



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI PELHO
RASKAIDEN JUNIEN KUORMITUSVAIKUTUSTEN MONITO-
ROINTI

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
25. syyskuuta 2017

TIIVISTELMÄ

ANTTI PELHO: Raskaiden junien kuormitusvaikutusten monitorointi

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 133 sivua, 5 liitesivua

Toukokuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Infrarakenteet

Tarkastajat: professori Pauli Kolisoja ja DI Heikki Luomala

Avainsanat: rata, monitorointi, akselipaino, 250 kN, kuormitusvaikutus, stabiili-teetti

Tässä tutkimuksessa selvitettiin raskaiden junien kuormitusvaikutuksia Kouvola-Kotka rataosaan. Tavoitteena oli selvittää edellytykset ja rajoitukset, jotka huomioiden raskaampi kalusto voitaisiin sallia Kouvola-Kotka rataosalla ilman huomattavia radan perusparannuksia. Rataosaa monitoroitiin kahdesta stabiliteetin kannalta epäedulliseksi arvioidusta kohteesta. Monitoroinnin tarkoituksena oli tuottaa mittaustietoa edellä mainitun päätöksenteon tueksi. Tutkimuksessa tehtiin lisäksi koko rataosan laserkeilaus ja joustomittaus sekä alustavat 2D-stabiliteettilaskelmat tutkimuskohteista.

Kohteet instrumentoitiin automaattisilla mittauslaitteistoilla. Huokosvedenpaineanturit mittasivat huokosvedenpaineen muutosta junien kuormituksen vaikutuksesta. Siirtymäanturit ja kiihtyvyyssanturit mittasivat pölkkyjen pystysiirtymiä. Venymäliuska-anturit mittasivat juna-kuormia. Inklinometrit mittasivat pohjamaan sivuttaissiirtymää junien kuormituksen vaikutuksesta. Geofonit mittasivat junaliikenteen aiheuttamaa tärinää. Valituille tutkimuskohteille pysäytettiin sekä kotimaista että venäläistä junakalustoa. Molempiin instrumentoituihin kohteisiin pysäytettiin kolme eri akselipainoista vaunuparia. Suomalaista kalustoa olivat 170 kN ja 225 kN akselipainoiset vaunut. Venäläistä kalustoa olivat normaalia raskaammat 250 kN akselipainoiset vaunut. Junat tutkimukseen järjesti VR-Yhtymä Oy.

Tutkimuksen mukaan raskaammat 250 kN akselipainoiset vaunut aiheuttivat hieman suurempia palautuvia painumia radassa kuin tällä hetkellä liikennöivä kalusto. Radan pohjamaan sivuttaissiirtymät olivat pieniä ja palautuivat kuormituksen poistuttua. Pohjamaa käyttäytyi tutkimustulosten mukaan kimmoisasti kaikilla tutkimuksessa käytetyillä kuormilla. Raskaampien vaunujen pysäytyksen aikana pohjamaan huokosvedenpaine kasvoi suhteessa kevyempien vaunujen pysäytyksien aikana tapahtuneisiin pohjamaan huokosvedenpaineen muutoksiin. Osa molempien kohteiden antureista mittasi kuitenkin kesän aikana selittämätöntä huokosvedenpaineen kasvua ilman kuormitusta, mikä vaikeutti kuormituksen aikana tapahtuvan huokosvedenpaineen kasvun arvioimista. Tärinämittausten tulokset osoittivat suuremman kuorman, nopeuden ja lovipyörien määrän lisäävän värähtelyn voimakkuutta.

Alustavien 2D-stabiliteettilaskelmien mukaan molempien kohteiden kokonaisvarmuudet olivat riittävät. Venäläisen 250 kN kaluston teliparin metripainon aiheuttamalla pinta-kuormalla laskettujen stabiliteettilaskelmien mukaan stabiliteettia voidaan joutua seuraamaan monitorointimittauksilla. Stabiliteettilaskelmat tehtiin kuitenkin vain kairaustulosten perusteella arvioiduilla lujuuksilla, koska kaikki laboratoriotulokset eivät valmistuneet vielä tämän tutkimuksen aikana.

ABSTRACT

ANTTI PELHO: Monitoring the loading effects of heavy trains

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 133 pages, 5 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Municipality Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja ja DI Heikki Luomala

Keywords: railroad, monitoring, axle load, 250 kN, loading effect, stability

This study focuses on the loading effects of heavy trains that are planned to operate on Kouvola-Kotka railway line. The main objective was to clarify the possible prerequisites and limitations to take into account in order to allow heavier 250 kN axle load trains to operate on Kouvola-Kotka railway without major track improvements. Two test sites, located on soft soil, were instrumented with geotechnical monitoring equipment. The purpose of geotechnical monitoring was to produce measurement data from the subsoil behavior and track conditions for the stability calculations and previously mentioned decision-making. This study also included the laser scanning of the embankment, continuous track stiffness measurements and preliminary 2D-stability calculations.

Test sites were instrumented with automatic monitoring equipment. Piezometers measured changes in the pore water pressure caused by the train loading. Linear position transducers and acceleration transducers measured sleepers' vertical displacement. Strain gauge transducers measured axle loads of trains. Inclometers measured the horizontal displacement of subsoil caused by train loading. Geophones measured soil vibration.

Finnish and Russian rolling stock were halted on both test sites with three different axle loads. Domestic wagons loaded with 170 kN and 225 kN axle loads and Russian wagons loaded with 250 kN axle load were tested. VR-Yhtymä Oy organized the rolling stock to this study.

According to the study, heavier 250 kN axle loaded wagons cause slightly bigger elastic deflection than that of rolling stock, which currently operates on the Kouvola-Kotka railroad. The horizontal displacements of the subsoil were small and elastic. The subsoil behaved elastically under all the loads that were used in this study. When the heavier wagons were halted, the pore water pressure of the subsoil grew faster, as expected, in relation to the lighter wagons. However, some of the piezometers measured the unexplained growth of the pore water pressure during the summer, which made it harder to interpret the changes in the pore water pressure caused by the trains. The study also indicated that soil vibration grew as the axle load, train speed or wheel faults increased.

According to the preliminary 2D-stability calculations, the stability of the subsoil on both test sites was sufficient. According to the calculations conducted with the metric weight of a Russian 250 kN bogie pair, it may be required to monitor the stability of the subsoil. The stability calculations were conducted using only the test results from the CPTU and vane apparatus tests, because not all the laboratory tests had been finished during this study.

ALKUSANAT

Diplomityö tehtiin Tampereen teknillisessä yliopistossa. Diplomityö liittyy Kotkan rata -projektiin, josta julkaistaan myös saman niminen tähän työhön pohjautuva raporttiversio. Haluan kiittää projektipäällikkö Heikki Luomalaa mahdollisuudesta tehdä diplomityö näin mielenkiintoiseen projektiin, sekä hänen suuresta panoksestaan ohjaajana. Suuri kiitos myös työn toiselle ohjaajalle professori Pauli Kolisojalle hänen panoksestaan työhön liittyen.

Kiitos myös VR Yhtymä Oy:lle testijunista, joilla rataa kuormitettiin sekä FinMeas Oy:lle ja Finnrock Oy:lle monitorointipalveluista. Haluan kiittää myös TTY:n pohja- ja ratarakenteiden tutkimusryhmiä ja VR-Track Oy:tä pohjatutkimuksista ja instrumentointiavusta. Erillisenä mainintana kiitos laboratoriomestari Marko Hapolle kaikista Kotkaan suunnatuista reissuista, joita hän pääsi tekemään työn ansiosta. Suuri kiitos myös kihlatulle, perheelle ja ystäville tukemisesta diplomityön tekemisen aikana.

Tampereella, 11.4.2018

Antti Pelho

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	RATAPENKEREEN TOIMINTA.....	2
2.1	Radan rakenneosat.....	2
2.1.1	Päällysrakenne	3
2.1.2	Alusrakenne	4
2.1.3	Pohjamaa ja radan perustaminen.....	5
2.2	Radan maarakennemateriaalien muodonmuutuskäyttäytyminen.....	6
2.2.1	Palautuvat muodonmuutokset	7
2.2.2	Palautumattomat muodonmuutokset.....	10
2.3	Pohjamaamateriaalien muodonmuutuskäyttäytyminen.....	11
2.3.1	Palautuvat muodonmuutokset	12
2.3.2	Palautumattomat muodonmuutokset.....	13
2.3.3	Pohjamaan sivuttaissiirtymä	14
2.4	Ratarakenteen jäykkyys.....	16
2.5	Ratarakenteen stabiliteetti	18
2.5.1	Stabiliteettiin vaikuttavat tekijät	19
2.5.2	Stabiliteetilaskenta	20
2.6	Radan kuormituskestävyys.....	23
3.	JUNALIIKENTEEEN VAIKUTUS RATAAN.....	25
3.1	Kuormien jakautuminen	25
3.2	Mitoituskuormat.....	28
3.3	Tutkimuksen testijunat	31
3.4	Junaliikenteen vaikutus rataympäristöön	34
4.	KOUVOLA-KOTKA RATAOSA.....	36
4.1	Nykytilanne	36
4.2	Monitoroidut pehmeikkökohteet.....	37
4.3	Vanhat pohjatutkimukset ja stabiliteetilaskennat.....	40
5.	MITTAUSMENETELMÄT	43
5.1	Pehmeikkökohteilla tehdyt pistemäiset mittaukset	43
5.1.1	Sivuttaissiirtymän mittaus.....	43
5.1.2	Huokosvedenpaineen mittaus	44
5.1.3	Pystysiirtymän mittaus	46
5.1.4	Kuormien mittaus.....	47
5.1.5	Tärinän mittaus	48
5.1.6	Kairaukset	49
5.2	Koko rataosalle tehdyt mittaukset.....	49
5.2.1	Pysyvän muodonmuutoksen mittaus.....	49
5.2.2	Radan jäykkyyden mittaus	50
6.	MITTAUS- JA KOEJÄRJESTELYT	51
6.1	Pehmeikkökohteiden koejärjestelyt.....	51

6.1.1	Pohjatutkimukset ja alustavat työt	51
6.1.2	Instrumenttien asennus.....	53
6.2	Koko rataosaa mittaavat koejärjestelyt	59
6.2.1	Radan jäykkyyden mittaus	60
6.2.2	Laserkeilaus	61
6.3	Testijunien pysäytykset ja ohiajot	61
7.	MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI.....	65
7.1	Huokosvedenpaine	65
7.1.1	Kohde km 233+900.....	65
7.1.2	Kohde km 238+280.....	71
7.1.3	Huokosvedenpaineen mittaamisen haasteet.....	75
7.2	Pystysiirtymä.....	77
7.2.1	Kohde km 233+900.....	78
7.2.2	Kohde km 238+280.....	86
7.2.3	Kiihtyvyyssantureilla mitattu pystysiirtymä.....	93
7.2.4	Kokonaisjäykkyyden tarkastelu	95
7.3	Sivuttaissiirtymä.....	98
7.3.1	Kohde km 233+900.....	98
7.3.2	Kohde km 238+280.....	103
7.3.3	Sivuttaissiirtymä mittausten yhteenveto	108
7.4	Junaliikenteen aiheuttama värinä	110
7.4.1	Kohde km 233+900.....	110
7.4.2	Kohde km 238+280.....	115
7.5	Pohjatutkimukset ja radan stabiliteettilaskennat	119
7.5.1	Kohde km 233+900.....	120
7.5.2	Kohde km 238+280.....	122
7.6	Radan jousto ja pysyvä muodonmuutos.....	124
8.	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	126
	LÄHTEET.....	131

LIITTEET:

Liite 1: Vanhojen pohjatutkimusten geotekniset poikkileikkaukset.

Liite 2: Venäläisistä vaunuista kootun testijunan vaunuluettelo.

Liite 3: CPTU-koekairauksien tulokset.

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EMMA	Radantarkastusvaunu
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
FOS	Kokonaisvarmuus (Factor of Safety)
LEM	Lamellimenetelmä (Limit Equilibrium Method)
LIMO	Liikkuvan kaluston tekniset määräykset ja ohjeet
RATO	Ratatekniset ohjeet
RATUS	Ratojen luokitus –projekti
YTE	Yhteentoimivuuden tekninen eritelmä
τ	leikkausjännitys
γ	liukuma (leikkausmuodonmuutos)
σ	normaalijännitys, pääjännitys
ε	venymä, muodonmuutos
ν	Poissonin luku
E	materiaalin jäykkyys
y_m	sivusiirtymä
S	pystysuuntainen siirtymä
τ_f	maan leikkauslujuus
c'	maan tehokas koheesio
σ_n'	vallitseva tehokas normaalijännitys
φ'	maan tehokas sisäinen kitkakulma
u	huokosvedenpaine
s_u	suljettu leikkauslujuus
F	varmuuskerroin

1. JOHDANTO

Kouvola-Kotka ratayhteys muuttuu koko ajan tärkeämmäksi liikenneväyläksi. Kotkassa sijaitsee Suomen suurin yleis-, vienti-, kontti-, metsäteollisuus- ja transitosatama. Satamaan kuljetetaan rautateitse vuosittain noin 5 miljoonaa tonnia tavaraa, joista suuri osa tulee Venäjältä. Kouvola-Kotka rataosa on tällä hetkellä rajoitettu 225 kN akselipainoille, koska rataosa on vanha eikä sitä ole perusparannettu aikoihin. Venäjältä saapuvat tavarajunat olisi kuitenkin mahdollista kuormata 250 kN akselipainoon, jolloin kuljetuskapasiteetti rataosalla paranisi. Suomen rajalle saakka Venäjän puolelle on jo rakennettu oikorata, joka kestää 300 kN akselipainoja ja Suomen puolella Vainikkala-Kouvola välinen rataosa on jo sallittu 250 kN akselipainoille. Kouvola-Kotka rataosalla halutaan sallia 250 kN akselipainot, jotta Hamina-Kotka sataman kilpailukyky venäläisen rahdin välityssatamana voitaisiin turvata.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää raskaiden junien kuormitusvaikutusta Kouvola-Kotka rataosalle. Tutkimuksen perusteella pyritään selvittämään, millä edellytyksillä Kouvola-Kotka rataosalla on mahdollista sallia 250 kN akselipainot, kuitenkin siten, ettei junan metripaino ylitä 80 kN/m.

Rataosa monitoroidaan radan stabiliteetin kannalta epäedullisimmiksi arvioituista kohteista. Monitoroinnin tarkoituksena on tuottaa mittaustietoa edellä mainitun päätöksen tueksi. Valituille tutkimuskohteille pysäytetään sekä kotimaista että venäläistä kalustoa. Junan pysäyttäminen ratalinjalle on pohjamaan stabiliteetin kannalta vaarallisin tilanne. Pysäytettävän kotimaisen kaluston akselipainot ovat 170 kN ja 225 kN ja venäläisen kaluston akselipaino on 250 kN.

Kouvola-Kotka rataosalla tehdään myös radan joustomittaus sekä laserkeilaus, jota verrataan muutamia vuosia sitten tehtyjen laserkeilausten tuloksiin. Näiden tutkimusten tavoitteena on saada kuva rataosan joustosta, penkereen kuormituskestävyydestä sekä radan pysyvistä muodonmuutoksesta.

Tässä tutkimuksessa keskitytään raskaiden junien kuormitusvaikutusten monitorointiin ja tulosten analysointiin. Tutkimuksen teoria keskittyy rataan ja sen osien toimintaan kuormituksessa. Työssä esitellään Kouvola-Kotka rataosa, mittaustaitteiden teoria ja toteutettavat monitorointijärjestelyt. Työssä lasketaan pehmeikkökohteiden stabiliteetti kairaus-tulosten perusteella käyttäen LEM-mallia eli lamellimenetelmää (Limit Equilibrium Method). Laboratoriokokeista saatavien tuloksien mukaiset tarkat stabiliteetilaskennat esitetään aiheeseen liittyvässä jatkotyössä.

2. RATAPENKEREEN TOIMINTA

Ratapenger on moniulotteinen rakenne, jonka täytyy toimia ongelmitta raideliikenteen sujuvuuden vuoksi. Ratapenkereessä ja pohjamaassa tapahtuu pysyviä ja palautuvia muodonmuutoksia liikenne- sekä ympäristökuormitusten vaikutuksesta pysty- ja sivuttaissuunnassa. Ratarakenteessa ja pohjamaassa tapahtuvista muodonmuutoksista kiinnostavimpia ja tutkituimpia ovat raidegeometrian virheitä aiheuttavat muodonmuutokset. Geometriavirheiksi kutsutaan rataan syntyviä raidegeometrian muutoksia, kuten korkeuspoikkeamaa eli paikallista pysyvää pystysiirtymää, jotka vaikuttavat radalla liikennöintiin.

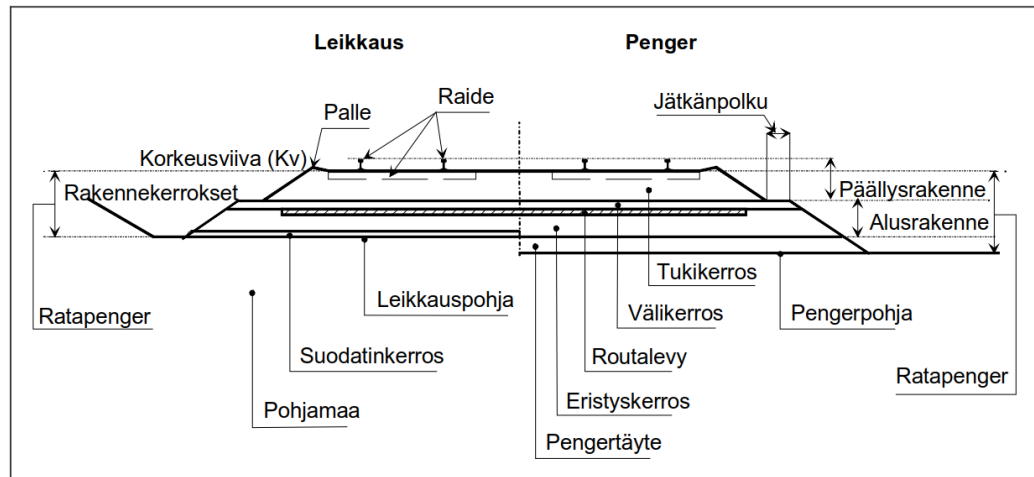
Tässä tutkimuksessa mitatuille radan pysty- ja sivuttaissiirtymille pyritään löytämään selitys maamateriaalien muodonmuutuskäyttäytymisen teorioista. Mitattujen siirtymien ja muodonmuutuskäyttäytymisen teorioiden avulla voidaan mahdollisesti päätellä eri akselipainoisten junien aiheuttamien siirtymien suuruuksia.

Ratapenkereen stabiliteetti kuuluu tärkeänä osana ratapenkereen toimintaan. Tässä työssä stabiliteetti käsitellään yleisellä tasolla sekä esitellään siihen vaikuttavat tekijät ja tutkimuksessa käytettävän stabiliteetilaskennan teoria.

Seuraavissa kappaleissa esitellään radan rakenneosat ja niiden toiminta sekä käsitellään radan maarakennemateriaalien ja pohjamaamateriaalien muodonmuutuskäyttäytymisen teoriaa sekä ratapenkereen stabiliteettia. Muodonmuutoksiin vahvasti liittyvät ratarakenteen jäykkyys ja kuormituskestävyys käsitellään tutkimuksen osalta tarpeellisella laajuudella.

2.1 Radan rakenneosat

Rata koostuu päällysrakenteesta ja alusrakenteesta. Päällysrakenteeseen kuuluvat tukikerros ja raide. Raiteella tarkoitetaan ratakiskoja, ratapölkkyjä, ratakiskojen kiinnitys- ja jatkososia sekä vaihteita ja muita raiteen erikoisrakenteita (Ratahallintokeskus 2002, s. 6). Alusrakenteella tarkoitetaan väli- ja eristyskerrosta sekä mahdollista suodatinkerrosta ja routalevyä. Kuvassa 2.1 on esitetty radan poikkileikkaus ja tärkeimpien rakenneosien nimet.



Kuva 2.1. Radan rakenneosat radan poikkileikkauksessa (Liikennevirasto 2014, s. 8)

2.1.1 Päälysrakenne

Ratapölkkyjen materiaalina käytetään betonia, puuta tai terästä. Suomessa yleisimmät pölkky materiaalit ovat puu ja betoni. Puupölkkyt täytyy kyllästyä, jotta ne kestävät rataympäristössä vallitsevat olosuhteet. Kyllästysaineena on käytetty kreosoottia, joka on nykyään todettu haitalliseksi yhdisteeksi. Kreosootilla kyllästetyt puuratapölkkyt saatetaan kieltää tulevaisuudessa, koska ne ovat ongelmajätettä. Tämä kasvattaa betonipölkkyjen suosiota radoissa.

