

Teemu Partanen

RAUTATIEN PENGERVÄRÄHTELY- RISKIN ARVIOINTI JA MALLINTAMINEN

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Marraskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Teemu Partanen: Rautatien pengervärähtelyriskin arviointi ja mallintaminen
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2020

Tämän diplomityön aiheena oli rautatien pengervärähtelyriskin arviointi. Työn tarkoituksena oli selvittää, mitä on pengervärähtely, ja miten sen ilmenemistä voidaan arvioida. Selvitystä tehtiin maastomittauksin Perniössä sekä 2D-mallinnuksella.

Pengervärähtelyksi kutsutaan ilmiötä, jossa suurella nopeudella kulkevan junan aiheuttamat kuormitukset alkavat aiheuttaa radan pystysuuntaisten palautuvien siirtymien kasvua. Pengervärähtelyilmiö voi tapahtua, kun junan nopeus lähestyy niin kutsuttua kriittistä nopeutta. Pehmeiköille perustetuilla radoilla kriittisenä nopeutena pidetään maassa etenevän pinta-aallon nopeutta.

Pengervärähtelyn ilmenemisen kannalta olennaisia asioita ovat ohut ratarakenne, ohut kuiva-kuorikerros sekä noin 10 metrin paksuinen pehmeikkö, eli savi- tai turvekerros, jossa leikkausaallon etenemisnopeus on alhainen. Pehmeikkökerroksessa etenevän leikkausaallon nopeus vastaa likimain pinta-aallon eli Rayleigh-aallon etenemisnopeutta. Leikkausaallon havaitseminen on yksinkertaisempaa kuin pinta-aallon, joten pengervärähtelyriskin arviointia tehdään tyypillisesti pehmeikkökerroksen leikkausaallon etenemisnopeutta mittaamalla.

Leikkausaallon etenemisnopeutta voidaan mitata ja arvioida monin eri menetelmin. Eräs yleisimmistä maastossa käytettävistä menetelmistä on niin kutsuttu cross-hole -menetelmä, jossa leikkausaallon kulkuaikaa mitataan maakerroksen sisässä lähettimen ja vastaanottimen avulla. Tätä menetelmää käytettiin myös tässä työssä savikerroksen leikkausaallon etenemisnopeuksien mittaamiseen.

Tässä työssä arvioitiin Perniössä sijaitsevan pehmeikköalueen pengervärähtelyriskiä. Perniössä pienimmät cross-hole -menetelmällä mitatut leikkausaallon etenemisnopeudet olivat alle 50 m/s, eli alle 180 km/h. Myös savinäytteistä määritetyt korkeat, paikoin yli 90 %, vesipitoisuudet viittaavat saven alhaiseen leikkausaallon etenemisnopeuteen. Näistä syistä ja alueen pohjasuh-teista päätellen riski pengervärähtelyyn on olemassa.

Maastomittauksien lisäksi pengervärähtelyriskiä arvioitiin 2D-mallinnuksella. Mallinnustulosten perusteella pystysuuntaiset palautuvat siirtymät alkavat suurenemaan, kun junan nopeus saavuttaa 60 % pehmeikkökerroksen leikkausaallon etenemisnopeudesta. Siirtymien kasvu korostuu varsinkin, kun junan kulkusuunta pehmeiköllä on savikerroksen ohenevaan suuntaan.

Avainsanat: rautatie, pengeri, värähtely, pengervärähtely, cross-hole, mallinnus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Teemu Partanen: Evaluating the risk of ground vibrations caused by high-speed trains
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
November 2020

The subject of this master's thesis was to evaluate the risk of ground vibrations caused by high-speed trains. The objective was to analyse the amplification of vertical ground vibrations, so-called ground vibration boom. The work includes field measurements at the railway embankment and modelling with PLAXIS 2D software.

Ground vibration amplification is expected to occur when train speed approaches the velocity of the Rayleigh waves in the ground surface. At the railways built on soft subgrade the velocity of the Rayleigh surface wave is often referred as the critical speed. Amplification is more possible to occur when the conditions at the railway includes low railway embankment, thin dry crust layer and soft subgrade with a depth approximately 10 meters. In this case soft subgrade means a peat layer or a soft clay layer where shear wave velocity is low.

Shear wave velocity in soft subgrade is approximately equal to the velocity of the surface wave. Shear waves are easier to identify and measure than surface waves. Therefore, the velocity of shear wave in soft subgrade is often used to estimate the risk of ground vibration amplifications.

The velocity of shear waves can be measured and estimated with multiple different methods. One of the most common method for field measurements is cross-hole technique. Cross-hole method was used to measure the shear wave velocities at Perniö site which is located on a soft subgrade area. The lowest shear wave velocities measured with cross-hole method were below 50 m/s which is equal to 180 km/h. Some of the clay samples had high water content of over 90% which also refers to a low shear wave velocity. Judging from these results, there is an increased risk of ground vibration amplification at the Perniö site.

In addition to field measurement, the amplification risk was also analysed with a 2D model of the railway. Based on the result of the model, the vertical displacements begin to increase when the train speed reaches 60% of the velocity of the shear waves in soft subgrade. The increase of displacements is even greater when the train is traveling from the deep clay layer towards the thinner clay layer.

Keywords: railway, high-speed train, vibration, ground vibration boom, cross-hole, modelling

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Väyläviraston tilaaman tutkimuksen yhteydessä Tampereen yliopiston Rakennetun ympäristön tiedekunnan tutkimuskeskus Terrassa. Tutkimus on osa Elinkaaritehokas väylänpito eli ETEVÄ-tutkimusohjelmaa.

Haluan kiittää työni ohjaajaa Heikki Luomalaa tämän diplomityön tekemisen mahdollistamisesta sekä suuresta avusta koko diplomityöprosessin edistämisessä. Pengervärähtely tutkimuksen aiheena vaikutti alusta lähtien mielenkiintoiselta, ja sellaisena se myös pysyi loppuun saakka, vaikka loppuhuipennuksena odotetut nopeuden noston koeajot siirtyivätkin toistaiseksi määrittämättömään tulevaisuuteen.

Kiitokset myös Juho Mansikkamäelle ohjauksesta ja neuvonnasta, erityisesti mallinnusosuudessa. Kiitos koko TerraRail-ryhmälle ja Marko Hapolle avusta työn parissa sekä mukavasta työympäristöstä. Kiitos kotiväelle tuesta lopputyön tekemisen aikana.

Tampereella, 19.11.2020

Teemu Partanen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VÄRÄHTELY RATARAKENTEESSA	2
2.1 Värähtely ilmiönä	2
2.2 Ratarakenne	6
2.3 Radalla liikennöivä kalusto	11
2.4 Junaliikenteen aiheuttama värähtely	14
2.5 Pengervärähtelyn kriittinen nopeus	18
2.6 Pengervärähtelyriskin arviointimenetelmät	20
2.7 Pengervärähtelyn aiempia tutkimuksia	21
3. PENGERVÄRÄHTELYRISKIN TUTKIMUSMENETELMÄT	25
3.1 Tutkimusmenetelmän valintakriteerit	25
3.2 Kenttämittaukset	26
3.2.1 Cross-hole -menetelmä	26
3.2.2 Down-hole -menetelmä	28
3.2.3 Seisminen CPTU-mittaus	29
3.2.4 SASW ja MASW	30
3.3 Laboratoriomenetelmät	31
3.3.1 Resonant column -menetelmä	31
3.3.2 Bender element -menetelmä	32
4. PERNIÖN PENGERVÄRÄHTELYKOHDE	33
4.1 Kohteen sijainti ja yleistietoa	33
4.2 Alueen pohjasuhteet ja -tutkimukset	37
4.3 Aiemmin tehdyt mittaukset ja toimenpiteet kohteella	38
5. MITTAUKSET JA TUTKIMUKSET PERNIÖSSÄ	40
5.1 Mittauspaikkojen valinta	40
5.2 Mittausmenetelmien valinta	42
5.3 Toteutetut mittaukset ja tutkimukset	42
5.3.1 Leikkausaallon etenemisnopeuden mittaus kentällä	43
5.3.2 Näytteiden vesipitoisuudet	47
5.4 Saadut tulokset	48
6. PENGERVÄRÄHTELYN MALLINTAMINEN	53
6.1 Pengervärähtelyn mallintaminen PLAXIS 2D -ohjelmalla	53
6.2 Perniön kohteen pengervärähtelymallinnus	59
6.3 Mallinnustulosten analysointi ja johtopäätökset	62
7. YHTEENVETO	66
LÄHTEET	68

KUVALUETTELO

Kuva 1. Värähtelyaallon käsitteitä. (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34).....	2
Kuva 2. Värähtelykomponentti. (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34).....	3
Kuva 3. Runkoaallot elastisena aaltoliikkeenä. (Vuolio 1991, s. 165)	4
Kuva 4. P- ja S-aaltojen etenemisnopeuksia [m/s] eri maa- ja kalliolajeissa. (Vuolio 1991, s. 166).....	5
Kuva 5. Maaperän liike R-aallossa. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 38)	5
Kuva 6. Raiteiden kokonaispituus vuosina 1862–2005. (Uimonen 2008, s. 16).....	6
Kuva 7. Suomen rataverkko. (Väylävirasto karttapalvelu 2020).....	7
Kuva 8. Radan rakenteen poikkileikkaus ja siihen liittyviä nimityksiä. (Liikennevirasto 2018, s. 8)	8
Kuva 9. GTK:n maaperäaineisto Etelä- ja Keski-Suomesta. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 39)	10
Kuva 10. Rataverkon luokittelu liikennöinnin mukaan. (Väylävirasto karttapalvelu 2020)	12
Kuva 11. Pendolinon mitat ja kuormat. (Liikennevirasto 2011, s. 93).....	13
Kuva 12. Sr2 kuvassa vasemmalla ja Dv12 oikealla. (VR Group 2020).....	13
Kuva 13. Junaliikenteen aiheuttama maan värähtely ja ääni. (Massarsch et al. 2002, s. 32).....	15
Kuva 14. Eri herätepisteistä lähtevän värähtelyn yhteisvaikutus. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40).....	15
Kuva 15. Junan akselin aiheuttama pystysuuntainen jännityslisäys. (Krylov 2001, s. 253).....	16
Kuva 16. Junan kuormituksesta aiheutuva taajuus nopeuden ja telivälin muuttuessa. (Hakulinen 2018, s. 10).....	17
Kuva 17. Pehmeän saven ominaistaajuuksia eri kerrospaksuuksilla.	18
Kuva 18. Kriittisen nopeuden ylitys. (Massarsch et al. 2002, s. 50–51)	19
Kuva 19. Värähtelyn kertautuminen kriittisen nopeuden ylittyessä. (Massarsch et al. 2002, s. 53)	19
Kuva 20. Ledsgårdissa mitatut leikkausaallon etenemisnopeudet. (Holm et al. 2002, s. 18).....	22
Kuva 21. Pengervärähtely rantaradalla 2004. (Hakulinen 2004, s. 10)	23
Kuva 22. Pengervärähtely Ylivieska–Liminka -rataosalla 2015. (Salmenperä et al. 2016, s. 53–54).....	23
Kuva 23. Cross-hole -menetelmän periaate. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 25).....	26
Kuva 24. Aallon oletettu ja toteutunut kulkureitti. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 26)	27
Kuva 25. Down-hole -menetelmän periaate. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 27).....	28
Kuva 26. Seismisen moduulin rakenne. (Mäenpää 2016, s. 31).....	29
Kuva 27. Kaavio tyypillisestä MASW-mittauksen kokoonpanosta. (Penumadu & Park 2005, s. 3).....	30
Kuva 28. Leikkausaallon etenemisnopeuden arviointi MASW-mittausten pohjalta. (Penumadu & Park 2005, s. 9)	31
Kuva 29. Bender element -menetelmän periaate. (Hakulinen 2018, s. 21)	32
Kuva 30. Kohteen sijainti kartalla ja alueen maaperä. (Ratadata 2020).....	33
Kuva 31. Yliskylän ylikulkusilta km 129+502.	34
Kuva 32. Radan perustamistapa ja todetut ongelmat kmv:llä 129+000–130+800. (Viljanen 2019, s. 6)	35
Kuva 33. Poikkileikkaus km 129+360. (Myyrä 1990)	37
Kuva 34. Rataosalla tehdyt siipikairaukset.	38
Kuva 35. Maatutkatulkinta kmv:llä 129+000–131+000. (Silvast 2016).....	39
Kuva 36. Mittauspisteet kartalla. (Ratadata 2020)	43
Kuva 37. Mittausjärjestelyt, km 129+400.	44

Kuva 38. Kierrekairan asennus maahan.....	45
Kuva 39. Vastaanotin ja asennustyökalu.....	45
Kuva 40. Kierrekaira ja herätteen kiihtyvyyssanturi.....	46
Kuva 41. Esimerkkikuvaaja cross-hole -mittauksesta, km 129+400.....	46
Kuva 42. Savinäyte, vasemmalla ennen irtomaan puhdistusta ja oikealla puhdistettu näyte.....	47
Kuva 43. Leikkausaallon etenemisnopeudet cross-hole -menetelmällä.....	49
Kuva 44. Mitatut arvot leikkausaallon etenemisnopeuksille verrattuna vesipitoisuuden perusteella laskettuihin arvoihin.....	51
Kuva 45. Leikkausaallon etenemisnopeuksien vertailu iteroidulla vesipitoisuuskaavalla.....	52
Kuva 46. Tasomuodonmuutos (vasemmalla) ja aksisymmetrisyys (oikealla). (Brinkgreve et al. 2017b, s. 21).....	54
Kuva 47. Radan pituusleikkaus PLAXIS-ohjelmassa.....	54
Kuva 48. Junan kahden vaunun geometria. (Krylov 2001, s. 253).....	55
Kuva 49. Telikuormien eteneminen PLAXIS 2D-mallissa.....	56
Kuva 50. Tallennuspisteiden sijainti mallissa.....	56
Kuva 51. Maksimipainumat eri leikkausaallon etenemisnopeuksilla.....	58
Kuva 52. Mitatut siirtymät Pendolino, km 129+460.....	59
Kuva 53. PLAXIS 2D -malli, Perniö kmv 129+350–129+490.....	60
Kuva 54. Maksimipainumat, 200 km/h pohjoiseen.....	62
Kuva 55. Maksimipainumat pohjoiseen ajettaessa.....	63
Kuva 56. Maksimipainumat etelään ajettaessa.....	64

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Radan päällysrakenneluokat ja raidekilometriosuudet.	9
Taulukko 2. Alusrakenneluokat. (Liikennevirasto 2018, s. 16).....	9
Taulukko 3. Yleisimmät Suomessa käytössä olevat veturityypit.	14
Taulukko 4. Vastapenkereet kmv:llä 129+328–129+480. (Myyrä 1990, s. 5)	36
Taulukko 5. Vastapenkereet kmv:llä 130+440–130+800. (Myyrä 1990, s. 10)	36
Taulukko 6. Lähtötietoja, kmv 129+340–129+480.....	40
Taulukko 7. Lähtötietoja, kmv 130+440–130+800.....	41
Taulukko 8. Saadut tulokset cross-hole -menetelmällä.	48
Taulukko 9. Saadut vesipitoisuuksien arvot.	50
Taulukko 10. PLAXIS 2D -mallissa käytetyt materiaalit ja kerrospaksuudet.	55
Taulukko 11. Maksimipainumat pehmeällä savikolla.	57
Taulukko 12. Maksimipainumat jäykemmällä savikolla.	57
Taulukko 13. Perniön mallissa käytetyt materiaalit ja kerrospaksuudet.	60
Taulukko 14. Mittapisteiden vastaavuus ratakilometreihin.	61
Taulukko 15. Maksimipainumat kmv 129+350–129+490, pohjoiseen.	61
Taulukko 16. Maksimipainumat kmv 129+350–129+490, etelään.	62

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CPT	engl. Cone Penetration Test
FEM	engl. finite element method
GTK	Geologian tutkimuskeskus
IC	InterCity
JKV	junakulunvalvonta
kmv	kilometriväli
MASW	engl. Multi-channel Analysis of Surface Waves
RATO	Ratatekniset ohjeet
rdkm	raidekilometri
SASW	engl. Spectral Analysis of Surface Waves
E	kimmomoduuli
G	leikkausmoduuli
S_u	suljettu leikkauslujuus
V_p	puristusaallon nopeus
V_s	leikkausaallon nopeus
w	vesipitoisuus
γ	maamateriaalin tilavuuspaino
λ	aallonpituus
ν	Poissonin luku
ρ	maamateriaalin irtotiheys

1. JOHDANTO

Eri puolilla maailmaa tehdyissä tutkimuksissa on todettu yhteys junaliikenteen nopeuden noston ja ratarakenteen värähtelyn kasvun välillä, kuten Ruotsissa (Madshus & Kaynia 2000) ja Yhdysvalloissa (Gao et al. 2017). Myös Suomessa on todettu ratarakenteen värähtelyn kasvua joillakin pehmeiköille rakennetuilla rataosilla, ja ilmiötä on tutkittu esimerkiksi Tampere–Seinäjoki-rataosalla (Törnqvist 2011). Pengervärähtelyn takia rataverkolle on jouduttu asettamaan nopeusrajoituksia, jotta kalusto, ratarakenne tai ympäristö eivät vaurioituisi. Nopeusrajoitukset heikentävät junaliikenteen sujuvuutta, joka on varsinkin viime vuosina noussut maassamme tärkeäksi teemaksi.

Rautatieliikenteen kuormitus aiheuttaa kiskojen ja pölkkyjen välityksellä värähtelyä maahan. Värähtelyn taajuus riippuu sekä kalustosta että päällysrakenteesta. Näiden pysyessä paikallisesti vakiona muuttuvaksi tekijäksi tulee kaluston nopeus. Pehmeillä pohjamailla maassa etenevän leikkausaallon nopeus voi olla alhainen. Tällöin suurella nopeudella liikkuva juna voi saavuttaa niin kutsutun kriittisen nopeuden, jolla junan aiheuttaman värähtelyaallon nopeus saavuttaa maan ominaisen leikkausaallon nopeuden. Tämä voi aiheuttaa palautuvien painumien suurenemista ratarakenteessa.

Tässä diplomityössä tutkitaan junakaluston nopeuden vaikutusta pengervärähtelyriskin suuruuteen. Työn alussa selvitetään pengervärähtelyn teoriaa sekä värähtelyn suuruuteen vaikuttavia maaperän ja ratarakenteen ominaisuuksia. Kolmannessa luvussa käsitellään, miten pengervärähtelyä voidaan mitata maassa erilaisilla mittausmenetelmillä. Ensin kerrotaan, millaisia pohjatutkimuksia tarvitaan maaperän ominaisuuksien selvittämiseen, ja mitä ominaisuuksia tulee tietää värähtelykäyttäytymisen selvittämiseksi.

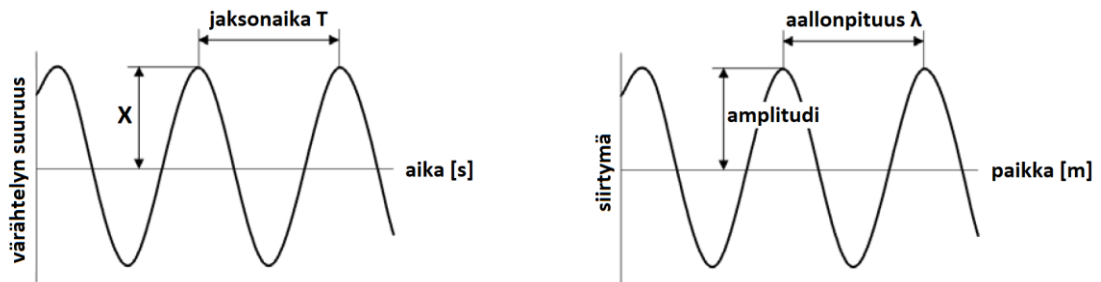
Pengervärähtelyriskin arvioimiseksi työssä tehdään leikkausaallon etenemisnopeuden mittauksia maastossa Perniön koekohteella. Tutkittava kohde sijaitsee rantaradalla rataosalla 1201 Ervelän ja Salon välisellä osuudella kilometrivälillä 129+300–130+800. Kyseisellä välillä on pienennetty nopeusrajoitus 160 km/h, jonka syyksi on linjakaavioon merkitty ”penger”. Saatujen mittaustulosten perusteella mallinnetaan ratarakenteen käyttäytymistä eri liikennöintinopeuksilla PLAXIS 2D -ohjelmistolla. Maastomittaus- ja mallinustulosten perusteella pystytään arvioimaan pengervärähtelyriskin todennäköisyyttä kohteella, mikäli liikennöintinopeutta kyseisellä välillä aiotaan tulevaisuudessa kasvattaa.

2. VÄRÄHTELY RATARAKENTEES- SÄ

Tässä luvussa käsitellään värähtelyn teoriaa ja sen ilmentymistä ratarakenteessa. Pengervärähtelyllä tarkoitetaan ratapenkereen pystysuuntaista palautuvaa painumaa liikku- van junan alla. Palautuvan painuman suuruuteen vaikuttavat ratapenkereen ja pohja- maan ominaisuudet sekä junakaluston ominaisuudet ja ajonopeus. Luvun alussa kerro- taan värähtelystä ilmiönä, radan rakenteesta sekä Suomessa käytettävästä junakalus- tosta yleisesti. Tämän jälkeen yhdistetään kyseiset asiat, eli kerrotaan, miten värähtely ilmenee ratarakenteessa. Luvun lopussa kerrotaan vielä, kuinka pengervärähtelyriskiä pystytään arvioimaan. Lisäksi kerätään yhteen Suomesta ja ulkomailta aikaisemmin saa- tuja tuloksia pengervärähtelyn ilmentymisestä.

2.1 Värähtely ilmiönä

Värähtely on väliaineessa tapahtuvaa aaltoliikettä tasapainoaseman ympärillä. Värähtely ja siihen liittyviä käsitteitä on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Värähtelyaallon käsitteitä. (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34)

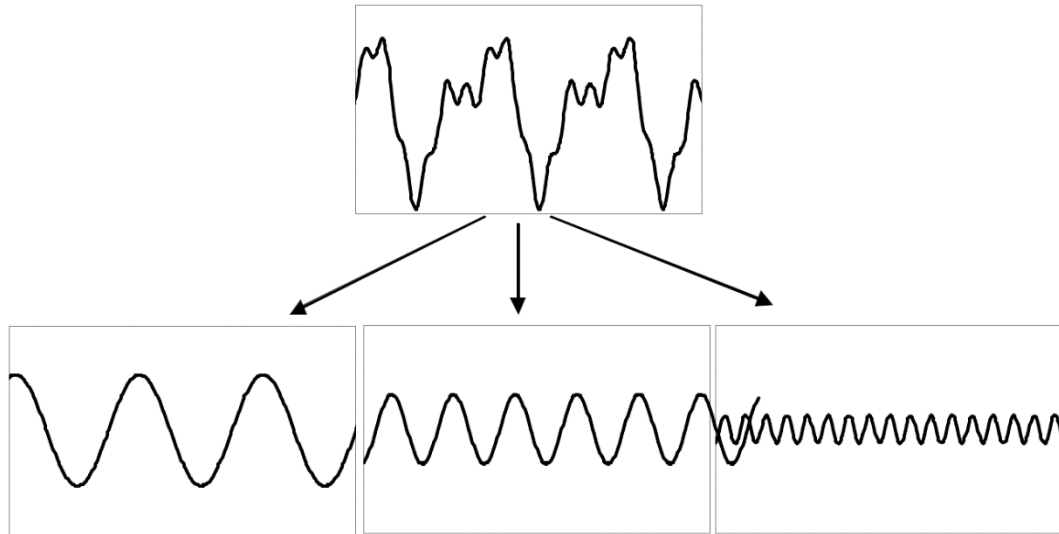
Kuvan 1 vasemmalla puoliskolla on esitetty värähtelyn suuruus ajan funktiona. Siinä jaksonaika T kertoo yhteen värähdykseen kuluvan ajan sekunteina. Jaksonajan käänteisluvun avulla pystytään määrittämään värähtelyn taajuus f kaavalla

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.1)$$

Taajuuden yksikkö on $\frac{1}{s} = Hz$ (hertsi). Taajuus kertoo, montako värähdystä tapahtuu yhdessä sekunnissa. Aaltoliikkeen taajuus riippuu aaltolähteen aiheuttamasta taajuudesta.

Kuvan 1 oikealla puoliskolla on esitetty värähtelyn siirtymä paikan funktiona. Siinä amplitudi tarkoittaa värähtelyn äärimmäistä poikkeamaa tasapainoasemasta ja aallonpi- tuus λ aaltoliikkeen kahden samassa vaiheessa olevan pisteen välistä etäisyyttä.

Monesti värähtely koostuu useasta taajuuskomponentista. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki vakioamplitudisesta värähtelykomponentista, joka on muodostunut kolmesta taajuuskomponentista.



Kuva 2. Värähtelykomponentti. (Talja & Törnqvist 2014, liite A s. 34)

Värähtelyaallon edetessä homogeenisessa väliaineessa aallon etenemisnopeus v on vakio. Tällöin aalto etenee aallonpituuden λ verran jaksonajassa T , josta saadaan aaltoliikkeen perusyhtälö

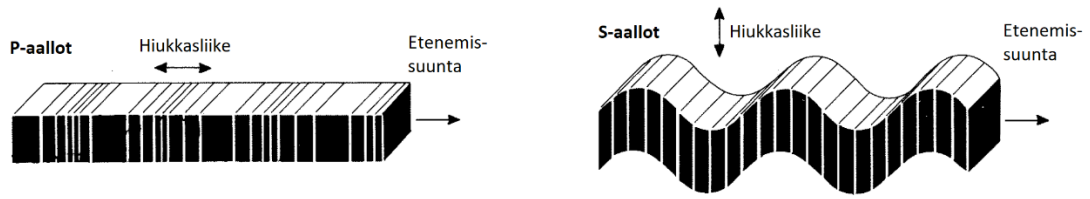
$$\lambda = v * T = \frac{v}{f}. \quad (2.2)$$

Aaltoliikkeen perusyhtälöstä saadaan puolittain kertomalla ja jakamalla muodostettua aallon etenemisnopeudelle yhtälö

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda * f. \quad (2.3)$$

Aallon etenemisnopeus riippuu ainoastaan väliaineen ominaisuuksista. Herätteen aiheuttaman taajuuden muuttuessa ainoastaan aallonpituus muuttuu, eli mitä suurempi on taajuus, sitä lyhyempi on aallonpituus. Sama pätee myös toisin päin, eli mitä pienempi on taajuus, sitä pidempi on aallonpituus.

Aaltoliikkeet voidaan jakaa kahteen luokkaan, runkoaaltoihin ja pinta-aaltoihin. Runkoaaltoja ovat puristusaalto eli P-aalto ja leikkausaalto eli S-aalto. Runkoaallot ovat esitettynä kuvassa 3.



Kuva 3. Runkoaallot elastisena aaltoliikkeenä. (Vuolio 1991, s. 165)

Kuvasta 3 nähdään, kuinka kuvassa vasemmalla esitetyn puristusaallon ainehiukkaset värähtelevät pitkittäin samansuuntaisesti aallon etenemisen kanssa, kun taas kuvassa oikealla esitetystä leikkausaallosta hiukkaset liikkuvat poikittain etenemissuuntaan nähden. Tämän takia puristusaallot etenevät yleisesti ottaen nopeammin kuin leikkausaallot. Maassa kulkevan puristusaallon etenemisnopeutta voidaan arvioida kaavalla

$$v_p = \sqrt{\frac{E*(1-\nu)}{\rho*(1-2*\nu)*(1+\nu)}}, \quad (2.4)$$

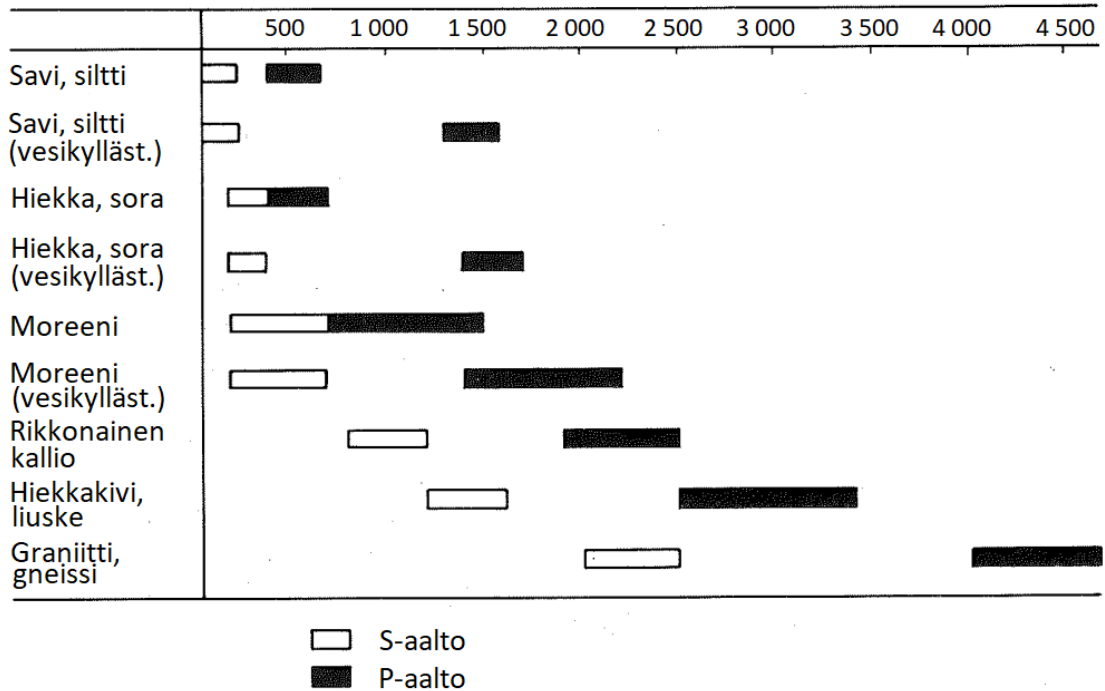
jossa v_p [m/s] on puristusaallon etenemisnopeus maassa, E on materiaalin kimmomoduuli [$\text{MPa} = \text{N/mm}^2$], ν (nyy) on Poissonin luku ja ρ [kg/m^3] on maan tilavuuspaino eli irtotiheys (Möller et al. 2000, s. 11). Poissonin luku eli Poissonin suhde kuvastaa materiaalin muodonmuutuskäyttäytymistä kuormituksessa. Tyypillisesti materiaalin Poissonin luku on välillä 0–0,5. Arvo 0,5 tarkoittaa, että materiaalin tilavuus ei muutu sitä kuormitettaessa.

