

Anniina Söderholm

# POHJAINTEN TOIMIVUUDEN MALLINTAMINEN RAUTATIETÄRINÄN VAIMENTAMISESSA

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: TkT Heikki Luomala  
Tarkastaja: DI Antti Pelho  
Tammikuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Anniina Söderholm: Pohjainten toimivuuden mallintaminen rautatietärinän vaimentamisessa  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikka  
Tammikuu 2025

---

Tässä diplomityössä tarkasteltiin ratapölkyn alle asennettavien pohjainten käytettävyyttä rautatietärinän vaimentamiseen. Työ koostuu kirjallisuusselvityksestä sekä laskentatutkimuksesta. Tehdyn kirjallisuusselvityksen tarkoituksena oli esitellä värähdysliikettä, liikennetärinän vaikutuksia ja tärinän mallintamista elementtimenetelmällä teoreettisella tasolla. Pohjainten toimivuutta tarkasteltiin pääosin kaksiulotteisilla FEM-mallinuksilla, joihin yhdistettiin erilaisia mittaustuloksia tai 3D-mallinuksista muodostettuja junaherätteitä. Laskentatulosten perusteella tehtiin arvio pohjainten soveltuvuudesta tärinän vaimennukseen erilaisissa pohjamaaolosuhteissa.

Työssä pyrittiin mallintamalla selvittämään maanpinnan hallitsevat taajuusalueet, kun junan ajonopeudet olivat 50 km/h ja 70 km/h. Tuloksia tarkasteltiin pystysuuntaisen heilahdusnopeuden ja taajuusjakauman kautta. Tarkasteluissa käytettiin kolmea eri jäykkyyksistä pohjamaatyyppeä: savea, siiltä ja moreenia. Hallitsevat taajuudet selvitettiin 14 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta, ja ne olivat välillä 1,3–10 Hz. Taajuudet esitettiin tuloksissa terssikaistoittain. Taajuusalueet riippuivat jonkin verran tarkasteltavasta junan nopeudesta. Pohjaimen käyttö ei vaikuttanut hallitseviin taajuuksiin. Myös pengerpaksuuden vaikutusta värähtelyyn tarkasteltiin mallintamalla.

Tehdyissä tarkasteluissa huomattiin pohjaimen vaikuttavan erityisesti kuorman jakautumiseen ratarakenteelle. Saadut tulokset antavat jonkinlaista käsitystä pohjaimen hyödyllisyydestä rautatietärinän vaimentamisessa erityyppisissä kohteissa. Pohjaimen vaikutus rautatietärinän vaimennukseen on työn perusteella suurin matalilla pengerpaksuuksilla välimaalajeilla, joilla primäärinen jousto syntyy lähellä pohjamaan pintaosaa. 2D-laskentamallin toimintaan liittyvien epätarkkuustekijöiden takia saatuja tuloksia voidaan pitää luonteeltaan suuntaa antavina.

Avainsanat: rautatietärinä, elementtimenetelmä, Plaxis, mallintaminen, 2D-mallinnus, ratarakenne, vaimentaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ABSTRACT

Anniina Söderholm: Modeling the Functionality of Under-Sleeper Pads in  
Mitigating Railway Vibration

Master's Thesis  
Tampere University  
Civil Engineering  
January 2025

---

This master's thesis examined the functionality of under-sleeper pads in mitigating railway vibrations. The work consists of a literature review and a computational study. The aim of the literature review was to research vibrational motion, the effects of traffic-induced vibrations, and the modeling of vibrations using the finite element method at a theoretical level. The functionality of the under-sleeper pads was mainly analyzed through two-dimensional FEM modeling. The model was combined with various dynamic loads which presented the effect from the train, formed from measurement data or 3D models. Based on the modeling results, an assessment was made regarding the suitability of the under-sleeper pads for vibration mitigation under different ground conditions.

The study aimed to model and identify the dominant frequency ranges of the ground surface when train speeds were 50 km/h and 70 km/h. The results were examined through vertical oscillation velocity and frequency distribution. Three different soil types with varying stiffness were used: clay, silt, and moraine. The dominant frequencies were identified at 14 meters from the centerline of the track, ranging from 1.3 to 10 Hz. The frequencies were presented in the results in one-third octave bands. The frequency ranges varied somewhat depending on the examined train speed. The use of the under-sleeper pads did not significantly affect the dominant frequencies. The impact of embankment thickness on vibration was also examined through modeling.

From the analyses conducted, it was observed that the under-sleeper pads particularly influenced the load distribution on the track structure. The results provide some insight into the applicability of the under-sleeper pads in mitigating railway vibrations in various contexts. According to the findings, the effect of the under-sleeper pads on railway vibration mitigation is greatest with shallow embankment thicknesses for transitional soil types such as silt, where primary deformation occurs close to the surface of the ground. Due to inaccuracies related to the functioning of the 2D calculation model, the obtained results can be considered indicative in nature.

**Keywords:** Railway vibration, Finite element method, Plaxis, Modeling, 2D-modeling, Track structure, Mitigation

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: ChatGPT-4

Käyttötarkoitus: Tekoälyä on hyödynnetty työn englanninkielisen tiivistelmän (Abstract) kielen-tarkistuksessa.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Englanninkielinen tiivistelmä (Abstract)

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

## ALKUSANAT

Diplomityö on tehty Tampereen Yliopiston Tutkimuskeskus Terralle osana laajempaa Väyläviraston tilaamaa pohjainten ja sepelinalusmattojen käytettävyyttä rataverkolla koskevaa tutkimuskokonaisuutta. Työn ohjausryhmään ovat kuuluneet Heikki Luomala (Tampereen yliopisto), Antti Pelho (Tampereen yliopisto), Mikael Takala (Väylävirasto) ja Juho Mansikkamäki (Tampereen yliopisto). Haluan kiittää Väylävirastoa ajankohtaisesta ja mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta, sekä koko ohjausryhmää aktiivisesta ohjauksesta ja panoksestanne työtäni kohtaan. Erityiskiitokset esitän Marko Peltomäelle (Tampereen yliopisto) kaikesta mallinnukseen liittyvästä avusta ja sparrauksesta. Lämmin kiitos myös Terralaisille sekä Verneläisille erinomaisesta työilmapiiristä.

Kiitos ystäväilleni ja perheelleni kärsivällisyydestä, vertaistuesta ja kannustuksesta. Erityinen kiitos kaikille hienoille ihmisille, joihin olen saanut kunnian tutustua opintojen aikana. Olette tehneet näistä vuosista todella merkitykselliset.

Tampereella, 30.1.2025

Anniina Söderholm

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. JUNALIIKENTEEN AIHEUTTAMA TÄRINÄ .....	3
2.1 Värähtely ilmiönä .....	3
2.2 Värähtelyn eteneminen ja vaimeneminen maaperässä .....	7
2.3 Ratarakenteen toiminta .....	11
2.4 Juna herätteenä ja radalla liikennöivä kalusto .....	13
2.5 Tärinän aiheuttamat haitat .....	16
2.6 Tärinän mittaaminen .....	18
2.7 Rautatietärinän vaimentaminen .....	19
2.8 Pohjainten toimintaperiaate .....	21
3. RAUTATJETÄRINÄN MALLINTAMINEN FEM-MALLILLA .....	25
3.1 Elementtimenetelmä .....	25
3.2 Plaxis 2D / 3D .....	26
3.3 Materiaalimallit .....	28
3.4 Heräte .....	31
4. POHJAINTEN TÄRINÄVAIMENNUKSEN MALLINTAMINEN .....	33
4.1 Lähtötiedot, lähtötilanne ja laskentaoletukset .....	33
4.2 Mallin luominen ja geometria .....	33
4.3 Materiaalimallit ja parametrit .....	35
4.4 Laskentamallit .....	39
4.4.1 Pölkyn yläpinnan siirtymään perustuva malli .....	39
4.4.2 Pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuva malli .....	41
4.4.3 Pengerkorkeuden vaikutuksen mallinnus .....	48
5. LASKENTATULOKSET .....	52
5.1 Pölkyn yläpinnan siirtymään perustuva malli .....	52
5.2 Pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuva malli .....	54
5.3 Pengerkorkeuden vaikutuksen mallinnus .....	61
6. TULOSTEN TARKASTELU .....	64
7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO .....	69
LÄHTEET .....	71
LIITE 1: LASKENTAGEOMETRIA .....	75
LIITE 2: FFT-KUVAAJAT .....	76
7.1 Pölkyn yläpinnan siirtymään perustuva malli .....	76
7.2 Pölkyn pohjapaineeseen perustuva malli .....	78

# KUVALUETTELO

<b>Kuva 1.</b>	Värähtelyn suuruus ajan funktiona: Amplitudi $X$ ja värähtelyjakso $T$ harmonisessa värähtelyssä. (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34).....	4
<b>Kuva 2.</b>	Epäharmoninen jaksollinen värähdysaalto jaettuna taajuuskomponentteihin (Mobley 1999, s. 20).....	5
<b>Kuva 3.</b>	Suhteellinen vaimennus $\zeta$ , kun perättäisten jaksojen amplitudien suhde on $X_1X_2, \zeta = \ln(X_1X_2)/(2\pi)$ . (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34).....	6
<b>Kuva 4.</b>	Värähtelyn nopeuden huippuarvo $v_{max}$ , tehollisarvo $v_{rms}$ sekä painotettu tehollisarvo $v_w$ (mukaillen Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 35–36.).....	7
<b>Kuva 5.</b>	Värähtelyn suuruus etäisyyden funktiona: Amplitudi $X$ ja aallonpituus $\lambda$ harmonisessa värähtelyssä. (mukaillen Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34).....	7
<b>Kuva 6.</b>	Aaltotyyppien eteneminen maaperässä a) Rayleigh-aalto, b) P-aalto, c) S-aalto. (mukaillen De Vos 2017, s.24).....	8
<b>Kuva 7.</b>	Maapohjan alimman, vallitsevan taajuuden arviointi kerrospaksuuden ja maalajin avulla (Talja & Törnqvist 2006, Liite C s.5).....	10
<b>Kuva 8.</b>	Maapohjan ominaistaajuuden ja pohjasuhteiden merkitys rakenteisiin siirtyvän värähtelyn suuruudessa. (Talja 2008 ym. Liite B s. 19).....	11
<b>Kuva 9.</b>	Radan rakenneosat ja niihin liittyvät nimitykset (Väylä 2020).....	12
<b>Kuva 10.</b>	Kaavio junan, ratarakenteen ja pohjamaan muodostamasta dynaamisesta järjestelmästä (De Vos 2017, s.19).....	13
<b>Kuva 11.</b>	Eri herätepisteistä lähtevän värähtelyn yhteisvaikutus pitkällä junalla (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40).....	15
<b>Kuva 12.</b>	Rautatietärinän siirtyminen maaperän kautta rakennukseen (De Vos 2017, s. 14).....	16
<b>Kuva 13.</b>	Maaperän ja rakennuksen värähtelyn mittaamisperiaate (Talja & Törnqvist 2014, s. 12).....	19
<b>Kuva 14.</b>	Periaatekuva rautatietärinän vaimennuskeinoista. a) Junaherätteeseen vaikuttaminen, b) radan värinäeristys c) alusrakenteen jäykistäminen d) pystysuora värinäeriste e) rakennuksen tuenta kovaan maapohjaan f) rakennuksen värinäeristys (Mukaillen Talja 2011, s. 32)......	21
<b>Kuva 15.</b>	Periaatekuva pohjaimen sijainnista ratarakenteessa ja pohjaimen rakennekerroksista (Väylävirasto 2024, s. 24).....	22
<b>Kuva 16.</b>	Betonisia ratapölkkyjä sinisillä pohjaimilla (Getzner 2024).....	23
<b>Kuva 17.</b>	Yksinkertaisia viiva-, pinta- ja tilavuuselementtejä (Mukaillen Syrjä 2019, s. 69)......	26
<b>Kuva 18.</b>	2D geometrian merkitys kolmiulotteisena (Witasse, R. 2021).....	27
<b>Kuva 19.</b>	Lineaarielastisen (a) ja kimmoisen ideaaliplastisen (b) materiaalimallin jännityskuvaajat (Geoengineer 2024).....	29
<b>Kuva 20.</b>	Ratarakenteen materiaalien yleinen kuormitusmuodonmuutoskäyttäytyminen. (Brown 1993 & Ehrola 1996 Kalliaisien et.al 2014, s.34 mukaan).....	30
<b>Kuva 21.</b>	Plaxis-ohjelmaan luodun geometrian ratarakenteet ja maakerrokset.....	34
<b>Kuva 22.</b>	Herätteen sekä pohjaimen sijoitus laskentageometriaan Plaxiksessa.....	40
<b>Kuva 23.</b>	Alkuperäinen mitattu herätesignaali ja Plaxis-ohjelmaan syötetty 5 sekunnin mittaiseksi leikattu herätesignaali.....	41

<b>Kuva 24.</b>	<i>RATO 3 mukainen pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapölkkyistä ratapenkereeseen (Liikennevirasto, RATO 3 2018, s. 31).</i>	42
<b>Kuva 25.</b>	<i>RATO 11 mukainen pystysuoran junakuorman jakaantuminen 60E1 kiskoprofiilin välityksellä ratapenkereeseen (Väylä, RATO 11 2024, s. 8).</i>	42
<b>Kuva 26.</b>	<i>Pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapenkereeseen pohjaimettomassa (ylempi) ja pohjaimellisessa (alempi) tilanteessa (Getzner 2024, s. 4).</i>	43
<b>Kuva 27.</b>	<i>Yhdistetyn kalusto-ratamallin periaatekuva Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmassa (Peltomäki et.al 2024, s. 4).</i>	45
<b>Kuva 28.</b>	<i>Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmalla mallinnetun pölkyn yläpinnan pystysiirtymä eri pohjainvaihtoehdoilla, pohjamaana savi (E = 30 MPa).</i>	46
<b>Kuva 29.</b>	<i>Pohjapaine pölkyn alapinnassa eri pohjainvaihtoehdoilla, pohjamaana savi (E = 30 MPa).</i>	47
<b>Kuva 30.</b>	<i>Herätteen sijoitus laskentageometriaan Plaxis 2D-ohjelmassa.</i>	48
<b>Kuva 31.</b>	<i>Maapohjaan kohdistuva penkereen suunnassa vaihteleva nauhakuorma [MN/jm] pengerpaksuuden vaikutuksesta. Laskelma on tehty IC2-vaunun mitoilla, 150 kN akselikuormalla ja 200 km/h junan nopeudella (Törnqvist et. al 2019, s. 18).</i>	49
<b>Kuva 32.</b>	<i>Pohjapaine eri syvyyksillä pölkyn alapinnasta katsottuna.</i>	50
<b>Kuva 33.</b>	<i>Herätteen sijoitus laskentageometriaan Plaxis 2D-ohjelmassa 1,4 m pengerpaksuudella.</i>	51
<b>Kuva 34.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on savi (E = 30 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.</i>	53
<b>Kuva 35.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti (E = 60 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.</i>	53
<b>Kuva 36.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on moreeni (E = 190 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.</i>	54
<b>Kuva 37.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on savi (E = 30 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.</i>	56
<b>Kuva 38.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on savi (E = 30 MPa) ja junan nopeus on 50 km/h.</i>	56
<b>Kuva 39.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti (E = 60 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.</i>	58
<b>Kuva 40.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti (E = 60 MPa) ja junan nopeus on 50 km/h.</i>	58
<b>Kuva 41.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on moreeni (E = 190 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.</i>	60
<b>Kuva 42.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on moreeni (E = 190 MPa) ja junan nopeus on 50 km/h.</i>	60
<b>Kuva 43.</b>	<i>Pohjapaine pohjamaan ja penkereen rajapinnassa 2,4 m penkereellä, kun mallinnus tehtiin Plaxis 2D:llä ja Ballasted Track Simulatorilla.</i>	62



<b>Kuva 44.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa siltillä 70 km/h junaherätteellä, joka on sijoitettu Plaxis 2D-mallissa joko penkereen päälle tai penkereen ja pohjamaan rajapintaan. ....</i>	63
<b>Kuva 45.</b>	<i>Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti (E = 60 MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.....</i>	63
<b>Kuva 46.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa savella 70 hm/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	76
<b>Kuva 47.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa siltillä 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	76
<b>Kuva 48.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa moreenilla 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	77
<b>Kuva 49.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa savella 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	78
<b>Kuva 50.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa savella 50 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	78
<b>Kuva 51.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa siltillä 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	79
<b>Kuva 52.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa siltillä 50 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	79
<b>Kuva 53.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa moreenilla 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	80
<b>Kuva 54.</b>	<i>Pystysuuntainen heilahdusnopeus Vy taajuustasossa moreenilla 50 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.....</i>	80

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$a$	heilahduskiihtyvyys
$A$	siirtymän heilahdusamplitudi
$c_p$	paineaallon etenemisnopeus
$c_s$	leikkausaallon etenemisnopeus
$c'$	tehokas koheesio
$E$	kimmomoduuli
$E_u$	suljetun tilan kimmomoduuli
$E'$	tehokas kimmomoduuli
$f$	leikkausaallon hallitseva taajuus
$f$	värähtelytaajuus
$f_c$	terssikaistan keskitaajuus
$f_p$	signaalin hallitseva taajuus
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
FFT	Fast Fourier Transform
$G$	liukumoduuli
$H$	maakerroksen paksuus
LE	Lineaarielastinen materiaalimalli
MC	Mohr-Coulombin materiaalimalli
$m$	moduuliluku
OCR	ylikonsolidaatioaste
P-aalto	primary wave, pressure wave, paineaalto, pitkittäisaalto
R-aalto	Rayleighin aalto, pinta-aalto
RATO	Ratatekniset ohjeet
S-aalto	leikkausaalto, shear wave, secondary wave
$s_u$	suljettu leikkauslujuus
$T$	jaksonaika
$v_0$	heilahdusnopeuden perusarvo
$v_{max}$	värähtelyn nopeuden huippuarvo
$v_{rms}$	värähtelyn nopeuden tehollisarvo
$v_w$	taajuuspainotettu tehollisarvo
$v_{w,95}$	värähtelyn tunnusluku
$X$	värähtelyamplitudi
2D	kaksiulotteinen

$\alpha$	Rayleighin parametri
$\beta$	Rayleighin parametri
$\gamma$	tilavuuspaino
$\zeta$	suhteellinen vaimennus, kriittinen vaimennussuhde
$\lambda$	aallonpituus
$\nu$	Poissonin luku
$\nu_u$	suljetun tilan Poissonin luku
$\nu'$	tehokas Poissonin luku
$\rho$	tiheys
$\sigma'_c$	pystysuora esikonsolidaatiojännitys
$\sigma'_{v0}$	vallitseva tehokas pystyjännitys
$\varphi_u$	suljetun tilan kitkakulma
$\varphi'$	tehokas kitkakulma
$\omega$	kulmataajuus

# 1. JOHDANTO

Ihminen kokee nykyaikana päivittäisen elämän toiminnoissaan monenlaista tärinää eri lähteistä. Autolla ajaessa tai pyykinpesukoneen lingotessa tärinän lähde on itsestään selvä ja ihmisen kontrolloitavissa. Useimmiten tämän tyyppinen tärinä ei aiheuta huolta ja se on helppo hyväksyä. Rautatietärinä on liikkuvan junan aiheuttamaa värähtelyä, joka syntyy junan pyörien ja raiteen välisestä kontaktista. Värähtely kulkeutuu maaperän kautta ympäristöön, ja siirtyy perustusten kautta myös rakennusten runkoihin. Tällainen talon tai asunnon ulkopuolisesta lähteestä peräisin oleva tärinä koetaan usein häiritseväksi ja se haittaa asumisviihtyvyyttä merkittävästi. Rautatietärinä havaitaan tyyppillisesti kodeissa välipohjan eli lattian tärisemisenä jalkojen alla, tai irtonaisten tavaroiden, kuten astioiden helinänä. Tärinä voi aiheuttaa asukkaissa myös pelkoa rakenteiden vaurioitumisesta, vaikka rautatietärinän voimakkuus ei yleisesti ole riittävän suuri aiheuttamaan rakennevaurioita.

Liikenteen aiheuttama tärinä on ympäristöhaittana rinnastettavissa liikennemeluun, ja lainsäädännön mukaan vastuu ympäristövahingon korvaamisesta eli rautatietärinän aiheuttamasta haitasta on sen aiheuttajalla. Suomessa Väylävirasto vastaa valtion rataverkosta ja sillä toimimisesta, ja siitä syystä myös huolehtii omalta osaltaan tärinähaittojen hallinnasta. Rautatietärinän voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. radalla liikkuvan kaluston tyyppi, nopeus ja paino, radan kunto ja rakenne, maaperän ominaisuudet, rakennusten perustukset ja rakenteet sekä niiden etäisyys radasta. Näiden tekijöiden yhteisvaikutukset määrittävät, miten häiritseväksi ja voimakkaana rautatietärinä koetaan eri kohteissa. Haitallisen tärinän vaimennukseen on käytettävissä useita keinoja, jotka kohdistuvat ratarakenteeseen tai sillä liikkuvaan kulkuvälineeseen. Vaimennusmenetelmien tehokkuus ja soveltuvuus vaihtelee paljon tapauskohtaisesti paikallisten tekijöiden, kuten maaperän ominaisuuksien takia. Tärinän voimakkuuden ja leviämisen sekä vaimennusmenetelmien toimivuuden arviointi on haastava ja monimutkainen prosessi, ja siihen liittyy merkittäviä epävarmuuksia. Siksi kokemusperäinen tieto ja mittausdata ovat avainasemassa teoreettisten tarkastelujen, laskelmien ja mallinnusten tukena.

Yhdyskuntarakenteen tiivistyminen ohjaa raideliikennettä ja asuinrakentamista yhä enemmän toistensa vaikutusalueelle. Tärinävaikutukset tulee huomioida sekä rakennusten että liikenneväylien sijoituksessa ja ratkaisuissa jo mahdollisimman varhaisessa vai-

heessa. Tärinähaittojen vähentäminen ja vaimentaminen jälkikäteen on kallista ja teknisesti haastavaa. Olemassa olevan rataverkon vaikutusalueella voi kuitenkin ilmetä tärinähaittoja esimerkiksi muuttuneen kaluston takia. Väyläviraston tavoitteena on löytää ratkaisuja vaihtoehdoksi nopeusrajoitusten alentamiselle tärinähaittojen vähentämiseksi. Nopeusrajoitukset vähentävät pääosin tärinähaittoja, mutta vaikuttavat liikennöintiin vähentäen radan välityskykyä erityisesti vilkkailla rataosuuksilla. Yhtenä vaihtoehtona tutkitaan erilaisten ratarakenteeseen asennettavien vaimennusmenetelmien, kuten pohjainten ja sepelinalusmattojen toimivuutta tärinänvaimennustarkoituksessa.

Tässä diplomityössä tutkitaan pohjaimien soveltuvuutta rautatietärinän vaimentamiseen erilaisilla pohjamailla. Pohjaimet ovat ratapölkyn alapintaan asennettavia joustavia levyjä erilaisilla paksuuksilla ja jäykkyyksillä. Pohjainten käyttö Suomen rataverkolla on ollut toistaiseksi vähäistä. Työn tavoitteena on muodostaa kokonaiskuva pohjaimien ja pohjamaan ominaisuuksien merkityksestä rautatietärinän vaimenemiseen.

Työn kirjallisuuskatsaus käsittelee värähtelyä ja rautatietärinää ilmiönä sekä rautatietärinän mallintamista FEM-laskennalla. Laskentaosuus perustuu osittain Pori – Mäntyluoto -rataosalla tehtyihin koeajoihin ja mittauksiin pohjaimellisilla ratapölkyillä. Pohjainten vaimennuskykyä on tutkittu mallintamalla valitut laskentakohteet Plaxis 2D -ohjelmalla, ja tekemällä tarkasteluja ilman pohjaimia sekä erilaisilla pohjain-pohjamaa-yhdistelmillä. Mallinnuksessa tutkittiin myös pengerkorkeuden vaikutusta värähtelyyn. Tulosten analysointiosuudessa on luotu taulukko, jonka avulla voidaan arvioida pohjainten vaimennuskykyä esimerkkitapauksissa. Lisäksi on myös arvioitu tilanteita, joissa pohjainten käyttämisestä ei ole merkittävää hyötyä tärinänvaimennuksen kannalta.

## 2. JUNALIIKENTEEEN AIHEUTTAMA TÄRINÄ

Värähtely on fysiikan ilmiö, jolla tarkoitetaan edestakaista jaksollista liikettä. Värähdysliikkeessä kappale ei liiku paikasta toiseen, vaan tasapainoasemansa molemmin puolin. (Salminen 2021) Värähtelevä systeemi sisältää yleisesti keinon varastoida potentiaalienergiaa (jousi tai kimmoisuus), keinon varastoida kineettistä energiaa (massan hitaus), sekä mekanismin, jolla energiaa vähitellen häviää systeemistä (vaimennin). Värähdysliikkeessä systeemin potentiaalienergia siirtyy kineettiseksi energiaksi ja takaisin potentiaalienergiaksi vuorotellen. Systeemin ollessa vaimennettu energiaa häviää joka värähdysyksyksessä, ja se on korvattava ulkoisella lähteellä eli herätteellä, jotta säilytetään tasainen värähtely. (Rao 2011, s. 13)

Värähtely muuttuu joidenkin lähteiden mukaan tärinäksi saavuttaessaan ihmiskehon jonkin rajapinnan välityksellä (Ollila 2021). Suomenkielisessä kirjallisuudessa ja tutkimuksessa termiä *tärinä* käytetään kuitenkin yleisesti synonyyminä tai rinnakkaisena terminä *värähtelylle*. Englanninkielisessä kirjallisuudessa ilmiölle on käytössä rinnakkaiset termit *vibration ja oscillation*.

Rautatietärinä on liikkuvan junan aiheuttamaa värähtelyä, joka syntyy junan pyörien ja junaraiteen välisestä kontaktista. Värähdysliike eteneeaaltona ratarakenteen kautta maaperään, ja edelleen rakennusten perustusten kautta rakenteisiin. (De Vos 2017, s. 12) Tässä luvussa käsitellään värähtelyn teoriaa, radan rakennetta ja värähtelyn etenemistä ratarakenteessa ja maaperässä. Seuraavassa luvussa kerrotaan junista herätteenä, rautatietärinän aiheuttamista haitoista sekä tärinän mittaamisesta. Lopuksi perehdytään keinoihin, joilla rautatietärinää on pyritty vaimentamaan Suomessa ja maailmalla.

### 2.1 Värähtely ilmiönä

Mitä tahansa liikettä, joka toistaa itseään tietyn ajanjakson välein, kutsutaan värähtelyksi (Rao 2011, s. 34). Värähtelyssä on erilaisia vaiheita, joissa värähtelijä on tasapainoasemassa, ääriasemassa tai jossain asemassa niiden välillä. Ajanjaksoa, joka kuluu yhden liikesyklin suorittamiseen ja samaan vaiheeseen palaamiseen, kutsutaan jaksonajaksi  $\tau$  (s). Taajuus  $f$  (Hz) on jaksonajan käänteisluku, ja kuvaa sekunnin aikana tapahtuvien syklien määrää. (Rao 2011, s. 62)

$$f = \frac{1}{\tau} \tag{2.1}$$

Värähtelyä ajan suhteen voidaan kuvata matemaattisesti myös ympyräliikkeenä eli kulmataajuutena  $\omega$ , jolloin kokonainen värähdysyksi tapahtuu aina 360 asteen eli  $2\pi$  radiaanin jälkeen, ts. täyden kierroksen jälkeen. (Mobley 1999, s.18)

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2)$$

Amplitudi  $A$  (m) ilmaisee värähtelyn laajuutta eli värähdysliikkeen suuruutta. Amplitudi on värähtelijän suurin poikkeama tasapainoasemasta, eli puolet värähtelyn vaihteluvälistä. Värähtely on harmonista, jos värähtelyn aiheuttavan voiman kiihtyvyys on suoraan verrannollinen kappaleen etäisyyteen tasapainoasemasta, ja sen suunta on kohti tasapainoasemaa. Harmoninen värähtely on yksinkertaisin värähdysliike, ja sitä kuvataan usein siniaallolla. (Rao 2011, s. 62) Harmonisen liikkeen siirtymäyhtälö on sinifunktio

$$x = A \sin \omega t \quad (2.3)$$

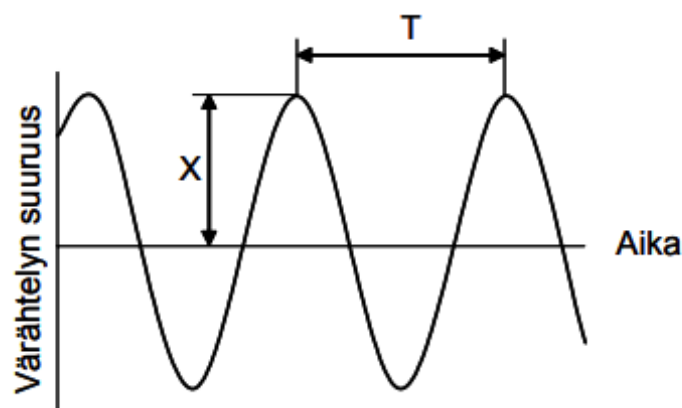
Määritelmällisesti nopeus on siirtymän ensimmäinen derivaatta ja kiihtyvyys toinen derivaatta ajan suhteen. Derivoimalla sinifunktiota (2.2) ajan suhteen, saadaan muodostettua yhtälöt värähdysliikkeen heilahdusnopeudelle  $v$

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega A \cos \omega t \quad (2.4)$$

ja heilahduskihtyvyydelle  $a$  (Rao 2011, s.55)

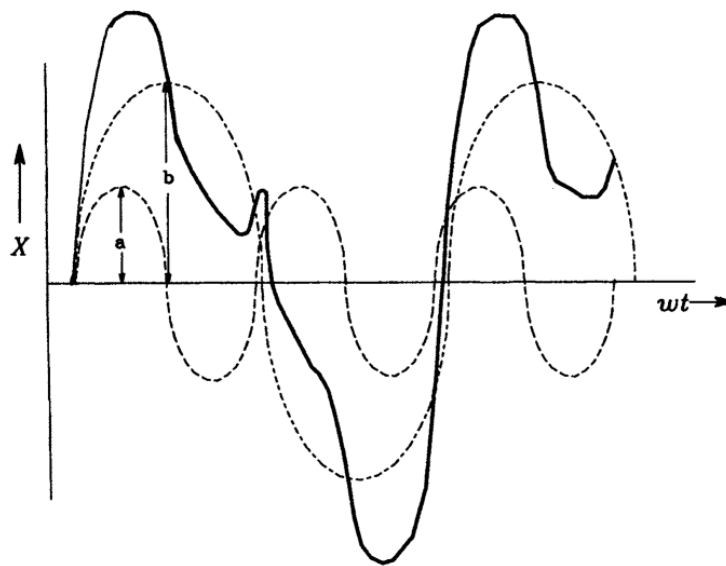
$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t \quad (2.5)$$

Kuvassa 1. on esitetty harmonisen, siniaallon muotoisen vakioamplitudisen värähtelyn suuruus ajan funktiona, ja amplitudin sekä jaksonajan määrittäminen siniaallosta.



**Kuva 1.** Värähtelyn suuruus ajan funktiona: Amplitudi  $X$  ja värähtelyjakso  $T$  harmonisessa värähtelyssä. (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34)

Luonnossa värähtely on harvoin täysin harmonista, vaan siihen vaikuttavat monet eri tekijät ympäristössä, maaperässä ja rakenteissa. Langeforsin mukaan maantärinää voidaan kuitenkin tyydyttävällä tarkkuudella käsitellä sinimuotoisena (Langefors & Kihlström 1967, s. 263). Vaikka kaikki harmoniset liikkeet ovat jaksollisia, kaikki jaksolliset liikkeet eivät ole harmonisia. Epäharmonista värähtelyä voidaan kuitenkin esittää useiden eritaajuuksisten harmonisten värähtelykomponenttien summana. Jaksollinen funktio ajan suhteen voidaan esittää matemaattisesti Fourierin sarjana, eli sini- ja kosinitermien äärettömänä summana (Moblely 1999, s. 20). Kuvassa 2. on esitetty epäharmoninen värähtely yhtenäisellä viivalla, ja sen kaksi sinimuotoista taajuuskomponenttia katkoviivoilla.



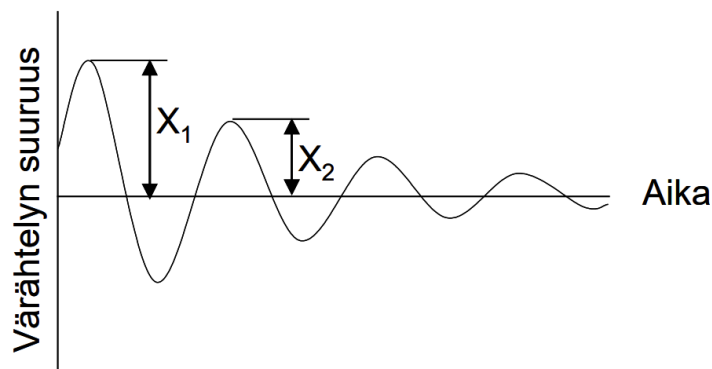
**Kuva 2.** Epäharmoninen jaksollinen värähdysalto jaettuna taajuuskomponentteihin (Moblely 1999, s. 20)

Värähtelyä voidaan luokitella harmonisuuden lisäksi myös vapaaksi tai pakotetuksi värähtelyksi. Värähdysliike on vapaata, jos värähtelevä systeemi jää värähtelyn alullepölynevan voiman jälkeen värähtelemään itsekseen, ilman uusia siihen vaikuttavia ulkopuolisia voimia (Rao 2011, s. 17). Esimerkiksi kitaran kieli, jota on kerran näppäilty ja jätetty sitten vapaasti soimaan on esimerkki vapaasta värähtelijästä. Taajuus, jolla systeemi pyrkii värähtelemään ilman ulkoisia voimia, tunnetaan sen luonnollisena taajuutena eli ominaistaajuutena (Rao 2011, s. 62). Pakotetussa värähtelyssä systeemiin kohdistuu ulkoinen, useimmiten toistuva voima, joka saa systeemin värähtelemään voiman aikaan saamalla pakotetulla taajuudella. Mikäli ulkoisen voiman taajuus osuu lähelle värähtelevän systeemin ominaistaajuutta, syntyy resonanssi eli myötävärähtelyilmiö, joka voimistaa merkittävästi värähtelyn suuruutta. (Rao 2011, s. 17) Liikkuva juna ja sen säännöllisin



välialojin kiskoihin osuvat akselit ja telit ovat esimerkki herätteestä, joka aiheuttaa pakotettua värähtelyä maaperään. Junaherätteen taajuuden ollessa yhtenevä maaperän tai jonkin läheisen rakenteen ominaistaajuuden kanssa, resonanssi voi aiheuttaa merkittäviä värähtelyä ympäristöön.

Vaimeneminen tarkoittaa värähtelyn amplitudin pienenemistä ajan myötä. Vaimenemista tapahtuu, koska värähtelijään kohdistuvat voimat, kuten kitka tai muu vastus kuluttavat värähtelyyn liittyvää energiaa (Rao 2011, s. 17.) Kuvassa 3 on esitetty suhteellinen vaimennus  $\zeta$ , joka ilmaisee vapaasti vaimenevan värähtelyn vaimenemisnopeuden (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34). Vaimennuksen merkitys on erityisen suuri tarkasteltaessa värähtelysteemejä lähellä resonanssia (Rao 2011, s. 17).