Ratapölkkyjen tärkeimmät tehtävät ovat välittää kiskosta siirtyneet voimat tukikerrokseen, säilyttää kiskon kallistus ja raideleveys, vastustaa kiskojen pituus-, sivu- ja pystysuuntaista liikettä sekä antaa kestävä tuki ja kiinnitysmahdollisuus kiskolle ja kiskon kiinnikkeille. (Esveld 2001, s. 212) Pölkkyt myös antavat edellytykset sähköiselle eristykselle kiskojen sekä tukikerroksen ja kiskon välillä. (Ratahallintokeskus 2002)

Ratakiskot ottavat vastaan kaluston aiheuttamat kuormitukset ja ohjaavat kaluston liikettä. Raiteet jaetaan kiskon pituuden mukaan kolmeen raidetyyppiin: jatkuvakiskoraide eli Jk-raide, pitkäkiskoraide eli Pk-raide ja lyhytkiskoraide eli Lk-raide. (Ratahallintokeskus 2002, s. 9) Raiteissa käytetään leveäjalkaista Vignole-kiskoprofiilia. CEN:n standardien mukaan kiskoprofiileja merkitään kiskon massan kokonaisina kilogrammoina metriä kohden ilmoittavalla luvulla, kirjaimella E ja asianomaisen standardin määrittävällä versioluvulla. Standardoiduista kiskoprofiileista Suomessa on käytössä 54 E1 ja 60 E1. Muita kun CEN:n standardeja kiskoprofiileja merkitään kirjaimella K ja numerolla, joka määräytyy samalla tavalla kuin standardissa. Suomessa on käytössä K30- ja K43-kiskoja. (Ratahallintokeskus 2002, s. 33)

Kiskot kiinnitetään ratapölkkyyn kiskonkiinnityksillä. Kiskon kiinnityksellä on monta tehtävää radan toiminnassa. Kiinnitysosat pitävät kiskojen välisen etäisyyden vakiona ja

antavat riittävän pituussuuntaisen kiinnityskyvyn raiteen pituussuuntaisia voimia vastaan. Aluslevy takaa kiskon oikean kallistuksen ja jakaa kiskosta kohdistuvat voimat riittävän suurelle pinta-alalle ratapölkkyyn. Välilevy lisää kiskon kiinnityksen läpivetovastusta ja joustavuutta sekä jakaa aluslevyyn kohdistuvat voimat koko kiskon lepopinnalle. Kiskon kiinnitysosat estävät myös kiskoa nurjahtamasta riittävällä vääntövastuksella. (Esveld 2001, s. 219; Ratahallintokeskus 2002, s. 45; Mäkelä 2002, s.12)

Raide lepää tukikerroksen päällä. Tukikerros on materiaaliltaan raidesepeä tai -soraa. Raidesoraa käytetään yhä vähemmän ratarakenteen materiaalina. Tukikerroksen tehtävänä on tukea ratapölkkyjä ja estää niiden poikittainen, pitkittäinen tai pystysuuntainen liike, jakaa liikennekuormien jännitykset alempana olevien kerrosten kannalta riittävän alhaiselle tasolle sekä vaimentaa dynaamisen kuormituksen aiheuttamaa melua ja tärinää. (Liikennevirasto 2014, s. 8) Raidesepeän vaatimukset ja ominaisuudet on käsitelty ratahallintokeskuksen ohjeessa Standardin SFS-EN 13450 raidesepeäkiiviaineet kansallinen soveltamisohje (Niemi & Nummelin 2005). Tukikerroksen reunaan tehdään yleensä korotus, jota kutsutaan palteeksi. Palteen tarkoituksena on lisätä tukikerroksen kykyä ottaa vastaan raiteesta siihen kohdistuvat voimat (Liikennevirasto 2014, s. 6).

2.1.2 Alusrakenne

Alusrakenne koostuu väli- ja eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta ja routalevystä. Alusrakenteeseen kuuluu myös pengertäyte niissä kohteissa, joissa sitä tarvitaan. Pengertäytteellä rata saadaan pystygeometrialtaan oikealle korkeustasolle.

Välikerros muodostaa tukikerrokselle tasaisen ja kantavan alustan sekä estää tukikerroksen sekoittumista alla oleviin rakenteisiin. Välikerroksen materiaalina käytetään yleensä soraa, murskettä tai sora-murskettä. Kaikki välikerrokseen käyvät materiaalit ja niiden ominaisuudet on esitelty julkaisussa InfraRYL. (Liikennevirasto 2014, s. 8)

Eristyskerros estää ja vähentää sen alla olevien maakerrosten routimista ja pysäyttää kapillaarisen veden nousu kerroksen alaosaan toimien suodatinkerroksena. Eristyskerros muodostaa välikerrokselle tasaisen ja kantavan alustan. Materiaalina käytetään karkeaa hiekkaa tai murskettä. (Liikennevirasto 2014, s. 6)

Suodatinkerros estää pohjamaan tai pengertäytteen sekoittumista eristyskerrokseen (Liikennevirasto 2014, s. 7). Suodatinkerros myös osaltaan estää tai vähentää alla olevan pohjamaan routimista. Suodatinkerroksessa käytetty materiaali saa poiketa vain hieman eristyskerroksesta ja pohjamaasta. (Mäkelä 2002, s.10) Suodatinkerroksen materiaalina käytetään yleensä hiekkaa. Materiaalivaatimukset on esitelty julkaisussa InfraRYL.

Routalevyjä käytetään estämään geotermisen lämmön poistuminen pohjamaasta rakennekerroksiin. Useasti rakennekerrosten ollessa ohuita pakkanen pääsee kulkeutumaan ker-

roksien läpi pohjamaahan aiheuttaen routaantumista. Routalevyt lisäävät rakenteen lämmöneristävyyttä vähentäen tai estäen alla olevan maan routimista. Routalevyinä käytetään sulakepuristettua polystyreeniä (XPS). Routalevy asennetaan useimmiten tukikerroksen alle sepelinseulonnan yhteydessä, mutta routalevyn voi myös asentaa eristyskerroksen ja välikerroksen väliin. (Liikennevirasto 2014, s. 7)

Radan voi perustaa leikkaukseen tai penkereelle. Leikkaukseen rakennettuun rataan tarvitaan usein suodatinkerros eristyskerroksen ja pohjamaan välille. Suodatinkerroksen tarve arvioidaan Terzaghin suodatinkriteerin avulla. Suodatinkriteerin mukaan ylemmän kerroksen raekoon läpäisyprosentin 15 kohdalla suhde alemman kerroksen raekokoon läpäisyprosentin 85 kohdalla täytyy olla yli 5. Pengertä rakentaessa eristyskerroksen alle tarvitaan pengertäyte. Pengertäyte tasoittaa maan luonnollista epätasaisuutta ja toimii pohjamaan tapaan rakennekerrosten alla.

2.1.3 Pohjamaa ja radan perustaminen

Pohjamaaksi kutsutaan radan alla olevaa luonnontilaista maata. Pysyvä ratarakenteen paino kuormittaa pohjamaata jatkuvasti, minkä lisäksi liikennekuorma aiheuttaa pohjamaahan dynaamisia sekä staattisia kuormituksia. Pohjamaan merkitys radassa tapahtuvissa palautuvissa painumissa sekä pysyvissä muodonmuutoksissa on tärkeä. Pohjamaan jäykkyys onkin eräs tärkeimmistä radan kuormituskestävyyteen vaikuttavista seikoista (Kalliainen & Kolisoja 2013, s. 81)

Rataa perustaessa täytyy varmistua pohjamaan ominaisuuksien riittävydestä radan alustaksi. Pohjamaalle määritetyt vaatimukset ovat seuraavat:

- Pohjamaahan ei saa muodostua liian suuria painumia liikennekuormituksen vaikutuksesta.
- Pohjamaan konsolidaatiopainuman täytyy olla pieni
- Ratarakenteen stabiliteetin täytyy olla riittävä.
- Pohjamaassa ei saa tapahtua vaiheittain etenevää leikkausmurtumaa eikä merkittäviä tilavuudenmuutoksia.
- Pohjamaa ei saa sekoittua ratarakenteen rakennekerrokseen. (Selig & Waters 1994, s. 2.9; Kalliainen et al. 2014, s. 19)

Radan perustustapa määräytyy painumien raja-arvojen ja stabiliteetin vaatimuksien sekä routamitoituksen perusteella. Uusi rata täytyy suunnitella siten, että pysyvän painuman ja palautuvan painuman RATO 3:ssa määrätyt raja-arvot eivät ylitä (Taulukko 2.1). Uusien ratojen stabiliteetti tutkitaan standardin SFS-EN 1990 mukaan RATO 3:ssa esitetyille kuormille. Kuormia käsitellään kattavammilla kappaleessa 3.2. Routamitoitus tehdään RATO 3:sta löytyvien routamitoituskäyrästöjen mukaan. (Liikennevirasto 2014, Liite 1)

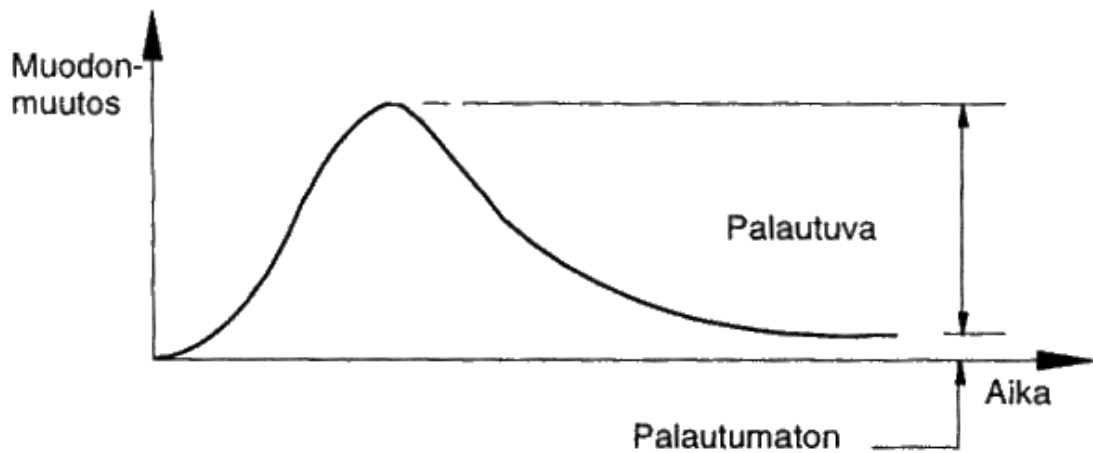
Taulukko 2.1 Tasaisen kokonaispainuman sekä pituus- ja sivuttaiskaltevuuden muutoksen enimmäisarvot eri alusrakenneluokissa (Liikennevirasto 2014, s. 17)

Radan alusrakenneluokka	Painuma-aika 100 vuotta	0-2 vuoden aikana tapahtuva painuma		2-9 vuoden aikana tapahtuva painuma	
	Tasainen kokonaispainuma [mm]	Pituuskaltevuuden muutos [%]	Sivuttaiskaltevuuden muutos [%]	Pituuskaltevuuden muutos [%]	Sivuttaiskaltevuuden muutos [%]
0	800	0,4	0,8	0,4	0,8
1	800	0,3	0,6	0,3	0,6
2	500	0,2	0,4	0,2	0,4
3	300	0,15	0,3	0,15	0,3
4	100	0,1	0,2	0,1	0,2

2.2 Radan maarakennemateriaalien muodonmuutoskäyttäytyminen

Radan maarakennemateriaalien ja pohjamaan maamateriaalien muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat kuormituskertojen lukumäärä, jännitystaso, jännityshistoria, tiiviys, vesipitoisuus, rakeisuus ja rakeiden muoto. Radan maarakennemateriaalit eli rakennekerroksissa käytetyt maamateriaalit ovat standardien ja ohjeiden mukaan valittuja rakeisia materiaaleja. Niiden muodonmuutoskäyttäytyminen voidaan jakaa palautuviin muodonmuutoksiin ja palautumattomiin muodonmuutoksiin.

Junaliikennettä voidaan kuvata toistuvina yksittäisinä kuormituksina. Ehrola kuvaa kirjassaan rakeisen materiaalin muodonmuutoskäyttäytymistä yksittäisen ja toistuvan kuormituksen vaikutuksesta. (Ehrola, 1996) Yksittäisen kuormituksen aiheuttama muodonmuutos on esitetty kuvassa 2.2. Esitetty muodonmuutoskäyttäytyminen on periaatteessa samanlaista, kun radassa junaliikenteen vaikutuksesta tapahtuu. Muodonmuutos palautuu suurimmalta osin kuormituksen poistuttua, mutta osa aiheutuneesta muodonmuutoksesta jää pysyväksi.



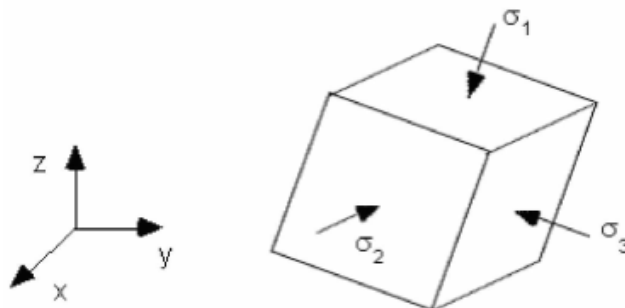
Kuva 2.2. Yksittäisen kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset (Ehrola 1996, s. 171)

Seuraavissa kappaleissa palautuvat ja palautumattomat muodonmuutokset käsitellään omina kokonaisuuksinaan, vaikka usein kuormitus aiheuttaa maarakennemateriaalille molempia joko suoraan tai välillisesti.

2.2.1 Palautuvat muodonmuutokset

Palautuvia muodonmuutoksia voidaan kuvata lineaarisesti kimmoisella tai epälineaarisesti kimmoisella käyttäytymisellä. Lineaarisesti kimmoista käyttäytymistä kuvataan lineaarielastisella materiaalimallilla. Jännitystilaa ja lineaarielastisen materiaalimallin teoria on esitetty kattavasti Kalliainen ja Kolisojan julkaisussa Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. (Kalliainen et al. 2014)

Maamateriaaliin kohdistuu kuormasta rasituksia, jotka aiheuttavat jännityksiä. Jännitystilaa voidaan kuvata kuutioelementin avulla. (Kuva 2.3) Kuutioelementin tahkoihin vaikuttavat normaalijännitykset (σ) ja leikkausjännitykset (τ) voidaan ilmaista kolmiulotteisesti koordinaatiston avulla. Jännitystilaa ilmaistaan usein kolmen pääjännityksen avulla. Pääjännitykset ovat jännityksiä, jotka vaikuttavat tasoa vastaan kohtisuorassa, jolloin leikkausjännityksiä ei esiinny.



Kuva 2.3 Pääjännitykset kuutioelementin tahkoilla (Kalliainen et al. 2014, s. 31)

Kappaleeseen kohdistuva jännitystila aiheuttaa muodonmuutoksia kappaleessa. Kappaleeseen kohdistuvien muodonmuutosten yhteisvaikutusta kutsutaan muodonmuutostilaksi. Muodonmuutostila pitää sisällään pisteen kautta kulkevien viivaelementtien venymät ja toisiaan vasten kohtisuorien viivaelementtiparien välisten suorien kulmien kiertymät. Muodonmuutostilassa käsite venymä (ϵ) vastaa jännitystilän käsitettä jännitys (σ) ja liukuma eli leikkausmuodonmuutos (γ) käsitettä leikkausjännitys (τ). (Kalliainen et al. 2014, s. 32)

Kolmiulotteinen materiaalelementti käyttäytyy yksinkertaisimmillaan lineaarielastisesti eli kaikki muodonmuutokset palautuvat jännitystilän palautuessa ennalleen. Tällöin puhutaan lineaarielastisen teorian käytöstä eli Hooken laista. Siinä materiaalia kuvaavina parametreina käytetään materiaalin jäykkyyttä E ja poissonin lukua ν . Näillä kahdella toisistaan riippumattomilla parametreilla kuvataan kolmiulotteista jännitys-venymäkäyttäytymistä isotrooppisessa ja homogeenisessä materiaalissa. Hooken laki voidaan kirjoittaa jäykkyydsmatriisimuotoon. Matriisiyhtälöiden avulla saadaan yksinkertaistetut yleisesti kirjallisuudessa käytettävät Hooken lain yhtälöt.

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad (1a)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E} [\sigma_2 - \nu(\sigma_3 + \sigma_1)] \quad (1b)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (1c)$$

missä,

$\epsilon_{1,2,3}$ = suhteelliset muodonmuutokset pääjännitysten suunnissa

$\sigma_{1,2,3}$ = pääjännitykset

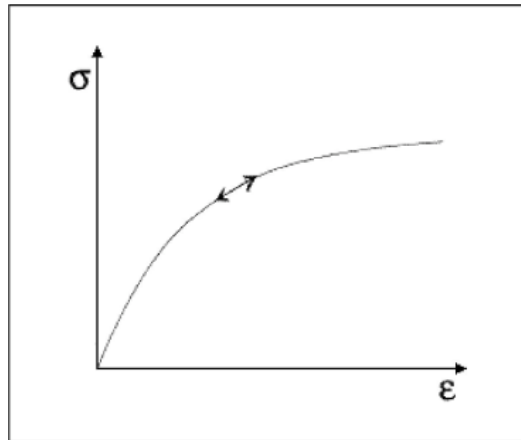
E = kimmomoduuli

ν = Poissonin luku (Kalliainen et al. 2014, s. 33)

Kaavan 1 mukaiset riippuvuudet kuvaavat vain pientä hetkeä maamateriaalin kuormituksessa, koska materiaalin käyttäytyminen on todellisuudessa epälineaarista. Tästä syystä mallintamisessa ja laskemisessa materiaaliparametrien tulee vastata ehdottomasti materiaalin todellisen kuormitustilanteen jännitys- ja muodonmuutostasoja. Lineaarinen malli kuvaa materiaalissa tapahtuvia muodonmuutoksia tarkasti vain hyvin rajoitetulla jännitysalueella. (Kolisoja et al. 1999s. 102-103)

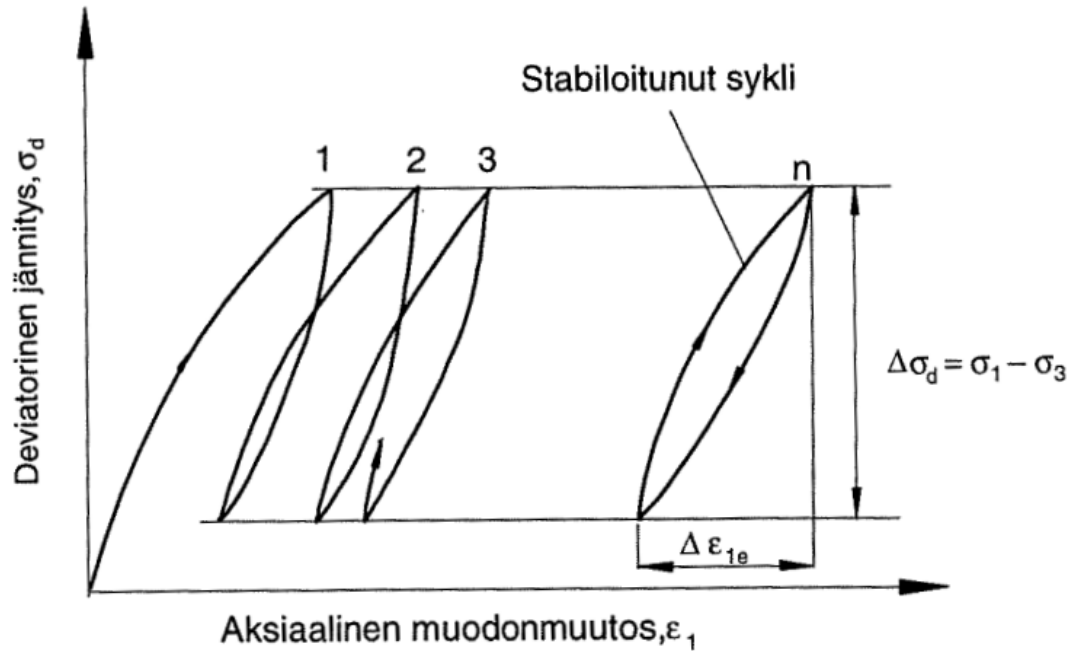
Ratarakenteessa tapahtuva muodonmuutos on lähes aina palautuvaa, koska ratarakenne suunnitellaan siten, että yhden akselinylityksen aiheuttama rasitus on selvästi alle radan komponenttien murtokuorman (Kalliainen et al. 2014, s. 35). Vaikka muodonmuutos olisi täysin palautuvaa ei lineaarielastinen materiaalimalli kuvaa kovin hyvin rakeisten maa- ja kiviainesten käyttäytymistä, koska karkearakeisten materiaalien käyttäytyminen riippuu jännitystilasta. Tämä tarkoittaa, että jännityksen ja venymän suhde ei kulje lineaarisesti eli materiaalit ovat epälineaarisesti kimmoisia. Materiaalin käyttäytyminen seuraa

kuitenkin samaa jännitys-muodonmuutospolkua riippumatta ollaanko kuormituksen lisäys vai palautusvaiheessa (Kalliainen et al. 2014, s. 35). Kuvassa 2.4 on esitetty periaatteellinen kuva rakeisen materiaalin jännitys-muodonmuutospolusta.



