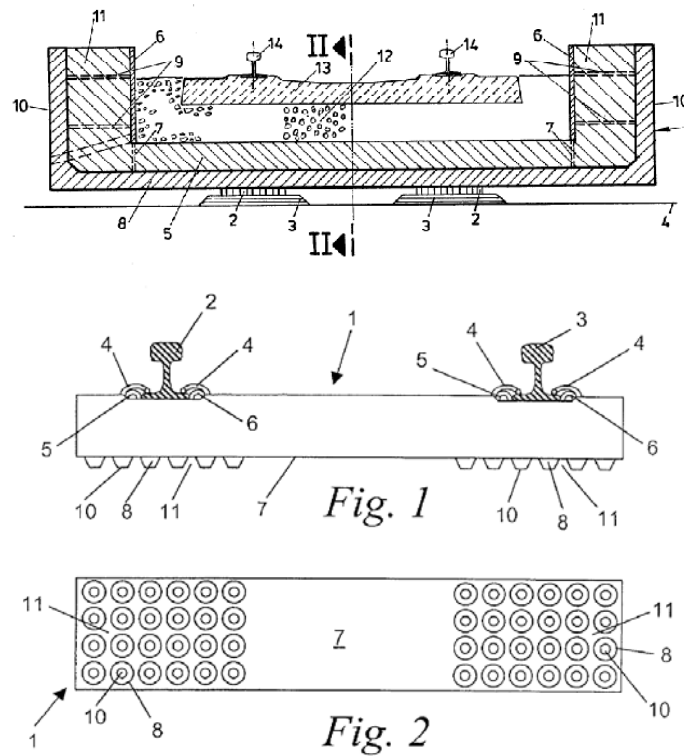
Kuva 19. Tärinäseinä, joka on rakennettu massastabiloimalla maahan seinä ja kovertamalla siihen aukot, jotka on täytetty pehmeällä ja joustavalla eristemateriaalilla.



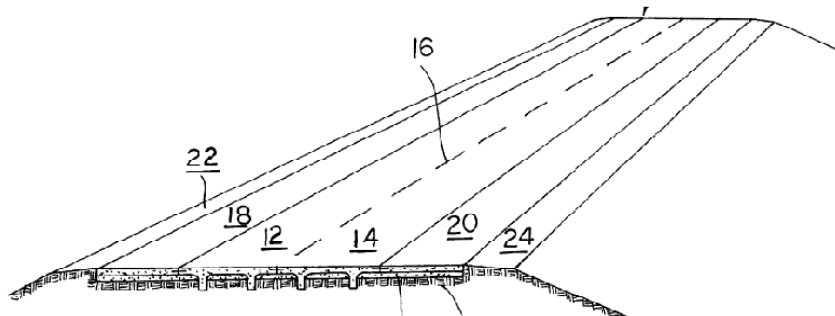
Kuva 20. Teräsputkipaaluista tehty tärinäseinä. Paalut on täytetty kumirouheella tai pehmeällä eristeellä.



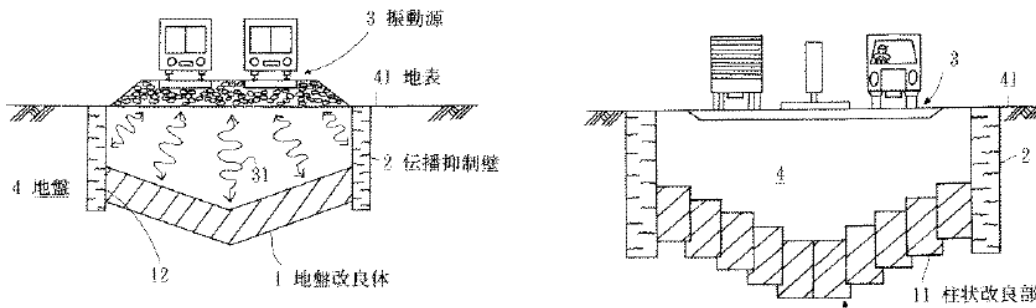
Kuva 21. Paineilmatäytteinen tärinäseinä. Erillinen laitteisto pitää paineen seinän onte-
loissa vakiona.



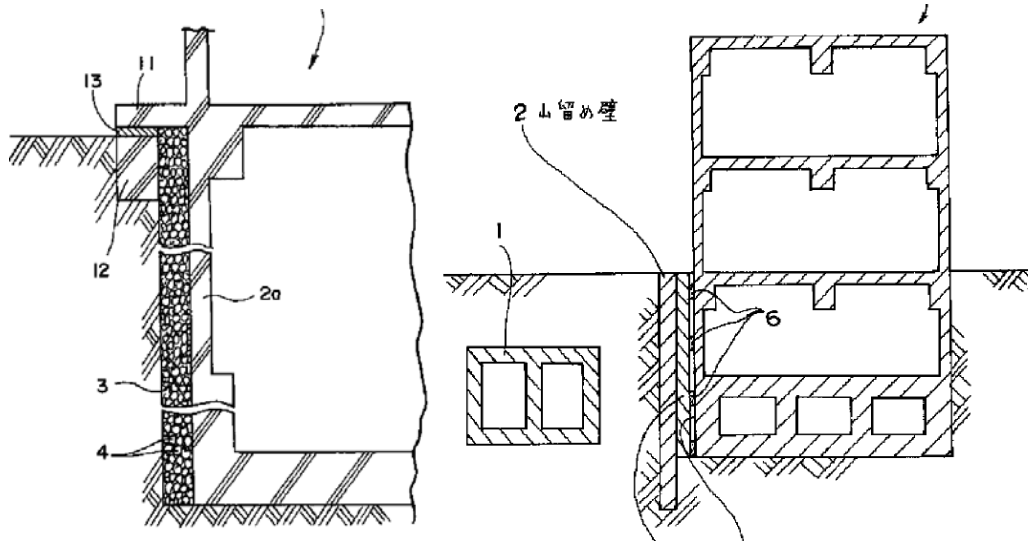
Kuva 22. Radan tärinän vaimentaminen kelluvilla rakenteilla.



Kuva 23. Jäykistetty betonilaatta radan tai tien alla. Laatassa on pitkittäissuuntaiset jäykistävät palkit.



Kuva 24. Radan alla oleva rakenne, jolla estetään värähtelyn leviämistä ympäristöön.



Kuva 25. Rakennuksen perustusta tai kellaritilaa vasten sijoitettu joustava eristys.

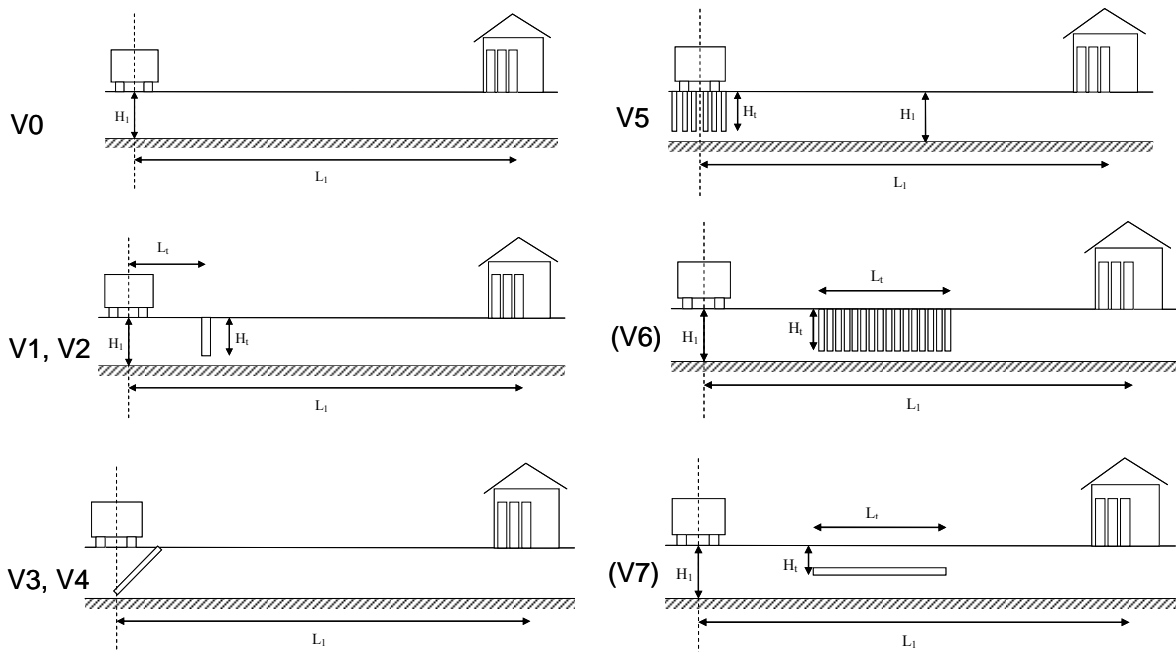
3. Tärinäesteiden laskennallinen vertailu

Laskennallisen vertailun tarkoituksena on ollut selvittää erilaisten estetyyppien toiminnallisia eroja. Tulosten perusteella on pyritty arvioimaan parhaiten toimivia tärinäestratkaisuja myöhempää tuotekehitystä ja koerakentamista varten. Laskennassa on keskitytty Suomessa tyypilliseen ja yleensä ongelmallisimpaan tapaukseen, jossa kovan maan päällä on pehmeä savikerros (kuva 1).

Laskenta on suoritettu kaksiulotteista FEM-mallia ja ABAQUS-ohjelmaa käyttäen. Liikennetärinään liittyvien mallintamisen epätarkkuuksien ja laskennassa suoritettavien yksinkertaistuksien vuoksi tuloksien avulla on pyritty vain suhteellisten toimivuuserojen selvittämiseen. Yksityiskohtaiset tulokset laskennallisesta arvioinnista on esitetty lähteessä (Fulop 2008).

3.1 Tarkastellut periaateratkaisut

Laskennassa oli alun perin tarkoitus tarkastella seitsemää kuvassa 26 esitettyä perustapausta. Lopullisesta tarkastelusta tapaus V6 jätettiin pois. Alustavissa laskelmissa havaittiin, että ratkaisuvaihtoehdolla V7 ei ole merkittävää vaikutusta tärinään, joten sen tuloksia ei käsitellä tässä yhteenvedossa, mutta tulokset löytyvät lähteestä (Fulop 2008).



Kuva 26. Periaatekuva eri laskentatapauksista. Tapauksen V1 erona V2:een ja tapauksen V3:n erona V4:ään on vain erilainen esteen korkeus.

Tarkasteltavat tärinäesteen korkeudet eri maakerroksen paksuuksilla on esitetty taulukossa 1. Esteen paksuus on kaikissa tapauksissa 0,25 m. Esteenä tarkastellaan kahta

ääritapausta, joista toinen on betoniseinä ja toinen avoin kaivanto. Tarkastelu toistettiin kolmella eri maaperällä: erittäin pehmeä, pehmeä ja sitkeä savi. Maan ominaisuuksia värähtelytarkastelussa on kuvattu leikkausaallon etenemisnopeuden V_s avulla, jonka arvoiksi laskennassa on valittu 40, 80 ja 160 m/s. Mallissa käytettyjen materiaaliparametrien ja leikkausaallon etenemisnopeuden välillä on suhde

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

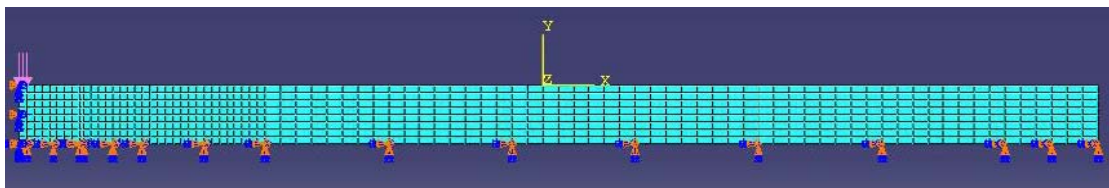
jossa E on maaperän kimmokerroin, ρ maaperän tiheys, ν maaperän suppeumaluku ja G materiaalin liukukerroin.

Taulukko 1. Tarkasteltavat tärinäesteen korkeudet H_T ja savikerroksen paksuudet H_L valituissa laskentatapauksissa (kuva 26).

	V0	V1, betoni		V1, avoin		V3, betoni		V5, betoni	
$H_T =$	–	4 m	8 m	4 m	8 m	4 m	8 m	4 m	8 m
$H_L = 4$ m	X	X	–	–	–	X	–	X	–
$H_L = 8$ m	X	X	X	X	–	X	–	X	X
$H_L = 16$ m	X	X	X	X	X	X	–	X	X
$H_L = 32$ m	X	X	X	X	X	X	–	X	X

3.2 Laskentamalli

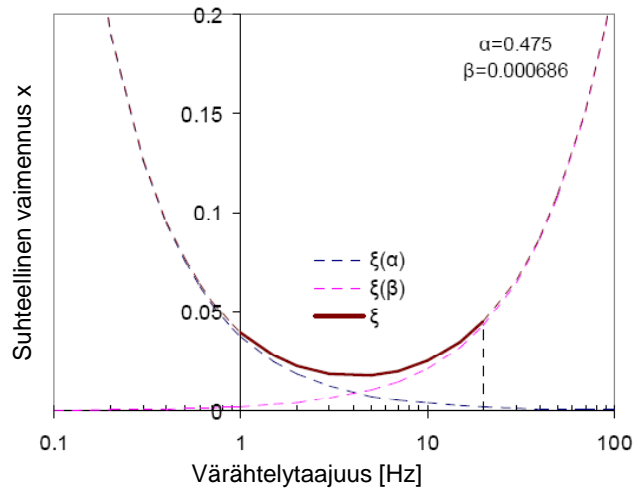
Käytetyn laskentamallin valinnan perusteena on ollut, että sillä voidaan helposti tehdä suuri määrä laskentoja eri parametrien arvoilla. Mallissa on käytetty symmetriaehtoa, sillä maaperä ja värähtelyn leviäminen on oletettu symmetriseksi molemmilla puolilla herätettä. Mallinnus on tehty tasomallina käyttäen kuorielementtejä (kuva 27). Elementtityypin ja -koon valinta perustuu seitsemästä erilaisesta kokeilumallista saatuihin tuloksiin. Kokeilu on kuvattu tarkemmin lähteessä (Fulop 2008). Mallissa maaperä ja tärinäeste on mallinnettu ABAQUS-ohjelman elementtityypillä CPE4R. Päytyreunalla värähtelyn heijastumisen estettiin käyttämällä elementtityypillä CPS4R. Mallin alareuna on mallinnettu täysin heijastavaksi.



Kuva 27. Pehmeää maakerrosta kuvaava laskentamalli. Heräte kohdistuu vasempaan reunaan.

Elementtiverkko on tasajakoinen ja elementtikokona on käytetty arvoa 0,25 m. Valittu elementtikoko riittää kuvaamaan tarkasti pehmeillä savimaille dominoivat alle 20 Hz:n värähtelyt, jolloin leikkausaallon nopeus on noin 40 m/s. Yli 20 Hz:n taajuuksilla laskenta menettää tarkkuuttaan. Kovemmilla maaperillä joilla leikkausaallon nopeus on suurempi, tarkka alue kasvaa, ja nopeudella 160 m/s alue ulottuu jo 80 Hz:iin.

Laskennallisten tekijöiden vuoksi rakenteen vaimennus on kuvattu yleisesti käytetyn suhteellisen vaimennuksen sijaan Rayleigh-vaimennuksena, joka määritetään parametrien α ja β avulla. Parametrit on valittu siten, että taajuusalueella 1–20 Hz suhteellinen vaimennus on 2–4 % (kuva 28). Vaimennus on tyypillinen savimaille, kun tutkitaan värähtelyn leviämistä kauempänä herätteestä, jolloin muodonmuutokset ovat pieniä. Yli 20 Hz:n alueella vaimennus on kuitenkin todellista arvoa suurempi ja laskenta menettää tarkkuuttaan.



Kuva 28. Laskennassa käytetyn Rayleigh-vaimennuksen suhde suhteelliseen vaimennukseen eri värähtelytaajuuksilla.