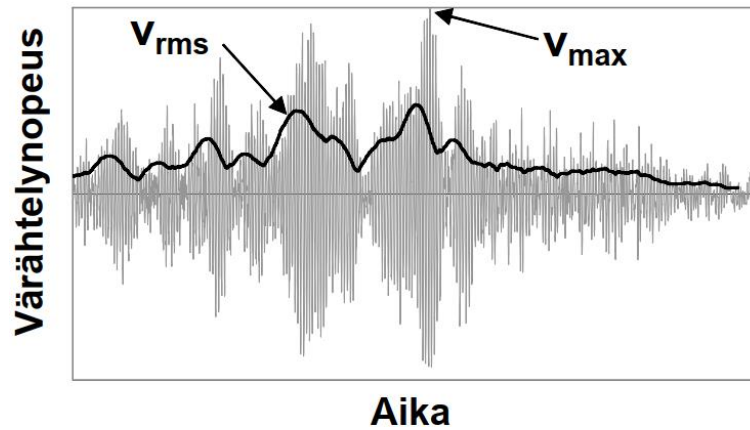


**Kuva 3.** Suhteellinen vaimennus  $\zeta$ , kun perättäisten jaksosten amplitudien suhde on  $X_1/X_2$ ,  $\zeta = \ln(X_1/X_2)/(2\pi)$ . (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34)

Rautatietärinän mittaamisessa ja arvioinnissa yleisesti käytetyt termit värähtelyn nopeuden huippuarvo  $v_{max}$ , värähtelyn tehollisarvo  $v_{rms}$  sekä painotettu värähtelyn tehollisarvo  $v_w$  on esitetty kuvassa 4. Värähtelyn nopeuden huippuarvo  $v_{max}$  (mm/s) kuvaa epäharmonisessa värähtelyssä mitatun värähtelysignaalin suurinta arvoa. Harmonisella eli vakioamplitudisella värähtelyllä huippuarvo ja amplitudi ovat samat. Mitatun värähtelysignaalin  $v(t)$  tehollisarvo  $v_{rms}$  (mm/s) ajanhetkellä  $t_0$  on

$$v_{rms} = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [v(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (2.6)$$

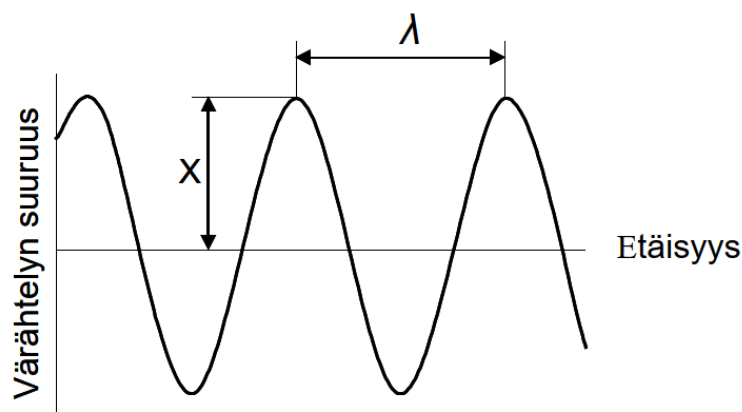
jossa aikaikkunan  $\tau$  pituus on 1 sekunti.



**Kuva 4.** Värähtelyn nopeuden huippuarvo  $v_{max}$ , tehollisarvo  $v_{rms}$  sekä painotettu tehollisarvo  $v_w$  (mukaillen Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 35–36.)

## 2.2 Värähtelyn eteneminen ja vaimeneminen maaperässä

Värähtelijä saa sen läheisyydessä olevat väliaineen osaset liikkeeseen, mikä synnyttää mekaanisen aaltoliikkeen, joka etenee väliaineessa eli maaperässä. Lyhytkestoinen liike, kuten yksittäinen isku synnyttää väliaineessa etenevän pulssin. Jatkuva värähtely, kuten junaheräte synnyttää aaltoliikkeen. Väliaineen ominaisuudet vaikuttavat siihen, millä nopeudella aaltoliike etenee. Aallon edetessä siihen muodostuu huippuja, joiden välistä matkaa, eli kokonaisen siirtymäjakson pituutta kutsutaan aallonpituudeksi  $\lambda$  (m). Kuvassa 5. on esitetty värähtelyn suuruus etäisyyden funktiona, ja aallonpituuden määrittäminen siniaallostta.



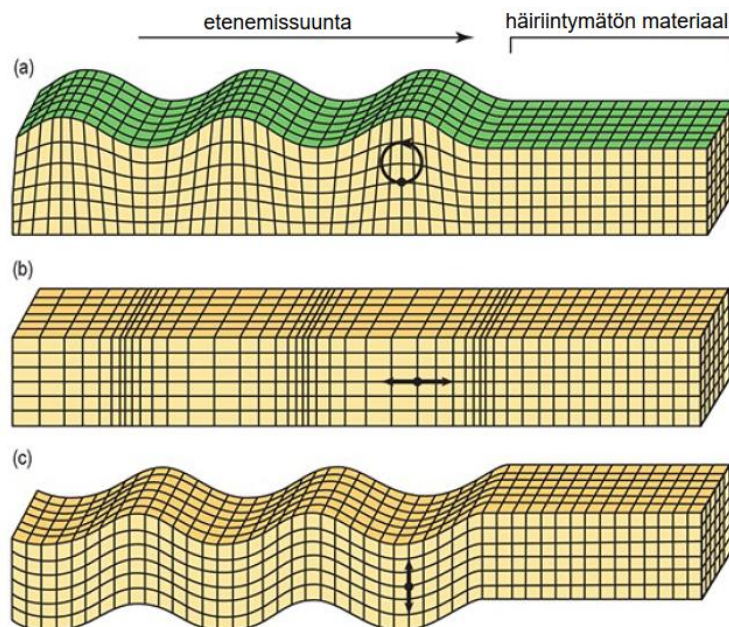
**Kuva 5.** Värähtelyn suuruus etäisyyden funktiona: Amplitudi  $X$  ja aallonpituus  $\lambda$  harmonisessa värähtelyssä. (mukaillen Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34)

Aaltoliikkeen etenemisnopeus homogeenisessä väliaineessa on tasaista, ja aallonpituus riippuu sekä värähtelylähteen taajuudesta sekä aallon nopeudesta. Näiden suureiden välinen yhteys tunnetaan aaltoliikkeen perusyhtälönä:

$$v = \frac{\lambda}{\tau} = \frac{\lambda}{1/f} = f\lambda \quad (2.7)$$

jossa  $v$  (m/s) on aaltoliikkeen etenemisnopeus,  $f$  (Hz) taajuus ja  $\lambda$  (m) aallonpituus. (Haapola et al. 2018)

Liikennetärinä välittyy siis ratarakenteen kautta pohjamaahan, jossa se etenee värähdysaaltoina ympäristöön. Maaperässä leviävät aaltomuodot jaetaan pinta- ja runkooaltoihin. Runkooaltoihin kuuluvat P-, S-, ja pinta-aaltoihin R-aallot (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 37). Erilaisten aaltotyyppien etenemistä maaperässä on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** Aaltotyyppien eteneminen maaperässä a) Rayleigh-aalto, b) P-aalto, c) S-aalto. (mukaillen De Vos 2017. s.24)

P-aallot ovat pituussuuntaisia aaltoja (primary wave, pressure wave, paineaalto, pitkittäisaalto), joille on tyypillistä korkea etenemisnopeus ja pitkä aallonpituus (De Vos 2017). Maaperän liike P-aalloissa on paine-eroista aiheutuvaa kokoonpuristumisen vaihtelua, ja sen etenemistyyli vastaa ilmassa tapahtuvaa paineaaltojen etenemistä (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 37).

S-aallot ovat poikittaisia aaltoja (leikkausaalto, shear wave, secondary wave), joissa maan partikkelit liikkuvat ilman maa-aineksen kokoonpuristumista leikkausmuodonmuutosten aiheuttamana. Aallonpituus on P-aaltoa lyhyempi ja etenemisnopeus tyypillisesti

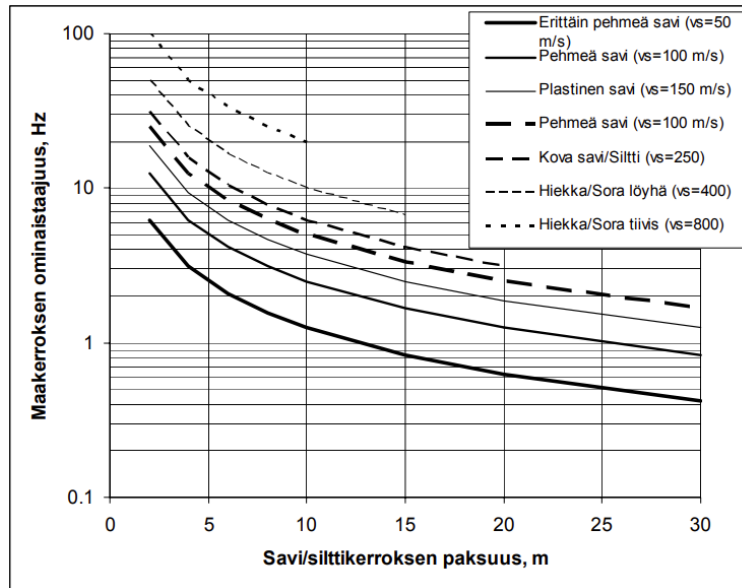
hitaampi. Leikkausaallot ovat dispersiivisiä, mikä tarkoittaa, että eri taajuuksiset aallot etenevät eri nopeuksilla. (De Vos 2017)

R-aallot (pinta-aalto, Rayleigh wave) syntyvät P- tai S-aaltojen kohdatessa maanpinnan (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 37). Aallot etenevät maaperän pintaosissa samaan tapaan kuin aallot veden pinnalla. Maaperän hiukkaset liikkuvat sekä aallon etenemissuunnassa, sekä poikittaissuunnassa etenemissuuntaan nähden. R-aallot etenevät aaltotyypeistä hitaimmin, ja kuten leikkausaalloissa, niiden etenemisnopeus riippuu värähtelyn taajuudesta. (De Vos 2017)

Värähdysaallon edetessä maaperässä, siihen kohdistuu erilaisia ympäristötekijöitä, jotka vaimentavat tai muuttavat sen etenemistä. Geometrisen leviämisen ja vaimennuksen ansiosta värähdysamplitudit yleensä pienenevät, kun etäisyys värähdyslähteeseen kasvaa ja aaltoenergia leviää yhä laajemmalle pinta-alalle (De Vos 2017). Taljan ja Törnqvistin mukaan voidaan sanoa tärinän suuruuden karkeasti puolittuvan, kun etäisyys kasvaa kaksinkertaiseksi (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 38).

Geometrisen vaimennuksen lisäksi toinen merkittävä vaimennusmekanismi on materiaalivaimennus. Ilmiöön liittyy myös kääntöpuoli, eli maaperän ominaistajuudella värähtelyn voimistuminen. Eri maalajeilla on niiden lujuuden, tiheyden ja rakeisuuskoostumuksen takia vaikutuksensa erityyppisten värähtelyiden leviämiseen (Vuolio & Halonen 2010, s. 300). Materiaalivaimennuksissa energiaa häviää värähdysaallosta väliaineen rakeiden välisten liikkeiden aiheuttamaan kitkaan (RIL 253-2024 s.78). Pehmeissä maakerroksissa välittyvät yleensä hyvin matalat alle 10 Hz taajuudet. Liikennetärinän vaikutusalue ulottuu kauimmaksi juuri hienorakeisissa ja pehmeissä savi-, siltti-, lieju- ja turvemaissa, suljetun leikkauslujuuden ollessa alle 25 kN/m<sup>2</sup>. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 39–41) Veden kyllästämissä hienorakeisissa maissa maan sisäinen tärinän vaimennus on karkearakeisia maita pienempi (Talja & Törnqvist 2006, Liite C s.3). Kovissa kivennäismaalajeissa, kuten sora, hiekka ja moreenimaalajit sekä kallio, liikennetärinän vaikutusalue on pienin. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 39–41) Korkeat taajuudet vaimenevat yleensä nopeasti jo lähellä rataa, koska niissä oleva syklien määrä on suuri ja muuttuu nopeasti lämmöksi (RIL 253-2024 s.78).

Tampereen teknillisen yliopiston taustaselvityksessä (2017) on esitetty saven yleiseksi ominaistajuusalueeksi noin 3...8 Hz, ja tiiveimmillä kitkamailla, kuten moreeneilla noin 15...40 Hz taajuusalueet. Välimaalajeilla, kuten siltillä ja löyhillä kitkamailla ominaistajuusalue asettuu tähän väliin, noin 8...20 Hz alueelle. Kalliossa voimistuvat vielä näitä korkeammat taajuudet. Kuvassa 7 on esitetty yksi tapa arvioida maaperän ominaistajuutta maalajin sekä kerrospaksuuden perusteella.



**Kuva 7.** Maapohjan alimman, vallitsevan taajuuden arviointi kerrospaksuuden ja maalajin avulla (Talja & Törnqvist 2006, Liite C s.5)

Suomessa tärinän leviämisen kannalta ongelmallisimpia savi- ja silttikerroksia esiintyy runsaasti eteläisen Salpausselän eteläpuolella sekä Pohjanmaalla. Pääsääntöisesti savikoiden kerrospaksuudet ovat sisämaassa pienempiä kuin rannikolla, mutta poikkeuksia esiintyy esimerkiksi jokikerrostumien alueella, harjumuodostumien reuna-alueilla sekä kalliopainanteissa. Paksummat savikot Lounais-Suomessa ovat jopa 50–70 metriä. (Talja & Törnqvist 2006, liite A1)

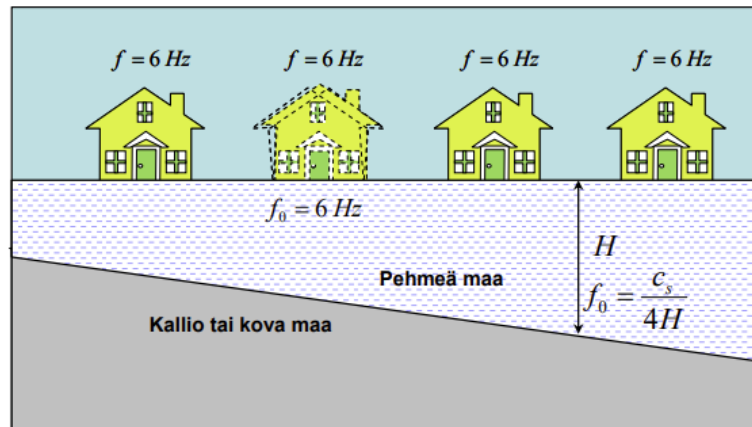
Aaltojen dispersio on myös värähtelyn voimakkuutta vaimentava tekijä. Etäisyyden kasvaessa energia hajoaa laajemmalle alueelle aallon etenemisen suunnassa, koska eri taajuussisältöiset aallot kulkevat maaperässä eri nopeuksilla. (RIL 253-2024 s. 78) Laskennallisesti kokonaisvaimennus, joka kuvaa suurena värähtelyn amplitudin pienenemistä, muodostuu vain geometrisestä- sekä materiaalivaimennuksesta. Kokonaisvaimennus voidaan kuvata maan pinnalla vaikuttavan R-aallon vaimennuksena, jolloin

$$\frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^\beta \cdot e^{\alpha(r_1-r_2)}, \quad (2.8)$$

jossa  $A_1$  on tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_1$  värähtelyn kohteesta, ja  $A_2$  tärinäamplitudin suuruus etäisyydellä  $r_2$  värähtelyn kohteesta. Eksponentti  $\beta$  kuvaa geometristä ja eksponentti  $\alpha$  materiaalivaimennusta. (Talja & Törnqvist 2006, Liite A s.7)

Värähtely voi yllättäen myös voimistua maaperässä, jos herätetaajuus osuu lähelle maaperän ominaistaajuutta tai sen monikertaa. Kuvassa 8. on esitetty maaperän ominaistaajuuden arviointia, ja kerrospaksuuden vaikutusta värähtelyyn.

Värähdyksaaltojen eteneminen maaperässä on harvoin suoraviivaista, koska pohjamaa sisältää materiaaliominaisuuksiltaan ja paksuudeltaan vaihtelevia kerroksia, sekä peruskallion topografia vaihtelee. Aalloissa tapahtuu heijastumista ja taittumista, kun ne kohtaavat maanpinnan, peruskallion tai maakerrosrajapinnan. Heijastuminen ja taittuminen, eri herätepisteistä lähtevät aallot sekä aaltojen summautuminen voivat aiheuttaa yllättäviä suuria väräjäarvoja etenkin pehmeissä maaperissä. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 38)



**Kuva 8.** Maapohjan ominaistajuuden ja pohjasuhteiden merkitys rakenteisiin siirtyvän väräjäsuuruudessa. (Talja 2008 ym. Liite B s. 19)

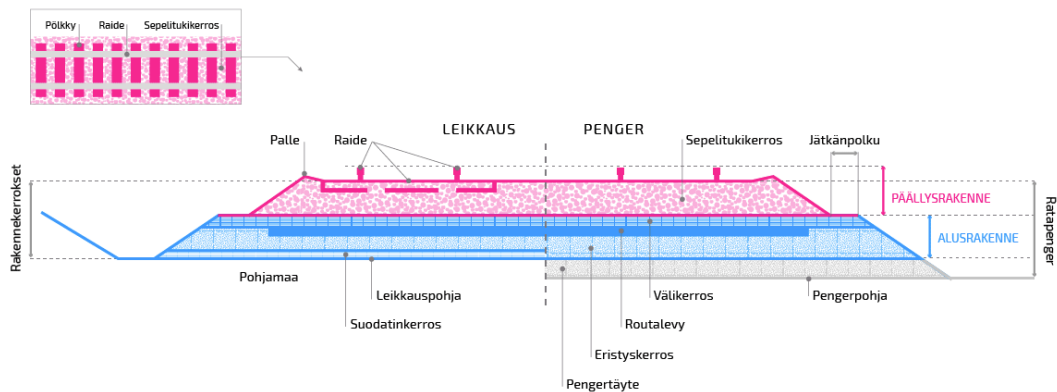
### 2.3 Ratarakenteen toiminta

Suomen rataverkon pituus oli 5915 km vuonna 2023. Yksiraiteista rataa on 5201 km ja kaksi- tai useampiraiteista 714 km. Hieman yli puolet radasta on sähkörataa. Suomen raideverkon raideleveys on 1524 mm, joka poikkeaa muualla Euroopassa käytettävästä 1435 mm raideleveydestä. (Väylä 2024)

Ratarakenne koostuu päällys- ja alusrakenteesta. Päällysrakenteen muodostavat rata-kiskot ja -pölkkyt kiinnityksineen sekä raidesepeleistä tehty tukikerros. Myös vaihteet lasketaan kuuluvan päällysrakenteeseen. Alusrakenteen osia ovat murskeesta rakennettavat välikerros ja eristyskerros, sekä routasuojalevy. (Väylä 2020) Alusrakenteen alla on ratapenkereen geometrian mukaisesti pengertäyttöä, tai se on rakennettu leikatun pohjamaan varaan. Kaksiraiteisen ratarakenteen poikkileikkaus ja rakenneosat on esitetty kuvassa 9.

Raide on ratarakenteen päällimmäisin osa. Se muodostaa alustan raiteilla kulkevalle liikenteelle ja ottaa vastaan liikenteen aiheuttamat kuormat. Raiteet jaetaan kiskon pituuden mukaan jatkuvakiskoraiteisiin, pitkäkiskoraiteisiin sekä lyhytkiskoraiteisiin. Jatkuvakiskoraiteessa (Jk-raide) kiskon pituus on yli 300 metriä, mikä mahdollistaa suuret no-

peudet, paremman matkustusmukavuuden ja pienemmät dynaamiset rasitukset rakenteille. Pitkäkiskoraidetta (Pk-raide) ja lyhytkiskoraidetta (Lk-raide) käytetään vähäliikenteisemmällä rataosuuksilla ja tapauksissa joihin Jk-raide ei sovellu. Niissä jatkosrakoja on paljon Jk-raidetta enemmän, ja nopeusrajoitus enintään 120 km/h. (Väylä, RATO 11 2024 s. 4–5)



**Kuva 9.** Radan rakenneosat ja niihin liittyvät nimitykset (Väylä 2020)

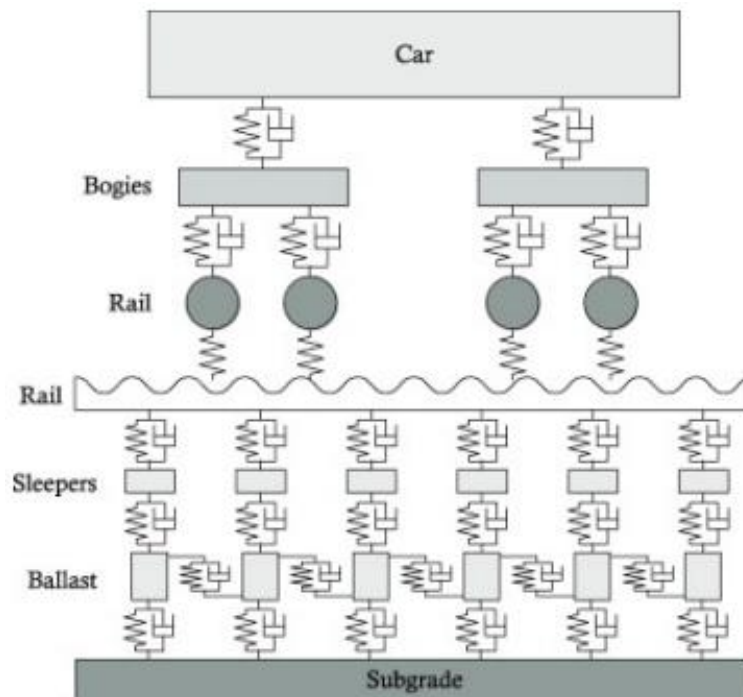
Raide muodostuu kahdesta rinnakkain asennetusta kiskosta, jotka on valssattu yleisimmin R260 teräksestä. Kiskot toimivat yhtenäisenä kulkupintana, tukipalkkina ja jakavat liikenteen kuormat ratapölkkyille. Kiskot on kiinnitetty kiskonkiinnittimillä ratapölkkyihin joko suoraan, tai aluslevyn välityksellä. Kiskoja yhdistävät kiskonjatkokset, joiden tehtävä on pitää kiskon päät epäjatkuvuuskohtassa kohdakkain. (Väylä, RATO 11 2024 s. 26, 34, 41) Kiskoissa on epäjatkuvuuskohtia jatkosten lisäksi erityisesti vaihteiden kohdalla. Ne voivat aiheuttaa pistemäisiä värähdysläheteitä kontaktissa junan pyörien kanssa.

Ratapölkkyt siirtävät kalustolta aiheutuvat kuormitukset kiskolta tukikerrokselle, sekä tukevat kiskoja. Niiden tehtävä on myös suurentaa tukikerrosta kuormittavaa pinta-alaa. Betonisia ratapölkkyjä voidaan käyttää vain sepelätukikerroksen kanssa, puisia pölkkyjä on mahdollista käyttää myös sorasta rakennetun tukikerroksen yhteydessä. Joissain tapauksissa on käytössä myös muovi- ja komposiittipölkkyjä. (Väylä, RATO 11 2024 s. 19–20) Puiset ratapölkkyt ovat joustavampia kuin betonipölkkyt, mikä vaikuttaa tärinän välittymiseen.

Ratapölkkyt asennetaan tukikerrokseen, joka uusissa raiteissa koostuu raidesepelistä. Vanhemmissa raiteissa on myös soratukikerroksia, ja esimerkiksi silloilla ja kaupunkiympäristössä käytetään myös kiintoraiderakenteita. Tukikerros on raiteen tasaisuuden ja radan käytettävyyden säilyttämisen kannalta oleellinen rakenneos. Sen tehtävä on tu-

kea raidetta, jakaa ratapölkkyistä välittyvä kuormitus alempien rakennekerrosten sallimalle tasolle ja taata ratarakenteen toiminnalle sopiva joustavuus yhdessä muiden komponenttien kanssa. (Väylä, RATO 11 2024 s. 14–16)

Liikkuvan junan aiheuttama värähtely syntyy kontaktissa junan pyörän sekä rataakiskon välillä. Painavan junan liikkuessa rataa pitkin, ratarakenne ja/tai sen alla oleva pohjamaa liikkuu junan painon takia edestakaisin. Radan pinnassa, tai junan pyörässä olevat epätasaisuudet aiheuttavat dynaamisen voiman niiden välille, minkä aiheuttaa sekä junan että ratarakenteen joutumisen värähtelyyn. Epäjatkuvuuskohtat radassa, vaihteet, jatkoskohtat, heikosti tuetut pölkkyt, pehmeät kohdat pohjamaassa ja vastaavat ovat kaikki potentiaalisia värähtelyn syntykohtia. Kuvassa 10. on esitetty, miten liikkuva juna sekä ratarakenne muodostavat dynaamisen järjestelmän, jonka lävitse värähtely siirtyy alla olevaan pohjamaahan. (De Vos 2017, s.19)



**Kuva 10.** Kaavio junan, ratarakenteen ja pohjamaan muodostamasta dynaamisesta järjestelmästä (De Vos 2017, s.19)

## 2.4 Juna herätteenä ja radalla liikennöivä kalusto

Rautatietärinässä rataa pitkin liikkuva juna toimii herätelähteenä, joka käynnistää värähtelyn. Paikallaan oleva juna aiheuttaa vain staattisen kuormituksen ratarakenteelle, eli voiman suunta ja suuruus pysyvät vakiona. Junan liikkuessa staattinen kuormitus muuttuu dynaamiseksi, ja etenee rataa pitkin kuormittaen painollaan ratarakennetta junan etenemisnopeudella. Veturista ja siihen kytketyistä vaunuista koostuva juna on kontaktissa rataakiskoon pyörien välityksellä. Pyörät ovat kiinni akseleissa, jotka taas ovat kiinni



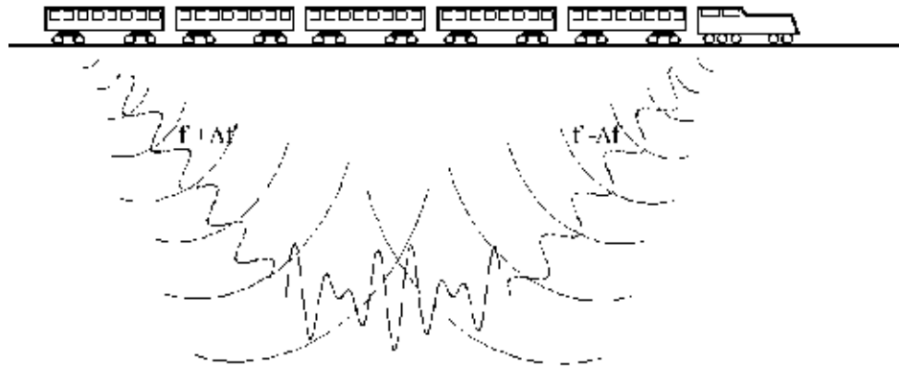
teleissä, joita on vaunussa toisistaan säännöllisin etäisyyksin. Vaunuja voi olla pitkässä tavarajunassa useita kymmeniä peräkkäin, mikä tekee junasta nauhamaisen kuormituslähteen. Tästä syystä junan aiheuttama kuormitus on radalla edetessään pulssimainen. Kuormitus aiheuttaa ratarakenteeseen sekä painavien junien tapauksessa myös sen alla olevaan pohjamaahan palautuvia muodonmuutoksia telien ohitustaajuudella. Tapahtumaketju saa aikaan värähdysliikettä. Toinen värähtelyä aikaansaava mekanismi ovat erilaiset radan epäjatkuvuuskohdat, joihin liikkuva juna hakkaa edetessään.

Junan aiheuttaman herätteen taajuuteen ja voimakkuuteen vaikuttaa useampi tekijä. Rataverkolla liikkuu pääasiasta kahdentyyppistä liikennettä: tavara- ja henkilöjunia. Suurin osa rataverkosta on sekä henkilö- että tavaraliikenteen yhteiskäytössä. Lisäksi joitakin rataosuuksia on pelkän tavaraliikenteen käytössä. (Väylävirasto karttapalvelu 2024) Eri tyyppisten junien aiheuttamissa herätteissä on eroja johtuen junien kulkunopeudesta, akselipainoista, junan pituudesta/vaunujen määrästä, sekä kaluston laadusta, akseli- ja teliväleistä jne. Akselipainolla on suuri merkitys paikalliseen taipumaan eli muodonmuutosten suuruuteen, ja siten lähes suoraan tärinän suuruuteen. Tavarajunat ovat tyypillisesti painavimpia. Suurimmalla osalla Suomen rataverkkoa sallitaan junille 22,5 tonnin akselipaino, osalla rataverkosta myös 25 tonnin akselipaino on sallittu (Väylä 2024).

Junan kulkunopeus vaikuttaa merkittävästi syntyvään tärinäherätteeseen ja värähtelyn taajuussisältöön. Mitä nopeammin juna kulkee, sitä korkeampitaajuisia värähtelyä se synnyttää. Tavarajunien suurin sallittu nopeus Suomessa on 120 km/h ja henkilöjunien 220 km/h (Väylä 2024). Yhtenä tärinähaittojen hallintakeinona onkin käytetty paikallisia nopeusrajoituksia ongelmallisilla rataosuuksilla. Junan nopeuden merkitys voi korostua erityisesti silloin, kun juna etenee lähes samalla nopeudella kuin maaperässä etenevä pinta-aalto (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40). Junan pituus vaikuttaa sekä herätteen toistuvuuteen että tärinävaikutuksen keston. Pitkien junien kohdalla voi käydä myös siten, että kauempana radasta olevassa pisteessä yhdistyy monesta herätepisteestä syntyvä värähtely. Ilmiötä kutsutaan interferenssiksi, ja se voi paikallisesti voimistaa tai vaimentaa värähtelyä. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40) Eri herätepisteistä lähtevän värähtelyn yhteisvaikutusta on havainnollistettu kuvassa 11.

Junan kuormituksesta aiheutuvan taajuuden ja voimakkuuden arviointiin on kehitetty erilaisia viitteellisiä arviointitapoja. Useimmat nomogrammit ja taulukot perustuvat junan nopeuteen ja teliväliin, joiden perusteella voidaan esittää arvio värähtelyn sisällöstä. Todellisuudessa arviointi ei ole yksiselitteistä, vaan junan nopeus, paino, pituus, teliväli ja ratarakenne-maapohja toimivat aina yhtenä dynaamisena kokonaisuutena, kuten kuvassa 10. on esitetty. Suuriakin poikkeamia tai voimistumia maaperässä voi tapahtua,

jos esimerkiksi radan epäjatkuvuuskohtaan osuvan pyörän toistuvuus on lähellä paikallisen maaperän ominaistaajuutta (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40).



**Kuva 11.** Eri herätepisteistä lähtevän värähtelyn yhteisvaikutus pitkällä junalla (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40)

Suomen rataverkolla liikkuvia hieman toisistaan poikkeavia tavaravaunutyyppejä ovat esimerkiksi suomalainen Sp-raakapuuvaunu, sekä itäisen yhdysliikenteen Vok-tavaravaunu. Sp-vaunu on yleisin suomen rataverkolle rekisteröity tavaravaunu, ja sen telimalli on H-runkoinen. Vok-vaunussa teli on kolmiosainen, ja sen rakenteen takia telillä on suuri jousittamaton massa (6920 kg) verrattuna Sp-vaunuun (4912 kg). Sp-vaunun akselipaino voi olla korkeimmillaan 20 t, kun taas Vok-vaunun jonkin verran korkeampi 22,5 t. Vok-vaunu aiheuttaa siis pääosin suuremman staattisen kuormituksen ratarakenteelle. Suurempi jousittamaton massa Vok-vaunussa on merkittävä tekijä vaunun aiheuttamassa dynaamisessa kuormituksessa. (Loponen et. al. 2016, s. 57–66) Tässä työssä mallinuksissa junaherätteenä käytettiin Vok-vaunua. Taulukossa 1. on esitetty Vok-vaunun mittoja ja niiden perusteella laskettuja herätetaajuuksia kahdella eri ajonopeudella.

Taulukko 1. Vok-vaunun mitat ja niiden perusteella lasketut teoreettiset herätetaajudet 50 ja 70 km/h nopeuksilla.

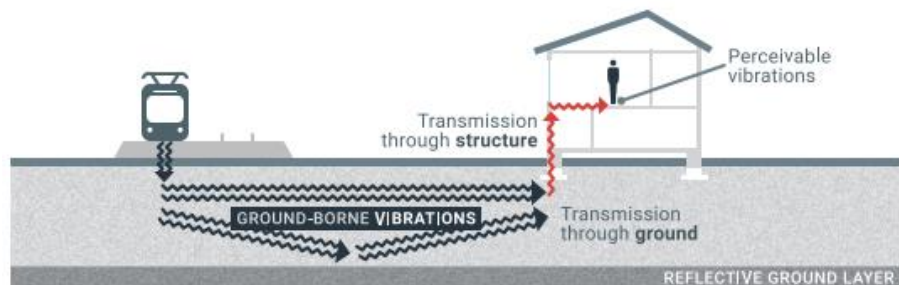
	Mitta [m]	Taajuus [Hz] nopeudella 50 km/h	Taajuus [Hz] nopeudella 70 km/h
Vaunun pituus	13,92 <sup>1)</sup>	1,00	1,4
Peräkkäisten vaunujen telien väli	3,0 <sup>1)</sup>	4,62	6,48
Teliväli	8,65 <sup>1)</sup>	1,61	2,25
Akseliväli telissä	1,8 <sup>1)</sup>	7,72	10,80
Lovipyörä	D=0,957 <sup>1)</sup>	4,62	6,47

1. Loponen et al. 2016, s. 66

## 2.5 Tärinän aiheuttamat haitat

Rautatietärinä aiheuttaa negatiivisia ympäristövaikutuksia, jotka voidaan jakaa kahteen luokkaan: vaikutukset asuinviihtyvyyteen, sekä tärinän aiheuttamat rakenteelliset vauriot. Liikenteen aiheuttaman tärinän tapauksessa vaikutukset asuinviihtyvyyteen korostuvat, koska rakennusten vaurioitumista koskevat suositusarvot ovat yleensä korkeampia kuin asuinmukavuudelle esitetyt ohjearvot (Talja & Törnqvist 2006, s. 8). Yhdyskuntarakenteen tiivistyessä ja liikenneyhteyksien korostuessa, ratojen lähialueita ja geoteknisesti heikompia ja samalla tärinähaitoille alttiimpia savikkoja kaavoitetaan asuinkäyttöön. Tämä tuo yhä suuremman joukon ihmisiä rautatietärinän vaikutusalueelle.

Liikenteen aiheuttaman herätteen vuoksi maaperä joutuu värähtelyyn, joka kohdastessaan rakennuksen perustuksen siirtyä edelleen ja aiheuttaa rakennuksen rungon ja lattioiden värähtelyyn. Liikennetärinän etenemistä rakennukseen on esitetty kuvassa 12. Tekijöitä, jotka vaikuttavat tärinän siirtymiseen rakennuksessa ovat mm. rakennuksen perustamistapa, rakennuksen mitat, rungon resonanssi-ilmiö sekä välipohjan ja muiden rakenneosien resonanssi-ilmiön. Asukkaat kokevat rakenteissa etenevän tärinän esimerkiksi häiritsevinä tuntemuksina kehossa, rakennusosista ja esineistä välittyvinä ääminä, kuten astioiden helinänä, sekä mahdollisesti pelkona rakenteiden vaurioitumisesta. (Talja & Törnqvist 2006, s. 11).



**Kuva 12.** Rautatietärinän siirtyminen maaperän kautta rakennukseen (De Vos 2017, s. 14)

Tärinän suuruuteen liittyviä käsitteitä on esitetty kappaleessa 2.1. Asumisviihtyvyyden tapauksessa tärinän arviointiin käytetään yleensä värähtelyn tehollisarvoa  $v_{rms}$  (mm/s). Yksittäisestä liikennevälineestä, kuten junasta mitattu värähtelysignaali jaetaan eri taajuuksiin komponentteihin, jotka painotetaan ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoiseksi kertomalla ne eri painotuskertoimilla. Taajuuspainotetusta värähtelysignaalista määritetään suurin tehollisarvo  $v_w$  (mm/s). Asuinmukavuuden arvioinnissa käytetään useammista liikennevälineistä mitattujen tehollisarvojen perusteella määritettyä värähtelyn tunnuslukua  $v_{w,95}$  (mm/s), joka kuvaa värähtelyn maksimiaron odotusarvoa. Se on

määritelty tärinämittaustuloksista 95 % todennäköisyyttä vastaavaksi tilastollisesti suurimmaksi arvoksi. (Talja & Törnqvist 2006, s. 12–13).