Kuva 2.4 Periaatteellinen kuva rakeisen materiaalin jännitys-muodonmuutoskäyttäytymisestä (Kalliainen et al. 2014, s. 35)

Edellä mainittu teoria keskittyy yhden kuormituksen aiheuttamaan jännitys-muodonmuutoskäyttäytymiseen. Kuormituksen toistokertojen lisääntyessä palautumattomien muodonmuutosten osuus sitomattomissa rakeisissa materiaaleissa pienenee. Kun riittävä kuormituskertamäärä on ylittynyt, jännitys-muodonmuutossykli stabiloituu ja palautumaton muodonmuutos käytännössä loppuu. (Ehrola 1996) Tästä eteenpäin kaikki materiaaleissa tapahtuva muodonmuutos on lähes täysin palautuvaa ja materiaali käyttäytyy lähes kimmoisasti. Linearisesti kimmoisasti käyttäytyvässä materiaalissa jännitykset ja muodonmuutokset ovat suoraan verrannollisia toisiinsa, eikä siinä tapahdu palautumattomia muodonmuutoksia (Wood 1990). Kuvassa 2.5 on esitetty kuormitus-muodonmuutoskäyttäytymisen stabiloituminen toistuvan kuormituksen aikana.

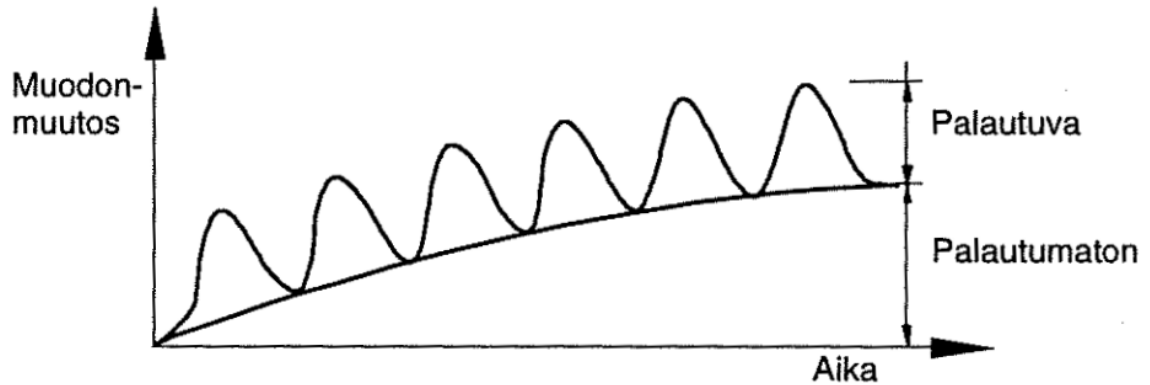


Kuva 2.5. Kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen toistuvan kuormituksen aikana (Ehrola 1996, s. 173)

2.2.2 Palautumattomat muodonmuutokset

Radan alusrakennekerrosten materiaalit sekä pohjamaa ovat rakeisia materiaaleja. Rakeisen materiaalin muodonmuutos ei yleisesti esiintyvillä jännitysalueilla ole jännitystilän suhteen lineaarista tai täysin palautuvaa eli kimmoista, vaan omaa myös plastisia ominaisuuksia (Ehrola 1996).

Aikaisemmin kappaleessa 2.2 esitetty kuva yksittäisestä kuormituksesta näytti kuormituksen aiheuttavan rakeiseen materiaaliin palautuvaan muodonmuutokseen verrattuna suhteellisen pientä palautumatonta muodonmuutosta. Toistojen lisääntyessä ennen jännitys-muodonmuutos syklin stabiloitumista palautumattomia muodonmuutoksia tapahtuu joka kuormituksella. Palautumattomat muodonmuutokset siis kumuloiduvat toistojen lisääntyessä tiettyyn toistomäärään asti. Toistuvan kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset on esitetty kuvassa 2.6.



Kuva 2.6. Toistuvan kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset rakeisessa materiaalissa (Ehrola 1996, s. 171)

Tällainen palautumattoman muodonmuutos syntyy usein esimerkiksi tukemisen jälkeen. Tukemisen seurauksena raideseppeli on löyhempää ja joskus raekooltaan pienempää kuin ennen tukemista. Löyhempi materiaali tiivistyy helpommin rakeiden etsiessä optimaalista paikkaa toistensa joukossa jakaa kuormaa alemmas. Junakuormitusten seurauksena raideseppeli pääsee tiivistymään takaisin kohti optimaalista tiiveyttä. Junakuorman ollessa suurempi kuin rataan ennen vaikuttaneet junakuormat, voi radan maarakennemateriaali tiivistyä käyttäytyen samalla tavoin kuin kuvan 2.6 materiaali.

Radan rakennekerrokseen ja pohjamaahan pysyviä muodonmuutoksia aiheuttavia tekijöitä kuvataan kattavasti ratakantokeskuksen julkaisussa Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. (Kolisoja et al. 1999)

Pysyviä muodonmuutoksia voi syntyä julkaisun mukaan esimerkiksi tukikerroksen hienonemisen seurauksena. Tukikerroksen hienonemisen seurauksena partikkelit hajoavat osiksi ja järjestäytyvät uudelleen aiheuttaen painumaa rataan. Varsinkin penkereen ollessa liian kapea ja sivutuen ollessa näin riittämätön, partikkelit pääsevät liikkumaan radan sivulle aiheuttaen koko ratapenkereen leviämistä ja mahdollisesti radan painumaa. (Kolisoja et al. 1999, s. 125)

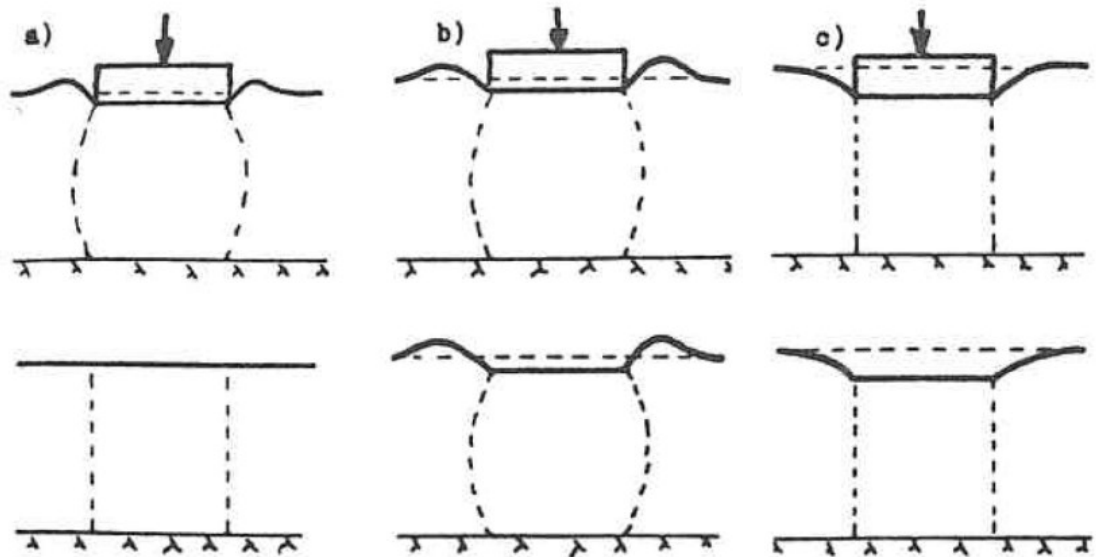
2.3 Pohjamaamateriaalien muodonmuutoskäyttäytyminen

Pohjamaamateriaalit ovat luonnon ja ajan mukaan syntyneitä maamateriaaleja. Pohjamaamateriaalit voivat olla erittäin hyviä tai huonoja kestämaan kuormitusta riippuen missä rata sijaitsee. Tässä tutkimuksessa valitut tutkimuskohteet sijaitsevat pehmeillä, joissa pohjamaamateriaalit ovat suurimmalta osin koheesiomaita, kuten savea.

Maamateriaalin muodonmuutosominaisuudet riippuvat maan rakeisuudesta ja huokoisuudesta. Huokoisempi maa kokoonpuristuu enemmän aiheuttaen painumia. Savien huokoisuus on usein suuri, jolloin ne ovat vähemmän jäykkiä eli painuvat helpommin kasaan, kuin karkearakeiset maat. Tästä syystä rakentamisessa painumaongelmat ovat yleisempiä savikoilla kuin karkearakeisilla mailla. Maamateriaalien muodonmuutosten suuruus ja

nopeus riippuvat lisäksi kerroksen maalajista, konsolidoitumisasteesta, vedenläpäisevyydestä, anisotrooppisuudesta jne. (RIL 1985, s. 366)

Pohjamaan maakerrosten kokoonpuristumisessa voidaan erottaa kolme pääalajia, jotka ovat kimmainen kokoonpuristuminen, plastinen kokoonpuristuminen ja konsolidaation aiheuttama kokoonpuristuminen. (Rantamäki et al. 1979, s.145) Kokoonpuristumisen lajit on esitetty kuvassa 2.7.



Kuva 2.7. Maakerrosten kokoonpuristumisen lajit. a) kimmainen, b) plastinen, c) konsolidaation aiheuttama. (Rantamäki et al. 1979, s.146)

Kimmonen kokoonpuristuminen on palautuvaa muodonmuutosta, kun taas plastinen kokoonpuristuminen ja konsolidaation aiheuttama kokoonpuristuminen ovat palautumattomia muodonmuutoksia.

2.3.1 Palautuvat muodonmuutokset

Junaliikenteen rataan ja pohjamaahan aiheuttamasta kokonaispainumasta suurin osa tapahtuu pohjamaassa ja on ns. alkupainumaa. Maamekaniikassa alkupainumaksi kutsutaan pitkien kuormitusten alussa tapahtuvaa välitöntä painumaa ns. rakennusajan painumaa tai lyhyen ajan painumaa (RIL 1985, s. 371). Liikennekuormitus on kestoltaan niin lyhyttä, että sen seurauksena penkereessä tai pohjamaassa ei tapahdu muita painumatyyppejä, kuten konsolidaatiopainumaa tai sekundääripainumaa. Kuormituksen lyhyen keston vuoksi aiheutunut muodonmuutos palautuu ja kimmainen kokoonpuristuma häviää.

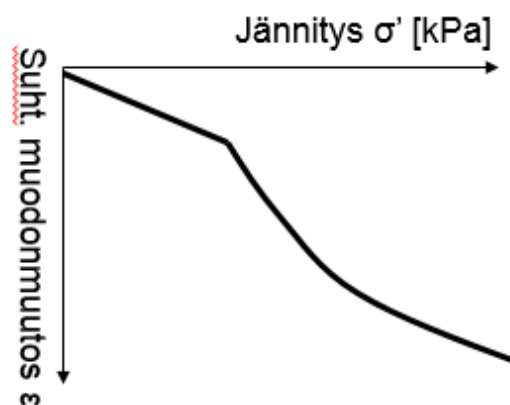
Maamekaniikassa maa jaetaan perinteisesti kahteen muodonmuutostilaan: suljettuun ja avoimeen. Huonosti vettä läpäisevän koheesiomaan voidaan olettaa olevan suljetussa tilassa lyhytaikaisen kuormituksen aikana. Tämän tutkimuksen molempien pehmeikkökohteiden oletetaan käyttäytyvän kuormituksen aikana suljetun tilan mukaisesti.

Suljetussa tilassa tapahtuva alkupainuma ei muuta maan tilavuutta eikä vesipitoisuutta. (RIL 1985, s.371) Suljetulla tilalla tarkoitetaan muodonmuutostilaa, jossa tilavuudessa ei tapahdu muutoksia, vaan tilassa tapahtuvat muodonmuutokset ovat leikkausmuodonmuutoksia eli liukumia. Suljetussa tilassa kuormituksen aiheuttama jännitys siirtyy huokosvedenpaineen ylipaineeksi, koska maan huokosvesi ei pääse poistumaan maakerroksesta kuormituksen aikana (Tavenas & Leroueil 1980).

2.3.2 Palautumattomat muodonmuutokset

Palautumattomia muodonmuutoksia ovat plastiset kokoonpuristumat ja konsolidaation aiheuttamat muodonmuutokset. Plastisia kokoonpuristumisia tapahtuu, jos kuormitus on suuri maan kantokykyyn nähden ja maamassa pääsee helposti laajenemaan sivulle (Rantamäki et al. 1979 s. 145) Plastiset kokoonpuristumat pohjamaassa ovat kuitenkin harvinaisia eikä vanhoilla radoilla edellytyksiä maan laajenemiselle sivusuunnassa yleensä ole.

Koska savien ja muiden koheesiomaiden vedenläpäisevyys on yleensä pieni, niissä tapahtuu konsolidaation aiheuttamia muodonmuutoksia. Konsolidaation aiheuttamissa muodonmuutoksissa maarakeet lähenevät toisiaan maan huokosissa olevan veden ja ilman poistuessa hiljalleen. Kuvassa 2.8 on esitetty tyypillinen saven jännitys-muodonmuutoskuvaaja.



Kuva 2.8 Periaatteellinen kuva saven jännitys-muodonmuutoskäyttäytymisestä (Lehtonen. 2016)

Savimaalle voidaan useissa tapauksissa määrittää myötöpiste. Myötöpisteellä tarkoitetaan jännityksen arvoa, jonka jälkeen tapahtuvat muodonmuutokset ovat huomattavasti suurempia kuin sitä pienemmillä jännityksen arvoilla. Muodonmuutokset tapahtuvat eri nopeudella riippuen maan ominaisuuksista ja ns. konsolidaatiokertoimesta, joka saadaan laboratoriotutkimusten perusteella.

Hienorakeisten maalajien muodonmuutoskäyttäytymisen tärkeitä tekijöitä ovat sen jännitys- ja aikahistoria sekä rakenteen lujittuminen. Vanhoissa radoissa pohjamaan hienorakeiset materiaalit ovat olleet syklisessä kuormituksessa vuosia, jolloin niiden rakenne on

lujittunut. Pohjamaahan on vaikuttanut suuriakin tehokkaita pystyjännityksiä jännityshistoriansa aikana.

Saven konsolidaatiotilalla tarkoitetaan vallitsevan jännityksen suhdetta suurimpaan jännitykseen, joka sitä on historiansa aikana koskaan kuormittanut. Savi on normaalikonsolidoitunut, jos sen vallitseva pystyjännitys on yhtä suuri kuin siihen historiansa aikana kohdistunut suurin jännitys. Ylikonsolidoituneeseen saveen on joskus historiansa aikana vaikuttanut suurempi pystyjännitys kuin tarkasteluhetkellä vallitseva pystyjännitys on. (Lehtonen. 2016)

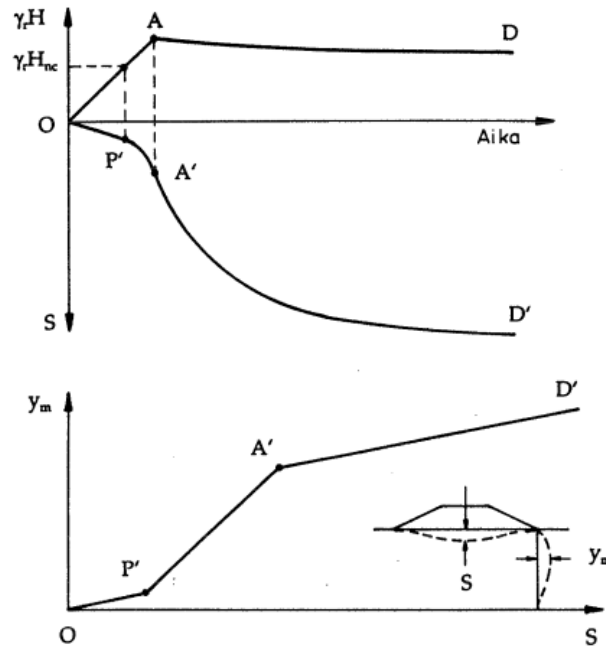
Saven muodonmuutuskäyttäytyminen jaetaan yleensä ylikonsolidoituneen saven ja normaalikonsolidoituneen saven käyttäytymiseen. Kuten myös rakeisten materiaalien teoriassa todettiin maan muodonmuutuskäyttäytyminen ei ole lineaarista. Ylikonsolidoituneella alueella tosin voidaan olettaa riittävällä tarkkuudella, että maan muodonmuutuskäyttäytyminen kuormituksessa olisi lähes lineaarista. Normaalikonsolidoituneella alueella saven muodonmuutuskäyttäytyminen on epälineaarista, lähempänä logaritmisesti laskevaa käyttäytymistä.

Suuret ja korkeat ratapenkereet ovat painavia rakenteita. Painava ratapenger voi aiheuttaa pohjamaassa rakentamisen jälkeen konsolidaatiopainumaa. Konsolidaatiopainumaa tapahtuu lähes koko ratapenkereen olemassa olon ajan. Tässä tutkimuksessa käsiteltävä rataosa on kuitenkin jo vanha, eikä siinä sen vuoksi oletettavasti tapahdu enää merkittävää konsolidaatiopainumaa.

Toistuvat kuormitusyhdöt voivat myös aiheuttaa palautumattomia muodonmuutoksia pohjamaalle, jos ratarakenne on liian ohut jakamaan kuormitusta riittävästi. (Kolisoja et al. 1999, s. 125) Ohuen ratarakenteen takia kuormitus ulottuu pohjamaahan saakka, jolloin toistuvan kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset pohjamaassa tapahtuvat radan maarakennemateriaalien tavoin.