Vakiosuuruinen harmoninen heräte on kohdistettu paineena mallin vasempaan yläreunaan kahden elementin alueelle (0,5 m). Laskenta on suoritettu taajuustasossa (steady-state dynamic analysis) ja tuloksena on saatu eritaajuuksista harmonisista herätteistä aiheutuva maaperän pysty- ja vaakavärähtely. Vertaamalla eri analyysien tuloksia ilman tärinäseinää olevan perustapauksen tuloksiin on saatu arvio siitä, miten eri tärinäesteet toimivat eri taajuusalueilla ja eri etäisyyksillä tärinäesteestä.

3.3 Tulokset

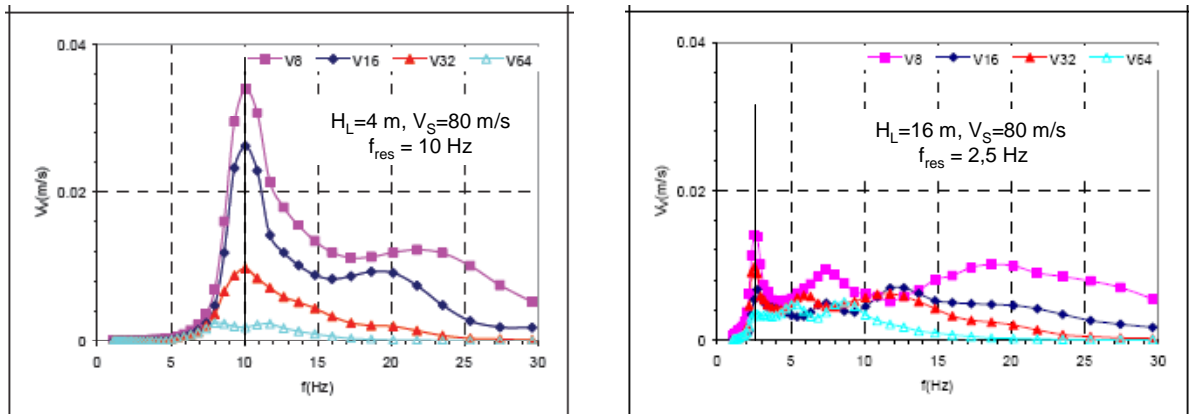
Seuraavia tuloksia tarkasteltaessa on muistettava, että liikennetärinän mallintamisen vaikeuden ja tehtyjen yksinkertaistuksien vuoksi laskentatulokset ovat pääasiassa suuntaa antavia. Tärinäesteiden toimivuus voi olla myös esitettyjä arvoja parempi, sillä käy-

tetty tasomalli ei ota huomioon mm. värinäesteestä maanpinnan tason suunnassa tapahtuvaa värähtelyn heijastumista.

3.3.1 Yleiset tulokset

Yleisiä tuloksia, joka on saatu laskennasta ilman värinäestettä (taulukko 1, tapaus V0), ovat:

- suurimmat värähtelyt esiintyvät pehmeässä maaperässä, kun savikerroksen paksuus on pieni (kuva 29)
- pysty- ja vaakavärähtelyt ovat samaa suurusluokkaa, vaikka pystyvärähtely onkin yleensä hieman vaakavärähtelyä suurempi
- värähtelyn dominoivan taajuusalueen keskitaajuus vastaa lausekkeesta $f_{res} = V_s/(2H_L)$ saatua arvoa (vrt. kuva 29, taulukko 2).



Kuva 29. Eritaajuisen vakioherätteen aiheuttama maanpinnan pystysuuntainen värähtely etäisyyksillä 6, 16, 32 ja 64 m (tarkastelupisteet V6–V64). Savikerroksen paksuus $H_L = 4$ m (vasen kuva) ja $H_L = 16$ m (oikea kuva).

Taulukko 2. Dominoiva värähtelytaajuus. Varjostetut 5–10 Hz:n arvot ovat tyypillisimpiä savimailla dominoivia värähtelytaajuuksia.

	$V_s = 40$ m/s Hyvin pehmeä savi	$V_s = 80$ m/s Pehmeä savi	$V_s = 160$ m/s Sitkeä savi
$H_L = 4$ m	$f_{res} = 5,0$ Hz	$f_{res} = 10$ Hz	$f_{res} = 20$ Hz
$H_L = 8$ m	$f_{res} = 2,5$ Hz	$f_{res} = 5,0$ Hz	$f_{res} = 10$ Hz
$H_L = 16$ m	$f_{res} = 1,2$ Hz	$f_{res} = 2,5$ Hz	$f_{res} = 5,0$ Hz
$H_L = 32$ m	$f_{res} = 0,6$ Hz	$f_{res} = 1,25$ Hz	$f_{res} = 2,5$ Hz

3.3.2 Tarkastelu taajuusalueittain, tarkasteluperiaate

Tärinäesteen tehokkuutta kuvataan tässä pienennyssuhteella R , joka ilmaisee tarkasteltavalla estetyypillä lasketun värähtelyn suhdetta värähtelyyn, joka on laskettu ilman tärinäestettä. Laskettuun pienennyssuhteeseen liittyen tuloksista on yleisesti havaittavissa, että pienennyssuhde riippuu merkittävästi seuraavista tekijöistä:

- mikä on tarkasteltava taajuusalue
- tarkastellaanko värähtelyn pysty- vai vaakavärähtelyä
- mikä on etäisyys tärinäesteeseen.

Koska tavoitteena on, että tärinäesteen tulisi vaimentaa muitakin kuin vain yhtä taajuutta, tässä yhteenvedossa pienennyssuhdetta tarkastellaan keskimääräisenä kolmella eri taajuusvälillä, jotka ovat 2,5–5 Hz, 5–8 Hz ja 8–30 Hz. Usein on tarpeen, että tärinäeste toimii maaperän värähtelyn dominoivalla taajuusalueella. Lisäksi usein voi olla tarpeen pienentää rungon tai lattian ominaistaajuusalueella tapahtuvaa värähtelyä, erityisesti mikäli rakennuksessa on havaittu haitallinen rungon tai lattian resonanssi-ilmiö. Resonanssissa rungon tai lattian ominaistaajuusalueella tapahtuva värähtely voi jopa 10-kertaistua maaperän värähtelyyn nähden. Kerrostalon rungolla tai toimistorakennusten pitkäjänteisillä betoni-, teräs- tai liittorakennelipohjilla tyypillinen ominaistaajuusalue on 2,5–5 Hz, taajuusalue 5–8 Hz on tyypillinen pientalojen rungoille tai toimistorakennusten pitkille ontelolaattavälipohjille ja taajuusalue 8–30 Hz on tyypillinen asuinrakennuksissa käytetyille kevyille puuvälipohjille tai hyvin lyhyille ontelolaattavälipohjille.

Merkittävänä parannusvaikutuksena voidaan asumismukavuuden suhteen pitää, kun pienennyssuhde $R < 0,5$ eli värähtelyn pienennys on luokkaa 50 %. Seuraavassa toimivuusvertailussa on käytetty seuraavia värähtelyn pienenemistä (1-R) kuvaavia merkin-
töjä:

- pieneminen (1-R) < 10 %
- + pieneminen (1-R) = 10–30 %
- ++ pieneminen (1-R) = 30–50 %
- +++ pieneminen (1-R) = 50–70 %
- ++++ pieneminen (1-R) > 70 %.

3.3.3 Taajuusalueen 5–8 Hz tulokset

Koska taajuusalueen 5–8 Hz on havaittu dominoivan Suomen savimaa-alueiden värähtelyssä, tärkeintä on, että tärinäeste pienentää värähtelyä ainakin tällä taajuusalueella.

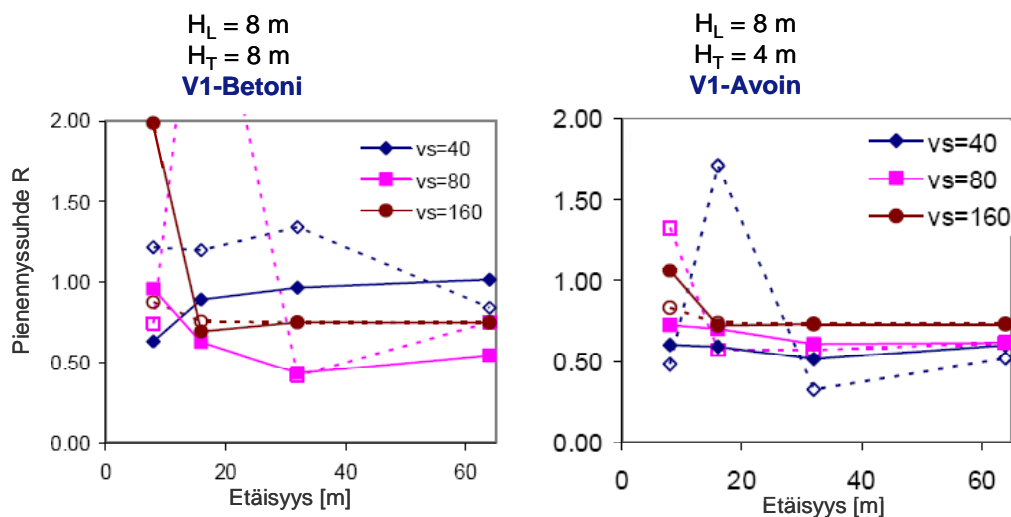
Kuvassa 30 esitetään esimerkki kuvassa 26 kuvatun pystysuoran avoimen tai betonilla täytetyn tärinäestetyypin V1 vaikutuksesta keskimääräiseen värähtelyn pienennyssuhteeseen R taajuusalueella 5–8 Hz, kun este on avoin kaivanto tai se on täytetty tai beto-

nilla. Vastaavat kuvat muille taulukon 1 laskentatapauksille on esitetty lähteessä (Fulop 2008). Yhteenveto eri laskentatapauksien tuloksista on esitetty taulukossa 3. Koska toivottavaa on, että värinäeste pienentää värähtelyä useilla eri etäisyyksillä esteestä, värinäesteen toimivuutta kuvaava värähtelyn pienennys taulukossa 3 on arvioitu kuvassa 30 esitettyjen käyrien keskimääräisenä arvona. Tapaus $V_S = 40$ m/s kuvaa hyvin pehmeää, $V_S = 80$ m/s pehmeää ja $V_S = 160$ m/s sitkeää savea.

Taulukon 3 tuloksista voidaan tehdä seuraavat taajuusalueella 5–8 Hz koskevat päätelmät:

- Kaikissa vertailutapauksissa este näyttää toimivan parhaiten hyvin pehmeissä maaperissä.
- Esteet toimivat parhaiten, kun ne ulottuvat kovaan maapohjaan asti.
- Kovilla esteillä pienennys on enimmillään 30–50 % hyvin pehmeissä savimaissa, kun kerroksen paksuus on 32 m ja esteen syvyys on 8 m. Aina ei yli 10 %:n pienennystä saavuteta, vaikka este ulottuisi kovaan maapohjaan asti.
- Avoin kaivanto (tai hyvin pehmeä este) toimii paremmin kuin kova este.
- Avoimella 4 m syvällä kaivannoilla pienennys on 30–80 % 16 ja 32 metrin pehmeissä savimaissa ja 8 m:n sitkeässä savimaassa, mutta pienennystä ei esiinny sitkeissä 16 tai 32 metrin savimaissa. Syvemmillä 8 m:n kaivannoilla ei näytetä saavutettavan oleellista etua, ellei kaivanto ulotu kovaan maaperään asti.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että avoimen kaivannon tai vastaavan toiminnallisesti riittävän pehmeän esteen toteutus on haasteellinen. Selvitettävä on myös, miten veden tunkeutuminen esteeseen vaikuttaa esteen toimivuuteen ja miten este vaikuttaa radan perustuksen rakenteelliseen käyttäytymiseen.



Kuva 30. Esimerkki värinäestetyypille V1 lasketusta keskimääräisestä värähtelyn pienennyssuhteesta R taajuusalueella 5–8 Hz eri etäisyydellä herätteestä. Jatkuva viiva kuvaa pysty- ja katkoviiva vaakavärähtelyä. Oikeassa kuvassa on avoin ja vasemmassa kuvassa betoninen värinäeseinä. H_L on pehmeän maakerroksen paksuus, H_T on esteen syvyys ja V_S on leikkausaallon nopeus maaperässä.

Taulukko 3. Avoimen ja betonilla täytetyn tärinäestetyypin V1 toimivuusarvio pystyvärähtelylle (R_V) ja vaakavärähtelylle (R_H). H_L on pehmeän maakerroksen paksuus, H_T on esteen syvyys ja V_S on leikkausaallon nopeus maaperässä. Merkintä EA kuvaa tapautta, jota ei ole laskennallisesti analysoitu.

V1-Betoni	$V_S = 40$ m/s				$V_S = 80$ m/s				$V_S = 160$ m/s			
	$H_T = 4$ m		$H_T = 8$ m		$H_T = 4$ m		$H_T = 8$ m		$H_T = 4$ m		$H_T = 8$ m	
	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H
$H_L = 4$ m	++	+	EA		-	-	EA		-	-	EA	
$H_L = 8$ m	-	-	-	-	-	-	+++	+	-	-	+	+
$H_L = 16$ m	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
$H_L = 32$ m	+	+	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-

V1-Avoim	$V_S = 40$ m/s				$V_S = 80$ m/s				$V_S = 160$ m/s			
	$H_T = 4$ m		$H_T = 8$ m		$H_T = 4$ m		$H_T = 8$ m		$H_T = 4$ m		$H_T = 8$ m	
	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H
$H_L = 4$ m	(++++)EA		EA		(++++)EA		(++++)EA		(++++)NA		EA	
$H_L = 8$ m	+++	+	(++++)NA		++	+	(++++)EA		++	++	(++++)EA	
$H_L = 16$ m	+++	++	++++	++	+	+	+	+	-	-	-	-
$H_L = 32$ m	++++	+++	++++	+++	++	-	++	-	-	-	-	-

Kuvassa 31 on esimerkki kuvassa 26 esitetyn radan alla olevien betonisten tärinäestetyyppien V3 ja V5 vaikutuksesta pienennysuhteeseen taajuusalueella 5–8 Hz. Vastaa-
vat kuvat muille taulukon 1 laskentatapauksille on esitetty lähteessä (Fulop 2008). Tärinäesteen toimivuutta kuvaavat tulokset on esitetty taulukossa 4. Taulukon tuloksista voidaan tehdä seuraavat taajuusalueella 5–8 Hz koskevat päätelmät:

- Tyypillä V3 (radan alle asennettu jäykistävä ratkaisu) pienennys on 30–80 % 8–32 metrin syvyisissä pehmeissä savimaissa, mutta merkittävää pienennystä ei esiinny sitkeissä savimaissa, ellei rakenne ulotu kovaan maaperään.
- Tyyppi V5 (esim. paalulaatta) voi olla toimiva ratkaisu pehmeissä savimaissa, mutta ei välttämättä sitkeissä savimaissa, ellei rakenne ulotu kovaan maaperään.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että lasketut tapaukset ovat teoreettisia, eivätkä edusta todellisilla ratkaisuilla saatavaa hyötyä. Ainakin tärinäestetyypin V5 tuloksiin vaikuttaa paljon todellinen muutos radan alustan massassa ja jäykkyudessa.