Tärinälle ei ole Suomessa laissa tai asetuksissa määritetty virallisia raja-arvoja. Ympäristönsuojelulaki (527/2014) määrittelee artikla 5 §:ssä melun ja tärinän ihmisen aiheuttamiksi päästöiksi. Meluntorjunnasta on annettu tarkempia määräyksiä ympäristönsuojelulain 15 luvun 151, 152 ja 153 §:ssä, mutta tärinään sovelletaan vain lain yleisissä velvoitteissa luvun 2 7§:ssä annettua velvollisuutta ehkäistä ja rajoittaa ympäristön pilaantumista ja toiminnan päästöjä. Suosituksia ja arvioita on kuitenkin esitetty mm. seuraavissa VTT:n julkaisuissa: Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksista (2004), Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa (2006), Ohjeita liikennetärinän arviointiin (2011) sekä Liikennetärinä – Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius (2014). VTT tiedotteessa 2278 (Talja 2004e) on esitetty suositus rakennusten värähtelyluokituksista. Suositus pohjautuu melko suoraan Norjan standardiin (NS 8176E, 1999) sekä VTT Tiedotteessa 2278 esitettyihin tärinämittaustuloksiin. Luokittelu on esitetty taulukossa 2. Taulukossa esitetty luokan D raja ylitetään rautatietärinän tapauksessa usein. Siitä syystä rautatietärinän haittojen arviointi tulee aina tehdä tapauskohtaisesti, ja samalla arvioida myös mahdollisuudet tärinähaitan pienentämiseksi. Uusille radoille ja niissä tapauksissa, joissa liikennöintinopeutta tai akselipainoja nostetaan, sovelletaan C-luokan arvoja. (Talja & Törnqvist 2006, s. 16). Vaimennusratkaisujen toteuttaminen on usein hankalaa ja kallista kun kyseessä ovat vanhat rataosuudet tai asuinalueet. Modernissa rakentamisessa keinovalikoima on laajempi, ja tärinähaitta voidaan huomioida jo kaavoitus- ja suunnitteluvaiheessa.

Taulukko 2. Suositus rakennusten värähtelyluokituksista (Talja & Törnqvist 2006, s. 15).

Värähtelyluokka	Kuvaus olosuhteista	$v_{w,95}$ [mm/s]
A	Hyvät asuinolosuhteet. <i>Ihmiset eivät yleensä havaitse tärinää.</i>	$\leq 0,10$
B	Suhteellisen hyvät olosuhteet. <i>Ihmiset voivat havaita tärinän, mutta se ei ole yleensä häiritsevää.</i>	$\leq 0,15$
C	Suositus uusien rakennusten ja väylien suunnittelussa. <i>Keskimäärin 15 % asukkaista pitää tärinää häiritsevänä ja voi valittaa häiriöstä.</i>	$\leq 0,30$
D	Olosuhteet, joihin pyritään vanhoilla asuinalueilla. <i>Keskimäärin 25 % asukkaista pitää tärinää häiritsevänä ja voi valittaa häiriöstä.</i>	$\leq 0,60$

Värähtelyn siirtyessä maaperästä rakennuksen perustuksiin ja siitä rakennuksen runkoon, värähtelyn suuruus ja taajuussisältö muuttuu. Ongelmallisimmissa tilanteissa on

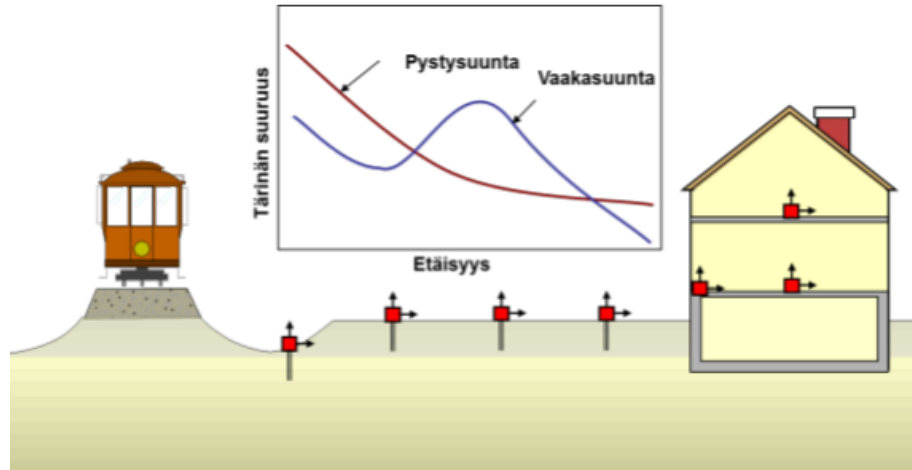
usein kyseessä resonanssi-ilmiöstä. Mikäli junasta aiheutuva ja maaperästä välittyvä heräte on hyvin kapeakaistainen, ja osuu rakenteiden ominaistajuuden alueelle, värähtely voimistuu rakenteissa. Ilmiö on yleinen erityisesti savimailla, joilla hallitseva terssikaista osuu 4–10 Hz alueelle, mikä on myös 1–2-kerroksisille rakennuksille tyypillinen ominaistajuus. Pohjasuhteiden vaikutusta resonanssin ilmenemiseen on esitetty myös kappaleessa 2.2. ja kuvassa 8. (Talja & Törnqvist 2014, liite C s. 45–46).

## 2.6 Tärinän mittaaminen

Tärinämittauksia tehdään palvelemaan mm. ilmenneiden tärinähaittakohteiden tutkimista, maankäytön suunnittelun tarpeita sekä tutkimuskäyttöä. Vertailukelpoisten tulosten saamiseksi on tärkeää, että mittauskäytännöt ja tulosten esittäminen tehdään yhteisillä toimintatavoilla. Tärinämittauksista saatuja tuloksia viedään myös erilasiin tietokantoihin, joiden dataa hyödynnettäessä tulosten vertailukelpoisuus korostuu entisestään. Tärinäkartoituksiin on määritetty VTT:n tutkimusraportissa *Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius* kolme tarkkuustasoa. Tarkastelutaso 1 perustuu kartta-aineistoihin ja junatietoihin, tasoissa 2 ja 3 käytetään tukena kohdekohtaisia tärinämittauksia (Talja & Törnqvist 2014, s. 7–8).

Liikennetärinän mittaamisessa voidaan käyttää kiihtyvyyssantureita tai geofoneja. Mittauslaitteisto kokonaisuudessaan koostuu mittausantureista ja niiden vahvistimista, signaalin esisuodattimesta sekä tallennusjärjestelmästä. Nykyaikaisissa laitteistoissa mittausdata voidaan saada lähes reaaliajassa suoraan pilvipalveluun käytettäväksi. Kaluston valinnassa on syytä kiinnittää huomiota erityisesti mitattavaan taajuusalueeseen, jotta laitteisto toimii luotettavasti koko liikennetärinän taajuusalueella, joka on noin 1–80 Hz. (Talja, A. 2004, s. 18)

Mittauspisteet tulee valita edustavasti kohdekohtaisesti. Värähtelyä mitataan rakennuksissa kolmessa suunnassa, x, y ja z, joista vaakasuunnat valitaan talon pääsuuntien mukaisesti. Mittauspisteitä valitaan lattiapinnoilta huoneistojen sisältä edustavasti. Lisäksi pyritään mittaamaan perustusten värähtelyä, ja maaperän pystysuuntaisia värähtelyitä rakennuksen ulkopuolelta pysty- ja vaakasuunnassa. Lattia-antureista arvioidaan useammin asuinviihtyvyyden arvoja, ja peruksiin kiinnitettävistä antureista rakennuksen vaurioitumisriskiä. (Talja, A. 2004, s. 18–19) Maapinnan tärinämittaus tehdään useimmiten linjamittauksena, jolloin asennetaan useampia mittausantureita rataa nähden poikittaisessa linjassa. Vähimmäismäärä mittauspisteille on kolme, jotta voidaan luotettavasti arvioida tärinän vaimenemista etäisyyden suhteen. (Talja & Törnqvist 2014, s. 13) Värähtelyn mittaamisperiaate on esitetty kuvassa 13.



**Kuva 13.** Maaperän ja rakennuksen värähtelyn mittaamisperiaate (Talja & Törnqvist 2014, s. 12)

## 2.7 Rautatietärinän vaimentaminen

Rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän vaimentamiseen on käytettävissä erilaisia menetelmiä, jotka kohdistuvat sen syntyyn, kulkeutumiseen maaperässä tai siirtymiseen rakenteisiin. Tavoitteena voi olla vaimennusmenetelmin pienentää herätteen voimakkuutta, muuttaa värähtelyn taajuussisältöä tai estää tai vaimentaa sen etenemistä maaperässä tai rakenteissa. Vaimennusratkaisut ovat aina kohdekohtaisia, koska värähtelyn syntymiseen ja leviämiseen ympäristöön vaikuttavat monet eri tekijät. Vaimennusmenetelmien tehokkuus on useimmiten sidoksissa värähtelyn taajuussisältöön. Rautatietärinän vaimentamisessa tulee aina vaihtoehtoista keskustellessa erotella, onko kyseessä uusi vai vanha rataosuus, tai uusi vai olemassa oleva rakenne. Keinovalikoima olemassa oleville radoille ja rakenteille on suppeampi, menetelmät kalliimpia ja hankalammin toteutettavissa.

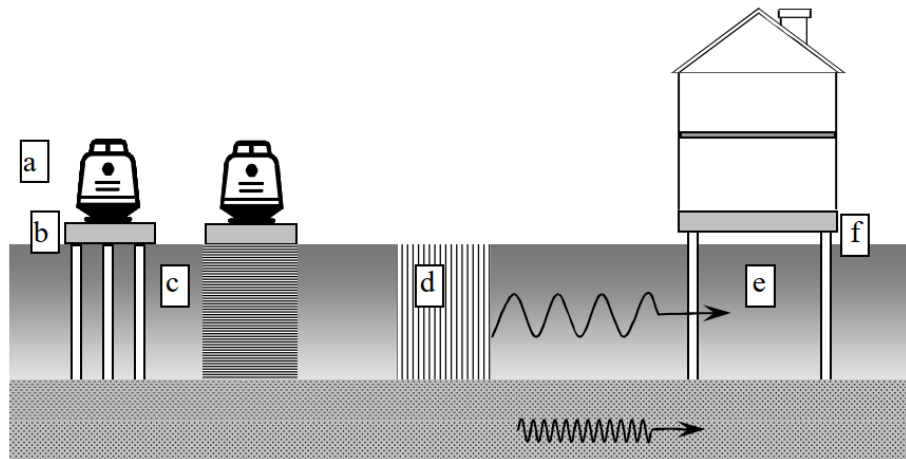
Junaan eli värähtelyn aiheuttavaan herätteeseen kohdistuva vaimennuskeino on esimerkiksi nopeusrajoitus. Nopeusrajoitukset eivät vaadi rakenteellisia muutoksia, ja ovatkin siksi Suomessa yleisimmin käytetty tärinänhallintakeino. Tärinäsyistä asetetut nopeusrajoitukset on esitetty Väyläviraston vuosittain julkaisemassa *Rautateiden verkkoselostuksessa*. Vuonna 2024 Suomessa oli valtion rataverkolla 26 tärinäperusteista nopeusrajoitusta (Väylävirasto 2024, liite 2K). Suurin osa rajoituksista on asetettu koskemaan yli 2500 tonnia painavia junia. Nopeusrajoitukset ovat kuitenkin radan liikennöinnin kannalta hankalia, etenkin vilkkaasti liikennöidyillä radoilla, joissa ne vähentävät radan välityskykyä ja vaikuttavat myös henkilöjunaliikenteeseen (Väylävirasto 2021). Tärinän takia asetetut nopeusrajoitukset ovat pääosin 40 tai 50 km/h (Väylävirasto 2024, liite K2). Tärinän syntyä voidaan ehkäistä myös panostamalla liikennöivän kaluston kuntoon.

Värähtelyn etenemistä ratarakenteessa voidaan vaimentaa kiskon, pölkyn tai sepelin alle asennettavilla vaimennusmateriaaleilla. Tässä työssä tutkittavien pölkyn pohjainten (eng. Under-Sleeper Pad, USP) toimintaperiaate on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.7.1. Muita vaimennusrakenteita ovat esimerkiksi sepelinalusmatot (eng. Under Ballast Mat, UBM). Sepelinalusmatto on joustava matto, joka asennetaan tukikerroksen alapuolelle tuomaan joustoa rakenteeseen. Pääasiassa sepelinalusmattoa käytetään vain tunneleissa ja kovilla pinnoilla. (Väylävirasto 2024, s.25) Ratarakenteeseen asennettavat tärinäeristeet ovat kustannuksiltaan melko edullisia, mutta niiden asentaminen olemassa olevaan rataaan vaatii käytännössä aina vähintään radan päällysrakenteen uusimisen. Vaimennusmateriaalien käyttötarvetta kannattaa arvioida radan suunnitteluvaiheessa tai kun rataosuuden päällysrakenne on tullut käyttöikänsä päähän. Samantyyppisiä joustavia materiaaleja voidaan käyttää myös rakennusten perustusten ja pienentää maasta rakennukseen siirtyvää värähtelyä (Talja et al. 2009, s. 17).

Radan alusrakenteeseen puuttamalla saadaan tehokkaimmin ehkäistyä tärinähaittoja. Se on kuitenkin vaimennuskeinoista kallein ja hankalin toteuttaa olemassa oleville radoille. Tavoitteena on tällöin jäykistää radan alla olevaa pehmeää maakerrosta esimerkiksi stabiloimalla tai rakentamalla rata paalulaatan varaan (Talja et al. 2009, s. 14). Lisääntynyt jäykkyys pienentää junan aiheuttamia muodonmuutoksia ja siten pienentää syntyvän värähtelyn amplitudia. Stabiloimalla jäykistetyin maaperän ominaistajuus on myös erilainen kuin ympäröivän luonnontilassa olevan maaperän, mikä vaikuttaa värähtelyn etenemiseen. Alusrakenteen jäykistäminen voidaan toteuttaa myös massanvaihdolla, jolloin pehmeä pohjamaa radan alta kaivetaan pois kokonaan tai määräsyvyyteen, ja korvataan esimerkiksi louheella. Massanvaihto soveltuu käytännössä vain melko mataliin, noin 3–5 m syviin pehmeikköihin (Liikennevirasto 2011, s. 10). Ratapenkereen alle alusrakenteeseen kohdistuvat toimenpiteet ovat materiaali- ja työkustannuksiltaan kalliita, ja vaativat koko ratapenkereen purkamisen työn toteuttamiseksi. Toisaalta pohjanvahvistukset ovat usein tarpeellisia pehmeiköillä radan painumien tai stabiliteetin hallitsemiseksi, jolloin rakenteet kannattaa samalla suunnitella myös tärinänvaimennuksen kannalta sopiviksi.

Pystysuorilla ratapenkereen suuntaisesti asennettavilla tärinäesteillä voidaan pienentää maassa leviävää värähtelyä. Maaperään upotettavan tärinäseinän toiminta perustuu siihen, että se on ympäröivää luonnonmaata merkittävästi jäykempi tai joustavampi. (Talja 2011, s. 34) Pystysuora tärinäeste voi olla esimerkiksi avoin tai täytetty kaivanto, maahan lyöty teräsponsittiseinä, muovinen tai sandwich-tyyppinen joustava vaimennuselementti tai lamellistabiloinnilla tehty yhtenäinen seinä (Talja et al. 2009, s. 15). Joillakin tärinäes-

teillä, kuten teräsponttiseinillä vaimennus perustuu osittain myös värähdysaaltojen heijastumiseen. Tärinäesteet voivat vaikuttaa myös radan stabiiliteettiin. Avoin kaivanto heikentää stabiiliteettia, kun taas teräsponttiseinä voi toimia leikkauspinnan katkaisevana seinänä. Pystysuorat tärinäseinät on joissain tapauksissa mahdollista asentaa puuttumatta ratarakenteeseen tai edes katkaisematta liikennöintiä radalla, mikä lisää niiden käyttömahdollisuuksia vanhoilla radoilla. Tärinää vaimentavien menetelmien periaatekuva on esitetty kuvassa 14.

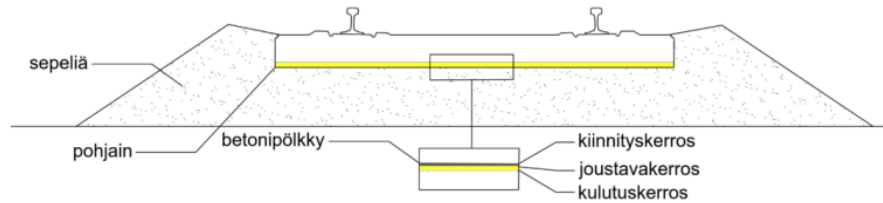


**Kuva 14.** Periaatekuva rautatietärinän vaimennuskeinoista. a) Junaherätteen vaikuttaminen, b) radan tärinäeristys c) alusrakenteen jäykistäminen d) pystysuora tärinäeriste e) rakennuksen tuenta kovaan maapohjaan f) rakennuksen tärinäeristys (Mukaiillen Talja 2011, s. 32).

## 2.8 Pohjainten toimintaperiaate

Pohjain (Under-sleeper Pad, USP) on ratapölkyn alapintaan koko pölkyn pituudelle asennettava levymainen joustoelementti. Elementti koostuu pölkkyä vasten tulevasta kiinnityskerroksesta, keskimmäisestä joustavasta kerroksesta sekä uloimmasta kulutuskerroksesta. Pohjainlevyjien joustavana materiaalina voi olla esimerkiksi polyuretaani, luonnonkumi tai etyyli-vinyylisetaatti (EVA). Kulutuskerros tehdään geotekstiilistä, ja sen tarkoitus on suojata pehmeää joustokerrosta terävien raidesepelin rakeiden hankaa-valta kulutusvaikutukselta. (Väylävirasto 2024, s. 24). Kuvassa 15. on esitetty pohjaimen rakenne ja sen sijoittuminen osaksi ratarakennetta ja kuvassa 16. pohjaimellisia rata-pölkkyjä.





**Kuva 15.** Periaatekuva pohjaimen sijainnista ratarakenteessa ja pohjaimen rakennekerroksista (Väylävirasto 2024, s. 24).

Pohjaimet toimitetaan tehtaalta yleensä valmiiksi pölkkyihin kiinnitettyinä. Pohjain voidaan asentaa täryttämällä tai kiinnityskerroksen avulla suoraan kosteaan betoniin. Valmiiseen pölkkyyn pohjain kiinnitetään tehtaalla ruiskuttamalla, maalaamalla tai liimamalla. (Väylävirasto 2024, s. 24). Radalla pohjaimelliset pölkkyt asennetaan sepelikerrokseen tavallisten pölkkyjen tapaan.

Väyläviraston RATO 11 -ohjeessa (Väylävirasto 2024, s.23) kerrotaan, että pohjainten pääasiallinen tarkoitus on vähentää radan kunnossapitokustannuksia. Pohjaimia voidaan kuitenkin käyttää Suomessa tilannekohtaisesti myös

- raiteen geometrian pysyvyyden parantamiseen
- radan jäykkyyserojen tasoittamiseen siirtymäalueilla, kuten ratarumpujen kohdalla
- tukikerroksen paksuuden madaltamiseen haastavissa kohteissa Väyläviraston erikoisluvalla
- kiskojen korrugaation vähentämiseen tai tärinän vähentämiseen
- poikittaisvastuksen parantamiseen.

Peltokankaan et al. (2013, s. 23) selvityksessä kerrotaan, että Keski-Euroopassa on melko runsaasti kokemusta pohjainten käytöstä eri tarkoituksiin jo 90-luvulta lähtien. Yllä listattujen käyttötarkoitusten lisäksi pohjaimia käytetään ulkomailla tavallisesti mm. jäykkyyserojen tasoittamiseen siltojen kohdilla, kiskon ja ratapölkyn jännitysten pienentämiseen sekä runkomelun vähentämiseen erityisesti suurnopeusradoilla.

*Wear* -lehden erikoisnumerossa *Contact mechanics and wear of rail/wheel systems* julkaistun artikkelin *Under sleeper pads – Influence on dynamic train-track interaction* (Johansson et al. 2008) mukaan pohjainten käytöllä tavoitellaan pääasiassa kahta asiaa: tärinän vaimennusta ja kunnossapitotarpeen laskemista vähentämällä raideseppelin kulumista. Joustava pohjain vähentää raideseppelin jauhautumista pölkyn alapintaa vasten pienentämällä painetta pölkyn ja sepelin välisessä kontaktissa. Paineen laskeminen saavutetaan kasvaneen kontaktipinta-alan avulla, kun sepelin rakeet uppoavat pehmeään pohjainkerrokseen. Tämä aiheuttaa kuorman tasaisemman jakautumisen pölkyltä raidesepeleihin. (Johansson et al. 2008) Tavanomaisessa sepeliraiteessa pölkyn ja sepelin välinen kosketuspinta-ala on noin 5-9 %, kun pohjaimen avulla kosketuspinta-ala voi

kasvaa jopa 35 prosenttiin (Varis 2018, s.9). Toinen vaikutusmekanismi perustuu siihen, että pohjain muuttaa ratarakenteen kokonaisjäykkyyttä joustavampaan suuntaan. Rakenteen elastisuuden lisääntyminen sekä kontaktipinta-alan lisääntyminen yhdessä vaikuttavat värähtelyn syntymiseen ja etenemiseen ratarakenteessa. Jo valmiiksi elastisella rakenteella, kuten pehmeillä pohjamailla pohjaimen vaikutus rakenteen kokonaisjoustavuuteen on pienempi, koska rakenne mahdollistaa jo lähtötilanteessa pystysuuntaista muodonmuutosta (Varis 2018, s. 12).



**Kuva 16.** *Betonisia ratapölkkyjä sinisillä pohjaimilla (Getzner 2024).*

Pohjaimen paksuus sekä jäykkyys ovat sen toimintaan eniten vaikuttavat tekijät. Pohjainten jäykkyyden kuvaamiseen käytetään yleisesti kirjallisuudessa sekä pohjainten valmistajien materiaaleissa alustalukua (bedding modulus, bedding stiffness). Alustaluku kuvaa sitä, kuinka suuren paineen 1 millimetrin painuma aiheuttaa. Alustaluvun yksikkö on  $N/mm^3$ . Väylävirasto 11 -ohjeessa (Väylävirasto 2024, s. 24) on esitetty pohjaimille luokittelu staattisen jäykkyyden mukaan. Luokittelu on esitetty taulukossa 2. RATO 11 -ohjeen mukaan jykemmät pohjaimet soveltuvat paremmin raiteen geometrian pysyvyyden parantamiseen, ja pehmeämmät pohjaimet lähinnä runkomelun ja tärinän vaimentamiseen (Väylävirasto 2024, s.25).

Pohjainten vaikutusta rautatietärinään ja sen vaimentamiseen on tutkittu viime vuosina mm. Saksassa (Auersch 2024, Auersch & Rücker 2015), Itävallassa (Loy et al. 2018, Loy 2012), Venäjällä (Kaewunruen & Remennikov 2015; Kaewunruen et al. 2017) ja Iranissa (Zakeri et al. 2016). Tutkimukset ovat sisältäneet sekä laskennallisia ja mallinustarkasteluita, että kenttätutkimuksia. Yleinen havainto tutkimuksissa on ollut pohjaimen vaimentavan rautatietärinää merkittävästi korkeammilla, noin 50–250 Hz taajuuksilla. Sitä matalammilla taajuuksilla on tutkimuksissa havaittu sekä tärinän voimistu-

mista että vaimentumista. Koekohtaisilla lähtöasetelmilla, junaherätteellä, ratarakenteella ja pohjaolosuhteilla, sekä käytettyjen pohjainten ominaisuuksilla on huomattava merkitys pohjaimen tärinää vaimentavaan vaikutukseen.

Taulukko 3. Pohjaimien luokittelu jäykkyyden mukaan (Väylävirasto 2024, s. 24).

Pohjain	Jäykkyys
Jäykkä	$0.25 \text{ N/mm}^3 < C_{\text{stat}} \leq 0.35 \text{ N/mm}^3$
Normaali	$0.15 \text{ N/mm}^3 < C_{\text{stat}} \leq 0.25 \text{ N/mm}^3$
Pehmeä	$0.10 \text{ N/mm}^3 \leq C_{\text{stat}} \leq 0.15 \text{ N/mm}^3$
Erittäin pehmeä	$C_{\text{stat}} < 0.10 \text{ N/mm}^3$

Suomessa pohjaimia on tutkittu tärinänvaimennuksen näkökulmasta muutamissa koe-kohteissa, mm. Vantaankosken kaksoisradalla Myyrmäessä (Peltonen & Backholm 2009), Kehäradalla (Varis 2018) sekä viimeisimpänä Pori-Mäntyluodon testiradalla vuosina 2020 ja 2021 (Väylävirasto, 2021).

Pori-Mäntyluoto-Tahkoluoto rataosuudella tehtiin vuonna 2020 noin 150 m pituinen testirata, jossa uusittiin päällysrakenteeseen pohjaimelliset pölkyt. Mittausten perusteella pohjainten havaittiin vaimentaneen tärinää jopa enemmän kuin laskennallisesti oli odotettavissa, ja testirataa päätettiin laajentaa vuonna 2021 toteutetun perusparannushankkeen yhteydessä. Testirataosuutta laajennettiin noin 17 ratakilometrin verran. Rataan asennettiin viittä erilaista pohjaintyyppiä, erilaisilla jäykkyyksillä ja paksuuksilla. Tavoitteena oli tutkia mm. pohjaimen paksuuden ja jäykkyyden vaikutusta rautatietärinään. Mittauksissa havaittiin jäykkyydeltään normaalien sekä pehmeiden pohjaimien vaimentavan tärinätasoja riippumatta junan nopeudesta tai maaperästä. Jäykkyydeltään normaali Pandrol USP-R-07e-pohjain vaimensi tärinää pystysuuntaisessa komponentissa betonipölkkyyen verrattuna 10–30% taajuusalueella 1-80 Hz, ja matalataajuista 1-20 Hz tärinää 15-40 %. Maaperä oli testialueella hiekkaa ja silttiä, joten mitaustuloksia pehmeimmillä ja tärinälle altteimmilta savikoilla ei tutkimuksessa saatu. (A-Insinöörit 2021).

## 3. RAUTATJETÄRINÄN MALLINTAMINEN FEM-MALLILLA

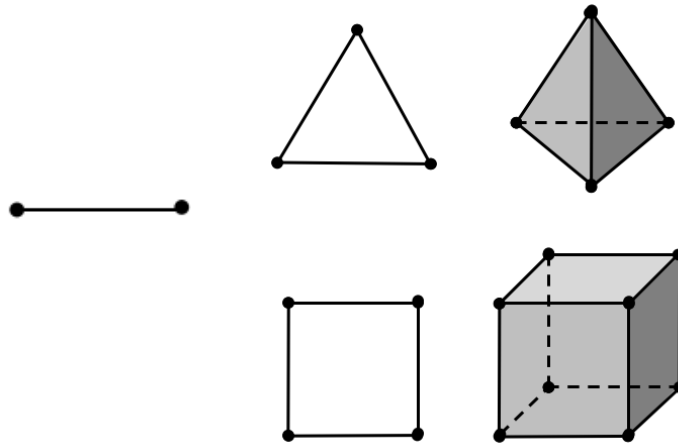
Tässä työssä rautatjetärinään liittävät mallinnustarkastelut tehtiin Plaxis 2D -ohjelmalla. Kaksiulotteinen mallinnustarkastelu valittiin työn laajuus ja aikataulu huomioiden. Värähely ilmiönä on monimutkainen, ja sen tarkasteleminen 2D -mallilla asettaa tiettyjä rajoituksia, jotka on huomioitava kaikissa tarkasteluvaiheissa ja tuloksia tulkitessa. Esimerkiksi nauhamaisen junaherätteen aiheuttamien maassa etenevien värähdysaaltojen interferenssiä ei voida mallintaa 2D-tarkastelussa. Maaperän ilmiöitä mallinnettaessa on muistettava, että maa ei ole materiaalina homogeeninen eikä lineaarisesti käyttäytyvä. Tarkastelut perustuvat aina jollain tasolla yksinkertaistuksiin ja likiarvoihin, myös verrattain tarkalla elementtimenetelmällä mallinnettaessa. Luotettavien tulosten saaminen ja niiden tulkitseminen edellyttää ymmärrystä sekä elementtimenetelmästä, fysiikasta että maaperän geoteknisestä käyttäytymisestä. Käytettävän FEM-laskentaohjelman tarjoamat mahdollisuudet ja rajoitukset tulee myös tuntea hyvin.

### 3.1 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmä (FEM, Finite Element Method) on numeerinen menetelmä erilaisten monimutkaisten fysikaalisten ongelmien ratkaisuun. Se perustuu siihen, että monimutkainen kohde jaetaan pienempiin, rajallisiin osiin eli elementteihin. Elementit toimivat mallissa yhdessä toistensa kanssa muodostaen elementtiverkon. Jokaiselle elementille voidaan antaa erilaisia materiaaliominaisuuksia, kuvauksia ja reunaehtoja. Tällä tavoin on mahdollista simuloida laajaa kohdetta tai monimutkaisen materiaalin käyttäytymistä kokonaisuutena. Käsin laskiessa kokonaisuus jouduttaisiin erottelemaan yksittäisiksi laskentakohteiksi, ja laskenta olisi merkittävästi hitaampaa. Tietokoneella tehtävä FEM-mallinnus tarjoaa mahdollisuuksia optimoida ja vertailla erilaisia ratkaisuja.

FEM-laskentaa käytetään monipuolisesti eri insinöörialoilla. Menetelmä mahdollistaa esimerkiksi rakenteiden ja materiaalien jännitysten, muodonmuutosten, venymien tai lämpötilan vaikutusten mallintamisen melko tarkasti. Laskentaa on mahdollista toteuttaa yksiulotteisena, kaksiulotteisena ja kolmiulotteisena. Elementit ovat matemaattisia alki-oita, jotka ovat tyypiltään joko pistemäisiä, viivamaisia, tasoelementtejä tai tilavuuselementtejä. Erilaiset elementtityypit on esitetty kuvassa 17. Jokainen elementti sisältää yhden tai useamman solmupisteen, jotka liittävät elementit toisiinsa muodostaen elementtiverkon. Jokaisella elementillä on myös vapausaste, joka määritellään solmupisteissä. Toisiinsa liittyvien solmupisteiden vapausasteen tulee olla sama. (Syrjä 2019, s.52–71)

Elementtiverkon tiheydellä voidaan vaikuttaa mallinnuksen tarkkuuteen. Verkkoa voidaan tihentää kohdissa, jotka ovat kiinnostavia tai joissa vaikuttaa paljon erilaisia voimia, materiaali vaihtuu jne. Verkkoa tihentämällä näihin mallin osioihin keskittyy enemmän solmupisteitä. Verkkoa voidaan harventaa lineaarisesti käyttäytyvissä osissa mallia, mikä nopeuttaa laskentaa. Elementtikoon muutoksen tulisi olla kuitenkin mieluummin lineaarinen ja tapahtua useammalla peräkkäisellä elementillä, kuin äkillinen muutos kahden elementin välillä esim. materiaalirajapinnassa (Syrjä 2019, s. 71).



**Kuva 17.** Yksinkertaisia viiva-, pinta- ja tilavuuselementtejä (Mukaillen Syrjä 2019, s. 69).

Elementtimenetelmällä mallinnuksen ensimmäinen vaihe on laskennan suunnittelu ja geometrian luominen. Laskentapoikkileikkaukseen tai 3D malliin lisätään kaikki tarvittavat elementit, kuormat ja muut geometriset attribuutit. Sen jälkeen geometrialle luodaan elementtiverkko halutulla tarkkuudella. Seuraavaksi määritetään materiaaliominaisuudet kullekin elementille. Lopuksi luodaan halutut laskentavaiheet ja olosuhteet, sekä määritetään kuormitukset. Ennen laskennan käynnistystä on hyvä tehdä mallin tarkistus, jotkut ohjelmistot tarjoavat tähän valmiin tai automaattisen työkalun. Laskennan jälkeen tulokset analysoidaan ja dokumentoidaan. Laajoissa malleissa tuloksia on paljon, joten tärkeä osa laskentaa on osata poimia kiinnostavat asiat ja esittää ne ymmärrettävässä muodossa. Virheiden havaitseminen ja analysointi on myös suuressa roolissa FEM-mallinnusta, sillä monimutkaisessa laskentakohteessa pienet virheet kertautuvat ja vääristävät tuloksia.

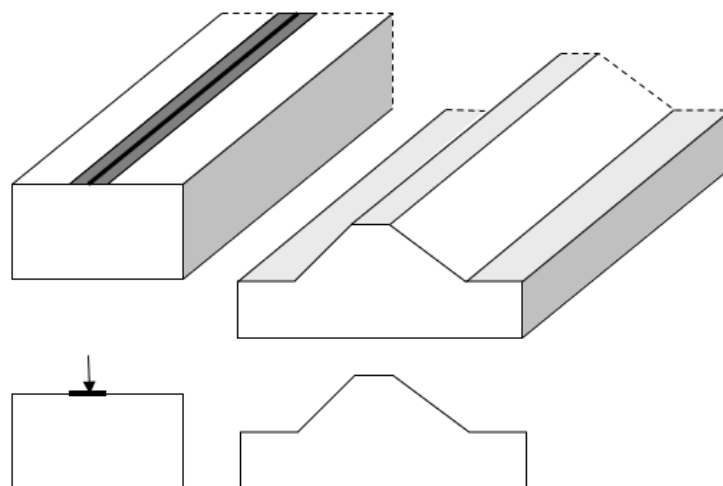
### 3.2 Plaxis 2D / 3D

Plaxis on erityisesti geoteknisiin tarkasteluihin kehitetty elementtimenetelmään perustuva ohjelma. Sen avulla voidaan analysoida esimerkiksi jännitystiloja, muodonmuutoksia, stabiliteettia sekä pohjaveden virtauksia ja huokosveden painetta. Ohjelma sisältää

kattavan valikoiman maaperän käyttäytymisen mallintamiseen kehitettyjä materiaalimalleja. Plaxis sisältää erillisen dynaamiseen analyysiin soveltuvan työkalun, jolla voidaan tarkastella maaperän sekä rakenteiden värähtelyä, ja asettaa erilaisia herätteitä. (Bentley 2024a, s.3)

Plaxiksesta on käytettävissä 2D ja 3D -tarkasteluihin soveltuvat ohjelmistoversiot. Molemmissa vaihtoehdoissa on etuja sekä rasitteita. 2D-tarkastelut ovat käytännössä aina nopeampia ja yksinkertaisempia. Laskentamallin luominen on helpompaa, parametrien määrittäminen yksioikoisempaa ja laskenta-ajat lyhyempiä, mikä mahdollistaa laskijalle useampien erilaisten mallinnustarkasteluiden tekemisen tai eri vaihtoehtojen vertailun järkevässä aikaikkunassa. 2D-tarkastelu antaa useisiin laskentatilanteisiin tuloksia riittäväällä tarkkuudella, etenkin suhteessa käytettyyn aikaan. 2D-tasomuodonmuutoksia mallintaessa tulee huomioida, että vaikka geometria luodaan x-y-tasossa, malli edustaa silti kolmiulotteista tilannetta. Koska z-ulottuvuutta ei mallinneta, sen merkitys voidaan kuvitella ikään kuin loputtomana pursotuksena 2D-geometriasta. Tasomuodonmuutosmalli antaa ikään kuin yhden yksikön paksuisen viipaleen edestä tuloksia 3D-tilanteesta.

Kuvasta 18. huomataan, miten 2D-geometria on kytköksissä 3D-maailmaan. Huomionarvoista on, että esimerkiksi radan poikkileikkausta mallinnettaessa, yksittäinen 2D-geometriaan mallinnettava ratapölkky käyttäytyykin 3D-pursotuksessa kuin loputtomasti jatkuvana laattana. Ratapenger taas ideatasolla mallintuu 'oikein' jatkuvana myös z-suunnassa. Kuormien jakautumisesta tai värähdysaaltojen etenemisestä radan pituussuunnassa ei saada tietoa 2D-mallissa, joten asia on pyrittävä huomioimaan muilla keinoilla ja pidettävä mielessä tulosten analysoinnissa.