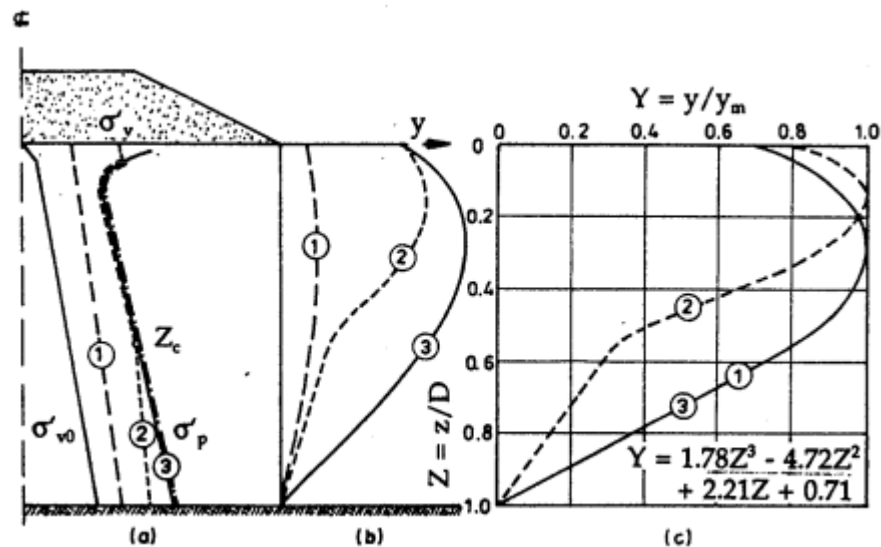
2.3.3 Pohjamaan sivuttaissiirtymä

Pohjamaan sivuttaissiirtymien ja pystysuuntaisen siirtymän välille on empiirisesti löydetty yhteys. Kuvassa 2.9 esitetään sivuttaissiirtymien periaatteellinen kehitys pengerruiskän alla. Kuvassa pengerrysvaiheen sivuttaissiirtymää on kuvattu viivalla $OP'A'$, jossa ylikonsolidaatiovaihetta edustaa viiva OP' ja normaalikonsolidoitunutta suljettua tilaa viiva $P'A'$. (Tielaitos 1994, s. 26)



Kuva 2.9 Sivuttaissiirtymien periaatteellinen kehitys pengerruiskan alla pengerrysvaiheessa (Tielaitos 1994, s. 27)

Sivuttaissiirtymän pystyjakauman arvioimiseksi on kehitetty menetelmä, joka esitetään kuvassa 2.10. Jakauman muoto sekä sivuttaissiirtymän suuruus riippuu maapohjan jännitystilasta. Kuvan tilanne 1 toteutuu kun kokonaisjännitykset syvyysprofiilissa on kauttaaltaan pienempiä kuin konsolidaatiojännitys. Tilanne 2 tapahtuu kun osa kokonaisjännityksistä ylittää konsolidaatiojännityksen eli saavuttaa normaalikonsolidoituneen suljetun tilan. Tilanne 3 toteutuu kun kokonaisjännitykset koko syvyysprofiilissa ovat normaalikonsolidoituneessa suljetussa tilassa. (Tielaitos 1994, s. 26)



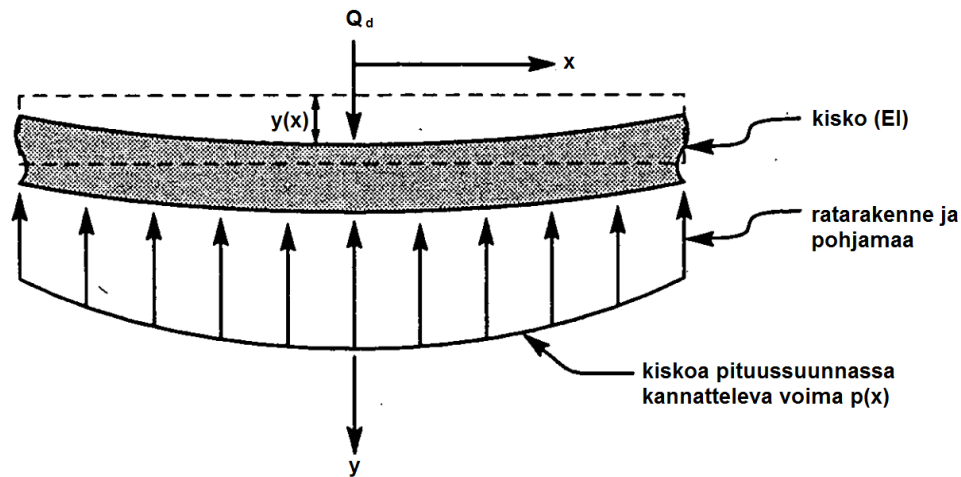
Kuva 2.10 Sivuttaissiirtymien arviointi pengerruiskan alla. a) Syvyysprofiili, b) sivusiirtymä pengerrysvaiheen lopussa, c) sivusiirtymän pystyjakauman empiirinen laskentamenetelmä. (Tielaitos 1994, s. 28)

2.4 Ratarakenteen jäykkyys

Radan kokonaisjäykkyydellä tarkoitetaan kuormituksen ja kuormituksen vaikutuksesta radassa tapahtuvan palautuvan painuman eli jouston suhdetta. Palautuva painuma on pystysuuntaista, joka palautuu kuorman poistuttua eli jännitystilän palautuessa normaalitasolle. Suurin osa palautuvasta painumasta tapahtuu ratarakenteessa ja pohjamaassa, mutta myös radan päällysrakenteen tukikerros ja pohjaimet sekä kiskonkiinnityksen väli- ja aluslevyt joustavat junakuorman alla.

Radan jäykkyyttä eli kimmoisuutta kuvataan rautatiealan kirjallisuudessa ja tutkimuksissa ratamoduulilla, jonka symboli on u (Peltokangas et al. 2013, s. 12). Englanninkielisessä kirjallisuudessa termi on *track modulus*. Ratamoduuli määritetään BOEF-mallin avulla. BOEF-malli (beam on elastic foundation) eli kimmoisalla alustalla oleva palkkimalli kuvaa kiskoja jatkuvana Euler-Bernoullin palkkina kimmoisalla Winklerin alustalla (Mäkelä 2002, s.26). Ratamoduuli määritetään kiskon pystysuuntaista liikettä vastustavaksi voimaksi pituussuuntaista millimetriä kohti, kun kisko taipuu yhden millimetrin (Selig & Waters 1994, s.51; Mäkelä 2002, s.27).

Radan jäykkyyden määrittely sekä sen määrittäminen on esitetty kattavasti Liikenneviraston julkaisussa Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen. (Peltokangas et al. 2013) Julkaisussa esitetään myös jatkuva jäykkyyden mittaustaite Stiffmasterin prototyyppi ja teoria. Tässä kappaleessa on kerrottu radan jäykkyydestä lyhyesti tähän tutkimukseen tarvittavin osin.



Kuva 2.11 Winklerin alustan periaattellinen kuva radan jäykkyyden tutkimuksissa (Mäkelä 2002, s.27)

Winklerin alustaa kuvataan rata-aiheisessa kirjallisuudessa yhtälöllä

$$u = -\frac{p(x)}{y(x)}, \quad (2)$$

missä

u	= ratamoduuli
$p(x)$	= kiskoa kannatteleva viivakuorma kohdassa x
x	= kiskon suuntainen pituuskoordinaatti
$y(x)$	= kiskon pystysuuntainen taipuma kohdassa x

Junan pyöräkuorman ja sen aiheuttaman kiskon pystysuuntaisen siirtymän eli taipuman suhdetta kutsutaan radan pystysuuntaiseksi jäykkyydeksi. Jäykkyyden voi laskea yhtälöllä

$$K = \frac{Q}{y_{max}}, \quad (3)$$

missä

K	= radan jäykkyys
Q	= pyöräkuorma
y_{max}	= kiskon suurin taipuma suoraan pyöräkuorman alla

Radan jäykkyys eroaa ratamoduulista siten, että se ottaa huomioon kiskon taivutusjäykkyyden kiskon alapuolisen rakenteen lisäksi. Ratamoduuli ottaa huomioon vain päällysrakenteen, alusrakenteen ja pohjamaan. (Mäkelä 2002, s.38; Peltokangas et al. 2013)

BOEF-mallilla voi mallintaa myös useamman akselikuorman yhteisvaikutuksesta syntyvän taipuman ja sitä kautta laskea ratamoduulin ja radan jäykkyyden arvot. BOEF-mallin avulla voidaan laskea myös ratapölkyn ja tukikerroksen välistä jännitystä ja raidealustaluvun. Näissä käytetään ns. fiktiivisen pölkyn teoriaa. (Peltokangas et al. 2013, s. 56-58)

Radan jäykkyyttä määritetään taipumamuotoon perustuvilla testeillä, yksittäisen pisteen tai akselin kuormitustestillä sekä moniakselikuormitustesteillä. Taipumamuotoon perustuvat testit vaativat taipuma- eli kiskon pystysiirtymämittaukset koko taipumasuppilon pituudelta. Menetelmän etu on soveltuvuus muihin jäykkyyden määrittämissä ja se, että menetelmä huomioi radasta yhtä pistettä laajemman osuuden. (Peltokangas et al. 2013, s. 60)

Yksittäisen pisteen kuormitustesti on helpoin radan jäykkyyden määrittämisen testi. Siinä rataa kuormitetaan yhdestä pisteestä, josta mitataan kuormituksen aiheuttama kiskon suurin pystysiirtymä. Peltokangas käyttää tutkimuksessaan yksittäisen pisteen kuormitustestiä tutkiessaan Suomen rataverkon pehmeikköjen ratamoduulia. Peltokankaan tutkimuksen koemittauksissa käytettiin radalla liikennöivää kalustoa, joten kuormitusta ei voitu valita mittauksissa. Jäykkyyden laskennassa päädyttiin käyttämään kaavasta 3 muunneltua kaavaa

$$K_{rp} = \frac{(0,5 * G_{akseli} * 1,1)}{y_{rp}}, \quad (4)$$

missä

K_{rp} = yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys

G_{akseli} = mitattu staattinen akselipaino

y_{rp} = ratapölkyn pään palautuva painuma (Peltokangas et al. 2013, s. 168)

Yhtälössä kerrotaan akselikuorma luvulla 0,5, koska akselikuormasta vain puolet kohdistuu ratapölkyn toiseen päähän. Kerroin 1,1 on dynaaminen voimakerroin, jolla kuvataan junaliikenteen aiheuttamia dynaamisia voiman lisäyksiä staattiseen kuormitukseen. (Peltokangas et al. 2013, s. 168)

Moniakselikuormitustesti on laajempi yksittäisen pisteen kuormitustesti. Monikuormitustestissä käytetään kahden tai kolmen akselin aiheuttamaa taipumasuppiloa. Moniakselikuormitustestillä on huomattavasti monimutkaisempaa määrittää radan jäykkyyttä kuin yksittäisen pisteen kuormitustestillä. (Peltokangas et al. 2013, s. 64)

TTY:llä kehitetty jatkuva jäykkyyden mittauslaitteisto perustuu radan taipuman mittamiseen. Stiffmaster-mittauslaitteisto mittaa mittakantamittauksen avulla junan akselin aiheuttaman radan taipuman sekä radan kuormittamattoman geometrian taipumasuppilon ulkopuolelta. Mittaus perustuu kulman muutokseen raskaan junan akselin viereisen pyörän ja kauempana taipumasuppilon ulkopuolella olevan pyörän akseleiden suhteen. Varsinainen mittaus tehdään siirtymäantureilla, jotka ovat kiinni mittauslaitteen rungossa. Mittaustulokset täytyy sitoa samaan paikkaan ennen siirtymäantureiden mittaustulosten erotuksen laskemista. (Peltokangas et al. 2013, s. 112-116)

2.5 Ratarakenteen stabiliteetti

Ratapenkereen stabiliteetilla tarkoitetaan sen kykyä kestää siihen aiheutuvia staattisia ja dynaamisia junakuormia sekä ympäristövaikutuksia sortumatta. Radan stabiliteetilla täytyy olla riittävä laskennallinen varmuus, jotta liikenne radalla on sallittua. Stabiliteettiin vaikuttaa ratarakenteen ja pohjamaan ominaisuudet, junaliikenteestä aiheutuvat kuormat sekä pohjaveden pinnan korkeus.

Olemassa olevan radan rakenteet suunnitellaan kestäväksi SFS-EN15528:n mukaiset junakuormat. Kuormat on esitetty kappaleessa 3.2. Tavanomaisille vanhoille ratapenkeille lasketun kokonaisvarmuusluvun täytyy olla yli 1,5. Siirtymille herkille rakenteille kokonaisvarmuusluvun täytyy olla yli 1,8. Siirtymille herkillä rakenteilla tarkoitetaan tilannetta, että ratapenkereen läheisyydessä on paalutettuja tai muuten siirtymille herkkiä rakenteita. (Liikennevirasto 2014, s. 16) Tämän tutkimuksen ratapenkerreit ovat tavanomaisia vanhoja ratapenkereitä.

Jos olemassa olevan tavanomaisen ratapenkereen kokonaisvarmuusluku on alle 1,5 täytyy radalle tehdä stabiliteettia parantavia toimenpiteitä. Kuitenkin jos kokonaisvarmuusluku on 1,3...1,5, stabiliteetin parantamisen sijasta voidaan radalle asettaa seurantamittaus. Kokonaisvarmuus ei missään tilanteessa saa alittaa arvoa 1,3. (Liikennevirasto 2014, s. 17)

2.5.1 Stabiliteettiin vaikuttavat tekijät

Suomessa yleisin ja eniten tarkasteltu stabiliteetin menettämistapa on pohjamaan murtuminen. Pohjamaan murtuminen tapahtuu maassa vaikuttavien jännitysten ylittäessä maan leikkauslujuuden. Maan leikkauslujuus on tärkein osa stabiliteettia. Koheesiomailla leikkauslujuudet ovat usein todella pieniä verrattuna kitkamaihin. Tässä tutkimuksessa keskitytään savimaiden stabiliteettiin ja niihin vaikuttaviin tekijöihin.

Saven vedenläpäisevyys on tunnetusti heikko. Jos savea kuormitetaan suljetussa tilassa, huokosvedenpaine kasvaa. Normaalikonsolidoituneessa maassa leikkausjännityksestä johtuva tavallista korkeampi huokosvedenpaine voi heikentää maan leikkauslujuutta ja siten maan stabiliteettia, maan alkaessa myötöpehmenemään.

Huokosvedenpaine pohjamaassa siis kasvaa junan kuormittaessa ratarakennetta. Huokosvedenpaineen kasvua tapahtuu suoraan penkereen alla, mutta myös penkereen sivuilla. Penkereen alla ja sivuilla tapahtuva huokosvedenpaineen kasvu tapahtuu eri tahdissa ajan funktiona. Tämä voi aiheuttaa stabiliteetin heikkenemistä myös tuntien kuluttua kuorman lisäämisestä. (Ratahallintokeskus 2006, s. 14)

Myös dynaaminen kuormitus vaikuttaa savimaiden leikkauslujuuteen ja sitä kautta sen muodonmuutoksiin ja pohjamaan stabiliteettiin. Hyvin nopeita kuormitustilanteen muutoksia vastaan maan lujuus on suurempi, kuin hitaasti muuttuvassa kuormitustilanteessa. Tämä vaikutus kuitenkin pätee vain yksittäisillä kuormituspulsseilla. Toistuvilla pulsseilla eli syklisessä kuormituksessa maan muokkautuminen voi vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan ja jopa laskea leikkauslujuutta. Kuormitusnopeuden vaikutus korostuu suuremman plastisuuden omaavilla normaalikonsolidoituneilla materiaaleilla kuin jäykemmällä ylikonsolidoituneilla materiaaleilla. (Ratahallintokeskus 2006, s.78)

Ajan kuluessa savimaiden leikkauslujuus ratapenkereiden alla kasvaa lujittumisen seurauksena. Lujittuminen johtuu penkereen painon ja liikennekuorman aikaansaamista jännityksistä savimaahan.

2.5.2 Stabiliateetilaskenta

Stabiliateetilaskenta on vakiintunut kahteen menetelmätyyppiin: lamellimenetelmät (LEM, Limit Equilibrium Method) ja elementtimenetelmää käyttävä FEM-laskenta (Finite Element Method). FEM-laskentaan tullaan keskittymään Kouvola-Kotka radan tutkimukseen liittyvässä toisessa työssä.

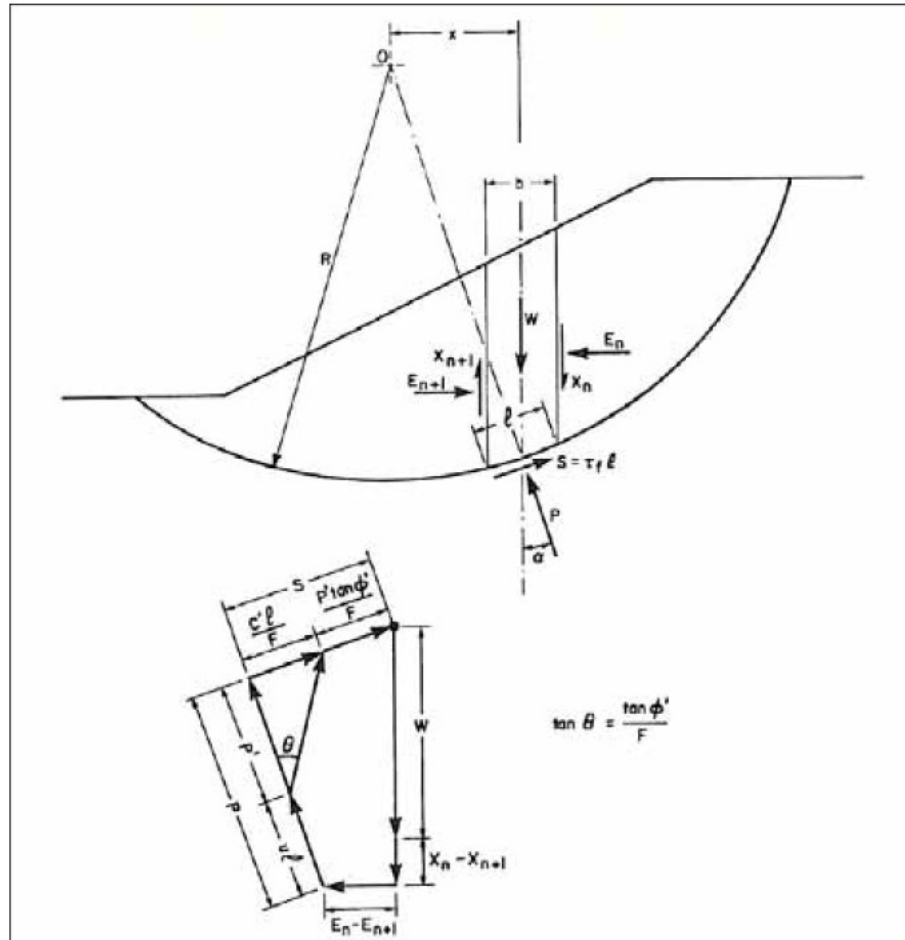
Penkereen stabiliateetti lasketaan joko kontinuumimekaniikkaan tai koko rakenteen tasapainon rajatilaan perustuen (Ratahallintokeskus 2006, s.12). Kontinuumilaskenta perustuu FEM-laskentaan ja koko rakenteen tasapainon rajatila liukupinta-analyysiin. Liukupinta-analyysi tehdään yleensä lamellimenetelmällä. Lamellimenetelmässä laskenta voidaan tehdä käyttäen joko suljetun tilan lujuuksia s_u tai tehokasta lujuuksia τ . Suljetun tilan lujuuksia käytettäessä puhutaan yleisesti kokonaisjännityksillä laskemisesta. Tehokasta lujuuksia käytettäessä puhutaan tehokkailla jännityksillä laskemisesta.

Lamellimenetelmät ovat stabiliateetilaskennan yleisimmin käytetty laskentamenetelmä. Lamellimenetelmää voi käyttää kaksiulotteisesti, jolloin liukupinnan rajaama alue jaetaan pystysuoriin lamelleihin tai kolmiulotteisesti, jossa liukukappale jaetaan kolmiulotteisiin kiiloihin tai pylväisiin (Lehtonen 2010, s.11). Lamellimenetelmien laskenta perustuu yksittäisten lamellien voima- ja/tai momenttitasapainoon. Näiden avulla lasketaan liukupinnalle mobilisoituva leikkausjännitys ja normaalivoimasta riippuva leikkauslujuus. Vain joko voima- tai momenttitasapainoa käyttävää menetelmää kutsutaan yksinkertaistetuksi menetelmäksi (simplified) ja molempia käyttäviä menetelmiä kutsutaan yleisiksi menetelmiksi (generalised/rigorous) (Lehtonen 2010, s.11).

Liukupintamenetelmässä määritetään koko liukuvalla kappaleelle yhteinen varmuuskerroin F . Varmuuskerroin on käänteisarvo koko liukuvan massan tasapainon saavuttamiseksi tarvittavasta osuudesta maan leikkauslujuudesta (Ratahallintokeskus 2006, s.12). Varmuuskerroin on yksinkertaisinta ilmaista liikettä vastustavien ja liikettä aiheuttavien voimien tai momenttien suhteena.

Liikettä aiheuttavat voimat ja momentit syntyvät maahan mobilisoituneiden leikkausjännitysten johdosta ja vastustavat voimat ja momentit riippuvat maan leikkauslujuudesta. Lamellimenetelmissä oletetaan, että maa on jännitys-muodonmuutosominaisuuksiltaan samanlainen koko liukupinnan matkalla.

Tässä työssä tehdyissä Geocalc laskelmissa käytetty lamellimenetelmä on Bishopin yksinkertaistettu menetelmä. Bishopin menetelmä perustuu momenttitasapainoon liukupinnan keskipisteen suhteen. Kuvassa 2.12 on esitetty Bishopin lamellimenetelmän periaate.



Kuva 2.12. Bishop lamellimenetelmä (Tavenas et al. 1980)

Kuvan mukaisesti liukupinnalla vallitsevan lujuuden määrittämiseksi on tiedettävä tehokas normaalijännitys σ'_n , johon vaikuttaa vallitseva huokosvedenpaine u . Keskeinen osa tehokkaiden jännitysten menetelmään kohdistuneesta keskustelusta liittyy huokospaineen suuruuteen. (Ratahallintokeskus 2006, s.13)

Tehokkailla jännityksillä laskettaessa maan lujuuden määrittää vallitseva tehokas normaalijännitys ja maan tehokas sisäinen kitkakulma. Maan tehokas leikkauslujuus voidaan laskea Mohr-Coulombin kaavalla

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \cdot \tan \phi' = c' + (\sigma_n - u) \cdot \tan \phi', \quad (5)$$

missä

- τ_f = maan leikkauslujuus
- c' = maan tehokas koheesio
- σ'_n = vallitseva tehokas normaalijännitys
- ϕ' = maan tehokas sisäinen kitkakulma
- σ_n = vallitseva liukupinnan normaalin suuntainen kokonaisjännitys
- u = vallitseva huokosvedenpaine (Lehtonen 2010, s.14)

Maan leikkauslujuus muuttuu vallitsevan tehokkaan normaalijännityksen funktiona. Tehokkaaseen normaalijännitykseen vaikuttaa maassa vallitseva huokosvedenpaine. Kuten kaava 7 esittää huokosvedenpaineen noustessa tehokas normaalijännitys pienenee.