Maassa kulkevan leikkausaallon etenemisnopeudelle voidaan laskea arvo kaavalla

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho*2*(1+\nu)}}, \quad (2.5)$$

jossa v_s [m/s] on leikkausaallon etenemisnopeus maassa ja G [$\text{MPa} = \text{N/mm}^2$] on maan leikkausmoduuli. Leikkausmoduuli kuvaa maan kykyä vastustaa leikkausaaltojen aiheuttamia muodonmuutoksia, eli käytännössä maan jäykkyyttä. Leikkausmoduulin selvittäminen vaatii kuitenkin laboratorioissa tehtäviä kokeita häiriintymättömälle näytteelle. Kaavoilla (2.4) ja (2.5) saadaan maassa kulkevien puristus- ja leikkausaaltojen etenemisnopeuksille laskettua suhde. Esimerkiksi kun maamateriaalin Poissonin luku on 0,33, on leikkausaallon etenemisnopeus tällöin puolet puristusaallon etenemisnopeudesta. (Möller et al. 2000, s. 12).

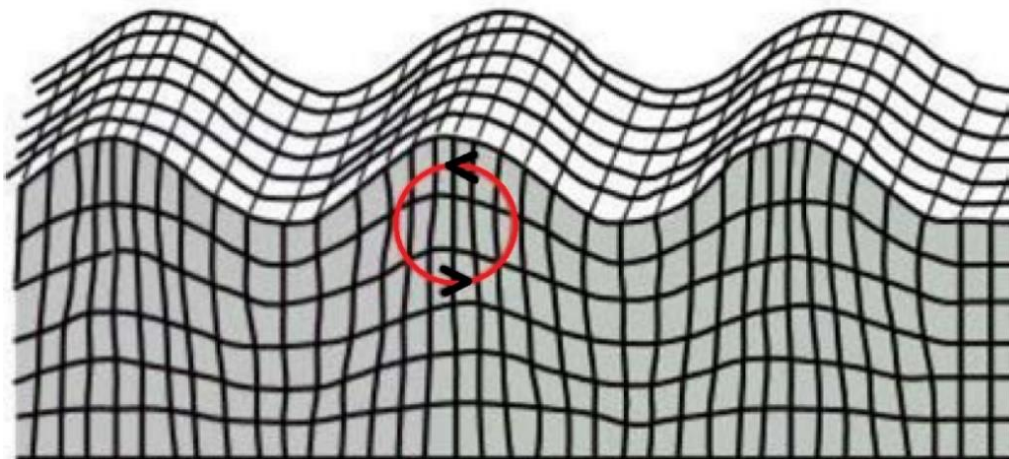
Molempien runkoaaltojen etenemisnopeuksia metreinä sekunnissa eri maa- ja kalliola-jeissa on esitettyä kuvassa 4.



Kuva 4. P- ja S-aaltojen etenemisnopeuksia [m/s] eri maa- ja kalliolajeissa. (Vuolio 1991, s. 166)

Kuvasta 4 havaitaan, että varsinkin leikkausaaltojen etenemisnopeudet voivat olla todella pieniä hienorakeisissa maalajeissa kuten savessa tai siltissä.

Pinta-aaltoja ovat yleisimmin Rayleigh-aalto eli R-aalto ja Love-aalto eli L-aalto. Rayleigh-aalto on merkittävin maan pinnalla etenevistä aalloista, koska Rayleigh-aallot sisältävät suurimman osan värähtelyn tuottamasta energiasta (Krylov 1995, s. 151). R-aallot syntyvät, kun jokin runkoaalloista kohtaa maanpinnan (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 37). R-aallon aiheuttamaa maaperän liikettä on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Maaperän liike R-aallossa. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 38)

Kuvasta 5 nähdään, kuinka R-aallossa maapartikkelit liikkuvat likimäärin ellipsin muotoista rataa maan pintakerroksessa, muistuttaen vedenpinnan aaltoilua. R-aallot ovat

vaaka- ja pystyamplitudeiltaan suurimmillaan maan pinnalla. R-aallon aallonpituutta vastaavalla syvyydellä värähtely on jo merkittävästi pienempää, pystyamplitudi pienentyy noin 70 % ja vaaka-amplitudi noin 85 % maan pinnan tason arvoihin verrattuna. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 37)

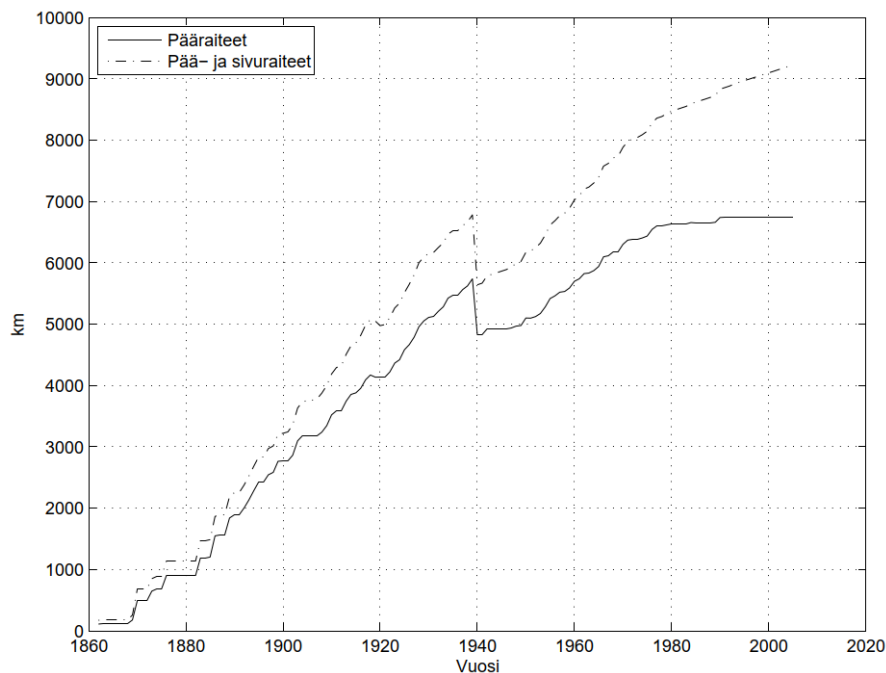
Rayleigh-aaltojen etenemisnopeutta arvioidessa pystytään käyttämään hyväksi S-aallon nopeutta, R-aaltojen etenemisnopeus on lähes yhtä suuri kuin S-aallon etenemisnopeus samassa materiaalissa.

$$v_r = v_s * \frac{0,86+1,14*v}{1+v}, \quad (2.6)$$

Vuolio esittää (1991, s. 165) R-aaltojen etenemisnopeuden olevan korkeintaan 0,9-kertainen verrattuna S-aallon etenemisnopeuteen samassa mittauspisteessä. Kirjallisuudessa on esitetty myös muita samankaltaisia arvoja (Géradin & Rixen 1997, s.160). Monesti olennaista ei ole kuitenkaan etsiä tarkkaa suhdelukua aallonnopeuksille, vaan on hyödyllistä ymmärtää S- ja R-aaltojen etenemisnopeuksien yhteys.

2.2 Ratarakenne

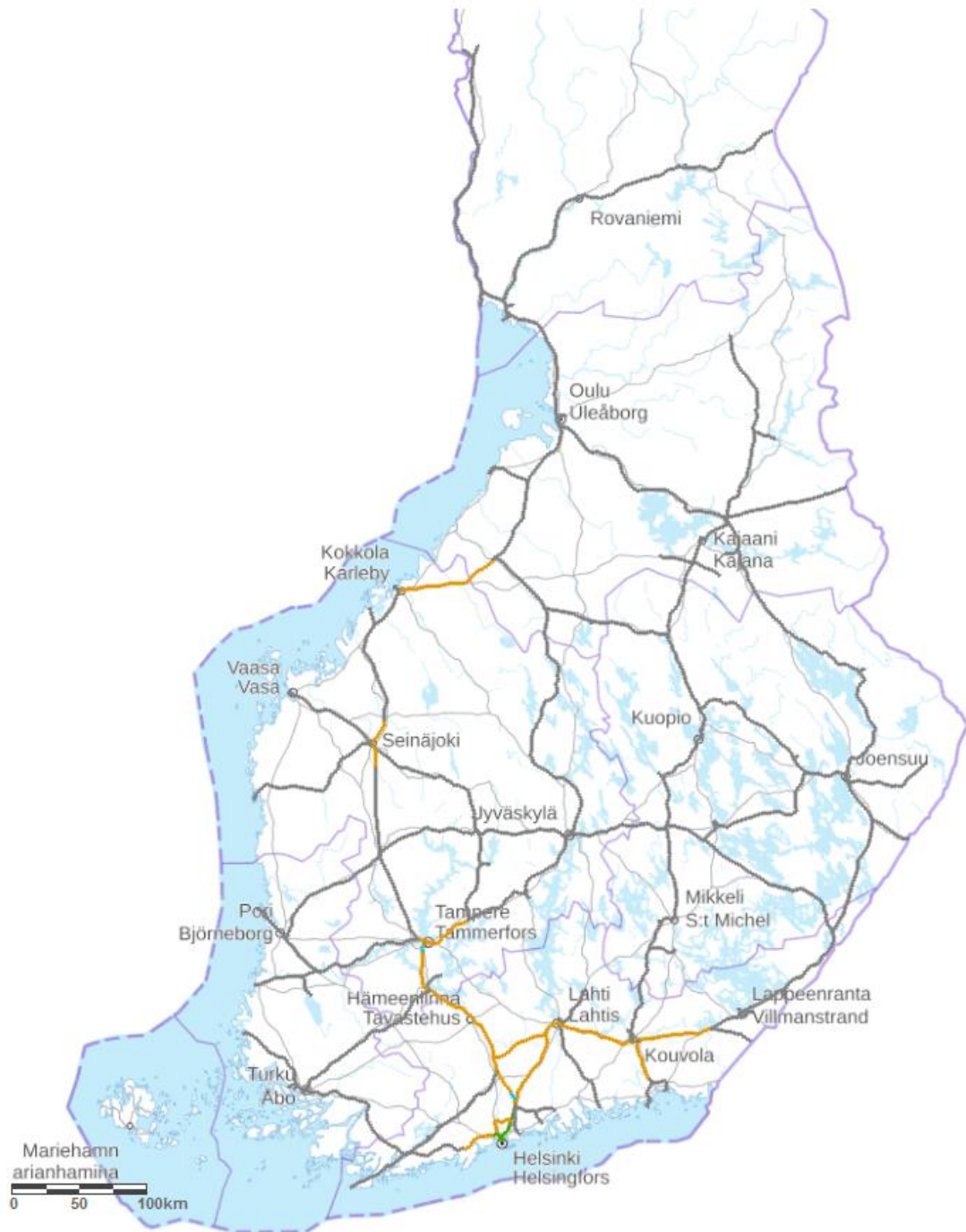
Suomen rautatieverkon rakentaminen alkoi vuonna 1862. Rataverkko laajeni aina 1980-luvulle saakka, jonka jälkeen rautateiden yhteenlaskettu pituus ei ole olennaisesti muuttunut. Rautatieverkon pituuden kehitystä on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Raiteiden kokonaispituus vuosina 1862–2005. (Uimonen 2008, s. 16)

Vuonna 2019 Suomen rataverkon pituus oli 5 923 ratakilometriä ja raidepituus oli 6 712 raidekilometriä (rdkm). Sivuraiteet mukaan lukien raidepituus oli 8 552 rdkm. (Tunninen

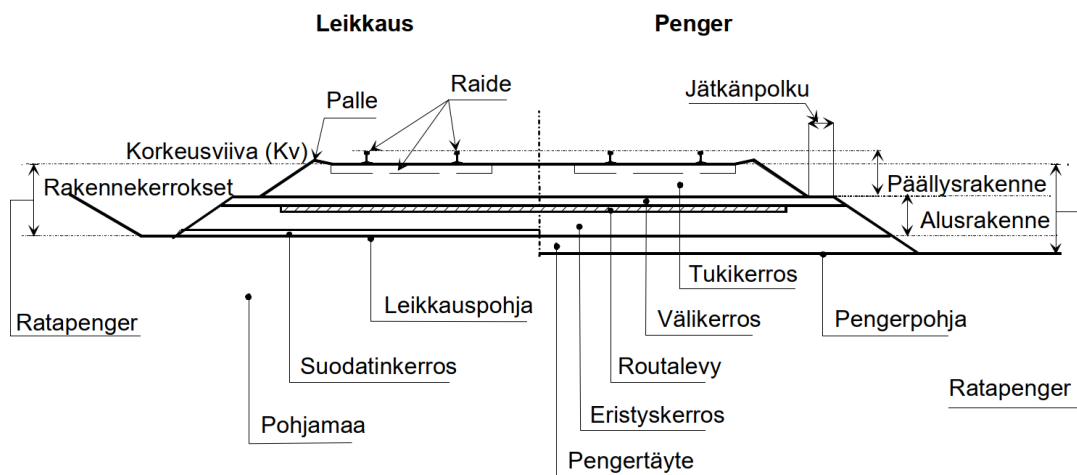
et al. 2020) Suomen rataverkko onkin pääosin yksiraiteista. Rataverkko ja raiteiden lukumäärä on esitettyä kuvassa 7.



Kuva 7. Suomen rataverkko. (Väylävirasto karttapalvelu 2020)

Kuvan 7 kartassa rataverkon raiteiden lukumäärä on merkitty eri väreillä: yksiraiteinen rata on merkitty harmaalla, kaksiraiteinen rata oranssilla, kolmiraiteinen rata vaaleansinisellä ja neliraiteinen rata vihreällä.

Ratarakenteella tarkoitetaan ratapengertä ja sen päälle rakennettua raidetta, johon kuuluvat ratapölkyt ja kiskot kiinnityksineen. Myös ratapenkereen alla oleva pohjamaa voidaan ajatella kuuluvaan ratarakenteeseen. Tyypillinen kaksiraiteisen radan poikkileikkaus ja radan rakennesein liittyvät nimitykset ovat esitettynä kuvassa 8. Kuva on puolitettu niin, että vasemmalla puolella on maa- tai kallioleikkaukseen rakennetun radan poikkileikkaus, ja oikealla puolella on penkereen päälle rakennetun radan poikkileikkaus.



Kuva 8. Radan rakenteen poikkileikkaus ja siihen liittyviä nimityksiä. (Liikennevirasto 2018, s. 8)

Kuvassa 8 raide koostuu kiskoista, ratapölkkyistä ja kiskonkiinnityksistä ratapölkkyihin. Rata voi olla rakennettu lyhytkiskoraiteena (lk-raide) kiskon pituuden ollessa ≤ 25 metriä, pitkäkiskoraiteena (pk-raide) kiskon pituuden ollessa 25–50 metriä tai jatkuvakiskoraiteena (jk-raide) kiskon pituuden ollessa > 300 metriä (Liikennevirasto 2018). Käytännössä koko Suomen päärataverkko on nykyään jatkuvakiskoraiteeksi hitsattua, koska se mahdollistaa liikennöinnin nopeuden yli 120 km/h ja yli 225 kN akselipainon säännöllisen käytön. Vuoden 2019 lopussa rataverkosta 5 231 rdkm oli jatkuvakiskoraidetta. Kiskoista 3 677 rdkm oli 60E1 kiskopainoista ja 2 069 rdkm 54E1 kiskopainoista. (Tunninen et al. 2020, s. 26–27) Raideleveys Suomessa on 1 524 mm.

Raiteen ratapölkyt ovat lähes poikkeuksetta joko betonia tai puuta. Betonipölkyt ovat nykyään yleisimpiä Suomen rataverkolla, vuoden 2019 lopussa betonipölkkyraidetta oli 5 129 rdkm (Tunninen et al. 2020, s. 28). Jatkuvakiskoraiteella betonipölkyt asennetaan 610 mm välein.

Olellaisena osana raiteeseen kuuluvat vielä kiskonkiinnitykset, joiden avulla kiskot kiinnitetään ratapölkkyyn. Kiskonkiinnitysten tarkoitus on pitää kiskojen välinen etäisyys eli raideleveys vakiona ja vastustaa sekä pituus- että poikittaissuuntaisia siirtymiä.

Päälysrakenteeseen kuuluu lisäksi tukikerros, johon raide tukeutuu. Tukikerros voi olla sepeliä tai soraa. Nykyään rakennetaan lähes yksinomaan sepelitukikerroksellista rataa. Sepelille on asetettu tarkkoja vaatimuksia muun muassa iskunkestävyydelle ja raekoolle. Näistä ja muista raidesepelin vaatimuksista on kerrottu enemmän standardissa SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset. Vuoden 2019 lopussa sepelitukikerroksellista raidetta oli 5 971 rdkm (Tunninen et al. 2020, s. 14).

Suomen radoilla on määritetty luokat sekä päälysrakenteelle että alusrakenteelle. Rataluokat eli päälysrakenneluokat ovat A, B₁, B₂, C₁, C₂ ja D. Päälysrakenneluokat ja niiden raidekilometrisuudet Suomen rataverkolle on esitetty taulukossa 1. (Väylävirasto 2019a, liite 3F s. 1; Tunninen et al. 2020, s. 14)

Taulukko 1. Radan päälysrakenneluokat ja raidekilometrisuudet.

päälysrakenneluokka	kiskot	ratapölkkyt	tukikerros	osuus vuonna 2019 [rdkm]
A	K30, K33	puu	raidesora tai vastaava	525
B ₁	K43, 54 E1, K60, 60 E1	puu	raidesora tai vastaava	563
B ₂	K43, K60	puu, betoni	raidesepeli	179
C ₁	54 E1	puu, betoni	raidesepeli	646
C ₂	54 E1	betoni	raidesepeli	1 124
D	60 E1	betoni	raidesepeli	3 675

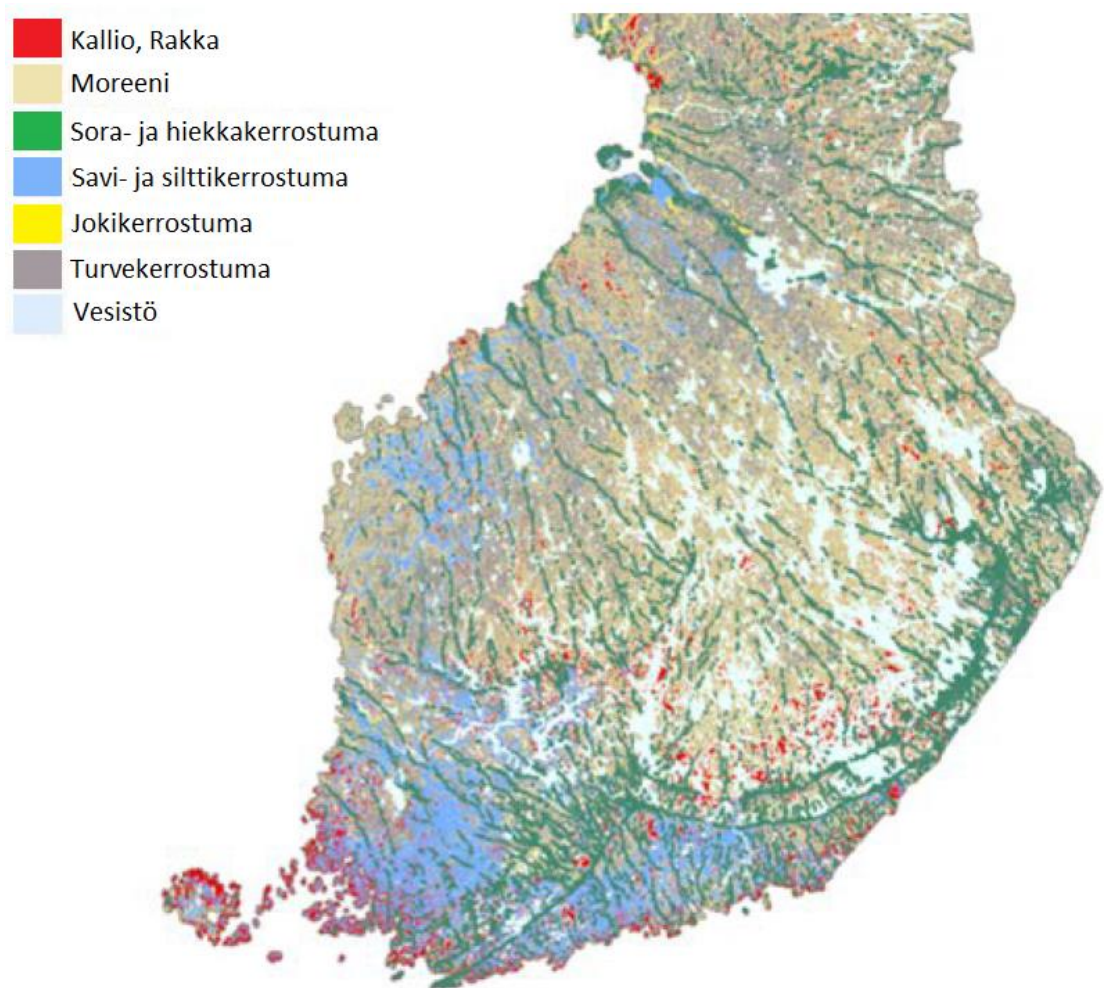
Rataosan päälysrakenneluokka määrää henkilöjunille suurimman sallitun nopeuden, ja tavarajunille suurimman sallitun nopeuden lisäksi myös akselipainon. Suomen radoilla nykypäivänä yleisimmässä D-luokassa henkilöjunien suurin sallittu nopeus on 220 km/h. Tavarajunien suurin sallittu nopeus riippuu akselipainosta siten, että enintään 20 tonnin akselipainolla suurin sallittu nopeus on 120 km/h, kun taas yli 20 tonnin akselipainolla suurin sallittu nopeus on 100 km/h. (Tuominen 2010, s. 23)

Alusrakenneluokat ovat 0, 1, 2, 3 ja 4. Luokka määräytyy joko henkilöliikenteen tai tavaraliikenteen mukaan siten, että korkeampi vaatimustaso määrää luokan. Alusrakenneluokat ovat esitettynä taulukossa 2.

Taulukko 2. Alusrakenneluokat. (Liikennevirasto 2018, s. 16)

alusrakenneluokka	henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, V	tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 225 kN akselipainolla, V	tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 250 kN akselipainolla, V
0	≤ 50 km/h	≤ 40 km/h	≤ 40 km/h
1	≤ 120 km/h	≤ 100 km/h	≤ 60 km/h
2	≤ 200 km/h	≤ 100 km/h	≤ 80 km/h
3	≤ 250 km/h	≤ 120 km/h	≤ 100 km/h
4	> 250 km/h	> 120 km/h	> 100 km/h

Päällys- ja alusrakenteen lisäksi myös pohjamaalla on monin paikoin merkittävä osuus ratarakenteen toimivuuteen. Rakennustekniikassa pohjamaalla tarkoitetaan rakenteen alla sijaitsevan maa-aineksen maalajia. Geologian tutkimuskeskus (GTK) määrittelee pohjamaan olevan 1,0 metrin syvyydellä maan pinnasta oleva maalaji. Kuvassa 9 on esitetty vallitsevat maalajit Etelä- ja Keski-Suomen alueella.



Kuva 9. GTK:n maaperäaineisto Etelä- ja Keski-Suomesta. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 39)

Kuvasta 9 nähdään sinisellä värillä laajat savi- ja silttikerrostuma-alueet Etelä- ja Lounais-Suomessa. Etelä-Suomen savet ovat tyypillisesti pehmeämpiä ja vesipitoisempia kuin muualla maassa (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 39).

Geoteknisiä haasteita on eniten pehmeissä ja vesipitoisissa pohjamaan maalajeissa, eli silteissä, savissa, turpeissa ja liejuissa. Tällaisia haasteita voivat olla esimerkiksi radan painumien hallinta, radan stabiliteetti eli vakavuus, tai liikenteen aiheuttaman tärinän leviäminen. Optimaalisessa tilanteessa tällaisia pehmeikköjä koitetaankin lähtökohtaisesti välttää rakentamisessa.

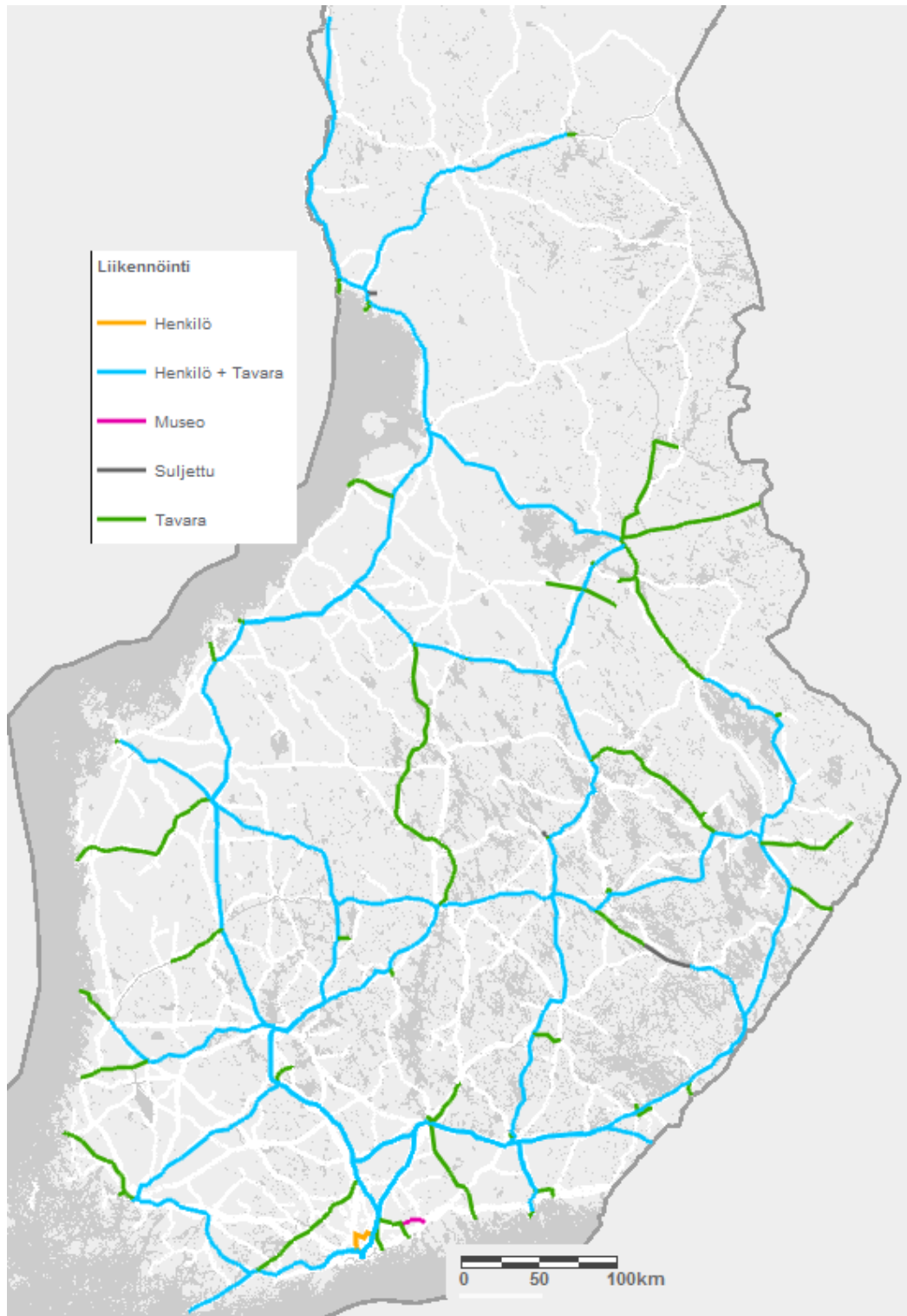
Kuten kuvan 9 kartasta nähdään, niin pehmeiden pohjamaiden osuus on Suomessa varsin suuri. Sama tilanne on muissakin Pohjoismaissa. Kokonaan pehmeikköjen väistäminen onkin rata- tai tielinjoja rakennettaessa käytännössä mahdotonta. Tästä syystä ongelmallisimmissa paikoissa käytetään suunnittelu- ja rakennusvaiheissa pohjanvahvistuksia. Seuraavassa on listattuna erilaisia pohjanvahvistusmenetelmiä:

- esikuormituspenkereet
- pystyjoitus
- vastapenkereet
- pengerkevennys
- massanvaihto
- stabilointi ja lujitteet
- paaluhatturakenteet
- paalulaattarakenteet

Pohjanvahvistusmenetelmän valinta perustuu usein kustannuksiin ja käytettävissä olevaan aikaan. Asutuksen tai muun rakennetun ympäristön läheisyydessä myös tilantarve voi olla ratkaiseva tekijä pohjanvahvistusmenetelmän valinnassa.

2.3 Radalla liikennöivä kalusto

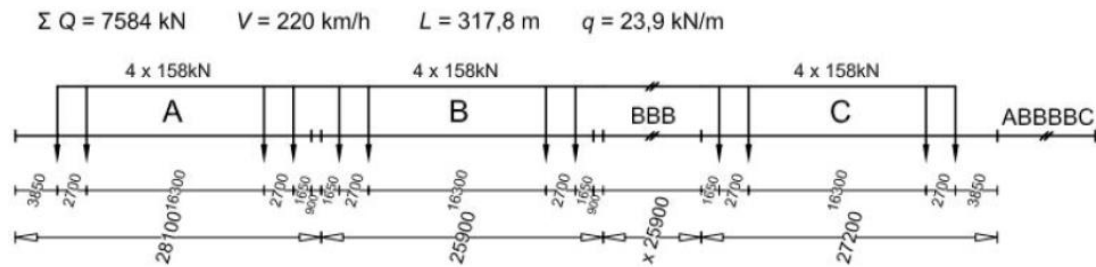
Suomen rautateillä kulkeva liikenne voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan, henkilö- ja tavaraliikenteeseen. Näiden lisäksi raiteilla kulkee satunnaisesti muun muassa kunnossapidon kalustoa ja ratatyökoneita. Henkilö- ja tavaraliikenne käyttävät Suomessa samoja ratoja ja raiteita. Tavaraliikennöintiä rataverkolla on yhteensä 5 623 ratakilometrillä, eli 95 % koko Suomen rataverkosta. Henkilöliikennöinti kattaa rataverkosta 4 046 ratakilometriä, eli lähes 70 % rataverkosta. (Tunninen et al. 2020, s. 13) Pieni osa rataverkosta on ainoastaan museokäytössä. Liikennöinnin osuudet Suomen rataverkolla ovat esitettyinä kartalla kuvassa 10.



Kuva 10. Rataverkon luokittelu liikennöinnin mukaan. (Väylävirasto karttapalvelu 2020)

Kuten kuvan 10 sinisellä värillä merkatuista rataosuuksista nähdään, suurin osa Suomen rataverkosta on tavara- ja henkilöliikenteen yhteiskäytössä. Tämä on tarkoittanut monenlaisia kompromisseja muun muassa raidegeometrioihin ja liikennöinnin aikataulutukseen suurien nopeus- ja painoerojen takia.