**Kuva 18.** 2D geometrian merkitys kolmiulotteisena (Witasse, R. 2021)

3D-mallinnus vastaa tarkemmin fyysistä todellisuutta. Malliin voidaan lisätä kaikki tarvittavat elementit, ja laskea halutut jännitykset jokaisessa eri suunnassa. Värähtelytarkasteluissa malli huomioi myös värähdysaaltojen keskinäisen interferenssin paremmin. Joissain tapauksissa voidaan kokea tarpeelliseksi käyttää sekä 2D, että 3D -tarkasteluita, tai esimerkiksi kalibroida 2D-malleja 3D-mallien avulla (Witasse, R. 2021). Mallinnukseen käytettävän ajan sekä laskenta-aikojen järkevöittämisiksi myös 3D-mallinuksissa on kuitenkin tehtävä usein yksinkertaistuksia geometrian ja sen tarkkuuden kanssa.

### 3.3 Materiaalimallit

Materiaalimallit ovat yksinkertaistuksia todellisesta materiaalista. Materiaalit jaetaan kolmeen eri tyyppiin. Isotrooppiset materiaalit käyttäytyvät samalla tavoin kaikissa eri suunnissa. Ortotrooppisilla materiaaleilla on kaksi tai kolme ortogonaalista akselia, ja anisotrooppisilla materiaaleilla käytös on täysin suunnasta riippuvaa. Näille materiaaleille annetaan eri materiaaliparametrit pää- ja sekundäärisuunnissa. (Syrjä 2019, s. 72) Rakennemalleissa materiaalit ovat tyypillisesti homogeenisiä. Maaperä on harvoin tasalaatuista, joten mallinnuksen tarkkuus on aina mietittävä tapauskohtaisesti ja käytettävissä olevien lähtötietojen mukaan. Käytännössä materiaali voidaan mallintaa homogeenisenä, jos sen raekoko on riittävän suuressa mittakaavassa samanlaista.

Plaxis 2D ohjelmistossa on useita erityisesti maaperän ja kallion mallintamiseen soveltuvia materiaalimalleja. Maaperän käyttäytyminen kuormituksen alla on usein erittäin epälineaarista. Käyttöön vaikuttavia tekijöitä ovat maalajin ja sen materiaaliominaisuuksien lisäksi laskentatilanne ja kuormitustilanne. Samalle maamateriaalille voidaan joutua eri laskentatilanteissa käyttämään eri materiaalimallia, jotta sen käyttäytyminen voidaan kuvata todenmukaisesti. Mallintajan on ymmärrettävä materiaalimallin valinnassa, onko laskentatilanteessa kyseessä pelkkä kuormitus, kuormituksen purkaminen tai näiden yhdistelmä. Onko odotettavissa materiaalin murtuminen, lujittuminen tai löyhentyminen?

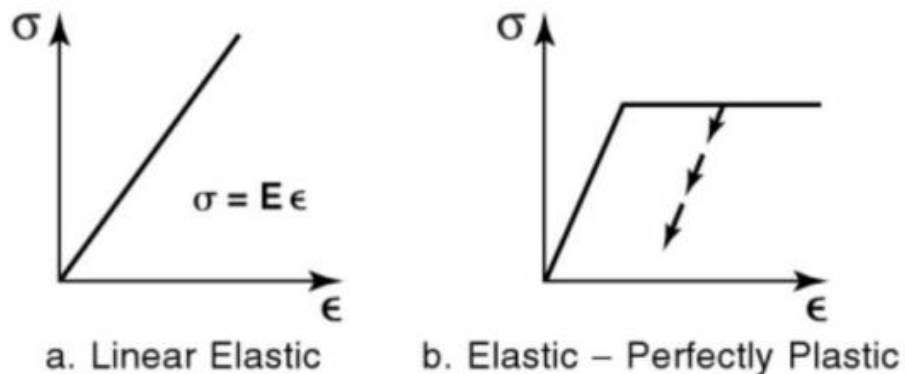
Yksinkertaisin materiaalimalli Plaxis 2D:ssä on lineaarielastinen malli (Linear Elastic, LE). Malli on isotrooppinen ja perustuu yleistettyyn Hooken lakiin:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.9)$$

jossa  $\sigma$  (kN/m<sup>2</sup>) kuvaa jännitystä ja  $\varepsilon$  venymää. Lineaarielastisessa mallissa jännitystilaa ei ole rajattu, eli materiaali ei joudu koskaan murtotilaan vaan sillä on rajaton lujuus. Kaikki mallissa tapahtuvat muodonmuutokset ovat elastisia, eli materiaali palaa alkupe räiseen muotoonsa, kun jännitykset tai kuormat poistetaan. Parametreina mallissa käytetään

tetään kimmomoduulia  $E$  ( $\text{MN}/\text{m}^2$ ) ja Poissonin lukua  $\nu$ . Bentley'n Plaxis 2D Material Models Manual -ohjeessa (Bentley Systems 2024b, s. 7) todetaan materiaalimallien esitte- lyssä, että lineaarielastinen malli ei soveltuisi sellaisenaan maaperän mallintamiseen. Tämä onkin totta kaikkien sellaisten mallinnustilanteiden kohdalla, joissa tarkastellaan palautumattomia muodonmuutoksia.

Yleinen maaperän mallinnustarkasteluissa käytettävä materiaalimalli on Mohr-Coulombin malli (MC). Malli on lineaarielastinen ja ideaaliplastinen. Jännitysten ollessa myötö- rajan alapuolella, materiaali käyttäytyy Mohr-Coulombin mallissa lineaarielastisesti Hoo- ken lain (2.9) mukaisesti. Kun jännitykset kasvavat ja ylittävät myötörajan, mallin käyt- täytyminen muuttuu plastiseksi. Mallin käyttäytymistä esittävät jännityskuvaajat on esi- tetty kuvassa 19. Mohr-Coulombin materiaalimallissa käytetään samoja jäykkyysspara- metreja kuin lineaarielastisessa mallissa, eli kimmomoduulia  $E$  ja Poissonin lukua  $\nu$ . Li- säksi plastisessa osuudessa malli noudattaa Mohr-Coulombin murtokriteeriä, jonka pa- rametrit mallissa ovat kitkakulma  $\varphi$  ( $^\circ$ ), koheesio  $c$  ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) sekä dilataatiokulma  $\psi$  ( $^\circ$ ). Bentley'n mukaan Mohr-Coulombin malli soveltuu hyvin yleisluontoisiin, ns. 'ensimmäi- sen vaiheen' mallinnustarkasteluihin (Bentley Systems 2024b, s.7).

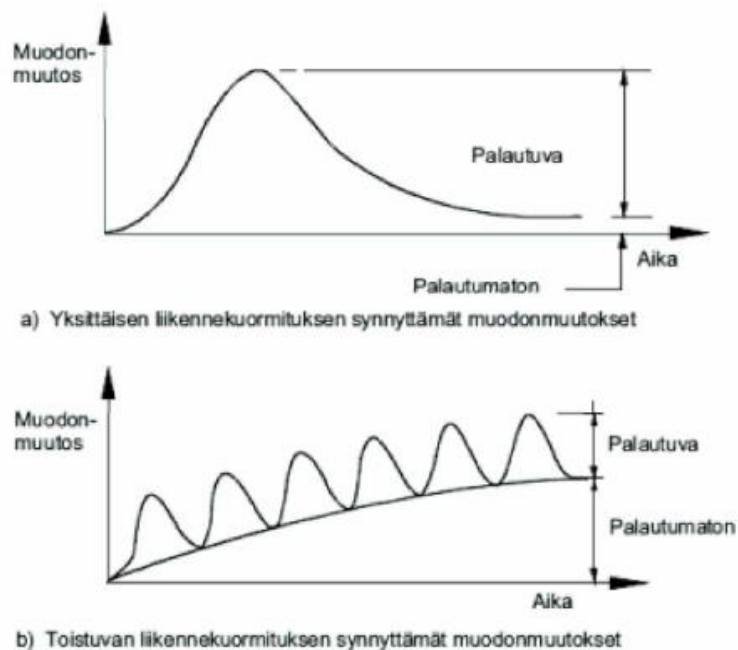


**Kuva 19.** Lineaarielastisen (a) ja kimmoisen ideaaliplastisen (b) materiaalimallin jännityskuvaajat (Geoengineer 2024)

Plaxis-ohjelmistossa on käytettävissä myös useita muita materiaalimalleja, jotka ovat joiltain osin kehittyneempiä, hyödyntävät useampia eri laskentaparametreja tai ovat so- veltuvia jonkin tietyn tyyppisen tilanteen mallintamiseen. Esimerkiksi Hardening Soil malli (HS) huomioi Mohr-Coulombin mallia paremmin jäykkyyssparametrien riippuvuuden maa- perän jännitystilasta. Soft Soil -malli (SS) taas kuvaa hyvin pehmeiden maamateriaalien, kuten savien käyttäytymistä kuormituksen alla. Soft Soil -malli ei kuitenkaan sovellu las- kentatilanteisiin, joissa kuormitusta puretaan. Esimerkiksi kaivantoihin liittyvät tarkastelut ovat tällaisia. (Bentley Systems 2024b s. 7–12)



Yleisimpiä geoteknisesti kiinnostavia tarkasteluja ovat esimerkiksi stabiiliteetti- ja painumatarkastelut, joissa tutkitaan kuormituksen aiheuttamia pysyviä muodonmuutoksia sekä murtotilanteen todennäköisyyttä ja varmuutta. Näihin tilanteisiin lineaarielastinen materiaalmalli ei sovellu, koska se kuvaa materiaalin jännitystilän rajattomana ja kaikki muodonmuutokset elastisina. Liikennetärinä liittyvissä tarkasteluissa ja maaperässä etenevän värähtelyn mallintamisessa ollaan kuitenkin kiinnostuneita nimenomaan kimmoisista eli palautuvista muodonmuutoksista. Yksittäistä radalla liikuvaa junaa tarkasteltaessa, värähtelyn etenemisen aiheuttamat muodonmuutokset tapahtuvat maaperässä elastisella alueella. Liikennöinti radalla aiheuttaa toki maaperään kuormitusta ja rasituksia, jotka voivat aiheuttaa plastisia muodonmuutoksia, kuten painumia tai stabiiliteetti-ongelmia. Käytännössä ratarakenne tulisi kuitenkin suunnitella kuormituskestäväksi siten, että yksittäinen radalla kulkeva juna ei saa aiheuttaa rataa plastisia muodonmuutoksia. Ratarakenteen palautuvaa sekä palautumatonta kuormitus-muodonmuutuskäyttäytymistä on esitetty kuvassa 20.



**Kuva 20.** Ratarakenteen materiaalien yleinen kuormitus-muodonmuutuskäyttäytyminen. (Brown 1993 & Ehrola 1996 Kalliaisen et.al 2014, s.34 mukaan).

Radan painumatarkasteluissa käytetään yleisesti kuormana vain pysyvää ratapenkerästä aiheutuvaa kuormaa, ja jätetään muuttuva liikennekuorma huomiotta. Pehmeikölle rakennettavan ratapenkeräen painumatarkastelussa kiinnostava laskenta-aika voi olla esimerkiksi 20 vuotta, sillä konsolidaatiopainuma on melko hidaskäyttöprosessi. Stabiiliteettitarkasteluissa huomioidaan pysyvän kuorman lisäksi myös liikennekuorma. Tarkastelun tavoitteena on määrittää ratarakenteelle riittävä varmuus murtumista vastaan. Laskenta-aika on mahdollisesti joitakin kuukausia.

Värähtelytarkasteluissa kiinnostava laskenta-aika on joitakin kymmeniä sekunteja, esimerkiksi yhden junan ohitusaika. Penger tai alusrakenne ei voi ajautua tarkastelutilanteessa murtoon, vaan pysytään kimmoisella muodonmuutosalueella. Mikäli rataa aiheutuisi plastisia muodonmuutoksia jokaisella junan ohituksella, se ei olisi radan turvallisen liikennöinnin tai painumien ja siirtymien kannalta hyväksyttävä. Siten on perusteltua käyttää liikennetärinämallinnuksissa lineaarielastista materiaalmallia.

### 3.4 Heräte

Plaxis-ohjelma tarjoaa useita erilaisia vaihtoehtoja kuormien mallintamiseen. Yleisimmät vaihtoehdot ovat pistekuorma, nauhakuorma tai pintakuorma (vain 3D-ohjelmassa). Kuormien sijainti ja vaikutuspiste mallissa määritellään geometrian ja rakenteiden luomisen yhteydessä. Laskentavaiheiden luomisen yhteydessä aktivoidaan halutut kuormat haluttuihin laskentavaiheisiin ja määritetään jokaiselle kuormalle suuruus ja vaikutussuunta. Kuorma voi olla eri laskentavaiheissa eri suuruinen tai tyyppinen. (Bentley 2024a, s. 13) Dynaamisissa laskentavaiheissa kuormille voidaan asettaa myös dynaaminen ominaisuustieto, jonka määrite voidaan luoda suoraan Plaxiksessa tai syöttää ohjelmaan esimerkiksi mitattu signaali tekstitiedostona. Herätteitä on mahdollista mallintaa myös kappaleiden siirtymien avulla.

Kappaleessa 2.4. todettiin junan kuormittavan ratarakennetta ja maaperää sekä staattisella että dynaamisella voimalla. 2D-laskennassa mallinnetaan käytännössä vain yhdelle ratapölkylle kohdistuvaa kuormaa, mikä tulee huomioida, jottei kuormitusvaikutusta alitai yliarvioida. Kuorman jakautuminen ja eteneminen radan pituussuunnassa on 2D-laskennassa hankalaa mallintaa. Yksinkertaisin ja intuitiivisin vaihtoehto junakuorman mallinnukselle ovat pistekuormat mallinnetun ratapölkyn päällä, jotka kuvaavat suoraan kiskolta pölkkyyn välittyvää kuormaa. Pistekuormille voidaan syöttää laskennassa sekä staattista kuormaa, että dynaaminen herätesignaali mittausdatasta.

Kun ymmärretään fysiikka sekä syy-seuraussuhteet junan aiheuttaman kuormituksen sekä värähtelyn muodostumisen takana, on mahdollista soveltaa mallinnuksessa myös muunlaisia herätetyyppejä. Yksi vaihtoehto on hyödyntää mittausdataa esimerkiksi syöttämällä herätteeksi suoraan ratapölkyn pystysiirtymän. Siirtymä on todellisuudessa vaste todellisen junakuorman aiheuttamaan kuormitukseen, mutta sillä on sama taajuussisältö kuin alkuperäisellä junan akselikuormalla (Pelho, A. & Mansikkamäki, J. 2021) Tässä työssä käytettiin yhtenä herätteenä muuttuvaa pohjapainetta ratapölkyn alapinnassa. Heräte mallinnettiin pölkyn alapintaan nauhakuormana, jolle syötettiin herätesignaali.

Signaalin muodostamiseen hyödynnettiin Marko Peltomäen junakuormitusten mallintamiseen kehittämää Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmaa. Ohjelman toimintaperiaate on esitelty tarkemmin kappaleessa 4.4.2.

## 4. POHJAINTEN TÄRINÄVAIMENNUKSEN MALLINTAMINEN

### 4.1 Lähtötiedot, lähtötilanne ja laskentaoletukset

Mallinnuksen tavoitteena oli luoda laskentamalli, jonka avulla voidaan arvioida pohjainten vaikuttavuutta rautatietärinän vaimennuksessa. Tavoitteena oli selvittää ensinnäkin pohjainten toimintaperiaatetta tärinän vaimennuksessa fysiikan näkökulmasta, ja miten vaikutusta olisi mahdollista mallintaa FEM-mallilla. Tavoitteena oli myös samalla arvioida 2D-mallinnuksen soveltuvuutta rautatietärinän mallinnukseen.

Tutkimus rajattiin koskemaan värähtelyn pystysuuntaista komponenttia, joka on värähtelyn ympäristövaikutusten kannalta mielenkiintoisin. Radansuuntaista komponenttia ei kaksiuotteisessa mallinnuksessa ole mahdollista tarkastella. Lisäksi tarkasteltiin värähtelyn taajuusalueita ja taajuusjakaumaa, sekä maaperässä välittyvän värähdysamplitudin suuruutta. Laskentaoletuksena oli, että 2D-mallilla ei voida kuvata värähtelyn absoluuttista suuruutta, vaan tarkasteluissa keskitytään suhteellisiin vaikutuksiin ja vaikutussuuntiin (vaimentava tai voimistava vaikutus). Kaikki laskennat tehtiin tasomuodonmuostilassa (plane strain). Tarkastelupisteitä sijoitettiin ratapenkereeseen, penkereen juureen, sekä maanpinnan tasoon 14, 20 ja 50 m päähän kuormitetun raiteen keskilinjasta. Laskentatilanteissa tarkasteltiin erityyppisten pohjamaiden, pengerkorkeuden ja junatyypin vaikutusta pohjaimen tärinänvaimennuskykyyn.

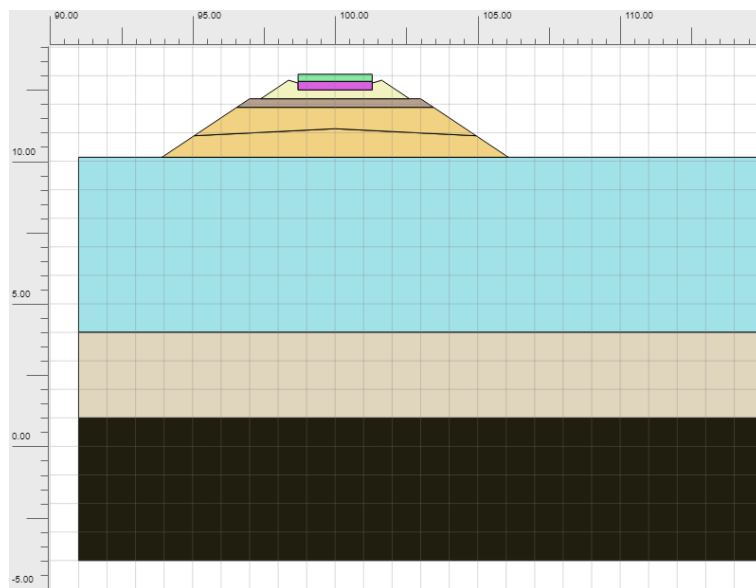
### 4.2 Mallin luominen ja geometria

Laskentamalli muodostettiin yksinkertaiselle perustilanteelle, jossa on yksiraiteinen penkereelle sijoitettu rata. Maanpinnan taso on vaakasuora, samoin kuin mallinnetut maakerrosrajat. Mallinnetut maakerrokset sekä ratarakenteen kerrokset on esitetty isotrooppisina ja homogeenisinä.

Radan rakennekerroksista mallinnettiin ratapölkky, sekä tukikerros, välikerros ja eristyskerrokset. Ratakiskoa ei mallinnettu. Ratapölkky mallinnettiin 0,2 m korkeana ja 2,6 m pituisena Liikenneviraston RATO 3 -ohjeen mukaan (Liikennevirasto, RATO 3 2018, s.24). Radan rakennekerrosten määrityksessä käytettiin RATO 3 mukaista radan normaalipoikkileikkausta 6 m pengerveveydellä olevalle betonipölkkyraiteelle suoralla maa-

pohjalla ja radalla (Liikennevirasto, RATO 3 2018, Liite 2/6). Rakennekerrosten kokonaispaksuus  $K$  oli yhteensä 2,4 m. Ratapenkereen sekä tukikerroksen luiskakaltevuutena käytettiin 1:1,5.

Maakerrokset mallinnettiin vakiopaksuisina ja vaakasuorina kerroksina. Ylin kerros oli 6 m paksuinen, sen alla 3 m paksuinen moreenikerros ja alimpana kallio. Malli katkaistiin mallintamisen yksinkertaistamiseksi  $x$ -suunnassa vasemmalla puolella 9 m etäisyydeltä, ja oikealla puolella 100 m etäisyydeltä radan keskiliinjasta. Muodonmuutosrajoiksi määritettiin  $x$ -suunnassa *viscous*.  $Y$ -suunnassa alempi rajapinta  $y_{min}$  määritettiin asetuksella *compliant base* ja ylempi rajapinta  $y_{max}$  asetuksella *viscous*. Viskoosit rajat mallissa absorboivat niihin suuntautuvaa värähtelyenergiaa (Bentley 2024c, s.382). *Compliant base* -raja-asetus on valittavissa vain mallin alimmalle  $y_{min}$  rajapinnalle, ja se ns. sitoo mallin paikalleen. Asetus simuloi värähdysaaltojen etenemistä syvälle maaperään, jolloin osa aalloista heijastuu takaisin. (Bentley 2024c, s.384) Mallinnetut ratarakenteet ja maakerrokset on esitetty kuvassa 21. Kokonainen malli on esitetty liitteessä 1.



**Kuva 21.** *Plaxis-ohjelmaan luodun geometrian ratarakenteet ja maakerrokset.*

Malliin valittiin elementtiverkon tyypiksi 15-solmuinen elementtiverkko. Tiheämpi elementtiverkko antaa tarkemman laskentatuloksen, mutta myös hidastaa laskenta-aikaa riippuen myös muista geometria-asetuksista ja mallin monimutkaisuudesta. Elementtiverkko luotiin asettaen elementtien jakautumisen asetukseksi *very fine*. Verkko luotiin tarkimmasta/pienimmästä geometriasta suurempaa kohti harvenevaksi siten, että rata-pölkyn (ja pohjaimen) karkeusluku oli 0.03, tukikerroksen 0.06, välikerroksen 0.088, eristyskerroksen 0.125 ja maakerrosten 0.5–1. Laskennan tarkkuutta haluttiin kohdistaa pölkkyyn ja pohjaimen sekä ratarakenteeseen siten, että myös pienempiin rakenneosiin

saadaan riittävästi laskentapisteitä. Toisaalta vierekkäisten rakenneosien elementtiverkkojen tiheyksien välillä ei tulisi olla liian suuria muutoksia, jotta laskenta toteutuu sujuvasti.

### 4.3 Materiaalimallit ja parametrit

Pohjamaan, eli ratapenkereen alapuolisen luonnonmaaperän kerrokset mallinnettiin lineaarielastisella materiaalimallilla. Kappaleessa 3.3 todettiin, että oletettavasti yksittäinen akselinylitys ei aiheuta pohjamaahan pysyviä muodonmuutoksia. Näin ollen dynaamisia mallinnuksia voidaan tehdä mallintaen maa ilman murtokriteeriä, jolloin sen jäykkyys on jännitystilasta riippumaton vakio. Vaikka lineaarielastinen mallinnustapa sisältää yksinkertaistuksen maaperän todelliseen käyttäytymiseen verrattuna, sen tarkkuuden on oletettu olevan riittävä, kun mallilla ei tarkastella lähellä murtotilaa olevia mallinnustilanteita.

Pohjamaan vaikutuksen arviointiin liittyviin tarkasteluihin määritettiin kolme eri perusmaalajityyppiä, savi, siltti ja moreeni, jotka ovat värinävaikutusten arvioinnin kannalta olennaisia ja riittävästi toisistaan poikkeavia. Eri tarkasteluissa ylimmän mallinnetun pohjamaakerroksen tyyppiä vaihdettiin näiden välillä. Alimmat maakerrokset olivat kaikissa tarkasteluissa aina moreeni sekä kallio. Mallinnuksessa käytettävien parametrien määrittämisessä ei tavoiteltu tietyn kohteen mallintamista tai käytetty pohjatutkimustietoja, vaan parametrit määritettiin alan kirjallisuuteen ja aiempiin mallinnustarkasteluihin perustuen. Pohjamaan mahdollista tiivistymistä ratapenkereen alla ei huomioitu mallinnuksessa.

Koheesiomaalajit savi ja siltti mallinnettiin suljetussa tilassa *Undrained C*, moreeni avoimessa tilassa *Drained* ja kallio vettä läpäisemättömässä tilassa *Non-porous*. Pohjaveden pinta asetettiin 1 m syvyydelle maanpinnan tasosta katsottuna.

Maalajien tilavuuspainot arvioitiin Suomen ympäristökeskuksen julkaisun *Suomen maalajien ominaisuuksia* (2012, s.29–32) sekä Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu – NCCI7* (14/2023, liite 6/1-2) avulla.

Poissonin luku  $\nu$  määritettiin materiaaleille Bentleyyn (2024b, s.36–37) ohjeen sekä VTT:n julkaisun *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa* (Törnqvist & Talja 2006, Liite A9) mukaan.

Kimmomoduulit  $E$  eli materiaalin jäykkyyttä kuvaavat arvot määritettiin perustuen keskimääräisiin taulukkoarvoihin VTT:n julkaisun *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa* (Törnqvist & Talja 2006, Liite A9) sekä Väyläviraston Euro-

koodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu – NCCI7 (14/2023, liite 6/1-2)* mukaan. Kimmomoduuli  $E$ , Poissonin luku  $\nu$  sekä liukumoduuli  $G$  (leikkausmoduuli, shear modulus) ovat kaikki yhteydessä toisiinsa seuraavalla kaavalla:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.0)$$

Plaxis -ohjelmisto määrittää automaattisesti laskennallisesti jäljelle jäävän parametrin, kun sille syötetään Poissonin luku sekä toinen kimmoparametreista. Liukumoduuli  $G$  voidaan laskea jäykkyysmoduulin  $M$  avulla korvaamalla parametri  $E$ :n tilalle jäykkyysmoduuli  $M$  kaavassa 3.0. Jäykkyysmoduuli  $M$  voidaan määrittää esimerkiksi kaavalla

$$M = m\sigma_a \left(\frac{\sigma'}{\sigma_a}\right)^{1-\beta} \quad (3.1)$$

jossa moduuliluku  $m$  sekä jännitysekspONENTTI  $\beta$  ovat yleisiä taulukkoarvoja,  $\sigma'$  on maaperän tehokas pystyjännitys ja  $\sigma_a$  vertailujännitys, jonka suuruus on 100 kN/m<sup>2</sup>. Pehmeän saven kimmomoduuliksi esitetään monissa lähteissä alhaisempia, jopa alle 10 MPa arvoja. Saven kimmomoduulin arvona päädyttiin käyttämään 30 MPa, joka on vielä realistinen jäykkyys ratapenkereen perustamiseen maanvaraisesti, mutta poikkeaa kuitenkin selvästi käytetystä siltin kimmomoduulista 60 MPa.

Plaxiksessa värähtelyn vaimenemista maakerroksessa kuvaavat parametrit Rayleigh  $\alpha$  ja Rayleigh  $\beta$ . Parametrit määritetään syöttämällä Plaxikseen haluttu vaimennussuhde, sekä kaksi taajuutta. Taajuudet edustavat maakerroksen ominaistaajuutta sekä lähtötietosignaalin sekä ominaistaajuuden välistä suhdetta. (Bentley 2024c, s.172-176) Maakerroksen ominaistaajuus voidaan laskea kaavalla

$$f_0 = \frac{v_s}{4H} \quad (3.2)$$

jossa  $H$  on maakerroksen paksuus. Herätetaajuutena käytettiin 3 Hz, joka on junan rataan kohdistaman herätteen signaalin hallitseva taajuus (Luomala, H. 2020, s.18–19). RIL ohjeessa *Rakentamisen aiheuttamat värähtämiset* rakenteiden suhteellinen vaimennus on 1–5 prosenttia (RIL 253-2024, s. 72). Sillä perusteella oletettiin mallissa vaimennukseksi konservatiivinen 2 prosenttia.

Leikkaus- ja puristusaallonnopeudet  $V_s$  ja  $V_p$  määritettiin automaattisesti Plaxis 2D:llä muiden ohjelmaan syötettyjen parametrien avulla. Laskennassa käytetyt maaparametrit on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Mallinnuksessa käytetyt maalajiparametrit

	Savi	Siltti	Moreeni	Kallio
	Undrained C	Undrained C	Drained	Non-porous
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	16	16	18	25
$E'_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-	-	190*10 <sup>3</sup>	1,27*10 <sup>6</sup>
$E_{u,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	30*10 <sup>3</sup>	60*10 <sup>3</sup>	-	-
$\nu$	-	-	0,3	-
$\nu_u$	0,4950	0,4950	-	-
$G$ [kN/m <sup>2</sup> ]	10*10 <sup>3</sup>	20*10 <sup>3</sup>	73*10 <sup>3</sup>	637*10 <sup>3</sup>
$V_s$ [m/s]	78,43	110,9	199,6	500
$V_p$ [m/s]	788,2	1115	373,4	707
Rayleigh $\alpha$	0,5924	0,2262	0,2234	0
Rayleigh $\beta$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	0,4547	0,6366	0,4244	0

Ratarakenteet mallinnettiin lineaarielastisella materiaalimallilla. Radan rakennekerrokset mallinnettiin avoimen tilan materiaaleina ja ratapölkky vettä läpäisemättömässä *non-porous* -tilassa.

Teräsbetonisen pölkyn tilavuuspaino määritettiin standardin SFS-EN 1991-1-1 mukaan (s.46). Tukikerroksen sepelin, välikerroksen soran ja eristyskerroksen hiekan tilavuuspainot määritettiin Väyläviraston Eurokoodin soveltamisohjeen *Geotekninen suunnittelu – NCC/7* (14/2023, liite 6/1–2) avulla.

Ratarakenteen liukumoduulien määrittämisessä hyödynnettiin Liisanantin diplomityössä (2022) tehtyjä parametrimäärittämiä, jotka perustuivat yhtälöön 3.0 sekä Kalliaisen et.al (2014, s112-114) tekemiin parametrisointeihin. Ratarakenteen materiaalien Poissonin luvut määritettiin Kalliaisen et. al (2014, s. 95, 112) mukaan. Ratarakenteen mallissa käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 5.



Taulukko 5. Mallinnuksessa käytetyt ratarakenteiden parametrit

	Ratapölkky	Tukikerros	Välikerros	Eristyskerros
Materiaali	Betoni	Sepeli	Sora	Hiekka
	Non-porous	Drained	Drained	Drained
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	25	18	20	18
$E_{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	45*10 <sup>3</sup>	-	-	-
$E'_{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-	150*10 <sup>3</sup>	160*10 <sup>3</sup>	76*10 <sup>3</sup>
$\nu$	0	0,2	0,2	0,2
$G$ [kN/m <sup>2</sup> ]	23*10 <sup>3</sup>	63*10 <sup>3</sup>	67*10 <sup>3</sup>	32*10 <sup>3</sup>
$V_s$ [m/s]	2971	184,6	172,4	131,4
$V_p$ [m/s]	4202	301,4	281,6	214,5
Rayleigh $\alpha$	-	0,2487	0,2496	0,2399
Rayleigh $\beta$ ( $\cdot 10^{-3}$ )	-	0,0677	0,0439	0,2894

## 4.4 Laskentamallit

### 4.4.1 Pölkyn yläpinnan siirtymään perustuva malli

Pohjaimen toimintaperiaatetta lähdettiin mallintamaan yksinkertaisimmalla mahdollisella tavalla, eli sen ratarakenteeseen tuottaman jouston avulla. Pohjainten paksuus on esimerkiksi Pandrolin (2023) valikoimassa vain 0,5...20 mm. Näin ohutta kappaletta oli elementtiverkon tiheyden kannalta hankala mallintaa sen todellisilla geometrisilla dimensioilla. Myöskään pohjainvalmistajien ilmoittama pohjaimen jäykkyyttä/pehmeyttä kuvaava *bedding modulus* eli eräänlainen jousivakio ei sellaisenaan ollut sovellettavissa FEM-laskentaan Plaxiksella. Pohjain mallinnettiin malliin saman paksuisena kuin ratapölkky (0,3 m) ja joustovaikutusta eli pohjaimelle asetettua jäykkyyttä optimoitiin oikean suuruiseksi pölkyn yläpinnan siirtymän avulla. Pohjaimen on tarkoitus tuoda noin 0,5...1 mm lisää joustoa verrattuna pohjaimettomaan tilanteeseen, riippuen käytettävän pohjaimen paksuudesta ja jäykkyydestä. RATO 3 (2018, s.18) ohjeen mukaan olemassa olevilla maanvaraisesti perustetuilla radoilla ratapölkystä mitattu radan pystysuuntainen palautuva siirtymä saa turvemaalla olla enintään 8 mm ja muilla maaperäolosuhteilla 4 mm. Vastaavasti uuden maanvaraisesti perustettavan radan sallittu palautuva pystysuuntainen siirtymä ratapölkyn yläpinnassa on enintään 3 mm. Rajoitukset otettiin huomioon pystysuuntaista kokonaissiirtymää optimoidessa, sillä ne ovat voimassa Suomen rataverkolla sekä pohjaimettomilla että pohjaimellisilla ratapölkkyillä varustetuilla radoilla.

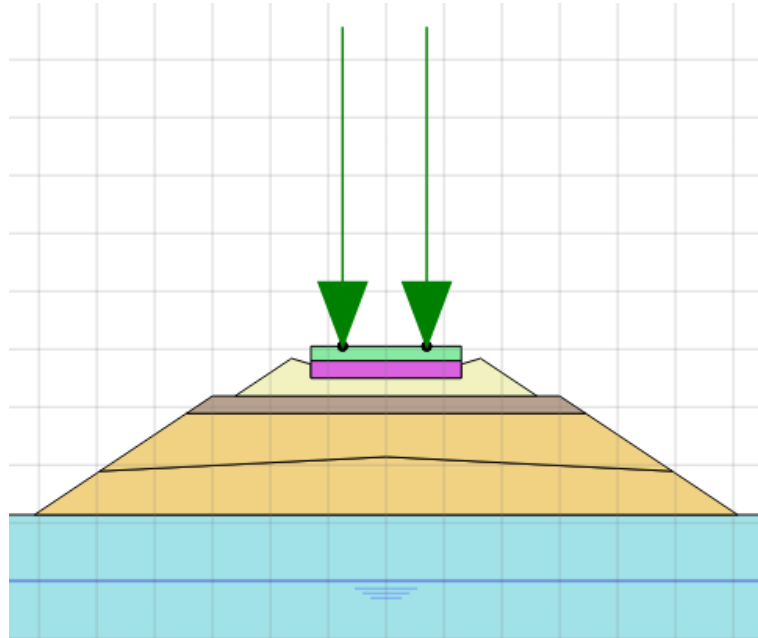
Pohjain mallinnettiin Plaxikseen lineaarielastisella materiaalimallilla non-porous-tilassa. Pohjainvalmistaja Pandrol (2023) ilmoittaa pohjaintensa tiheydeksi 710...1200 kg/m<sup>3</sup>. Mallissa käytettiin pohjaimelle tilavuuspainoa 11,5 kN/m<sup>3</sup>. Poissonin luvuksi pohjaimelle käytettiin 0,3.

Yläpinnan siirtymää optimoimalla määritettiin kaksi pohjainvaihtoehtoa eri kimmomoduuleilla  $E_{ref}$ . Keskijäykälle pohjaimelle saatiin kimmomoduulin arvoksi 16 000 kPa ja pehmeälle pohjaimelle 8000 kPa.

Herätteenä mallissa käytettiin kahta ratakiskoilta pölkkyyn kohdistuvaa pistekuormaa, joiden vaikutuspisteet kohdistettiin ratapölkyn yläpintaan raidelevyyden etäisyydelle toisistaan. Pistekuormien sijoitus sekä pohjaimen sijoitus mallin ratarakenteeseen, on esitetty kuvassa 22.