Tässä tutkimuksessa laskennat tehdään kokonaisjännitysten menetelmällä, koska sitä sovelletaan usein laskettaessa suljetun tilan stabiliteettia lyhytaikaisessa kuormituksessa. Tässä menetelmässä lujuus määritetään Mohr-Coulombin murtoehdon mukaan, mutta kaavan kitkakulmatermi merkitään nollassa ja koheesion paikalla käytetään suljettua leikkauslujuutta (Lehtonen 2010, s.14). Maakerroksille määritetään leikkauslujuuden arvo, jota käytetään laskennassa. Lujuus ei riipu laskennallisesta jännityksestä tai huokosvedenpaineesta.

Kokonaisvarmuus lasketaan kokonaisjännityksiä käyttäessä kuvan 2.11 mukaisesti kaavalla

$$F = \frac{R \sum \tau_f l}{\sum W x}, \quad (6)$$

missä

R = liukupinnan säde

τ_f = leikkauslujuus

l = lamellin pohjan leveys

W = lamellin paino

x = sivusuuntainen etäisyys liukupinnan keskipisteestä. (Tavenas et al. 1980; Lehtonen 2010, s.15)

Laskennassa suljettu leikkauslujuus vastaa murtotilan lujuutta murtotilan huokospaineessa. Suljettua leikkauslujuutta käyttäessä stabiliteetilaskennassa saadaan pienempiä kokonaisvarmuuden arvoja kuin tehokkailla jännityksillä laskettaessa (Ratahallintokeskus 2006, s.24).

Stabiliteetilaskennassa tarvittava suljettu leikkauslujuus tulkitaan CPTU-kairauskokeiden sekä siipikairauksien perusteella. Tulkinnassa oletetaan, että penkereen alapuolinen maa on normaalikonsolidoitunut. Kärkivastuksen kärkikerroin määritetään vastaamaan penkereen ulkopuolista redusoitua siipikairauksella määritettyä suljettua leikkauslujuutta, joka on laitettu vastaamaan normaalikonsolidoitunutta maata. Kärkikerroin täten huomioi siipikairan redusoinnin kautta nopeusvaikutuksen ja anisotropian. (Selänpää. 1.11.2017) Suljettu leikkauslujuus lasketaan kaavalla

$$s_u = \frac{q_T \sigma_0}{N_k} * \left(\frac{OCR}{1,3} \right)^{-0,2}, \quad (7)$$

missä

s_u = suljettu leikkauslujuus

q_T	= korjattu kärkivastus
σ_0	= tehokas pystyjännitys maassa
N_k	= kärkikerroin
OCR	= ylikonsolidoitumisaste. (Larsson & Åhnberg 2003)

Ylikonsolidoitumisasteen selvittämiseen käytetään ödometrikoetta. Pengerkuormituksen jakautumista pohjamaahan arvioidaan Boussinesqin jännitys jakaumateorialla. Boussinesqin teoriassa kuorma vaikuttaa puoliavaruuden pinnalla sitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Teoria perustuu olettamukseen, että maapohja on homogeeninen, isotrooppinen, jatkuva ja lineaarisesti kimmoinen puoliavaruus. (RIL 1985, s.314-320) Teorialla selvitetään maan tehokas pystyjännitys eri kerroksissa.

2.6 Radan kuormituskestävyys

Radan kuormituskestävyydestä ei ole vielä tarkkaa määritelmää. Kuormituskestävyyttä on tutkittu Tampereen teknillisessä yliopistossa ja siihen liittyen on tehty Elina Malassun diplomityö Esiselvitys radan kuormituskestävyyksimitoituksen kehittämisestä sekä Liikenneviraston julkaisu Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys. (Kalliainen et al. 2014; Malassu 2016)

Liikenneviraston julkaisun mukaan kuormituskestävyys on ratakokonaisuuden kykyä ottaa vastaan liikkuvasta kalustosta ja ympäristötekijöistä aiheutuvia kuormituksia. Malassun mukaan kuormituskestävyydellä tarkoitetaan ratarakenteen kykyä vastustaa liikenne- ja ympäristökuormitusten yhteisvaikutuksesta johtuvia pysyviä ratageometrian muutoksia. Radan kuormituskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä on ainakin ratarakenne, pohjamaa, ympäristöolosuhteet sekä kuormitushistoria.

Rataan kohdistuva kuormitus syntyy liikennekuormituksesta, ympäristökuormituksesta sekä niiden yhteisvaikutuksesta. Suomessa ratoja ei vielä mitoiteta kuormituskestävyyttä ajatellen, vaan radan rakennekerrosmitoitus perustuu routamitoitukseen, stabiileetin vaatimukseen ja painumien raja-arvoihin. Suomen kylmien talvien ansiosta routamitoituksesta saadut kerrospaksuudet ovat riittäneet hyvin myös radan kuormituskestävyyttä ajatellen. (Luomala et al. 2015, s. 9) Kuitenkin akselipainoja nostettaessa voi radan kuormituskestävyys jäädä liian pieneksi. Joissain kohteissa rakenteet voivat olla jopa niin ohuet, että radan kuormansietokyky määräytyy pohjamaan ominaisuuksien mukaan (Luomala et al. 2015, s. 9).

Heikko radan kuormituskestävyys ilmenee pysyvinä muodonmuutoksina, joita syntyy alusrakenteeseen ja pohjamaahan. Alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset ilmenevät korkeusviivan laskuna, jota syntyy alusrakennemateriaalin pyrkiessä pois kuorman alta liikkuen samalla penkereen sivuille. Ilmiö tapahtuu hitaasti, mutta se tunnistetaan useilla rataosilla lähes pystysuorina ja löyhtyneinä luiskina. Ilmiö hidastuu penkereen leventy-

essä tarpeeksi, sillä partikkeleiden liikettä vastustava sivusuuntainen tuki lisääntyy penkereen leventyessä, jonka seurauksena saavutetaan eräänlainen tasapainotilanne. (Luomala. 2017)

Kuormituskestävyyden avulla voidaan päätellä, onko rata altis ratageometrian epätasaiselle tai nopealle heikkenemiselle. Radan huono kuormituskestävyys viittaa ratageometrian nopeampaan heikkenemiseen. Ratageometria voi tavallista suuremmilla liikennekuormilla heikentyä nopeasti, jos radan kuormituskestävyys ei ole riittävä.

3. JUNALIIKENTEN VAIKUTUS RATAAN

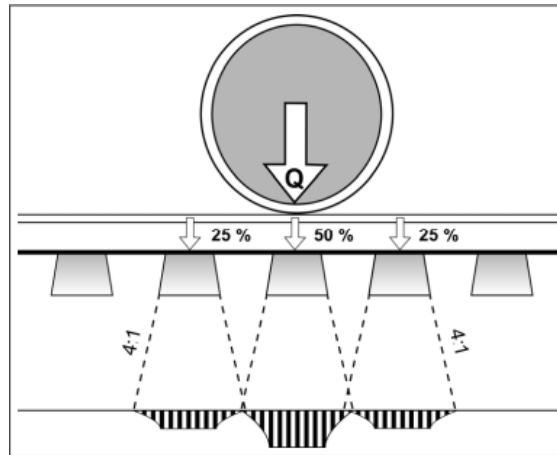
Junaliikenne aiheuttaa rataa kvasistaattista ja dynaamista kuormitusta. Kvasistaattista kuormaa on junan pyörien aiheuttama staattinen kuormitus rataa, junaan kohdistuva tuuli-kuorma ja kompensoimaton pyöräkuorman lisäys kaarteissa. (Esveld 2001, s. 57) Dynaamista kuormitusta on kaluston aiheuttamat jousivoimat ja iskut rataa. Dynaamiseen kuormitukseen vaikuttavat junan nopeus, junan osien ominaisuudet, radan rakenneosien ominaisuudet sekä ratageometria.

Tässä luvussa käsitellään junakuormien jakautuminen radassa, ratojen mitoittamisessa käytettävät kuormitukset, suomalaisen ja venäläisen kaluston kuormituserot sekä junaliikenteen vaikutus rataympäristöön.

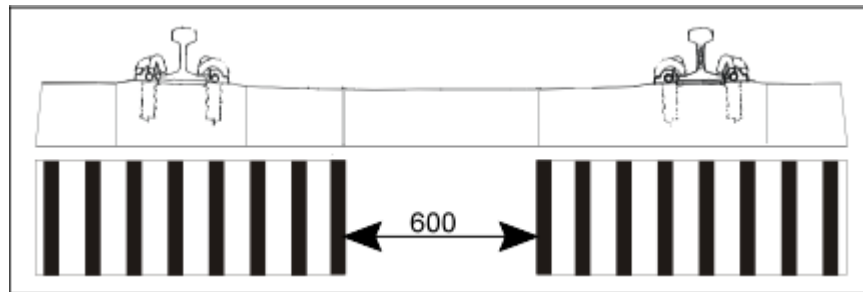
3.1 Kuormien jakautuminen

Junakuormia kuvataan akselipainolla, telipainolla ja metripainolla. Akselipainolla tarkoitetaan pyöräkerran raiteeseen kohdistavaa staattista painoa. Telipaino on telin pyöräkertojen raiteeseen kohdistama yhteinen staattinen paino. Metripaino on vaunun tai veturin staattinen paino jaettuna sen pituudella puskimesta puskimeen. (Ratahallintokeskus 1995, s.4)

Junien aiheuttama pystysuuntainen kuorma siirtyy akselilta pyörien ja kiskojen kautta ratapölkkyihin, joiden tehtävä on jakaa kuorma ratapenkereeseen. Pystysuoran kuorman otaksutaan usein jakautuvan ratapenkereeseen ratapölkkyjen kautta kuvan 3.1 mukaisesti. Ratapölkystä kuorman otaksutaan välittyvän tukikerrokseen pölkyn molemmista päistä, noin reilun kolmasosan alueelta, kuten kuvassa 3.2 esitetään. Pölkky ei saisi välittää kuormaa keskiosallaan. Pölkystä eteenpäin kuorman otaksutaan jakaantuvan tukikerroksessa 4:1 kaltevuudessa ja muissa maakerroksissa 2:1 kaltevuudessa (Liikennevirasto 2014, s.30).

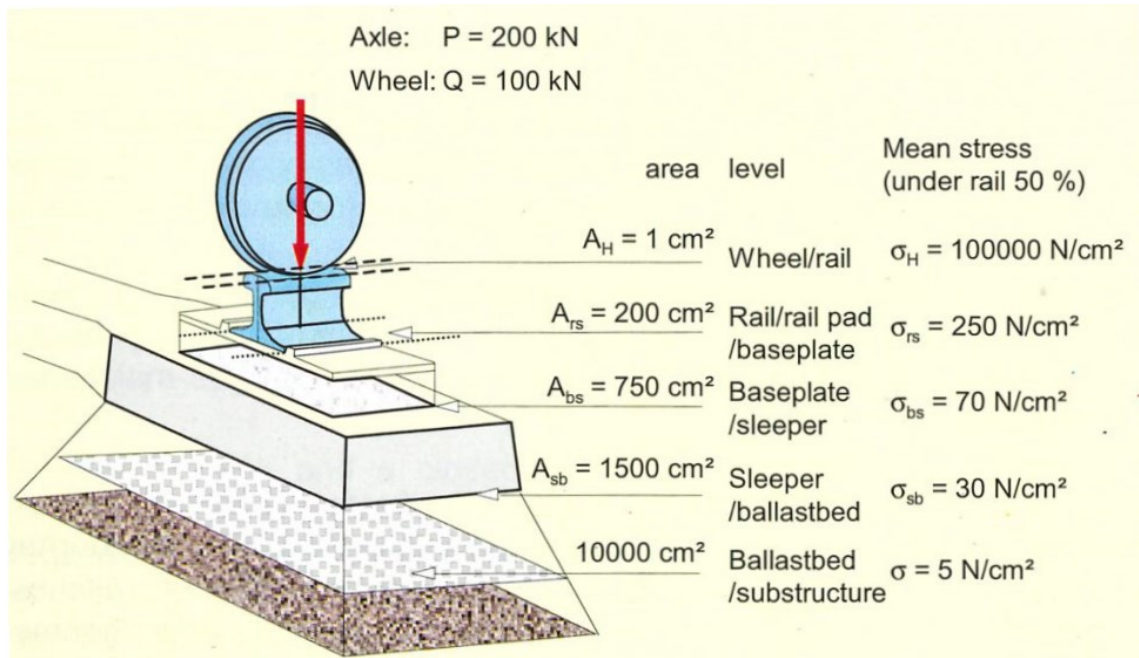


Kuva 3.1. Pystysuoran akselikuorman jakautuminen ratapölkkyjen kautta penkereeseen. (Liikennevirasto 2014, s.30)



Kuva 3.2. Kuormituksen jakautuminen ratapölkkyllä. (Ratahallintokeskus 2002, s. 20)

Kuormitus jakautuu radan jokaisessa rakenneosassa ja kerroksessa suuremmalle alueelle, jolloin jännitys pienenee ratarakenteessa alaspäin mentäessä. Esveld on esittänyt kuormien välittymisen pyörältä pohjamaahan kuvan 3.3 mukaisesti. (Esveld 2001, s. 14) Radan kerroksien pitäisi jakaa kuormat periaatteessa siten, että pohjamaahan kohdistuu vain murto-osa kiskoon kohdistuvasta jännityksestä.

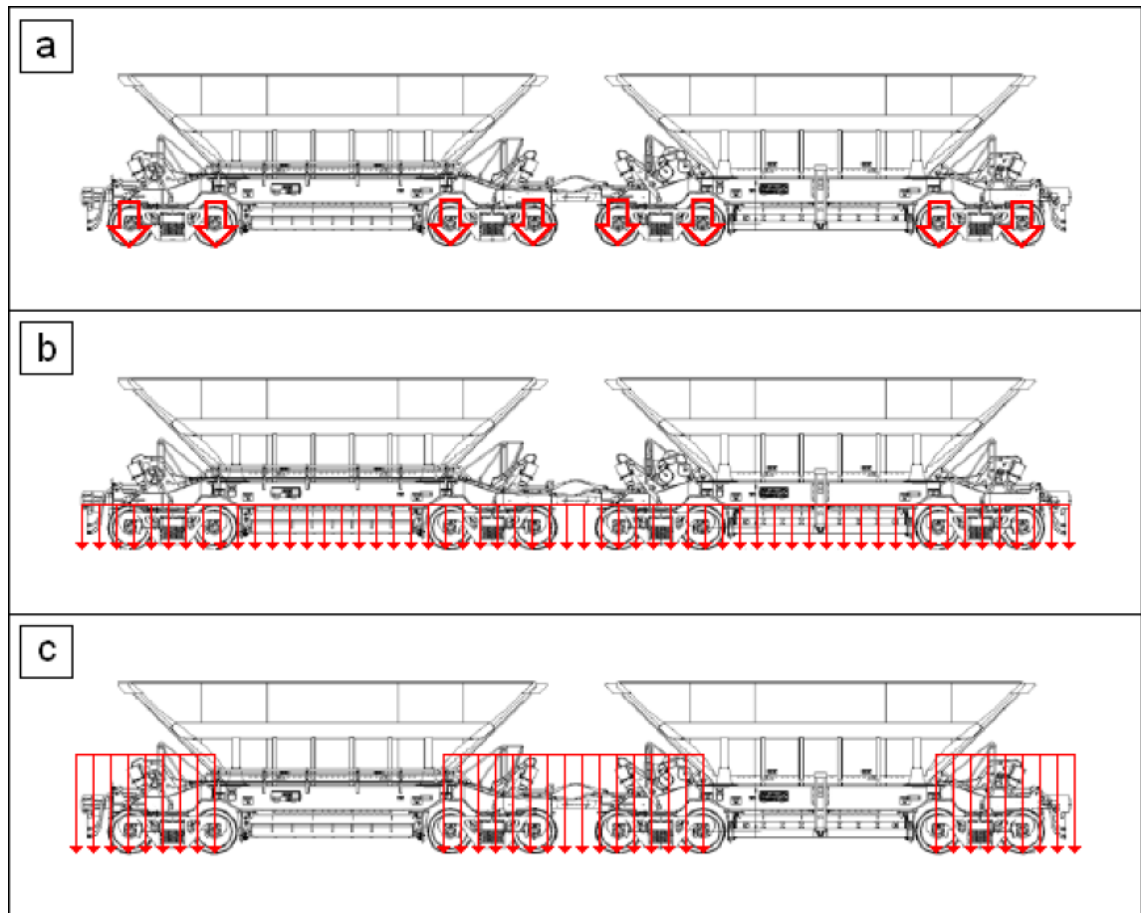


Kuva 3.3 Periaatteellinen kuva pyöräkuorman välittymisestä radan rakennekerroksiin. (Esveld 2001, s. 14)

Kuten aikaisemmin todettiin, staattinen kuorma välittyy rataan pyörien kautta. Rataan kohdistuva kuormitus on akselin kohdalla akselipainon verran. Juna tekee siis hetkellisesti radan yhteen kohtaan huomattavasti metripainoa suurempaa kuormitusta. Mitoituksessa käytettävä nauhakuorma ei siis vastaa todellista kuormitusjakautumaa yksittäiseen radan komponenttiin, mutta pohjamaan suhteen se kuvaa hyvin liikkuvan junan aiheuttamaa kuormitusta. Pysähtynyt juna taas aiheuttaa telien kohdalla suurempaa kuormitusta pohjamaahan kuin metripaino.

Todellisuudessa rataan kohdistuva kuormitus riippuu akselien sijainnista toisiinsa nähden. Lähempänä toisiaan olevat akselit aiheuttavat yhdessä rataan suurempaa kuormitusta kuin kaukana toisistaan olevat akselit. Tästä syystä metripaino ei ole lopulta kovin hyvä suure kuvaamaan junan kuormituksen jakautumista ja todellista vaikutusta rataan, aina-kaan pysäytetyn junan osalta.

Vaunujen akselipainojen, pituuksien ja akselien sijainnin vaikutusta voidaan vertailla Korkeamäen ja Nurmikolun esittämän teliparin metripainon avulla. Teliparin aiheuttama metripaino lasketaan kahden peräkkäisen telipainon summan suhteena teliparin kauimmaisten akselien väliseen etäisyyteen (Korkeamäki & Nurmikolu 2009, s.42).



Kuva 3.4. a) Akselipaino, b) metripaino ja c) teliparin aiheuttama metripaino. (Korkeamäki & Nurmikolu 2009, s.42)

Kuvasta 3.4 huomataan, kuinka teliparin metripaino on metriä kohden suurempi kuin koko vaunun metripaino. Teliparin metripaino kasvaa, mitä lähempänä telit ovat toisiaan. Kouvola-Kotka rataosalla kulkevissa venäläisissä vaunuissa kahden eri vaunun vierekkäiset telit ovat lähempänä toisiaan kuin suomalaisissa vaunuissa. Täten venäläisten vaunujen teliparin metripaino on suurempi kuin suomalaisten vaunujen, vaikka molempien vaunujen akselipaino olisi sama.