3.3.4 Tulokset muilla taajuusalueilla

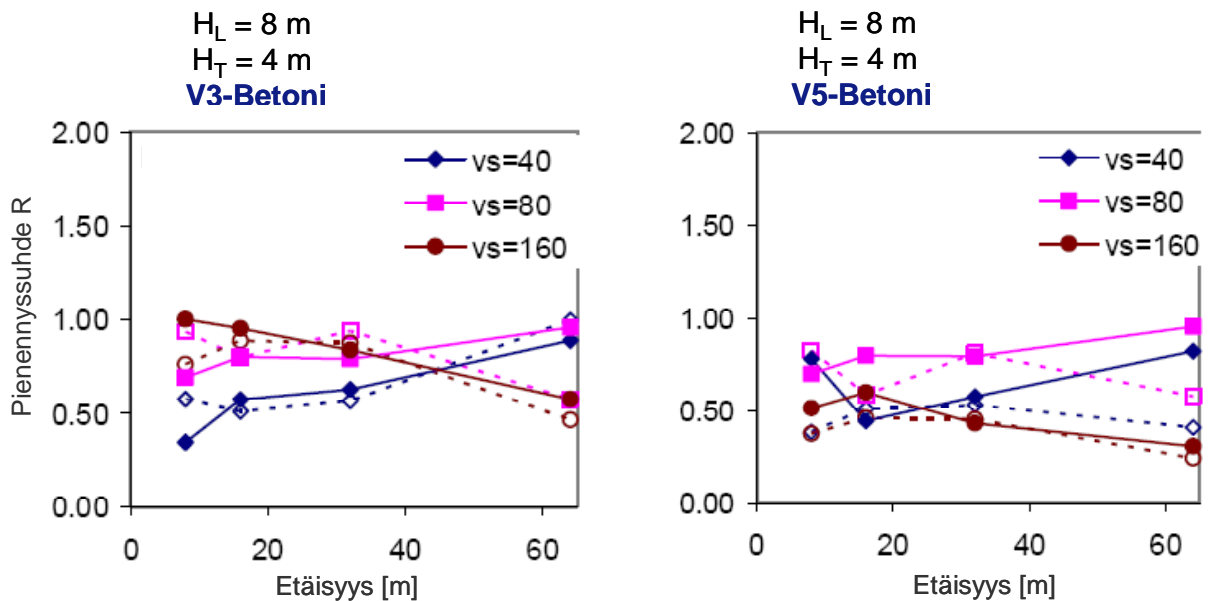
Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty tulokset, jotka kuvaavat tärinäesteiden toimivuutta erikseen taajuusalueilla 2,5–5 Hz, 5–8 Hz, 8–30 Hz. Taulukoissa esitetyt taajuusaleen 5–8 Hz tulokset ovat samat kuin taulukoissa 3 ja 4.

Tärinäestetyypin V1 tuloksista voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

- Taajuusalueilla 2,5–5 ja 8–30 Hz toimivimpia ovat samat ratkaisut kuin taajuusalueella 5–8 Hz, betoninen 8 m:n estetyyppi ja avoin 4 m:n estetyyppi.
- Betoninen 8 m:n este toimii parhaiten hyvin pehmeällä savella. Paksuilla kerroksilla (16/32 m) vaimenee parhaiten ylin taajuusalue ja matalilla kerroksilla (4/8 m) alin taajuusalue.
- Myös avoin 4 m:n kaivantointi toimii parhaiten hyvin pehmeällä savella. Ylin taajuusalue vaimenee kaikilla kerrospaksuuksilla yleensä paremmin kuin alin taajuusalue.

Tärinäestettyyppien V3 ja V5 tuloksista voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

- Pääsääntöisesti taajuusalueilla 2,5–5 ja 8–30 Hz toimivimpia ovat samat ratkaisut kuin taajuusalueella 5–8 Hz.
- Tyyppi V3 (radan alle asennettu jäykistävä ratkaisu) toimii yleensä parhaiten keskitaajuuksilla 5–8 Hz.
- Tyyppi V5 (esim. paalulaatta) toimii yleensä ylimmällä taajuusalueella paremmin kuin alimmalla taajuusalueella.



Kuva 31. Esimerkki tärinäestetyypeille V3 ja V5 lasketusta keskimäärisestä värähtelyn pienennysuhdeesta R taajuusalueella 5–8 Hz eri etäisyydellä herätteestä. Jatkuva viiva kuvaa pysty- ja katkoviiva vaakavärähtelyä. H_L on pehmeän maakerroksen paksuus, H_T on esteen syvyys ja V_S on leikkausaallon nopeus maaperässä.

Taulukko 4. Tärinästetyypin V3 ja V5 toimivuusarvio pystyvärähtelylle (R_V) ja vaakavärähtelylle (R_H). H_L on pehmeän maakerroksen paksuus, H_T on esteen syvyys ja V_S on leikkausaallon nopeus maaperässä. Merkintä EA kuvaa tapausta, jota ei ole laskennallisesti analysoitu.

V3-betoni	$V_S = 40 \text{ m/s}$				$V_S = 80 \text{ m/s}$				$V_S = 160 \text{ m/s}$			
	$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$	
	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H
$H_L = 4 \text{ m}$	+	-	EA		++	++	EA		+	+	EA	
$H_L = 8 \text{ m}$	++	++	EA		+	+	EA		+	+	EA	
$H_L = 16 \text{ m}$	++	++	EA		+	-	EA		-	-	EA	
$H_L = 32 \text{ m}$	+++	+++	EA		+	+	EA		-	-	EA	

V5-betoni	$V_S = 40 \text{ m/s}$				$V_S = 80 \text{ m/s}$				$V_S = 160 \text{ m/s}$			
	$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$	
	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H
$H_L = 4 \text{ m}$	++++	++++	EA		++++	++++	EA		++++	++++	EA	
$H_L = 8 \text{ m}$	++	+++	++++	++++	+	++	++++	++++	++	+++	++++	++++
$H_L = 16 \text{ m}$	++	++	+++	+++	-	+	+	+	-	-	-	-
$H_L = 32 \text{ m}$	++	+++	+++	+++	-	+	++	++	-	-	-	+

Taulukko 5. Avoimen ja betonilla täytetyn tärinästetyypin V1 toimivuusarvio taajuusalueilla 2,5–5 Hz (ylin, punainen väri), 5–8 Hz (musta) ja 8–30 Hz (alin, sininen väri). Muut merkinnät ovat samat kuin taulukoissa 3 ja 4.

V1-Betoni	$V_S = 40 \text{ m/s}$				$V_S = 80 \text{ m/s}$				$V_S = 160 \text{ m/s}$			
	$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$	
	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H
$H_L = 4 \text{ m}$	+	+	EA		-	-	EA		-	-	EA	
$H_L = 8 \text{ m}$	-	-	+++	++	-	-	+++	+	-	-	+	+
$H_L = 16 \text{ m}$	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+
$H_L = 32 \text{ m}$	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

V1-Avoim	$V_S = 40 \text{ m/s}$				$V_S = 80 \text{ m/s}$				$V_S = 160 \text{ m/s}$			
	$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$		$H_T = 4 \text{ m}$		$H_T = 8 \text{ m}$	
	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H	R_V	R_H
$H_L = 4 \text{ m}$	(++++)EA		EA		(++++)EA		(++++)EA		(++++)EA		EA	
$H_L = 8 \text{ m}$	+++	+	(++++)EA		++	+	(++++)EA		++	++	(++++)EA	
$H_L = 16 \text{ m}$	+++	++	++++	++	+	+	+	+	-	-	-	-
$H_L = 32 \text{ m}$	++++	++++	++++	++++	++	-	++	-	-	-	-	-

Taulukko 6. Tärinästetyypin V3 ja V5 toimivuusarviot taajuusalueilla 2,5–5 Hz (punainen), 5–8 Hz (musta) ja 8–30 Hz (sininen). Muut merkinnät kuten taulukoissa 3 ja 4.

V3-Betoni	V _S = 40 m/s				V _S = 80 m/s				V _S = 160 m/s			
	H _T = 4 m		H _T = 8 m		H _T = 4 m		H _T = 8 m		H _T = 4 m		H _T = 8 m	
	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H
H _L = 4 m	++ +	++ -	EA		++ +	++ +	EA		++ +	++ +	EA	
H _L = 8 m	++ -	++ -	EA		++ +	++ +	EA		++ +	++ +	EA	
H _L = 16 m	++ -	++ -	EA		++ +	++ +	EA		++ +	++ +	EA	
H _L = 32 m	+++ +	+++ +	EA		+++ +	+++ +	EA		+++ +	+++ +	EA	

V5-Betoni	V _S = 40 m/s				V _S = 80 m/s				V _S = 160 m/s			
	H _T = 4 m		H _T = 8 m		H _T = 4 m		H _T = 8 m		H _T = 4 m		H _T = 8 m	
	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H	R _V	R _H
H _L = 4 m	++++ ++++	++++ ++++	EA		++++ ++++	++++ ++++	EA		++++ ++++	++++ ++++	EA	
H _L = 8 m	++ ++++	++ ++++	++++ ++++	++++ ++++	++ ++++	++ ++++	++++ ++++	++++ ++++	++ ++++	++ ++++	++++ ++++	++++ ++++
H _L = 16 m	++ ++++	++ ++++	+++ ++++	+++ ++++	- ++++	- ++++	- ++++	- ++++	- ++++	- ++++	- ++++	- ++++
H _L = 32 m	++ ++++	++ ++++	+++ ++++	+++ ++++	- ++++	- ++++	++ ++++	++ ++++	- ++++	- ++++	- ++++	- ++++

3.3.5 Arvio vesitäytteen esteen toimivuudesta

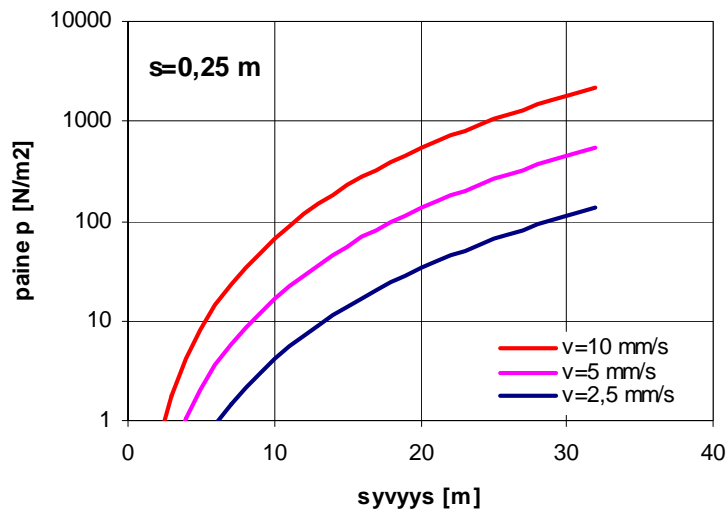
Tehdyssä vertailussa avoimella kaivannolla saatiin paras eristys. Syvä kaivanto ei kuitenkaan ole yleensä mahdollinen ilman tuentaa. Jotta rakenne toimisi mahdollisimman hyvin avoimen kaivannon tapaan, seinämien välisen tilan tulee olla hyvin joustava. Ongelmana on, että yleensä este täyttyy vedellä. Koska vesi on kokoonpuristumatonta, sen liikkeen hitausvoimista syntyvä paine voi välittää värähtelyn tärinäesteen läpi, vaikka neste ei hitaassa liikkeessä välitäkään voimia.

Nesteen jäykistävää vaikutusta voidaan karkeasti arvioida nesteeseen syntyvän paineen avulla. Seuraavassa, ilmiötä havainnollistavassa vertailussa, syntyvän paineen suuruutta arvioidaan pystysuoraan, yläreunastaan avoimeen nesterakoon syntyvän paineen avulla, kun paine syntyy rakoa puristavasta harmonisesta liikkeestä. Paineen suuruus riippuu raon suuruudesta s , liikkeen värähtelynopeudesta v ja tarkasteltavasta syvyydestä h . Suurin paineamplitudi syvyydellä h on liitteen A mukaan suurusluokaltaan

$$p_{\max} = p_0 \cdot \left(\frac{s_0}{s}\right) \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^3$$

jossa $p_0 = 1,67 \text{ N/m}^2$, $s_0 = 0,1 \text{ m}$, $v_0 = 1 \text{ mm/s}$ ja $h_0 = 10 \text{ m}$.

Kuvassa 32 on esitetty suurin paine raon korkeuden funktiona tapaukselle, jossa raon leveys $s = 0,25$ m. FEM-laskelmien perusteella on arvioitu, että maaperään aiheutuva jännitys on suuruusluokkaa 1000 N/m^2 , kun värähtelyn amplitudi maan pinnalla on suuruusluokkaa 10 mm/s . Jos lähtökohtana pidetään, että neste toimii pehmeänä, kun nesteeseen syntyvä painetaso on $1/10$ maan jännityksistä (100 N/m^2), niin esimerkkitapauksessa voi nesteen arvioida käyttäytyvän suhteellisen pehmeänä ainakin 10 metrin syvyyteen asti. Lausekkeen mukaan paine kasvaa kuitenkin hyvin nopeasti, jos raon syvyys kasvaa, raon leveys pienenee, tai värähtelynopeus kasvaa.



Kuva 32. Arvio nestepaineen (p) riippuvuudesta raon syvyydestä eri värähtelynopeuksilla (v), kun raon leveys $s = 0,25$ m.

Nesteen täyttämän tärinäesteen käyttäytymisen arvioimiseksi kokeiltiin myös ABAQUS-ohjelman käyttöä (Vepsä 2009). Kokeilussa käytettiin seuraavia mallintamistapoja:

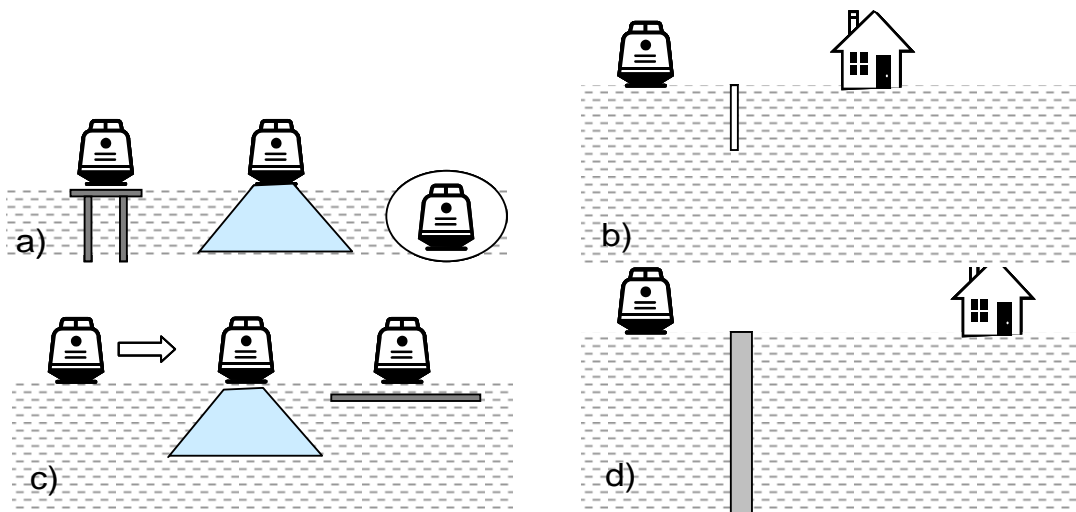
- Nesterako mallinnettiin akustisilla elementeillä (AC2D4), jolloin muuttujana on ainoastaan nesteen paine. Malli ei ota huomioon nesteen liikettä.
- Neste mallinnettiin hydrodynaamisella materiaalimallilla, joka tarkastelee nesteen liikettä raossa kokoonpuristumattomana viskoosina nesteinä, jolloin neste on mallinnettu mukautuvilla (adaptiivisilla) neste-elementeillä (F2D2).
- Nesterako mallinnettiin kontinuumielementeillä (CPED2) yläreunastaan suljettuna rakona, jolloin paineen oletetaan olevan koko raon alueella sama.

Laskenta osoittautui erittäin hankalaksi. Akustiset AC2D4-elementit toimivat laskennassa parhaiten, mutta tarkastelua ei elementin rajoituksista johtuen voida pitää riittävän luotettavana nesteraon arviointiin. Kontinuumielementtimallin CPED2 käyttö vaikutti akustisen elementtimallin yksinkertaistukselta. Hydrodynaaminen malli ei vaikuttanut luotettavalta, sillä sen mukaan värähtelyt voisivat nesteraon vuoksi jopa moninkertaisua.