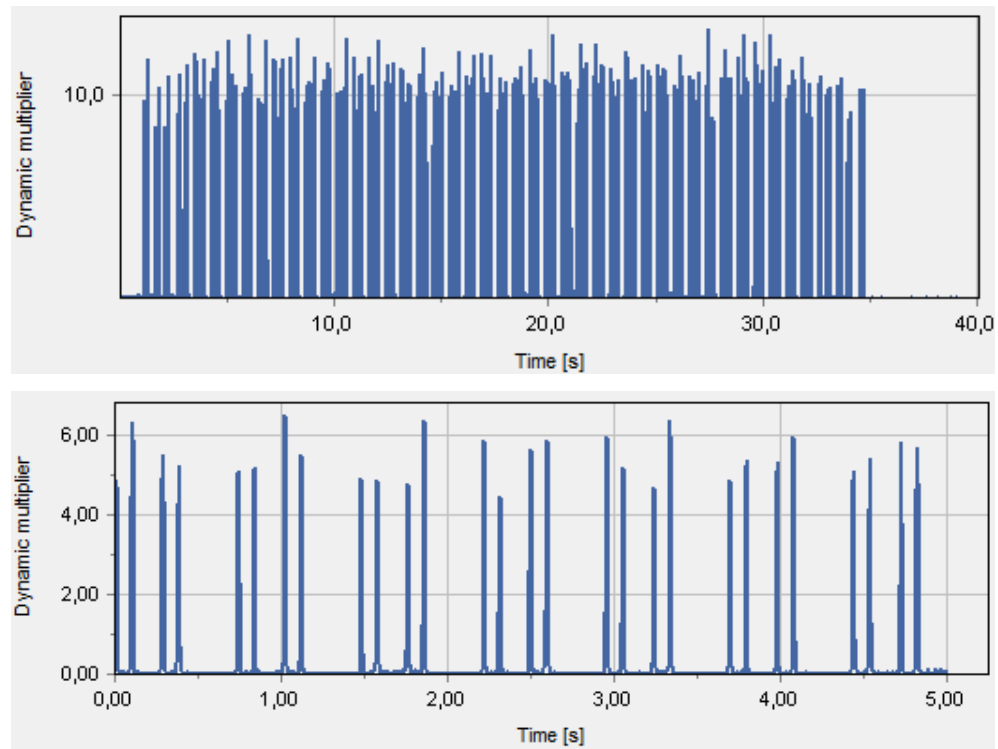
Pistekuormille syötettiin herätesignaalina Tampereen yliopiston (2019) mittaama junan kiskoon aiheuttamaa venymää ajan funktiona. Data on mitattu venymäliuskoilla kiskosta, ja oikaistu vastaamaan 22,5 tn akselikuormaa. Mittausdatassa yliajavan junan tyyppi oli

venäläinen Vok-tavaravaunu ja junan nopeus 70 km/h. Yksittäisen junan ohitusaika 70 km/h nopeudella oli mittausdatassa noin 40 sekuntia, ja laskennan tehostamiseksi datasta leikattiin viiden sekunnin mittainen osuus. Alkuperäinen, sekä mallinnuksessa käytetty lyhennetty herätessignaali on esitetty kuvassa 23.



**Kuva 22.** Herätteen sekä pohjaimen sijoitus laskentageometriaan Plaxiksessa.

Mallinnuksessa käytettiin kolmea eri laskentavaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa Plaxis laskee pelkän maaperän ja ratarakenteet ilman kuormia. Toisessa vaiheessa pistekuormat lisättiin malliin staattisina. Kolmas vaihe oli dynaaminen tarkastelu, jossa aktivoitiin pistekuormien dynaaminen ominaisuus. Dynaamisen vaiheen maksimiaskelten määräksi asetettiin 10 000 ja laskenta-ajaksi 5 sekuntia. Lopullisia mallinnuksia tehtiin tässä vaiheessa yhdeksän, kolmella taulukossa 4. esitetyllä pohjamaatyypillä, ilman pohjainta, jäykällä pohjaimella sekä pehmeällä pohjaimella.



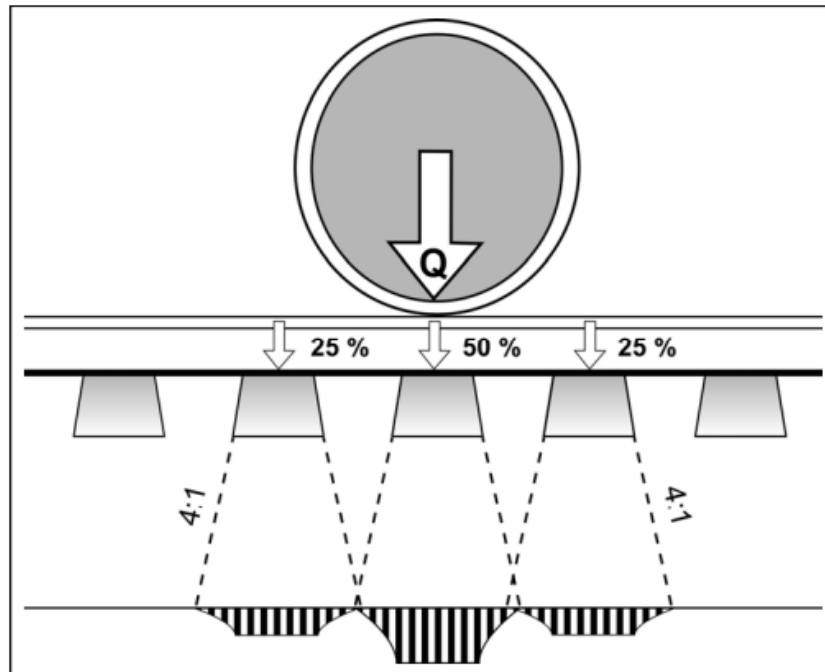
*Kuva 23. Alkuperäinen mitattu herätesignaali ja Plaxis-ohjelmaan syötetty 5 sekunnin mittaiseksi leikattu herätesignaali.*

#### 4.4.2 Pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuva malli

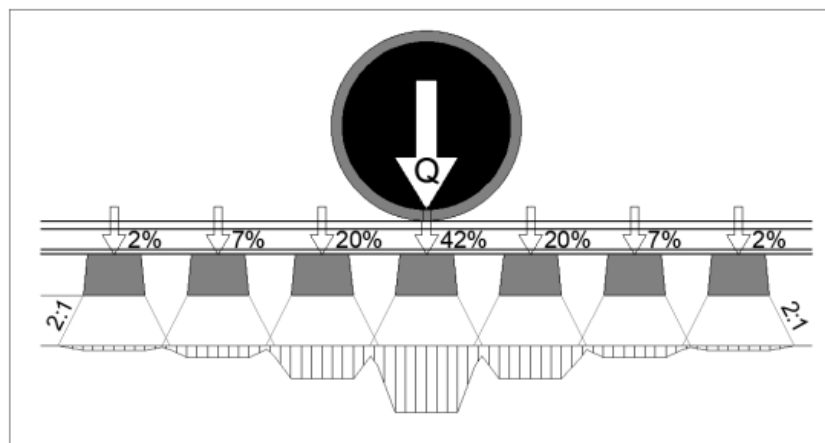
Pohjaimen toimintaperiaatetta mallinnettiin myös pystysuoran kuorman jakautumisen muutosta simuloivalla mallilla. Pystysuuntainen kuorma jakautuu ratapölkkyjen kautta sepelitukikerrokselle. Kiskon jäykkyys vaikuttaa myös kuorman jakautumiseen pituus-suunnassa. Ratapölkyn ja sepelin väliin sijoittuvien pohjainten elastiset ominaisuudet pidentävät rataiskon taipumalinjaa akselikuorman alla. Tämän takia yhdeltä pyöräparilta välittyvä pystykuorma jakautuu useammalle ratapölkylle kuin ilman pohjaimia. Kuorman jakautuminen suuremmalle pinta-alalle radan pituussuunnassa laskee ratapölkkyjen alapintaan aiheutuvaa keskimääräistä pohjapainetta, sekä pohjapainetta suoraan akselikuorman alla olevan ratapölkyn alapinnassa. Suoraan akselin alapuolella oleva pölkky on 2D-mallinnuksen kannalta kiinnostavin, koska 2D-poikkileikkausgeometriassa voidaan käytännössä mallintaa vain yksi pölkky.

Pystysuorien kuormien jakautumista ratapölkkyjen kautta penkereeseen on esitetty Liikenneviraston RATO 3 -ohjeessa (2018 s.31) kuvan 24. mukaisesti, ellei tarkempaa jakaumaa ole tapauskohtaisesti selvitetty. Tukikerroksessa kuorman oletetaan jakautuvan 4:1 kaltevuudessa, ja muissa maakerroksissa 2:1 kaltevuudessa. Väyläviraston RATO 11 -ohjeessa (2024 s.7–8) pystysuuntaisen junakuorman jakautuminen on esitetty 60E1

-kiskon välityksellä kuvan 25. mukaiseksi. Kuormitusjakauma on tässä esityksessä laajempi kuin RATO 3 mukainen kuormitusjakauma, ja kolmen pölkyn sijaan kuorman esitetään jakautuvan seitsemälle ratapölkylle. Tukikerroksen jakauma on esitetty 2:1 kaltevuudella. RATO 11 kuormitusjakauma perustuu noin kymmenen eri alueella sijaitsevan pyörävoimamittalaitteen kaksiakselisten vaunujen perusteella määritettyyn keskiarvoon. Kuormitusjakauman laajuuteen ja muotoon vaikuttaa kiskoprofiilin lisäksi merkittävästi koko ratarakenteen jäykkyys (alus- ja pohjarakenne, pohjamaa ja/tai pohjanvahvistus), sekä tukikerroksen kunto ja tyyppi. (Väylä, RATO 11 2024, s. 7-8)

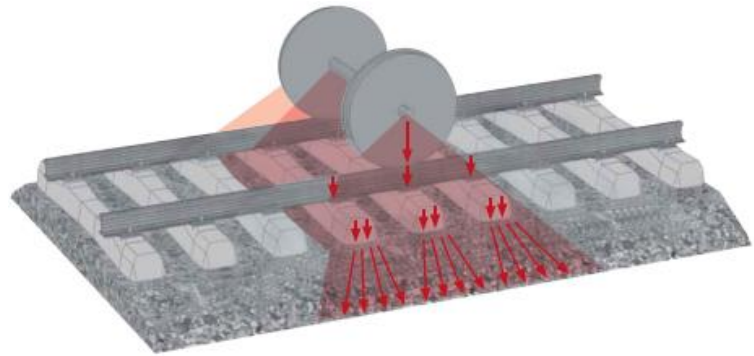


**Kuva 24.** RATO 3 mukainen pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapölkkyistä ratapenkereeseen (Liikennevirasto, RATO 3 2018, s. 31).

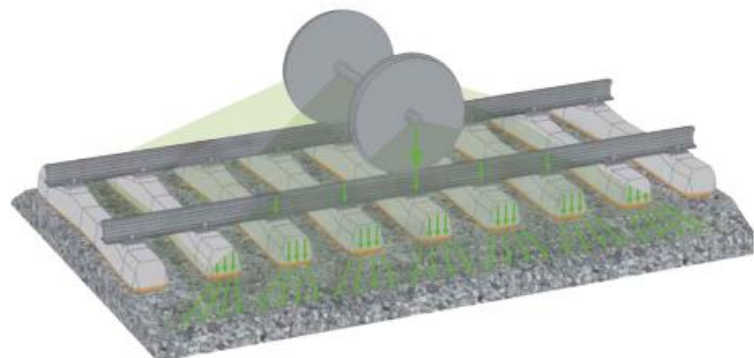


**Kuva 25.** RATO 11 mukainen pystysuoran junakuorman jakaantuminen 60E1 kiskoprofiilin välityksellä ratapenkereeseen (Väylä, RATO 11 2024, s. 8).

Pohjainten vaikutusta rataiskon taipumasuppiloon ja sitä kautta pystysuoran junakuorman jakautumiseen on esitetty kuvassa 26. Pohjaimellisella pölkyltä junakuorman oletetaan jakautuvan useammalle pölkylle ja siten laajemmalle alueelle radan pituussuunnassa verrattuna pohjaimettomaan tilanteeseen. Koska sama kuorma jakautuu suuremmalle pinta-alalle, pohjapaine ( $kPa = kN/m^2$ ) ratapölkkyjen alapinnassa pienenee, vaikka pystykuorman kokonaissuuruus pysyy muuttumattomana.



Load distribution without under sleeper pads



Load distribution with under sleeper pads

**Kuva 26.** Pystysuoran junakuorman jakaantuminen ratapenkereeseen pohjaimettomassa (ylempi) ja pohjaimellisessa (alempi) tilanteessa (Getzner 2024, s. 4).

Toinen pohjapainetta pienentävä tekijä pohjaimellisilla pölkkyillä on kasvanut kontaktipinta-ala pölkyn alapinnan ja tukikerroksen raidesepelin partikkeleiden välillä. Raidesepelin rakeet uppoavat hieman juostavaan pohjaimeen, minkä takia kontaktipinta-ala kasvaa. Pohjaimen paksuudella ja pehmeydellä on vaikutusta siihen, kuinka paljon rakeet uppoavat pohjaimeen. Pohjainvalmistaja Getzner on esittänyt kontaktipinta-alan pohjaimettoman pölkyn ja sepelin välillä olevan 8 % ja pohjaimellisessa tilanteessa jopa 35 % (Getzner 2024 s.4). Tällaisella muutoksella on jo havaittavaa vaikutusta pohjapaineeseen pölkyn ja sepelin välillä, mutta todellista kontaktipinta-alan muutosta on hankala mitata ja siihen vaikuttavat monet tekijät. Merkittävimpiä vaikuttajia ovat todennäköisesti raidesepelin muoto ja kuluneisuus, sekä pohjaimen ominaisuudet.

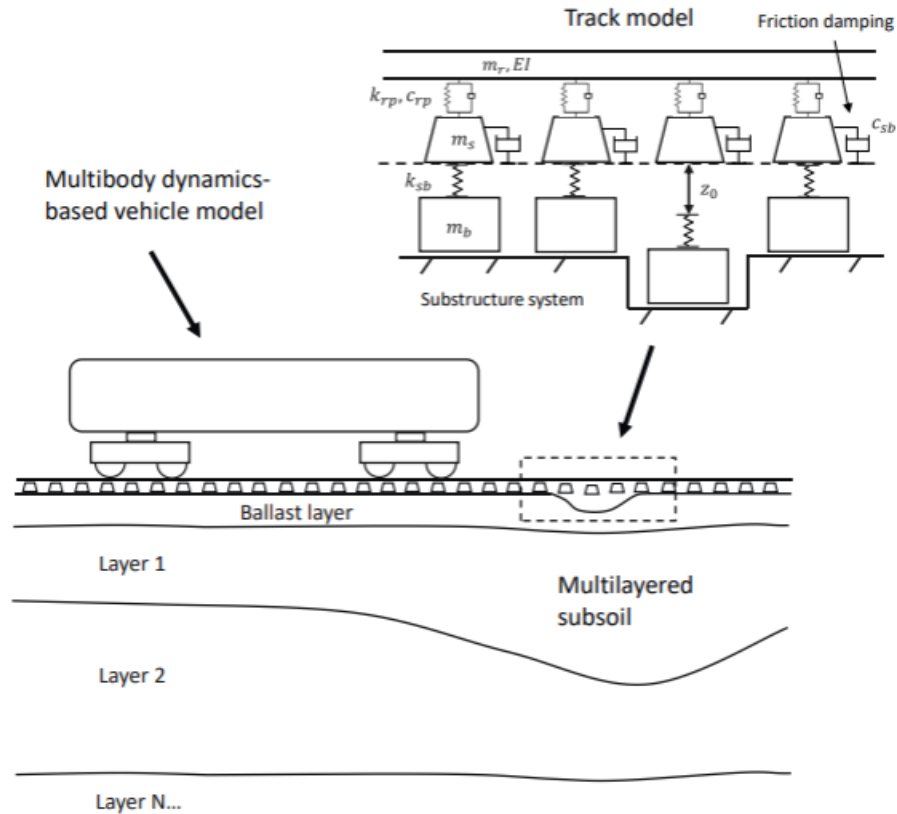
Mallinnuksen kannalta on ylipäätään hankala ottaa huomioon raideseppelin partikkelimaisuutta. Rakennekerrokset mallinnetaan FEM-malleissa yleisimmin homogeenisenä, ja kuormien jakautuminen tasaisena. Kolisojan (1997, s. 21) mukaan partikkelimekaniikkaan perustuvissa malleissa joidenkin rakeiden välillä saattaa olla huomattavasti suurempia jännityksiä, ja jotkut rakeet saattavat olla lähes jännityksistä vapaita. Tässä työssä partikkelimaisuutta ja kontaktipinta-alan muutosta ei ole huomioitu mallinnuksessa. Vaikutusta voisi olla mahdollista huomioida herätteessä esimerkiksi jollakin lisäkertoimella, mikäli sellainen määritettäisiin ensin tarkemmin jollakin partikkelimekaniikkaan perustuvalla menetelmällä.

Pohjapaineen suuruus ratapölkyn alapinnassa määrittää kuinka suurella voimalla pölkky aiheuttaa liikettä alla olevaan rakenteeseen, sekä miten voima kohdistuu ratapenkereeseen. Tällä on suora vaikutus siihen, millainen värähdysaalto herätteestä muodostuu ja lähtee etenemään pohjamaassa. Oletettavasti vaikutusta on jonkin verran sekä värähtelyn taajuussisältöön että voimakkuuteen.

Kuorman jakautumisen vaikutusta värähtelyyn pyrittiin mallintamaan Plaxis-laskentaohjelmaan syötettävän herätteen avulla. Heräte mallinnettiin Marko Peltomäen Tampereen yliopistossa kehittämällä Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmalla. Ohjelman laskentamalli on kehitetty erityisesti ratarakenteiden dynaamisen pitkäaikaiskäyttämisen simuloimiseksi. Mallissa on yhdistetty monikappaledynamiikkaan perustuva kalustomalli, sekä epälineaarinen ratamalli. Ratamallissa kiskorakenteen malli perustuu elementtime- netelmään ja kiskon alapuolinen rakenne on kuvattu epälineaarisenä jousi-massa-vaimennin-systeeminä. Laskentamallin periaatekuva on esitetty kuvassa 27.

Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmassa on mahdollista simuloida 3D-tarkasteluja erilaisista junan yliajotilanteista lyhyen- ja pitkän ajan laskentavaihtoehdoilla. Lyhyen ajan simulaatiossa määritetty junakalusto ajaa valitun pituusleikkauksen kerran. Pitkän ajan simulaatiossa voidaan vastaavasti valita ylityskertojen määrä. Lyhyen ajan tarkastelussa voidaan laskea radan palautuva painuma eli jouston suuruus, rakenteen jännitystilat sekä kaluston kiihtyvyys. Pitkän ajan tarkasteluissa mahdollisia laskentakohteita ovat lisäksi myös ratarakenteen deformaatio eli plastiset muodonmuutokset, pölkkyvoimat, akselivoimat, pystyjännitykset sekä plastinen muodonmuutoskenttä. (Grönroos 2024, s. 32) Laskentaa varten ohjelmassa on mahdollista valita esimerkiksi nopeaa henkilöjunakalustoa tai tavarajunaa vastaava kalustotyyppi, ratarakennetta kuvaavat parametrit, sekä alusrakennetta ja pohjamaata kuvaavat jäykkyysvasteet. Lyhyen ajan simu-

laatioissa pohjamaan jäykkyyssparametrina käytetään E-moduulia. Tarkempi kuvaus laskentaohjelman toiminnasta ja parametrisoinnista on esitetty Peltomäen et al. artikkelissa *Simulating the effects of structural discontinuities on the long-term behavior of the ballasted railway track* (2024).



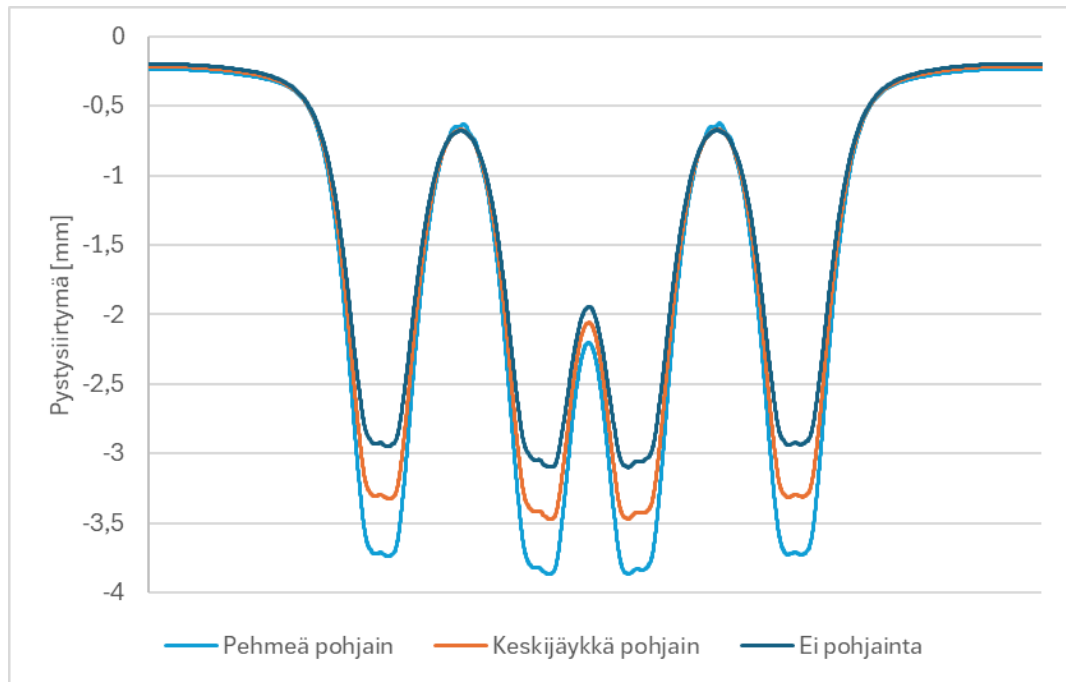
**Kuva 27.** Yhdistetyn kalusto-ratamallin periaatekuva Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmassa (Peltomäki et al 2024, s. 4).

Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmalla muodostettiin Plaxis-laskentaa varten erilaisia herätteitä. Pohjamaa mallinnettiin kolmella eri jäykkyyssvaihtoehdolla: savea kuvaava 30 MPa, välimaalajeja, kuten siltiä kuvaava 60 MPa sekä moreenia kuvaava 190 MPa. Kalustomallina käytettiin idän liikenteen Vok-vaunua vastaavaa tavarajunakalustotyyppiä. Kiskona käytettiin 60E1-kiskoprofiilia, jonka kimmomoduuli on 210 GPa. Pölkynä laskennassa oli betonipölkky. Junan kulkunopeus oli simulaatioissa 50 km/h. Herätteitä muokattiin Excel-laskentaohjelmassa vastaamaan myös 70 km/h nopeutta.

Pohjaimen elastinen vaikutus tuotiin malliin muokkaamalla ratapölkyn ja raideseperituki-kerroksen välistä jousivakiota  $k_b$ . Ohjelmassa on käytetty ratapölkkyjen ja tukikerroksen välillä epälineaarista kontaktimallia, jossa pölkyn alapuoliseen tukikerrokseen kohdistu-

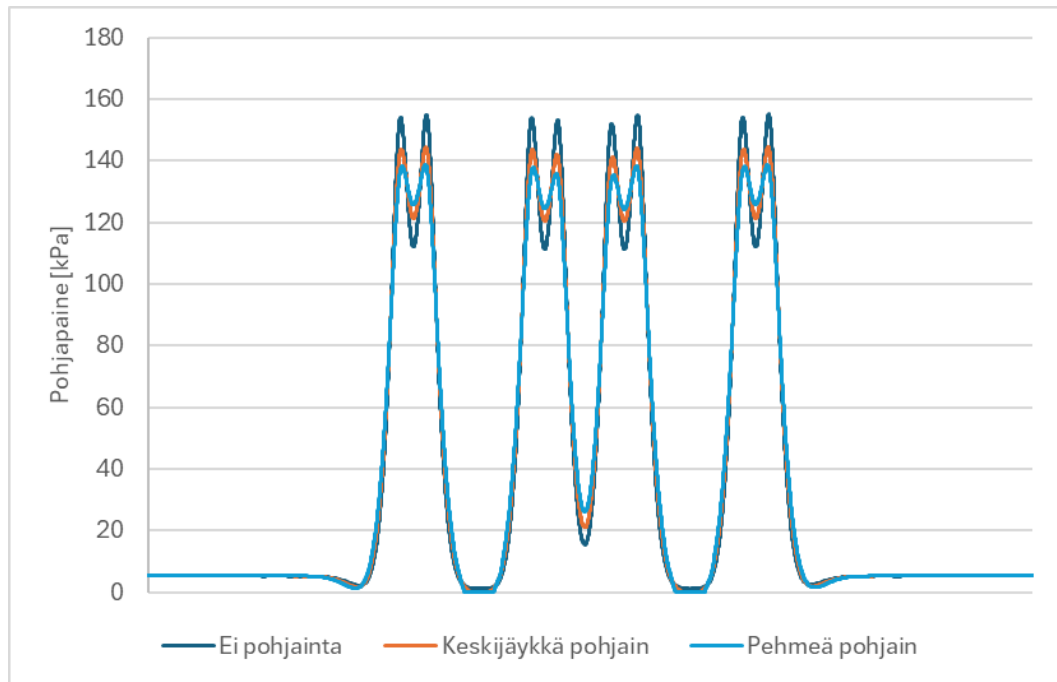


van kontaktivoiman  $F_{sb}$  suuruus määritetään pölkyn pystyaseman, tukikerroksen pystyaseman sekä pölkyn ja tukikerroksen välistä jäykkyysovastetta kuvaavan jousivakion avulla (Peltomäki et. al. 2024, s.7). Jousivakioita käytettiin kolmea eri suuruista, joista 550 kN kuvaa pohjaimetonta tilannetta, 160 kN keskijäykkää pohjainta ja 90 kN pehmeää pohjainta. Pölkyn yläpinnan pystysiirtymästä todettiin, että näillä jousivakion arvoilla mallinnettu pohjain kasvattaa siirtymää keskijäykkällä pohjaimella noin 0,5 mm ja pehmeällä pohjaimella noin 1 mm pohjaimettomaan tilanteeseen verrattuna. Esimerkki pölkyn yläpinnan siirtymästä savimaalla on esitetty kuvassa 28.



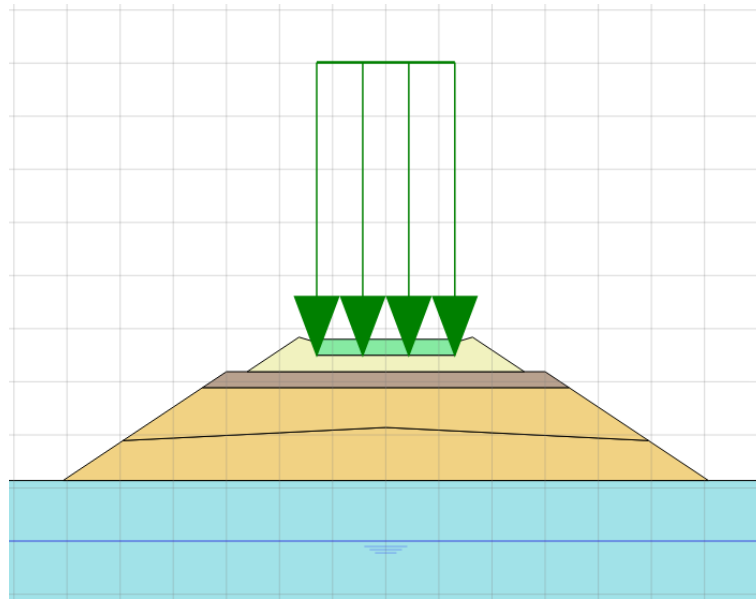
**Kuva 28.** *Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmalla mallinnetun pölkyn yläpinnan pystysiirtymä eri pohjainvaihtoehdoilla, pohjamaana savi ( $E = 30$  MPa)*

Laskentaohjelmasta otettiin ulos herätesignaali, joka kertoo pohjapaineen pölkyn alapinnassa. Kuvassa 29. on esitetty herätesignaalit kahdella eri pohjaimella sekä pohjaimetomalla vaihtoehdolla. Kuvaajasta huomataan, että pohjaimen käyttö loiventaa pohjapaineen muutoksia sekä akselivälissä, että vaunujen välissä. Vaunujen välissä pohjapaine ei ehdi palautua nolnaan, mikä on Vok-vaunulle tyypillistä. Vaunujen etäisyys toisistaan eli samalla peräkkäisten vaunujen telien etäisyys toisistaan on lyhyempi esimerkiksi Sp-vaunuun verrattuna. Pohjapaineen maksimiarvo on pohjaimellisessa tilanteessa pienempi verrattuna pohjaimelliseen. Näillä tekijöillä voidaan olettaa olevan jonkin verran vaikutusta aiheutuvan värähtelyn voimakkuuteen sekä taajuussisältöön.



**Kuva 29.** Pohjapaine pölkyn alapinnassa eri pohjainvaihtoehdoilla, pohjamaana savi ( $E = 30 \text{ MPa}$ ).

Lopulliset Plaxis-ohjelmaan syötettävät dynaamiset herätesignaalit muodostettiin Excel-laskentaohjelmalla muokkaamalla junan kulkunopeus halutuksi (50 km/h tai 70 km/h), sekä lisäämällä vaunuja (monistamalla signaalia) jotta herätteestä saatiin halutun 5 sekunnin mittainen. Mallinnustarkastelut tehtiin käyttämällä samaa laskentageometriaa, laskenta-asetuksia ja laskentavaiheita kuin kappaleessa 4.4.1 kuvaillut. Pohjainta ei mallinnettu Plaxikseen, vaan sen vaikutus rakenteessa esitettiin muodostetulla herätteellä. Kuorma mallinnettiin näihin tarkasteluihin nauhakuormana, joka kohdistettiin ratapölkyn alapinnan tasoon. Nauhakuormalle annettiin dynaamiseen laskentavaiheeseen herätesignaali. Heräte oli pinta-ala-yksikössä, joten sen suuruutta redusoiitiin 0,3 m levyisen pölkyn mukaiseksi. Herätteen sijoitus laskentageometriaan on esitetty kuvassa 30.



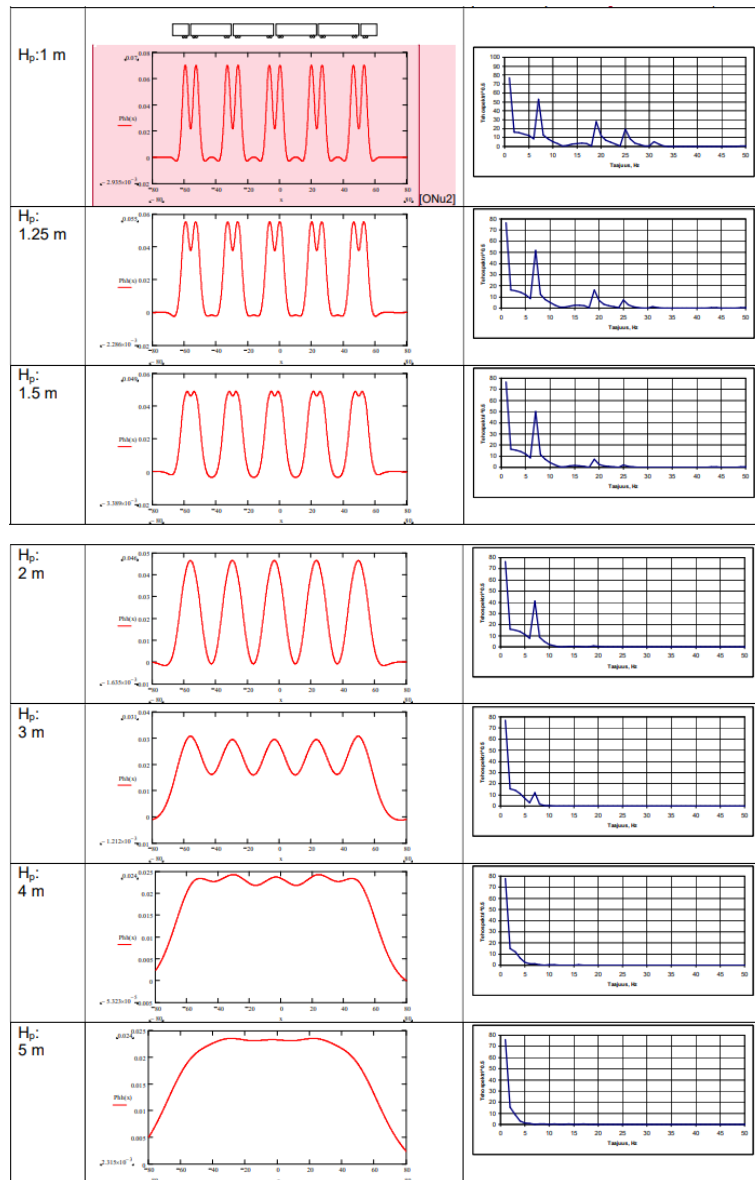
*Kuva 30. Herätteen sijoitus laskentageometriaan Plaxis 2D-ohjelmassa.*

#### 4.4.3 Pengerkorkeuden vaikutuksen mallinnus

Yhdeksi junaherätteen pohjamaahan välittymiseen vaikuttavaksi tekijäksi tunnistettiin mallinnuksessa radan pengerkorkeus. Korkeampi penger vaikuttaa junan aiheuttaman kuormituksen jakautumiseen ja siihen, missä vaiheessa värähdysaalto välittyy pohjamaahan. Liikkuva juna aikaansaa pohjamaassa penkereen alapuolella sitä pienemmän jännitysmaksimin, mitä paksumpi pengerpaksuus on junan ja maapohjan välissä (Törnqvist et. al 2019, s. 16). Junan pohjamaalle aiheuttama kokonaiskuormitus pysyy samana, mutta pengerpaksuuden kasvaessa myös maapohjaan penkereen alapinnasta välittyvä pohjapaine pienenee kuorman jakautuessa myös radan poikkisuunnassa laajemmalle. Oletettavasti korkeampi penger jo itsessään häivyttää joitakin värähtelytaajuuksia. Osittain vaikutus perustuu kuorman jakautumisen lisäksi myös siihen, jos pengermateriaalille ominainen leikkausaallon nopeus on eriävä pohjamaalle tyypillisestä leikkausaallon nopeudesta.

Ratapenkereen alapuolisen jännitystilän vaihtelua eri pengerpaksuuksilla on esitetty tutkimusraportissa *Ratapenkereen värähtelyn arviointi Seinäjoki-Oulu-rataosuudella* (Törnqvist et. al 2019) pohjamaan pinnalle vaikuttavan nauhakuorman avulla. Raportin mukaan pengerpaksuudella on erittäin suuri merkitys maapohjaan kohdistuvan rasituksen 'dynaamisuuteen' samoin kuin sen taajuussisältöön. Vaikutusta on esitetty kuvassa 31. Siitä huomataan, että hyvin ohuilla penkereillä maapohjaan kohdistuu vaunun sisäisten telivälien aiheuttaman herätteen lisäksi myös peräkkäisten vaunujen telivälien säätelemä kuormavaihtelu. Raportin laskelmien mukaan pengerpaksuuden kasvaessa korkeammat

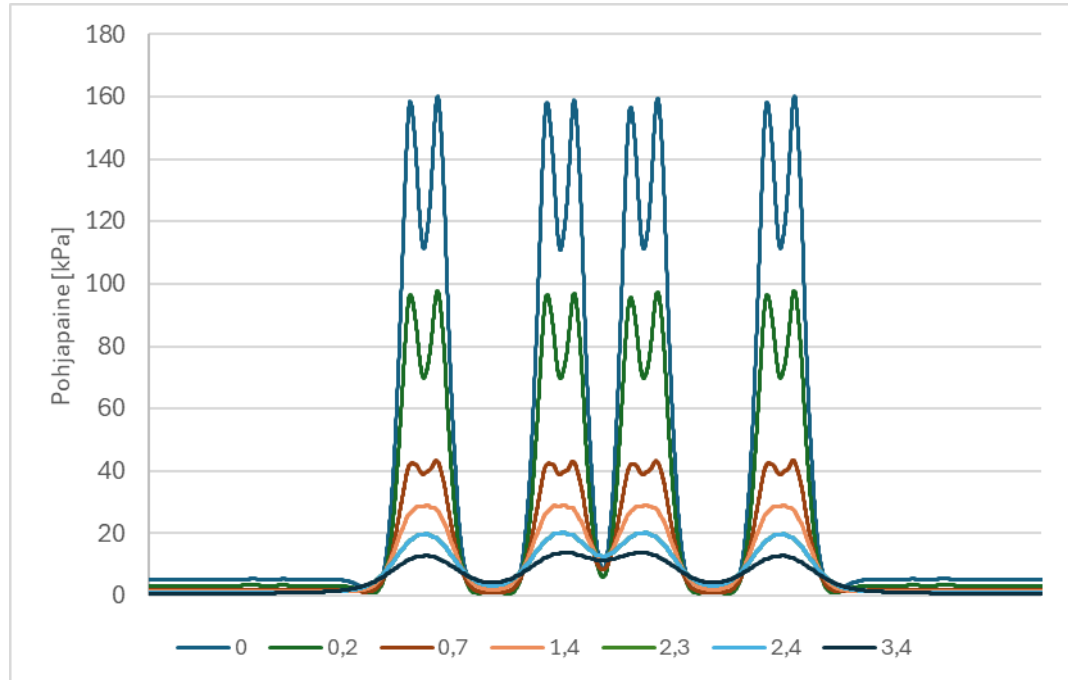
herätetaajuudet häivyttävät, ja lopulta kuorma lähestyy lähes staattista tasaista nauhakuormaa. (Törnqvist et. al 2019, s. 16)



**Kuva 31.** Maapohjaan kohdistuva penkereen suunnassa vaihteleva nauhakuorma [MN/jm] pengerkorkeuden vaikutuksesta. Laskelma on tehty IC2-vaunun mitoilla, 150 kN akselikuormalla ja 200 km/h junan nopeudella (Törnqvist et. al 2019, s. 18)

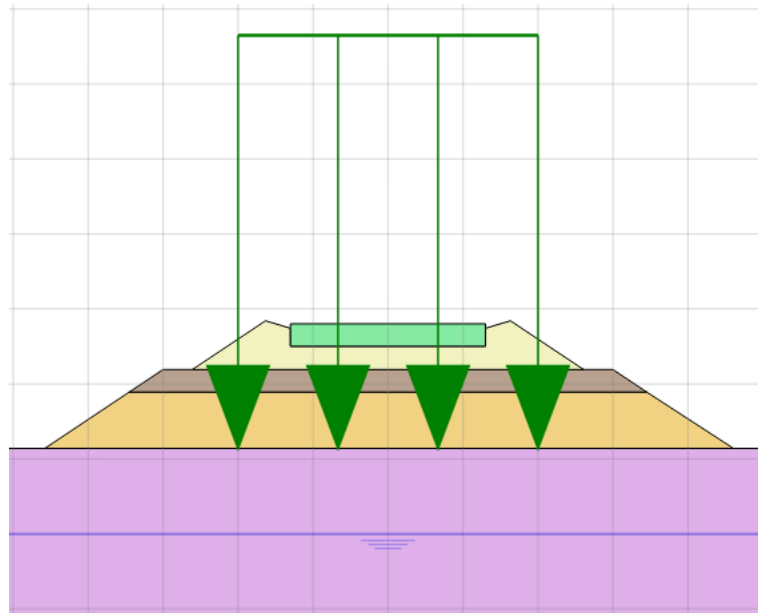
Koska mallinnukset tehtiin Plaxiksella 2D-tasossa, kuormien jakautumisen lisäksi myöskään pengerkorkeuden vaikutus välittyi taajuusjakaumiin ei todennäköisesti toistu mallissa todellisuutta vastaavasti. Vertailua pengerkorkeuden ja maaperäolosuhteiden yhteisvaikutuksesta tehtiin mallintamalla tilannetta 1,4 m sekä 2,4 m pengerpaksuuksilla sekä Plaxis 2D:llä että Ballasted Track Simulatorilla. Jälkimmäisellä mallinnetut kahden vaunun aiheuttamat jännitykset eri syvyyksillä ratarakenteessa on esitetty kuvassa 32.