Radalla liikennöivä kalusto on vetureita ja niihin kytkettyjä vaunuja. Näiden lisäksi henkilöliikenteen käytössä on moottorivaunukalustoa, eli moottorivaunuista ja niiden liitevaunuista muodostuvia junia, jotka liikennöivät kiinteästi toisiinsa kytkettyinä. Tällaisia ovat esimerkiksi Suomessa nopean liikenteen tyyppikalustona käytettävät Pendolino-sähkömoottorijunat, joita kutsutaan Suomessa toisella nimellä Sm3. (Ilikkanen 2013, s. 9–10) Pendolinon mitat ja akselipainot on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Pendolinon mitat ja kuormat. (Liikennevirasto 2011, s. 93)

Kuvassa 11 kokonaispituus $L = 317,8 \text{ m}$ tarkoittaa kahden toisiinsa kytketyn Pendolinon yhdistelmän pituutta.

Sähkömoottorijuniin lukeutuvat myös Suomen ja Venäjän väliseen matkustajaliikenteeseen käytettävät Allegrot, joiden tunnus Suomessa on Sm6. Muu Suomessa käytettävä moottorikalusto on lähi- ja paikallisliikenteen käytössä. Näitä ovat sähkömoottorijunat Sm2, Sm4 ja Sm5, sekä dieselmoottorijuna eli kiskobussi Dm12.

Veturit ovat joko sähkö- tai dieselvetureita. Samoja vetureita käytetään sekä henkilö-, että tavarajunien vetämiseen. Tyypillisimmät Suomessa käytettävät sähköveturit ovat Sr1 ja Sr2. Vuodesta 2017 alkaen käyttöön on otettu myös uudempia Sr3-sähkövetureita. Dieselvetureista yleisin on Dv12. (VR Group 2020) Kuvassa 12 on esitettynä Sr2- ja Dv12-veturit.



Kuva 12. Sr2 kuvassa vasemmalla ja Dv12 oikealla. (VR Group 2020)

Seuraavassa taulukossa 3 on koottu tietoja Suomessa käytettävistä vetureista. (VR Group 2020; Fenniarail 2020)

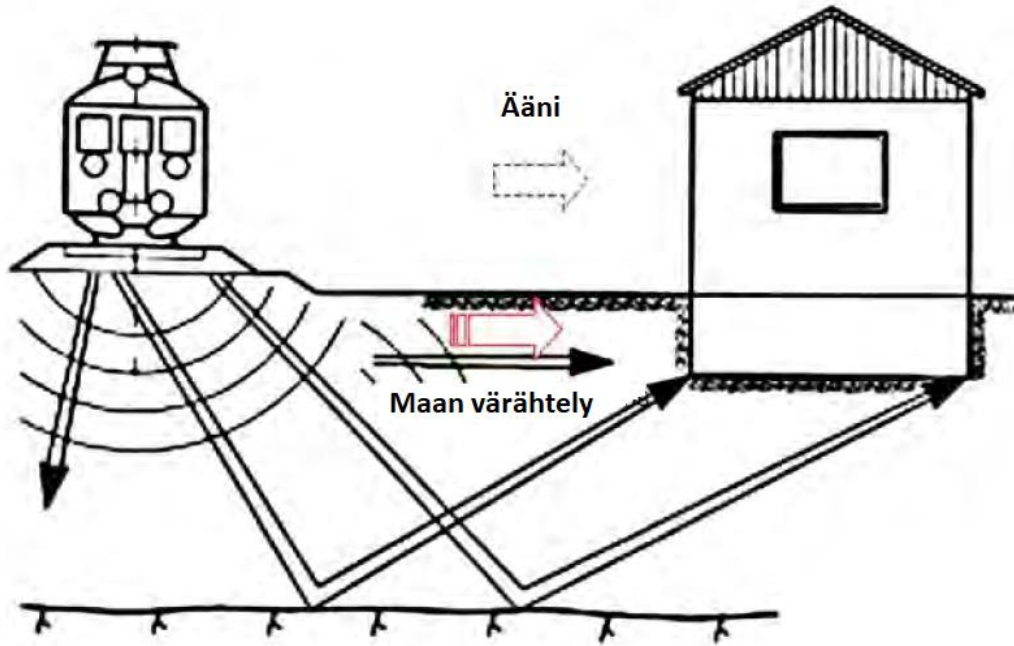
Taulukko 3. Yleisimmät Suomessa käytössä olevat veturityypit.

veturi	suurin nopeus	kokonaispaino	max. akselipaino	liikennöitsijä
Sr1	140 km/h	86 t	21,5 t	VR Group
Sr2	210 km/h	84 t	21,0 t	VR Group
Sr3	200 km/h	90 t	22,5 t	VR Group
Dv12	125 km/h	68 t	17,0 t	VR Group
Dr14	75 km/h	87 t	21,5 t	VR Group
Dr16	140 km/h	84 t	20,5 t	VR Group
Dr18	90 km/h	115 t	20,0 t	Fenniarail Oy

Vetureiden ja moottorivaunujen lisäksi olennainen osa junakalustoa ovat vetureiden vetämät vaunut. Henkilöliikenteessä tyypillisin vaunu nykyään on InterCity-vaunu eli IC-vaunu, jotka ovat yksi- tai kaksikerroksisia. Tavaraliikenteessä erilaisten vaunujen kirjo on suurempi. VR Transpoint jakaa vaunukaluston seuraaviin ryhmiin: avovaunut, erikoisvaunut, irtotavaravaunut, katetut vaunut, säiliövaunut ja yhdistettyjen kuljetusten vaunut (VR Group 2020).

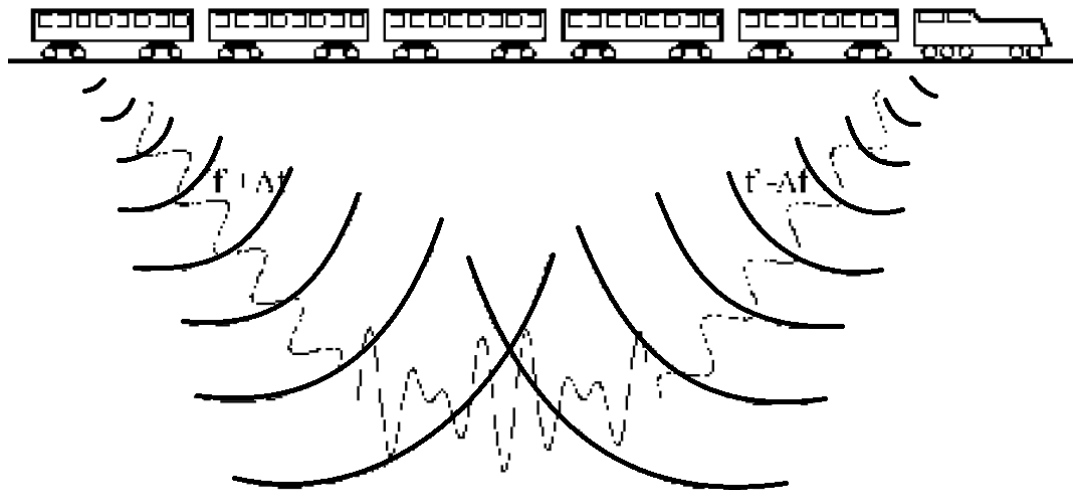
2.4 Junaliikenteen aiheuttama värähtely

Junakaluston runko jousituksineen sekä rata muodostavat monimutkaisen värähtelevän kokonaisuuden (Levomäki 1999, s. 13). Värähtelystä kiinteässä väliaineessa voidaan puhua myös tärinänä. Junaliikenteen aiheuttama värähtely eroaa jonkin verran muista maahan värähtelyä aiheuttavista tärinälähteistä. Pääosin erona on, että junaliikenteessä värähtelylähde on liikkeessä. Tämän takia junan voidaan ajatella muodostavan nauhamaisen tärinälähteen, jossa junan jokainen akseli muodostaa erillisiä pistemäisiä tärinälähteitä. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40) Junan aiheuttamaa värähtelyä ratarakenteeseen ja ympäristöön on havainnollistettu kuvissa 13 ja 14.



Kuva 13. Junaliikenteen aiheuttama maan värähtely ja ääni. (Massarsch et al. 2002, s. 32)

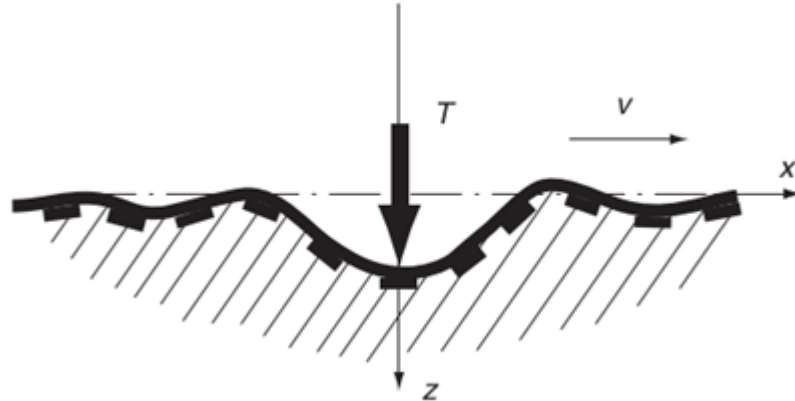
Kuvasta 13 nähdään, että liikkuva juna on värähtelyn lähde ja maa on värähtelyn välittäjänä. Värähtely välittyy ratarakenteen lisäksi ympäristöön, esimerkiksi rakennukseen, jossa se koetaan tärinänä. Kuvassa 14 on esitetty, kuinka pitkän junan aiheuttama värähtely voi kertautua kauempana radasta eri herätepisteistä lähtevien värähtelyiden yhteisvaikutuksesta.



Kuva 14. Eri herätepisteistä lähtevän värähtelyn yhteisvaikutus. (Talja & Törnqvist 2014, liite B s. 40)

Ratarakenteessa värähtely havaitaan ratarakenteen pystysuuntaisena liikkeenä juna-kuormituksen alla. Värähtelyn voimakkuutta voidaan tulkita joko pystysuuntaisen siirty-

män, nopeuden tai kiihtyvyyden suuruudesta. Pystysuuntainen painuma ratarakenteessa aiheutuu pääosin yksittäisen akselin, tai akseliparin eli telin, kuormituksesta kiskoihin ja niiden kautta ratapölkkyihin, tukikerrokseen ja alusrakenteeseen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 15.

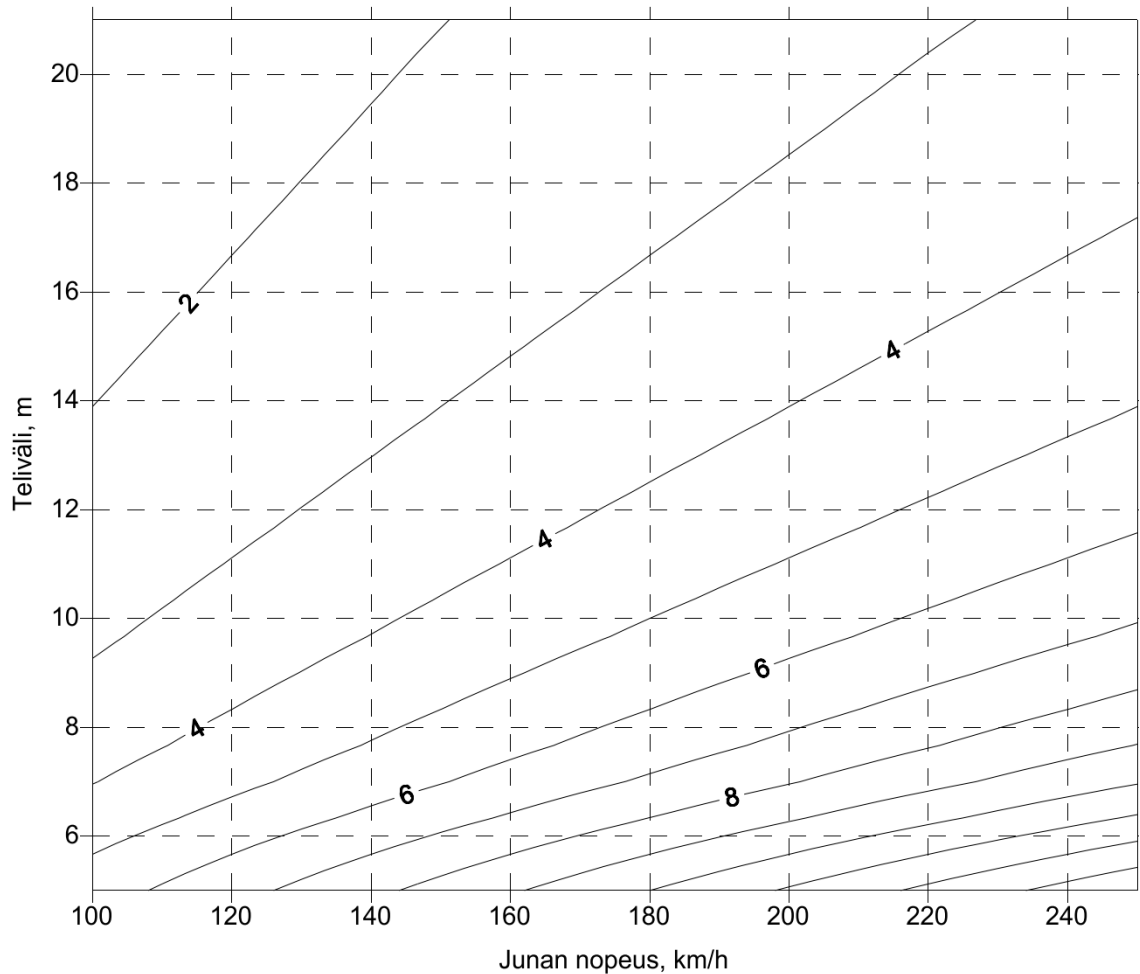


Kuva 15. Junan akselin aiheuttama pystysuuntainen jännityslisäys. (Krylov 2001, s. 253)

Värähtelyä syntyy junan liikkuessa radalla. Junaliikenteestä aiheutuvia värähtelyyn vaikuttavia tekijöitä on lueteltuna seuraavassa luettelossa (Möller et al. 2000, s. 17):

- akselipaino
- ajonopeus
- junan geometria ja kokoonpano
- kaluston lovipyörät
- ratapenkereen geometrinen muotoilu
- ratapenkereen rakenne
- pohjamaan ominaisuudet
- radan laatu
- rakentaminen
- routiminen.

Junasta aiheutuva hallitseva värähtelytaajuus riippuu pääasiassa telivälistä ja junan nopeudesta. Kuvassa 16 on esitetty, miten taajuus muuttuu junan telivälin ja nopeuden muuttuessa.



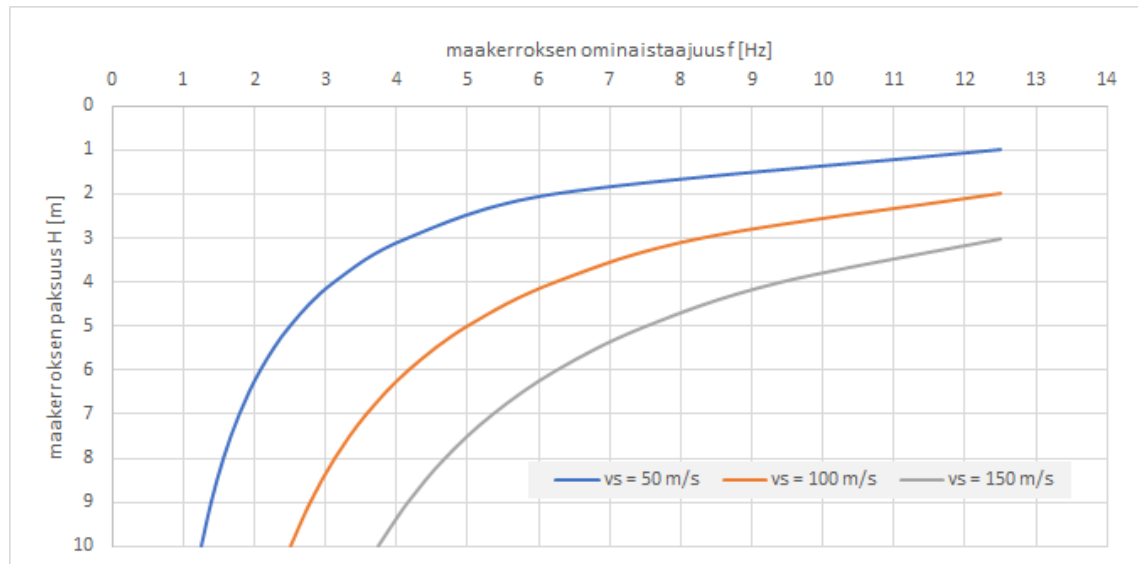
Kuva 16. Junan kuormituksesta aiheutuva taajuus nopeuden ja telivälin muuttuessa. (Hakulinen 2018, s. 10)

Kuvassa 16 taajuus on merkitty vinoviivoilla. Esimerkiksi 14 metrin telivälillä 200 km/h nopeudessa vallitseva värähtelytaajuus on 4 Hz. Vallitseva taajuus onkin useasti välillä 3–8 Hz.

Maakerroksen ominaistaajuutta voidaan arvioida kaavalla

$$f = \frac{v_s}{4H}, \quad (2.7)$$

jossa v_s on maakerroksessa kulkevan leikkausaallon etenemisnopeus, ja H on maakerroksen paksuus (Möller et al. 2000, s. 15). Kaavasta saadaan laskettua ominaistaajuuksia erilaisille pehmeille saville kuvan 17 mukaisesti.



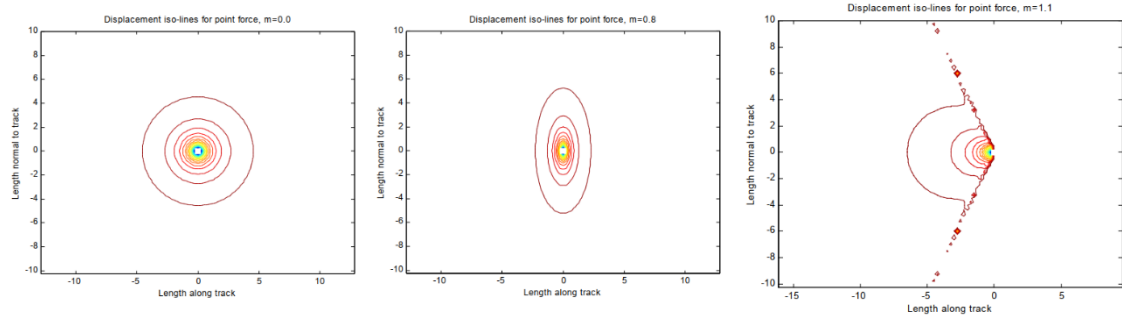
Kuva 17. Pehmeän saven ominaistajuuksia eri kerrospaksuuksilla.

Kuvaan 17 on otettu esimerkiksi maakerrokset, joissa leikkausaallon etenemisnopeudet ovat 50 m/s, 100 m/s ja 150 m/s. Nämä vastaavat tyypillisiä arvoja erilaisille saville. Nähdään, että ominaistajuuudet ovat 3–5 metrin paksuisissa kerroksissa samaa luokkaa kuin junien telienylityksistä aiheutuvat kuormitustajuuudet, eli 3–8 Hz.

2.5 Pengervärähtelyn kriittinen nopeus

Junaliikenteen aiheuttaman ympäristöön leviävän värähtelyn lisäksi toinen rautateillä havaittava värähtelymuoto on pengervärähtely. Sillä tarkoitetaan liikkuvan junan alla tapahtuvia pystysuuntaisia siirtymiä ratarakenteessa ja rakenteen alla sijaitsevassa pohjamaassa. Pengervärähtelyn suuruus voi kasvaa eksponentiaalisesti, kun junan nopeus saavuttaa niin kutsutun kriittisen nopeuden. Kriittisiä nopeuksia radassa voidaan arvioida olevan kaksi erilaista: maassa etenevän Rayleigh-pinta-aallon etenemisnopeus sekä radan päällysrakenteen kriittinen nopeus. Pehmeiden pohjamaiden päälle rakennetuilla radoilla kriittiset nopeudet voivat olla niin alhaisia, että nykyaikaisilla suurnopeusjunilla sen saavuttaminen on mahdollista. (Krylov et al. 2000, s. 107–108)

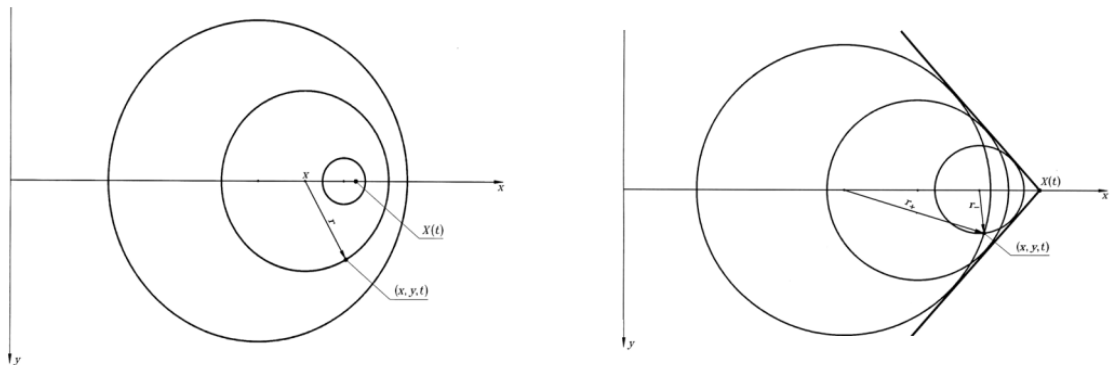
Kriittisen nopeuden saavuttamisessa tapahtuvaa pengervärähtelyilmiötä on verrattu niin kutsutun äänivallin rikkoutumiseen, kun lentokone ylittää äänen nopeuden ilmassa. Ratarakenteessa tapahtuvaa värähtelyn suurenemista kriittisen nopeuden ylittyessä kutsutaan englanniksi termillä *ground vibration boom*. Ilmiön tapahtuessa siirtymäamplitudit kasvavat moninkertaisiksi, kun junan synnyttämä aaltoliike ei enää liiku junan edellä vaan jää ikään kuin junakuormituksen alle. (Krylov et al. 2000, s. 108) Tällöin junan akselien ja telien ylityksistä aiheutuvat kuormat saattavat kertautua resonanssi-ilmiön tavoin. Kuvassa 18 on selvennetty ilmiön syntyä.



Kuva 18. Kriittisen nopeuden ylitys. (Massarsch et al. 2002, s. 50–51)

Kuvassa 18 on esitetty ylhäältä päin kuvattuna junan yhden akselin nopeuden vaikutus ympäristöön siirtyviin jännityksiin. Kuvan 18 vasemmassa reunassa junan nopeus on nolla. Keskimmaisessä kuvassa nopeus on 0,8-kertainen kriittiseen nopeuteen nähden. Kuvan oikeassa reunassa kriittinen nopeus on ylitetty junan nopeuden ollessa 1,1-kertainen kriittiseen nopeuteen verrattuna. Kuvasta nähdään, kuinka jännityksistä aiheutuva värähtely keskittyy pistemäisesti auramaiseen muotoon junan eteen ja sivuille. Tämä aiheuttaa pystysuuntaisten liikkeiden kertautumisen.

Kuvassa 19 on esitetty, kuinka junasta aiheutuvat värähtelyaallot kertautuvat, kun juna saavuttaa kriittisen nopeuden.



Kuva 19. Värähtelyn kertautuminen kriittisen nopeuden ylittyessä. (Massarsch et al. 2002, s. 53)

Kuvan 19 vasemmalla puolella on esitetty värähtelyn synty junasta, jonka nopeus on alle kriittisen nopeuden. Kuvan oikeassa puoliskossa kriittinen nopeus on saavutettu ja värähtely alkaa kertaantumaan. Pinta-aallon nopeuden saavuttaminen voi moninkertaistaa pystysuuntaisia siirtymiä jopa 2–4-kertaiseksi (Massarsch et al. 2002, s. 57). Kuten kuvan 19 oikeasta puoliskosta nähdään, siirtymien moninkertaistumista voi tapahtua myös ympäristössä, kun junan liikkeestä aiheutuvat aallot saapuvat tiettyyn pisteeseen samanaikaisesti.

2.6 Pengervärähtelyriskin arviointimenetelmät

Suuri osa junaliikenteen värähtelyenergiasta sitoutuu pinta-aaltoihin, joten niihin kohdennetaan suurin mielenkiinto ratarakenteen värähtelyä tutkittaessa. Ongelmallisimpia kohteita pengervärähtelyn kannalta ovat pehmeiköt, joilla penger on matala. Vaikka pengervärähtelyyn onkin kehitetty erilaisia teoreettisia malleja, ei niiden luotettavuudesta ja käyttökelpoisuudesta ole näyttöä (Törnqvist 2011). Varmimmat tulokset tässäkin asiassa saadaan ajamalla koeajoja ja tekemällä niiden yhteydessä mittauksia paikan päällä.

Aiempien tutkimusten ja laskettujen tapauksien tulosten pohjalta värähtelyriskin suuruuteen vaikuttaa seuraavia asioita (Hakulinen 2003, s. 15):

- Alle kolme metriä syvillä pehmeiköillä ei ole merkittävää ratapenkereen värähtelyn vahvistumisen vaaraa.
- Pehmeikölle rakennetun ratapenkereen paksuuden ollessa yli 3–4 metriä on värähtelyriski pieni.
- Värähtelyriski kasvaa pehmeikön paksuuden kasvaessa 10 metriin saakka. Syvemmillä pehmeiköillä riski pienenee vähäisissä määrin.
- Paksu saven kuivakuorikerros vähentää ratapenkereen värähtelyriskiä merkittävästi.

Pehmeiköille perustettujen ratojen värähtelyriskin on havaittu kasvavan, kun nopeus nousee yli 150 km/h (Törnqvist 2011). Maaperän värähtelyn tutkimisessa tärkein tunnusluku on leikkausaallon etenemisnopeus (Möller et al. 2000, s. 28). Ennen tarkempia tutkimuksia on syytä tehdä värähtelyriskin arviointi. Tässä voidaan hyödyntää Liikenneviraston RATO 3 -ohjetta (Liikennevirasto 2018, s. 33). Ohjeen mukaan värähtelyriskin mahdollisuutta voidaan arvioida seuraavilla kahdella kriteerillä:

- 1) Penkereen ja tiiviin tai lujan penkereen alapuolisen maakerroksen yhteenlaskettu paksuus raiteen kohdalla on alle 2,5 m sekä näiden alla on pehmeä, vähintään 1 m paksu turve- taikka liejukerros.
- 2) Penkereen ja tiiviin tai lujan penkereen alapuolisen maakerroksen yhteenlaskettu paksuus raiteen kohdalla on alle 2,5 m sekä näiden alla on savikerros, joka on a) paksuudeltaan vähintään 2 m ja jonka suljettu leikkauslujuus on keskimäärin alle 20 kN/m², taikka b) paksuudeltaan on yli 4 m ja suljetulta leikkauslujuudeltaan keskimäärin alle 30 kN/m².

Mikäli edellä mainittujen ehtojen perusteella värähtelyriski on mahdollinen, voidaan tarkempaa arviointia tehdä mittaamalla leikkausaallon etenemisnopeutta raiteen alapuoliossa maakerroksessa (Liikennevirasto 2018, s. 33). Leikkausaallon etenemisnopeuden eri mittaamistapoja käsitellään tämän työn luvussa 3.

Leikkausaallon etenemisnopeuden määrittämiseen on olemassa myös kaavoja, joita pystytään käyttämään arvioinnissa. Savikoille perustetuilla radoilla leikkausaallon etenemisnopeutta voidaan arvioida saven vesipitoisuuden w avulla, mikäli vesipitoisuus on välillä 30–120 %. Kaava on

$$v_s = 135 - 0,75 * w, \quad (2.8)$$

jossa v_s [m/s] on leikkausaallon etenemisnopeus maassa, ja w [%] on saven vesipitoisuus. Jotta värähtelyriski pysyisi hallittuna, tulisi leikkausaallon etenemisnopeuden olla vähintään 1,4-kertainen raiteella liikkuvan kaluston nopeuteen verrattuna. (Liikennevirasto 2018, s. 33)

Värähtelyn pystysuuntaiset siirtymät voivat ylittää pahimmissa tapauksissa sallitut raja-arvot. Suomessa on määritetty joitakin raja-arvoja pystysuuntaisille siirtymille radassa. Olemassa olevilla radoilla radan palautuva pystysuuntainen siirtymä saa olla enintään 4 mm. Pohjamaan ollessa turvetta sallitaan 8 mm siirtymä. Siirtymämittaukset tehdään ratapölkyn yläpinnasta. Uusilla radoilla suunnitteluperusteena on 3 mm sallittu palautuva pystysuuntainen siirtymä mitoitusakselipainon suuruisella kuormituksella. (Liikennevirasto 2018, s. 18)

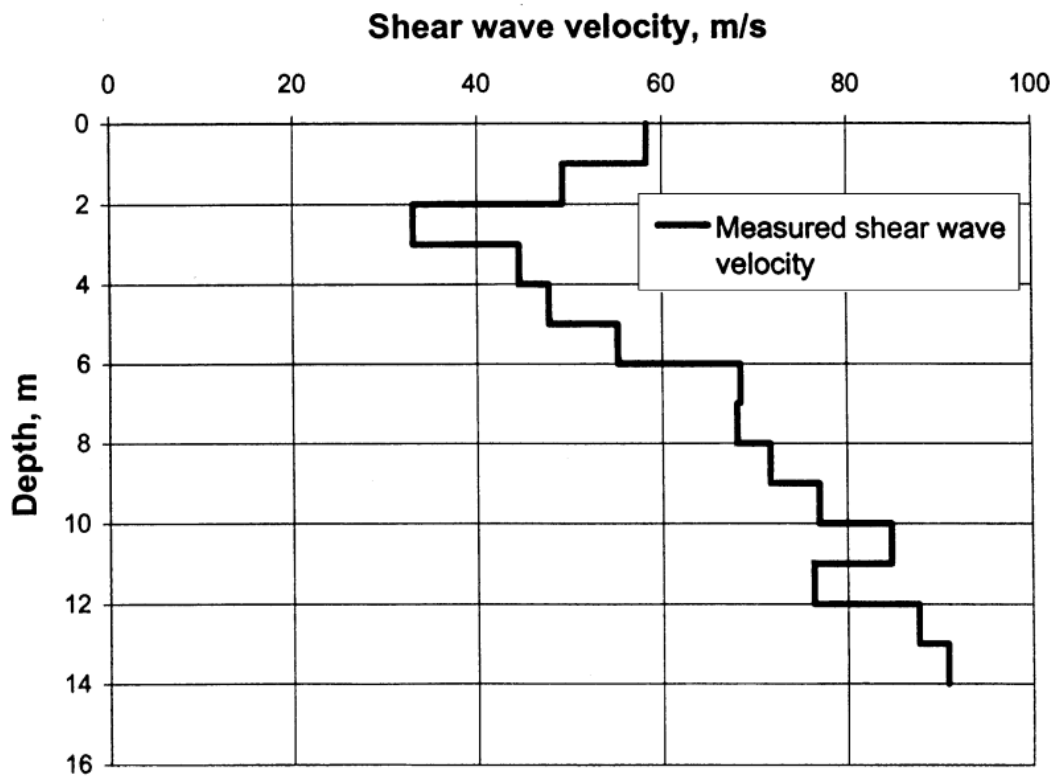
2.7 Pengervärähtelyn aiempia tutkimuksia

Pengervärähtelyä on tutkittu verrattaen vähän maailmalla. Merkittävimpänä syynä tähän voidaan pitää sitä, että suuressa osassa maailmaa maaperä ei ole otollista ilmiön tapahtumiselle. Maita, joissa pehmeää pohjamaata löytyy, ovat muun muassa Pohjoismaat. Näissä maissa, missä ratojen rakentamista pehmeiköille ei ole voitu välttää, eivät junien nopeudet ole olleet suuria.