3.3.6 Yhteenveto periaateratkaisujen tuloksista

Yleisesti, pehmeille maaperille soveltuvaa ja laajalla taajuusalueella toimivaa ratkaisua ei laskennallisessa tarkastelussa löytynyt. Tulosten perusteella tärinäesteillä on vaikea saavuttaa yli 50 %:n pienennystä. Laskennan perusteella pehmeillä maaperillä parhaiten toimivat ratkaisut tärinän leviämisen estämiseksi ovat arvioidussa paremmuusjärjestyksessä:

- Radan perustuksen ulottaminen kovaan maapohjaan ainakin matalien savikerrosten tapauksessa, esim. paalulaatta, maan vaihto, maan stabilointi tai tunnelirakentaminen (kuva 33a)
- Maaperää huomattavasti pehmeämmät, vähintään 4 m syvyyteen ulottuvat tärinäesteet (kuva 33b)
- Radan alla olevan maakerroksen jäykistäminen siten, että radan alla olevan maaperän ominaistaajuus kasvaa merkittävästi ympäröivän maaperän jäykkyyteen nähden, esim. materiaalia vaihtamalla tai lisäämällä radan pengerrakenteen leveyttä (kuva 33c)
- Maaperää huomattavasti jäykemmät, vähintään 8 m syvät, tai kovaan pohjaan ulottuvat tärinäesteet (kuva 33d).



Kuva 33. Erilaisia periaateratkaisuja leviävän tärinän pienentämiseksi.

4. Uusien tuotteiden ideointi

Uusien tuotteiden ideoinnin tavoitteena oli löytää tehtyihin taustaselvityksiin ja alan asiantuntijoiden näkemykseen perustuen sellaisia uusia, entistä tehokkaampia hinnaltaan tai edullisempia tärinäesteraatkaisuja, joita voidaan jatkossa kehittää eteenpäin tuotekehitys- ja koerakentamisprojekteissa.

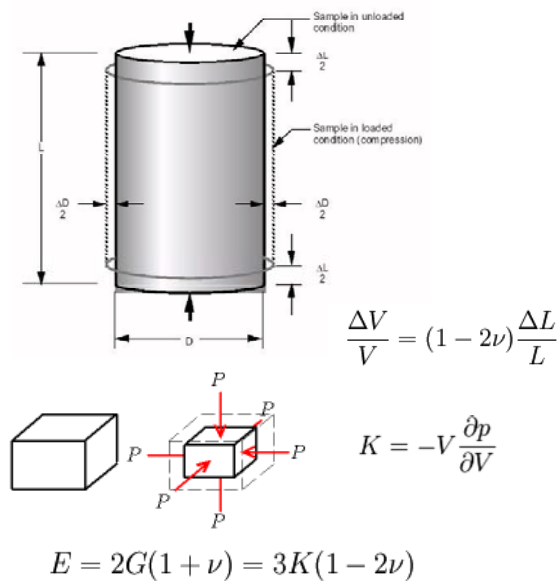
4.1 Materiaalien kovuuksia

Tärinäesteen toimivuuteen vaikuttaa se, mikä on tärinäesteessä käytetyn materiaalin ja maaperän jäykkyysero. Materiaalin dynaamista jäykkyyttä kuvataan seuraavassa termeillä kovuus ja pehmeys. Kiinteillä aineilla kovuus on verrannollinen kimmokertoimeen. Nesteillä ja kaasuilla kovuus on verrannollinen kokoonpuristuvuuteen. Kimmo-kerroin kuvaa vetorasituksesta aiheutuvaa kappaleen pituuden muodonmuutosta ja kokoonpuristuvuus paineesta aiheutuvaa kappaleen tilavuuden muodonmuutosta (kuva 34). Kaasut ja nesteet käyttäytyvät jäykkyysominaisuuksiltaan kiinteän aineen tavoin, kun ne ovat suljetussa sylinterissä ja niitä kuormitetaan aksiaalisesti (esim. hydraulikka- ja pneumatiikkasyylinterit). Nesteet ovat kokoonpuristumattomia toisin kuin kaasut ja siksi nesteet käyttäytyvät suljetussa tilassa kovana, mutta kaasut pehmeänä.

Taulukossa 7 on esitetty eri materiaalien kimmo-ominaisuuksia. Taulukosta nähdään esimerkiksi että

- EPSillä (styrox) ei ole oleellisesti pehmeämpää kuin pehmeä savi, koska niiden kimmokertoimet ovat samaa suuruusluokkaa
- EPS on levymäisenä mattona ilmapitoisuutensa vuoksi huomattavasti pehmeämpää kuin kumi
- syvästabiloidulla savella kovuus on merkittävästi pienempi kuin betonilla, mutta oleellisesti suurempi kuin pehmeällä savella
- veden ja pehmeän saven kovuudet voivat suljetussa tilassa olla samaa suuruusluokkaa
- kumin kovuus on suljetussa tilassa samaa suuruusluokkaa kuin veden, jos poikkipintamuodonmuutos on estetty, siksi kumia käytetäänkin eristematoissa yleensä rouheena.

Taulukon 7 perusteella pehmeää savea joustavampi materiaali tärinäesteeksi voi olla esimerkiksi suljettuun tilaan pakattu ilma, riittävän vapaasti purkautumaan pääsevä vesi tai hyvin pehmeät jousielementit kahden jäykän seinämän välissä. Pehmeää savea jäykempi tärinäeste on mahdollista tehdä puusta, betonista, teräksestä, kovemmista maa-aineksista tai stabiloidusta savesta.



Kuva 34. Kimmokertoimen, kokoonpuristuvuuden ja suppeumaluvun välinen yhteys kiinteillä aineilla.

Taulukko 7. Eri materiaalien kovuuteen vaikuttavia tekijöitä.

	Kimmo- kerroin E (MPa)	Suppeu- maluku ν	Kokoon- puristuvuus K (MPa)
Ilma		0	0,1 (paine)
Kumi	10...100	~0,5	1000
EPS	3...10	~ 0,05	1...10
Vesi		~ 0,5	2200
Pehmeä savi	3...5	0,45...0,5	
Sitkeä savi	4...10	0,3	
Keskittiivis sora	90...180	0,2...0,35	
Syvästabilointi	100...1000	0,3	
Kevytsoharkot	3000		
Puu	5 000...15 000	0,05...0,5	
Betoni	25 000...40 000	0,2	
Teräs	200 000	0,3	160 000

Taulukon lähteet:
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W50.pdf>
<http://en.wikipedia.org/wiki/Compressibility>
http://en.wikipedia.org/wiki/Bulk_modulus
www.eps-eriste.fi/document.php?DOC_ID=14&SID=1
 Kurkela & Hakulinen, Saint Petersburg, 16-19 June 2008
 Rakentajain kalenteri 1994

4.2 Hintatietoja

Ratahallintokeskukselta saatujen hinta-arvioiden (Kurkela 2008a) perusteella Korian koekohteeseen vuonna 2006 syvästabiloimalla valmistetun noin 20 m syvän pilariseinän (kuva 9) hinta oli suurusluokkaa 1000–1500 €/m. Hinnaltaan samaa suurusluokkaa on myös Mellilään vuonna 2005 rakennettu 14 m syvä teräsponttiseinä (kuva 8). Teräsponttiseinän hinnasta noin 70 % muodostuu romutettavan teräspontin hinnasta. Radan alle asennettujen betonipaalujen (kuva 12) varaan perustetun paalulaatan hinnaksi on arvioitu uudessa kohteessa 3000 €/m ja korjauskohteessa 5000 €/m.

Tärinäesteen materiaaliksi on harkittu myös käytöstä poistettuja renkaita tai kierrätykseen varastoituja sähköpylväitä. Suomen rengaskierrätyksen (<http://www.rengaskierratys.fi>) mukaan renkaita vapautuu Suomessa vuodessa noin 40 000 tonnia (noin 3,5 milj. kpl), joka vastaa noin yhden neliökilometrin alaa tasoon levitettynä. Kuusakoski Oy:ltä saatujen arvioiden mukaan noin puolelle kierrätysrenkaista on käyttö jo tiedossa. Materiaalin hinta on luokkaa 2–3 €/tonnilta, joka on keskimääräisiin rahtikustannuksiin (noin 20 €/tonni) nähden pieni.

Energiayhtiöltä saatujen tietojen mukaan sähköpylväitä vapautui vuonna 2008 noin 50 000 vuodessa ja lähivuosina määrä voi kaksinkertaistua. Lisäksi teleyhtiöltä vapautuu lähiaikoina sama määrä sähköpylväitä. Vapautuva määrä vastaa noin 0,3 neliökilometrin alaa tasoon levitettynä. Pylväiden pituus on 8–12 m ja latvan halkaisija vähintään 150 mm. Tolpan hinta on luokkaa 15–20 €/kpl ja sen keskimääräiset kuljetuskustannuk-

set ovat Suomessa suurusluokkaa 3–5 €/kpl. Tällä hetkellä käytettyjen sähkötolppien käyttöaste on kierrätyksessä hyvä.

4.3 Kehitettyjä tuoteideoita

Liitteessä B on esitetty ajatuksia erilaisiksi tärinäesteiksi ja arvioitu niiden käyttömahdollisuuksia. Ideat on kehitetty tilaisuudessa, johon osallistui joukko projektin johtoryhmään kuuluvia tärinäalan asiantuntijoita. Käyttömahdollisuuksia on arvioitu seuraavien tekijöiden perusteella:

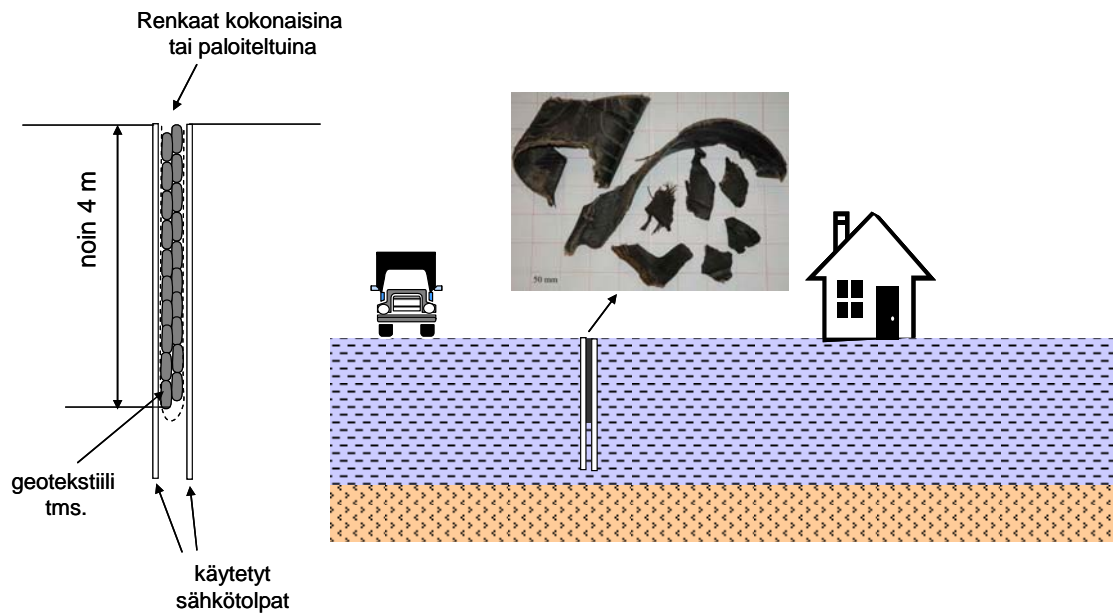
- miksi ratkaisu toimii
- mitkä ovat idean hyvät puolet
- mitkä ovat idean huonot puolet
- kuinka kalliina ratkaisu pidetään.

Lähtökohtana ideoinnille olivat syvästabiloimalla ja teräsponteista valmistetuista tärinäseinistä saadut kokemukset sekä periaateratkaisujen laskennallisesta vertailusta saadut tulokset.

4.4 Jatkotarkasteluun seulotut ratkaisut

Seulonnan kriteerinä on käytetty tärinäesteen toimivuutta, hintaa ja uutuusarvoa. Maaperää huomattavasti jäykempiä, kovaan pohjaan ulottuvia tai vähintään 12–20 m syviä, teräsponteista tai syvästabiloimalla valmistettuja tärinäseiniä ei valittu jatkotarkasteluun, koska niiden toimivuus tunnetaan jo jollakin tarkkuudella aikaisempiin tutkimuksiin perustuen (s. 11, kohta 2.1).

Uutuusarvoltaan ja edullisuudeltaan mielenkiintoisimpana pidettiin rengastäytteistä tärinäseiniä (kuva 35). Noin 4 m syvänä se voidaan toteuttaa tavanomaisilla paalutus- ja kaivutekniikoilla. Este toimii parhaiten, mikäli se ulottuu kovaan maapohjaan. Toisin kuin kova este, pehmeä este näyttää toimivan myös, vaikka se olisi suhteellisen matala savikerroksen paksuuteen nähden (s. 30, taulukko 5). Poiketen kovasta esteestä, pehmeä este pienentää suhteellisen hyvin myös maan vaakasuuntaista värähtelyä.



Kuva 35. Periaatekuva rengastäytteisestä seinästä. Sähkötolpat voidaan korvata massastabiloinnilla.

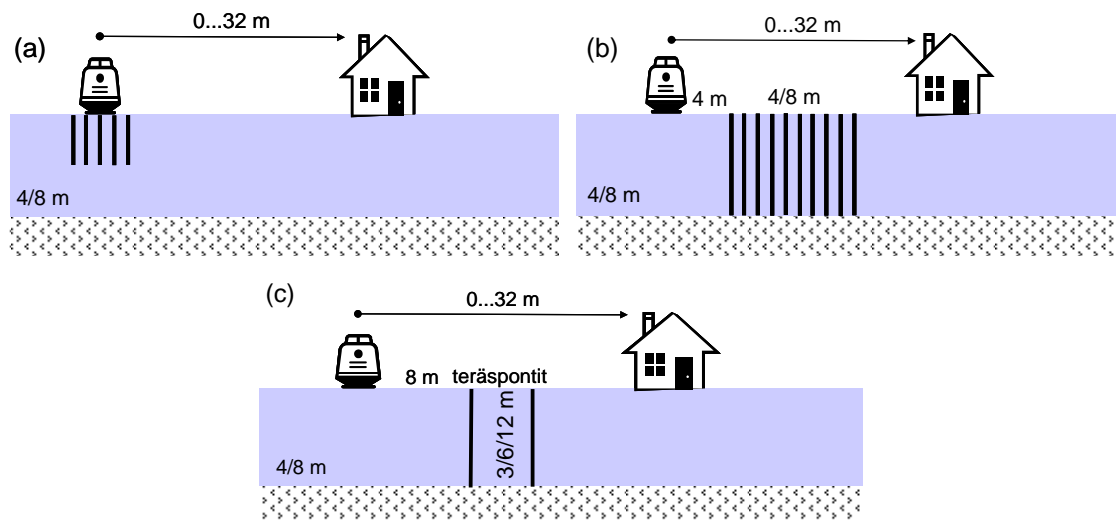
Esteen toimivuudelle on oleellista, että sen on mahdollisimman pehmeä. Esteen täyttävän veden mahdollisimman vapaan liikkuvuuden vuoksi esteen paksuuden tulee olla luokkaa 200 mm (s. 32, kuva 32). Kumirouheen kimmokertoimen $E = 0,5\text{--}1\text{ MPa}$ (s. 41, kuva 39, paine 50–100 kPa) voidaan olettaa oleva riittävän pieni saven kimmokertoimeen $E = 3\text{--}10\text{ MPa}$ nähden (s. 35, taulukko 7).

Uusiomateriaalin käytön vuoksi rengastäytteisen seinän hinnan arvellaan olevan masatuotannossa noin puolet teräsponteilla tai syvästabiloimalla valmistettujen tärinäseinien hinnasta, suuruusluokkaa 500–1000 €/m, riippuen esteen pituudesta. Hinnasta noin 250–300 €/m aiheutuu materiaaleista (käytetyt sähkötolpat ja rengasrouhe) ja loput työstä (paalutus, kaivu, kuljetus, täyttö, maisemointi, projektijohto).

Tärinäesteen toimivuuteen ja rakentamiseen liittyy epävarmuuksia, sillä tällaista, hyvin pehmeää tärinäestettä ei ole aikaisemmin kokeiltu. Valmistuksen jälkeen on lisäksi varauduttava renkaiden tiivistymiseen ja pieneen maanpinnan painumiseen, jonka vaikutukset väylään ja alueella oleviin rakennuksiin tulee ottaa huomioon. Lisäksi rakentaminen voi edellyttää ympäristölupaa ja mahdollista pinta- ja pohjaveden seuranta.