Kuvaajista tulee hyvin samantyyppiset kuvan 31. kuvaajiin verrattuna, syvemmälle mentäessä korkeampia taajuuksia aiheuttavat kuormituspiikit loivenevat. Akselivälin aiheuttama taajuus ei juurikaan enää erotu 1,4 m syvyydellä, ja peräkkäisten vaunujen välinen teliväli loivenee myös lähes pois kuvaajasta 3,4 m syvyydellä.



**Kuva 32.** Pohjapaine eri syvyyksillä pölkyn alapinnasta katsottuna.

Plaxikseen luotiin aiemmissa mallinuksissa käytetyn 2,4 pengerkorkeuden lisäksi malli 1,4 m pengerkorkeudella. Laskentatarkastelut tehtiin molemmilla pengerkorkeuksilla kohdistamalla Ballasted Track Simulator -ohjelmistolla mallinnettu pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuva junaheräte ratapölkyn alapinnan tasoon. Vertailulaskelmaan otettiin herätteeksi Ballasted Track Simulatorin mallista pystyjännitys 1,4 m ja 2,4 m syvyyksiltä rakenteesta, ja kohdistettiin se ratarakenteen ja pohjamaan rajapintaan. Herätteen sijoitus laskentageometriaan on esitetty kuvassa 33. Laskentaoletuksena oli, että Plaxiksen 2D-tarkastelussa pengerkorkeuden vaikutus on todellista 3D-vaikutusta pienempi.



**Kuva 33.** Herätteen sijoitus laskentageometriaan Plaxis 2D-ohjelmassa 1,4 m pen-  
gerpaksuudella.

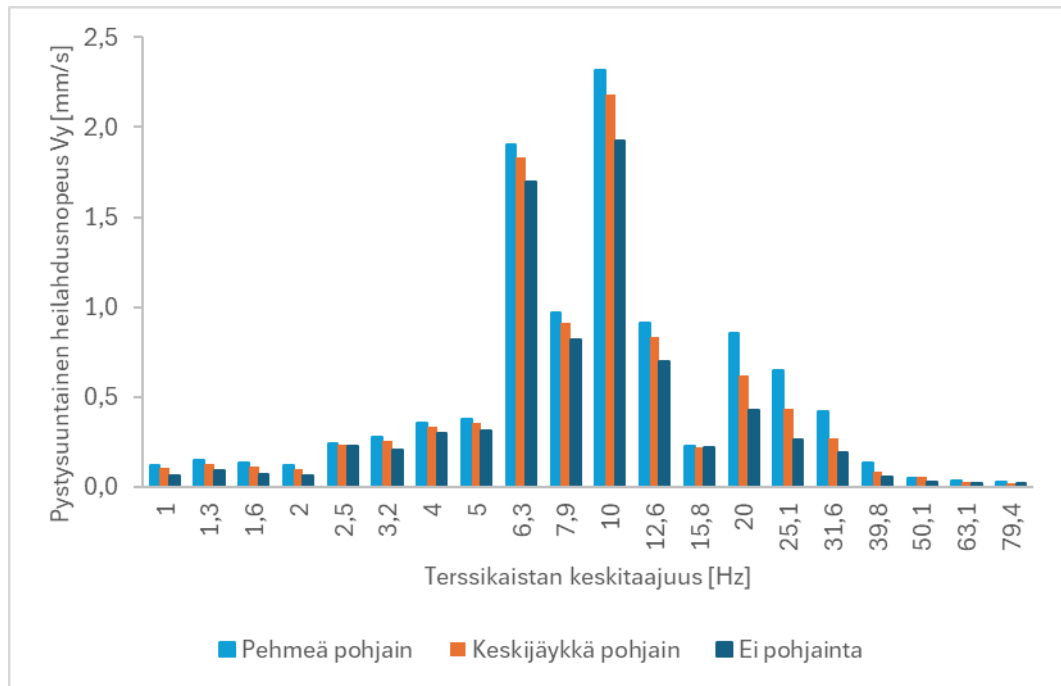
## 5. LASKENTATULOKSET

### 5.1 Pölkyn yläpinnan siirtymään perustuva malli

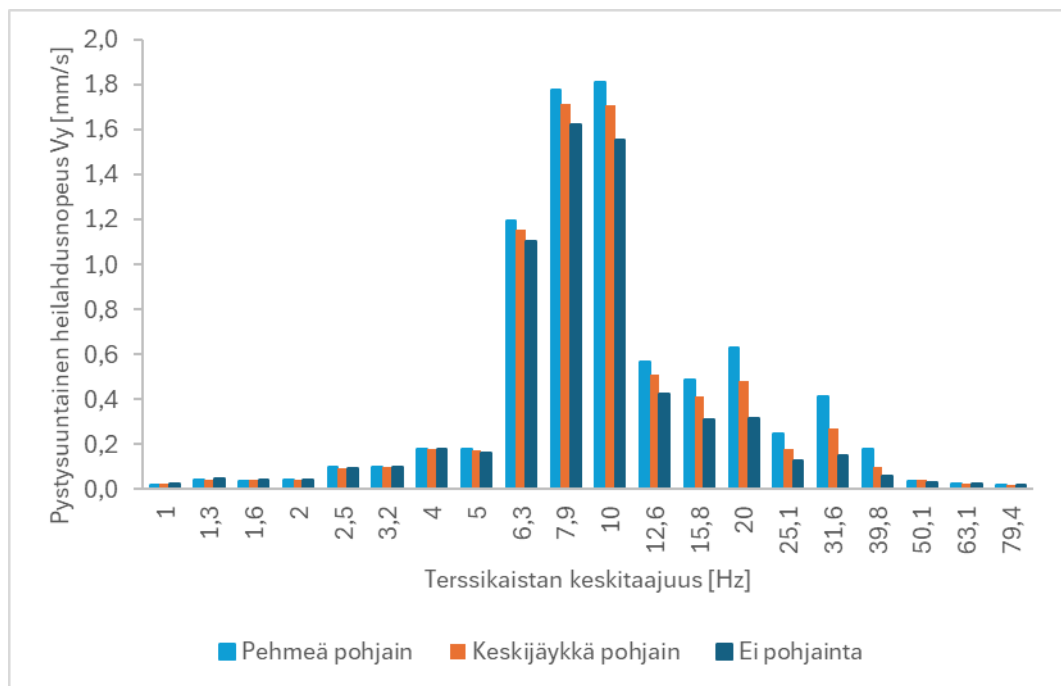
Laskennat suoritettiin pölkyn yläpinnan siirtymään perustuvassa mallissa 9 laskentatapaukselle: kolmella eri pohjamaatyypillä, ja kahdella eri pohjaimella sekä pohjaimettomalla vaihtoehdolla. Kaikki tapaukset tutkittiin samalla herätteellä, ja ratapenkereen korkeus oli 2,4 m. Maanpinnan hallitsevat taajuudet on esitetty FFT-kuvaajina terssikaistoitain värähtelyn heilahdusnopeuden keskiarvona VTT-ohjeen Ohjeita liikennetärinän arviointiin (Talja 2011, s.8) mukaisesti. Tarkastelupiste on maapinnan tasossa, 14 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Kaikissa laskentatuloksissa esitetyt pystysuuntaisen heilahdusnopeuden absoluuttiset arvot ovat suuruusluokaltaan merkittävästi todellista liikennevärähtelytilannetta suurempia. Arvot on esitetty kuvaajissa tulosten keskinäistä vertailua varten. Laskentatuloksia ei voida käyttää 2D-mallinnuksessa todellisten heilahdusnopeuksien arviointiin.

Kuvassa 34. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain kun pohjamaana oli savi. Mallinnuksessa pohjaimen käyttö ei vaikuttanut maapinnan pystysuuntaisiin hallitseviin taajuusalueisiin, kun pohjamaana oli savi tai siltti. Savella hallitsevat taajuusalueet olivat 6,3 Hz, 7,9 Hz, 10 Hz ja 12,6 Hz. Pohjaimen käyttö voimisti näillä taajuusalueilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskiarvolla pohjaimella 8...20 %, ja pehmeällä pohjaimella 14...31 %. Kokonaisuudessaan tässä mallissa pohjaimen lisääminen voimisti savella pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta kaikilla taajuusalueilla. Vähiten heilahdusnopeuden voimistumista tapahtui molemmilla pohjaintyypeillä taajuusalueilla 2,5 Hz (8...5 %) sekä 15,8 Hz (2...1 %). Pehmeä pohjain voimisti pystysuuntaisen värähtelyn heilahdusnopeutta kaikilla taajuusalueilla enemmän kuin keskiarvolla pohjain.

Kuvassa 35. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain kun pohjamaana oli siltti. Siltillä hallitsevat taajuusalueet olivat 6,3 Hz, 7,9 Hz ja 10 Hz. Pohjaimen käyttö voimisti näillä taajuusalueilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskiarvolla pohjaimella 5...10 % ja pehmeällä pohjaimella 8...17 %. Pohjaimen käyttö siltillä voimisti pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta useimmilla taajuusalueilla. Heilahdusnopeuden vähenemistä siltillä oli taajuusalueilla 1 Hz (-33...-12 %), 1,3 Hz (-12...-4 %), 1,6 Hz (-8...-2 %) ja 3,2 Hz (-3...-1 %). Pehmeä pohjain vaikutti heilahdusnopeuden muutokseen enemmän kuin keskiarvolla pohjain molemmilla tapauksissa.



**Kuva 34.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on savi ( $E = 30 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $70 \text{ km/h}$ .

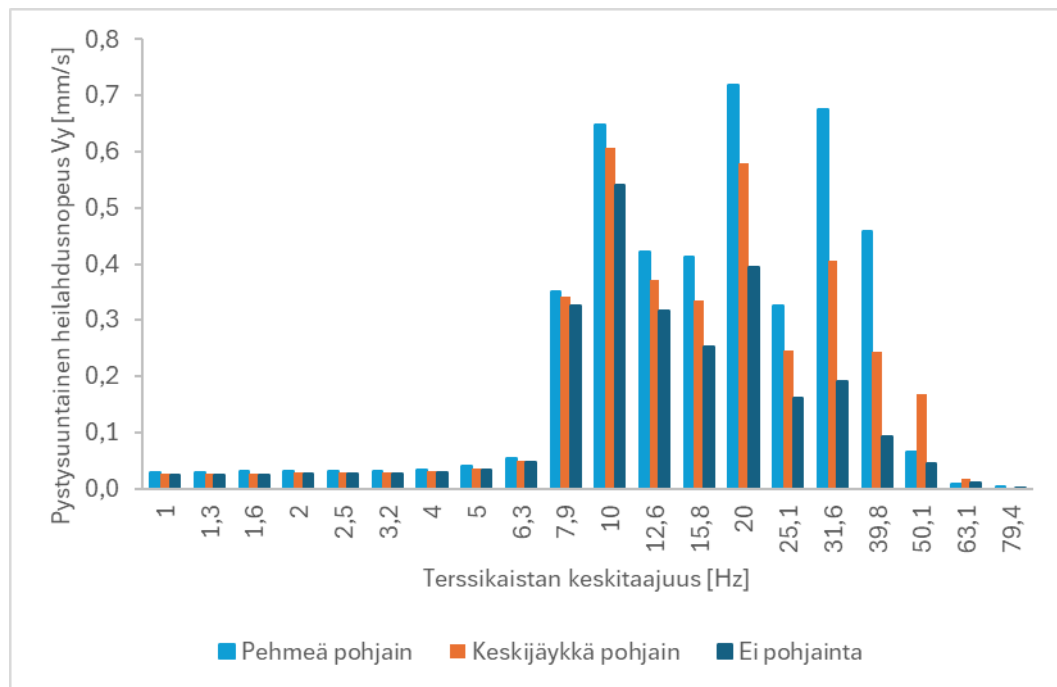


**Kuva 35.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti ( $E = 60 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $70 \text{ km/h}$ .

Kuvassa 36. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain kun pohjamaana oli moreeni. Moreenilla hallitsevat taajuusalueet ilman



pohjainta olivat 7,9 Hz, 10 Hz, 12,6 Hz, 15,8 Hz sekä 20 Hz. Pohjaimellisissa laskentatilanteissa erityisesti korostuivat näiden lisäksi taajuusalueet 13,6 Hz sekä 39,8 Hz. Pohjaimen käytön vaikutus voimisti pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta molemmilla pohjaimilla enemmän, mitä korkeampaan taajuusalueeseen edetään. Suurimmat muutokset heilahdusnopeudessa olivat taajuusalueilla 25,1 Hz (101...52 %), 32,6 Hz (251...110 %) ja 39,8 Hz (393...162 %). Pehmeän pohjaimen käyttö vaimensi keskimääräistä heilahdusnopeutta 63,1 Hz taajuusalueella -13 %. Pehmeä pohjain vaikutti keskimääräisen heilahdusnopeuden muutokseen enemmän kuin keskijäykkä pohjain lähes kaikissa taajuusalueissa.



**Kuva 36.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on moreeni ( $E = 190 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on 70 km/h.

Kokonaisuudessaan tässä mallissa pohjaimen vaikutus värähtelyyn oli merkittävämpi moreenilla kuin savella ja siltillä. Tärkein huomattavissa oleva trendi oli, että pohjain voimistaa tällä mallinnustyyllillä värähtelyä kaikilla tarkasteltavilla pohjamailla, sekä lähes kaikissa taajuusalueissa. Pehmeämpi pohjain vaikuttaa värähtelyyn enemmän kuin keskijäykkä pohjain.

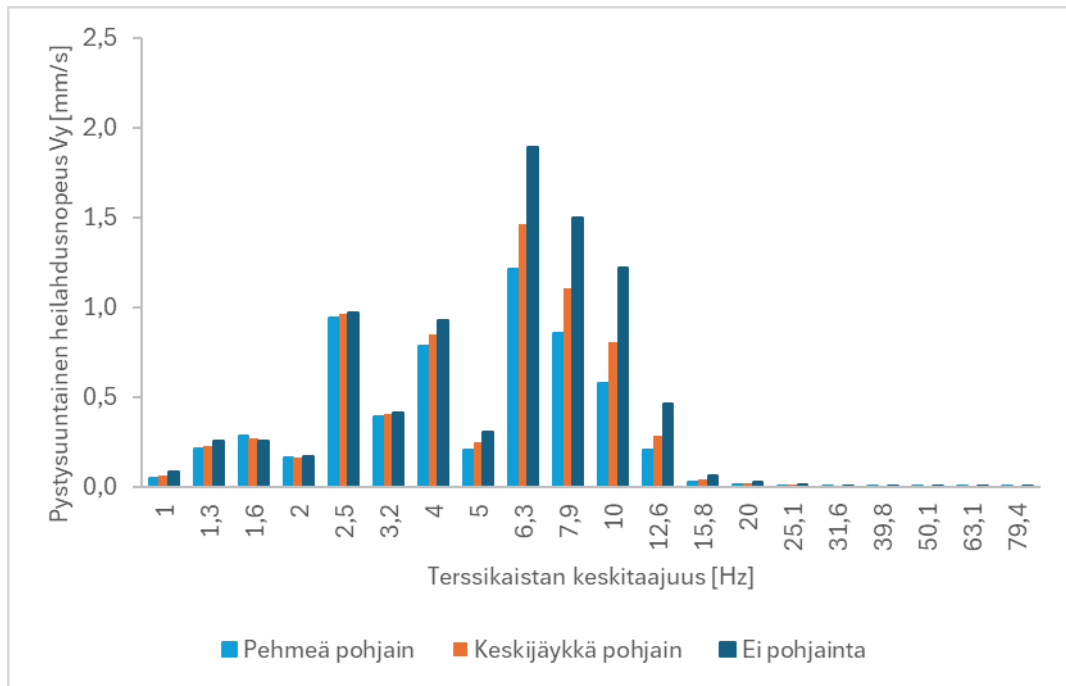
## 5.2 Pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuva malli

Laskennat suoritettiin pohjapaineen muutoksiin perustuvassa mallissa 18 laskentatapaukselle: kahdella junan kulkunopeudella, kolmella eri pohjamaatyypillä, ja kahdella eri

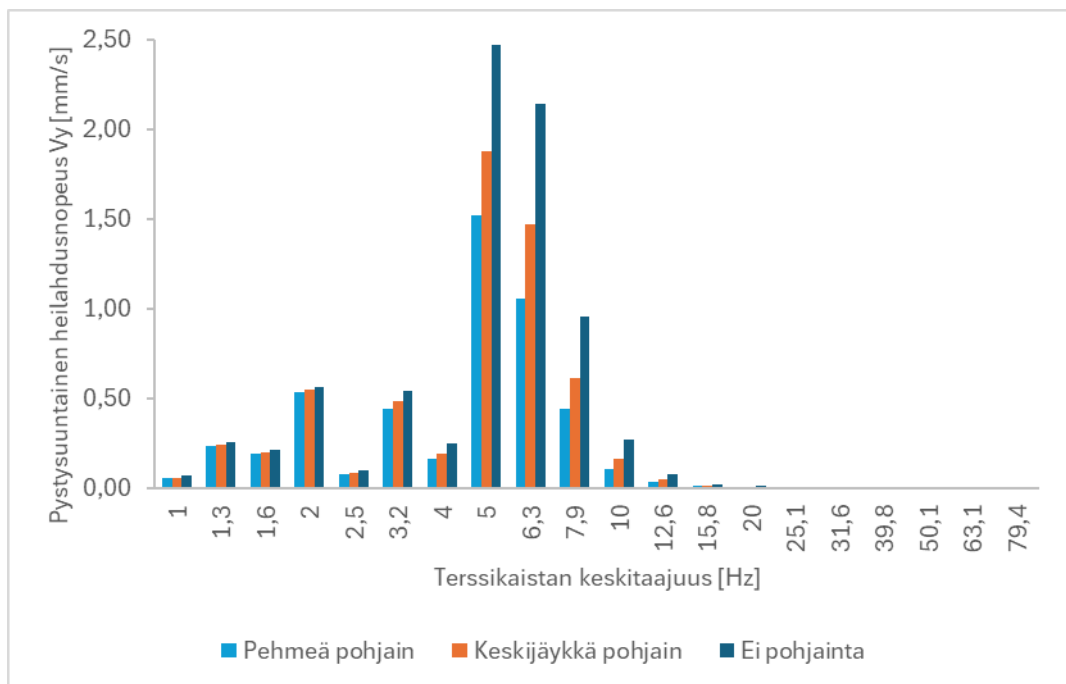
pohjaimella sekä pohjaimettomalla vaihtoehdolla. Herätteenä käytettiin jokaiselle laskentatapaukselle omaa Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmalla sekä Excelillä muodostettua herätesignaalia. Ratapenkereen korkeus oli kaikissa tapauksissa 2,4 m. Maanpinnan hallitsevat taajuudet on esitetty FFT-kuvaajina terssikaistoittain värähtelyn heilahdusnopeuden keskiarvona VTT-ohjeen Ohjeita liikennetärinän arviointiin (Talja 2011, s.8) mukaisesti. Tarkastelupiste on maapinnan tasossa, 14 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Kaikissa laskentatuloksissa esitetyt pystysuuntaisen heilahdusnopeuden absoluuttiset arvot ovat suuruusluokaltaan merkittävästi todellista liikennevärähtelytilannetta suurempia. Arvot on esitetty kuvaajissa tulosten keskinäistä vertailua varten. Laskentatuloksia ei voida käyttää 2D-mallinnuksessa todellisten heilahdusnopeuksien arviointiin.

Kuvissa 37. ja 38. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain ajonopeuksilla 70 km/h ja 50 km/h kun pohjamaana oli savi. Mallinnuksessa pohjaimen käyttö ei vaikuttanut maapinnan pystysuuntaisiin hallitseviin taajuusalueisiin millään tarkasteltavista pohjamaista. Junaherätteen kulkunopeus sen sijaan vaikutti jonkin verran hallitseviin taajuusalueisiin savella ja siltillä. Savella 70 km/h junaherätteen nopeudella hallitsevat taajuusalueet olivat 2,5 Hz, 4 Hz, 6,3 Hz, 7,9 Hz, 10 Hz. Pohjaimen käyttö vaimensi matalammilla 2,5 Hz ja 4 Hz taajuusalueilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskijäykällä pohjaimella 1...8 %, ja pehmeällä pohjaimella 3...15 %. Korkeammilla 6,3 Hz, 7,9 Hz ja 10 Hz taajuuksilla heilahdusnopeus vaimentui keskijäykällä pohjaimella 23...34 % ja pehmeällä pohjaimella 36...53 %. Kokonaisuudessaan tässä mallissa pohjaimen lisääminen vaimensi savella pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta kaikilla paitsi yhdellä taajuusalueella. 1,6 Hz taajuusalueella heilahdusnopeus voimistui pehmeällä pohjaimella 12 % ja keskijäykällä pohjaimella 8 %. Pehmeä pohjain vaimensi pystysuuntaisen värähtelyn heilahdusnopeutta kaikilla taajuusalueilla enemmän kuin keskijäykkä pohjain.

Savella 50 km/h nopeudella kulkevalla junaherätteellä hallitsevat taajuusalueet poikkesivat jonkin verran verrattuna 70 km/h nopeudella kulkevaan junaan. Matalista taajuusalueista 2 Hz sekä 3,2 Hz alueet nousivat hallitseviksi, korkeammista 5 Hz, 6,3 Hz sekä 7,9 Hz alueet. Pohjaimen käyttö vaimensi matalammilla taajuusalueilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskijäykällä pohjaimella 3...10 %, ja pehmeällä pohjaimella 5...18 %. Korkeammilla 5 Hz, 6,3 Hz ja 7,9 Hz taajuusalueilla heilahdusnopeus vaimeni keskijäykällä pohjaimella 24...26 % ja pehmeällä pohjaimella 38...54 %. Pystysuuntaisen värähtelyn heilahdusnopeudet olivat savella 50 km/h nopeudella suuruusluokaltaan hyvin lähellä 70 km/h nopeudella heilahdusnopeuksia.



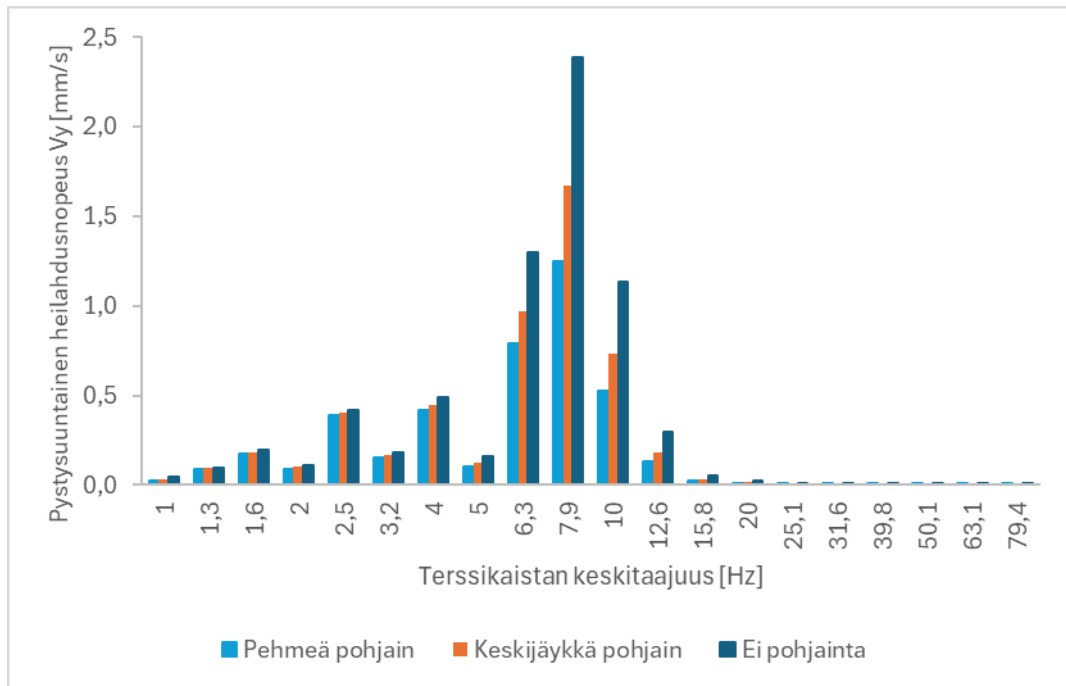
**Kuva 37.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on savi ( $E = 30 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $70 \text{ km/h}$ .



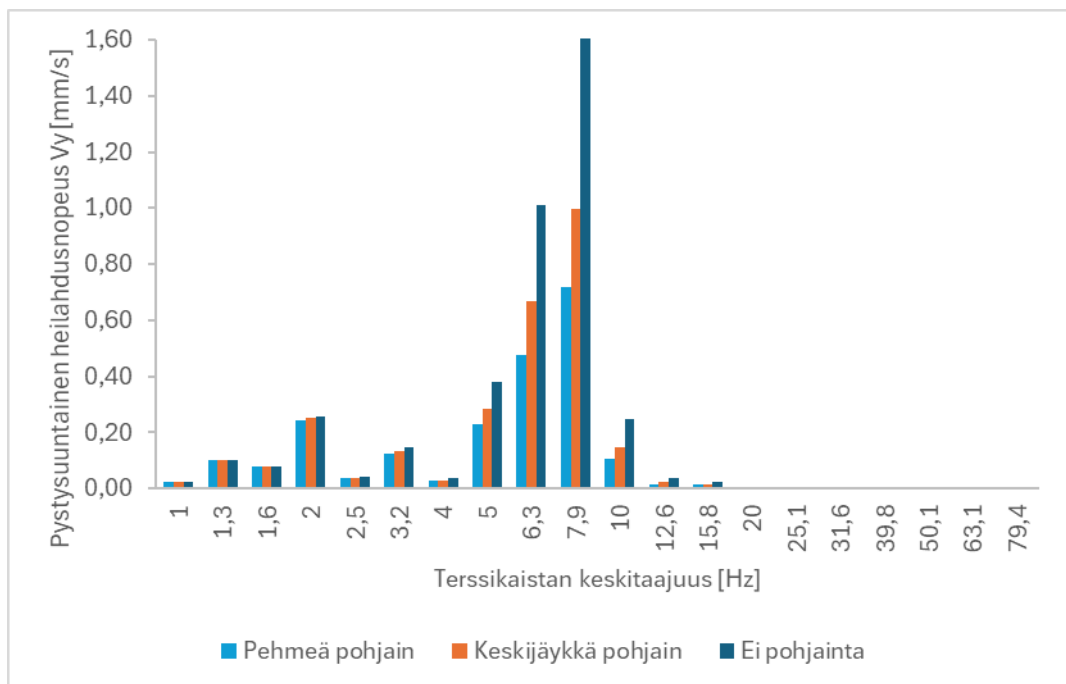
**Kuva 38.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on savi ( $E = 30 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $50 \text{ km/h}$ .

Kuvissa 39. ja 40. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuu-  
det terssikaistoittain ajonopeuksilla 70 km/h ja 50 km/h kun pohjamaana oli siltti. Siltillä  
70 km/h junanherätteellä hallitsevat taajuusalueet olivat hyvin samanlaiset kuin savella,  
2,5 Hz, 4 Hz, 6,3 Hz, 7,9 Hz ja 10 Hz. Pohjaimen käyttö vaimensi matalammilla 2,5 Hz  
ja 4 Hz taajuusalueilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta  
keskijäykällä pohjaimella 4...8 %, ja pehmeällä pohjaimella 7...15 %. Korkeammilla 6,3  
Hz, 7,9 Hz ja 10 Hz taajuuksilla heilahdusnopeus vaimentui keskijäykällä pohjaimella  
25...36 % ja pehmeällä pohjaimella 39...54 %. Kokonaisuudessaan tässä mallissa poh-  
jaimen lisääminen vaimensi siltillä pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdus-  
nopeutta kaikilla taajuusalueilla. Pehmeä pohjain vaimensi pystysuuntaisen värähtelyn  
heilahdusnopeutta kaikilla taajuusalueilla enemmän kuin keskijäykkä pohjain

Siltillä 50 km/h nopeudella kulkevalla junanherätteellä hallitsevat taajuusalueet poikkesi-  
vat jonkin verran verrattuna 70 km/h nopeudella kulkevaan junaan. Matalista taajuusalu-  
eista 2 Hz sekä 3,2 Hz alueet nousivat hallitseviksi, korkeammista 5 Hz, 6,3 Hz sekä 7,9  
Hz alueet. Pohjaimen käyttö vaimensi matalammilla taajuusalueilla pystysuuntaisen vä-  
rähähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskijäykällä pohjaimella 3...9 %, ja pehme-  
ällä pohjaimella 5...17 %. Korkeammilla 5 Hz, 6,3 Hz ja 7,9 Hz taajuusalueilla heilahdus-  
nopeus vaimeni keskijäykällä pohjaimella 26...38 % ja pehmeällä pohjaimella 40...55 %.  
Pehmeä pohjain vaimensi pystysuuntaisen värähtelyn heilahdusnopeutta kaikilla taa-  
juusalueilla enemmän kuin keskijäykkä pohjain. Pystysuuntaisen värähtelyn heilahdus-  
nopeudet olivat siltillä 50 km/h nopeudella suuruusluokaltaan noin kaksi kolmasosaa 70  
km/h olleista heilahdusnopeuksista.



**Kuva 39.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti ( $E = 60 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $70 \text{ km/h}$ .

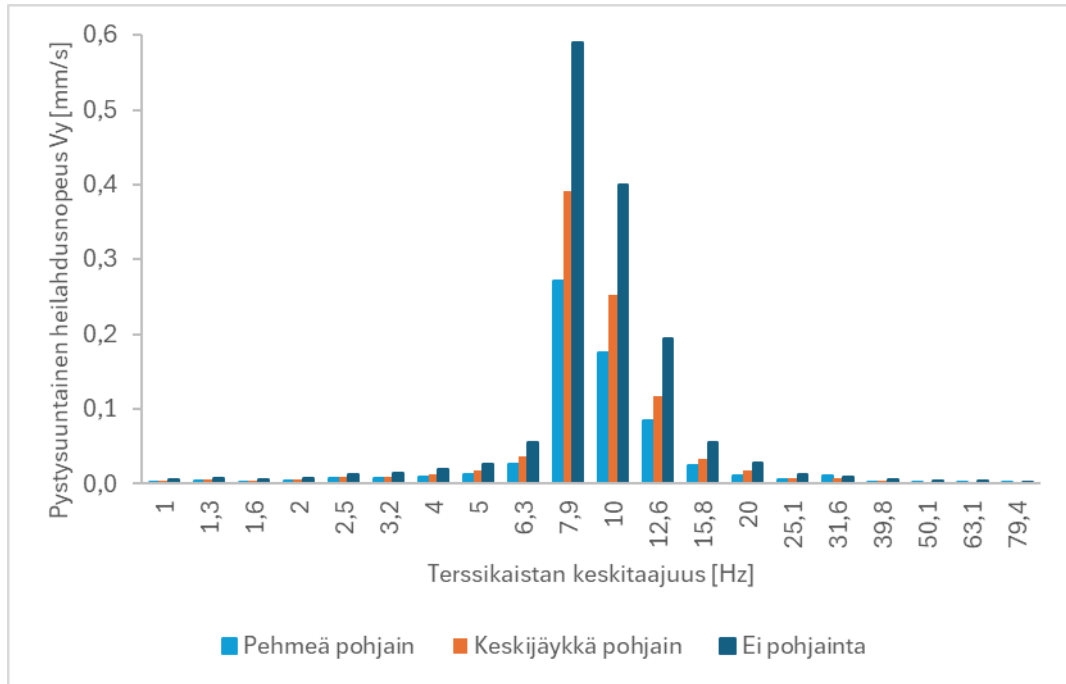


**Kuva 40.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on siltti ( $E = 60 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $50 \text{ km/h}$ .

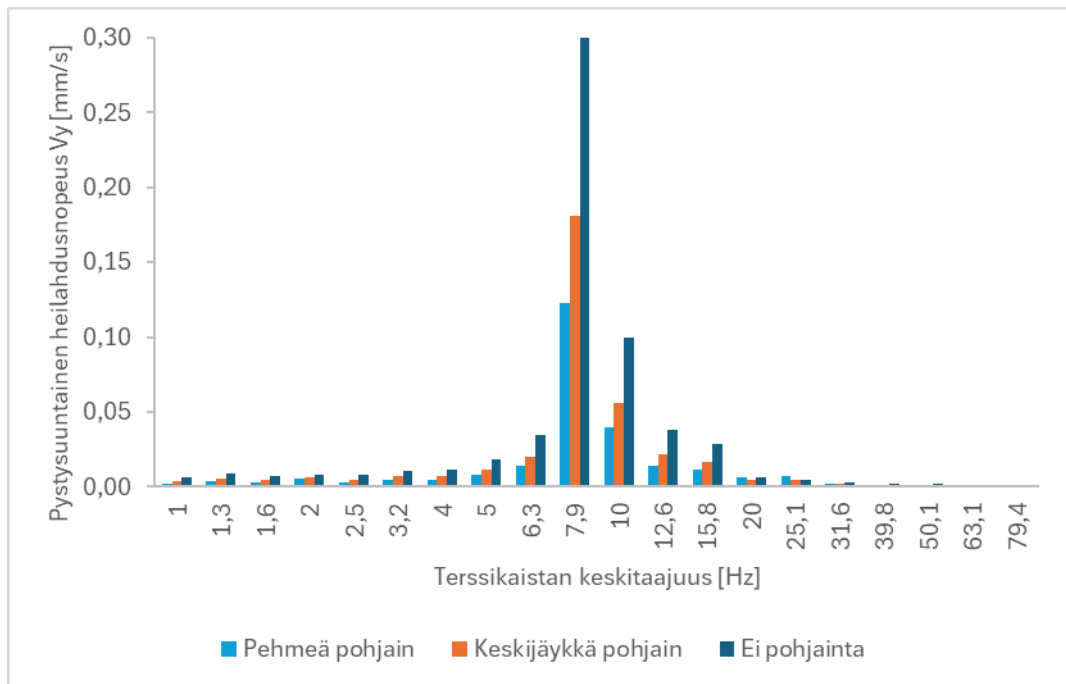
Kuvissa 41. ja 42. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuu-  
det terssikaistoittain ajonopeuksilla 70 km/h ja 50 km/h kun pohjamaana oli moreeni.  
Moreenilla 70 km/h nopeudella kulkevalla junaherätteellä hallitsevat taajuusalueet olivat  
7,9 Hz, 10 Hz ja 12,6 Hz. Pohjaimen käyttö vaimensi näillä taajuusalueilla pystysuuntaisen  
värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskijäykällä pohjaimella 34...40 %,  
ja pehmeällä pohjaimella 54...56 %. Kokonaisuudessaan 70 km/h nopeudella pohjaimen  
lisääminen vaimensi moreenilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdus-  
nopeutta kaikilla paitsi yhdellä taajuusalueella. 31,6 Hz taajuusalueella heilahdusnopeus  
voimistui pehmeällä pohjaimella 11 %, mutta vaimeni keskijäykällä pohjaimella 14 %.