3.2 Mitoituskuormat

Radan rajoittavana kuormituksena käytetään akselipainoa sekä metripainoa. Suomen rataverkon suurin sallittu akselipaino on 250 kN. Suuressa osassa rataverkkoa sallittu akselipaino on kuitenkin vain 225 kN. Suomen suurin sallittu metripaino rataverkolla on 88 kN/m. Metripainoa käytetään ratojen luokittelussa. Rataa mitoittaessa Suomessa käytetään nauhakuormaa ja referenssivaunuja yhdistäviä kuormakaavioita. (Liikennevirasto 2014, s.23)

Radan alus- ja pohjarakenteiden sekä maanvaraisen perustamisen mitoituksessa käytetään pystysuoran junakuorman ominaisarvoa. Ominaisarvo saadaan kertomalla kuormakaavion perusteella määräytyvät nauha- ja akselikuormat sysäskertoimella. Kuitenkin maanvaraisen penkereen stabiliteetin osalta mitoittava tilanne on pysähtynyt juna, jolloin sysäskertoimen arvo on 1,0. Kuormakaavion perustella määräytyvät nauha- ja akselikuormat vastaavat paikallaan olevan junan staattista kuormaa. Junakuorman laskenta-arvo on ominaisarvo kerrottuna yhdistelykertoimella ja junakuorman osavarmuusluvulla. (Liikennevirasto 2014, s.23)

Uusilla radoilla käytetään geoteknisessä mitoituksessa SFS-EN1991-2 mukaista kuormakaaviota LM71. Kuormakaavio muodostuu nauhakuormasta sekä neljästä 1,6 m etäisyydellä toisistaan sijaitsevasta akselikuormasta. Kuormakaavion LM71 2D-stabiliteettilaskennassa käytettävät arvot on esitetty taulukossa 3.1. (Liikennevirasto 2014, s.25)

Taulukko 3.1 Kuormakaavion LM71 2D-stabiliteettilaskennassa käytettävät arvot (muokattu lähteestä (Liikennevirasto 2014, s.26)

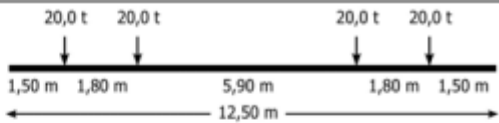
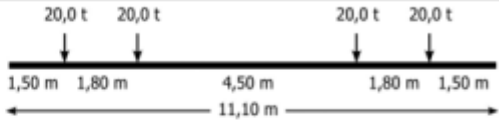
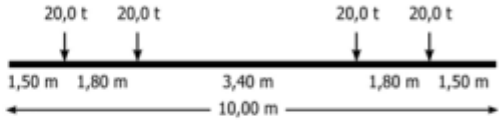
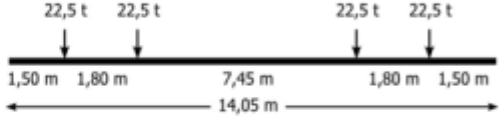
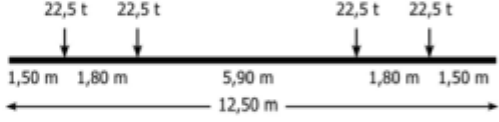
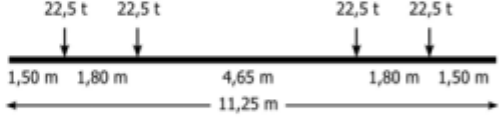
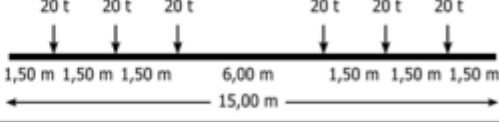
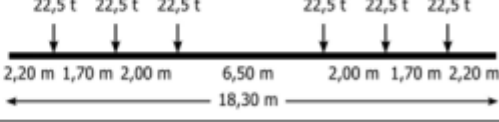
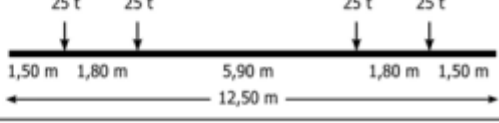
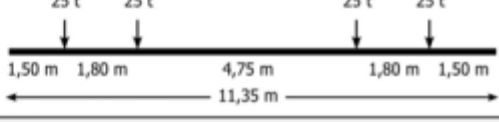
Kaluston sallittu akselipaino [kN]	Mitoituskuorma kaavion tunnus	2D-stabiliteettilaskennassa käytettävä nauhakuorma, qstab [kN/m]
170	LM71-17	110
225	LM71-22.5	137
250	LM71-25	149
300	LM71-30	163
350	LM71-35	195

Vanhoilla radoilla geoteknisessä suunnittelussa käytetään YTE-rataluokkia. YTE-rataluokka ja sitä seuraava kuormakaavio esitetään suunnitteluperusteissa. Jos suunnitteluperusteissa ei ole esitetty YTE-rataluokkaa ja kuormakaaviota, käytetään voimassa olevan rataverkon kuvauksen mukaista YTE-rataluokkaa. (Liikennevirasto 2014, s.23)

YTE-rataluokka määrää käytettävän akselipainon ja kuormituskaavion sekä nopeuden. Stabiliteetin, painumien ja maanpainerakenteiden mitoituksessa mitoittavana on yleensä raskain tavaravaunu tai veturi. Junaliikenteen aiheuttaman värähtelyn tarkasteluissa mitoittava on suurin sallittu nopeus. (Liikennevirasto 2014, s.23)

Vanhojen ratojen luokittelussa on siirrytty standardin EN 15528:2008 mukaiseen luokitteluun. Standardi huomioi akselikuorman ja vaunun pituuden lisäksi akselien paikat vauunuissa. Standardissa akselikuormarajat riippuvat akselien sijainnista siten, että kaukana toisistaan sijaitsevilla akseleilla saa olla suurempi akselikuorma kuin lähellä toisiaan sijaitsevilla akseleilla. Metripaino riippuu täten akseleiden sijoittelusta. Vanhojen ratojen mitoituksen kuormakaaviot ovat SFS-EN15528 mukaiset. Kuormakaaviot on esitetty taulukossa 3.2.

Taulukko 3.2 SFS-EN15528 mukaiset kuormakaaviot (Liikennevirasto 2014, s.27)

Referenssi vaunu	Akselikuorma P (t)	Metripaino p (t/m)	Mitat
C2	20	6,4	
C3	20	7,2	
C4	20	8,0	
D2	22,5	6,4	
D3	22,5	7,2	
D4	22,5	8,0	
xL-a	20	8,0	
xL-b	22,5	7,4	
E4	25	8,0	
E5	25	8,8	

Taulukon kuormakaavioita ryhmitellään laskennassa referenssivaunujen sijoittelun avulla. Junan EN-rataluokka on sama kuin referenssivaunu, poikkeuksena xL-a ja xL-b referenssivaunut, jotka kuuluvat rataluokan D4xL juniin yhdessä D4 vaunujen kanssa. EN-rataluokat E4 ja E5 pätevät vain tavaravaunuille. Näiden kuormakaavioiden käyttö edellyttää 3D-tarkastelua. Tässä tutkimuksessa tarkastelu tehdään vain 2D-stabiiliteettiohjelmalla, jolloin laskennassa käytetään alla olevan taulukon 3.3 esittämiä nauhakuormien arvoja.

Taulukko 3.3 SFS-EN15528 mukaiset 2D-stabiliteetilaskennassa käytettävät nauhakuormat. (Liikennevirasto 2014, s.29)

EN-rataluokka	2D-stabiliteetilaskennassa käytettävä nauhakuorma, q_{stab} [kN/m]
C2	83
C3	
C4	
D2	92
D3	
D4	
D4xL	101
E4	
E5	

3.3 Tutkimuksen testijunat

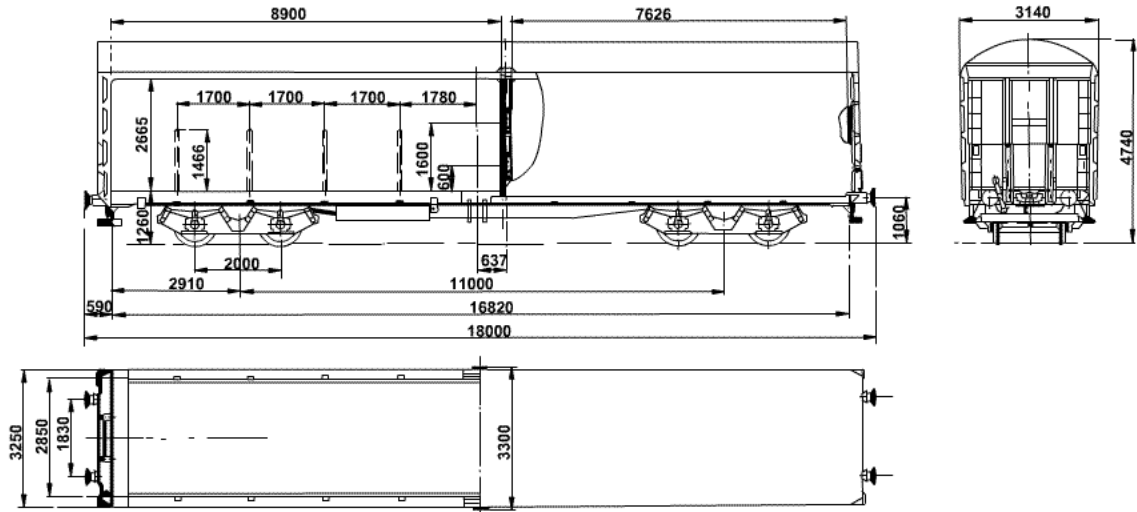
Tutkimuksessa käytetään suomalaista sekä venäläistä kalustoa. Seuraavissa kappaleissa on esitelty yleisesti suomalaisen ja venäläisen kaluston piirteitä ja keskitytty tutkimuksessa käytettyihin vaunutyypeihin.

Suomalainen kalusto

Suomen junaliikenteen kalusto on hyväksytty aikaisemmin LIMO:n eli liikkuvan kaluston teknisten määräysten ja ohjeiden mukaisesti. Nykyään uudet tavaravaunut hyväksytään YTE:n mukaisesti. YTE eli yhteentoimivuuden tekninen eritelmä rajoittaa rataan kohdistuvaa kuormitusta nopeusrajoituksilla riippuen vaunujen suurimmasta sallitusta staattisesta akselipainosta. Sallitun staattisen akselipainon ollessa 225 kN suurin sallittu nopeus on 120 km/h. Kun sallittu staattinen akselipaino on 250 kN, on suurin sallittu nopeus 100 km/h. Pyörien halkaisijan tulee olla 840-920 mm. (Korkeamäki 2011, s.57)

Suomen rataverkolla liikennöitävistä tavaravaunuista noin puolet ovat telillisiä vaunuja. Käytettävät telimallit ovat K14, K16 ja K17. Telimallit ovat hyväksytyt osaksi tavaravaunujen YTE:ä. Edellä mainitut telimallit ovat rungoltaan H-runkoisia telejä. (Korkeamäki 2011, s.60) H-runkoisissa teleissä ei ole paljon jousittamatonta massaa verrattuna kolmi-osaisiin teleihin.

Tässä tutkimuksessa käytettävä suomalainen vaunu selluloosavaunu Hai on 18000 mm pituinen vaunu. Vaunun mitat on esitetty kuvassa 3.5. Vaunun pituus lasketaan puskiemesta puskiemiseen. Vaunun telit ovat 11000 mm etäisyydellä toisistaan. Kahden eri vaunun viereisten telien kauimmaisten akseleiden etäisyys toisistaan on 9000 mm. Vaunun suurin sallittu akselipaino on 225 kN. Vaunun suurimmaksi metripainoksi tulee näin ollen 50 kN/m. Teliparin aiheuttama suurin metripaino on 100 kN/m.



Kuva 3.5. Selluloosavaunu Hai. Suomalainen vaunu, jolla mittaukset tehtiin. (VR-Yhtymä Oy 2017)

Venäläinen kalusto

Venäläisissä telillisissä vaunuissa käytetään yleisesti kolmiosaista Model 18-100 teliä. Tämän tutkimuksen vaunussa oleva teli Model 18-9855 Barber S-2-R on kehitetympi versio Model 18-100 telistä. Kolmiosaisen Model 18-100-telin jousittamaton massa on suuri. (Korkeamäki 2011, s.70) Tästä syystä lovipyörät aiheuttavat tavanomaista suuremman iskuvoiman pyörän ja kiskon välille. Lovipyörän aiheuttamat iskut kohdistuvat erityisesti raiteeseen, mutta myös radan rakennekerrokseen. Akselipainon nosto kasvattaa myös iskuvoimaa. Rakennekerrokseen syntyvä suurempi kuormitus voi lisätä sepelin jauhaantumista ja siten vähentää radan kuormituskestävyyttä ja aiheuttaa pysyviä painumia.

Kouvola-Kotka radalla liikennöivä venäläinen kalusto on suurilta osin kemianteollisuuden tuotteita kuljettavaa Hopper-vaunukalustoa. Tutkimuksessa käytettävät Hopper-vaunut ovat lyhyitä 14720 mm pituisia vaunuja, joiden telien välinen etäisyys on 10500 mm. Tällöin kahden peräkkäisen vaunun telien kauimmaisten akselien välinen etäisyys on 6070 mm. Vaunun suurin sallittu akselipaino on 250 kN. Vaunun suurin metripaino on siten 67,9 kN/m, mikä on hieman enemmän kuin suomalaisessa selluloosavaunu Haissa, mutta vähemmän kuin Suomen rataverkolla sallittu 80 kN/m. Täyteen lastatun Hopper-vaunun teliparin metripaino 164,7 kN/m, mikä on huomattavasti suomalaista Hai-vaunua suurempi. Tällä hetkellä Kouvola-Kotka rataosalla liikennöivien 225 kN akselipainoisten Hopper-vaunujen teliparin metripaino on 148,3 kN/m.



Kuva 3.6. Hopper Model 19-9870-01. Mittauksissa käytetty venäläinen vaunu. (Tikhvin Freight Car Building Plant 2014)

Testijunat

Taulukossa 3.4 on esitetty kootusti suomalaisen testivaunun sekä venäläisen testivaunun tiedot. Taulukosta nähdään, että kaikkien vaunujen metripaino pysyy alle 80 kN/m. Kuitenkin teliparin metripainot ovat lähes poikkeuksetta yli 80 kN/m. Taulukosta hahmottaa helposti venäläisen vaunun kuormittavan rataa huomattavasti enemmän kuin suomalaisen vaunun, vaikka akselipaino olisi yhtä suuri.

Taulukko 3.4 Tutkimuksessa käytettyjen vaunujen akselipainojen, metripainojen ja teliparin metripainojen vertailu

Vaunu	Pituus [m]	Teliparin etäisyys [m]	Akselipaino [kN]	Metripaino [kN/m]	Teliparin metripaino [kN/m]
Hai	18	9	170	37,8	75,6
Hai	18	9	225	50,0	100,0
Model 18-100	14,72	6,07	225	61,1	148,3
Model 18-100	14,72	6,07	250	67,9	164,7

Taulukossa esitetyllä teliparin etäisyydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä kahden eri vaunun viereisten telien kauimmaisten akselien etäisyyttä toisistaan.

3.4 Junaliikenteen vaikutus rataympäristöön

Junaliikenne aiheuttaa rataympäristöön melu- sekä värinähaittoja. Meluhaitta ei muutu merkittävästi junan kuorman kasvaessa. Meluhaittaan vaikuttaa eniten junan pituus ja nopeus, jotka määräävät melun keston. Melun lisäksi junaliikenteestä syntyy aina värinää. Värinän voimakkuuteen vaikuttavat junan kuorma, nopeus, telien jousitus, junan pituus, radan rakenteen ominaisuudet, kaluston kunto, maapohjan ominaisuudet ja akselipainojen tasaisuus (Levomäki 1999, s.10)

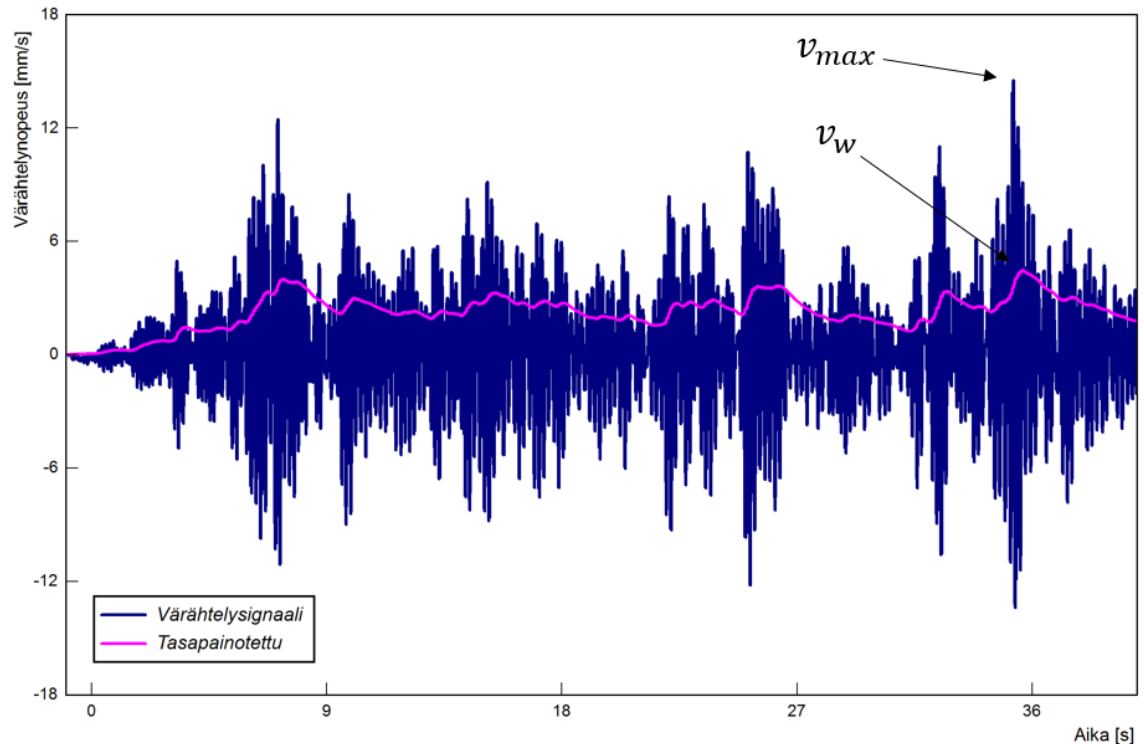
Akselipaino on edellä mainitusti vain yksi osa värinän aiheuttajista. Täten akselipainon noston vaikutusta värinään on vaikea määrittää. Kaluston ominaisuudet vaikuttavat syntyvään värinään enemmän kuin akselipaino. Kalustossa esiintyvät lovipyörät aiheuttavat voimakkaita äkillisiä värinäpiikkejä.

Radan päällysrakenteen ja -penkereen yhteistoiminta junakaluston kanssa määrää värinän välittymisen maapohjaan ja radan perustuksiin. Junan telin aikaansaama jännitys maapohjassa määrittää maapohjan muodonmuutoksen. Mitä pienempi maapohjan dynaaminen muodonmuutos on, sitä pienempi on värinäheräte. (Törnqvist & Talja 2006, Liite C)

Pölkytyksen merkitys värinän syntymiseen ei ole yksiselitteinen. Betonipölkky jakaa kuormaa tehokkaammin kuin puupölkky, jolloin värinäheräte on pienempi. Toisaalta betonipölkky siirtää korkeita taajuuksia tehokkaammin kuin joustavampi puupölkky. Maapohjassa korkeat taajuudet vaimenevat kuitenkin matalia taajuuksia nopeammin, jolloin betonipölkyn korkeampi ominaistajuus edesauttaa värinän vaimentumista. (Törnqvist & Talja 2006, Liite C)

Junaliikenteen aiheuttamaa värinää kuvataan värähtelyn nopeudella v (mm/s). Junaliikenne synnyttää kolmea eri suuntaista värinää: pystysuuntaista, junan kulkusuunnan suuntaista sekä poikkisuuntaista junan kulkusuuntaan nähden. Värähtelyn huippuarvolla v_{max} (mm/s) tarkoitetaan värähtelysignaalin itseisarvoltaan suurinta arvoa.

Värähtelyä tarkasteltaessa värähtelyn nopeudesta lasketaan tehollisarvo v_{rms} (mm/s), joka taajuuspainotetaan. Taajuuspainotuksessa mitatun signaalin värähtelykomponentit tehdään ihmisen herkkyyden suhteen samanarvoisiksi painottamalla värähtelykomponentteja taajuudesta riippuvalla painotuskertoimella W_v . Taajuuspainotetun värähtelysignaalin $v_w(t)$ määritettyä suurinta tehollista arvoa kutsutaan painotetun värähtelyn tehollisarvoksi v_w (mm/s). (Törnqvist & Talja 2006, s.14)



Kuva 3.7. Esimerkkikuva värähtelysignaalista, taajuuspainotetusta värähtelysignaalista sekä värähtelyn huippuarvosta v_{max} ja painotetun värähtelyn tehollisarvosta v_w

Junaliikenteen tärinähaittoja tutkittaessa junaliikennettä mitataan viikon ajan. Viikon ajalta 15 merkiteivimmistä junasta mitattujen painotettujen värähtelyn tehollisarvojen keskiarvoa lisätynä 1,8-kertaisella hajonnalla kutsutaan värähtelyn tunnusluvuksi $v_{w,95}$ (mm/s) (Törnqvist & Talja 2006, s. 14). Värähtelyn tunnusluvun avulla määrätään värähtelyluokka, jolla kuvataan alueen tärinäolosuhteita.

Tärinää on tutkittu entistä enemmän viimeisten vuosikymmenten aikana, junien nopeuksien ja painojen noustessa koko ajan suuremmaksi. Tärinää ja sen vaikutuksia voidaan myös simuloida, jos maaperä ja junan ominaisuudet tunnetaan tarkkaa. Esimerkiksi lähteen (Kouroussis et al. 2011) tutkimuksessa simuloitiin Eurostar HST junan aiheuttamaa tärinää Brysselin ja Pariisin välisellä radalla. Simuloituja tuloksia verrattiin geofoneilla mitattuihin tuloksiin. Simulointi osoittautui tutkimuksessa hyvin toimivaksi, kun pohjamaan ja junan ominaisuudet tiedettiin tarkkaan. Tutkimuksessa todettiin myös, että junan ominaisuudet ja pohjamaan kerrostuneisuus vaikuttavat suuresti tärinän voimakkuuteen.