Yksi ensimmäisistä pengervärähtelyä käsittelevistä tutkimuksista on tehty vuonna 1948 Alankomaissa. Siinä DeNien tutkimusryhmä raportoi suurista raiteen muodonmuutoksista junien kulkiessa suurilla nopeuksilla pehmeikköjen läpi. (Salmenperä et al. 2016, s. 5)

Eräs eniten tutkituista pengervärähtelytapauksista on Ruotsista 1990-luvun lopulta. Vuonna 1997 tehdyissä tutkimuksissa Ledsgårdissa Etelä-Ruotsissa havaittiin suuria vä-

rähtelyn voimistumisia junan nopeuden kasvaessa. Paikka sijaitsi uuden suurnopeusjunan linjalla Göteborgin ja Malmön välillä, missä käyttöön otettu uusi X2000-juna pystyi liikennöimään jopa 200 km/h nopeuksilla. Ledsgårdin pehmeiköllä maassa etenevän Rayleigh-aallon nopeudeksi mitattiin kuitenkin paikoin noin 45 m/s arvoja, eli jopa pienempiä kuin junan maksiminopeus. (Krylov 2001, s. 251) Myöhemmin tutkittuja leikkausaallon etenemisnopeuksia eri syvyyksillä maan pinnasta on esitetty kuvassa 20.

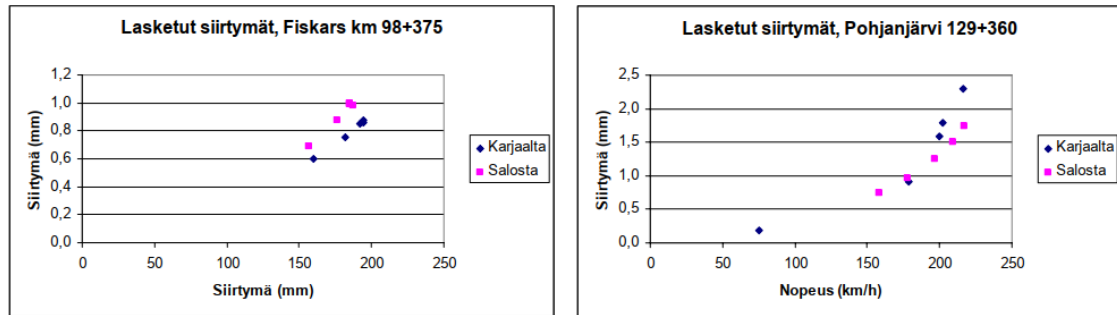


Kuva 20. Ledsgårdissa mitatut leikkausaallon etenemisnopeudet. (Holm et al. 2002, s. 18)

Ledsgårdissa havaittiin, että värähtelyiden amplitudit jopa kymmenkertaistuivat junan nopeuden kasvaessa nopeudesta 140 km/h nopeuteen 180 km/h. Tätä pidettiin selkeänä merkinä kriittisen nopeuden ylityksestä. (Krylov 2001, s. 252) Värähtelyistä aiheutuvia ongelmia ratkottiin Ledsgårdissa junan suurinta sallittua nopeutta pienentämällä. Ensin nopeusrajoitukseksi asetettiin 160 km/h ja myöhemmin vielä alhaisempi 130 km/h. (Holm et al. 2002, s. 7)

Suomessa tehtyjä pengervärähtelyn tutkimuksia on olemassa muutamia. Vuonna 2002 tehtiin nopeiden junien ratapengervärähtelymittauksia Lielähti–Seinäjäki -rataosalla. Mittauksissa huomattiin junan nopeuden kasvun vaikutus pystysuuntaisiin siirtymiin. Amplitudit olivat kuitenkin pieniä, alle 0,5 mm, koska radan alla sijainnut turvepehmeikkökerros oli vain 2 metriä paksu. (Hakulinen 2004, s. 3)

Vuonna 2004 rantaradalla on tutkittu nopeuden noston vaikutusta pengervärähtelyyn kahdella eri pehmeiköllä. Silloin saadut mittaustulokset on esitetty kuvassa 21.

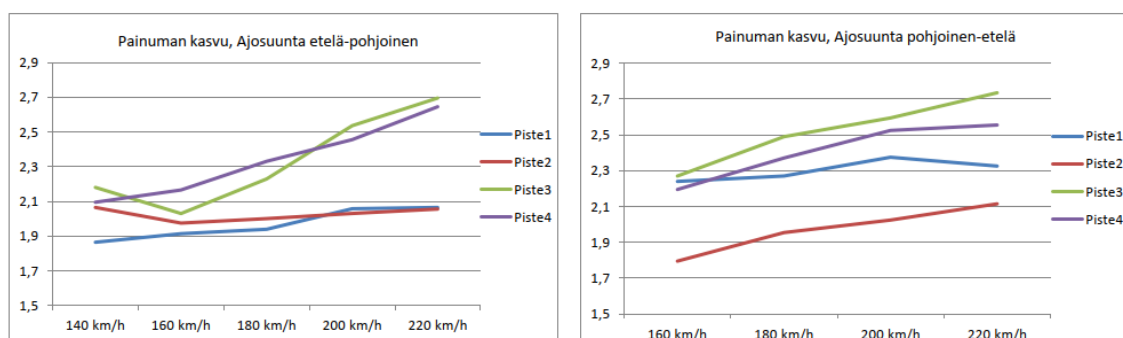


Kuva 21. Pengervärähtely rantaradalla 2004. (Hakulinen 2004, s. 10)

Kuvassa 21 esitetyissä mittaustuloksissa vasemmalla puolella on Fiskars km 98+375 ja oikealla puolella Pohjanjärvi km 129+360. Molemmista kuvista on havaittavissa pengervärähtelyyn viittaava siirtymien kasvu junan nopeuden noustessa kohti oletettua kriittistä nopeutta. Näissäkin mittauksissa siirtymien amplitudi jäi alle 3 millimetrin, joten tuloksia ei pidetty ongelmallisina. Junan nopeuden kasvaessa kuitenkin myös ympäristöön leviävä tärinä lisääntyi. (Hakulinen 2004, s. 14)

Pohjanjärven mittauksissa tehtiin havainto, että värähtely on suurempaa, kun juna saapuu Karjaalta päin. Tästä suunnasta tullessa pehmeikkö ohenee, minkä arvioitiin vaikuttavan värähtelyyn suurentavasti. (Hakulinen 2004, s. 8)

Vuonna 2015 turvepohjaisella Ylivieska–Liminka -rataosalla on ajettu Pendolino-kalustolla nopeuden noston koeajoja, joiden yhteydessä on tehty pengervärähtelymittauksia. Ratakilometrillä 687 saadut mittaustulokset on esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Pengervärähtely Ylivieska–Liminka -rataosalla 2015. (Salmenperä et al. 2016, s. 53–54)

Kuvasta 22 havaitaan, että palautuvat painumat suurenivat nopeuden kasvaessa. Merkittävää eksponentiaalista voimistumista ei kuitenkaan havaittu, vaan palautuvat painumat pysyivät pienempinä kuin 3 mm. Tässäkin mittauksessa tehtiin havainto, että siirtymät olivat suurempia ohenevan pehmeikön suuntaan ajettaessa.

Suomessa tehdyissä mittauksissa on saatu havaittua pengervärähtelyilmiötä junan nopeuden noustessa. Vaikka pystysuuntaiset siirtymät ovatkin nopeuden nostojen mittauksissa kasvaneet, ei siirtymien suuruus ole ollut niin merkittävä, että siirtymistä aiheutuisi välitöntä vaaraa liikenteelle. Oletettavasti pengervärähtelyn kannalta todennäköisimmät paikat on vahvistettu alun perin jo muista syistä, kuten stabiliteettiiongelmiin takia.

Radan suurimman sallitun nopeuden nostoa harkittaessa on huomioitava myös sen pitkäaikaiset vaikutukset. Muodonmuutosten kasvaminen voi mahdollisesti nopeuttaa raidepelin kulumista ja aiheuttaa plastisia muodonmuutoksia ratapenkereeseen. Lisäksi on selvitettävä huokosvedenpaineen kasvun vaikutukset siirtymiin ja stabiliteettiin. (Hakulinen 2004, s. 14)

3. PENGERVÄRÄHTELYRISKIN TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä luvussa kerrotaan tutkimusmenetelmistä, joita voidaan käyttää pengervärähtelyriskiin vaikuttavien maaperän ja penkereen ominaisuuksien mittaamiseen. Ensin kerrotaan, mitä kaikkea tulee huomioida tutkimusmenetelmää valittaessa. Sen jälkeen esitellään tarkemmin eri tutkimusmenetelmiä, jotka voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri ryhmään: maan pinnalla tehtävät kenttämittaukset, kairausta vaativat kenttämittaukset sekä laboratoriotutkimusmenetelmät. Luvun tarkoituksena on esitellä mittaustapoja maan ominaisuuksille, joiden on todettu olevan olennaisia pengervärähtelyn tapahtumisen kannalta. Varsinaisia penkereen värähtelymittauksia ei tässä työssä käsitellä.

3.1 Tutkimusmenetelmän valintakriteerit

Yksi olennaisimmista pengervärähtelyn suuruuteen vaikuttavista maan ominaisuuksista on leikkausaallon etenemisnopeus maaperässä. Tämän takia tutkimusmenetelmän valinnassa olennaista on saada tätä ominaisuutta mitattua. Aallon etenemisnopeutta maassa pystytäänkin mittaamaan eri tavoilla. Etenemisnopeus voidaan saada selville mittaamalla, kun tiedetään värähtelyaallon tietyn matkan kulkemiseen kulunut aika. Vaihtoehtoisesti värähtelyaallon etenemisnopeutta voidaan arvioida käyttäen laskennassa muita maan parametreja.

Kentällä mittaaminen voidaan tehdä joko kairausten avulla tai pintamittauksina. Myös laboratoriossa voidaan mitata etenemisnopeutta maaperästä otetuista näytteistä. Värähtelyn mittaukset kentällä tehdään yleensä geofoneilla tai kiihtyvyyssmittareilla, ja näiden saamat signaalit tallennetaan tietokoneille myöhempää analyysia varten (Möller et al. 2000, s. 28).

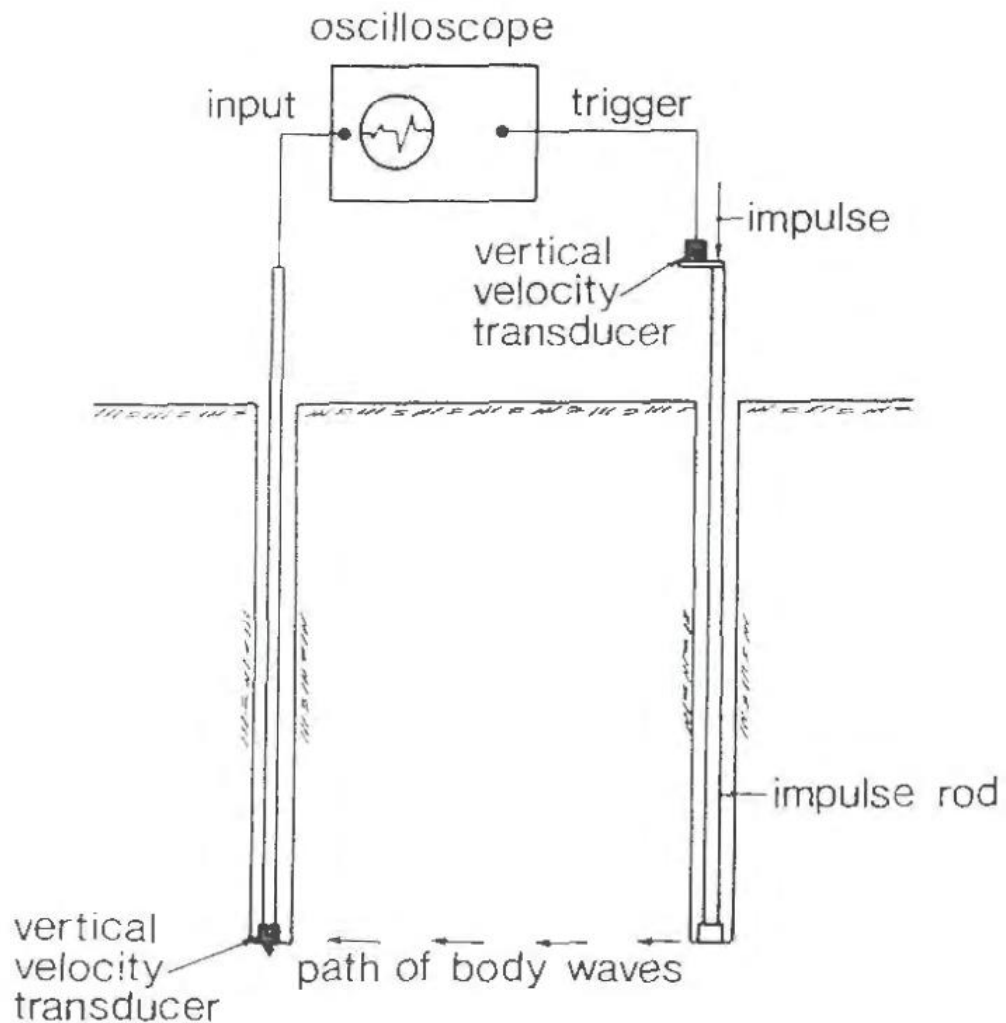
Kentällä tehtäviä pintamittauksia ovat esimerkiksi SASW (Spectral Analysis of Surface Waves) ja MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves). SASW-mittausmenetelmällä mitataan suoraan R-aaltojen nopeutta geofonien avulla.

Kairausta vaativia maanpinnan alaisia mittausten menetelmiä ovat cross-hole, down-hole, up-hole ja seisminen CPTU-kairaus. Näissä menetelmissä värähtelyaalto pakotetaan kulkemaan maan sisässä niin, että sen kulkureitti on mahdollisimman suoraviivainen. (Mäenpää 2016, s. 12) Kairausta vaativat menetelmät ovat yleensä hankalampia ja kallimpia toteuttaa, mutta niistä saatavia mittaustuloksia on usein helpompia tulkitä.

3.2 Kenttämittaukset

3.2.1 Cross-hole -menetelmä

Cross-hole -mittausmenetelmässä mitataan leikkausaallon etenemisnopeutta maassa kairaamalla kaksi reikää pystysuunnassa muutaman metrin etäisyydelle toisistaan kuvan 23 mukaisesti.



Kuva 23. Cross-hole -menetelmän periaate. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 25)

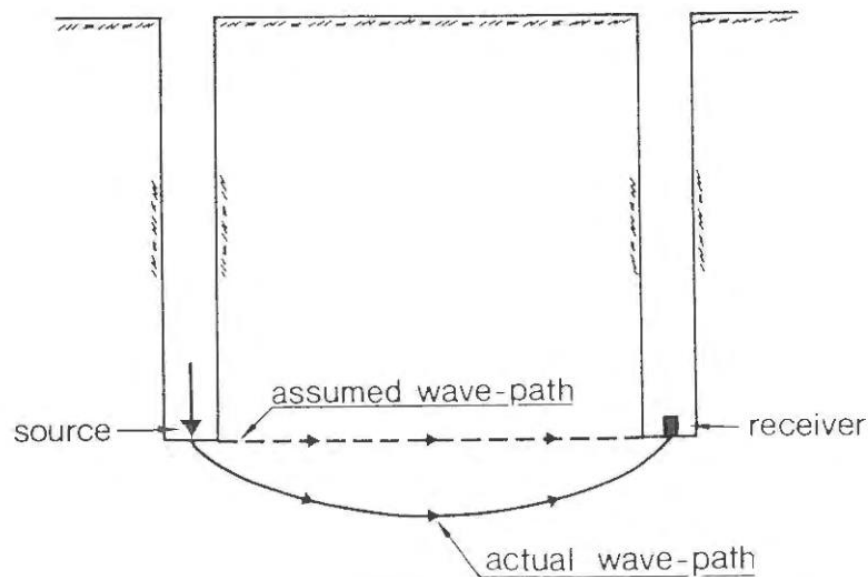
Kuvassa 23 oikeanpuolimmaiseen reikään on kairattu tanko, johon annetaan maan pinnalta isku eli heräte. Herätteen lähtöhetki tallennetaan mittauslaitteistoon esimerkiksi kiihtyvyyssanturin avulla. Vasemmanpuoleiseen reikään on työnnetty vastaanotin, jolla saadaan tallennettua ajanhetki, jolloin herätteestä aiheutunut maassa etenevä aaltoliike saavuttaa vastaanottimen. Näin saadaan laskettua aallon etenemisnopeus maassa, kun tiedetään pisteiden välinen etäisyys sekä kulunut aika iskusta vastaanottoon.

Reikien pystysuuntaus on tarkastettava huolellisesti, koska niiden välinen etäisyys toisistaan kaikilla syvyyksillä täytyy tietää tarkasti. Herätteen antamiseen käytetty tanko ja vastaanotin tulee asentaa mahdollisimman tiiviiseen kontaktiin maahan, jotta värähtely välittyy häiriöttömästi.

Cross-hole -menetelmässä voidaan käyttää myös kolmea kairareikää. Tällöin vastaanottimia, esimerkiksi geofoneja, sijaitsee kahdessa eri kairareiässä. Reikien etäisyyden ja leikkausaallon saapumisaikojen erotuksen avulla pystytään laskemaan maassa etenevän värähtelyaallon nopeus. Näin menetelmällä pystytään eliminoimaan mahdollinen virhe herätteen lähtöajan tallennuksessa.

Cross-hole -tekniikkaa pidetään usein tarkimpana menetelmänä värähtelyaallon nopeuden mittaamiseen, mutta silläkin on heikkouksia. Yleisestikin maan sisässä tehtävissä mittauksissa syntyy epätarkkuuksia, koska kairauksen yhteydessä maa-aines häiriintyy aina jonkin verran reiän läheisyydessä. Tehdyt vertailut osoittavat, että maan häiriintymisen suuruuteen ei vaikuta käytetäänkö ennalta kairattua reikää vai upotetaanko laitteet suoraan koskemattomaan maahan. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 25)

Cross-holella saatavia tuloksia voi vääristää myös se, että runkoaaltojen kulkema reitti ei välttämättä ole lyhin mahdollinen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 24.

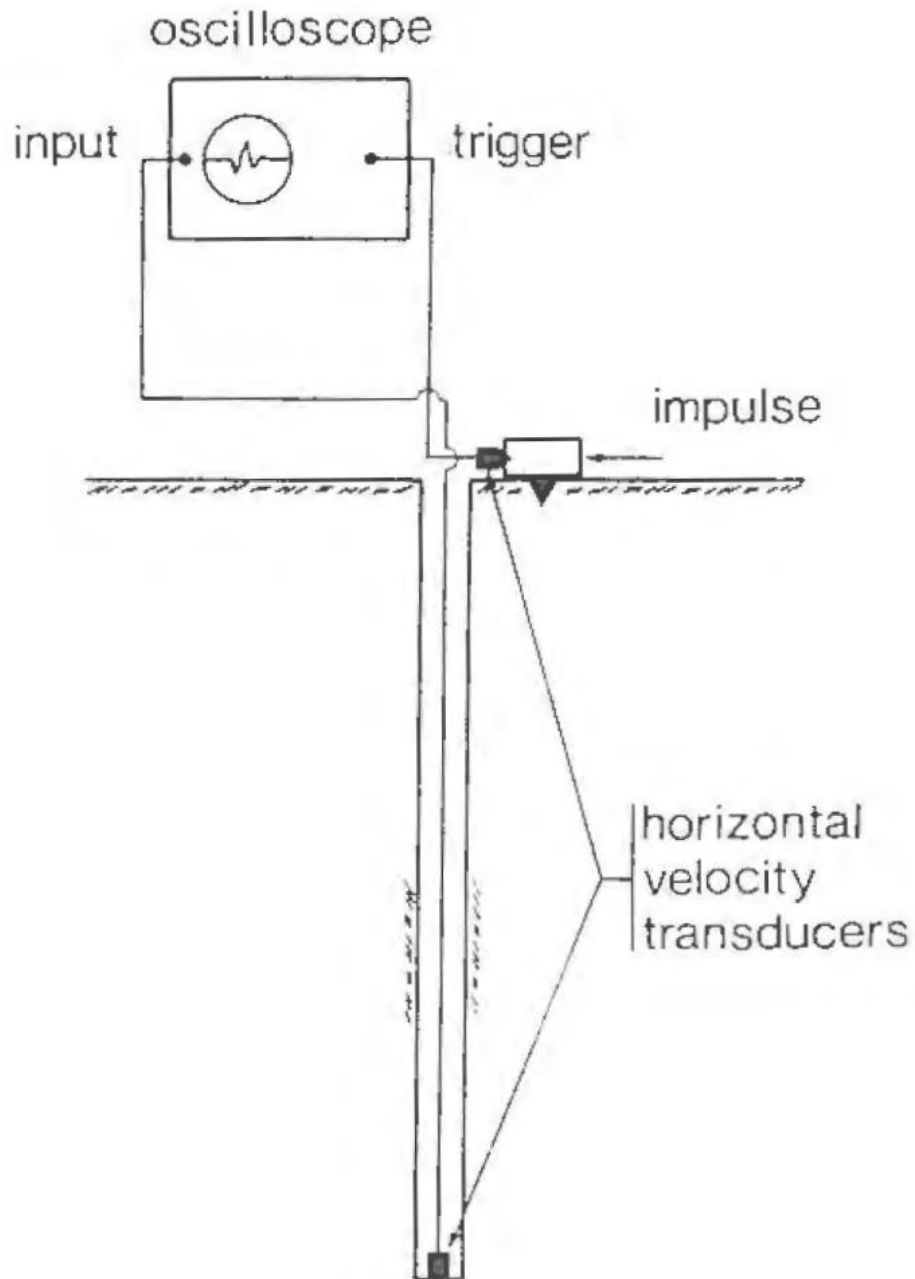


Kuva 24. Aallon oletettu ja toteutunut kulkureitti. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 26)

Kuvan 24 ilmiö tapahtuu, jos mitattavan maakerroksen ylä- tai alapuolinen maa on jäykempää, missä leikkausaalto kulkee nopeammin. Tällöin aallon etenemiseen kuluva aika voi olla oletettua pienempi, mikä voi taas vääristää tuloksia mitattavan maakerroksen ominaisuuksista.

3.2.2 Down-hole -menetelmä

Toinen kairaamista vaativa leikkausaallon etenemisnopeuden mittaustapa on down-hole -menetelmä. Erona cross-holeen on, että tässä menetelmässä tarvitaan ainoastaan yksi reikä, mikä helpottaa ja nopeuttaa mittaustyötä. Menetelmän periaatekuva on esitettyä kuvassa 25.



Kuva 25. Down-hole -menetelmän periaate. (Larsson & Mulabdić 1991, s. 27)

Kuvassa 25 periaatteena on, että heräte annetaan maan pinnalta ja mittaus tapahtuu reiän pohjalta. Menetelmällä pystytään mittaamaan leikkausaallon nopeutta ainoastaan pystysuunnassa. Pystysuunnassa voidaan kuitenkin helpommin erottaa mahdollisia maalajien kerrostumia, kun vastaanotinta siirretään eri syvyyksille.

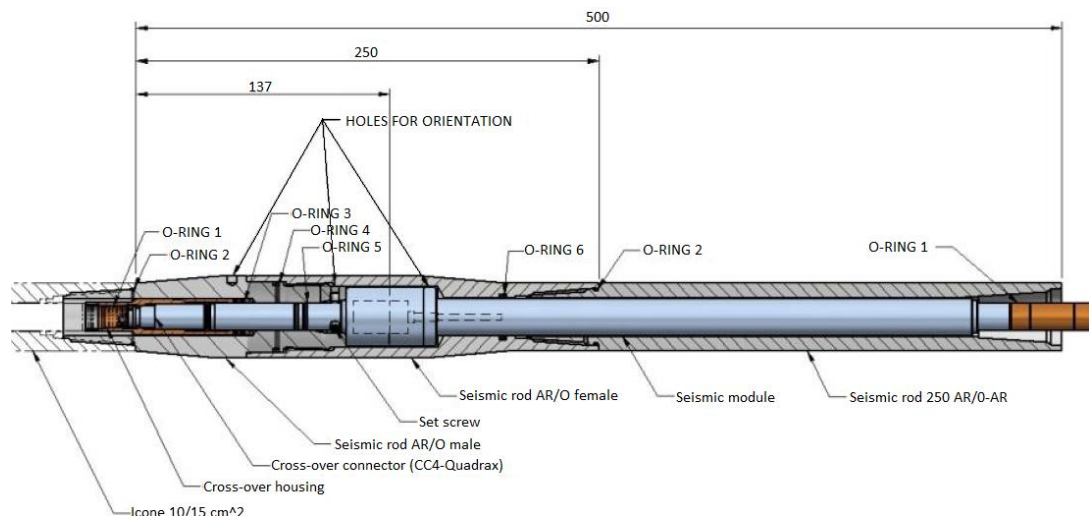
Cross-hole -menetelmän tapaan maan häiriintyminen kairareian ympärillä sekä mittauslaitteiston riittävä kontakti maan kanssa ovat mahdollisia ongelmia down-hole -menetelmässäkin. Down-hole -menetelmässä mitataan käytännössä aikaa ja matkaa, joten niiden arvojen on oltava todella tarkasti tiedossa.

Yhdellä kairareiällä mittaus voidaan toteuttaa myös niin, että heräte annetaan maan sisältä ja värähtelyaalto vastaanotetaan maan pinnalla. Tällöin menetelmää kutsutaan nimellä up-hole.

3.2.3 Seisminen CPTU-mittaus

CPTU eli CPT (Cone Penetration Test) lisättyä huokosvedenpaineen mittauksella on kairaustapa, jossa maahan työnnetään puristuksen avulla kärkikartiota vakionopeudella. Mitattavia suureita ovat kärkivastus, vaippakitka ja huokosvedenpaine. (Mäenpää 2016, s. 27)

Seisminen CPTU-mittaus pohjautuu vahvasti luvussa 3.2.2 esitettyyn down-hole -menetelmään. Periaate on samanlainen, eli heräte annetaan maan pinnalta ja kairassa sijaitseva seisminen moduuli vastaanottaa saapuvan signaalin. Seisminen moduuli on yksi monista mittalaitteista, joita voidaan liittää CPTU-kairaukseen. (Mäenpää 2016, s. 28–29) Kuvassa 26 on esimerkkinä AP van den Bergin Icone Seismic Module, joka mittaa leikkaus- ja puristusaaltoja kolmella kiihtyvyyssanturilla.



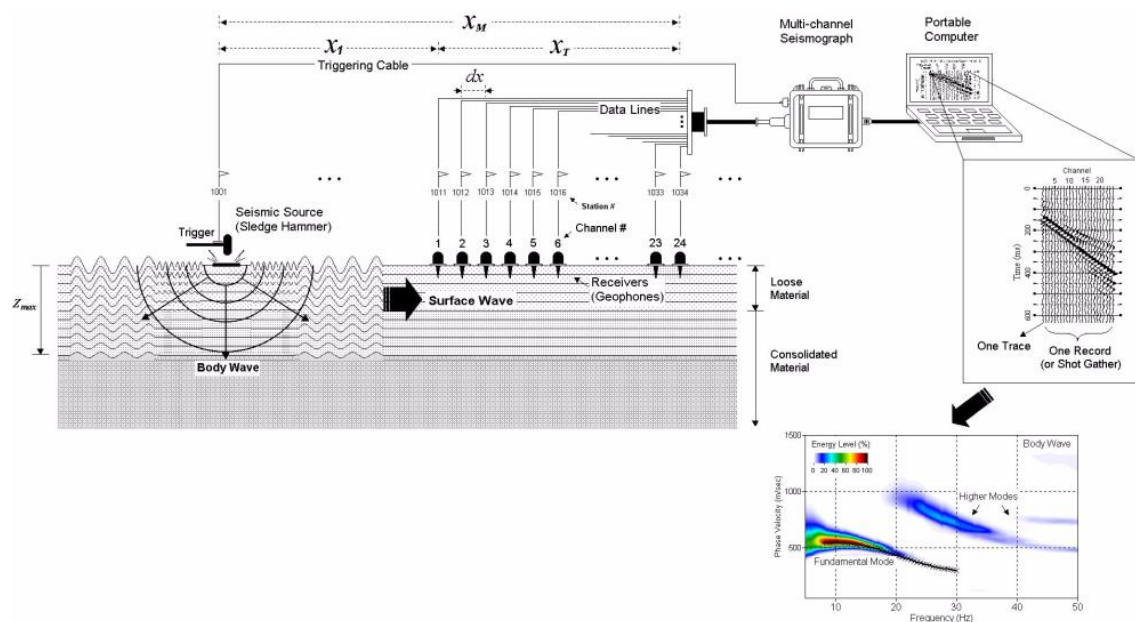
Kuva 26. Seisminen moduulin rakenne. (Mäenpää 2016, s. 31)

Seisminen moduulin avulla voidaan mitata suoraan maassa kulkevan leikkausaallon etenemisnopeutta. Leikkausaallon nopeuden avulla voidaan määrittää myös muita parametreja, kuten leikkausmoduuli G . (Mäenpää 2016, s. 1)

3.2.4 SASW ja MASW

Kenttäolosuhteissa aallonnopeudenmittauksia voidaan toteuttaa myös maan pinnalla. Tyypillisimpiä tällaisia ovat SASW ja MASW. SASW eli Spectral Analysis of Surface Waves on mittaamenetelmä, jolla mitataan nimensä mukaisesti pinta-aaltojen kuten Rayleigh-aaltojen etenemisnopeutta. Mittaus tehdään sijoittamalla värähtelylähde sekä vähintään kaksi vastaanotinta maan pinnalle ja mittaamalla pinta-aallon etenemisnopeuksia eri taajuuksilla. SASW-mittauksessa hyödynnetään sitä, että pinta-aallon syvyys kasvaa aaltoliikkeen aallonpituuden kasvaessa. Mittaamalla miten pinta-aallon etenemisnopeus muuttuu taajuuden muuttuessa, voidaan tutkia, kuinka etenemisnopeus vaihtelee syvyyden mukaan. (Möller et al. 2000, s. 32)

MASW eli Multichannel Analysis of Surface Waves on niin ikään mittaamenetelmä, jossa pinta-aallon etenemistä tutkitaan geofonien avulla. MASW-menetelmässä vastaanottimia on useita, jolloin pystytään helpommin tunnistamaan erilaiset aaltoliikkeet ja suodattamaan tuloksista häiriöitä, kuten heijastuneita aaltoja ja runkoaaltoja. Tyypillisen MASW-mittauksen kaavio on esitetty kuvassa 27.