Moreenilla 50 km/h nopeudella kulkevalla junaherätteellä hallitsevina taajuusalueina  
erottuivat samat kuin 70 km/h nopeudella. Pystysuuntaisen värähtelyn heilahdusnopeu-  
det olivat 50 km/h nopeudella suuruusluokaltaan noin puolet pienempiä kuin 70 km/h  
nopeudella ajetulla junaherätteellä. Pohjaimen käyttö vaimensi hallitsevilla taajuusalu-  
eilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdusnopeutta keskijäykällä poh-  
jaimella 42...43 %, ja pehmeällä pohjaimella 59...62 %. Vaimennusteho oli siis hieman  
parempi kuin 70 km/h nopeudella. Kokonaisuudessaan 50 km/h nopeudella pohjaimen  
lisääminen vaimensi moreenilla pystysuuntaisen värähtelyn keskimääräistä heilahdus-  
nopeutta kaikilla paitsi yhdellä taajuusalueella. 20 Hz taajuusalueella heilahdusnopeus  
voimistui pehmeällä pohjaimella 3 %, mutta vaimeni keskijäykällä pohjaimella 20 %.

Vaimennusvaikutuksen tehon vaihtelu oli kokonaisuudessaan moreenilla selvästi savea  
ja silttiä pienempää. Pehmeä pohjain vaimensi pystysuuntaisen värähtelyn heilahdusno-  
peutta enemmän kuin keskijäykkä pohjain.



**Kuva 41.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on moreeni ( $E = 190 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $70 \text{ km/h}$ .



**Kuva 42.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on moreeni ( $E = 190 \text{ MPa}$ ) ja junan nopeus on  $50 \text{ km/h}$ .

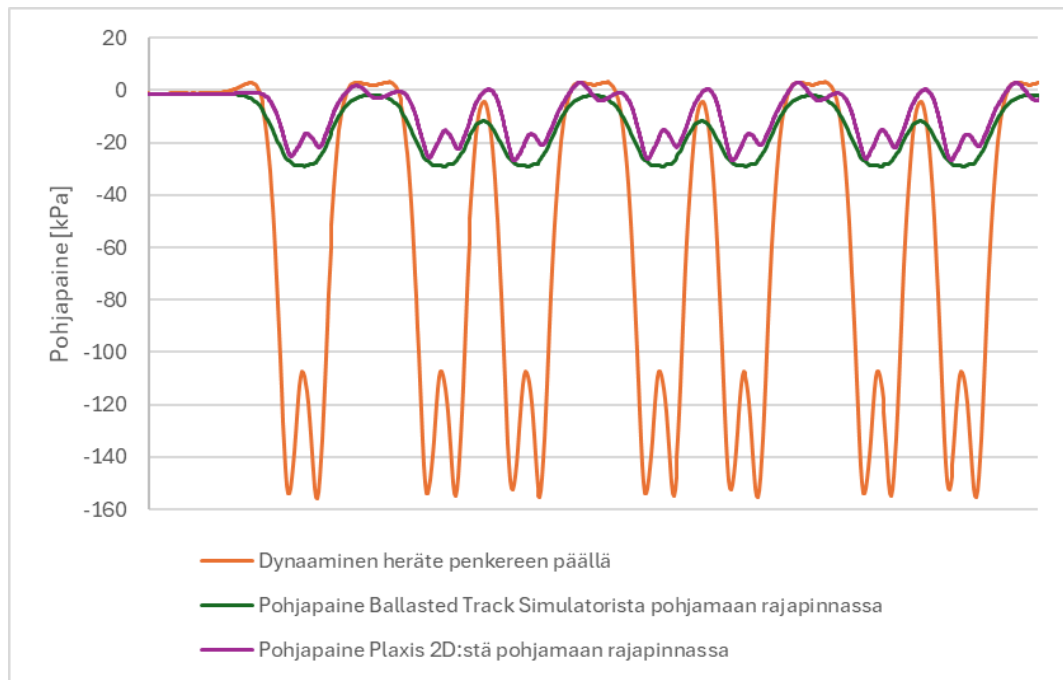
### 5.3 Pengerkorkeuden vaikutuksen mallinnus

Pengerkorkeuden vaikutusta mallinnettiin kahdella eri mallilla ja neljällä eri herätteellä. Toisessa mallissa käytettiin 2,4 m pengerkorkeutta ja toisessa 1,4 m korkeutta. Molemmilla malleilla tehtiin kaksi tarkastelua, joissa Ballasted Track Simulatorilla mallinnettu heräte kohdistettiin ratapölkyn alapinnan tasoon sekä ratapenkereen ja pohjamaan rajapintaan. Tuloksissa vertailtiin eroa kuorman jakautumisessa Plaxiksen 2D -mallin sekä Ballasted Track Simulatorin 3D-mallinnuksen välillä. Lisäksi tarkasteltiin maaperässä välittyvien värähtelyiden välittymistä ja eroa pystysuuntaisessa heilahdusnopeudessa sekä taajuusjakaumassa. Maanpinnan hallitsevat taajuudet on esitetty FFT-kuvaajina terssi-kaistoittain värähtelyn heilahdusnopeuden keskiarvona VTT-ohjeen Ohjeita liikennetäri-  
nän arviointiin (Talja 2011, s.8) mukaisesti. Tarkastelupiste on maapinnan tasossa, 14 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta.

Kuvasta 43. voidaan todeta ero kuormien jakautumisessa Plaxis 2D -mallin ja Ballasted Track Simulator 3D -jännityslaskennan välillä. Plaxiksessa dynaaminen heräte kohdistettiin penkereen päälle ratapölkyn alapinnan tasoon kuten aiemmissakin mallinnuksissa. Kuvaajissa on esitetty vallitseva pystyjännitys ratapenkereen ja pohjamaan rajapinnassa, sekä vertailukuvaajana käytetty dynaaminen heräte. Plaxis-mallinnuksen tuloksessa erottuvat selvästi lyhyempien akselivälienkin aiheuttamat kuormituspiikit molemmilla pengerpaksuuksilla. Ballasted Track Simulatorin mallinnuksen tuloksessa kuormituspiikkien loiveneminen on havaittavissa paremmin todellista 3D-ulottuvuuden jakautumista vastaavana. Korkeampi 2,4 m penger häivyttää kuormituspiikkejä vielä hieman enemmän kuin 1,4 m penger.

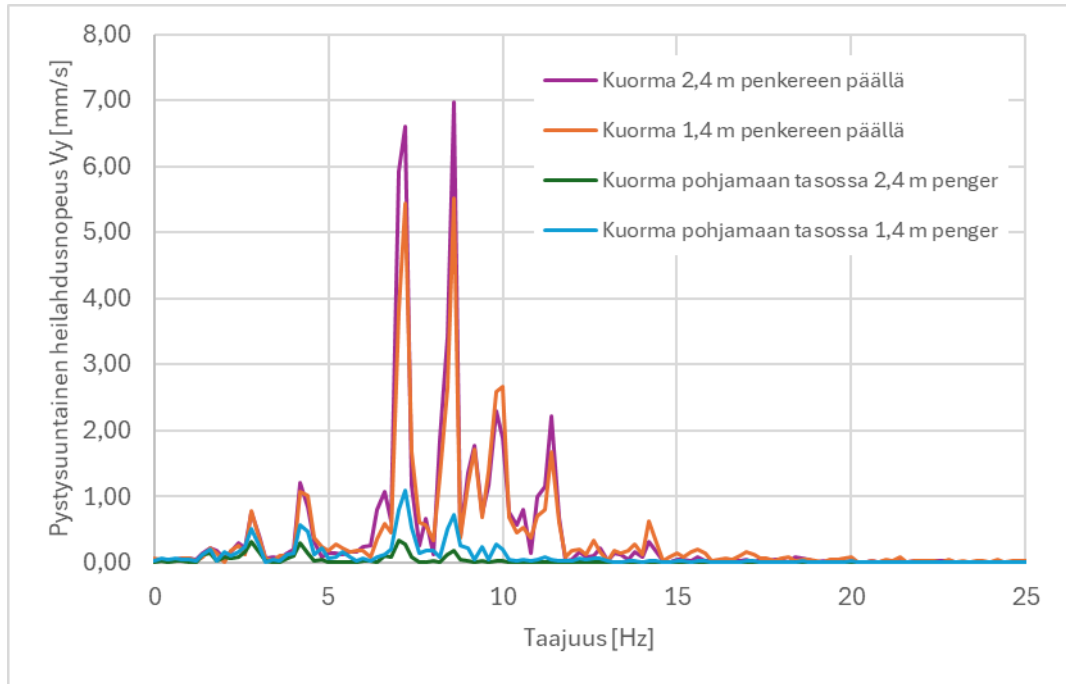
Kuvissa 44. ja 45. on esitetty maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn jakaumaa 1,4 m ja 2,4 pengerpaksuuksilla, kun heräte on asetettu Plaxiksessa penkereen päälle tai penkereen ja pohjamaan rajapintaan. Kuvaajista huomataan, että Plaxis 2D:n kuormitusjakaumalla korkeammat taajuusalueet 6,3 Hz, 7,9 Hz ja 10 Hz korostuvat molemmilla pengerkorkeuksilla. Penkereen päälle asetetulla herätteellä värähtely välittyy paremmin 2,4 m penkereellä kuin 1,4 m penkereellä. Korkeampia taajuuksia aiheuttaa junan mitoista esimerkiksi akseliväli, jonka laskennallinen herätetaajuus on 10,8 Hz (taulukko 1.). Peräkkäisten vaunujen telivälin aiheuttama herätetaajuus on noin 6,48 Hz. Ballasted Track Simulatorin mallissa todenmukaisempi kuormituksen radansuuntaisen jakautuminen hävittää tehokkaasti näitä taajuuksia molemmilla 1,4 m ja 2,4 m pengerpaksuuksilla. Tuloksissa huomataan myös, että penkereen ja pohjamaan rajapintaan asetetulla herätteellä 1,4 m pengerpaksuudella lähes kaikki taajuusalueet välittyvät paremmin kuin 2,4 m pengerpaksuudella kuorman jakautumisen takia.



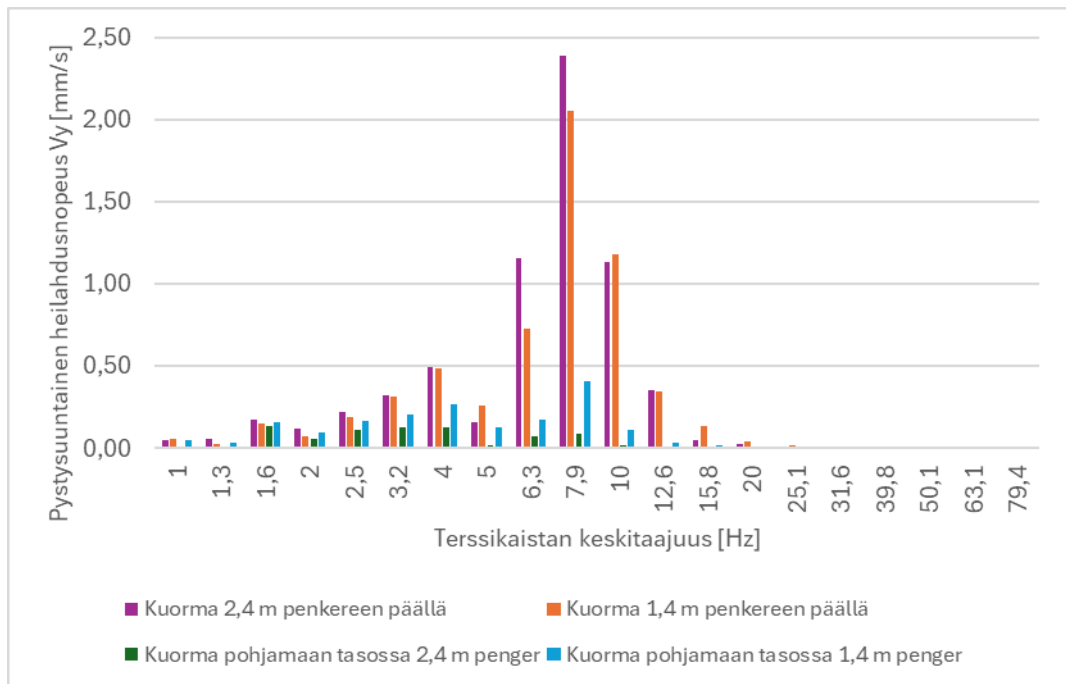


**Kuva 43.** Pohjapaine pohjamaan ja penkereen rajapinnassa 2,4 m penkereellä, kun mallinnus tehtiin Plaxis 2D:llä ja Ballasted Track Simulatorilla.

Näiden mallinnusten perusteella ei voida todeta, että Plaxis 2D:ssä matalammalla pengerkorkeudella tehtyjen mallinnusten taajuusjakauma vastaisi paremmin todellista taajuusjakaumaa. Mallinnusten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että pengerkorkeus Plaxis 2D:ssä ei vaikuta kuorman jakautumiseen yhtä voimakkaasti kuin todellisessa 3D-tilanteessa. Tämä johtaa siihen, että Plaxis 2D mallinnustuloksissa korkeammat, esimerkiksi akselivälin aiheuttamat taajuusalueet välittyvät paremmin. Todellisuudessa jo 1,4 m paksuinen penger vaimentaa niitä merkittävästi tilanteessa, jossa pohjamaalle ominainen leikkausaallon nopeus poikkeaa penger materiaalin leikkausaallon nopeudesta. 2,4 m paksuisella penkereellä vaimennusvaikutus on voimakkaampi.



**Kuva 44.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa sillillä 70 km/h junaherätteellä, joka on sijoitettu Plaxis 2D-mallissa joko penkereen päälle tai penkereen ja pohjamaan rajapintaan.



**Kuva 45.** Maanpinnan pystysuuntaisen värähtelyn hallitsevat taajuudet terssikaistoittain laskentamallissa, jossa pohjamaa on silti ( $E = 60$  MPa) ja junan nopeus on 70 km/h.

## 6. TULOSTEN TARKASTELU

Mallinnusprosessissa luotiin kaksi eri tapaa mallintaa pohjaimen vaikutusta junan aiheuttamaan värähtelyasteeseen. Ensimmäisessä mallissa pohjain luotiin yksinkertaisena joustoelementtinä, jonka kimmomoduuli määritettiin pölkyn yläpinnan siirtymän perusteella. Dynaaminen heräte muodostettiin mittausdatasta. Mallinnuksen tuloksena saatiin, että tällä tavalla mallinnettuna pohjain käytännössä voimistaa värähtelyn pystysuuntaista heilahdusnopeutta kaikilla taajuusalueilla 14 m päässä sijaitsevassa tarkastelupisteessä. Pehmeä pohjain voimisti värähtelyä enemmän kuin keskijäykkä pohjain. Tulos on vastaa odotuksia, ja samankaltaisia tuloksia on saatu myös useilla jousi-massa-malleilla.

Mallinnuksessa pohjaimen käyttö ei vaikuttanut hallitseviin taajuusalueisiin värähtelyssä. Hallitsevat taajuusalueet savella ja siltillä olivat 6,3 Hz, 7,9 Hz sekä 10 Hz, moreenilla myös tätä korkeammat taajuusalueet. Kyseiset taajuusalueet ovat suoraan johdettavissa herätteenä olleen Vok-vaunun mitoista taulukon 1. mukaan. Taajuusalue 6,3 Hz aiheutuu 70 km/h nopeudella peräkkäisten vaunujen välisestä telivälisestä, 10 Hz telin akselivälisestä. Osa hallitseviksi nousevista taajuusalueista voi aiheutua myös herätteen mittojen moninkerroista, jolloin maaperässä etenevät aallot yhdistyvät interferenssissä. Herätteenä käytetty signaali oli tässä laskentamallissa suoraan mittausdatasta. Siten sen kulunopeus voi todennäköisesti jonkin verran poiketa 70 km/h tuntivauhdista. Eriävä ajonopeus vaikuttanee jonkin verran herätteen aiheuttamiin värähtelytaajuuksiin. Kuorman epätasaisuudet ja kaluston kulkuominaisuudet näkyvät tässä herätteessä ja siten myös tulosten taajuusjakaumassa paremmin korkeina taajuuksina verrattuna toisen vaiheen mallinnuksiin. Pehmeässä savessa matalat taajuudet välittyvät paremmin ja moreenissa korkeammat, mikä vastaa realistista taajuusjakamaa.

Malli ei lopulta onnistu kovinkaan hyvin kuvaamaan 3D-tilannetta pohjaimen käyttötilanteessa. Oletettavasti pohjaimen toimintamekanismi on hieman monimutkaisempi kuin tässä mallissa esitetty jouston lisäys. Mallissa kuormien jakautumiseen tulevaa muutosta ei huomioida lainkaan. Moreenilla värähtely voimistuu eniten, ja voimistumista tapahtuu nimenomaan korkeammilla yli 20 Hz taajuuksilla. Tämä ei vastaa ennako-oletuksia eikä värähtelymittauksista saatua kokemukseräistä tietoa. Se vuoksi on syytä epäillä tämän mallinnustavan todenmukaisuutta tai soveltuvuutta ainakaan jäykille pohjamaille. Todennäköisesti mallissa jäykällä pohjamaalla pehmeä pohjain ja sen päällä oleva pölkky ajautuvat yhdessä värähtelemään, mikä päättyy voimistamaan koko systeemin värähtelyä.

Pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuvalla herätteellä mallinnetuissa tarkaste- luissa matalat taajuudet toistuvat ensimmäistä mallia todenmukaisemmin, koska mal- lissa käytetty heräte sisältää käytännössä radan taipuman ja siitä seuraavat taajuudet. Taajuusjakaumassa erottuvat savella ja siltillä 70 km/h herätteen nopeudella selvästi vaunun pituuden aiheuttama 1,4 Hz, telivälin aiheuttama 2,25 Hz, peräkkäisten vaunujen telivälin 6,48 Hz sekä akselivälin 10,8 Hz. Moreenilla alle 7 Hz taajuusalueet häivyttävät käytännössä pois tuloksista. Näiltä osin mallin taajuusjakauma voidaan todeta oletetun laiseksi ja todenmukaiseksi. Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmassa mallin raide on 'virheetön', joten herätteessä ei ole lovipyöriä, radan kolhuja ym. vastaavia korkeam- pia taajuusalueita. Hallitsevat taajuudet ovat kuitenkin lähes samat kaikilla maalajeilla, kuin ensimmäisessä mallissa. Käytetty heräte vaikuttaa malleissa eniten siihen, mitä vä- rähtelytaajuuksia ylipäättään syntyy. Maaperän vaimennuskyky sekä taajuuksien eroa- minen maaperälle ominaisista taajuusalueista leikkaa osan etenevistä taajuuksista pois, mikä huomataan parhaiten moreenimaaperällä. Junaherätteen nopeuden laskeminen 70 kilometristä tunnissa 50 kilometriin tunnissa vaikuttaa erottuviin taajuuksiin oletetun lai- sestä. Hallitsevat taajuusalueet muuttuvat käytännössä täysin taulukon 1. mukaan.

Kokonaiskuvassa tällä mallinnustavalla pohjain vaimentaa värähtelyä kaikilla pohja- mailla sekä 70 km/h että 50 km/h nopeuksilla. Pehmeä pohjain vaimentaa tässä mallissa värähtelyä enemmän kuin keskijäykkä pohjain kaikilla taajuusalueilla. Mallissa matalilla alle 5 Hz taajuusalueilla pohjaimen prosentuaalinen vaikutus tärinänvaimennukseen oli pienempi kuin korkeammilla 5 Hz ja yli taajuusalueilla. 70 km/h junan nopeudella moree- nilla pehmeän pohjaimen vaimennuskyky oli 39...65 % ja keskijäykän pohjaimen 26...42 %. Savella ja siltillä vaihtelu prosentuaalisessa vaimennuskyvyssä oli paljon suurempaa. Kun tarkastelluista terssikaistojen taajuusalueista poistetaan tuloksista pienin ja suurin ja lasketaan keskiarvo saadulle vaimennukselle, moreenilla 70 km/h nopeudella pehmeä pohjain vaimensi keskimäärin -52 % ja keskijäykkä -33 %, siltillä pehmeä pohjain -41 % ja keskijäykkä -27 % ja savella pehmeä pohjain -28 % ja keskijäykkä -17 % värähtelyn pystysuuntaisesta heilahdusnopeudesta. 50 km/h nopeudella moreenilla pehmeä poh- jain vaimensi keskimäärin -51 % ja keskijäykkä -39 %, siltillä pehmeä pohjain -34 % ja keskijäykkä -21 % ja savella pehmeä pohjain -43 % ja keskijäykkä -28 % värähtelyn pystysuuntaisesta heilahdusnopeudesta. Saadut keskiarvot vaimennustehossa prosen- tuaalisesti eri junan kulkunopeuksilla olivat siis hyvin lähellä toisiaan, mutta savella vai- mennusteho oli parempi 50 km/h junaherätteellä kuin 70 km/h herätteellä.

Tässäkin mallissa on kuitenkin puutteita, jotka tulee huomioida tulosten arvioinnissa. Liit- teessä 2. esitetyistä FFT-kuvaajista voidaan huomata, että 2D-mallissa välittyvät väräh- telyn heilahdusnopeudet ovat jopa kymmenkertaisia yleisiin liikennetärinästä välittyviin

heilahdusnopeuksiin verrattuna. Malli siis yliarvioi reilusti välittyviä heilahdusnopeuksia, joten tuloksia ei tule tarkastella absoluuttisella tasolla. Todennäköisesti malli yliarvioi myös värähtelyn vaimenemista pohjaimen vaikutuksesta. Ballasted Track Simulatorilla muodostetussa herätteessä on huomioitu radan pituussuuntainen 3D-vaikutus kuorman jakautumisessa. Plaxis-2D malli ei kuitenkaan kykene ilmiön kolmiulotteisuuden huomiointiin. Kun Plaxis -malliin syötetään herätesignaali pintakuormana, ja annetaan sille vaikutussyvyudeksi pölkyn syvyysdimensio 0,3 m, samalla käytännössä redusoidaan junan kokonaiskuorman suuruutta. Plaxikseen syötetään radan pituussuuntaisen kuormanjakautumissuppilon keskimmaiselle (ja 2D-poikkileikkausessa ainoalle) pölkylle Ballasted Track Simulatorissa redusoitu pohjapaineheräte. Todellisuudessa junan kokonaispaino on kuitenkin edelleen sama, se vain jakautuu laajemmalle alueelle ja useammalle pölkylle kiskon jäykkyyden ja pohjaimen jouston vaikutuksesta. 2D-mallissa näitä reunapölkkyjä ei ole, mikä johtaa kokonaiskuorman suuruuden redusoitumiseen. Tämä vaikuttaa vähintäänkin siten, että malli yliarvioi matalimpien junan vaunun pituudesta aiheutuvien taajuuksien vaimenemista. Oletettavasti vaikutusta on myös muissa taajuusalueissa.

Radan pituussuuntainen värähdysaaltojen interferenssi jää 2D-poikkileikkaustyyllillä mallinnetussa tarkastelussa täysin huomioimatta. Tämän vaikutusta tai sen merkittävyyttä on hankala arvioida. Toinen huomiotta jäävä seikka on radan pituussuuntaisten taipumasuppiloiden yhdistyminen. Pohjainten jakaessa kuormaa laajemmalle radan pituussuunnassa, oletettavasti jotkin, esimerkiksi kahden telivälin aiheuttamat kuormitukset jakautuvatkin molemmista suunnista samalle pölkylle. Tästä syystä reunimmaisille pölkylle voi tulla kaksinkertainen kuormitus pohjaimettomaan tilanteeseen verrattuna. Kuvassa 29. esitetyt pohjapaineen huippujen loivenemiset eivät välttämättä todellisuudessa toteudu sellaisenaan, mikä voi vaikuttaa värähdysaaltojen syntyyn tai pienentää pohjaimen todellista vaikutusta tärinävaimennuksessa.

Viimeisellä mallilla tutkittiin pengerpaksuuden vaikutusta kuorman välittymiseen pohjamaalle Plaxis 2D-mallissa verrattuna Ballasted Track Simulatorin 3D malliin. Kolmiulotteisessa tilanteessa suurempi pengerpaksuus vaikuttaa junan pohjamaalle aikaansaaman jännitysmaksimin pienentymiseen. Kokonaiskuormitus pysyy samana, kuten pohjaimen aiheuttaman kuormanjakautumisen muutoksissa, mutta penkereen alapohjasta maaperälle välittyvä kontaktipaine pienenee pengerpaksuuden ja siten laajenevan pinta-alan kasvaessa. Pengerpaksuudella on merkitystä myös maapohjaan kohdistuvan rasituksen 'dynaamisuuteen' sekä välittyvään taajuussisältöön. Pengerpaksuuden kasvaessa korkeammat taajuudet häivytyivät. Mallinnuksen tuloksena todettiin, että Plaxis 2D-mallissa pengerpaksuuden vaikutus kuorman välittymiseen pohjamaalle ei toistu oikealla

tavalla, minkä takia korkeammat taajuudet välittyvät todellista paremmin myös paksuilla penkereillä. Pengerpaksuustarkasteluissa käytettiin kaikissa pohjamaana välimaalaji silttiä. Oletettavasti pengerpaksuuden merkitys kitkamailla ja esimerkiksi tiiviillä moreeneilla ei ole kovin merkittävä, sillä pengermateriaalin ja pohjamaan ominaiset leikkausaallon nopeudet ovat hyvin samaa luokkaa. Pehmeillä pohjamailla pengerpaksuuden merkitys on todennäköisesti suurempi.

Kokonaisuutena pohjain ja pengerpaksuus vaikuttavat molemmat pohjamaahan välittyvän kontaktipaineen dynaamisuuteen ja muotoon. Pohjain loiventaa esimerkiksi akselivälisiä aiheutuvia värähtelytaajuuksia. Paksulla ratapenkereellä on käytännössä samantyyppinen vaikutus. Matalat taajuudet välittyvät joka tapauksessa pengerpaksuudesta riippumatta, sillä junan kokonaispaino pysyy samana. Mikäli kyseessä on riittävän paksu esimerkiksi yli 3 m penger, maahan kohdistuva dynaaminen komponentti pienenee lähes olemattomiin. Silloin ohittava juna aiheuttaa vain yksittäisen kuormituspulssin, joka ei aiheuta resonanssia maaperässä. Koska pohjain ja pengerpaksuus vaikuttavat nimenomaan ratapenkereestä pohjamaan pintaan kohdistuvaan jännitykseen, niillä on oletettavasti suurin vaikutus tilanteissa, joissa primäärinen joustolähde sijaitsee pohjamaan pintaosassa. Näissä tilanteissa vaikutus olisi suurin maan pintaosassa etenevään Rayleigh-aaltoon. Tällaisia kohteita voisivat olla esimerkiksi välimaalajit siltti ja hiekka. Pehmeillä savilla primäärinen jousto tulee pääosin syvemmältä maaperästä, kun koko pehmeä kerros reagoi herätteeseen ja kokoonpuristuu ainakin määräsyyvyyteen saakka, aiheuttaen enemmän runkoaaltoilun tyyppistä värähtelyä. Tämän tyyppisillä pohjamailla pohjaimella ei oletettavasti ole merkittävää hyötyä ainakaan matalimpiin taajuuksiin. Moreenilla tehdyissä mallinuksissa pohjaimen vaimennusteho oli hyvä, mutta ongelmalliset matalat taajuudet eivät jäykkien kitkamaalajien olosuhteissa leviä kovin herkästi tai laajalle ympäristöön. Sen tyyppiset värähtelyongelmat eivät siis yleensä kohdistu moreenimaille, joten värähtelyvaimennuksen tarvettakaan ei ole.

Pölkyn alapinnan pohjapaineeseen perustuva malli ottaa tehdyistä tarkasteluista parhaiten huomioon pohjainten vaikutuksen kuorman jakautumisen näkökulmasta. Heräte on realistinen, ja vastaa Vok-tavaravaunun aiheuttamaa kuormitusta. Herätteestä aiheutuvat taajuusalueet ja niiden monikerrat ovat realistisia. Puuttuvat radan epätasaisuuksista jne. aiheutuvat taajuusalueet eivät haittaa, koska niistä ei tässä mallinnustarkastelussa oltu kiinnostuneita. Kuitenkin malli voidaan katsoa monilta osin puutteelliseksi kuvaamaan 3D-tilannetta rautatietärinän syntyemisessä ja leviämisessä ympäristöön. Malli yliarvioi todellisia heilahdusnopeuksia. Radan pituussuuntaista interferenssiä ja ratapenkereen paksuutta ei huomioida. Tarkkuus, jolla tällä mallinnustavalla saatuja tuloksia voi-

daan hyödyntää on lähinnä likimääräinen. Mallin perusteella ja sen tuloksia muihin tietoihin yhdistelemällä voidaan tehdä arvio, missä tilanteessa pohjain vaimentaa vähän, paljon tai ei lainkaan vaimenna junan aiheuttamaa värähtelyä. Mallin perusteella ei voida tehdä esimerkiksi prosentuaalisia arvioita vaimennuskyvystä kussakin tilanteessa tai erityyppisillä pohjaimilla. Huomioitavaa on, että virhelähteitä ja yksinkertaistuksia sisältyy 2D-mallinnukseen useita. Kaikki mallinnukset tehtiin lineaarielastisella materiaalmallilla, joka ei ole tarkin mahdollinen saatavilla oleva materiaalmalli. Ylipäänsä kaikki FEM-mallinnuksella tehdyt simuloinnit ovat likimääräisiä arvioita todellisesta mallinnustilanteesta. Numeerisilta virheiltä ei täysin voida välttyä. Laskentatulokset eivät sellaisenaan päde eksplisiittisesti edes täysin vastaavan kaltaisiin kohteisiin maastossa, vaan taustalla vaikuttavia tekijöitä on aina useita erilaisia.

Kaikki edellä mainitut tekijät ja laskentatulokset huomioiden tuloksista koostettiin yhteenvedo taulukkoon 6. Taulukossa on esitetty kirjoittajan näkemys siitä, missä olosuhteissa pohjaimella olisi suurin vaikutus tärinänvaimennuksen kannalta, ja missä tilanteissa pohjaimen käytöstä ei ole juurikaan hyötyä tärinänvaimennuksen näkökulmasta. Pohjaimen vaikutus rautatietärinän vaimennukseen on työn perusteella suurin matalilla pengerpaksuuksilla välimaalajeilla, joilla primäärinen jousto syntyy lähellä pohjamaan pintaosaa.

Taulukko 6. *Pohjaimen vaikuttavuus tärinän vaimennuksen kannalta eri mallinnustilanteissa (+++ vaimentaa eniten, - ei vaikutusta)*

VOK-VAUNULLINEN JUNA		PYSTYSUUNTAINEN HEILAHDUSNOPEUS	
		Matala 1–5 Hz	Korkea 5–15 Hz
SAVI	Matala, alle 1 m pengeri	-	-
	Penger 2,4 m	-	+
SILTTI	Matala, alle 1 m pengeri	++	+++
	Penger 2,4 m	+	++
MOREENI	Matala, alle 1 m pengeri	++	++
	Penger 2,4 m	++	++

## 7. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Erityisesti raskaan tavarajunaliikenteen aiheuttama matalataajuinen värähtely koetaan usein haitallisena ja asumismukavuutta heikentävänä. Tärinäongelmat ovat yleisimpiä pehmeikköolosuhteissa, joita on Suomessa erityisesti Länsi- ja Lounais-Suomen alueilla. Rautatieliikenteen aiheuttaman tärinän muodostumiseen vaikuttavat mm. maaperäolosuhteet, ratarakenteen ominaisuudet sekä radalla liikennöivän kaluston ominaisuudet ja kulkunopeus. Värähtelyaaltojen etenemisen ja vaimenemisen arviointi on usein hankalaa, sillä siihen vaikuttavat monet tekijät, kuten maaperän ominaistaajuus, maaperän kerroksellisuus ja kerrospaksuus sekä värähdysaaltojen heijastuminen eri kohteista. Rautatietärinän vaimentamiseen on olemassa monia tutkittuja keinoja, mutta useat niistä ovat kalliita ja hankalia toteuttaa olemassa oleville ratarakenteille.

Työn tavoitteena oli tutkia ratapölkyn alapintaan asennettavan joustoelementin eli pölkyn pohjaimen toimintaa rautatietärinän vaimentamisessa. Tarkoituksena oli luoda laskentamalli Plaxis 2D -ohjelmalla, ja selvittää pohjaimen toimintaa eri maaperäolosuhteissa. Pohjainten toiminnan mallintaminen tärinävaimennuksessa 2D-laskennalla osoittautui hankalaksi, eikä sitä ei onnistuttu täysin kuvaamaan yhdellä mallilla. Vaimennuskykyyn ja fysikaalisiin ilmiöihin sen taustalla päästiin kuitenkin perehtymään pilkkomalla kokonaisuutta osiin, ja yhdistelemällä eri laskentamalleja ja -menetelmiä ja soveltamalla niistä saatuja tuloksia.

Työssä tehtiin kaksi hieman eri periaatteella toimivaa mallia, jotka molemmat kuvasivat osittain pohjaimen vaikutusta osana ratarakennetta. Ensimmäisessä mallissa pohjain mallinnettiin suoraan Plaxikseen joustoelementtinä pölkkyelementin alle, ja herätteenä käytettiin Tampereen Yliopiston mittausdataa 70 km/h kulkunopeudella. Toisessa mallissa hyödynnettiin Marko Peltomäen Ballasted Track Simulator -laskentaohjelmaa herätteen muodostamisessa. Pohjaimen vaikutusta radan pituussuuntaiseen kuorman jakautumiseen pyrittiin tuomaan 2D-malliin herätteellä, joka kuvasi muuttuvaa pohjapainetta ratapölkyn alapinnassa. Laskelmat tehtiin käyttäen kolmea eri pohjamaatyyppeä (savi, siltti ja moreeni), kahta eri junan kulkunopeutta (50 km/h ja 70 km/h) sekä kahta eri jäykkyyksistä pohjainta ja pohjaimetonta vertailutilannetta. Lisäksi tutkittiin pengerkorkeuden vaikutusta värähtelyn taajuusjakaumaan vertailemalla Plaxis 2D-mallin tuloksia Ballasted Track Simulator -mallilla saatuihin tuloksiin.

Mallinnusten tuloksia tarkasteltiin pystysuuntaisen heilahdusnopeuden kautta. Tarkastelupiste sijaitsi maanpinnan tasossa 14 m etäisyydellä raiteen keskilinjasta. Hallitsevat



taajuudet riippuivat jonkin verran maaperätyypistä sekä junan kulkunopeudesta. Taajuudet esitettiin terssikaistoittain sekä FFT kuvaajina.