4. KOUVOLA-KOTKA RATAOSA

4.1 Nykytilanne

Kouvola-Kotka rataosa on 52 km pituinen rautatie Kaakkois-Suomessa. Kouvola Juurikorpeen rataosa on kaksiraiteista ja Juurikorvesta Kotkan satamaan yksiraiteista. Kouvola-Kotka rataosa valmistui vuonna 1890. Kaksoisraide on rakennettu kahdessa osassa. Ensin 1950 -luvulla Kouvola Inkeröiseen ja 1990 -luvulla Inkeröisestä Juurikorpeen. (Liikennevirasto 2015a, s.8) Kaksoisraiteen läntinen raide jatkuu Kotkan satamaan ja itäinen raide poikkeaa rataosaksi Juurikorpi-Hamina.

Rataosalla kulkee henkilö- ja tavaraliikennettä. Henkilöliikenne toteutetaan kiskobusseilla Sm1, Sm2 ja Sm4. Tavaraliikenteen puolella rataosaa käyttävät molemmat Suomen tavaraliikenneoperaattorit VR ja Fenniarail Oy. Rataosalla kulkee paljon transitoliikennettä Venäjältä Kotkan satamaan. Transitoliikenteellä tarkoitetaan kauttakulkevaa tavara- ja raaka-ainekuljetusta toisen valtion läpi kolmanteen valtioon.

Kouvola-Kotka rataosan päällysrakenneluokka on läntisen raiteen osalta Kouvola Paimenporttiin luokkaa D. (Kuva 4.1) Rataosa Paimenportista Kotkan satamaan sekä vanhemman kaksoisraiteen osalta itäinen raide on päällysrakenneluokkaa C1. Päällysrakenneluokalla D kiskotus on 60E1 tai 60E2 ja ratapölkkyt ovat betonipölkkyjä, kun taas päällysrakenneluokalla C1 kiskotuksena on 54E1. Taulukossa 4.1 on esitetty päällysrakenneluokat sekä näitä vastaavat suurimmat sallitut nopeudet eri akselipainoilla Kouvola-Kotka rataosalla.

Taulukko 4.1. Kouvola-Kotka radan päällysrakenneluokat, päällysrakenneluokista johdetut EN-rataluokat ja sallittavat nopeudet eri akselipainoilla. Muokattu lähteestä (Liikennevirasto 2015b, Liite 6 s. 10-11)

Rataosa	Luokka		Henkilöjunat		Tavarajunat			
	Liikennevirasto	SFS-EN 15528	veturijunat	moottorijunat	≤ 160 kN	160 ≤ 200 kN	200 ≤ 225 kN	225 ≤ 250 kN
Kouvola-Kotka								
Kouvola tavara-Juurikorpi läntinen raide	D	D4	120	120	120	120	100	-
Kouvola Oikoraide-Inkeröinen itäinen raide	C1	D4	120	120	120	120	100	-
Inkeröinen-Juurikorpi itäinen raide	D	D4	120	120	120	120	100	-
Juurikorpi-Paimenportti	D	D4	120	120	120	120	100	-
Paimenportti-Kotka asema	C1	D4	80	80	80	80	80	-
Kotka asema-Kotkan satama	C1	D4	35	35	35	35	35	-

Kouvola-Kotka rataosalla suurin sallittu akselipaino on 225 kN. Kuitenkin tätä raskaampia itäisen yhdysliikenteen vaunuja saa kuljettaa erillisohjeilla. Akselipainon ollessa yli

225 kN, mutta enintään 235 kN suurin sallittu nopeus on 60 km/h. Jos yksittäinen akselipaino on yli 225 kN, mutta enintään 235 kN itäisen yhdysliikenteen vaunuja voidaan kuljettaa enintään 225 kN akselipainoille määrättyllä nopeudella. Jos itäisen yhdysliikenteen vaunujen akselipaino on yli 235 kN antaa Liikenneviraston Rataliikennekeskus Kouvola-Kotka sekä Kotka-Hovinsaari ja Kotka-Mussalo rataosilla erillisen kuljetusluvan enintään 245 kN akselipainoon saakka. (Liikennevirasto 2015b, Liite 17)

Päällysrakenneluokka Överbyggnadsklass Superstructure Category	ei sähköistetty icke-elektrifierad non-electrified	sähköistetty elektrifierad electrified	kiskotus räler rails	pölkky sliprar sleepers	tukikerros ballast ballast
A	—	—	K30, K33	puu trä wooden	raidesora tai vastaava ballastgrus eller motsvarande gravel or equivalent
B ₁	—	—	K43, K60, K54 E1, 60 E1	puu trä wooden	raidesora tai vastaava ballastgrus eller motsvarande gravel or equivalent
B ₂	—	—	K43, K60	puu, betoni trä, betong wooden, concrete	raidesepeli makadamballast railway ballast
C ₁	—	—	54 E1	puu, betoni trä, betong wooden, concrete < 1987	raidesepeli makadamballast railway ballast
C ₂	—	—	54 E1	betoni betong concrete > 1987	raidesepeli makadamballast railway ballast
D	—	—	60 E1, 60 E2	betoni betong concrete	raidesepeli makadamballast railway ballast

..... Ei liikennöintiä
Trafikeras inte
No traffic

■ ■ ■ Rakenteilla
Under byggnad
Under construction

Kuva 4.1. Kartta Kaakkois-Suomen rataverkon päällysrakenneluokista sekä taulukko päällysrakenneluokkien kisko-, pölkky- ja tukikerrostyypeistä. (Liikennevirasto 2015b, Liite 6 s. 20)

Kouvola-Kotka rata kuuluu kunnossapitotasolle 2 (Liikennevirasto 2015b, Liite 6 s.20). Kunnossapitotaso on neljänneksi korkein Suomen kunnossapitotasoista. Kunnossapitotaso määrää radan tarkastusvaunumittauksella havaittavien raidegeometrian suureiden virheluokkien raja-arvot.

Kouvola-Kotka rataosalla on kaksi tärinästä johtuvaa nopeusrajoitusta. Myllykosken kohdalla km 201+500 - 203+100 kokonaispainoltaan yli 3000 tonnin junilla on nopeusrajoitus 40 km/h ja Keltakankaan kohdalla km 207+300 - 207+700 kaikkien junien nopeusrajoitus on 40 km/h. (Liikennevirasto 2015b, Liite 9)

Rataosalla on myös yksi radan kunnosta johtuva nopeusrajoitus Inkeröisen kohdalla km 212+000 - 212+100, jossa nopeusrajoitus on 50 km/h. Rajoitus johtuu vaihteen V003 kunnosta. (Liikennevirasto 2015b, Liite 10)

4.2 Monitoroidut pehmeikkökohteet

Kouvola-Kotka rataosalta valittiin kaksi stabiiletiltaan heikoimmaksi arvioitua kohdetta monitoroitavaksi. Kohteet valitsi Arcus Oy. Kohteiksi valikoitui pehmeikkökohteet km

233+900 ja km 238+280. Kuvassa 4.2 on esitetty tutkimuskohteiden sijainti kartalla. Molemmat kohteet sijaitsevat Juurikorpi-Paimenportti rataosuudella. Tällä rataosuudella päällysrakenneluokka on D eli pölkyt ovat betonisia ja kiskotuksena on 60E1.

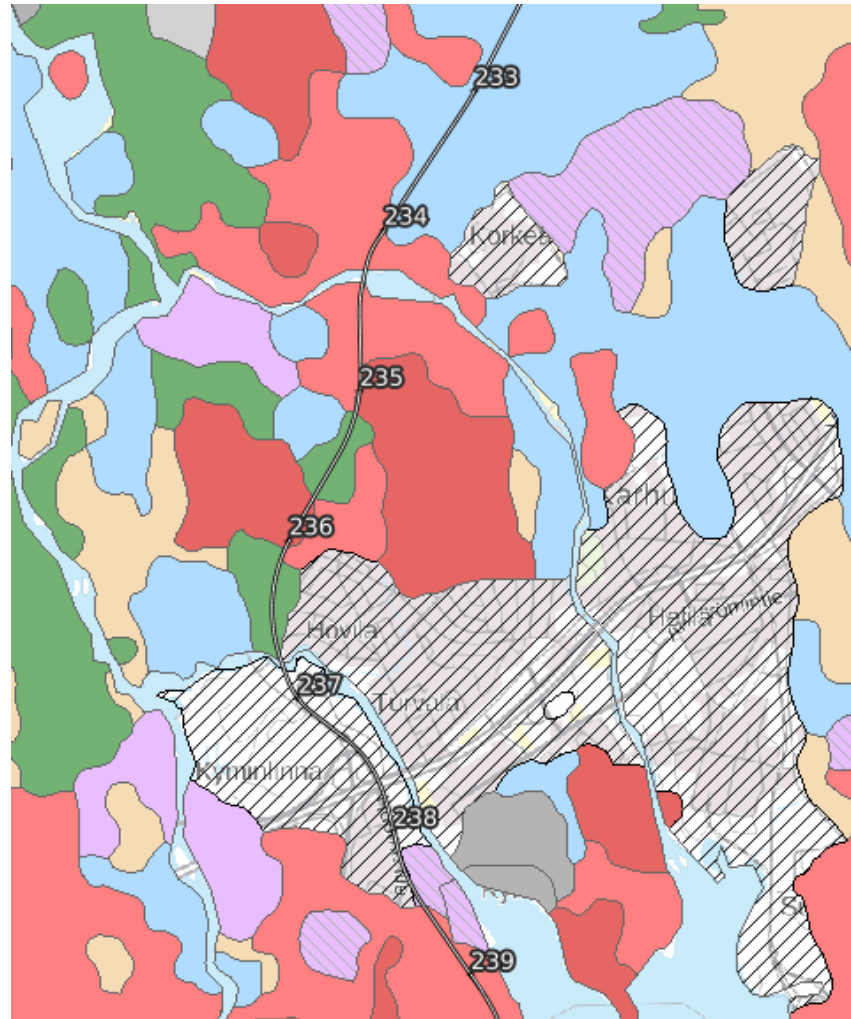
Suomen ratapehmeiköistä löytyy tietoa muun muassa pehmeikkörekisteristä eli Liikenneviraston ratarekisteristä sekä ”Ratojen luokitus”- projektin puitteissa kerätystä RATUS-taulukosta ja Ratahallintokeskuksen aiemmista selvityksistä akselipainon nostoon liittyen. Näiden aineistojen pohjalta Kymin liikennepaikan lähistöltä valittiin pehmeiköjä, joiden vakavuus oli heikoin. Kohteet ja niiden poikkileikkaus pyrittiin valitsemaan siten, että ratapenger ei olisi kovin korkea, koska korkealla penkereellä junakuorman suhteellinen vaikutus on pienempi kuin matalammilla penkereillä. (Puhakka 2017)



Kuva 4.2. Monitoroitavien pehmeikkökohteiden sijainti. (RATADATA -karttapalvelin 2017)

Kohde km 233+900 sijaitsee GTK:n Maankamarapalvelun mukaan savimaalla. Savikko loppuu noin ratakilometrille 234+200, josta alkaa kallioinen alue. Savikolta itään pohjamaa on liejua. Kohteen km 233+900 kohdalla oleva savikko on Juurikorpi-Kotka radan suurin savikko. Kymin liikennepaikka on rakennettu saman savikon varaan.

Kohde km 238+280 sijaitsee liejumaalla. Pehmeikkö jatkuu radasta itään päin kohti merenrantaa. Kymin liikennepaikan ja Hovinsaaren liikennepaikan välisen radan pohjasuhtediedot on esitetty kuvassa 4.3. GTK:n Maankamarapalvelu kertoo pohjasuhtediedot metrin syvyydeltä maanpinnasta. Palvelun aineisto on enemmän suuntaa antava kuin täysin oikea. Pohjasuhteet voivat myös muuttua syvyysuunnassa, mitä Maankamarapalvelu ei ota huomioon.

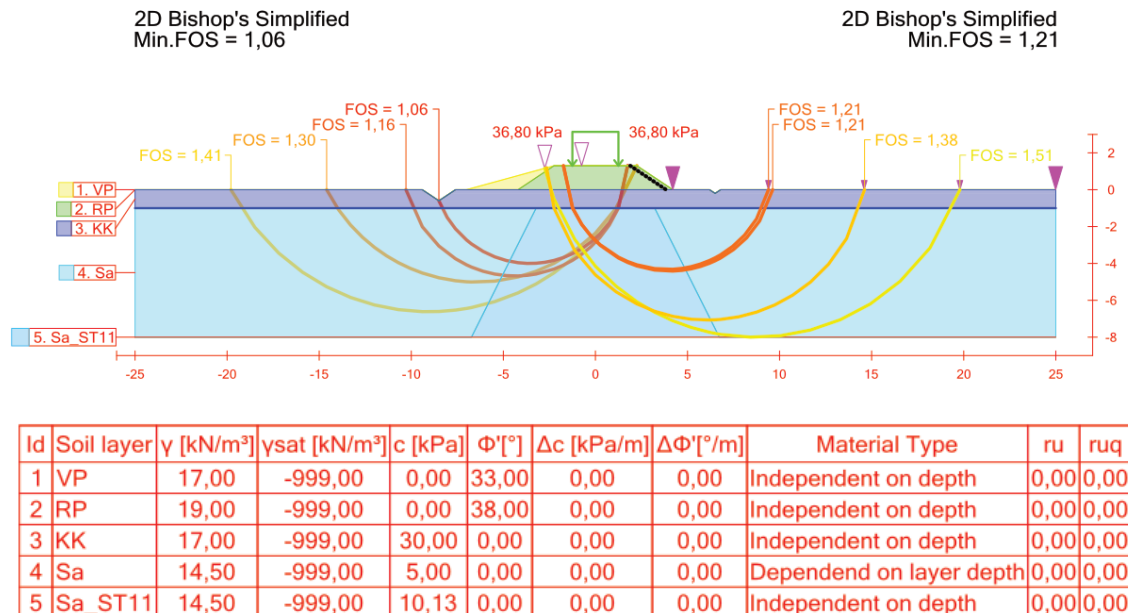


Kuva 4.3. Kymin ja Hovinsaaren liikennepaikkojen välisen radan pohjaolosuhteet. (RATADATA -karttapalvelin 2017)

Kohteen km 233+900 kanssa samalla pehmeiköllä on harva asuinalue. Lähimmät asuinrakennukset ovat noin 150 metrin päässä radasta. Kohde km 238+280 sijaitsee teollisuusalueen vieressä. Samalla pehmeiköllä on Kymenlaakson sähkön sähkövoimakeskus. Kohteen länsipuolella kulkee Huumantie ja itäpuolella Seppolantie. Huumantie on kaksikaistainen noin 6 m levyinen raskaalle liikenteelle tarkoitettu kokoojakatu. Huumantien yhteydessä on myös kevyenliikenteenväylä. Monitoroitavan kohteen kohdalla Huumantien ja kohteen välissä sijaitsee vanha käytöstä poistettu junarata.

4.3 Vanhat pohjatutkimukset ja stabiliteettilaskennat

Monitoroiduista kohteista on aikaisemmin tehty pohjatutkimuksia 1970-luvulla sekä uudestaan 2000-luvulla Ratojen luokitus -projektissa. Pohjatutkimukset on esitetty liitteessä 1. Kohteen km 233+900 pohjatutkimukset on tehty 1970-luvulla. Kohteesta on tehty 2D-stabiliteettilaskelmia pohjatutkimusten perusteella. Stabiliteettilaskelmat on tehnyt Arcus Oy Geocalc-ohjelmalla. Stabiliteettilaskemilla etsitään kohteen heikointa leikkauspintaa ja sen kokonaisvarmuuslukua. Tavanomaisen vanhan ratapenkereen pienin sallittu kokonaisvarmuusluku F on 1,5 (Liikennevirasto 2014, s.16). Kohteen km 233+900 kokonaisvarmuusluvuksi on saatu ainoastaan $F=1,06$, joka on erittäin pieni kokonaisvarmuusluku ratapenkereelle. Vanhoja pohjatutkimuksia ja laskelmia tarkastellessa niiden tuloksia on kuitenkin syytä epäillä. Tästä syystä kohteilla tehtiin uudet pohjatutkimukset tämän tutkimuksen yhteydessä. Kuvassa 4.4 on esitetty kohteen km 233+900 läheltä laskettu RATUS-hankkeeseen liittyvä 2D-stabiliteettilaskenta.

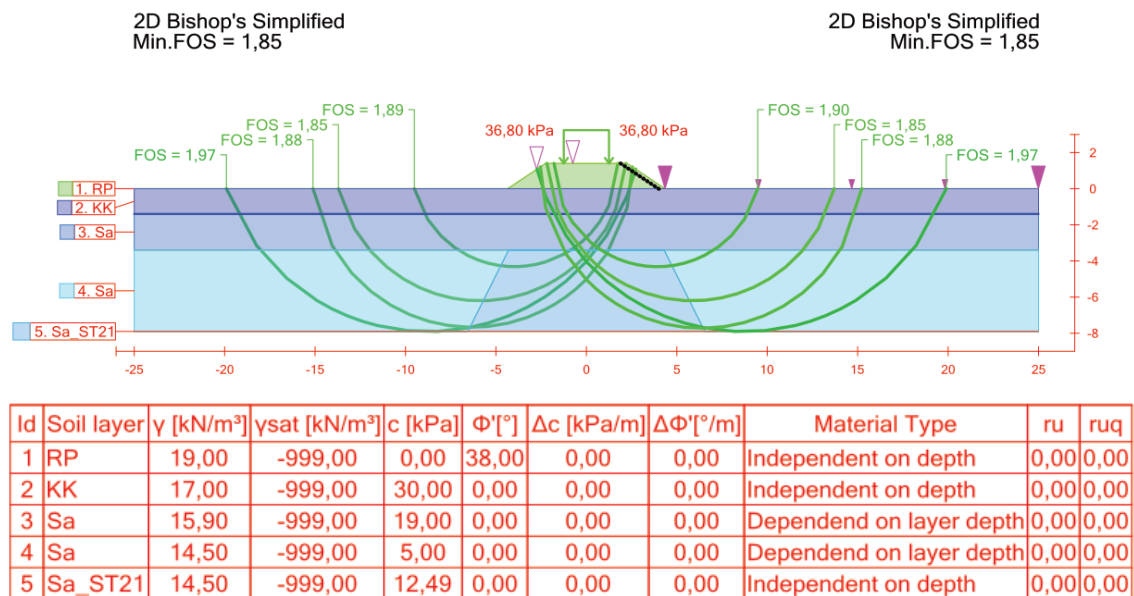


Kuva 4.4. Ratus -projektissa tehty 2D-stabiliteettilaskenta ratakilometriltä 233+860. (RATADATA -karttapalvelin 2017)

Laskenta on tehty käyttäen Bishopin yksinkertaistettua menetelmää. Mahdollisia liukupintoja on laskettu radan molemmin puolin neljä. Junan kuormaa on kuvattu laskelmissa pintakuormana. Junan aiheuttamaksi pintakuormaksi on määrätty 36,8 kPa, mikä kuvaa noin 225 kN akselipainoista vaunua. Saven lujittumista radan alla on kuvattu alueella, jossa saven suljetuksi leikkauslujuudeksi on laskettu 10,13 kPa. Lujittumattoman saven leikkauslujuuden arvoksi on laskettu suhteellisen pieni 5 kPa. Laskenta on hyvin pelkistetty ja saven lujuusarvot 1970 -luvulla tehtyjen pohjatutkimusten mukaiset. Todellisuudessa kokonaisvarmuuden voi olettaa suuremmaksi.

Kohteen poikkileikkaus on piirretty laskennassa karkeasti suunnilleen samanmuotoiseksi ja suuruiseksi kuin mitä se oikeasti on. Poikkileikkauksen pyöristäminen vaikuttaa tuloksiin, koska penkereen koko ja muoto ovat laskemissa todellisuudesta poikkeavia. Laskelmissa ei otettu huomioon penkereen ja muiden maakerrosten painumista ratapenkereen kohdalla. Todellisuudessa maakerrokset painuvat vuosia kestävän kuormituksen vaikutuksesta, jolloin ne eivät ole aivan samassa kohdassa ratapenkereen alla kuin sen vieressä.

Kohteen km 238+280 pohjatutkimuksia on tehty 1970-luvulla ja niitä on täydennetty vuonna 2002. Kuvassa 4.5 on esitetty kohteen km 238+280 RATUS-hankkeeseen liittyvä 2D-stabiliteetilaskenta.