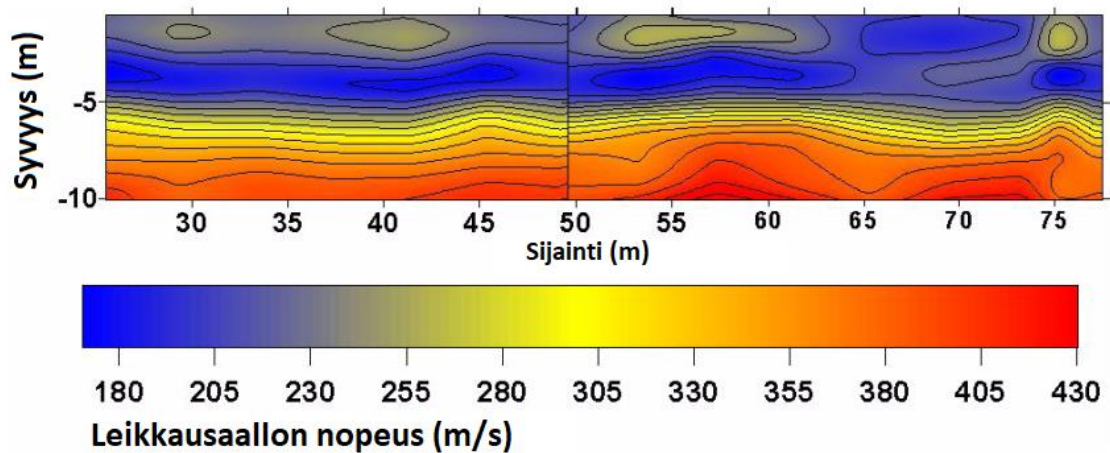


Kuva 27. Kaavio tyypillisestä MASW-mittauksen kokoonpanosta. (Penumadu & Park 2005, s. 3)

Kuvassa 27 annetaan pystysuuntainen heräte. Matkan X_1 päähän asennetaan ensimmäinen geofoni. Ensimmäisen geofonin etäisyys herätteestä riippuu maan ominaisuuksista. Pehmeällä maaperällä, jossa leikkausaallon etenemisnopeus on alle 100 m/s, etäisyys on 1–5 metriä. Jäykemmillä mailla, joissa leikkausaallon nopeus on yli 300 m/s, pystytään käyttämään jopa 40 metrin etäisyyttä. Etäisyys kauimmaiseen geofoniin X_M voi pehmeiköillä olla korkeintaan 20 metriä, jäykemmillä mailla pystytään mittaamaan

jopa 100 metrin etäisyydeltä. Geofonien keskinäinen etäisyys toisistaan on mittaustilanteessa vakio. Pehmeikoilla välit ovat pieniä, 0,25–0,5 metriä. Jäykillä mailla etäisyydet voivat olla useita metrejä. (Penumadu & Park 2005, s. 6)

MASW-menetelmällä saatavista signaaleista pystytään tekemään erilaisia päätelmiä. Aaltoon sitoutuneen energiamäärän lisäksi voidaan arvioida leikkausaallon etenemisnopeutta eri syvyyksillä ja siten havaita eri maakerroksia ja niiden ominaisuuksia. Kuvassa 28 on esitetty Tennesseeen yliopiston alueella tehtyjen MASW-mittausten tuloksia.



Kuva 28. Leikkausaallon etenemisnopeuden arviointi MASW-mittausten pohjalta. (Penumadu & Park 2005, s. 9)

SASW- ja MASW-menetelmille on yhteistä, että niiden tulosten tulkitsemisen on monimutkaista ja niihin vaaditaan tarkkoja ohjelmistoja. Toisaalta mittausjärjestely on monesti yksinkertaisempi kuin kairausta vaativat kenttämittaukset, koska mittaukset pystytään tekemään maan pinnalta.

3.3 Laboratoriomenetelmät

Maan pengervärähtelyyn vaikuttavia ominaisuuksia voidaan tutkia myös laboratoriossa. Leikkausaallon etenemisnopeuteen savikerroksessa vaikuttava leikkausmoduuli G pystytään määrittämään Bender element tai resonant-column -mittauksella, erityisesti pienien muodonmuutosten alueella (Liikennevirasto 2015, liite 9 s. 9)

3.3.1 Resonant column -menetelmä

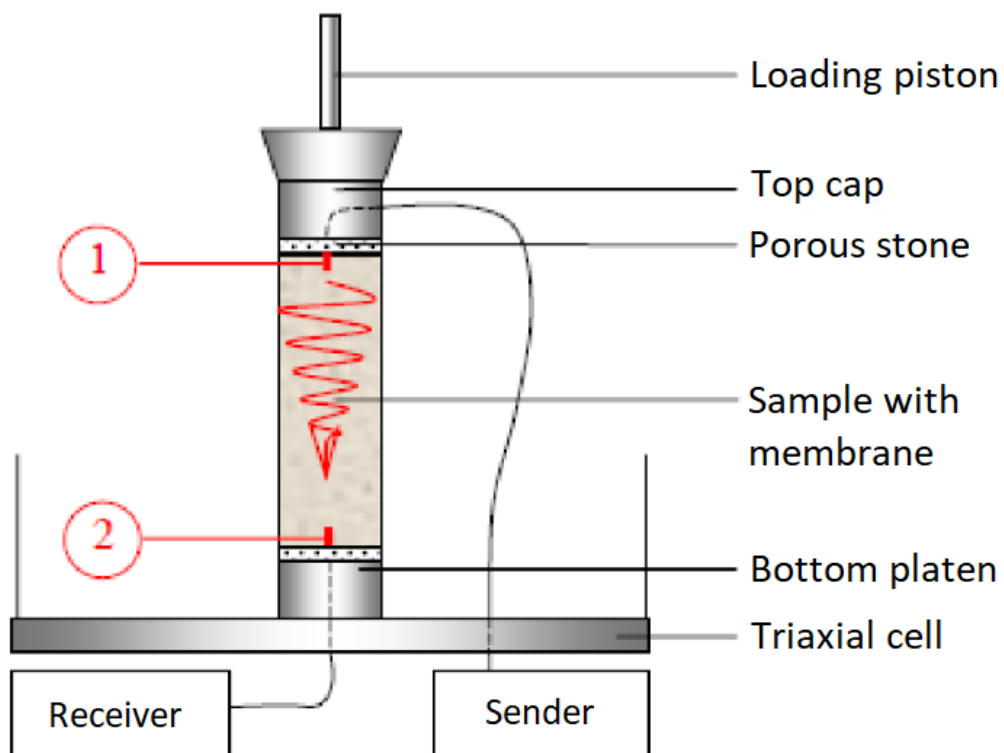
Resonant column -menetelmällä pyritään määrittämään häiriintymättömästä savinäytteestä leikkausmoduuli G . Määrittäminen kyetään tekemään erittäin pienillä leikkausmuodonmuutoksilla, arvoista välillä 10^{-6} – 10^{-4} %. Resonant column -menetelmässä maa-

näyte asetetaan kumikalvolla ympäröitynä kolmiaksaalisellisiin, ja sitä kuormitetaan värähtelyllä. Leikkausmoduulia G määrittäessä värähtely on vääntövärähtelyä. (Mäenpää 2016, s. 19)

Leikkausmoduulin lisäksi resonant column -menetelmää käytetään kimmomoduulin E sekä vaimennussuhteen D määrittämiseen. Vaimennussuhde kuvaa materiaalin kykyä vaimentaa syntynyttä värähtelyä, ja se onkin olennainen suure maan dynaamisten kuormitusten ja niiden vaikutuksien tutkimisessa. (Mäenpää 2016, s. 19)

3.3.2 Bender element -menetelmä

Bender element -menetelmässä leikkausaallon nopeutta mitataan suoraan koekappaleesta. Mittaus perustuu leikkausaallon kulkemiseen maanäytteen läpi. Leikkausaalto synnytetään kappaleeseen annettavasta jännitepulsseista. (Mäenpää 2016, s. 20) Kuvassa 29 on esitetty bender element -laitteiston periaatekuva.



Kuva 29. Bender element -menetelmän periaate. (Hakulinen 2018, s. 21)

Kuvassa 29 maanäyte on kalvon sisässä kolmiaksaalisellissä. Kappaleen päältä annetaan pulssi, jonka kulkuaika kappaleen pohjalle mitataan. Kappaleen koko tiedetään, jolloin saadaan laskettua pulssin nopeus eli leikkausaallon etenemisnopeus.

Rataosuus Kirkkonummi–Turku on sähköistetty vuonna 1995. Perniön kohdalla ratajohdotyyppinä on S71, mikä mahdollistaa maksiminopeudeksi 200 km/h (Väylävirasto 2019b, s. 15). Sähköistytyn yhteydessä rantaradalla alkoi myös Pendolino-junien liikennöinti (Leskinen et al. 2008, s. 15).

Rantarata on varustettu junakulunvalvonnalla (JKV). Kirkkonummi–Turku välillä välisuojastuspisteitä on alle 10 kilometrin välein, mikä mahdollistaa peräkkäisten junien 10 minuutin vuorovälin. Rataosuudella Karjaa–Turku käytettävät asetinlaitteet ovat vuosina 1993–1995 rakennettuja GANZ Domino 55 -releasetinlaitteita. Salo–Ervelä välin turvalaitteiden kaapelointi on uusittu 2010-luvulla. (Väylävirasto 2019b, s. 16)

Vuonna 1991 rakennettu ratakilometrillä 129+502 rautatien ylittävä Yliskylän ylikulkusilta, jossa on suojaustarve max. 160 km/h, koska silta sijaitsee kaarteessa. Vuonna 2019 tehdyssä nopeustarkastelussa todetaan, että sillan pilarin etäisyys vasemmalla puolella radan keskilinjasta on 5,3 metriä, eikä silta aiheuta rajoitteita nopeuden nostolle (Viljanen 2019, s. 7). Silta on kuvattuna seuraavassa kuvassa 31.



Kuva 31. Yliskylän ylikulkusilta km 129+502.

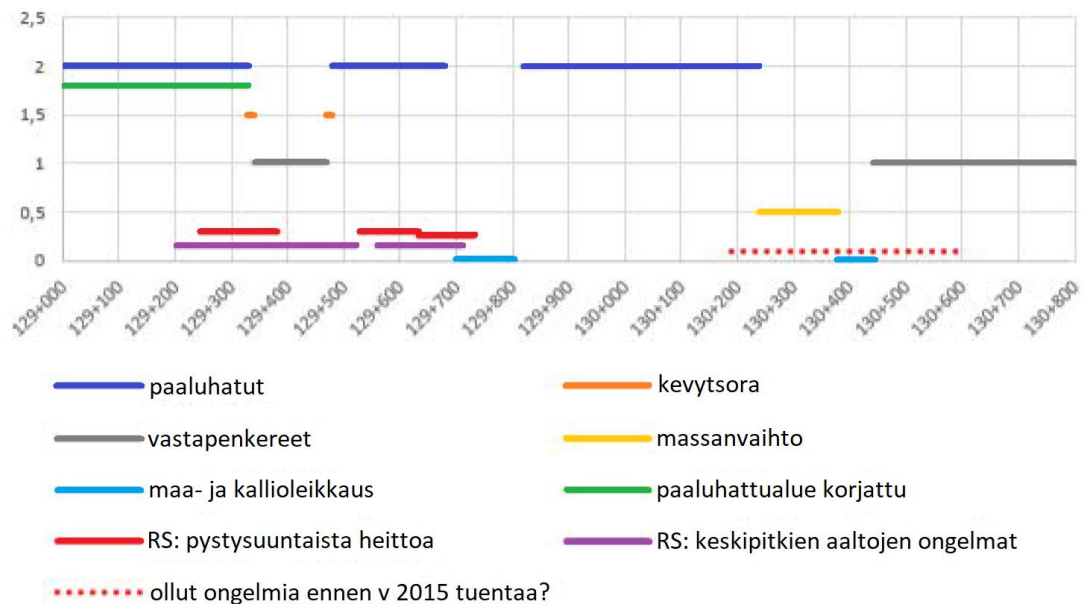
Yllä oleva kuva 31 on otettu pohjoisen suuntaan, 4.4.2020 tehdyssä maastokatselmuksessa.

Muutama kilometri ennen tässä työssä tutkittavaa kohdetta sijaitsee kaksi vuonna 1992 rakennettua tunnelia: Lemunmäki (kmv 125+820–126+595) ja Märjänmäki (kmv 126+940–128+180), joissa maksiminopeusrajoituksena on 160 km/h. Nopeuksia olisi mahdollista nostaa molemmissa tunneleissa IC-junille 180 km/h ja Pendolinoille 220 km/h, koska tunneleiden verhousrakenne on korjattu vaatimuksien mukaisesti vuonna 2018. Nopeusrajoitusten nosto vaatii kuitenkin vielä koeajot rakenteiden toimivuuden ja kaluston kestävyuden varmistamiseksi. (Väylävirasto 2019b, s. 18 & s. 27)

Rantaradalla on toteutettu vuonna 2007 paaluhattuselvitys. Paaluhattualueita ovat tässä työssä tutkittavalla alueella Roadscannersin tulkin mukaan kmv 128+438–129+328, kmv 129+480–129+678 ja kmv 129+820–130+238. (Passi 2007, s. 11) Ensimmäisellä välillä paaluhattujen pinnan keskisyvyys radan keskilinjalta mitattuna on 1,43 m, toisella välillä 1,52 m ja kolmannella 1,68 m.

Radan ali kulkee välillä 129+300–130+800 kolme rumpua. Rummut sijaitsevat kohdissa 129+600, 129+680 ja 130+540.

Vuonna 2019 tehdyssä nopeustarkastelussa rantaradalla on esitetty radan perustamistapa ja todetut ongelmat kmv:llä 129+000–130+800 kuvan 32 mukaisesti.



Kuva 32. Radan perustamistapa ja todetut ongelmat kmv:llä 129+000–130+800. (Viljanen 2019, s. 6)

Kuvasta 32 nähdään, että rataosalla on monenlaisia pohjasuhteita ja perustamistapoja. Pehmeimpiin kohtiin rakennettujen paaluhattualueiden lisäksi alueella on kaksi kalliroleikkaukseen rakennettua kohtaa, kmv:llä 129+700–129+800 ja kmv:llä 130+380–130+440. Tällainen vaihtelu pohjasuhteissa on alueella tyypillistä. Muihin pehmeisiin kohtiin on käytetty myös massanvaihtoa (kmv 130+240–130+380) sekä vastapenkereitä. Vastapenkereet sijaitsevat noin kmv:llä 129+340–129+480 ja kmv:llä 130+440–130+800. Näillä alueilla ei radan alle ole tehty rakenteellisia parannuksia, vaan ainoastaan radan vakavuutta eli stabiiliteettia parantavia vastapenkereitä. Oletuksena on, etteivät vastapenkereet juuri vaikuta junakuormituksen alla etenevän pinta-aallon etenemisnopeuteen. Kyseisissä paikoissa pehmeikön syvyys on säilynyt alkuperäisenä. Nämä asiat voivat mahdollistaa kyseisissä kohdissa värähtelyn voimistumisen. Vastapenkereiden tiedot on esitetty taulukoissa 4 ja 5.

Taulukko 4. Vastapenkereet kmv:llä 129+328–129+480. (Myyrä 1990, s. 5)

kilometriväli	vastapenkereen		ojan etäisyys
	korkeus	leveys	
129+328...+460 vasen	kv-1,0 m	kl+9 m	kl+10 m
129+328...+420 oikea	kv-1,0 m	kl+9 m	kl+10 m
129+420...+480 oikea	h=0,5 m	kl+18 m	-

Taulukko 5. Vastapenkereet kmv:llä 130+440–130+800. (Myyrä 1990, s. 10)

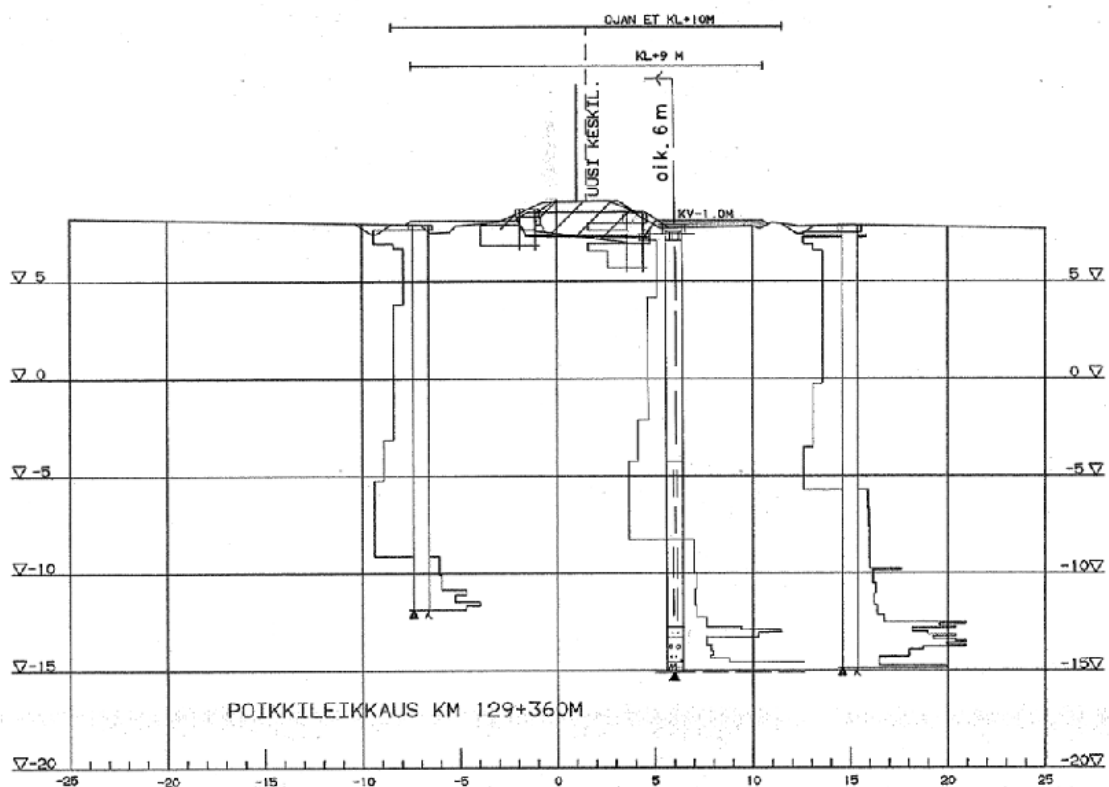
kilometriväli vasen	vastapenkereen		ojan etäisyys
	korkeus	leveys	
130+475...+500	taso +9,2	kl+12 m	kl+12 m
130+500...+530	kv-1,0 m	kl+12 m	kl+14 m
130+530...+610	taso +8,5	kl+12 m	kl+14 m
130+610...+640	kv-1,0 m	kl+12 m	kl+12 m
kilometriväli oikea	vastapenkereen		ojan etäisyys
	korkeus	leveys	
130+440...+490	kv-1,0 m h=0,5 m	kl+12 m kl+12...+18 m	kl+21 m
130+490...+500	+9,1->+8,5 h=0,5 m	kl+12 m kl+12...+18 m	kl+21 m
130+500...+560	taso +8,5 h=0,5 m	kl+12 m kl+12...+18 m	kl+21 m
130+560...+660	taso +8,5 h=0,5 m	kl+12 m kl+12...+18 m	kl+25 m
130+660...+800	taso +8,5 m	kl+15 m	kl+20 m

Taulukosta 4 nähdään, että kilometrivilillä 129+328–129+480 vastapenkereet sijaitsevat radan molemmilla puolilla ja ovat 9–18 metriä leveitä. Taulukosta 5 selviää vastapenkerien sijainti välillä 130+440–130+800. Kyseisellä välillä vasemman puolen vastapenger on rakennettu vain osalle välistä ja on leveydeltään 12 metriä. Oikean puolen vastapenger kulkee koko matkalla ja on leveydeltään 12–18 metriä.

4.2 Alueen pohjasuhteet ja -tutkimukset

Kohteen pohjasuhteista löytyy jonkin verran arkistoitua tietoa. Valtionrautateiden georyhmä on kuvannut vuonna 1988 Pohjanjärven radanoikaisun kmv:llä 129+000–131+800 yhteydessä alueen pohjasuhteita näin: ”Pohjasuhteiltaan alue pehmeää savikkoa muutamaa moreeni- ja kalliomäkeä lukuun ottamatta. Saven paksuus muuttuu paikoitellen jyrkästi varsinkin radan poikkisuunnassa. Saven paksuus on enimmillään yli 20 m.” (Myyrä 1988)

Alueelta löytyy myös Pohjanjärven radanoikaisun yhteydessä tehtyjä poikkileikkauksia. Kuvassa 33 on esimerkkinä poikkileikkaus kilometriltä 129+360.



Kuva 33. Poikkileikkaus km 129+360. (Myyrä 1990)

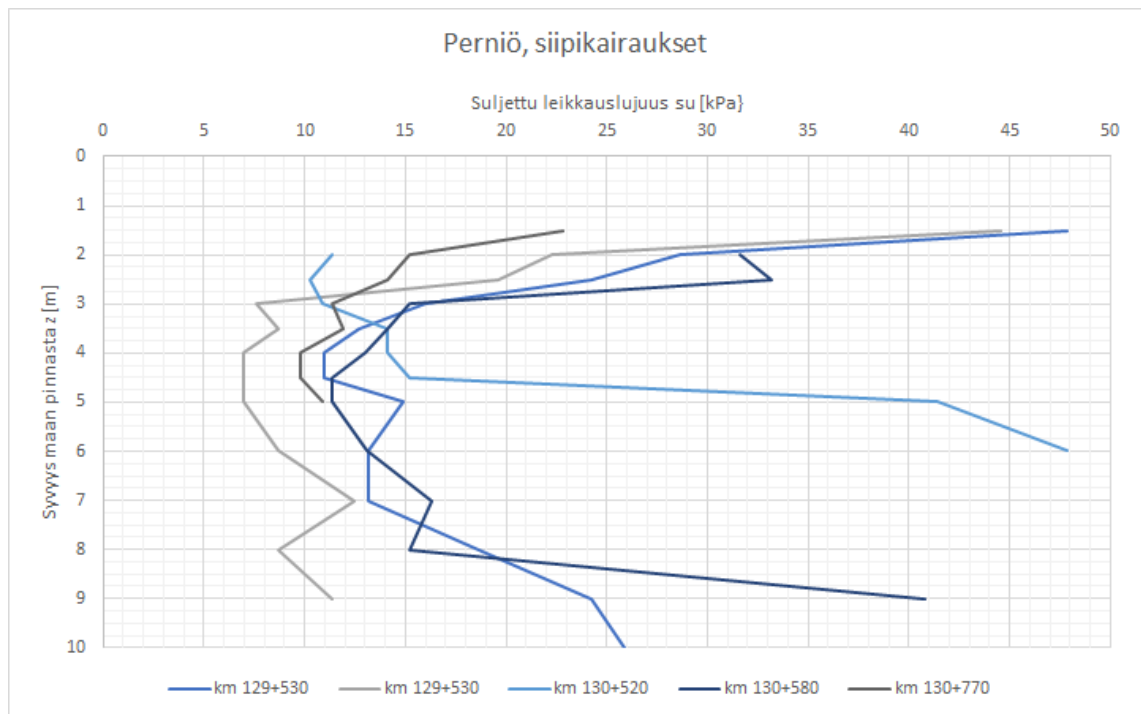
Kuvassa 33 näkyy hyvin radan oikealle puolelle rakennettu vastapenger. Kuvasta nähdään myös pehmeikön syvyys, joka on kyseisessä kohdassa noin 15 metriä.

Perniön savialueet ovat olleet mielenkiinnon kohteina monissa muissakin tutkimuksissa. Marco D’Ignazio on väitöskirjassaan (2016, s. 83) laatinut yhteenvetotaulukon alueen savien tyypillisistä ominaisuuksista. Saven tilavuuspainon γ arvo on keskimäärin $15,4 \text{ kN/m}^3$. Saven vesipitoisuus w vaihtelee välillä 48–109 %, suurimman osan mitatuista arvoista ollen välillä 70–90 %. Suljettu leikkauslujuus s_u savikerroksen yläpinnasta

mitattuna on välillä 9–12 kPa, syvemmälle mentäessä lujuus kasvaa keskimäärin 1,15 kPa metrillä.

Vuonna 2007 tehdyn paaluhattuselvityksen yhteydessä on tehty maanäytteille laboratoriotutkimuksia kilometritä 128+770. Suurimmat vesipitoisuudet ovat olleet kolmen metrin syvyydellä 90–100 %.

Alueelta löytyy muutamia pohjatutkimustietoja Geologian tutkimuskeskuksen pohjatutkimusrekisteristä. Tutkittavalta rataosalta on rekisterissä viisi siipikairausta vuodelta 2010. Siipikairauksista kootut tiedot on esitetty kuvassa 34.



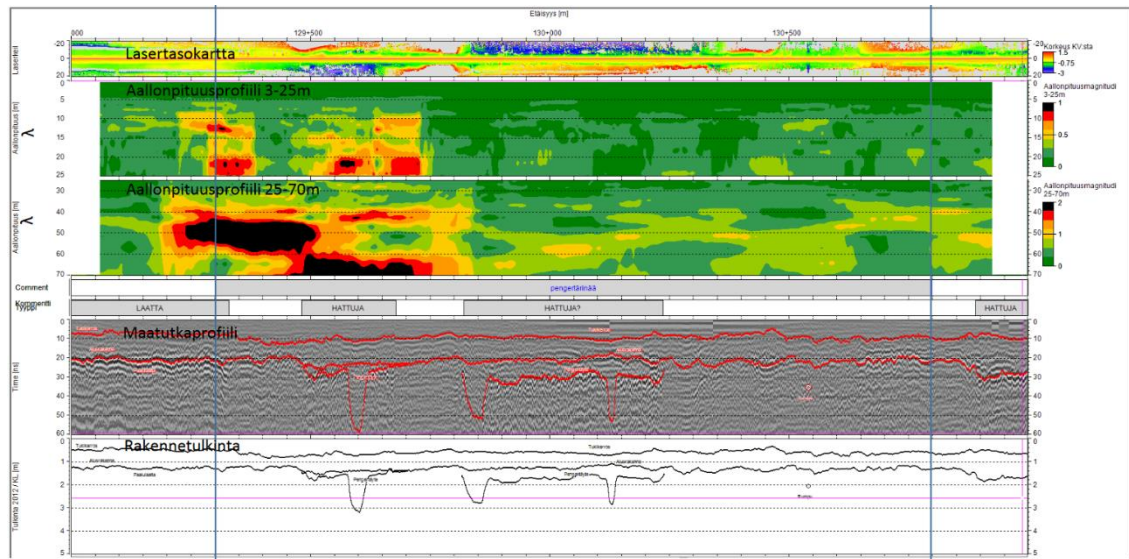
Kuva 34. Rataosalla tehdyt siipikairaukset.

Kuvassa 34 on esitetty siipikairauksella määritetyt redusoimattomat suljetun leikkauslujuuden arvot syvyyden funktiona ratakilometreillä 129+530 kahdesta pisteestä, 130+520, 130+580 ja 130+770. Kuvaajasta voidaan nähdä, että saven lujuus on alhaisimmillaan noin 3–5 metrin syvyydellä maan pinnasta. Kairaukset on lopetettu määräsyvyyteen.

4.3 Aiemmin tehdyt mittaukset ja toimenpiteet kohteella

Roadscanners Oy on vuonna 2015 rantaradalla tehdyssä mittausajossa havainnut kolmella alueella radan geometriassa korkeuspoikkeamia, joiden on tulkittu viittaavan pengervärähtelyyn ja -tärinä. Alueet ovat kmv 72+430–75+200, kmv 97+500–99+300 ja kmv 129+300–130+800. (Silvast 2016) Pelkästään geometrian korkeuspoikkeamista ei pystytä kuitenkaan varmentamaan, että ongelmat aiheutuisivat pengervärähtelystä tai

johtaisivat pengervärähtelyyn. Viimeisimpänä yllä luetelluista alueista on tämän työn tarkastelualue. Roadscanners on laskenut aallonpituusprofiilit mittausajon korkeuspoikkeama-aineiston avulla. Mittausajon maatulkatulkinnat on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Maatulkatulkinta kmv:llä 129+000–131+000. (Silvast 2016)

Kuvassa 35 aallonpituusprofiilit on laskettu aallonpituusväleille 3–25 m ja 25–70 m. Aallonpituusprofiilien mukaan suurimmat ongelmat sijoittuvat kmv:lle 129+205–129+710. Maatutkadatan perusteella radan rakennepaksuus pengertäyte mukaan luettuna vaihtelee 1,2–1,8 metrin välillä. Kesällä 2015 tehty tuenta kmv:llä 130+190–130+590 on rauhoittanut värähtelyjä kyseisellä välillä. (Silvast 2016)

Kohteessa ei ole havaittu routaongelmia. Lievää ongelmaa on aikaisemmin ilmennyt kmv:llä 129+329–129+335, jonne on vuonna 2011 tehty routakiilaus. Ongelman syyksi on arvioitu jauhaantumisen tukikerroksessa sekä pakkasmäärä. (Väylävirasto 2019c, s. 80) Kyseinen kohta sijaitsee paaluhattualueen ja pehmeikön välisessä kevytsorasiirtymärakenteessa. Havaitut ongelmat saattavatkin liittyä siirtymärakenteessa tapahtuviin painumaeroihin.

5. MITTAUKSET JA TUTKIMUKSET PERNIÖSSÄ

Pengervärähtelyriskin arvioimiseksi on tarpeellista tehdä kattavasti tutkimuksia ja mittauksia tutkittavalla alueella. Tässä luvussa kerrotaan tarvittavista tutkimuksista ja mittauksista Perniön koekohteella leikkausaallon etenemisnopeuden selvittämiseksi. Luvun alussa on kerätty lähtötietoja, joiden perusteella tehdään valinnat mistä paikoista mittauksia olisi tarpeellisinta tehdä. Tämän jälkeen käydään läpi kaikki tehtävät mittaukset ja maaperän tutkimukset sekä niistä saadut mittaustulokset.