Työssä saadut tulokset antavat jonkinlaista käsitystä pohjainten hyödyllisyydestä rautatietärinän vaimentamisessa. Pohjaimen vaikutus rautatietärinän vaimennukseen on työn perusteella suurin matalilla pengerpaksuuksilla välimaalajeilla, joilla primäärinen jousto syntyy lähellä pohjamaan pintaosaa. Vaimennuskykyä onnistuttiin tarkastelemaan erityisesti matalataajuisen tärinän vaimenemisen näkökulmasta, mikä oli työssä yhtenä tavoitteena. Pohjainten toimintaperiaatetta onnistuttiin työssä pohtimaan laajemmin, ja hieman eri näkökulmista kuin aiemmissa tutkimuksissa, joista useimmat ovat perustuneet jonkinlaiseen jousi-massa-malliin. Tulosten perusteella voidaan antaa varovaisia suosituksia pohjainten soveltuvuudesta rataverkolle erilaisiin kohteisiin. Tulokset eivät ole täysin yleistettävissä kaikenlaisille kohteille, ja niitä hyödyntäessä on ymmärrettävä 2D-laskennan rajallisuus. Tuloksien tarkentamista 3D-mallinnuksella kannattaisi tutkia. Lisäksi pohjaimien soveltuvuutta kaikkein pehmeimmille maaperäolosuhteille, kuten savikoille olisi hyödyllistä tutkia yhdistämällä mallinnukseen koerakenne ja mittauksia. Pohjainten toimintaa mallinnettiin vain raskaan Vok-tavarajunan nopeuksilla 50 km/h ja 70 km/h. Mallinnuksia voisi olla hyödyllistä tehdä myös muilla kalustotyypeillä sekä kulkunopeuksilla.

Kaikissa mallinuksissa pehmeämmän pohjaimen vaikuttavuus tärinän kannalta oli suurempi kuin keskijäykän pohjaimen. Todellisessa ratarakenteen suunnittelu- ja mitoitustilanteessa pohjaimen valintaa ohjaavat tärinänvaimennusominaisuuksien lisäksi myös muut tekijät. Esimerkiksi ratarakenteen sallittu palautuva pystysuuntainen siirtymä voi rajoittaa joissain tilanteissa valittavan pohjaimen ominaisuuksia. Ominaisuuksiltaan erilaisten pohjainten toimivuutta eri käyttötilanteissa voisi olla hyödyllistä tutkia tarkemmin.

# LÄHTEET

A-Insinöörit. (2022) *Testirata Pori-Mäntyluoto - pohjainpölkkyjen tärinän jatkotutkimus*. [Raportti]. Espoo.

Ali Zakeri J, Esmaeili M, Heydari-Noghabi H. (2016) *A field investigation into the effect of under sleeper pads on the reduction of railway-induced ground-borne vibrations*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, vol. 230, issue 3. Teheran, Iran.

Auersch, L. (2024) *Mitigation of railway induced ground vibration by soft support elements and a higher bending stiffness of the track*. [Artikkeli]. Applied Sciences 14, no. 3: 1244. Berlin: Federal institute of material research and testing (BAM).

Auersch, L., Rücker, W. (2015) *Mitigation Measures against Vibration for Ballasted Tracks – Optimisation of Sleepers, Sleeper Pads and the Substructure by Combined Finite-Element Boundary-Element Calculations*. [Artikkeli]. Nielsen, J., et al. Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, vol 126. Springer, Berlin, Heidelberg.

Bentley Systems. (2024a) Plaxis 2D 2024.2. General Information Manual 2D.

Bentley Systems. (2024b) Plaxis 2D 2024.2. Material Models Manual 2D.

Bentley Systems. (2024c) Plaxis 2D 2024.2. Reference Manual 2D.

De Vos, P. (2017) *Railway induced vibration*. UIC International Union of Railways. [Raportti]. [Viitattu 23.8.2024]. Saatavissa: <https://uic.org/IMG/pdf/uic-railway-induced-vibration-report-2017.pdf>

Geoengineer. (2024). *Numerical Modelling: The Mohr-Coulomb Model*. [Artikkeli]. [Viitattu 11.12.2024]. Saatavissa: <https://www.geoengineer.org/education/numerical-constitutive-modeling/numerical-modelling-the-mohr-coulomb-model>

Getzner. (2024) *Under sleeper pads for ballasted track*. [Esite]. Bürs: Getzner Werkstoffe GmbH. [Viitattu 3.10.2024]. Saatavissa: <https://www.getzner.com/en/products/rail-products/sleeper-pads>

Grönroos, A. (2024) *Radan rakennekerrosten ominaisuuksien vaikutus geometriavirheen syntyyn*. [Diplomityö]. Tampereen yliopisto, Rakennetun ympäristön tiedekunta. Tampere.

Haapola, J., Hellsten, L., Huuska, O. & Viitanen, P. (2018) *Resonanssi 5: Jaksollinen liike ja aallot*. e-Oppi Oy.

Johansson, A., Anders, K., Nielsen, J., Bolmsvik, T., Lundén, R. (2008) *Under sleeper pads – Influence on dynamic train – track interaction*. [Artikkeli]. Wear, vol. 265, no. 9, s. 1479-1487.

- Kalliainen, A., Kolisoja, P. & Nurmikolu, A. (2014) *Radan 3D-rakennemalli ja rata-  
rakenteen kuormituskestävyys*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä.  
55/2014. Helsinki.
- Kolisoja, P. (1997) *Resilient deformation characteristics of granular materials*.  
Tampereen teknillinen korkeakoulu. Tampere.
- Langefors, U. & Kihlström, B. (1967) *The modern technique of rockblasting*. 3<sup>rd</sup>  
edition. Uppsala: Almqvist & Wiksell.
- Loy, H. (2012) Mitigating vibration using under-sleeper pads. [Artikkeli]. *Railway  
Gazette International*, Vol. 168, s. 40–42.
- Loy, H., Augustin, A., Tschann, L. (2018) *Reduction of Vibration Emissions and  
Secondary Airborne Noise with Under-Sleeper Pads—Effectiveness and Experi-  
ences*. [Artikkeli]. Anderson, D., et al. *Noise and Vibration Mitigation for Rail  
Transportation Systems. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidiscipli-  
nary Design*, vol 139. Springer, Cham.
- Liikennevirasto. (2011) *Massanvaihdon suunnittelu*. Helsinki. Liikenneviraston  
ohjeita 11/2011. Helsinki.
- Liikennevirasto. (2018) *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3 – Radan rakenne*. Li-  
ikenneviraston ohjeita 13/2018. Helsinki.
- Loponen, T., Salmenperä, P. & Nurmikolu, A. (2016) *Liikkuvan kaluston ja rai-  
teen välinen vuorovaikutus ja sen dynaaminen mallinnus*. Liikenneviraston tutki-  
muksia ja selvityksiä 14/2016, Helsinki, Liikennevirasto.
- Mobley, R. K. (1999) *Vibration Fundamentals*. 1st edition. San Diego: Elsevier.
- NS 8176. (1999) *Vibrasjoner og støt. Måling i bygninger av vibrasjoner fra land-  
basert samferdsel og veiledning for bedømmelse av virkning på mennesker*.  
Oslo: Norges Standardiseringsförbund (NSF)
- Ollila, T. (2021) *Värinä, värähtely ja tärinä. Mitä eroa niillä on?* MIP Electronics  
Oy:n blogi. 7.9.2021. [Blogi]. [Viitattu 23.8.2024]. Saatavissa:  
[https://www.mip.fi/fi/blogi/203-vaerinae-vaeraehtely-ja-taerinae-mitae-eroa-niil-  
lae-on](https://www.mip.fi/fi/blogi/203-vaerinae-vaeraehtely-ja-taerinae-mitae-eroa-niil-lae-on)
- Pandrol. (2023) *Under Sleeper Pad - Sustainable Resilient Systems*. [Esite]. [Vii-  
tattu 21.12.2024]. Saatavissa: [https://www.pandrol.com/wp-con-  
tent/uploads/2023/03/Under-Sleeper-Pads-E-EN-1.pdf](https://www.pandrol.com/wp-content/uploads/2023/03/Under-Sleeper-Pads-E-EN-1.pdf)
- Pelho, A. & Mansikkamäki, J. (2021) *Modelling the railway induced ground vibra-  
tions in soft soil areas of Western Finland*. [Artikkeli]. IOP Conf. Ser.: Earth Envi-  
ron. Sci.
- Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. (2013) *Radan pystysuuntainen  
jäykkyys ja sen mittaaminen*. Helsinki: Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä  
6/2013.
- Peltomäki, M., Luomala, H. & Kolisoja, P. (2024) *Simulating the effects of struc-  
tural discontinuities on the long-term behavior of the ballasted railway track*.  
Tampereen yliopisto.

Rao, S. S. (2011) *Mechanical vibrations*. 5th ed. Upper Saddle River, (N.J.): Pearson.

RIL 253-2024. (2024) *Rakentamisen aiheuttamat tärinät*. Helsinki. Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL.

Salminen, T. (2021) *Omaan tahtiin fysiikka – Värähtely ja aaltoliike*. [Verkkosivu]. [Viitattu 23.08.2024]. Saatavissa: <https://fysiikka.omaantahtiin.com/etusivu/fysiikka-5/v%C3%A4r%C3%A4htely-ja-aaltoliike>

Suomen ympäristökeskus SYKE. (2012) *Suomen maalajien ominaisuuksia*. Nanna Ronkainen. Helsinki.

Syrjä, R. (2019). Elementtimenetelmään perustuvan ohjelman käytön perusteet. Kurssimoniste. Aalto yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu, Rakennustekniikan laitos. [Viitattu 10.10.2024]. Saatavissa: [https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/952739/course/section/143156/L\\_FEM\\_FI\\_20190905.pdf](https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/952739/course/section/143156/L_FEM_FI_20190905.pdf)

Talja, A. (2004) *Suositus liikennetärinän mittaamisesta ja luokituksesta*. Espoo. VTT. VTT Tiedotteita - Research Notes 2278. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2004/T2278.pdf>

Talja, A & Törnqvist, J. (2006) *Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa*. VTT Working Papers 50.

Talja, A., Vepsä, A., Kurkela, J. & Halonen, M. (2008) *Rakennukseen siirtyvän liikennetärinän arviointi*. VTT tiedotteita 2425. Espoo.

Talja, A. & Fulopic, L. & Kurkela, J. & Vepsä, A. & Törnqvist, J. (2009) *Tärinäes- teet liikennetärinän vaimentamisessa*. Espoo. VTT.

Talja, A. (2011) *Ohjeita liikennetärinän arviointiin*. Espoo. VTT tiedotteita – Research Notes 2569.

Talja, A. & Törnqvist, J. (2014) *Liikennetärinä: Alueiden tärinäkartoitus ja raken- teiden vaurioitumisalttius*. VTT-R-04703-14. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf>

Thompson, D. (2008) *Railway Noise and Vibration - Mechanisms, Modelling and Means of Control*. 1st edition. San Diego: Elsevier.

Toikkanen, S. (2022) *Rautatietekniikan kokonaisuus*. Luentokalvot, Tampereen yliopiston opintojakso RAK.402 Rautatiesuunnittelu – RASU.

Varis, R. (2018) *Kehäradan pohjaimellisten vaihteiden monitorointi*. Helsinki: Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 66/2018.

Vuolio, R. & Halonen, T. (2010) *Räjätystyöt*. 2. painos. Helsinki. Suomen Rakennusmedia Oy.

Väylävirasto. (2020) *Luumäki – Imatra ratahanke: Mistä on ratarakenne tehty?* [Artikkeli]. [Viitattu 20.9.2024]. Saatavissa: <https://vayla.fi/-/mista-on-ratarakenne-tehty->

Väylävirasto. (2021) *Pori-Mäntyluoto urakka-aineisto*.

Väylävirasto. (2023) *Eurokoodin soveltamisohje: Geotekninen suunnittelu – NCCI7*. Väyläviraston ohjeita 14/2023. Helsinki.

Väylävirasto. (2024) *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11 – Radan päällysrakenne*. Väyläviraston ohjeita 15/2024 v2. Helsinki.

Väylävirasto. (2024) *Rautateiden verkkoselostus 2024*. Väyläviraston julkaisuja 56/2024. Helsinki: Väylävirasto.

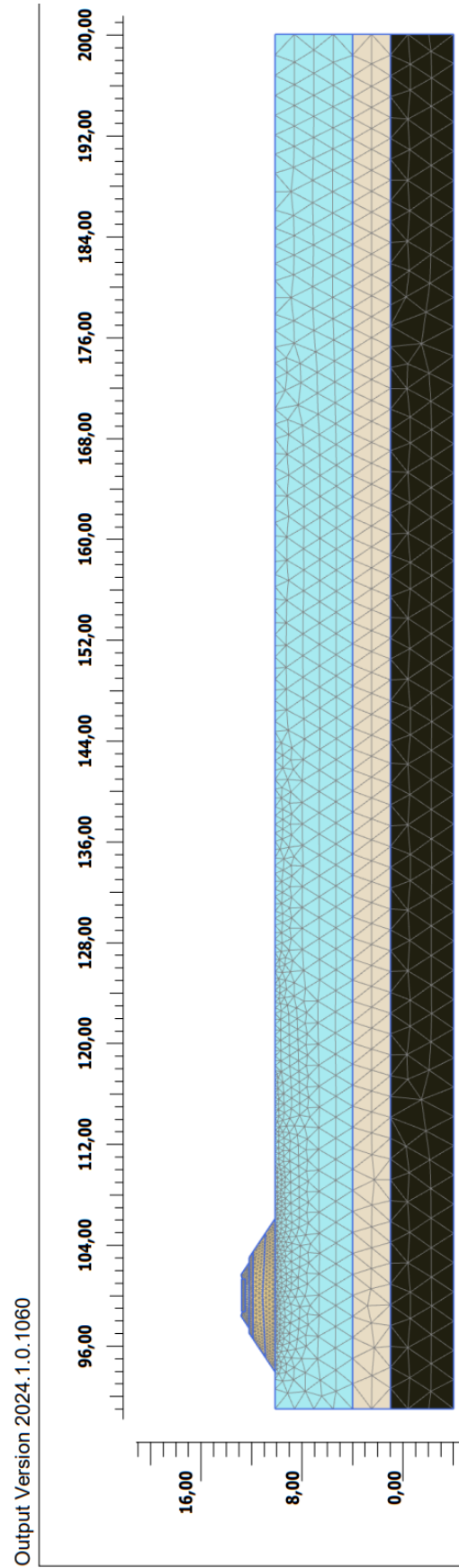
Väylävirasto. (2024) *Tietoa väylistä – Rataverkko*. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.9.2024]. Saatavissa: <https://vayla.fi/vaylista/rataverkko>

Väylävirasto karttapalvelu. (2024) Saatavissa: <https://suomenvaylat.vayla.fi/>

Witasse, R. (2021) *Why Run PLAXIS 3D Analysis?* Bentley. [Blogikirjoitus]. [Viitattu 13.12.2024]. Saatavissa: <https://blog.bentley.com/software/why-run-plaxis-3d-analysis/>

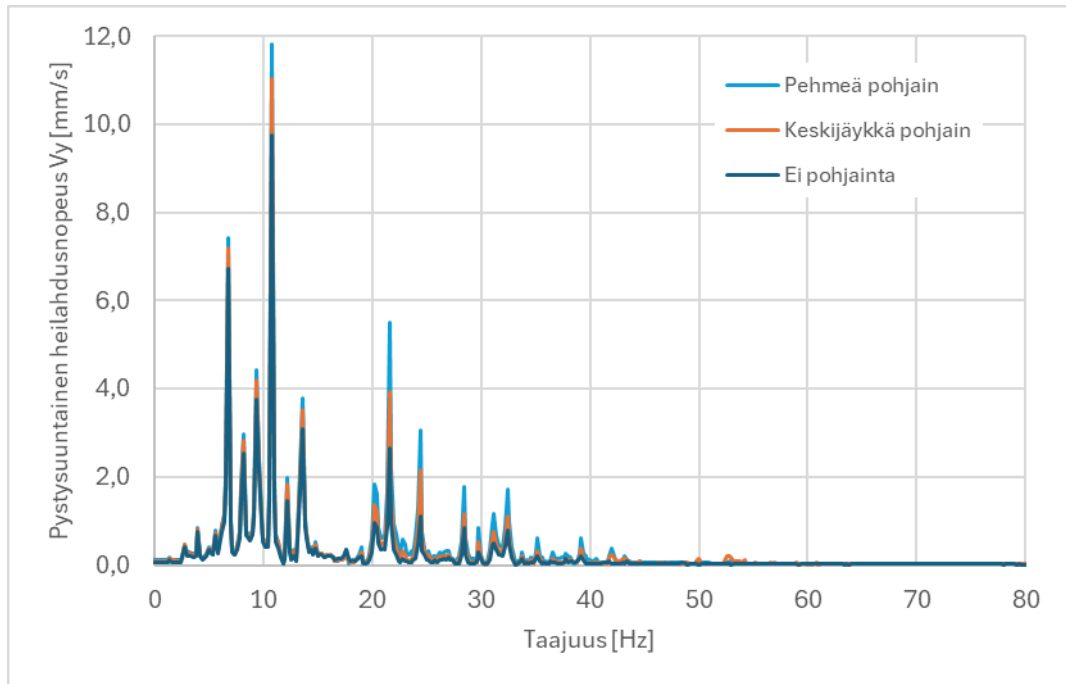
Ympäristönsuojelulaki. 27.6.2014/527. Finlex. [Viitattu 27.9.2024]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527>

# LIITE 1: LASKENTAGEOMETRIA

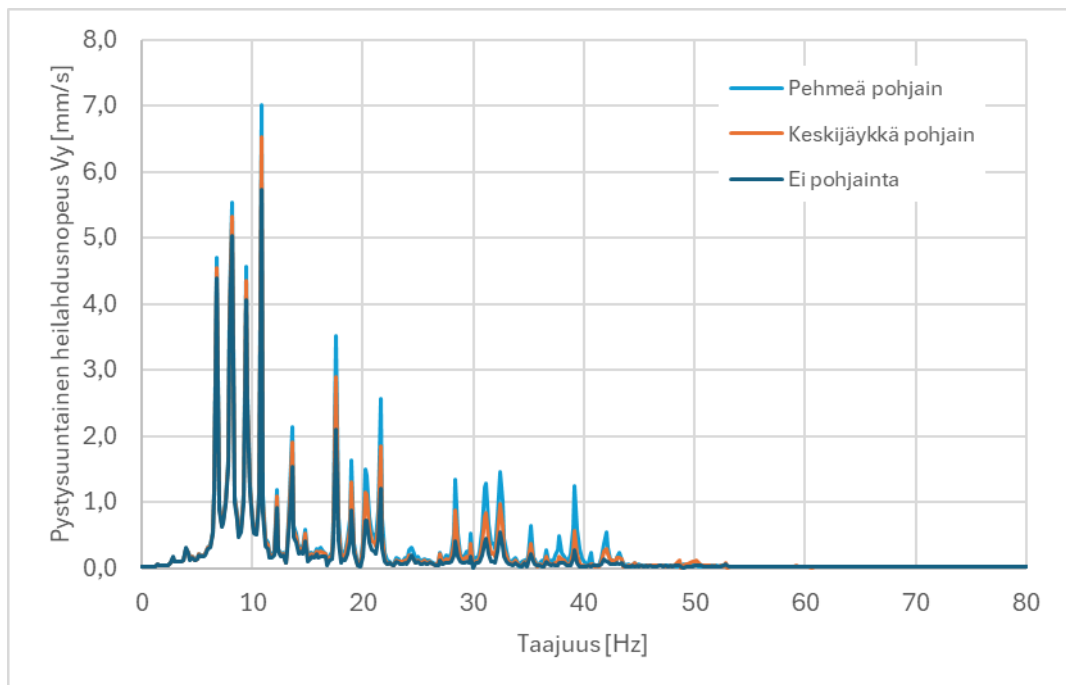


## LIITE 2: FFT-KUVAAJAT

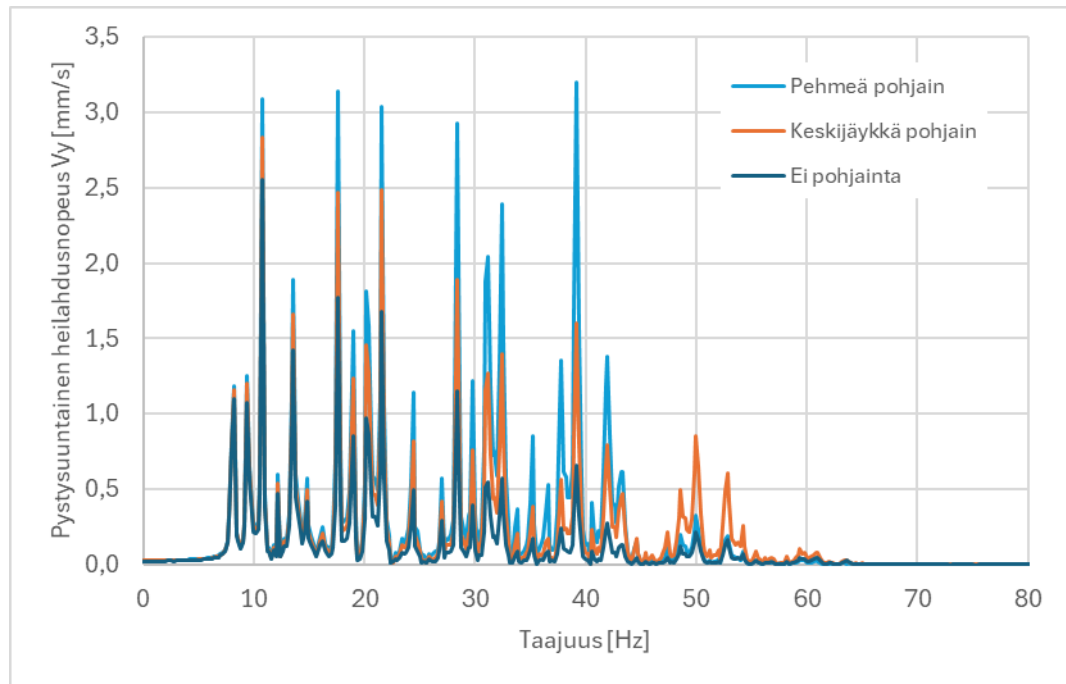
### 7.1 Pölkyn yläpinnan siirtymään perustuva malli



**Kuva 46.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa savella 70 hm/h junanaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.



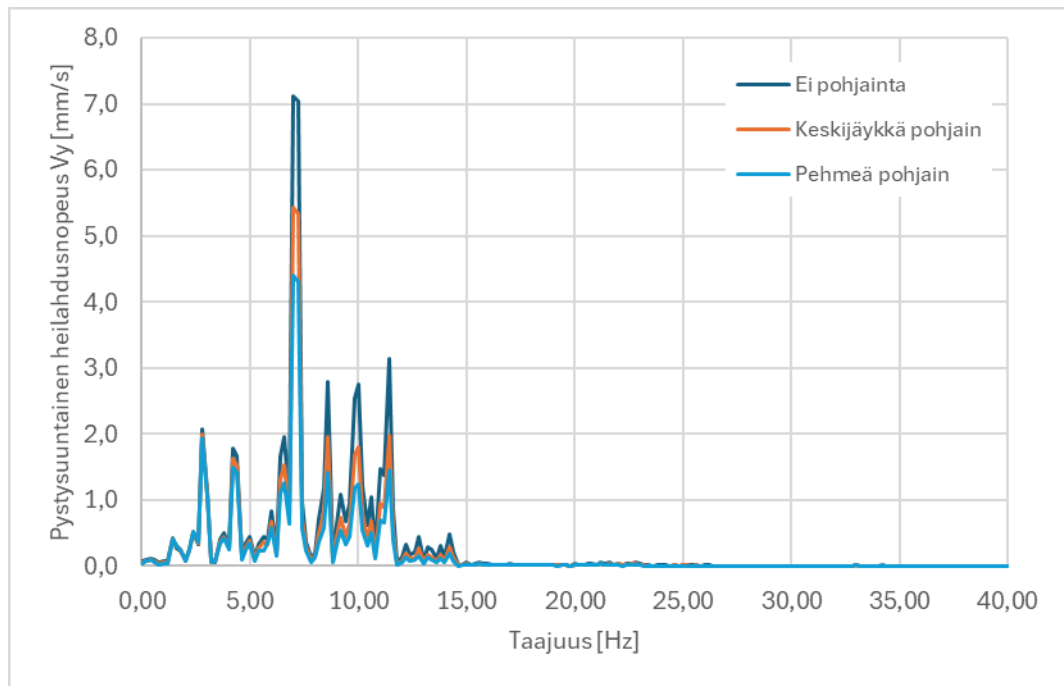
**Kuva 47.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa sillillä 70 km/h junanaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.



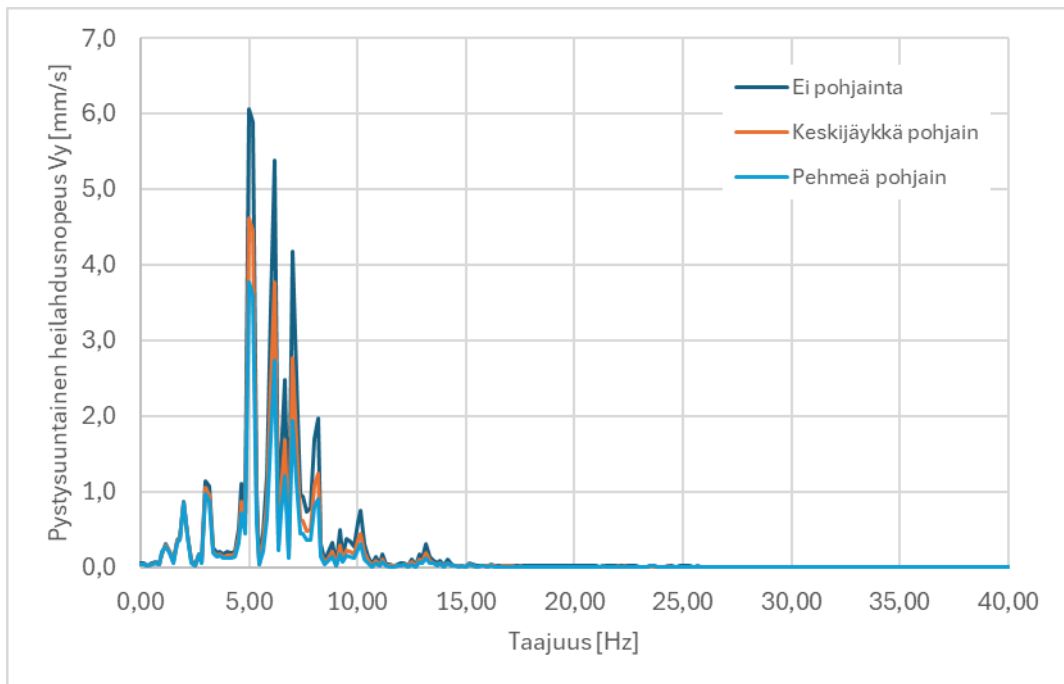
**Kuva 48.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa moreenilla 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.



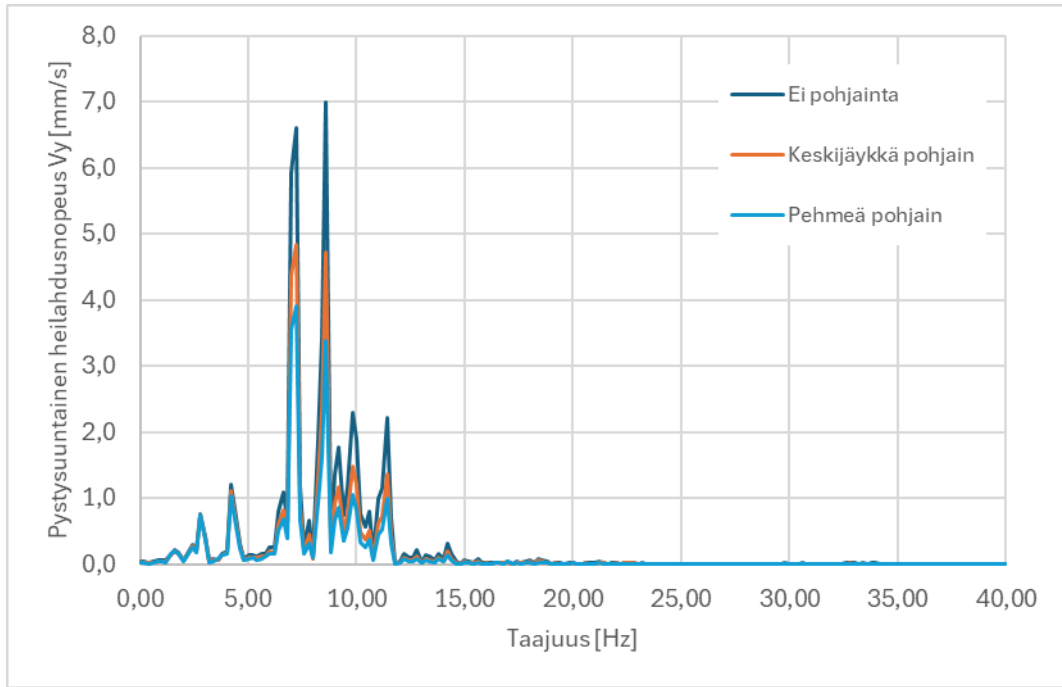
## 7.2 Pölkyn pohjapaineeseen perustuva malli



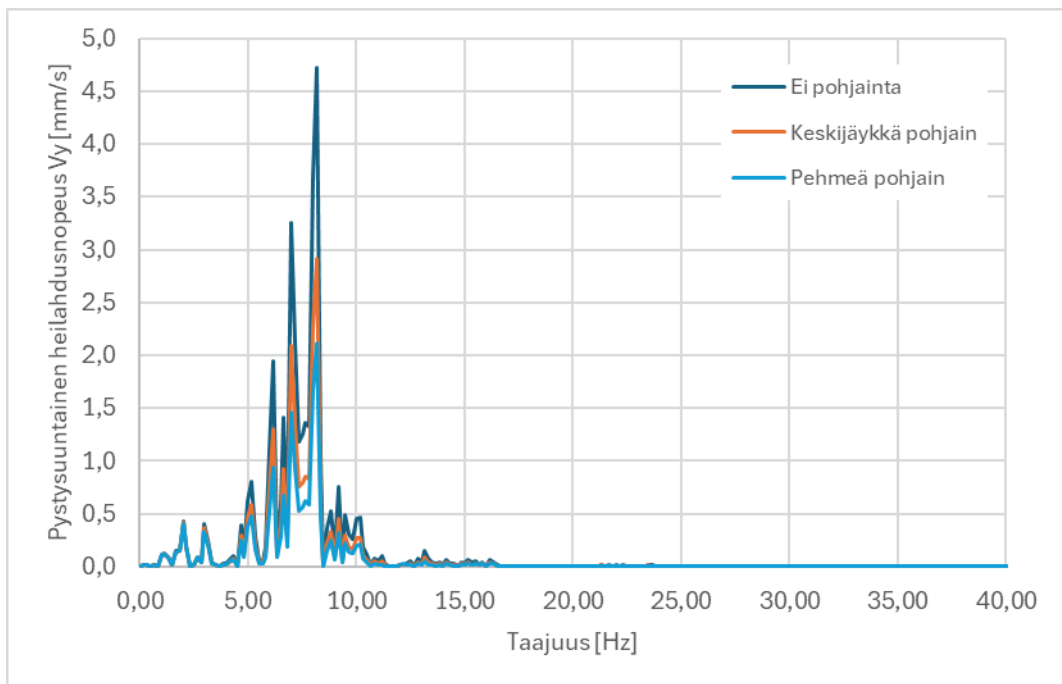
**Kuva 49.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa savella 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla



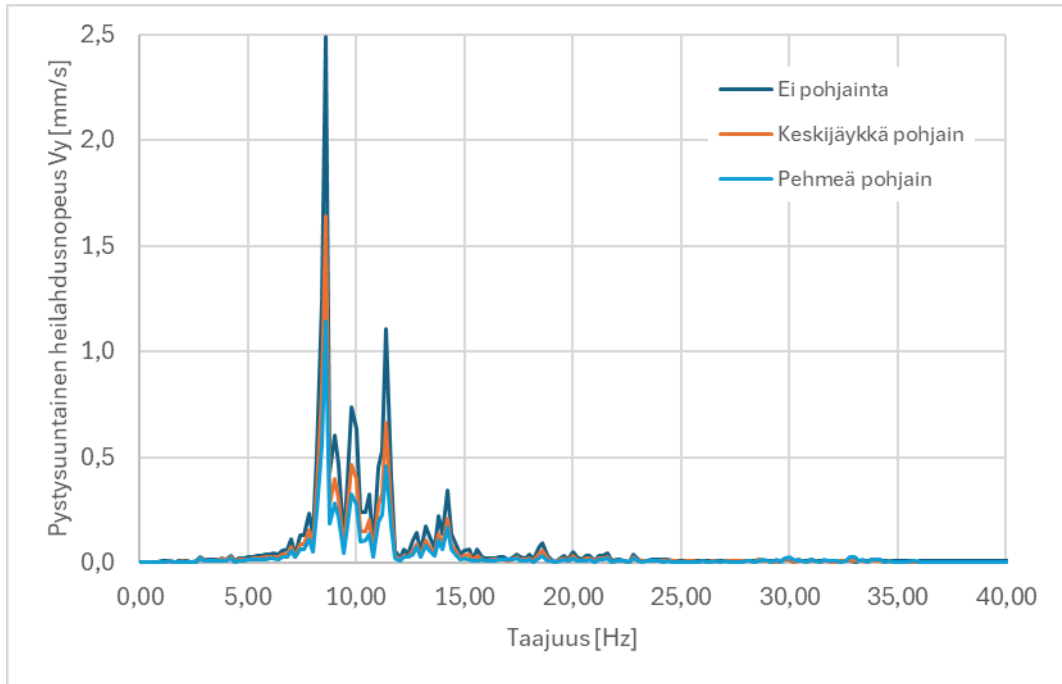
**Kuva 50.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa savella 50 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla



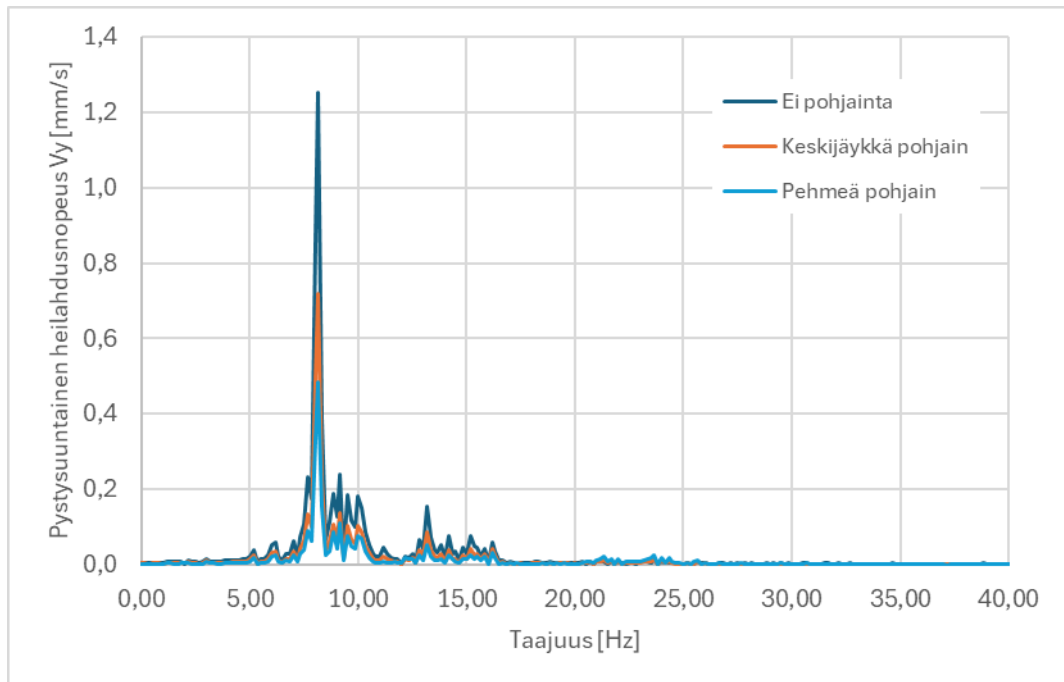
**Kuva 51.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa siltillä 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.



**Kuva 52.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa siltillä 50 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.



**Kuva 53.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa moreenilla 70 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.



**Kuva 54.** Pystysuuntainen heilahdusnopeus  $V_y$  taajuustasossa moreenilla 50 km/h junaherätteellä eri pohjainvaihtoehdoilla.