Muiksi jatkotarkastelun arvoisiksi katsotut ideat liittyvät maaperän jäykistämiseen ja peräkkäisten seinien käyttöön. Savimailla hyvin pehmeän esteen rakentaminen aivan väylän tai tien alle voi olla vaikeaa liian suurten painumien vuoksi. Silloin eristämiskeinoja voivat olla kova tärinäeste väylän vieressä tai väylän alla oleva maapohjan jäykistäminen joko osasyvyyteen tai kovaan maapohjaan asti. Väylän maapohjan jäykistämällä (kuva 36a) voidaan pienentää syntyvää värähtelyä (s. 30, taulukko 4) ja sillä voidaan vaikuttaa myös maaperän ominaisvärähtelyn taajuuteen väylän kohdalla. Lasken-

nallisesti olisi tarpeen selvittää erilaisia jäykistämismuutoksia ja parasta vaihtoehtoa olisi hyvä kokeilla myös käytännössä, sillä tällaista ratkaisua ei ole vielä kokeiltu. Alustan jäykistäminen soveltuu parhaiten matalille savikkoalueille. Myös väylä ulkopuolelle tehty maa-alueen jäykistäminen (kuva 36b) saattaa pienentää värähtelyä, mutta ennen koerakentamista tulisi pienennyksen suuruuden merkittävyys arvioida laskennallisesti. Lisäksi olisi hyvä selvittää ainakin laskennalliseen tarkasteluun perustuen, mikä hyöty voidaan saavuttaa kahdella perättäisellä tärinäseinällä. Seinät voivat olla joko teräsponteista tai syvästabiloimalla valmistettuja ja niiden voidaan arvioinnissa ajatella ulottuvan kovaan maapohjaan asti (kuva 36c).



Kuva 36. Periaatekuvia jatkotarkastelun kannalta mielenkiintoisista ratkaisuista. Numeroarvot ovat ehdotuksia laskennallisen tarkastelun parametreiksi. Osakuvat a ja b: Käytettyjen sähkötolppien (tai stabiloinnin) käyttö maan jäykistämiseksi. Stabilointi voi ulottua kovaan maapohjaan tai vain osasyvyyteen. Osakuva c: Teräsponteilla (tai syvästabiloimalla) toteutettujen perättäisten tärinäseinien yhteisvaikutuksen selvittäminen. Tärinäseinät ulottuvat kovaan maapohjaan.

Rajoitettujen resurssien ja numeerisen mallintamiseen liittyvien epätarkkuuksien vuoksi tässä selvityksessä päätettiin panostaa rengastäyteen koe-esteen rakentamiseen ja sen todellisen toimivuuden selvittämiseen. Koe-esteestä tehtävien mittausten avulla on tavoitteena havainnollistaa myös värähtelyn kierto-ilmiötä, jolloin esteen edestä tuleva värähtely taittuu esteen pään kautta esteen taakse. Koe-esteestä tehtävien tärinämittausten numeerinen mallintaminen ja muiden edellä esitettyjen ratkaisujen toimivuuden selvittäminen jätettiin jatkotutkimusaiheiksi. Seuraavassa on esitetty kuvaukset suunnittelusta koe-esteestä ja tehtävistä tärinämittauksista. Koemittausten tulokset esitetään myöhemmin laadittavassa erillisessä raportissa.

4.5 Kuvaus koe-esteestä

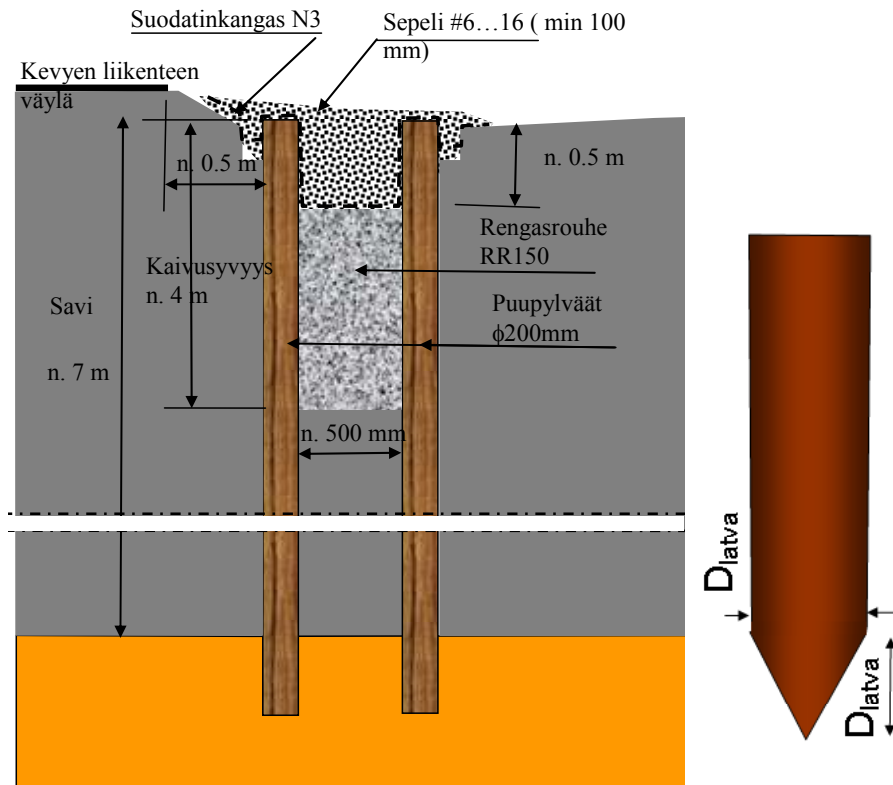
Kuvauksen tarkoitus on esittää esimerkinomaisesti, miten rengastäytteinen tärinäeste voidaan toteuttaa.

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 37). Pylväiden väliin jäävän kaivannon leveys on noin 500 mm.

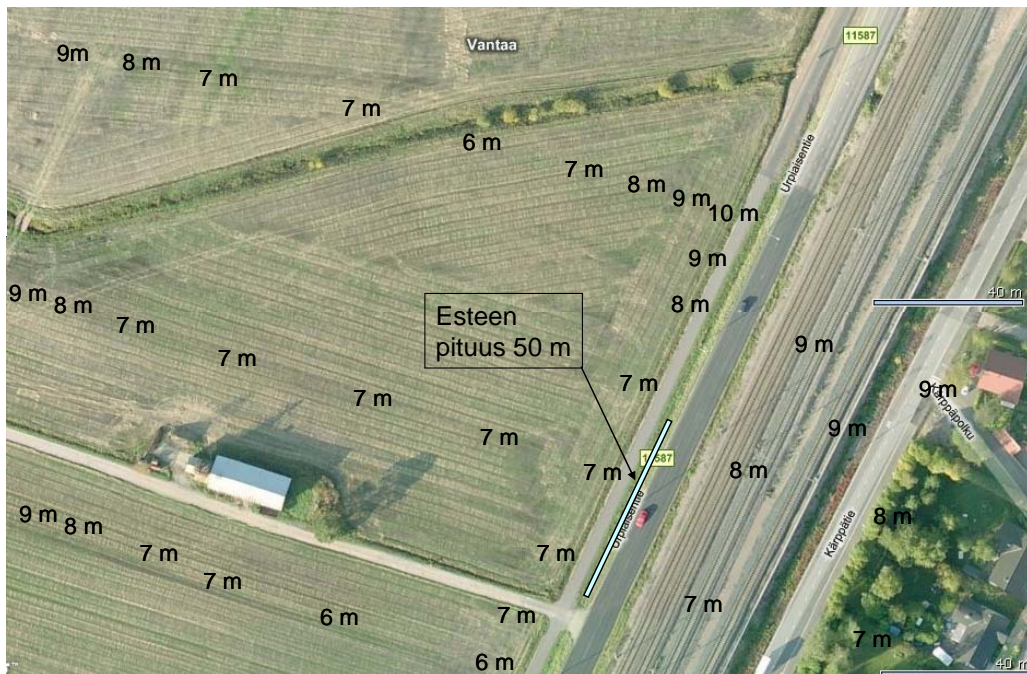
Este on ajateltu rakennettavan kevyen liikenteen väylän ja maantien väliin jäävälle viherkaistaleelle (kuva 38). Savikerroksen paksuus on tärinäesteen kohdalla ja sen lähi-alueella noin 7 m, jonka alapuolella maan on arvioitu olevan silttiä tai löyhää hiekkaa. Lähialueelta mitattu saven siipikairausleikkauslujuus on alimmillaan noin 7 kN/m^2 , mutta 2 metrin paksuisen kerroksen keskiarvo on noin 10 kN/m^2 .

Seinämään käytetään vanhoja, painekyllästettyjä puhelin- tai sähköpylväitä. VTT:n tutkimuksen (Lehmus et. al. 2005) mukaan pylväiden keskihalkaisija on keskimäärin noin 200 mm (taulukko 8). Taivutuslujuuden ominaisarvo on 22 MPa kuivana ja 24 MPa muutettuna standardikosteuteen 12 %. Tässä esimerkissä pylväät on ajateltu lajiteltavaksi niin, että pylvään keskihalkaisija on 180–220 mm.

Kumirouheen kimmokerroin riippuu voimakkaasti sivupaineesta ja on paineella 50 kPa suuruusluokkaa 500 kPa (kuva 39). Kokoonpuristuvuusmoduuli (sekanttimoduuli) riippuu rouheen koosta (kuva 40). Rengasrouheella RR150 (maksimikoko 150 mm). kokoonpuristuvuusmoduuli on suuruusluokkaa 200 kPa, kun aksiaalipaineen muutos on 0–50 kPa.



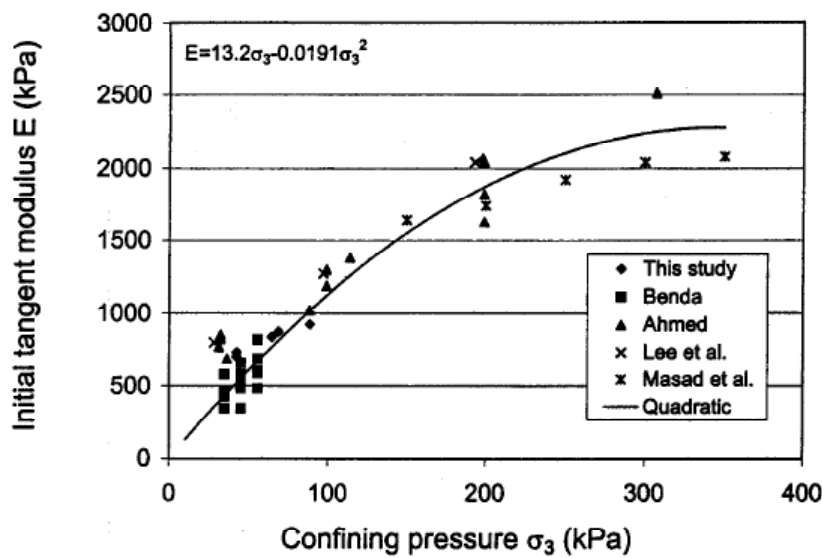
Kuva 37. Periaatekuva tärinäesteen rakenteesta. Alapään tunkeutuminen siltti- tai hiekkakerrokseen ei ole välttämätöntä. Pylvään pää työstetään kiilamaiseksi asennuksen helpottamiseksi.



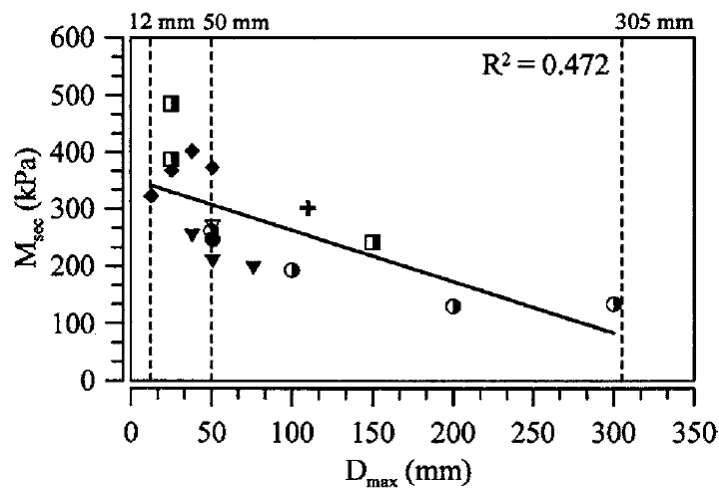
Kuva 38. Suunnitellun koe-esteen sijainti savikkoalueella. Luvut kuvaavat arvioitua savikerroksen paksuutta.

Taulukko 8. Käytettyjen sähköpylväiden tilastollisia tietoja. Halkaisijat esittävät keskikohdan halkaisijaa ja taivutuslujuudet kuivan pylvään lujuutta vähintään 1 m maanpinnan yläpuolella. Mittausten määrä 100 kpl (Lehmus et. al. 2005).

	Halkaisija d [mm]	Tiheus ρ [kg/m ³]		Kosteus u (%)		Murto-kuorma F_u [kN]	Taivutuslujuus f_b [MPa]	Taivutuskimmo-kerroin E [MPa]	Kuormitusaika [s]
		$\rho_{u,pinta}$	$\rho_{u,sisus}$	u_{pinta}	u_{sisus}				
Keskiarvo	189	513	467	18,1	19,8	13,4	35,2	9969	348
Keskihajonta	17	49	41	3,9	2,8	4,2	8,1	2314	139
Ominaislujuus							21,9		



Kuva 39. Rengasrouheen alkukimmokerroimen E riippuvuus paineesta (Edeskär 2006). Sellipaine σ_3 on sylinteriin pakatun aineen sivupaine aksiaalisessa puristuskokeessa.



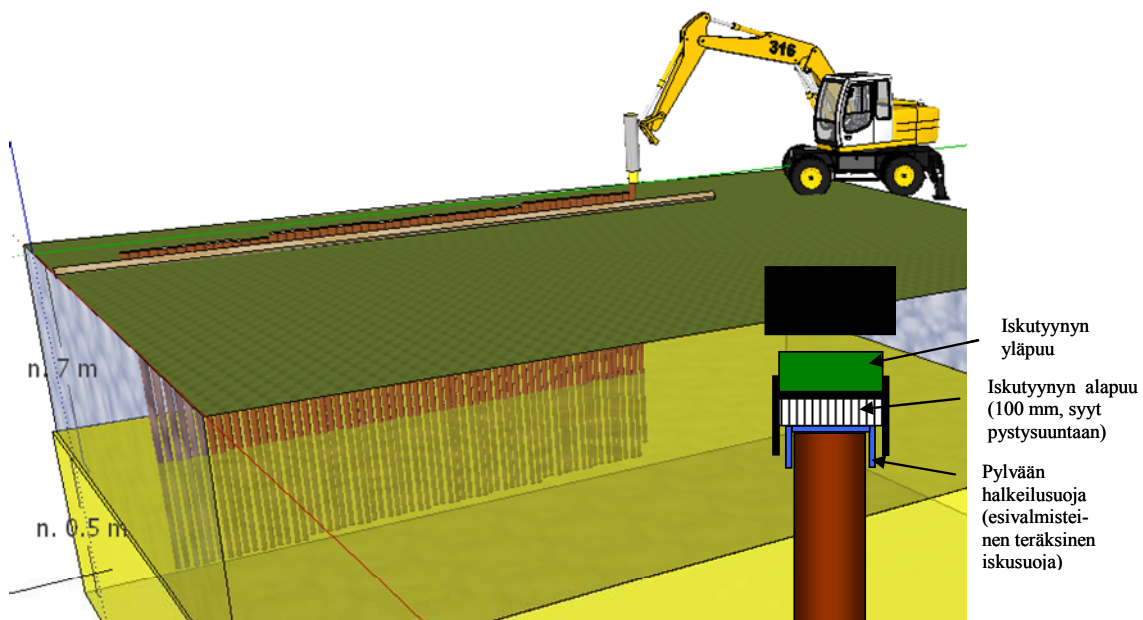
Kuva 40. Kokoonpuristuvuusmoduulin (sekanttimoduulin) $M_{sec} = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ riippuvuus rengasrouheen koosta D_{max} eri koetulosten perusteella. $\Delta\varepsilon$ on suhteellisen kokoonpuristuksen muutos, kun paineen muutos $\Delta\sigma = 0-50$ kPa (Strenk & al. 2007).