5.1 Mittauspaikkojen valinta

Perniön kohde sijaitsee rantaradalla kmv:llä 129+300–130+800. Tässä työssä toteutettavien mittausten tarkemmat paikat on valittu hyödyntäen luvussa 4 käsitellyjä aiemmin tehtyjä tutkimuksia ja toimenpiteitä. Pengervärähtelyn kannalta ongelmallisimmiksi paikoiksi arvioitiin rataosuudet, jotka on vahvistettu ainoastaan vastapenkereiden avulla. Nämä kohteet ovat kmv 129+340–129+480 ja kmv 130+440–130+800. Näistä osuuksista molemmat päätettiin tutkia. Molemmilta väleiltä tehtiin arviointia aiempien pohjatutkimusten perusteella.

Kilometriviäliltä 129+340–129+480 on olemassa vanhoja pituus- ja poikkileikkauksia sekä pohjatutkimuksia 1990-luvulta. Näistä on kerätty tietoja penkereen paksuudesta, savikerroksen paksuudesta sekä mahdollisesti löytyneitä tietoja saven leikkauslujuudesta. Tietoja on kerätty 20 metrin välein taulukkoon 6.

Taulukko 6. Lähtötietoja, kmv 129+340–129+480.

ratakilometri	ratapenkereen paksuus	savikerroksen paksuus	savikerroksen pienin suljettu leikkauslujuus S_u	valitaan mittauksiin?
129+360	1,8 m	17 m	n. 12 kPa	kyllä
129+380	1,8 m	16 m		kyllä
129+400	1,8 m	16 m	n. 12 kPa	kyllä
129+420	1,8 m	14 m		kyllä
129+440	1,8 m	11 m		kyllä
129+460	1,8 m	9 m	n. 10 kPa	kyllä

Taulukosta 6 valitaan mittauksiin kaikki 20 metrin välein valitut pisteet. Syy valinnoille on, että pehmeikkö on syvä koko kyseisellä välillä, eikä saven suljettu leikkauslujuus ole suuri tiedossa olevissa pisteissä.

Vastaavalla tavalla arvioitiin myös kmv 130+440–130+800. Kerätyt tiedot ovat esitettynä taulukossa 7.

Taulukko 7. Lähtötietoja, kmv 130+440–130+800.

ratakilometri	ratapenkereen paksuus	savikerroksen paksuus	savikerroksen pienin suljettu leikkauslujuus S_u	valitaan mittauksiin?
130+460	1,8 m	5 m		ei
130+480	1,8 m	5 m	n. 10 kPa	ei
130+500	1,8 m	5 m		ei
130+520	1,8 m	8 m		kyllä
130+540	4,0 m (rumpu)	7 m	n. 10 kPa	ei
130+560	1,8 m	7 m		kyllä
130+580	1,8 m	8 m	n. 10 kPa	kyllä
130+600	1,8 m	5 m		kyllä
130+620	1,8 m	5 m		ei
130+640	1,8 m	4 m		ei
130+660	1,8 m	3 m		ei
130+680	1,8 m	5 m	n. 10 kPa	kyllä
130+700	1,8 m	5 m		kyllä
130+720	1,8 m	5 m		kyllä
130+740	1,8 m	4 m		ei
130+760	1,8 m	3 m		ei
130+780	1,8 m	3 m		ei

Taulukosta 7 valitaan tässä työssä tehtäviin mittauksiin pisteet 130+520–130+600 ja 130+680–130+720. Nämä on valittu pehmeikön syvyyden ja ominaisuuksien perusteella. Ratakilometri 130+540 on päätetty jättää tutkimatta, koska kohdalla sijaitsee oja sekä suuri betonirumpu. Myöskään rummun välittömästä läheisyydestä ei päätetty tehdä mittauksia, koska arvioitiin, että rummun asennuksessa maakerrokset ovat saattaneet sekoittua ja häiriintyä.

5.2 Mittausmenetelmien valinta

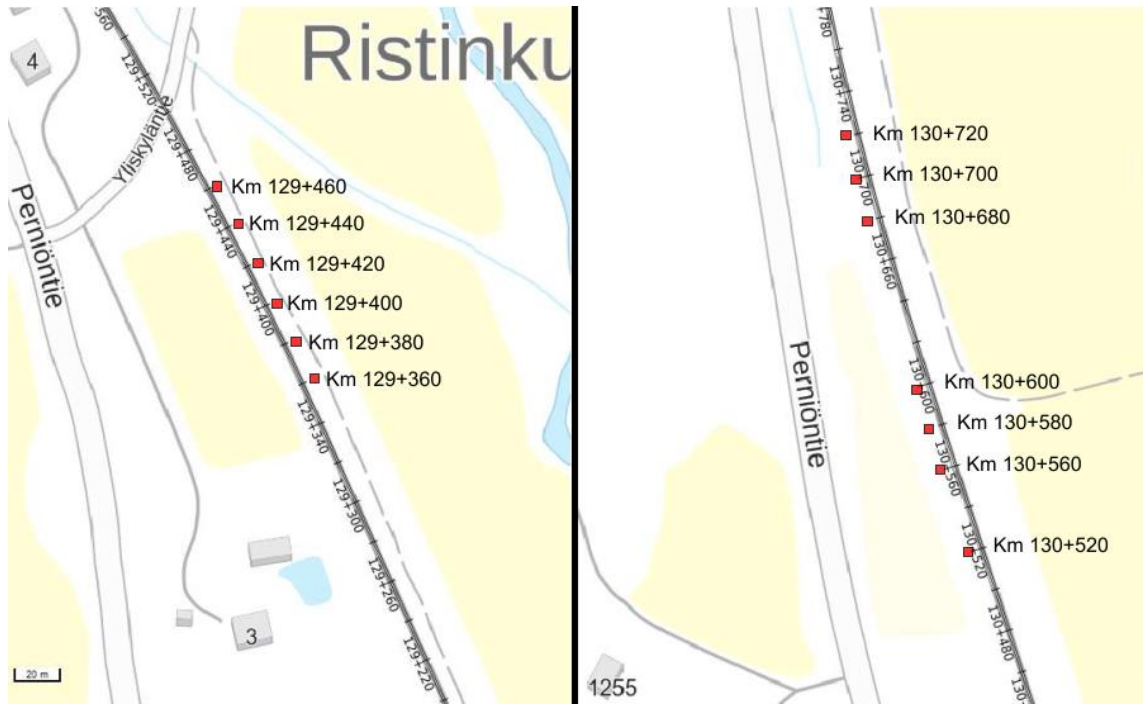
Mittauspaikkojen valinnan lisäksi valittiin myös käytettävät mittausmenetelmät. Mittausmenetelmien valintaan vaikuttavat oleellisesti käytettävissä olevat resurssit ja laitteet. Niiden lisäksi vaikuttavia asioita ovat esimerkiksi ratatyöluopien saatavuus, eli toisin sanoen kuinka pitkiä työrakoja pystytään saamaan liikennöivien junien välissä.

Tässä työssä leikkausaallon etenemisnopeuden mittauksiin valittiin cross-hole -menetelmä. Cross-hole -mittaukset pystytään tekemään käsin kairaamalla. Menetelmä on käsin tehtynä työläs, mutta tulosten luotettavuus ja luettavuus ovat erinomaisia. Menetelmässä yhden pisteen mittausten tekemiseen kului aikaa kaikkine valmisteluineen ja purkuineen reilu tunti. Tämän pituisia työrakoja oli kuitenkin hyvin saatavilla myös työtä helpottavasti valoisaan aikaan, koska COVID-19 -tilanteen takia junavuoroja oli jäänyt pois aikatauluista.

Cross-hole -mittausten lisäksi mittauspisteistä päätettiin ottaa savinäytteet, joista määritettiin vesipitoisuudet laboratoriossa. Muita mittausmenetelmiä ei käytetty, koska arvioitiin, että näillä kahdella menetelmällä saadaan riittävän hyvällä tarkkuudella tuloksia leikkausaallon etenemisnopeudesta.

5.3 Toteutetut mittaukset ja tutkimukset

Perniön kohteella toteutettiin mittaukset 5.–6.5.2020 sekä 17.6.2020. Pengervärähtelyn kannalta ongelmallisimmiksi arvioiduista paikoista mitattiin leikkausaallon etenemisnopeutta savessa cross-hole -menetelmällä. Samoista pisteistä savesta otettiin lisäksi näytteet, joista määritettiin laboratoriossa vesipitoisuus. Sen avulla voidaan myös arvioida leikkausaallon etenemisnopeutta. Mittauspisteet ovat esitettynä kuvan 36 kartassa punaisilla neliöillä.



Kuva 36. Mittauspisteet kartalla. (Ratadata 2020)

Kuvan 36 vasemman puolen alueen kuusi mittauspistettä sijaitsevat Perniön kohteen eteläpäässä. Kuvan oikean puolen alueen seitsemän mittauspistettä sijaitsevat kohteen pohjoispäässä.

5.3.1 Leikkausaallon etenemisnopeuden mittaus kentällä

Pengervärähtelyä eli pystysuuntaisten palautuvien siirtymien voimistumista voi tapahtua, kun junan nopeus lähestyy maassa etenevän pinta-aallon nopeutta. Pinta-aallon etenemisnopeutta pystytään arvioimaan likimain samaa nopeutta etenevän leikkausaallon etenemisnopeutta mittaamalla. Leikkausaallon etenemisnopeutta voidaan mitata luvussa 3 kuvatuin menetelmin. Näistä vaihtoehdoista tällä kohteella tehtäviin mittauksiin valittiin cross-hole -menetelmä.

Cross-hole -mittauksia tehtiin yhteensä 13 pisteestä radan vierestä. Mittaukset tehtiin radan vieressä, koska käytettävissä oleva laitteisto ei soveltunut mittaamiseen ratarakenteen läpi. Kuvassa 37 on esitetty mittausjärjestelyt radan varressa.



Kuva 37. Mittausjärjestelyt, km 129+400.

Kuvasta 37 ilmenee herätteen ja vastaanottimen sijainti suhteessa rataan. Herätteenä oleva kairatanko on merkitty kuvaan punaisella nuolella, ja keltaisella nuolella on merkitty paikka, johon vastaanotin on upotettu. Herätteen ja vastaanottimen välinen etäisyys oli eri mittauspäikoissä 4–5 metriä. Etäisyys maan pinnalla mitattiin sekä mittanauhalla että GPS:llä, jolla päästiin noin yhden senttimetrin mittatarkkuuteen. Samalla tarkkuudella mitattiin myös heräte- ja vastaanotinpisteen sijainti ja korkeusasema rataan nähden ratapölkyn keskipisteestä tarkasteltuna.

Täysin tarkkaa etäisyyttä mittaussyvytydessä ei pystytty mittamaan. Tuloksien tulkinassa täytyy huomioida mahdollinen etäisyysvirhe, esimerkiksi jos kairaus ei ole suuntautunut täysin kohtisuoraan alaspäin. Virheen arvioitiin olevan kuitenkin korkeintaan 10 cm, joka tarkoittaisi 5 metrin mittausetäisyydellä 2 %:n virhettä. Kuvassa 38 on esitetty kierrekairan asennus maahan.



Kuva 38. Kierrekairan asennus maahan.

Kuvassa 38 on ensin kaivettu kuoppa pintamaahan lapiolla ja kierrekairan avulla. Savi-kerroksen alkaessa kierrekaira pyöritettiin lopulliseen mittaussyvyyteen. Samalle syvyydelle 4–5 metrin päähän asennettiin myös leikkausaallon vastaanotin. Vastaanotin ja sen maahan työntämiseen käytetty harjateräksestä tehty työkalu on esitetty kuvassa 39.



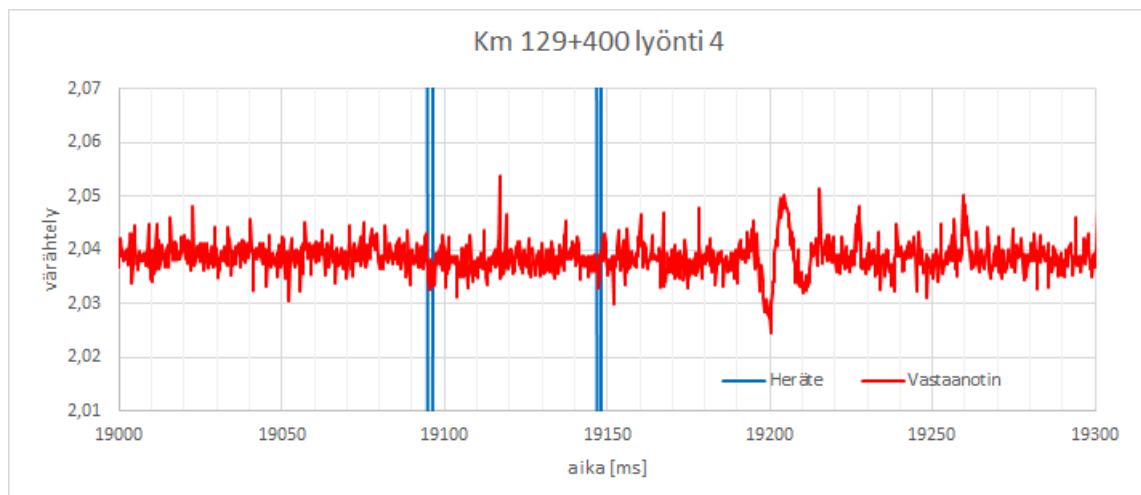
Kuva 39. Vastaanotin ja asennustyökalu.

Kuvan 39 vastaanotin asennettiin samaan syvyyteen kuin herätteen antamiseen käytetty kierrekaira. Kierrekairaan lyöntikohdan alapuolelle asennettiin kiihtyvyyssanturi, jotta saatiin talteen ajanhetki, jolloin värähdysaalto on lähtenyt etenemään maassa. Anturin sijainti kairatangon varressa näkyy kuvassa 40.



Kuva 40. Kierrekaira ja herätteen kiihtyvyyssanturi.

Jokaisessa mittauspisteessä tehtiin 3–5 lyöntiä, jotta saatiin mahdollisten epäonnistuneiden lyöntien tulokset karsittua. Onnistuneet lyönnit olivat aina yhden millisekunnin tulos tarkkuudella toisistaan, joten onnistuneiden lyöntien keskiarvo vastaa hyvin tarkasti mitauspaikan todellisuutta. Kuvassa 41 on esimerkki lyönnistä ja sen aikaansaamasta herätteestä sekä vastaanottimen reaktiosta.



Kuva 41. Esimerkkikuvaaja cross-hole -mittauksesta, km 129+400.

Kuvan 41 esimerkkikuvaajasta nähdään, että lyönti eli heräte on tapahtunut ajanhetkellä 19 095 ms. Heräte on tapahtunut vasemmanpuolimmaisimman sinisen viivan kohdalla,

muut siniset viivat ovat aiheutuneet kairatangon heilumisesta lyönnin jälkeen. Vastaanotin on alkanut reagoimaan ajanhetkellä 19 195 ms. Aikojen erotus on siis 100 millisekuntia. Tästä saadaan laskettua leikkausaallon etenemisnopeus, kun tiedetään pisteiden välinen etäisyys, joka tässä mittauspaiikassa oli 5,09 metriä. Leikkausaallon etenemisnopeus lasketaan kaavalla

$$v_s = \frac{s}{t}, \quad (5.1)$$

jossa s on matka metreinä ja t on aika sekunteina. Kuvan 41 tapauksessa leikkausaallon etenemisnopeudeksi saadaan siis $v_s = \frac{s}{t} = \frac{5,09 \text{ m}}{0,100 \text{ s}} \approx 50,9 \text{ m/s}$. Kaikki tulokset on esitetty tarkemmin luvussa 5.4.

5.3.2 Näytteiden vesipitoisuudet

Jokaisesta mittauspisteestä otettiin mittausten yhteydessä savinäyte. Näyte otettiin kierrekairan avulla samasta syvyydestä kuin leikkausaallon nopeusmittaus kyseisissä pisteissä. Savinäyte on siis pisteestä, josta herätteen aiheuttama värähtelyaalto on lähtenyt kohti vastaanotinta. Kierrekaira nostettiin tunkilla ylös savesta, ja näytteen pinnalta puhdistettiin siihen tarttunut pintamaamateriaali. Kuvassa 42 on esitetty savinäytteiden ottaminen.



Kuva 42. Savinäyte, vasemmalla ennen irtomaan puhdistusta ja oikealla puhdistettu näyte.

Kuvan 42 vasemmalla puolella on savinäyte ennen puhdistusta ja kuvan oikealla puolella on puhdistettu savinäyte. Puhdistettu näyte irrotettiin edustavilta osin kairasta ja näyte suljettiin salpapussiin. Salpapusseissa savinäytteet kuljetettiin laboratorioon, missä niistä määritettiin vesipitoisuudet.

Vesipitoisuus w [%] kertoo, kuinka paljon kuivaamattomassa näytteessä on vettä verrattuna kuivatun näytteen massaan. Vesipitoisuuden laskentakaava on

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2}, \quad (5.2)$$

jossa m_1 on näytteen massa ennen kuivausta ja m_2 on kuivatun näytteen massa. Näytteen kuivatus tapahtuu uunissa 105–110 °C:n lämpötilassa yön yli, kunnes näyte saavuttaa vakiopainon.

Savinäytteistä saatujen vesipitoisuuksien w avulla pystytään arvioimaan leikkausaallon etenemisnopeutta luvussa 2.6 esitetyllä kaavalla (2.8). Näytteiden vesipitoisuudet ja niiden pohjalta lasketut leikkausaallon etenemisnopeudet on esitetty seuraavassa luvussa 5.4.

5.4 Saadut tulokset

Cross-hole -menetelmällä tehdyillä mittauksilla saatiin leikkausaallon etenemisnopeudeksi savessa 50–105 m/s eli 180–380 km/h. Kaikki mittauksin saadut tulokset on esitetty taulukossa 8.

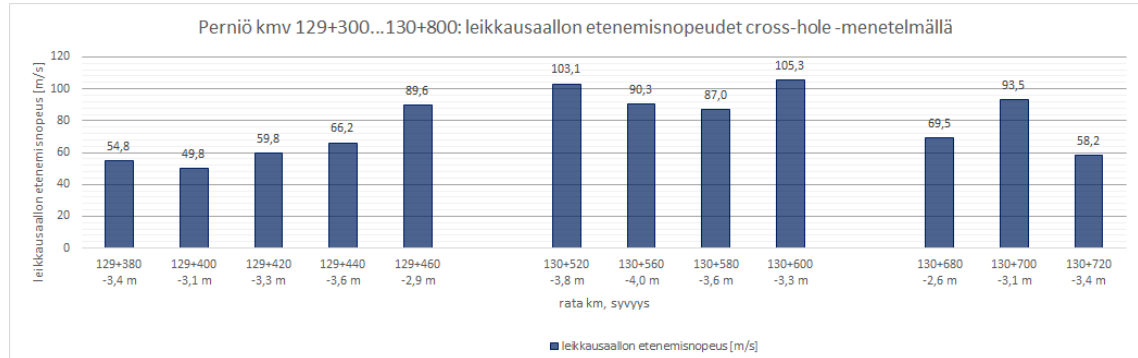
Taulukko 8. Saadut tulokset cross-hole -menetelmällä.

rata km	mittaus-syvyys rata-pölkystä [m]	herätteen etäisyys radan keskilinjasta [m]	vastaanottimen etäisyys herätteestä [m]	kulku-aika, 3 lyönnin keskiarvo [ms]	kairatangan vaikutus kulku-aikaan [ms]	leikkausaallon etenemisnopeus savessa [m/s]
129+380	-3,4	oik. 6,0	4,73	87,5	-0,6	54,8
129+400	-3,1	oik. 5,3	5,03	101,5	-0,6	49,8
129+420	-3,3	oik. 4,8	4,99	84,2	-0,6	59,8
129+440	-3,6	oik. 5,5	4,53	69,0	-0,6	66,2
129+460	-2,9	oik. 5,1	5,16	58,0*	-0,4	89,6*
130+520	-3,8	vas. 6,0	4,03	39,7	-0,6	103,1
130+560	-4,0	vas. 7,2	3,95	44,3	-0,6	90,3
130+580	-3,6	vas. 6,3	3,95	46,0	-0,6	87,0
130+600	-3,3	vas. 5,0	4,11	39,7	-0,6	105,3
130+680	-2,6	vas. 5,0	4,24	61,7	-0,6	69,5
130+700	-3,1	vas. 5,2	3,93	42,7	-0,6	93,5
130+720	-3,4	vas. 5,0	3,98	69,0	-0,6	58,2

* = epätarkka tulos

Taulukossa 8 ensimmäisessä sarakkeessa on mittapisteen ratakilometrit ja toisessa sarakkeessa on kerrottu, kuinka syvälle herätteen antamiseen käytetty kierrekaira on kairattu ratapölkyn pinnan tasosta mitattuna. Kolmannessa sarakkeessa on kerrottu, kuinka kaukana herätepiste on ollut radan keskilinjasta. Kilometrillä 129 mittaukset tehtiin radan oikealta puolelta, ja kilometrillä 130 radan vasemmalta puolelta. Puolen valinta tehtiin maasto-olosuhteiden perusteella. Neljännen sarakkeen lukema on herätteen ja vastaanottimen välinen etäisyys, ja viidennessä sarakkeessa on leikkausaallon kulkeutumiseen kulunut aika millisekunneina. Koska herätteen kiihtyvyyssanturi oli kairatangan yläpäässä,

on kuudennessa sarakkeessa vähennetty kairatangossa edenneen aallon kulku-aika. Viimeiseen sarakkeeseen on saaduista tuloksista laskettu leikkausaallon etenemisnopeus kullakin ratakilometrillä. Saadut leikkausaallon etenemisnopeudet on esitetty myös kuvassa 43.



Kuva 43. Leikkausaallon etenemisnopeudet cross-hole -menetelmällä.

Pienin arvo 49,8 m/s pisteessä km 129+400 on hyvin alhainen, mutta ei ole syytä epäillä, että mittaus olisi epäonnistunut. Pisteessä 129+460 mittaus oli ainoa, jonka kiihtyvyyssanturin piirtämistä kuvaajista jäi tuloksin varaa, joten sen pisteen tulosta voidaan pitää epävarmana. Pisteessä 129+460 mittaussyvyys oli vain 2,0 metriä vastapenkereen yläpinnasta, eli vain noin yhden metrin verran kerroksen alapinnasta. Onkin mahdollista, että leikkausaalto lähti etenemään vastapenger materiaalin kautta, mikä moninkertaisesti aallon etenemisnopeuden. Cross-hole -mittaus tehtiin myös pisteestä 129+360, mutta kiihtyvyyssantureiden data jäi epäselväksi, joten leikkausaallon kulku-aikaa ei saatu selvitettyä.

Syvyyden vaikutusta leikkausaallon etenemisnopeuteen yritettiin mitata pisteessä 129+400. Pisteessä mitattiin 3,1 metrin syvyyden lisäksi aallon etenemistä 4,1 m sekä 5,1 m syvyyksistä. 4,1 metrin syvyydessä leikkausaallon etenemisnopeudeksi saatiin 48,7 m/s, eli 1,1 m/s alhaisempi kuin 3,1 metrin syvyydessä. 5,1 metrin syvyydessä leikkausaallon vastaanottimen data oli vaikeasti luettavaa, eikä nopeutta saatu arvioitua. Ongelma aiheutui oletettavasti siitä, että vastaanotin ei ollut täysin tiiviisti puristuksissa savikerroksessa.

Leikkausaallon etenemisnopeuksia syvemältä tai ratarakenteen alta ei tässä tutkimuksessa pystytty toteuttamaan. Saadut tulokset vastannevat kuitenkin hyvin myös ratarakenteen alla sijaitsevan saven ominaisuuksia. Lähellä maan pintaa savi voi olla lujittunut ratarakenteen alla, mutta syvemällä eroa ominaisuuksissa ei oletettavasti ole.

Seuraavassa on esitetty mittausten yhteydessä otetuista savinäytteistä laboratoriossa mitatut vesipitoisuudet. Saadut tulokset savinäytteiden vesipitoisuuksista ovat taulukossa 9.

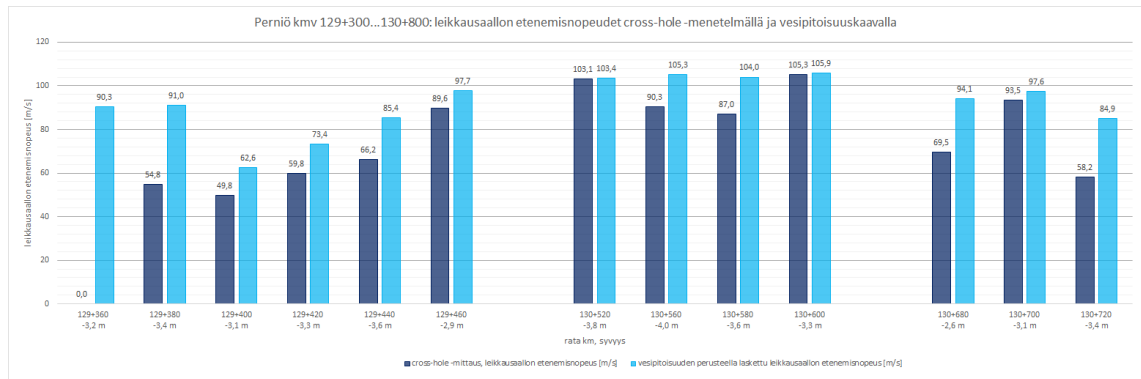
Taulukko 9. Saadut vesipitoisuuksien arvot.

rata km	syvyys rata- pölkystä [m]	vesipitoisuus w [%]	leikkausaallon etenemis- nopeus [m/s] RATO 3 - ohjeen kaavalla
129+360	-3,2	59,6	90,3
129+380	-3,4	58,7	91,0
129+400	-3,1	96,6	62,6
	-4,1	82,8	72,9
	-5,1	83,2	72,6
129+420	-3,3	82,2	73,4
129+440	-3,6	66,1	85,4
129+460	-2,9	49,8	97,7
130+520	-3,8	42,1	103,4
130+560	-4,0	39,6	105,3
130+580	-3,6	41,3	104,0
130+600	-3,3	38,8	105,9
130+680	-2,6	54,6	94,1
130+700	-3,1	49,9	97,6
130+720	-3,4	66,8	84,9

Taulukosta 9 huomataan saatujen vesipitoisuuksien vaihtelevan välillä 38,8–96,6 %. Taulukon neljänteen sarakkeeseen on laskettu leikkausaallon teoreettisia etenemisnopeuksia käyttäen RATO 3 -ohjeessa, tämä työn luvussa 2.6 esitettyä kaavaa (2.8).

Suurin vesipitoisuus 96,6 % havaittiin pisteessä 129+400. Vesipitoisuuksien arvoissa on melko paljon vaihtelua. Välillä 130+520–130+600 vesipitoisuuksien arvot ovat suhteellisen alhaisia ja samankaltaisia toisiinsa nähden. Tämä korreloi hyvin sen kanssa, että kyseinen savi tuntui käsin kairatessa huomattavasti jäykemmältä kuin muualla tutkimusalueella.

Kuvassa 44 on esitetty, miten cross-hole -menetelmällä saadut arvot vertautuvat vesipitoisuuden laskentakaavalla laskettuihin leikkausaallon etenemisnopeuden arvoihin kussakin mittauspisteessä.



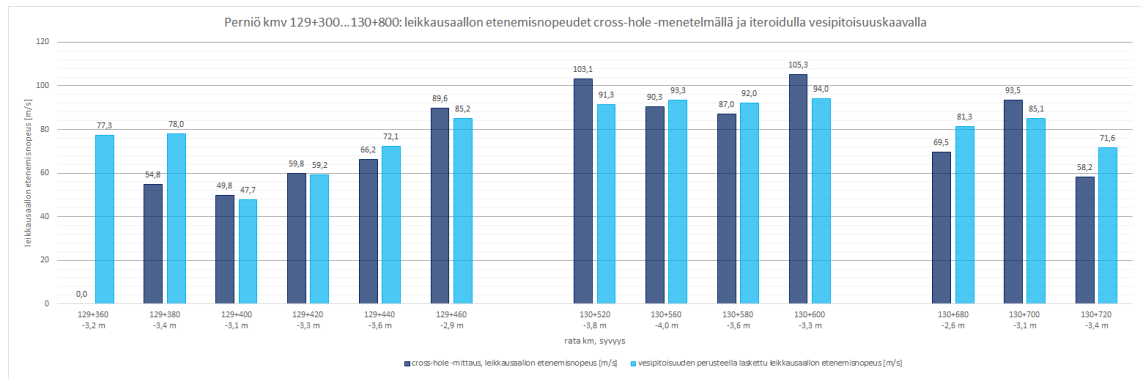
Kuva 44. Mitatut arvot leikkausaallon etenemisnopeuksille verrattuna vesipitoisuuden perusteella laskettuihin arvoihin.

Kuvassa 44 tummansiniset pystytolpat kuvaavat cross-hole -menetelmällä saatuja leikkausnopeuden etenemisnopeuksia ja vaaleansiniset pystytolpat kuvaavat vesipitoisuuden perusteella laskettuja arvioita etenemisnopeudesta. Kuvaajasta nähdään, että poikkeuksetta vesipitoisuuden kaava näyttää antavan suurempia arvoja leikkausaallon etenemisnopeudelle kuin suoraan mitatut arvot. Tämä ei tietenkään ole toivottava asia, mikäli esimerkiksi juuri pengervärähtelyn paikallista riskinarviointia tehtäisiin savinäytteiden vesipitoisuuksien perusteella.

Tässä työssä saatujen mittaustulosten perusteella iteroitiin RATO 3 -ohjeessa esitettyä kaavaa (2.8) vastaamaan Perniön kohteen tuloksia. Samankaltainen yksinkertaistettu kaava muutettiin muotoon

$$v_s = 125 - 0,80 * w, \quad (5.3)$$

jossa v_s [m/s] on leikkausaallon etenemisnopeus maassa ja w [%] on saven vesipitoisuus. Tällä kaavalla saatiin vesipitoisuuksien perusteella lasketut leikkausaallon etenemisnopeuksien arvot vastaamaan keskimäärin parhaiten cross-hole -mittauksin saatuja arvoja. Kaavalla (5.3) saadut laskelmat leikkausaallon etenemisnopeuksille ja niiden vertautuminen cross-hole -mittauksin saatuihin arvoihin on esitetty kuvassa 45.



Kuva 45. Leikkausaallon etenemisnopeuksien vertailu iteroidulla vesipitoisuuskaavalla.

Kuvassa 45 vaaleansiniset pystytolpat kuvaavat iteroidulla vesipitoisuuskaavalla (5.3) laskettuja leikkausaallon etenemisnopeuksia. Kuvasta nähdään, kuinka arvot vastaavat toisiaan paremmin kuin kuvassa 44, varsinkin alhaisilla leikkausaallon etenemisnopeuksilla. Kyseisen kaavan (5.3) soveltuvuutta muualla Suomessa mitattuihin tuloksiin ei pystytä kuitenkaan tarkemmin tässä työssä arvioimaan, mutta sen käyttökelpoisuutta tulevaisuudessa tapahtuvissa mittauksissa voisi olla syytä kokeilla.

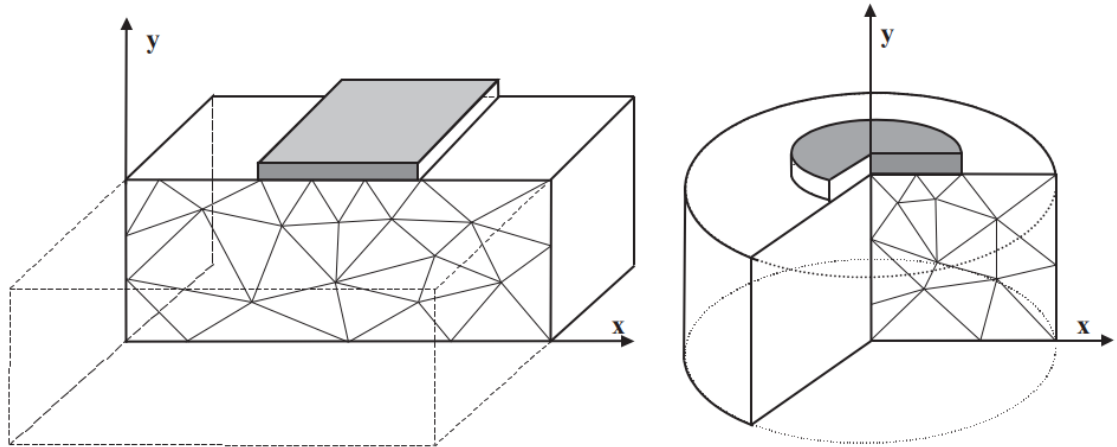
6. PENGERVÄRÄHTELYN MALLINTAMINEN

Tässä luvussa tutkitaan, miten pengervärähtelyriskiä voidaan arvioida mallintamalla. Ensin kerrotaan pengervärähtelyn mallintamisesta yleisesti, minkä jälkeen toisessa aliluvussa mallinnetaan Perniön koekohteen pengervärähtelyä. Mallin lähtötietoina ovat tämän työn yhteydessä Perniön kohteella tehdyt leikkausaallon etenemisnopeuden mitaukset sekä alueella tehdyt pohjatutkimukset. Mallinnus tehdään elementtimenetelmään perustuvalla PLAXIS 2D -ohjelmalla. Luvun lopussa analysoidaan, kuinka mallintamalla saadut värähtelyarvot vastaavat odotettuja tuloksia, ja kuinka ne mahdollisesti vastaavat todellisuudessa saatavia arvoja. Perniön kohteella on suunnitelmissa ajaa nopeudennoston koeajoja vuonna 2021. Mallinnustuloksista voidaan tehdä alustavia päätelmiä, kuinka ajonopeuden nostaminen vaikuttaisi värähtelyn suuruuteen Perniön kohteella. Mallin pääasiallinen tarkoitus on kuitenkin olla suuntaa antava ja mahdollisimman helppokäyttöinen työkalu pengervärähtelyriskin arviointiin, joten pelkkiä mallinnustuloksista saatuja lukuarvoja ei voida käyttää kohteen pengervärähtelyriskiä arvioidessa.

6.1 Pengervärähtelyn mallintaminen PLAXIS 2D -ohjelmalla

PLAXIS 2D on kaksiulotteinen elementtimenetelmään perustuva mallinnusohjelma, joka on kehitetty analysoimaan geoteknisiä ongelmia, kuten esimerkiksi muodonmuutoksia, stabiiliteettia tai pohjaveden virtausta. (Brinkgreve et al. 2017a, s. 3) Pengervärähtely on ilmiönä hyvin erityislaatuinen. Tästä syystä ei ollut olemassa valmista pohjaa, johon syöttää lähtöarvoja, vaan malli tuli luoda itse. Tämä kuitenkin onnistui käyttämällä dynaamista mallia, jossa junan akseli- ja telikuormia siirrettiin eteenpäin mallissa tarvittavan pituisin aika-askelin.

2D-malli on yksinkertaistempimpi kuin 3D-malli, mutta se antaa silti usein riittävän tarkkuuden geoteknisiin laskentoihin. Maaperän ominaisuuksia pystyy 2D-mallin pituusleikkauksessa kuvaamaan hyvin, kun oletuksena on, että maakerrokset pysyvät samanlaisina suurella alueella. PLAXIS 2D -ohjelmassa valitaan ensin, minkä akselin suhteen malli on symmetrinen. Vaihtoehdot ovat *plane strain* eli tasomuodonmuutos, ja *axisymmetric* eli aksisymmetrinen. Nämä ovat esitettyinä kuvassa 46.

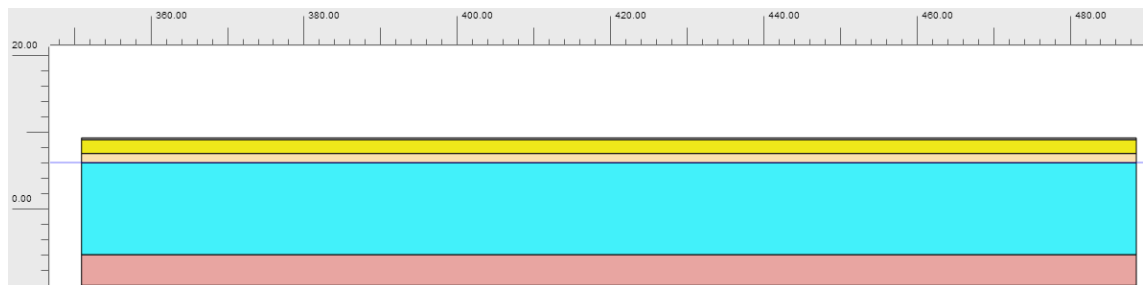


Kuva 46. Tasomuodonmuutos (vasemmalla) ja aksisymmetrisyys (oikealla).
(Brinkgreve et al. 2017b, s. 21)

Kuvassa 46 vasemmalla puolella esitetty tasomuodonmuutos tarkoittaa, että muodonmuutokset tapahtuvat xy -tasossa. Kolmas suunta, olkoon z , oletetaan jatkuvan loppumattomiin. Muodonmuutosten z -suunnassa oletetaan olevan nollia, mutta suunnan normaalijännitys otetaan täysin huomioon (Brinkgreve et al. 2017b, s. 20). Tasomuodonmuutosmalli soveltuu erityisesti poikkileikkauksien mallintamiseen.

Kuvan 46 oikealla puolella esitetty aksisymmetrisyys tarkoittaa, että malli on symmetrinen y -akselin suhteen x -akselin ollessa säteen pituus. Se soveltuu käytettäväksi esimerkiksi mallinnettaessa tilannetta, jossa pistemäinen värähtelylähde aiheuttaa värinää ympäristöön, koska mallissa pystytään huomioida värinän leviämisen aiheuttama vaimeneminen. (Brinkgreve et al. 2017b, s. 21)

Pengervärähtelyä mallinnettaessa on käytettävä tasomuodonmuutosmallia, koska pengervärähtelyilmiön kannalta on oleellista saada sekä junan että sen alla kulkevan aallon etenemistä mallinnettua. Näin ollen mallintaminen tehdään radan pituusleikkauksessa, jollainen on esitetty kuvassa 47.



Kuva 47. Radan pituusleikkaus PLAXIS-ohjelmassa.

Kuvassa 47 on 140 metriä pitkä radan pituusleikkaus. Pituusleikkauksen kuvaaminen 2D-mallissa on osin haastavaa, koska radan päällysrakenne ei jatku äärettömästi poik-

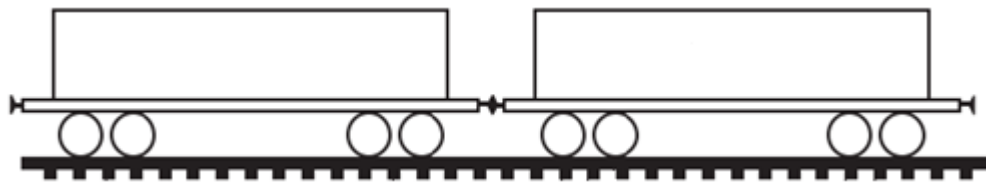
kisuunnassa, toisin kuin malli tässä tapauksessa olettaa. Tämän takia päällysrakennekerroksen materiaalien ominaisuuksia on iteroitu, jotta tämä saadaan huomioitua mahdollisimman hyvin. Mallissa käytetyistä materiaaleista ainoastaan savikerroksen ominaisuuksia on laskettu tässä työssä tehtyjen tutkimusten perusteella. Muiden materiaalikerrosten ominaisuuksia on pohdittu haastatteleamalla PLAXIS 2D:llä enemmän työskennelleiltä asiantuntijoilta (Mansikkamäki 2020; Pelho 2020). Kuvassa 47 esitetyn pituusleikkauksen materiaalit ja kerrospaksuudet ovat esitettynä taulukossa 10.

Taulukko 10. PLAXIS 2D -mallissa käytetyt materiaalit ja kerrospaksuudet.

materiaali	paksuus [m]	materiaalimalli	tilavuuspaino γ [kN/m ³]	leikkausmoduuli G [MN/m ²]	leikkausaallon etenemisnopeus v_s [m/s]
kiskot + pölkyt	0,25	linear elastic	25	20 000	2800
ratapenger	1,8	linear elastic	22	104	216
pengeri	1,2	linear elastic	20	33,3	128
savi	12,0	linear elastic	16	6,70	64,1
moreeni	4,0	linear elastic	19	200	321

Taulukossa 10 materiaaliruuutujen värit vastaavat rakennekerrosten värejä kuvassa 47. Savikerroksen leikkausaallon etenemisnopeus (64,1 m/s) on laskettu tässä työssä Periniössä tehtyjen cross-hole -mittausten keskiarvona kilometriväliltä 129+360–129+460.

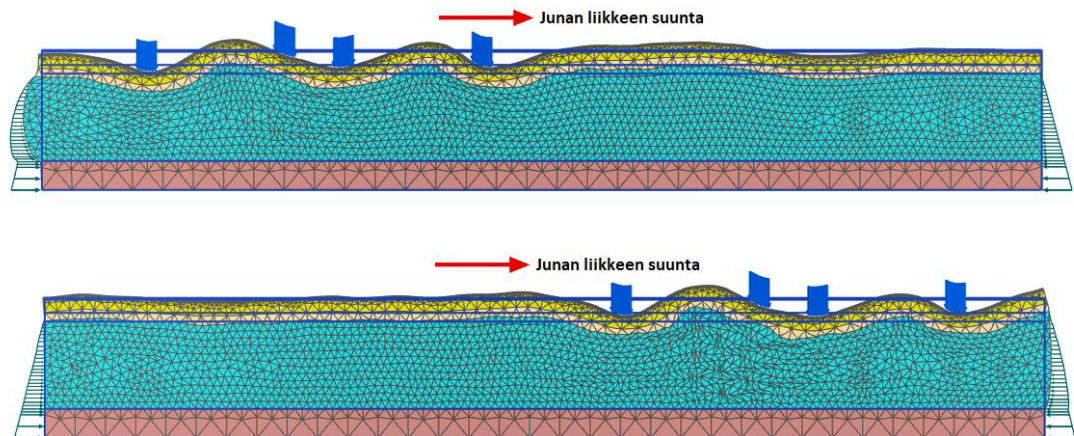
Pituusleikkauksen ja materiaalien lisäksi pengervärähtelyilmiön mallintamiseen tarvitaan myös junakalustosta aiheutuva kuormitus. Kaluston aiheuttama kuormitus mallinnettiin Pendolinon kahden ensimmäisen vaunun eli neljän ensimmäisen telin aiheuttamana kuormituksena. Kustakin telistä aiheutuu 2D-mallissa 2,7 metrin pituinen tasainen kuorma, suuruudeltaan 26 kN/m/m (Mansikkamäki 2020).



Kuva 48. Junan kahden vaunun geometria. (Krylov 2001, s. 253)

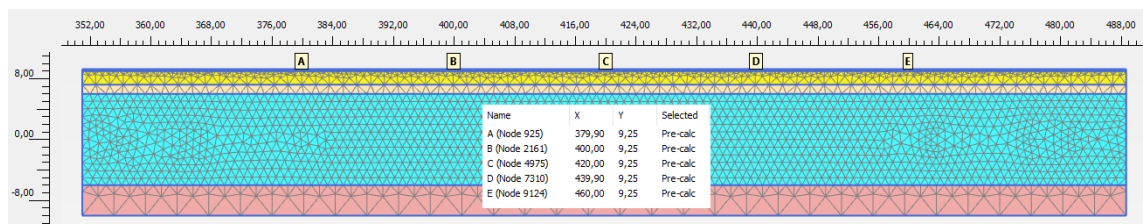
Junan liike mallissa luotiin dynaamisia aika-askelia käyttäen. Junaa liikutettiin mallissa siirtämällä telikuormia askeleittain kuormituksen leveyden verran eli 2,7 metriä eteenpäin. Mallinnus alkoi ensimmäisen telikuorman saapumisella mallin vasempaan reunaan, ja loppui neljännen telikuorman poistuessa mallin oikeassa reunassa. Yhteensä aika-askelia eli vaiheita tuli 69 kappaletta 140 metrin pituisessa mallissa. Aika-askeleen kesto muuttamalla pystyttiin muuttamaan junan nopeutta. Esimerkiksi kun mallinnettiin

junan nopeudeksi 160 km/h, aika-askelen pituudeksi tuli 0,06075 sekuntia. Kuvassa 49 on esitetty esimerkki telikuormien etenemisestä mallissa 160 km/h nopeudella.



Kuva 49. Telikuormien eteneminen PLAXIS 2D-mallissa.

Kuvassa 49 yläpuoliskossa on esitetty telikuormien sijainti ajassa 1,397. Kuvan alapuoliskossa on esitetty telikuormien sijainti ajassa 2,855 s. Kuvassa pystysuuntaiset siirtymät on skaalattu 2000-kertaisiksi siirtymien visuaalisen hahmottamisen helpottamiseksi. Pengervärähtelyilmiön havaitsemisessa kiinnostuksen kohteena ovat pystysuuntaiset siirtymät. 2D-malli ei ota huomioon junan alla etenevän aallon vaimenemista ympäristöön, joten pystysuuntaiset siirtymät saattavat olla osin liian suuria. Tämä on kuitenkin yritetty huomioida mallin parametreissa. Siirtymien arvot eri junan nopeuksilla tallennettiin päällysrakennekerroksen yläpinnasta viidestä eri pisteestä, jotka on esitetty kuvassa 50.



Kuva 50. Tallennuspisteiden sijainti mallissa.

Kuvan 50 pisteet sijaitsevat 20 metrin välein siten, että piste A sijaitsee 30 metrin päässä mallin vasemmasta reunasta, ja piste E sijaitsee 30 metrin päässä mallin oikeasta reunasta. Pengervärähtelyn toteutuessa pystysuuntaiset siirtymät lähtisivät oletettavasti suurenemaan eksponentiaalisesti, kun junan nopeus ylittää maassa kulkevan pinta-aallon nopeuden eli niin kutsutun kriittisen nopeuden. Pinta-aallon nopeus on hyvin lähellä savikerroksessa kulkevan leikkausaallon etenemisnopeutta. Pengervärähtelyn riippuvuus savikerroksen ominaisuuksista varmistetaan luomalla lähes identtinen malli, jossa ainoastaan savikerroksen leikkausaallon etenemisnopeus on kaksinkertaistettu arvoon

128,2 m/s. Näissä kahdessa mallissa Pendolinon neljää telikuormaa liikutettiin nopeuksilla 20–300 km/h noin 20 km/h nopeusvälein. Saadut negatiivisen pystysuuntaisen siirtymän arvot kussakin mittauspisteessä A–E on esitetty taulukossa 11, kun $v_s = 64,1 \text{ m/s}$, ja taulukossa 12, kun $v_s = 128,2 \text{ m/s}$.

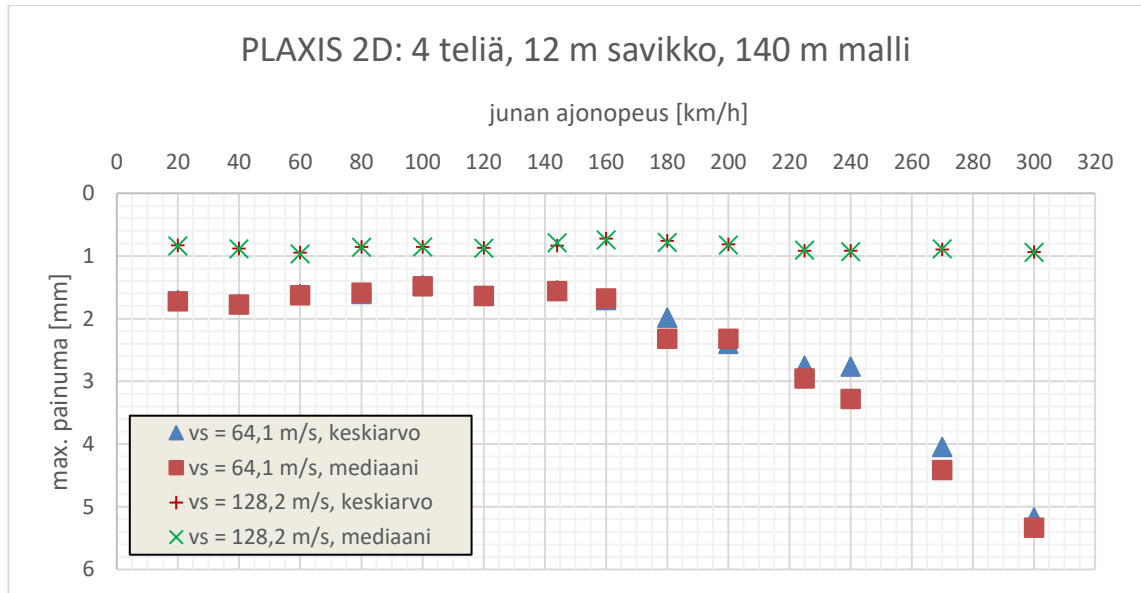
Taulukko 11. Maksimipainumat pehmeällä savikolla.

Junan nopeus [km/h]	PLAXIS 2D: maksimipainumat, $v_s = 64,1 \text{ m/s}$ [mm]						
	A	B	C	D	E	keskiarvo	mediaani
20	1,88	1,72	1,53	1,82	1,55	1,70	1,72
40	1,66	1,66	1,91	1,80	1,77	1,76	1,77
60	1,55	1,62	1,53	1,65	1,66	1,60	1,62
80	1,75	1,58	1,64	1,55	1,51	1,61	1,58
100	1,44	1,36	1,52	1,48	1,52	1,46	1,48
120	1,62	1,60	1,64	1,67	1,66	1,64	1,64
144	1,59	1,58	1,55	1,43	1,56	1,54	1,56
160	1,85	1,67	1,59	2,00	1,40	1,70	1,67
180	2,49	1,19	2,32	1,61	2,32	1,98	2,32
200	2,97	2,20	2,32	2,60	1,92	2,40	2,32
225	3,51	3,50	1,89	1,88	2,95	2,75	2,95
240	3,50	3,94	3,28	1,48	1,62	2,76	3,28
270	3,25	4,41	4,71	4,64	3,21	4,05	4,41
300	2,79	4,45	5,33	6,29	6,97	5,17	5,33

Taulukko 12. Maksimipainumat jäykemmällä savikolla.

Junan nopeus [km/h]	PLAXIS 2D: maksimipainumat, $v_s = 128,2 \text{ m/s}$ [mm]						
	A	B	C	D	E	keskiarvo	mediaani
20	0,84	0,81	0,86	0,76	0,87	0,83	0,84
40	0,91	0,86	0,92	0,88	0,83	0,88	0,88
60	0,96	0,91	1,04	0,83	0,99	0,95	0,96
80	0,82	0,84	0,86	0,89	0,86	0,85	0,86
100	0,92	0,81	0,88	0,81	0,85	0,85	0,85
120	0,94	0,80	0,88	0,91	0,80	0,87	0,88
144	0,87	0,78	0,95	0,79	0,76	0,83	0,79
160	0,67	0,75	0,78	0,66	0,74	0,72	0,74
180	0,69	0,78	0,80	0,71	0,80	0,76	0,78
200	0,84	0,82	0,84	0,74	0,81	0,81	0,82
225	0,95	0,91	0,89	0,94	0,90	0,92	0,91
240	0,93	0,93	0,96	0,83	0,91	0,91	0,93
270	0,83	0,90	0,98	0,89	0,87	0,89	0,89
300	0,98	0,94	0,87	0,93	0,94	0,93	0,94

Taulukoissa 11 ja 12 maksimipainuma tarkoittaa negatiivisen siirtymän arvoa toisen ja kolmannen telikuorman alla. Positiivisia siirtymiä, eli ratarakenteen kohoamista kuormituksen läheisyydessä, ei otettu huomioon. Taulukoissa on esitetty pisteissä A–E saatujen palautuvien painumien lisäksi niistä lasketut keskiarvot ja mediaanit jokaisella ajonopeudella. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 51.



Kuva 51. Maksimipainumat eri leikkausaallon etenemisnopeuksilla.

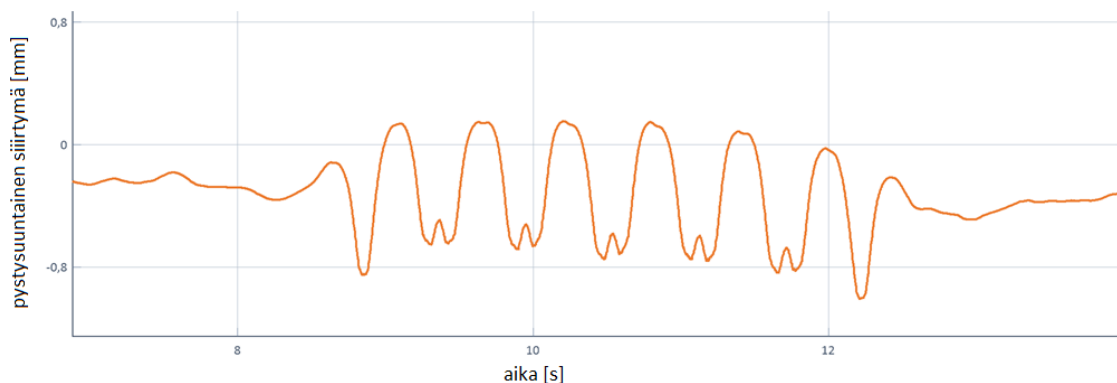
Kuvasta 51 havaitaan selkeästi pengervärähtelyilmiölle tyypillinen pystysuuntaisten siirtymien eksponentiaalinen kasvu, kun savikerroksessa etenevän leikkausaallon nopeus on 64,1 m/s. Kun leikkausaallon etenemisnopeus on 128,2 m/s, ei vastaavaa kasvua siirtymissä tapahdu, ja painumat ovat kokonaisuudessaankin pienempiä kuin pehmeämmällä savikolla. Pehmeää savikkoa kuvastavassa mallissa leikkausaallon etenemisnopeus 64,1 m/s on noin 230 km/h. Aiemmin esitettyjen teorioiden perusteella siirtymien kasvua alkaa tapahtua, kun ylitetään 60 % tästä arvosta. Nopeutena tämä olisi noin 140 km/h. Kuvan 51 perusteella tämä teoria vaikuttaa toteutuvan. Tässä kappaleessa saatujen tulosten perusteella voidaankin olettaa, että PLAXIS 2D:llä on mahdollista saada mallinnettua pengervärähtelyilmiötä.

Molemmissa malleissa savikerroksien ominaisuudet pysyvät vakiona jokaisella syvyydellä. Todellisuudessa varsinkin pehmeikkökerroksen ominaisuudet vaihtelevat syvyyden muuttuessa. Savikerroksissa pienimmät jäykkyydet ja leikkausaallon etenemisnopeudet ovat tyypillisesti muutaman metrin syvyydessä, kuten voidaan havaita esimerkiksi tässä työssä esitetyistä kuvista 20, 28 ja 34.

6.2 Perniön kohteen pengervärähtelymallinnus

Edellisessä aliluvussa pääteltiin, että pengervärähtelyä on mahdollista mallintaa PLAXIS 2D:llä. Tässä aliluvussa luodaan malli Perniön koekohteeseen kmv:lle 129+350–129+490 aiempien pohjatutkimusten ja cross-hole -mittauksilla saaduista lähtötiedoista. Lisäksi lähtötietona pystysuuntaisten siirtymien suuruudelle oli keväällä cross-hole-mittausten yhteydessä taltioitu Pendolinon S 985 ohitus kohti pohjoista 5.5.2020 klo 14:50. Kilometrillä 129+460 tukikerrosepelin yläpinnassa sijainneen kiihtyvyyssanturin datasta laskettiin siirtymät FlexPro-ohjelman avulla kuvan 52 mukaisesti.

5.5.2020 Pendolino pohjoiseen km 129+460



Kuva 52. Mitatut siirtymät Pendolino, km 129+460.

Kuvasta 52 nähdään selvästi, että painumat ovat suurimmillaan telikuormien keskipisteissä, joita on 12 kappaletta. Pystysuuntaisen siirtymän arvot ovat hyvin lähellä yhtä millimetriä. Pendolinon nopeus on ollut GPS-datan mukaan 158–162 km/h. Tämä pystytään tarkistamaan myös yllä olevasta kuvaajasta, kun tiedetään, että Pendolinon etumaisen ja takimaisen telin välinen etäisyys on 148 metriä luvussa 2.3 esitetyn kuvan 11 mukaisesti. Aikaero telien ylityksissä on FlexPro-ohjelmalla laskettuna 3,37 sekuntia. Tämä tarkoittaa junan nopeudeksi 158 km/h. Näin ollen tämän mittauksen perusteella voidaan olettaa, että pohjoisen suuntaan ajavan Pendolinon aiheuttamat pystysuuntaiset siirtymät kilometrillä 129+460 ovat 1 mm nopeuden ollessa 160 km/h. Tätä arvoa käytettiin kiintopisteenä mallin luomisessa PLAXIS 2D -ohjelmaan. Arvot eivät kuitenkaan ole täysin verrattavissa keskenään, koska mallissa siirtymän suuruus mitataan kiskon yläpinnasta.

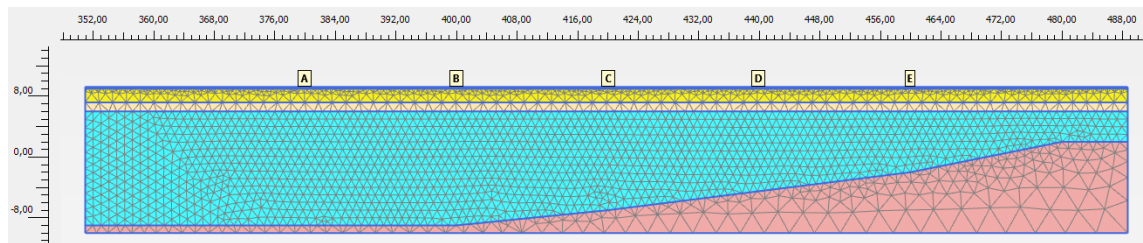
Mallinnuksessa saatiin kohdasta km 129+460 mitattu 1 mm pystysiirtymä yritettiin saada vastaamaan mallissa 1 mm painumaa samassa kohdassa iteroimalla mahdollisuuksien rajoissa päällysrakennekerroksen materiaalien ominaisuuksia. Mallissa pystysuuntaiset siirtymät kuitenkin jäivät liian suuriksi. Tämän arvioidaan aiheutuvan 2D-mallinnuksen rajoitteiden takia, kun junakuormituksen alla tapahtuvat siirtymät eivät pääse mallissa

vaimenemaan ympäristöön. Tämä on huomioitava tuloksien suuruutta arvioitaessa. Perniön kmv:ltä 129+350–129+490 luodussa mallissa käytettävät parametrit ovat esitettynä taulukossa 13.

Taulukko 13. Perniön mallissa käytetyt materiaalit ja kerrospaksuudet.

materiaali	paksuus [m]	materiaalimalli	tilavuuspaino γ [kN/m ³]	leikkausmoduuli G [MN/m ²]	leikkausaallon etenemisnopeus v_s [m/s]
kiskot + pölkkyt	0,25	linear elastic	25	20 000	2800
ratapenger	1,8	linear elastic	22	104	216
penger	1,2	linear elastic	20	33,3	128
savi	4,0–15	linear elastic	16	6,70	64,1
moreeni	1,0–11	linear elastic	19	200	321

Taulukosta 13 nähdään, että savikerroksen paksuus vaihtelee sen ollessa paksuimmillaan 15 metriä ja ohuimmillaan 4 metriä. Tämän takia myös savikerroksen alla sijaitsevan moreenikerroksen paksuus vaihtelee mallissa. Moreenikerroksen paksuutta enemmän merkitystä on kuitenkin savi- ja moreenikerrosten rajapinnan sijainnilla, koska moreenikerroksen jäykkyys on moninkertainen savikerroksen jäykkyyteen verrattuna. Perniön kohteen malli on esitettynä kuvassa 53, josta ilmenee savikerroksen paksuuden muutos pituussuunnassa.



Kuva 53. PLAXIS 2D -malli, Perniö kmv 129+350–129+490.

Mallinnetun alueen vasemmalla puolella sijaitsee paalulaattarakenne ja oikealla puolella sijaitsee paaluhatturakenteella vahvistettu ratarakenne. Tämä on hyvä asia mallin kuvaavuuden kannalta, jossa kuormitus ilmestyy pehmeikön päälle kovalta pohjalta. Malli ei toki tässä tapauksessa ota huomioon paalulaatta- ja paaluhatturakenteessa tapahtuvia pieniä palautuvia painumia, eikä myöskään noin kymmenen metrin pituisia siirtymärakenteita ennen kumpaakin rakennetta.

Pystysuuntaisia siirtymiä tarkkailtiin samalla tavalla kuin edellisessä aliluvussa, mittapisteen ollessa kuvan 53 mukaiset A–E. Mittapisteen vastaavat Perniön kohteen ratakilometrejä taulukon 14 mukaisesti.

Taulukko 14. Mittapisteiden vastaavuus ratakilometreihin.

ratakilometri	129+380	129+400	129+420	129+440	129+460
mittapiste	A	B	C	D	E

Mallinnuksessa junan eri nopeuksien vaikutuksia pystysuuntaisiin siirtymiin tutkittiin molempiin suuntiin ajettaessa. Näin saatiin huomioitua pehmeikön paksuuden muutoksen vaikutus pystysuuntaisiin siirtymiin. Ajosuunta pohjoiseen tarkoittaa mallissa kulkemista kohti oikeaa reunaa, eli pehmeikön ohenevaan suuntaan. Ajosuunta etelään vastaa mallissa kulkemista kohti vasenta reunaa, eli pehmeikön paksunevaan suuntaan. Ajonopeuksina käytettiin 60–240 km/h. Suurempia nopeuksia ei tässä mallissa enää tutkittu, koska ne ovat hyvin teoreettisia nykyisellä Pendolino-kalustolla sekä nykyisellä rantaradalla.