Esteen toteutus käsittää seuraavat vaiheet:

- 1) Esiselvitykset. Selvitetään esteen rakentamiseen vaikuttavat yleiset tekijät (sähkökaapelit, putket, liikennejärjestelyt, varastointipaikat, maanomistus, asukkaiden kuulemiset, rakennusluvut, ympäristöluvut, jne.).
- 2) Geotekninen suunnittelu. Määritetään esteen kohdalta pohjasuhteet kairauksien avulla. Pohjasuhteet määräävät tarvittavan pylväiden pituuden, paalutuskaluston koon ja kaivutyön suorittamistavan. Pohjasuhteet antavat myös lähtöarvot geotekniselle suunnittelulle. Suunnittelussa tulee tarkastella ainakin seuraavat geotekniset asiat:
 - (a) Varmistetaan pylväseinän taivutuskestävyyden riittävydestä rakentamistyön aikana. Lähtökohtana arvioinnissa on, että pylväseinämien yläpää on tuettu toisiinsa kaivun aikana. Tässä esimerkissä on arvioitu, että 4 metrin kaivussyvyys (s. 40, kuva 37) on pylväiden kestävyyden suhteen mahdollinen vain, mikäli työ tehdään vedenalaistyönä.
 - (b) Kaivussyvyyden alapuolelle ulottuvan pylväseinämän tuentapituuden määrittäminen, mikäli pylväseinien alaosat tukeutuvat toisiinsa niiden väliin jäävän saven välityksellä. Tuentapituus perustuu saven geoteknisiin ominaisuuksiin kaivutason alapuolisessa kerroksessa. Tässä esimerkissä on arvioitu, että 3,5 metrin tunkeutuma kaivannon alapuoliseen saveen on riittävä.
 - (c) Tuentapituuden määrittäminen, mikäli savikerros on matala ja pylväseinän alareuna tunkeutuu saven alapuoliseen kovaan maapohjaan. Tuentapituus perustuu maapohjan geoteknisiin ominaisuuksiin. Vaadittavasta tuentasyvyydestä varmistetaan laatimalla paalutustyötä varten loppuunlyöntiohjeet. Ohjeissa on otettava huomioon myös pilarin yläpäähän lyönnaikainen vaurioituminen. Tässä esimerkissä on arvioitu, 3,5 metrin tunkeutuma kaivannon alapuoliseen saveen saavutetaan ilman erillisiä loppuunlyöntiohjeita.
 - (d) Tarvittaessa arvioidaan maanpinnan kohoaminen paalutustyön aikana.
 - (e) Tarvittaessa arvioidaan rengasrouheen kokoonpuristumisesta aiheutuva ympäröivän maanpinnan pitkäaikaispainuminen esteen valmistumisen jälkeen. Tässä esimerkissä on arvioitu, että 2 metrin etäisyydellä esteestä pitkäaikaispainuma voi olla noin 10 mm.
- 3) Sijainnin määrittäminen. Seinämän tuleva sijainti mitataan paikalleen ja merkitään maastoon. Selvitetään sähkökaapelien, putkien ym. maanalaisten rakenteiden tarkka sijainti.
- 4) Rakentamisen esityöt. Pylväät katkaistaan määrämittäisiksi, esimerkkitapauksessa pituuteen 7,5 m. Pylvään tyvipuoli oikaistaan tarvittaessa kohtisuoraksi paalutus-

työtä varten. Pylväiden latvapuoli työstetään kiilamaiseksi asennuksen helpottamiseksi (s. 40, kuva 37). Pylväiden työstöstä syntynyt materiaali ja kierrätyskäyttöön soveltumattomat palat kootaan ja kuljetetaan kierrätyspisteeseen.

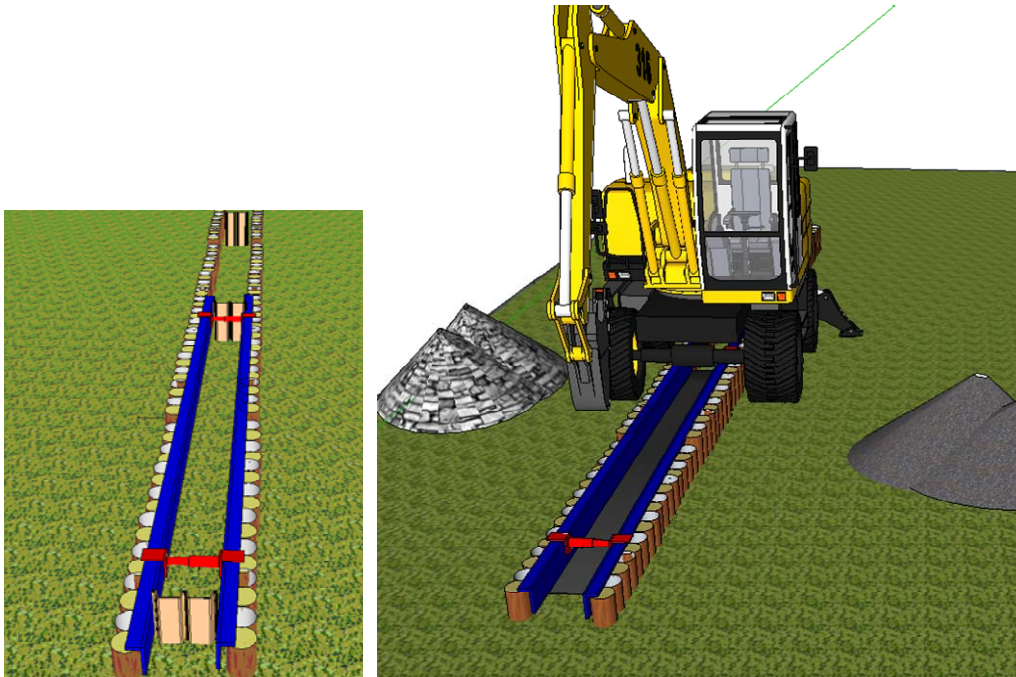
- 5) Asennusalueen tasaus. Asennusalue tasataan noin 200 mm nykyisen tason alapuolelle. Maan pinnan nykyinen korkeusasema ja viettokaltevuus säilytetään valmiin rakenteen viimeistelyn jälkeen.
- 6) Ensimmäisen paalurivin lyöminen. Pylväät lyödään tasatulle pohjalle suoraan riviin (kuva 41). Seinämä tulee saada suoraan linjaan, jotta kaivu ja tuenta voidaan tehdä jatkossa kuvatuin menetelmin. Määrämittaiset pylväät lyödään maahan niin, että pylvään yläpää jää vähintään suunnitellulle tasolle eikä mene maan sisään upoksiin.
- 7) Mikäli määrämittaan katkaistut pylväät eivät tunkeudu koko pituudeltaan maahan, eli jos esimerkkitapauksessa kaivussyvyyden alapuolelle jäävä osuus on pienempi kuin $7,5 - 4 = 3,5$ m, noudatetaan loppuunlyöntiohjeita, jotta pylvään kärki kiinnittyy riittävän lujasti kovaan maapohjaan.
- 8) Toisen pylväsrivin lyöminen. Toinen pylväsriivi lyödään yhdensuuntaiseksi ensimmäisen pylväsrivin kanssa. Sekä ensimmäisen että toisen pylväsrivin on oltava niin hyvin suorassa, että kaivu pylväiden välistä kyetään tekemään kapeakärkisellä 300 mm:n kauhallä. Pylväiden väliin jäävien rakojen on oltava niin pieniä, että savi ei pääse tunkeutumaan pylväiden välistä kaivantoon ja että raot eivät heikennä pylvässeinämän taiputuskestävyyttä.



Kuva 41. Periaatekuva ensimmäisen paalurivin lyömisestä ja paalun yläpään suojaamisesta. Suoran paalurivin saamiseksi käytetään tarvittaessa ohjainta. Paalun päässä voidaan käyttää iskusuojaa (paalutuskoneen varuste) ja pylvään päässä erillistä suojahattua tai kiristettävää pantaa.

- 9) Kaivun esivalmistelut. Kaivu tehdään vaiheittain. Kerrallaan kaivetaan vain yksi 4–5 m osuus. Ennen kaivua pylväsrievien yläreunat tuetaan toisiinsa ja kaivettava osuus suljetaan päistään esimerkiksi pylväsrievien päihin lyödyin väliaikaisin ponttilankuin (kuva 42). Yläpäiden tuennan tulee estää pylväiden siirtyminen ja katkeaminen. Ponttilankut estävät kaivun ja täytön aikana saven sortumisen ja pitävät kumirouhetäytön erillään savesta. Tuenta siirretään kaivun etenemisen tahdissa aina seuraavaan osuuteen.
- 10) Kaivu ja täyttö. Pylväiden väli tyhjennetään savesta ja täytetään kumirouheella yksi osuus kerrallaan (kuva 42). Kaivu tehdään 4 m syvyyteen vedenalaistyönä. Työturvallisuussyistä johtuen paaluseinien väliin ei saa mennä. Vesitäyttö on tehtävä pylväiden katkeamisen välttämiseksi. Vesitäytön pinta saa laskea enintään yhden metrin maanpinnan alapuolelle. Kaivumassa kuljetaan suoraan pois tai läjitetään mahdollisimman kauas kaivannosta. Kaivettu pylväiden välitila täytetään tasoon 0,5 m maanpinnasta rengasrouheella RR150 (maksimikoko 150 mm). Loppuosuus 0,5 m maanpinnasta täytetään sepelillä #6–16 mm.

Rengasrouhetäyttö tehdään 0,5 m kerroksissa veden alla kaivinkoneen kauhalla tasoittaen ja tiivistäen. Sepelikerroksen käytön ja rouheen tiivistämisen tarkoitus on pienentää rouheen kokoonpuristumisesta aiheutuvaa maanpinnan alenemista ja pylväiden taivutusrasitusten kasvamista. Mikäli kokemus ensimmäisestä osuudesta osoittaa, että pylväiden päiden siirtymät ovat liian suuret (välin pieneneminen suuruusluokkaa yli 50 mm) ja ympäristön painumisesta on haittaa, korvataan kaivun aikainen tilapäinen yläpään tuenta pysyvällä tuennalla.



Kuva 42. Periaatekuva pylväsrievien yläpäiden tukemisesta ja kaivutyön suorittamisesta jaksottain. Sivutuenta voidaan toteuttaa esimerkiksi L - teräksillä ja kaivujakson päiden tuenta teräspontein.

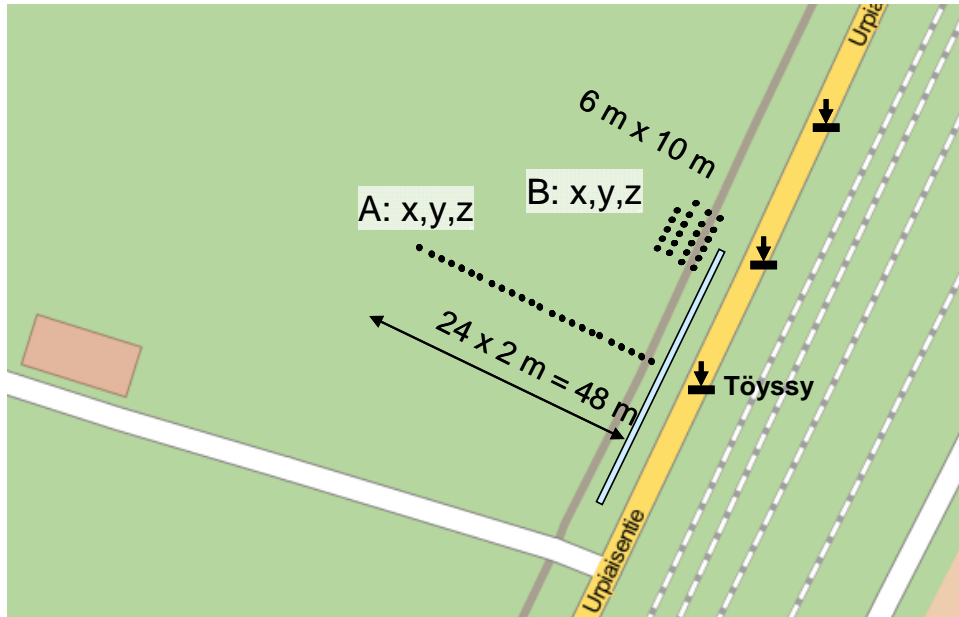
- 11) Ympäristövaikutusten seuranta. Tarvittaessa rakennetaan ainakin esteen molempiin päihin tarkastuskaivot kaivot pinta- ja pohjaveden laadun seurantaan varten. Vesinäytteiden seuranta toteutetaan erillisen seurantasuunnitelman mukaan.
- 12) Viimeistely. Seinämän toteutunut sijainti, sekä korkeus- että vaakasijainti, mitataan ja lisätään piirustuksiin. Rakennusalue siistitään ja ylijäämämassat ja materiaalit poistetaan kohteelta. Luiskaan jääneet painaumat yms. tasataan ja tarvittaessa maaisemoidaan mullalla.
- 13) Dokumentointi. Arkistoidaan laskelmat, suunnitelmat ja muut syntyneet dokumentit.

4.6 Suunnitelma koe-esteestä tehtäviksi mittauksiksi

Mittausten tavoitteena on selvittää koe-esteen ääntä pienentävä vaikutus. Lisäksi mittauksilla on tarkoitus visualisoida ääntäesteen vaikutusta maan pinnan värähtelyyn.

Värähtely mitataan kolmiakselisesti ja kutakin suuntaa tarkastellaan erikseen. Kaikki mittaukset toistetaan samoista mittauspisteistä kolmessa eri vaiheessa, (i) ennen työn aloittamista, kun esteen sijainti on merkitty maastoon, (ii) kun esteen paalutustyö on tehty, mutta kaivutyötä ei ole aloitettu, (iii) kun este on valmis.

Kuvassa 43 on esitetty suunnitelma mittauspisteistä. Suunnitelma käsittää kaksi eri tapausta: Tapauksessa A mittausanturit asetetaan suoraan linjaan ääntäesteen taakse ja tapauksessa B anturit asetetaan esteen päälle taakse ryhmäksi. Tapauksella A selvitetään ääntäesteen toimivuutta ja tapauksella B värähtelyn kiertoilmiötä, jossa esteen edestä tuleva värähtely taittuu esteen päälle kautta sen taakse. Molemmissa tapauksissa tutkitaan kolmesta eri herätepisteestä aiheutuvaa ääntä. Keinotekoinen heräte aiheutetaan herätepisteisiin ajamalla kuorma-autolla tien reunaan sijoitettujen töyssyjen yli (kuva 43). Töyssyn korkeus on noin 50 mm ja kuorma-auton nopeus noin 30–40 km/h. Yksi mittaus käsittää yhden samaan suuntaan tehdyn ohiajon ja kukin mittaus toistetaan vähintään kolme kertaa.

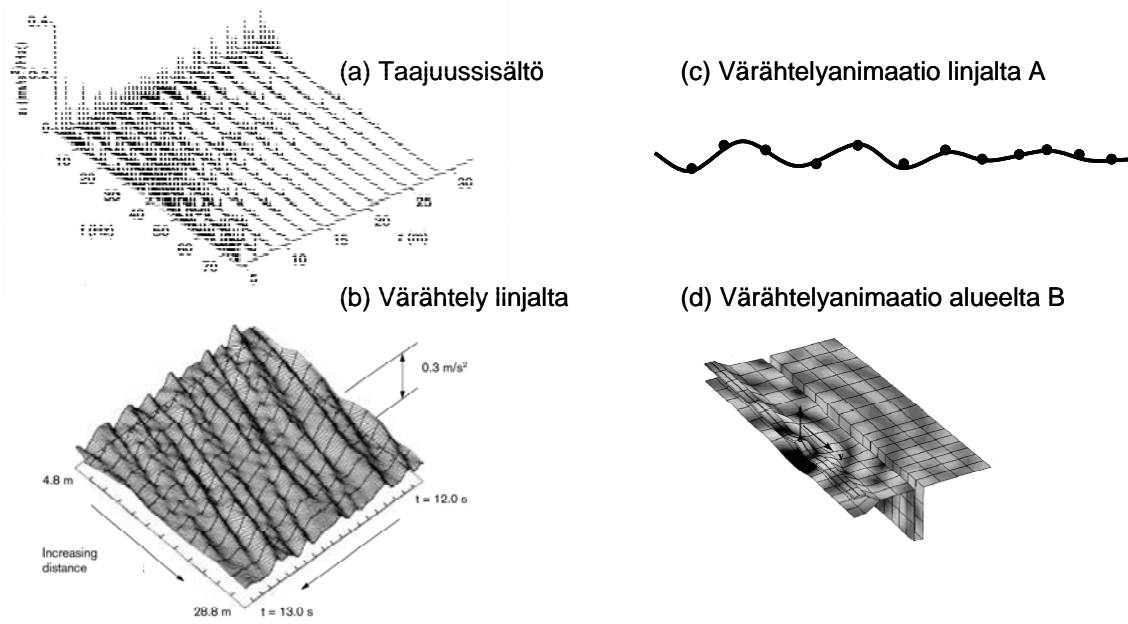


Kuva 43. Alustava mittausuunnitelma. Pisteet kuvaavat mittausantureiden sijaintia ja töyssyt tärinän aiheuttamispisteitä.

Koska suunniteltu koe-este on lyhyt, tärinäesteen toimintaa arvioidaan tässä keinotekoisella herätteen avulla. Auto- tai junaliikenteestä aiheutuva tärinä ei anna oikeaa kuvaa esteen toimivuudesta, koska esteen taakse aiheutuu tärinää myös alueelta, jota tärinäeste ei suojaa. Keinotekoisella herätteellä saavutetaan etuja myös kokeiden suorittamiseen ja samanlaiseen toistettavuuteen liittyen.

Mittauspisteiden väliksi on valittu 2 m, jotta tulosten avulla voidaan visualisoida maaperässä dominoivan värähtelyn muotoa (kuva 44c). Kun maaperä on pehmeää savea (leikkausaallon etenemisnopeus $v = 40\text{--}80$ m/s) ja koska värähtelyssä hallitsee taajuus $f = 5$ Hz (Vantaan kaupungin mittaukset), dominoiva aallonpituus on $v/f = 8\text{--}16$ m. Koska mittauksissa on käytössä vain 24 samanaikaisesti mittaavaa kanavaa, kukin värähtelysuunta mitataan ja analysoidaan erikseen.

Tulosten tarkastelussa tutkitaan värähtelyn suuruuden lisäksi värähtelyn eri taajuuskomponenttien muuttumista terssikaistoittain (kuva 44a). Sekä värähtelyn suuruus että sen taajuuskomponentit ilmoitetaan värähtelynopeuden painotettuna tehollisarvona. Esteen toimivuutta kuvataan pienennyskertoimella, joka esittää esteen eri rakentamisvaiheiden (ii) ja (iii) jälkeen mitatun värähtelyn suhdetta ennen esteen rakentamista (i) mitattuun värähtelyyn. Värähtelyä havainnollistetaan kuvilla ja animaatioilla (kuva 44, osakuvat b–d).



Kuva 44. Esimerkkejä mittaustulosten visualisointimahdollisuuksista.

5. Yhteenveto

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 yleensä niin vähäistä, ettei siitä aiheudu rakenneaurioita. Se voi kuitenkin häiritä nukkumista, haitata asumismukavuutta tai aiheuttaa epäilyksiä rakenneaurioista tai kiinteistön arvon alenemisesta.

Suomessa liikennetärinän suhteen erityisen ongelmallisia ovat pehmeät savikko- ja turvealueet. Nykyisen käsityksen mukaan tärinäesteellä voitaisiin pienentää ainakin pystysuuntainen värähtely noin puoleen. Vaikutus on suuri, sillä pehmeillä alueilla junien tärinähaitat voivat ulottua jopa satojen metrien päähän ja maanteilläkin yli 50 metriin. Suomessa on riskialueilla jo pelkästään rautateitä useita satoja ratakilometrejä.

Tutkimuksen tavoitteena on ollut kehittää valmiuksia tärinäesteiden laskennallisten arviointimenetelmien käyttöön, selvittää erilaisten tärinäesteiden periaateratkaisujen toimivuuseroja, kehittää uusia tärinäesteratkaisuja ja arvioida uusien tärinäesteratkaisujen käyttömahdollisuuksia. Tutkimus on painottunut sellaisiin esteisiin, jotka soveltuvat Suomessa ongelmallisimman, pehmeikköalueilla esiintyvän matalataajuuksisen värähtelyn eristämiseen. Tärinäesteen toimivuudessa on pyritty siihen, että este vaimentaa myös vaakasuunnassa tapahtuvaa värähtelyä.

Erilaisten tärinäesteiden periaateratkaisujen toimivuuseroja arvioitiin käyttämällä kaksiulotteista FEM-mallia ja ABAQUS-ohjelmaa. Tarkastelu tehtiin savikerroksen paksuuskille 4, 8, 16 ja 32 m. Tärinäesteen periaateratkaisut ovat maaperän jäykistäminen väylän alla ja väylän viereen rakennettu pystysuora tärinäseinä. Tärinäseininä käsiteltiin kahta ääritapausta, joista toinen on 25 cm paksu betoniseinä ja toinen samanlevyinen avoin kaivantto. Tarkastellut esteen syvyydet olivat 4 ja 8 m. Maaperän jäykistäminen väylän alla toteutettiin kahdella eri tavalla. Ensimmäisessä tapauksessa käsiteltiin 4 tai 8 m syvyyteen ulottuvaa kiinteää betonilohkoa ja toisessa tapauksessa V-muotoon asetettuja betonilaattoja, joiden paksuus on 25 cm ja muodostuvan V:n kärki ulottuu 4 metrin syvyyteen.

Yleisesti, pehmeille maaperille soveltuvaa ja laajalla taajuusalueella toimivaa ratkaisua ei laskennallisessa tarkastelussa löytynyt. Tulosten perusteella tärinäesteillä on vaikea saavuttaa yli 50 %:n pienennystä. Laskennan perusteella pehmeillä maaperillä parhaiten toimiviksi ratkaisuksi arvioitiin: (1) väylän perustuksen ulottaminen kovaan maapohjaan, (2) maaperää huomattavasti pehmeämmät, vähintään 4 m syvyyteen ulottuvat tärinäseinät, (3) väylän alla olevan maakerroksen jäykistäminen mahdollisimman syvälle ja (4) maaperää huomattavasti jäykemmät, vähintään 8 m syvät tai kovaan pohjaan ulottuvat tärinäesteet.

Tulosten perusteella ideoitiin erilaisia tärinäesteitä ja arvioitiin niiden käyttömahdollisuuksia. Uutuusarvoltaan ja edullisuudeltaan mielenkiintoisimpana pidetään kierrätykseen menevistä sähköpylväistä ja rengasrouheesta valmistettua tärinäseinää. Rakenne muodostuu kahdesta samansuuntaisesta pylväseinämästä ja niiden välisestä rengasrouhetäyttestä, joka on korvaa seinämien välistä poistetun saven. Laskennallisten vertailujen perusteella este toimii parhaiten, mikäli se ulottuu kovaan maapohjaan. Toisin kuin kova este, pehmeä este näyttää pienentävän värähtelyä myös, vaikka este olisi suhteellisen matala savikerroksen syvyyteen nähden. Pehmeä este näyttää pienentävän myös vaakasuuntaista värähtelyä paremmin kuin kova este.

Koska tärinäesteen toimivuuden osoittaminen ei monien epävarmuuksien vuoksi ole laskennallisesti riittävän tarkkaa, toimivuus ehdotetaan varmistettavaksi koerakentamisen avulla. Koe-esteestä ja sen rakentamiseen liittyvistä toimenpiteistä on laadittu alustava kuvaus. Noin 4 m syvyyteen asti este voidaan toteuttaa tavanomaisilla paalutus- ja kaivutekniikoilla.

Lisäksi raportissa on esitetty suunnitelma koe-esteestä tehtävistä mittauksista. Mittausten tavoitteena on selvittää esteen todellinen vaikutus tärinään ja sen taajuussisältöön. Koska mittaustuloksilla on tarkoitus visualisoida tärinäesteen vaikutusta maan pinnan värähtelyyn, tärinän mittauspisteiden väli on vain 2 m. Mittaussuunnitelma käsittää kaksi eri tapausta: Toisessa tapauksessa mittaasanturit asetetaan suoraan linjaan tärinäesteen taakse ja toisessa tapauksessa anturit asetetaan ryhmäksi esteen toisen pään läheisyyteen. Ensimmäisellä tapauksella selvitetään tärinäesteen toimivuutta ja toisella tapauksella värähtelyn kiertoilmiötä, jossa esteen edestä tuleva värähtely taittuu esteen pään kautta sen taakse. Mittaukset on tarkoitus toistaa samoista mittauspisteistä kolmessa eri työvaiheessa: ennen rakentamisen aloittamista, pylväseinämien valmistuttua ennen kaivutyötä ja koko esteen valmistuttua. Mittaustulokset on suunniteltu esitettäväksi erillisessä raportissa.

Lähdeluettelo

Edeskär, T. 2006. Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications. Technical and Environmental Properties. Luleå: Luleå University of Technology. Doctoral Thesis. 317 s.

Fulop, L. 2007. Evaluations of the possibilities to reduce traffic induced vibration. Research Report VTT-R-10493-07. 25 p. + app. 11 p.

Fulop, L. 2008. 2008. Evaluation of the performance of different vibration barrier configurations. Research Report VTT-R-05705-08. 23 p. + app. 63 p.

Koivisto, K., Havola, K., Forsman, J. (2007). Finnish Rail Administration. LITES 2 - Eliminating traffic induced vibrations by means of deep stabilisation, phase 2. Report 2: Korja test structures - construction and measurements. Ramboll Finland.

Kurkela, J. 2008a. Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän vaimentamisessa. Kirjallisuusselvitys ja yhteenveto suomalaisista koekohteista. Tutkimusraportti VTT-R-01831-08. 33 s.

Kurkela, J. 2008b. Tärinäesteiden mahdollisuudet liikennetärinän vaimentamisessa. Selvitys patenteista. Tutkimusraportti VTT-R-08382-08. 13 s. + liitt. 24 s.

Lehmus, E., Jämsä, S., Korttesmaa M. 2005. Käytöstä poistettavien CCA - kyllästettyjen puupylväiden uudelleenkäyttö. Yhteenveto ja johtopäätökset. 30 s.

Ratahallintokeskus & Tieliikelaitos. 2006. Raportti 11230, Tärinämittaukset Loimaalla.

Strenk, P., Wartman, J., Grubb, D., Humphrey, D., Natale, M. 2007. Variability and Scale-Dependency of Tire-Derived Aggregate. Journal of materials in engineering. March 2007. S. 233–241.

Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J., Halonen, M. 2008. Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi. VTT Tiedotteita 2425. Espoo: VTT, 95 s. + liitt. 69 s.

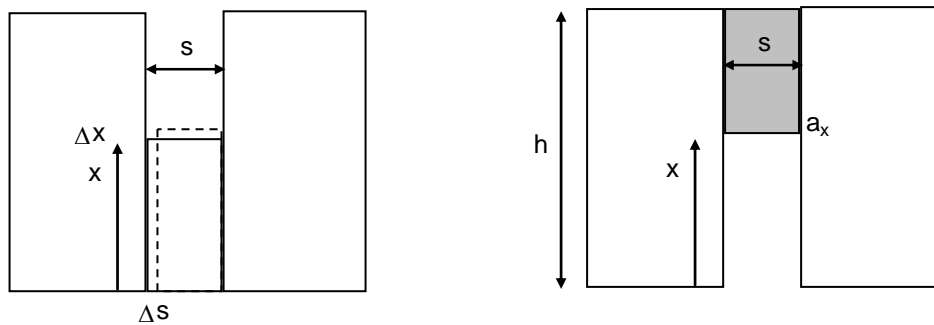
Talja, A., Saarinen, A. 2009. Maaliikenteen aiheuttaman runkomelun arviointi. VTT Tiedotteita 2468. Espoo: VTT, 56 s. + liitt. 11 s.

Vepsä, A. 2009. Numerical modelling of vibration in soil containing water filled trench. A case study. Research Report VTT-R-00283-09. Espoo: VTT, 27 s. + liitt. 55 s.

Liite A: Nesterakoon syntyvä paine

Esimerkissä tarkastellaan kokoonpuristumattoman nesteen pystysuuntaisista hitausvoimista aiheutuvaa painetta äärettömän pitkässä, yläreunastaan vapaassa raossa, jonka toinen sivutaso värähtelee harmonisesti (kuva 1).

Mallilla pyritään arvioimaan sitä, milloin vesitäytteisen tärinäseinän voisi olettaa toimivan pehmeänä. Koska vesi on käytännössä kokoonpuristumatonta, sen jäykkyys voi olla samaa suuruusluokkaa kuin savimaalla, ellei neste pääse purkautumaan raosta riittävän vapaasti.



Kuva 1. Vasen kuva: Raon pienenemisestä Δs aiheutuva nestetason korkeuden muutos Δx korkeudella x . Oikea kuva: Korkeuden x yläpuolelle jäävän nesteen määrä.

Korkeuden muutos Δx :

$$s \cdot x = (s - \Delta s) \cdot (x + \Delta x)$$

$$\Delta x = \frac{s \cdot x}{s - \Delta s} - x$$

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta s}{s}} - 1$$

Kun seinämän värähtelynopeuden amplitudi on v ja värähtelytaajuus f , seinämän siirtymän u ja kiihtyvyyden a amplitudit ovat:

$$u = \Delta s = \frac{v}{2\pi f}$$

$$a = v \cdot 2\pi f$$

Korkeuden x alapuolella olevan seinämän osuuden liikkeestä aiheutuva nestetason pystysuuntainen kiihtyvyyden amplitudi a_x on

$$a_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot a = \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta s}{s}} - 1 \right) \cdot a = \left(\frac{1}{1 - \frac{v}{s \cdot 2\pi f}} - 1 \right) \cdot v \cdot 2\pi f$$

Korkeusvälillä (x_{i+1} , x_i) olevan raon pienenemisestä johtuva nestetaso kiihtyvyys

$$a_{x,i} = a_{x,i+1} - a_{x,i} = \left(\frac{1}{1 - \frac{v}{s \cdot 2\pi f}} - 1 \right) \cdot v \cdot 2\pi f \cdot (x_{i+1} - x_i)$$

Kiihtyvyys kohdistuu nestetasoa x ylempänä olevaan nesteeseen. Raon pienenemisestä välillä (x_{i+1} , x_i) aiheutuva paine nestetasolla x_i on

$$p_{x,i} = a_{x,i} \cdot \rho(h - x_i)$$

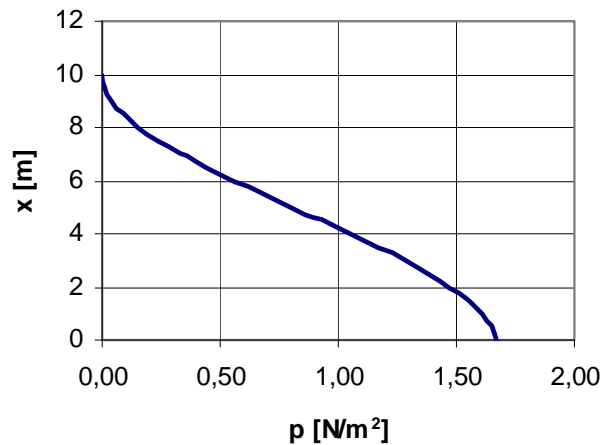
jossa ρ on nesteen tiheys. Jos koko rako pienenee samanaikaisesti, nestetasolla x oleva paine on tasoa ylempänä olevien välien pienenemistä aiheutuvien paineiden summa (kuva 2):

$$p_x = \sum p_{x,i}$$

Laskenta osoittaa, että suurin paine syntyy raon alareunaan ($x = 0$) ja voidaan likimäärin arvioida lausekkeella

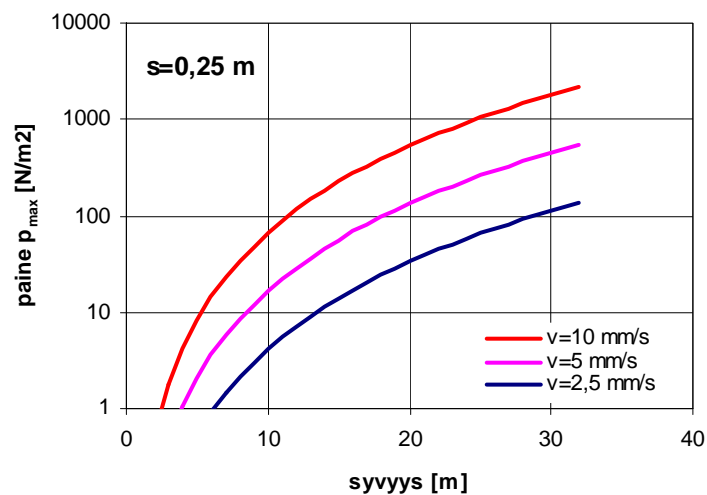
$$p_{\max} = p_0 \cdot \left(\frac{s_0}{s}\right) \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^3$$

jossa $p_0 = 1,67 \text{ N/m}^2$, $s_0 = 0,1 \text{ m}$, $v_0 = 1 \text{ mm/s}$ ja $h_0 = 10 \text{ m}$ (kuva 2). Paineen riippuvuuden värähtelytaajuudesta on todettu tarkasteltavilla värähtelynopeuksilla olevan hyvin pieni.