Perniön kohteen kmv:ltä 129+350–129+490 mallintamalla saadut palautuvat painumat junan ajonopeuden funktiona on esitetty taulukoissa 15 ja 16. Taulukossa 15 on esitetty suurimmat palautuvat painumat, kun ajosuunta on pohjoiseen.

Taulukko 15. Maksimipainumat kmv 129+350–129+490, pohjoiseen.

Junan nopeus [km/h]	PLAXIS 2D: maksimipainumat, ajosuunta pohjoiseen [mm]				
	129+380	129+400	129+420	129+440	129+460
60	2,15	1,95	1,81	1,55	1,33
80	1,92	1,77	1,72	1,46	1,36
100	2,12	1,82	1,66	1,54	1,24
120	1,98	1,78	1,70	1,46	1,19
144	2,60	2,24	1,53	1,74	1,30
160	3,04	1,85	2,76	1,69	1,31
180	3,28	2,21	3,23	2,09	1,62
200	3,78	3,23	1,27	2,87	1,32
225	3,61	3,56	3,31	1,30	2,42
240	3,45	3,71	4,16	2,84	2,41

Taulukosta 15 havaitaan, että palautuvien painumien arvot vaihtelevat jonkin verran eri mittapisteissä. Yleisesti ottaen painumat kuitenkin kasvavat nopeuden kasvaessa. Joitakin poikkeuksia löytyy, esimerkiksi pisteessä km 129+420 ajonopeudelle 200 km/h painuma on vain 1,27 mm. Mittapisteessä km 129+440 ajonopeudella 225 km/h painuma jää vain 1,30 mm suuruiseksi.

Taulukossa 16 on esitetty suurimmat palautuvat painumat, kun ajosuunta on etelään.

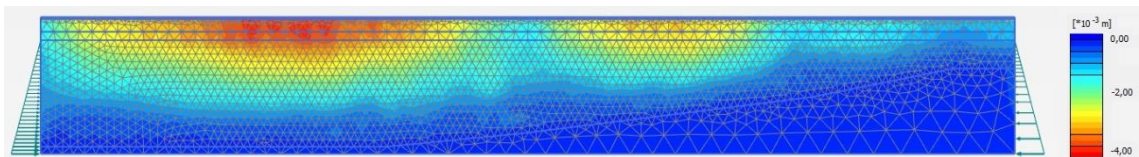
Taulukko 16. Maksimipainumat kmv 129+350–129+490, etelään.

Junan nopeus [km/h]	PLAXIS 2D: maksimipainumat, ajosuunta etelään [mm]				
	129+380	129+400	129+420	129+440	129+460
60	1,85	1,74	1,77	1,61	1,37
80	1,89	1,69	1,67	1,43	1,29
100	1,81	1,61	1,54	1,34	1,20
120	1,68	1,63	1,55	1,40	1,13
144	1,70	1,69	1,51	1,40	1,29
160	1,80	1,82	1,64	1,46	1,40
180	1,98	1,80	1,71	1,62	1,54
200	2,01	1,99	1,88	1,70	1,63
225	2,22	2,13	1,89	1,97	1,59
240	2,52	2,31	2,28	2,18	1,61

Taulukosta 16 havaitaan, että palautuvat painumat suurenevät ajonopeuden kasvaessa. Painumien suureneminen vaikuttaa erittäin johdonmukaiselta. Saatuja tuloksia on analysoitu tarkemmin seuraavassa aliluvussa.

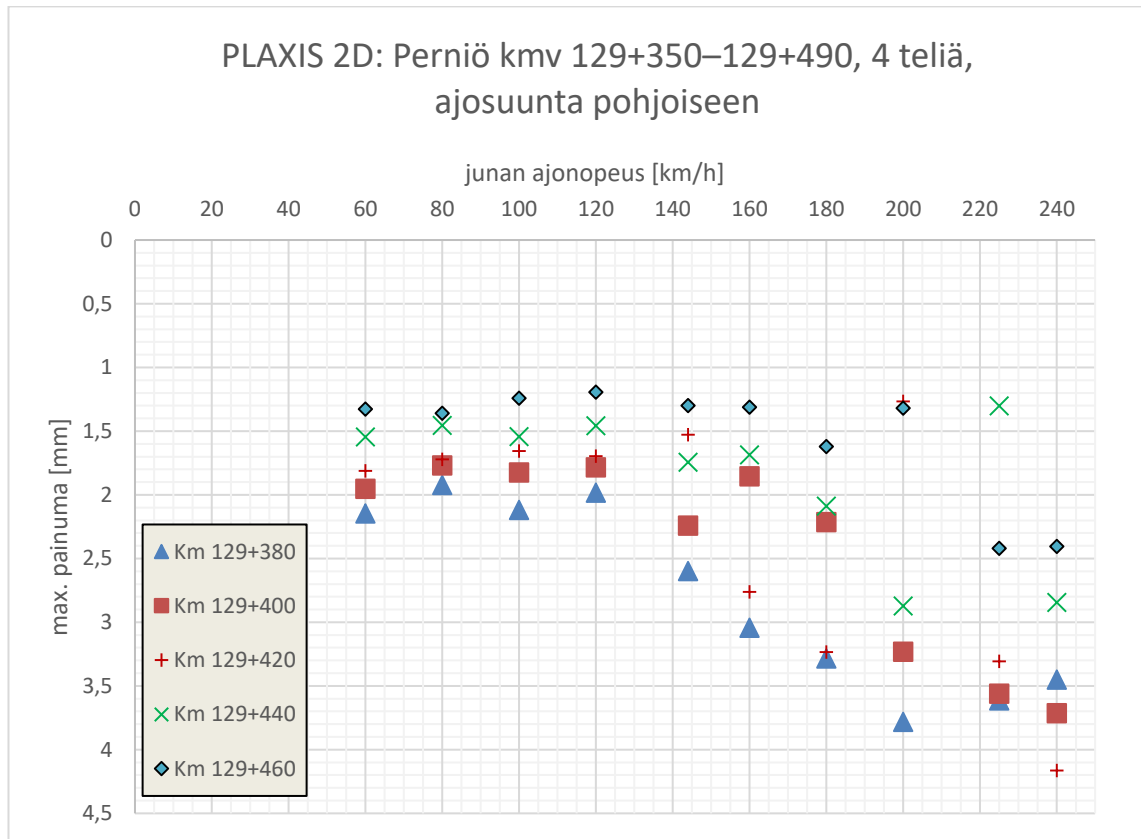
6.3 Mallinnustulosten analysointi ja johtopäätökset

Mallinnustuloksista erottui selkeästi, että pohjoisen suuntaan ajettaessa pystysuuntaiset palautuvat siirtymät ovat suurempia kuin etelän suuntaan ajettaessa. Tämän arvioitiin liittyvän aiemmin työssä esitettyyn teoriaan värähtelyn voimistumisesta ajettaessa pehmeikön ohenevaan suuntaan. Osassa mittapisteissä painumat jäivät kuitenkin odotettua pienemmiksi. Tämän arvioidaan aiheutuvan nopeasti kulkevan junan saapumisesta kovalta paalulaatta-alueelta pehmeikölle, jolloin juna hetkellisesti niin sanotusti uppoaa syvemmälle pehmeikköön. Tätä on havainnollistettu kuvassa 54, jossa junan nopeus on 200 km/h.

**Kuva 54.** Maksimipainumat, 200 km/h pohjoiseen.

Kuvasta 54 nähdään, kuinka suurimmat painumat ovat tapahtuneet punaisen ja oranssin värisissä kohdissa. Mittapisteistä on valittu 20 metrin välein, joten pisteen valinnalla on vaikutusta painuman suuruuteen. Tässä työssä ei pystytä arvioimaan aiheutuuko kuvan 54 painumien vaihtelu mallinnuksen ominaisuuksista, vai tapahtuuko kyseistä ilmiötä myös reaali maailmassa.

Kuvassa 55 on esitetty maksimipainumat jokaisessa mittapisteessä junan nopeuden funktiona pohjoisen suuntaan ajettaessa.

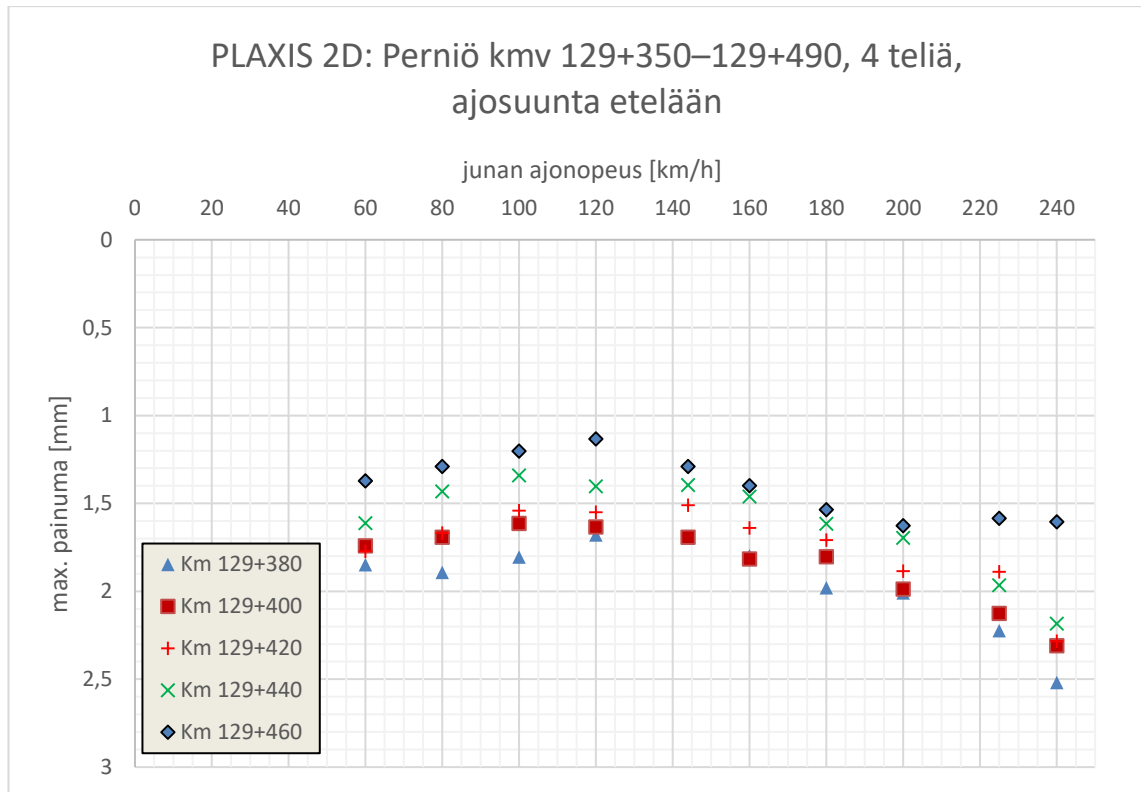


Kuva 55. Maksimipainumat pohjoiseen ajettaessa.

Kuvasta 55 havaitaan, että pisteissä km 129+380 ja km 129+400 painumien muutos noudattaa melko selkeästi kasvavaa käyrää. Muissa mittapisteissä, jotka kaikki sijaitsevat ohenevan pehmeikön alueella, painumakäyttäytyminen on osin hyvin epälineaarista. Epälineaarisuuskin voi kertoa sen, että ohenevan pehmeikön suuntaan ajettaessa pengervärähtelyä voi olla hyvin vaikea arvioida pelkästään maamateriaalien ja ratarakenteen ominaisuuksien perusteella.

Tässä mallinnuksessa palautuvien painumien arvot vastaavat kohtalaisella tarkkuudella maastomittauksien yhteydessä mitattua Pendolinon ohituksen kokonaispystysiirtymien arvoja. Mittauksia oli vain yksi, mikä luo epävarmuutta mallinnustulosten pohjalta tehtäviin oletuksiin siirtymien suuruuksista. Oletuksena kuitenkin on, että pohjoisen suuntaan ajettaessa pystysiirtymät ovat alle 4 mm 200 km/h nopeudella. 4 mm:n siirtymä ei pitäisi olla turvallisuusriski mahdollisia nopeudennoston koeajoja ajatellen. Pitkäaikaisia vaikutuksia ratarakenteeseen suurilla siirtymillä voi kuitenkin olla.

Kuvassa 56 on esitetty maksimipainumat jokaisessa mittapisteessä junan nopeuden funktiona etelän suuntaan ajettaessa.



Kuva 56. Maksimipainumat etelään ajettaessa.

Kuvasta 56 havaitaan, että painumat suurenevat nopeuden kasvaessa lineaarisesti. Ainoastaan pisteessä km 129+460 painumat eivät juuri kasva nopeuden noustessa. Todennäköisesti syynä tähän on ohuempi pehmeikkö kyseisessä pisteessä. Muissa pisteissä painumien suureneminen vaikuttaa lievältä. Painumat jäävät pienemmiksi kuin 2,5 mm, jotka ovat selvästi pohjoisen suunnan arvoja pienempiä.

Etelän suuntaan saadut painumatulokset vahvistavat käsitystä siitä, että ohenevan pehmeikön suuntaan ajettaessa pystysuuntaiset siirtymät suurenevat enemmän nopeuden kasvaessa. Tutkituissa pisteissä siirtymät eivät aiheuta huolta nopeuden noston koeajoja ajatellen. Etelän suuntaan ajettaessa suurimmat siirtymät voivat tapahtua, kun juna saapuu pehmeiköltä paalulaatta-alueelle noin kilometrillä 129+340. Tämä piste ei kuitenkaan kuulu mallinnukseen, jossa arvioitiin siirtymien muuttumista pengervärähtelyn takia.

Mallinnuksessa arviot pystysuuntaisista siirtymistä on tehty kahden vaunun eli neljän telikuorman perusteella. Pendolinossa on kuitenkin 6 vaunua eli 12 teliä, minkä lisäksi Pendolinoja voidaan ajaa myös kahden yksikön yhdistelminä, mikä kasvattaa peräkkäisten teliylitysten määrän 24:än. Kuvassa 52 oli esitetty yhden Pendolinon ohituksen aiheuttama siirtymäkuvaaja 160 km/h nopeudella. Kuvaajan perusteella telikuormien aiheuttamat siirtymät eivät kasva telien määrän lisääntyessä. Suuremmilla nopeuksilla ajettaessa telikuormien määrän vaikutus tulisi kuitenkin monitoroida tarkemmin.

Mallinnuksessa päädyttiin neljän telikuorman käyttämiseen, koska malli haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisena, mutta kuitenkin edustavia tuloksia antavana. Mallia testattiin myös yhdellä ja kahdella telikuormalla. Yhdellä telikuormalla pengervärähtelyyn liittyvää pystysuuntaisten siirtymien vahvistumista ei pystytty tarkastelemaan, joten siitä luovuttiin. Yhden vaunun kahdella telikuormalla mallinnettaessa pengervärähtelyilmiöstä muodostui jo parempi käsitys. Ongelmaksi muodostui telien välinen etäisyys, joka oletettavasti suurensi siirtymiä liikaa tietyillä nopeuksilla. Tämän arvioidaan aiheutuvan siitä, että kyseisessä tapauksessa kuormituksista syntyy ainoastaan yksi taajuus. Toisen vaunun eli kolmannen ja neljännen telikuorman lisääminen lisäsi myös telikuormituksista syntyvien eri taajuuksien määrää, jolloin malli alkoi vastata paremmin todellisuudessa syntyviä taajuuksia.

Junan aiheuttamat kuormitukset ovat 2D-mallissa äärettömän leveitä. Tästä syystä 2D-mallissa liikkuva telikuorma ei aiheuta siirtymiä tai dynaamisia voimia radan poikkisuunnassa, mikä voi vääristää tuloksia. 3D-mallissa sekä junan aiheuttamat kuormitukset että radan päällysrakenne saataisiin paremmin vastaamaan todellisuutta.

Tässä mallinnuksessa ei ole huomioitu radan alla pohjasuhteissa tapahtuvia mahdollisia poikkisuuntaisia muutoksia. Tällaisten muutosten vaikutusta ei pystytä pituusleikkausmuotoisessa 2D-tarkastelussa mallintamaan, mutta niiden vaikutusta olisi mielenkiintoista tutkia esimerkiksi 3D-mallinnuksella.

Poikkisuuntaisten muutosten lisäksi lisätutkimuksissa mielenkiinnon kohteena voisi olla toisen raiteen vaikutus pengervärähtelyyn. Väylävirasto on tutkinut Helsinki–Turku nopean junayhteyden hankearvioinnissa yhtenä vaihtoehtona rantaradan kaksiraiteistamista (Väylävirasto 2020). Vaihtoehto osoittautui arvioinnissa hyvin todennäköisesti toteuttamiskelvottomaksi. Teoreettisesti kaksiraiteisuuden vaikutus pengervärähtelyyn tulisi kuitenkin tutkia, mikäli pehmeikölle ei tehtäisi lisää pohjanvahvistuksia. Etenkin kahden suurella nopeudella ajavan junan saapuminen pehmeikköosuudelle samanaikaisesti eri suunnista voisi teoriassa aiheuttaa pistemäisesti suuria pystysiirtymiä ratarakenteessa.

7. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää, mitä on pengervärähtely, ja miten sen ilmene- mistä voidaan arvioida. Työn alussa käsiteltiin värähtelyn ja ratarakenteen teoriaa, jonka jälkeen esiteltiin pengervärähtelyn arviointiin soveltuvia mittausmenetelmiä. Työssä sel- vitettiin myös pengervärähtelyriskiä rantaradalla sijaitsevassa Perniön nopeusrajoitus- kohteessa kilometrivälillä 129+300–130+800. Selvitystä tehtiin maastomittauksin sekä 2D-mallinnuksella.

Pengervärähtelyksi kutsutaan ilmiötä, jossa suurella nopeudella kulkevan junan aiheut- tamat kuormitukset alkavat aiheuttaa radan pystysuuntaisten palautuvien siirtymien kas- vua. Siirtymien raja-arvoina savikoilla pidetään 3 mm uusilla radoilla ja 4 mm jo raken- netuilla radoilla ratapölkyn yläpinnasta mitattuna. Pengervärähtelyilmiö voi tapahtua, kun junan nopeus lähestyy niin kutsuttua kriittistä nopeutta. Kriittiseksi nopeudeksi voidaan käsittää ratarakenteelle tyypillinen kriittinen nopeus tai maassa etenevän pinta-aallon etenemisnopeus. Pehmeiköille perustetuilla radoilla pinta-aallon etenemisnopeus on al- haisempi kuin ratarakenteen kriittinen nopeus, joten tässä työssä keskityttiin tutkimaan pengervärähtelyriskiä pinta-aallon etenemisnopeuden arvioinnin avulla.

Pengervärähtelyn ilmenemisen kannalta olennaisia asioita ovat ohut ratarakenne, ohut kuivakuorikerros sekä noin 10 metrin paksuinen pehmeikkö, eli savi- tai turvekerros, jossa leikkausaallon etenemisnopeus on alhainen. Pehmeikkökerroksessa etenevän leikkausaallon nopeus vastaa likimain pinta-aallon eli Rayleigh-aallon etenemisnopeutta. Leikkausaallon havaitseminen on yksinkertaisempaa, joten pengervärähtelyn riskinarvi- ointi tehdään tyypillisesti pehmeikkökerroksen leikkausaallon etenemisnopeutta mittaa- malla.

Leikkausaallon etenemisnopeutta voidaan mitata ja arvioida monin eri menetelmin. Eräs yleisimmistä menetelmistä on niin kutsuttu cross-hole -menetelmä, jossa leikkausaallon kulkuaikaa mitataan maakerroksen sisässä lähettimen ja vastaanottimen avulla. Tätä menetelmää käytettiin myös Perniön kohteen savikerroksen leikkausaallon etenemisno- peuksien mittaamiseen. Perniössä pienimmät cross-hole -menetelmällä mitatut arvot oli- vat alle 50 m/s, eli alle 180 km/h. Myös savinäytteistä määritetyt korkeat, paikoin yli 90 %, vesipitoisuudet viittaavat saven alhaiseen leikkausaallon etenemisnopeuteen. Näistä syistä ja alueen pohjasuhteista päätellen riski pengervärähtelyyn on olemassa.

Maastomittauksien lisäksi Perniön kohteen pengervärähtelyriskiä arvioitiin 2D-mallinnuksella. Mallinnustulosten perusteella pystysuuntaiset palautuvat siirtymät alkavat suurentua, kun junan nopeus ylittää 140 km/h. Kyseinen nopeus vastaa noin 60 % mallissa käytetyn pehmeikkökerroksen leikkausaallon etenemisnopeudesta, mikä vastaa teoriaosuudessa esitettyä arvoa. Siirtymien kasvu korostuu varsinkin, kun junan kulkusuunta pehmeiköllä on savikerroksen ohenevaan suuntaan.

Mallinnustulosten ja maastomittausten perusteella Perniön kohteelle asetettu 160 km/h nopeusrajoitus lienee perusteltu. Tarkka arvio pengervärähtelyn toteutumisesta saadaan kuitenkin vain mittaamalla suuremmilla ajonopeuksilla tapahtuvia palautuvia siirtymiä. Nopeusrajoituksen nostoa harkittaessa onkin ensin ajettava koeajot, joiden aikana monitoroidaan pystysuuntaisia palautuvia siirtymiä. Mikäli siirtymät osoittautuvat raja-arvoja pienemmiksi, voidaan nopeusrajoituksen nostoa harkita. Radan suurimman sallitun nopeuden nostoa harkittaessa on kuitenkin huomioitava myös sen pitkäaikaiset vaikutukset muun muassa raidesepelin kulumiseen, plastisiin muodonmuutoksiin sekä stabiliteettiin.

LÄHTEET

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. & Swolfs, W. M. (2017a). PLAXIS 2D 2017. Part 0: General information.

Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S. & Swolfs, W. M. (2017b). PLAXIS 2D 2017. Part 2: Reference Manual.

D'Ignazio, M. (2016). Undrained shear strength of Finnish clays for stability analyses of embankments. Tampere University of Technology. Publication 1412. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3806-3>

Fenniarail (2020). Dr18-veturit. Verkkosivusto. Saatavissa: <https://www.fenniarail.fi/kalusto/>

Gao, Y., Huang, H., Ho, C. L. & Hyslip, J. P. (2017). High speed railway track dynamic behavior near critical speed. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 101. pp. 285–294.

Gérardin, M. & Rixen, D. (1997). Mechanical vibrations: theory and application to structural dynamics. ISBN 0-471-97524-9.

Hakulinen, M. (2003). Ratapenkereen värähtelyn analysointi. Geomatti Oy. Ratahallintokeskus, tilausnumero 236624, 30.5.2003. Työ 246.

Hakulinen, M. (2004). Ratapenkereen värähtelyn mittaaminen Helsinki–Turku radalla. Geomatti Oy. Rrs:n työnumero 1219. Työ 257.

Hakulinen, M. (2018). RAK-23610 2019 Luento 11b High speed trains. Luentokalvot, Tampereen yliopiston opintojakso RAK-23610 Yhdyskunnan geotekniikka.

Holm, G., Andréasson, B., Bengtsson, P.-E., Bodare, A. & Eriksson, H. (2002). Mitigation of Track and Ground Vibrations by High Speed Trains at Ledsgård, Sweden. Svensk Djupstabilisering.

likkanen, P. (2013). Rautatieliikenteen kustannusmallit. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2013. Liikennevirasto, liikennesuunnitteluosasto. Helsinki. 53 s.

Krylov, V. V. (1995). Generation of Ground Vibrations by Superfast Trains. Applied Acoustics 44. pp.149–164.

Krylov, V. V. (2001). Noise and Vibration from High-speed Trains. Department of Civil and Structural Engineering Nottingham Trent University.

- Krylov, V. V., Dawson, A. R., Heelis, M. E. & Collop, A. C. (2000). Rail movement and ground waves caused by high-speed trains approaching track-soil critical velocities. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol 214, Issue 2, 2000. Saatavissa: <https://doi.org/10.1243/0954409001531379>
- Larsson, R. & Mulabdić, M. (1991). Shear Moduli in Scandinavian Clays. Statens Geotekniska Institut, rapport No 40. 134 p.
- Leskinen, T., Sala, E., Veijovuori, S., Nyby, M., Häyrynen, J.-P. & Koskinen, K. (2008). Rantaradan Helsinki–Turku ratatekninen ja liikenteellinen selvitys. Ratahallintokeskus/Sito Oy.
- Levomäki, M. (1999). Rautatieliikenteen aiheuttama tärinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akseli-painot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 3/1999. RHK Tekninen yksikkö, Helsinki.
- Liikennevirasto (2011). Eurokoodin soveltamisohje: Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1. Liikenneviraston ohjeita 20/2011.
- Liikennevirasto (2015). Geotekniset tutkimukset ja mittaukset, Suunnitteluvaiheen ohjaus. Liikenneviraston ohjeita 10/2015. Dnro LIVI/5791/04.00/2015.
- Liikennevirasto (2018). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3: Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018.
- Madshus, C. & Kaynia, A. M. (2000). High-speed railway lines on soft ground: dynamic behavior at critical train speed. Norwegian Geotechnical Institute. Journal of Sound and Vibration 231(3). pp. 689–701. Saatavissa: <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2647>
- Mansikkamäki, J. (2020). TKT Juho Mansikkamäen haastattelut 11.9.2020, 28.9.2020, 2.10.2020 & 12.10.2020.
- Massarsch, K. R., Bodare, A. & Smekal, A. (2002). Effects of Vibrations from Railway Traffic. PrognosVib Report 1, Delrapport 1, Banverket Contract B01-1027/17. 111 p.
- Myyrä, V. (1988). Pohjanjärven alustavat radanoikaisuvaihtoehdot välillä km 129+000m–131+800m, Koski–Salo. Valtionrautatiet, georyhmä. Nro Rkgr 59/88. Saatavissa Väyläviraston Ratapiirustusarkistosta: ratapiirustusarkisto@vayla.fi
- Myyrä, V. (1990). Työkohtainen työselitys. Rty/geo 18.1.1990. Saatavissa Väyläviraston Ratapiirustusarkistosta: ratapiirustusarkisto@vayla.fi
- Mäenpää, J. (2016). Seismisen CPTU-mittauksen käyttö leikkausaallon nopeuden määrittämiseen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 96 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201608034366>

Möller, B., Larsson, R., Bengtsson, P.-E. & Moritz, L. (2000). Geodynamik i praktiken, Information 17. Statens Geotekniska Institut. 51 s. Saatavissa: <http://www.swed-geo.se/upload/Publikationer/Info/pdf/SGI-I17.pdf>

Passi, T. (2007). Paaluhattujen 3D maatumkaluotaus Helsinki–Turku rantaradalla. Raportti 070415. Roadscanners Oy. Saatavissa: <https://oma.ratadata.fi/index.php/s/S6EFDjpLEO5u4al?path=%2F2016%2FL%C3%84HT%C3%96TIE-TOJA%2Fv%202007%20paaluhattuselvitys>

Pelho, A. (2020). DI Antti Pelhon haastattelu 18.9.2020.

Penumadu, D. & Park, C.B. (2005). Multichannel Analysis of Surface Wave (MASW) Method for Geotechnical Site Characterization. GSP 133 Earthquake Engineering and Soil Dynamics.

Ratadata (2020). Ratadata karttapalvelimen verkkoliittymä. Väylävirasto, Berlins Oy, Loram Finland Oy. Saatavissa: <http://193.65.47.106/site/index2020.html>

Salmenperä, P., Luomala, H. & Tuikka, J. (2016). Ylivieska–Liminka nopeudennostotestit ja pengervärähtely turvepehmeiköllä. Tutkimusraportti, Tampereen teknillinen yliopisto. Versio 13.3.2016, julkaisematon.

Silvast, M. (2016). Pengervärähtelykohteiden alustavat erikoistarkastelut Rantaradalla. Roadscanners Oy. 18.4.2016. Saatavissa: <https://oma.ratadata.fi/index.php/s/S6EFDjpLEO5u4al?path=%2F2016%2FNOPEUDENNOSTOSELVITYSRA-PORTTI>

Talja, A. & Törnqvist, J. (2014). Liikennetärinä: Alueiden tärinäkarttoitus ja rakenteiden vaurioitumisalttius. VTT-R-04703-14. VTT. 58 s. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/VTT-R-04703-14.pdf>

Tunninen, N., Mäkäräinen, E., Pajunen, K. & Pynnönen, L. (2020). Ratatilastot 31.12.2019, Yhteenveto rataverkon tunnusluvuista. Versio 1.1, 17.3.2020. Sweco Infra & Rail Oy. Saatavissa: https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk_n_extranet/hallintaraportit/vuosi-2019/

Tuominen, A. (2010). Rataverkon luokittelun vertailu kantavuuden mukaan. Liikennevirasto, rautatieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2010. 53 sivua ja 5 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-542-7.

Törnqvist, J. (2011). Lielähti–Seinäjoki-rataosan pengervärähtely. Värähtelyn mittaus kohteissa välillä Lielähti–Seinäjoki. Tutkimusraportti, VTT-R-00390-10. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 42 s.

Uimonen, S. (2008). Suomen infrastruktuuripääoma: Rautatiet. VATT-keskustelualoitteita 439. Helsinki. Valtion taloudellinen tutkimuskeskus.

Viljanen, M. (2019). Lemunmäen ja Märjännmäen tunneleiden koeajot Rantaradalla, Nopeustarkastelu Rantaradalla kmv 115–137. Versio 1.1, 8.10.2019. NRC Group Finland Oy.

VR Group (2020). Veturityypit. Verkkosivusto. Saatavissa: <https://www.vrgroup.fi/fi/vrgroup/vr-group-yrityksena/liiketoiminnot/junaliikennointi/veturityypit/>

Vuolio, R. (1991). Räjätystyöt. Suomen Maarakentajien Keskusliitto r.y. ISBN 952-90-2761-3. 318 s.

Väylävirasto (2019a). Rautateiden verkkoselostus 2021. Väyläviraston julkaisuja 46/2019.

Väylävirasto (2019b). Rantaradan kehittämisselvitys. Väyläviraston julkaisuja 54/2019. 42 s. ISBN 978-952-317-748-2.

Väylävirasto (2019c). Roudan hallintaraportti 2019. MIs/NRC Group Finland Oy. 4.6.2019. Saatavissa: https://rhk-fi.directo.fi/tietopalvelu/rhk_n_extranet/hallintaraportit/vuosi-2019/

Väylävirasto (2020). Helsinki–Turku nopea junayhteys: hankearviointi. Väylävirasto. Helsinki 2020. Väyläviraston julkaisuja 50/2020. 63 sivua. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-808-3.

Väylävirasto karttapalvelu. (2020). Saatavissa: <https://julkinen.vayla.fi/webgis-sovellukset/karttapalvelu/>