Kuva 2. Nestepaineen jakautuminen korkeuden x funktiona, kun $p = p_0$, $s = s_0$, $v = v_0$ ja $h = h_0 = 10$ m.

FEM-laskelmien perusteella on arvioitu, että aiheutuva jännitys on maaperässä suuruusluokkaa 1000 N/m^2 , kun värähtelyn amplitudi maan pinnalla on suuruusluokkaa 10 mm/s . Kuvassa 3 on esitetty suurin paine raon korkeuden funktiona tapaukselle, jossa raon leveys $s = 0,25$ m. Jos lähtökohtana pidetään, että neste toimii pehmeänä, kun syntyvä painetaso on $1/10$ värähtelystä aiheutuvista maan jännityksistä (100 N/m^2), niin ainakin luokkaa 10 metrin syvyyteen asti nesteen voi arvioida käyttäytyvän suhteellisen pehmeänä.



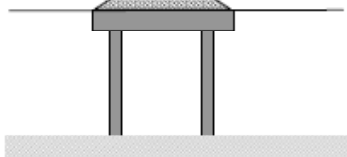
Kuva 3. Arvio nesteraossa esiintyvistä suurimmista paineista, kun raon leveys $s = 0,25$ m.

Liite B: Tärinäesteratkaisujen ideoinnin tulokset

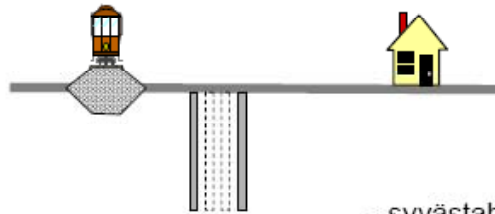
Kokeillut ratkaisut



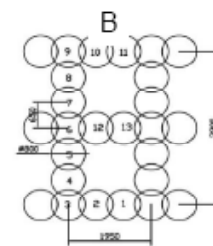
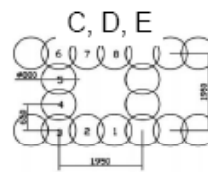
- ponttiseinä



- paalulaatta



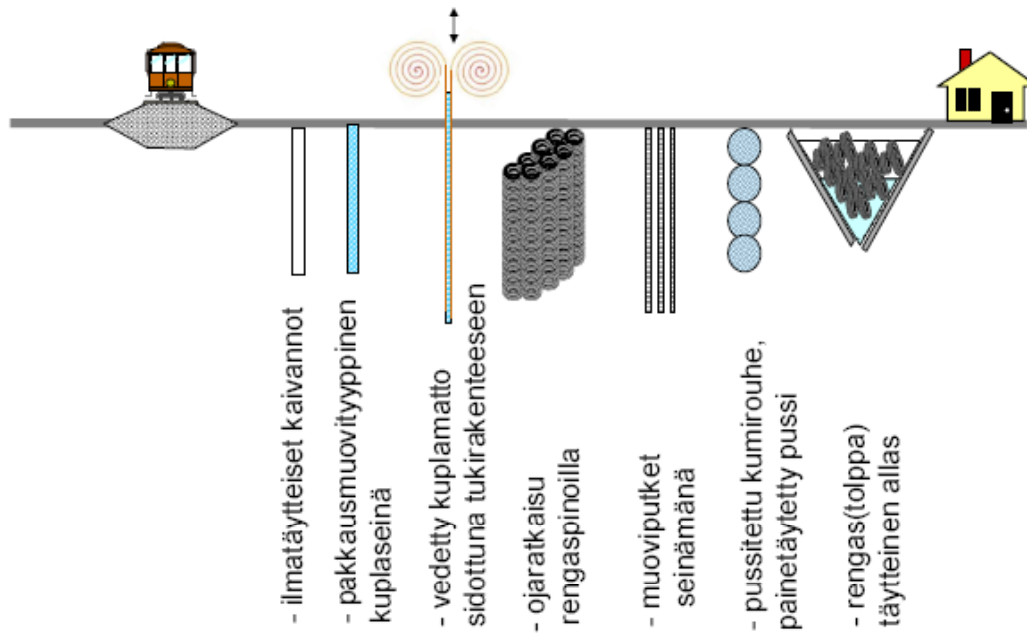
- syvästabilointi



Arviointi

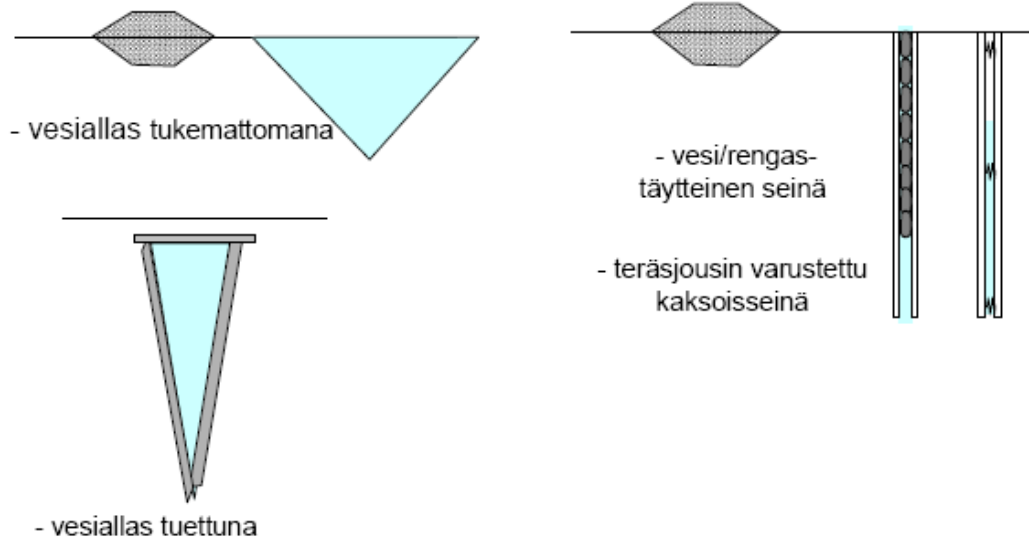
Kokeillut ratkaisut:	Miksi toimii	Hyvät puolet	Huonot puolet	mutu-hinta
- ponttiseinä	Jäykkyysero	Kokeiltu, parannus n. 50 %	----	+++
- syvästabilointi	Jäykkyysero	Kokeiltu	----	+++
- paalulaatta	Radan irrotus maasta	Kokeiltu	----	+++++

Kaasun käyttäytymiseen perustuvat seinät



Kaasun käyttäytymiseen perustuvat:	Miksi toimii	Hyvät puolet	Huonot puolet	mutu-hinta
- ilmatäytteiset kaivannot	- täysi katko ilmaosuudella	- laskennallisesti paras	- mahdoton toteuttaa	+
- pakkausmuovityyppinen kuplaseinä	- kokoonpuristuva	- todettu toimivan	- slitzwall-tekniikka tarpeen - kallis - pitkäaikaistoimivuus	++++
- vedetty kuplamatto sidottuna tukirakenteeseen	- kokoonpuristuva ilma	- asennusteknologia tunnettu - asennus edullinen?	- pitkäaikaistoimivuus - tuotekehitystyö vaativa - kuplamaton toimittaja?	++
- ojaratkaisu rengaspinoilla	- kaasu tai purkautuva neste	- kierrätysmateriaali	- pussitettava - slitzwall-tekniikka tarpeen - kestävyys maanpaineelle?	+++
- muoviputket	- kaasu (tai purkautuva neste)	- asennus tangolla täyttämällä - putkea (letkua) saatavilla - riittävä rengasjoustavuus?	- kestävyys maanpaineelle? - pehmyttäyttö tarpeen?	++(+)
- pussitettu kumirouhe, painetäytetty pussi	- pitää sisältää ilmaa	- kierrätysmateriaali	- tuotekehitystyö vaativa - slitzwall-tekniikka tarpeen? - mahdoton toteuttaa?	++++
- rengas(tolppa) täytteinen allas	- joustavuus ja purkautuva neste	- periaatteessa toimintavarma - poistomaa melusteeseen?	- suuret maansiirtotyöt - liettyminen estettävä - paketoiva suodatinkankaaseen	+++

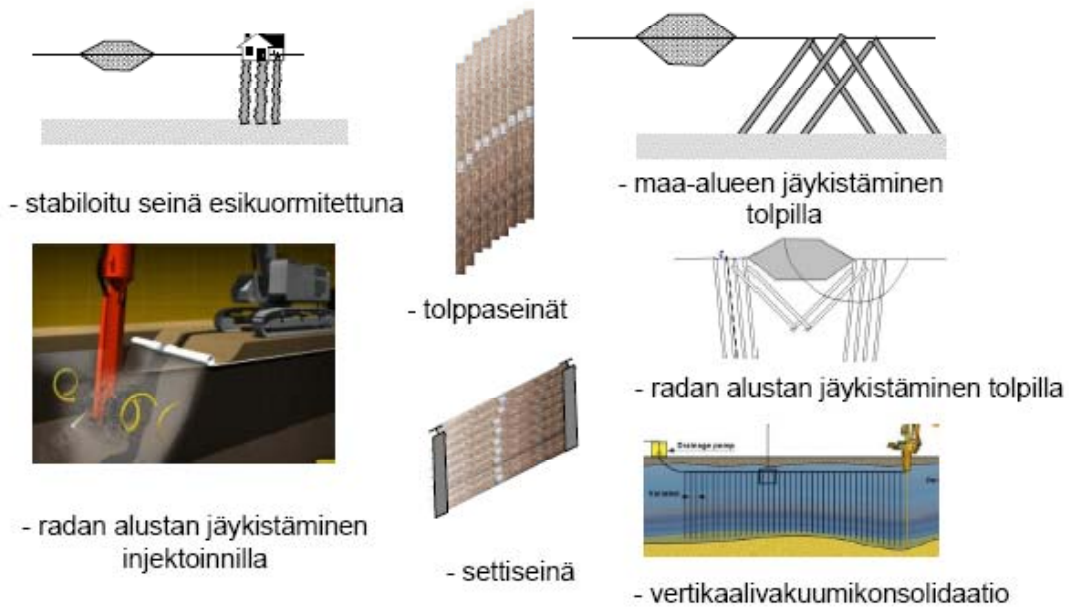
Nesteen käyttäytymiseen perustuvat seinät



Arviointi

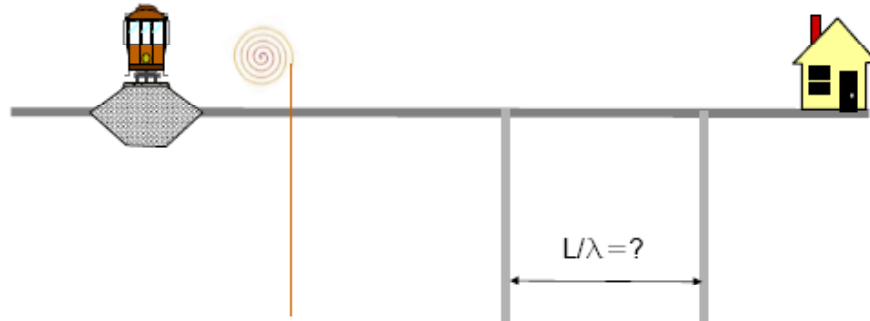
Nesteen käyttäytymiseen perustuvat:	Miksi toimii	Hyvät puolet	Huonot puolet	mutu-hinta
- vesiallas tukemattomana	- (purkautuva) neste	- maisematekijä? - bulkkitekniikkaa	- alueturvallisuus taajamissa? - ratapenkereen toimivuus? - vaatii tilaa, loivat luiskat - mahdoton toteuttaa?	++
- vesiallas tuettuna	- (purkautuva) neste	- puupylväs/massastabilointi		
- vesi(rengas)täytteinen seinä	- purkautuva neste	- kierrätystolpat - kierrätysrenkaat - perinteinen paalutustekniikka - perinteinen kaivutekniikka	- puupylväiden hinta? - ratapenkereen toimivuus?	+(++)
- teräsrousin varustettu kaksoisseinä	- purkautuva neste (tai kaasu)	- varmatoimisuus	- jäykät seinät - kalliit jouset	++++(+)

Maata jäykemmät ratkaisut



Maata jäykemmät ratkaisut:	Miksi toimii	Hyvät puolet	Huonot puolet	mutu-hinta
- stabiloitu seinä esikuormitettuna	- vetolujuus parantaa toimivuutta	- esikuorma meluvalli-rakenteena - perusteknologiaa - toimivuus tunnetaan	- hinta	+++(+)
- tolppaseinät	- jäykkyysero maahan nähden	- eristyskyky ponttiseinän luokkaa - hiilinielu	- puupylväiden hinta? - rajoitettu syvyys (9m?)	+(++)
- maa-alueen jäykistäminen tolvilla	- jäykkyysero maahan nähden	- parantaa myös ratastabiiliteettia - perusteknologiaa	- toimivuutta ei tunneta - puupylväiden hinta?	+(++)
- radan alustan jäykistäminen tolvilla	- jäykkyysero maahan nähden	- perusteknologiaa	- toimivuus rajallinen	++(++)
- radan alustan jäykistäminen injektioinnilla	- jäykkyysero maahan nähden	- lähes perusteknologiaa	- kalliit sideaineet - toimivuus epävarma - lopputulos epävarma - ratapenkereen stabiiliteetti?	+++(+)
- settiseinä (H-palkki+vaakatonlat)	- jäykkyysero maahan nähden	- perusteknologiaa	- ei toimine tärinän kannalta	++++(+)
- vertikaalivakuumikonsolidaatio	- maaperän paikallinen kuivaus	- "perusteknologiaa" - ei pysyvää materiaalitavetta - korkealentoinen idea	- toimivuus ei riittävä?	++

Värähtelyaallon toimintaan vaikuttavat ratkaisut



- ohutlevyseinä vedettynä

- usea peräkkäinen seinä

Arviointi

Värähtelyaallon toimintaan vaikuttavat ratkaisut:	Miksi toimii	Hyvät puolet	Huonot puolet	mutu-hinta
- ohutlevyseinä vedettynä	- vetolujuus parantaa toimivuutta	- ei syrjäytä maata - materiaalikustannukset?	- maan painuminen estää toimivuutta - vaatii tuotekehitystyötä - esijännitystekniikka? - pitkäaikaiskestävyys	
- usea peräkkäinen seinä	- vaikutus värinäaaltoon	- voidaan säätää halutulle taajuusalueelle	- etuja ei tunneta	++(+++)