Kuva 4.5. Ratus -projektissa tehty 2D-stabiliteetilaskenta kohteesta km 238+280. (RATADATA -karttapalvelin 2017)

Kohteen km 238+280 laskenta on myös tehty Bishopin yksinkertaistetulla menetelmällä. Junan kuormitusta kuvaavana pintakuormana on käytetty samaa 36,8 kPa, joka vastaa 225 kN akselipainoista vaunua. Kohteen pohjamaata on kuvattu hieman alle 2 metrin paksuisella kuivakuorella, jonka alla on 2 metrin paksuinen savikerros, jossa ei ole tapahtunut lujittumista. Vasta näiden savikerrosten alla olevassa savikerroksessa kuvataan saven lujittumista. Kuivakuoren suljettu leikkauslujuus on laskennassa ollut 30 kPa, kuivakuoren alla olevan savikerroksen suljettu leikkauslujuus on ollut 19 kPa, lujittuneen saven suljettu leikkauslujuus on ollut 12,49 kPa ja lujittumattoman savikerroksen leikkauslujuus on ollut 5 kPa.

Laskennassa saatu pienin kokonaisvarmuusluku on $F=1,85$. Näinkin suuri varmuus johtuu laskennassa oletetun kuivakuoren ja sen alla olevan savikerroksen suuresta suljetusta leikkauslujuudesta. Koska pohjatutkimukset eivät ole tästä kohteesta tuoreita ja luotettavia, täytyy myös tässä laskennassa käytettyihin arvoihin suhtautua varauksella. Tässä

kohteessa Ratus -projektissa lasketut kokonaisvarmuusluvut voivat olla joissain määrin todellista suuremmat.

5. MITTAUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käsitellään tässä tutkimuksessa käytettävien mittausmenetelmien sekä pohjatutkimusten teoria. Mittausmenetelmät on jaettu pehmeikkökohteilla tehtyjen mittausten mittausmenetelmiin ja koko rataosalle tehtyjen mittausten mittausmenetelmiin.

5.1 Pehmeikkökohteilla tehdyt pistemäiset mittaukset

Pehmeikkökohteet instrumentoitiin junien pysäytyksiä varten. Instrumenttien avulla saatiin selville ratarakenteen sekä pohjamaan ominaisuuksien muutoksia junakuorman vaikutuksesta. Pehmeikkökohteilta mitattiin pohjamaan huokosvedenpainetta, penkereen sivuttaissiirtymää ja pystysiirtymää, junien kuormat ja maaperän värinä, lisäksi kohteilla tehtiin kairauksia ja otettiin maanäytteitä. Tampereen teknillinen yliopisto on käyttänyt ennenkin tässä tutkimuksessa käytettäviä mittausmenetelmiä ratapenkereiden monitoroinnissa. Mittausmenetelmien teorioita ja toimintaa on kuvattu laajasti aiemmissa Liikenneviraston julkaisuissa kuten Luomalan julkaisussa Ratapenkereiden monitorointi ja Lehtosen julkaisussa Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi (Luomala 2010; Lehtonen 2010). Tässä työssä teorian esittelemistä on supistettu ja mittausmenetelmistä kerrotaan vain tärkeimmät seikat.

5.1.1 Sivuttaissiirtymän mittaus

Maaperän eri kerrosten sivuttaissiirtymän mittaamisessa käytetään yleisesti inklinometrejä. Inklinometri koostuu kulmanmuutosantureista, jotka mittaavat asentonsa suhteessa maan vetovoimaan. Kaltevuusanturit vertaavat asentoaan paikallaan pysyvän pohjaan sekä muihin kaltevuusantureihin, jonka kautta se määrittää asennussyvyydellään tapahtuneen sivuttaissiirtymän. Kaltevuusanturit asetetaan maahan asennettuun inklinometriputkeen määräväleihin. Inklinometriputki porataan kovaan pohjaan saakka. Inklinometriputki on tärkeää saada liikkumattomaan kovaan pohjaan, koska mittaukset tehdään putkeen asennetun alimman kulmanmuutosanturin suhteen. (Luomala 2010, s.10-11) Inklinometrin käytöstä monitoroinnissa ollaan laatimassa standardia SFS-EN ISO 18674-3.

Inklinometri kertoo maakerrosten vaakasuuntaiset liikkeet. Inklinometrin heikkoutena on sen tarve olla asennettuna kovaan pohjaan saakka. Kovan pohjan ollessa syvällä on asentaminen kallista ja mittaustarkkuus heikkenee. Mittaustarkkuuden heikkeneminen perustuu inklinometrin toimintatapaan. Usean kulmamutoksen perusteella lasketun mittaus tuloksen tarkkuus heikkenee anturimäärän kasvaessa, koska antureiden mittausvirheet kumuloituvat. Inklinometriputken ollessa pidempi tarvitaan putkeen enemmän antureita. (Luomala 2010, s.10-11)

Inklinometriputki vaatii asettumisaikaa ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Asettumisaikaa voidaan lyhentää ja luotettavuutta lisätä käyttämällä ympärystäyttöä maaputkireiän ja inklinometriputken välissä. Mikäli ympärystäyttöä ei tehdä, voi inklinometriputki päästä liikkumaan aiheuttaen tuloksissa huojuntaa ja epäluotettavuutta. (Bäcklund 2017) Tämän tutkimuksen inklinometreissä tehtiin ympärystäyttö. Kuvassa 5.1 on esitetty asennettu inklinometri.

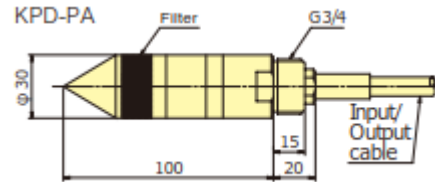


Kuva 5.1. FinMeasin inklinometri asennushetkellä tämän tutkimuksen kohteessa km 233+900.

Tässä tutkimuksessa käytetyt inklinometrit olivat FinMeas Oy:n digitaalisia kaltevuusantureihin perustuvia inklinometrejä, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen mittauksen. Inklinometriputken asennettiin monta anturia samanaikaisesti, jolloin mittaus saatiin automatisoitua. Kaltevuusanturit oli asennettu putken metrin välein. FinMeas Oy:n mitta-
laite kuluttaa vain vähän sähköä ja voi toimia pelkän akun avulla jopa vuoden (Luomala 2010, s.10-11). Tutkimuksessa käytetyssä inklinometrissä oli integroitu aurinkopaneeli, joka kasvattaa inklinometrin toiminta-aikaa. FinMeas tarjoaa automaattisten inklinometri-
rien lisäksi verkkopalvelua, josta mittaustuloksia voi seurata reaaliajassa.

5.1.2 Huokosvedenpaineen mittaus

Huokosvedenpainetta on Suomessa mitattu käyttäen sähköisiä huokosvedenpaineantureita eli pietsometrejä. Tässä tutkimuksessa huokosvedenpaineen mittaamisessa käytettiin Tokyo Sokki Kenkyujo Companyn KPD-200KPA antureita. Anturit mittaavat painetta tunnuksensa mukaisesti 200 kPa saakka. Anturi on lieriönmuotoinen, jossa on kartiokärki. Anturin mitat on esitetty kuvassa 5.2.



Kuva 5.2. Tokyo Sokki Kenkyujo Co. anturin KPD-KA mitat. (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. 2017)

Anturissa on kalvo, joka venyy siihen kohdistuvan paineen vaikutuksesta. Venymä aiheuttaa jännitteen, joka on verrannollinen anturin syöttöjännitteeseen. Paine lasketaan mitattavan jännitteen ja syöttöjännitteen suhteen lineaarisena funktiona:

$$p = \frac{V_{mit}}{V_s} \cdot k - c, \quad (8)$$

missä

p	=	paine [kPa]
V_{mit}	=	anturilla mitattu jännite [V]
V_s	=	syöttöjännite [V]
k	=	kalibrointikerroin [kPa/(V/V)]
c	=	korjausvakio [kPa] (Lehtonen 2010, s.39)

Kaavassa esitetty periaate käy useimpiin lineaarisiin analogiantureihin. Tutkimuksessa käytetyt anturit mittaavat absoluuttista painetta, joten paineessa on mukana myös ilmanpaine ja sen vaihtelut. Ilmanpaine täytyy ottaa huomioon mitattujen arvojen käsittelyssä.

Jokaisella anturilla on oma nollakohtansa. Antureiden mukana tulee kalibrointitodistus, josta selviää anturin kalibrointikerroin mitatun jännitteen ja paineen vastaavuudelle, sekä korjausvakio. Korjausvakiolla anturin nollakohta saadaan oikealle nollassolle. Anturien korjattu nollasso on erittäin lähellä normaalia vallitsevaa ilmanpainetta, jolloin anturi näyttää nollassa, kun se on ilmassa.

Anturin kalvon suojana on huokoskivi, jonka kautta paine välittyy kalvolle. Anturit täytyy ilmata, jotta se olisi täysin kyllästetty joko vedellä tai öljyllä. Anturi, jonka sisälle tai huokoskiveen jää ilmaa, antaa virheellisiä mittaustuloksia. Tässä tutkimuksessa anturit ilmattiin Lehtosen (2010) tutkimukseen kehitetyllä järjestelyllä, jossa anturi asetetaan öljyllä täytettyyn messinkiseen putkeen, jonka toinen pää on suljettu o-renkaalla tiivistetyllä pleksillä. Pleksissä on painemittari sekä läpivienti, jonka kautta messinkiputkeen imetään tyhjiö.

5.1.3 Pystysiirtymän mittaus

Siirtymää mittaavia laitteistoja on käytetty rataympäristön pysty- ja vaakasiirtymien monitoroinnissa. Siirtymää voidaan mitata siirtymäantureilla, kiihtyvyyssantureilla tai erilaisilla geodeettisilla ja optisilla menetelmillä. Tässä tutkimuksessa pystysiirtymän mittauksessa käytettiin resistiivisiä lineaaripotentiometrityypin antureita sekä kiihtyvyyssantureita.

Siirtymäanturit

Siirtymäanturit mittaavat siirtymää fysikaalisesti. Rataympäristössä yleisesti käytettyjä siirtymäantureita ovat differentiaalimuuntaja (Linear Variable Differential Transformer, LVDT) ja resistiivinen potentiometri. Differentiaalimuuntajia valmistetaan eri rakenneratkaisuilla. Anturissa on primääri- ja kahteen osaan jaettu sekundäärikäämi, jonka osat on kiinnitetty vastakkaisuuntaisesti. Siirtymä mitataan käämien sisällä liikkuvan ferromagneettisen sydämen avulla. (Peltokangas et al. 2013, s.91)

Resistiivinen potentiometri koostuu resistiivisestä elementistä, joka liikkuu anturin sisällä. Kontaktin liike voi olla lineaarista tai pyörivää sekä molempien yhdistelmää. Lineaarissa potentiometreissä resisstiivisenä elementtinä käytetään yleensä resistiivistä langaa. Langan pituus ja resistanssi muuttuvat anturin kärjen ja/tai karan liikkeen mukana. Anturin mittaama mittaustulos voltteina ilmaisee karan siirtymää. (Doebelin 2004, s.231)

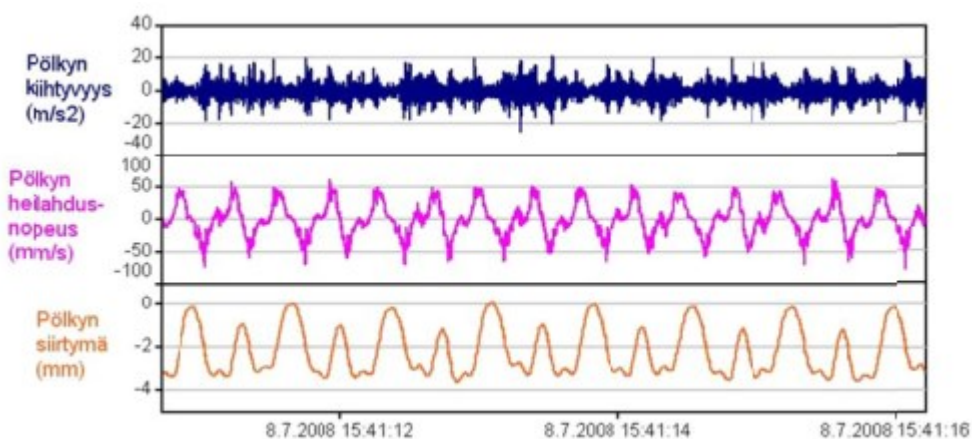
Tässä tutkimuksessa käytettävät siirtymäanturit ovat Novotechnikin valmistamia resistiivisiä lineaaripotentiometrityypin TRS 25-antureita, joiden mittausalue on 25 mm. Antureille syötetään 5 voltin jännite. Anturi antaa mittaustuloksiksi jännitteen 0 - 5 V väliltä, jonka voi muuttaa suoraan millimetreiksi kalibrointikertoimen 27mm/V/V avulla. Antureiden asennus esitetään luvussa 6. TRS 25-antureiden tarkkuudeksi luvataan jopa $\pm 0,075$ % mittausalueesta ja toistettavuudeksi $\pm 0,002$ mm (Novotechnik 2015). Kuvassa 5.3 on Novotechnikin TRS50 anturi, joka on samanlainen kuin TRS25 anturi, mutta sen mittausalue on 50 mm.



Kuva 5.3. Novotechnikin TRS50 anturi. (Novotechnik 2015)

Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturilla mitataan siirtymiä kiihtyvyyteen perustuen. Kiihtyvyys muunnetaan laskennallisesti siirtymäksi integroimalla se ajan suhteen kahdesti. Ensimmäinen integrointi muuttaa kiihtyvyyden heilahdusnopeudeksi ja toinen siirtymäksi. Signaalin integrointi on esitetty kuvassa 5.4. Kiihtyvyyssanturien käytössä on rajoituksia. Anturit soveltuvat vain dynaamisten eli nopeasti tapahtuvien ilmiöiden mittaamiseen. Kiihtyvyyssantureilla ei voi mitata staattisia ilmiöitä tai pysyviä muodonmuutoksia. Kiihtyvyyssantureilla mitataan junien ohjassa tapahtuvaa pölkyn tai kiskon siirtymää eli radan palautuvaa painumaa. Mittauksessa siirtymän nollassa voi vaihdella junana ylityksen aikana. Kiihtyvyyssanturit voivat myös ottaa häiriöitä veturista, jolloin veturin aiheuttamia palautuvia painumia on vaikea arvioida. Vaunun yhden telin aiheuttama maksimisiirtymä voidaan kuitenkin tulkita noin 0,1 mm tarkkuudella. (Peltokangas et al. 2013, s.88)



Kuva 5.4. Esimerkki kiihtyvyyssignaalin integroinnista siirtymäksi (Peltokangas et al. 2013, s.88)

Kiihtyvyyssantureilla mitattiin tässä tutkimuksessa ratapölkkyjen pystysiirtymää. Kiihtyvyyssantureiden lisäksi mittauksessa tarvitaan dataloggeri, tietokone sekä antureiden kiinnittämiseen vaadittavat tarvikkeet. Mittauksessa käytetään ohjelmistoa, joka lukee dataloggerin digitoimat antureilta tulevat signaalit ja tallentaa ne tietokoneen kovalevyille. (Peltokangas et al. 2013, s.88)

5.1.4 Kuormien mittaus

Akselipainoja voidaan mitata kiskoon liimattavilla venymäliuskoilla. Venymäliuskat mitaavat kiskon leikkausmuodonmuutosta. Leikkausmuodonmuutos pysyy vakiona pölkkyvälissä kiskon taipuessa tuentapisteiden etäisyyden suhteessa. Venymäliuskat liimataan

250 mm etäisyydelle toisistaan kiskon uumaan 45 asteen kulmaan. Kulmapoikkeamat aiheuttavat virhettä akselipainon mittauksessa, minkä vuoksi venymäliuskat kalibroidaan (Luomala 2010, s.62-63).

Kalibrointi tapahtuu erillisten kuormitusjärjestelyjen avulla tai vasta mittaustuloksia analysoitaessa. Kalibrointi tehdään tunnettujen kuormien avulla. Suomessa tavarajunia vetää yleensä SR1-veturi, jonka staattisen akselipainon tiedetään olevan noin 210 kN. Veturin aiheuttama leikkausmuodonmuutos voidaan muuttaa kuormaksi kertomalla se kalibrointikertoimella. Oikea kalibrointikerroin saadaan jakamalla mittaustulos 210:llä. Samalla kertoimella kerrotaan muiden junien mittaustulokset, jolloin saadaan selville jokaisen mitatun junan likimääräiset akselipainot.

Kaarteeseen asennettujen venymäliuskojen kalibrointi tunnettujen akselipainojen avulla on hankalampaa. Kaarteessa toinen kisko ottaa kuormaa vastaan hieman enemmän kuin toinen, jonka vuoksi kiskokohtaisen kalibrointikertoimen selvittämiseen tarvitaan useiden junien mittausta, nopeuden määrittäminen sekä hieman iterointia.

Venymäliuskat vaativat vahvistimen. Vahvistin muuttaa anturilta tulevan millivolttien suuruusluokassa olevan jännitteen volttiluokan jännitteeksi. Koska junakuormat ovat dynaamisia ja nopeita, täytyy käytettävän vahvistimen taajuusvasteen olla suuri. Kiskovoi-
mien mittauksessa näytteenottotaajuus on 2000 Hz. Suomessa junat liikkuvat nopeimmillaan 200 km/h, jolloin kyseinen juna kulkee venymäliuskojen välisen matkan 4,5 millisekunnissa. Edellä mainitulla näytteenottotaajuudella ylityksestä saadaan yhdeksän näytettä, josta on mahdollista määrittää akselipaino. Mitä hitaammin juna ajaa, sitä helpompaa ja varmempaa akselipainon määrittäminen on. (Luomala 2010, s.62-63)

5.1.5 Tärinän mittausta

Junaliikenteen aiheuttamaa tärinää mitataan geofoneilla eli elektromagneettisilla seismometreillä. Geofonit mittaavat tärinän heilahdusnopeutta. Geofonin muodostaa kestopagneetti ja liikkuva käämi. Käämi liikkuu kestopagneetin sisällä indusoiden magneettiin nopeuteen verrannollisen jännitteen. Geofonin ulostulo on täten nopeuteen verrannollinen jännite. (Doebelin 2004, s.348)

Tässä tutkimuksessa käytettiin Finnrock Oy:n tarjoamia Sigicomin INFRA V12 kolmiak-siaalisia geofoneja. Geofonit mittaavat värähtelyn nopeutta kolmiulotteisesti. Sigicomin geofonissa on sisäänrakennettu digitaalinen signaalinkäsittely, jolloin sen ulostulo on värähtelyn nopeus. Signaalinkäsittelijä käsittelee signaalin valitun standardin mukaisesti. Geofonin signaali otetaan talteen 4096 Hz taajuudella käyttäen 16 bitin A/D-muunninta. Geofonin yksittäisen mittauksen mittausaika on 40 sekuntia 4096 Hz näytteenottotaajuudella. Tämä tarkoittaa, että geofoni ei saa mitattua hitaasti ajavaa pitkää junaa kokonaan. Geofoni toimii 12 V tasavirralla, joka tuotetaan akun avulla. (Sigicom 2017) Geofonit voidaan ketjuttaa yhteen, jolloin ketjun muodostavat anturit tarvitsevat vain yhden akun.

Tässä tutkimuksessa käytetyt geofonit olivat yhteydessä internettiin, minkä ansiosta ne pystyivät lähettämään tuloksia lähes reaaliaikaisesti Finnrockin pilvipalveluun.

5.1.6 Kairaukset

Maaperän pohjatutkimuksissa käytettiin CPTU-kairauskoetta, siipikairaa ja maaperästä otettiin ST1-näytteenottimella näytteitä sekä suurempia näytteitä. Siipikairauksissa käytettiin ensimmäisen luokan siipikairaa. Ensimmäisen luokan siipikairaus on esitetty SGY:n kairausoppaassa. (SGY 1999)

CPTU-kairauskoe on sähköinen puristinkairauskoe huokosvedenpainemittauksella. Kairauskoeksessa maahan työnnetään määrätyllä vakionopeudella kärkikartiota. Kairauskoeken aikana mitataan kärkikartion kärkivastusta, vaippakitkaa, maan huokospainetta, tunkeutumissyvyyttä sekä kaltevuutta. CPTU-kairauskoe rekisteröi mitattavat suureet sähköisesti tiheällä mittausvälillä. Tiheän mittausvälin ansiosta CPTU-kairauskoe saavuttaa lähes jatkuvan mittauskäyrän. (Selänpää 2015)

ST1-näytteenotin kuuluu kiinteisiin mäntänäytteenottimiin (fixed piston samplers). ST1-näytteenottimella saadaan näytteitä halutusta syvyydestä. Suuremmat näytteet otettiin lapioilla muovisankoihin.

5.2 Koko rataosalle tehdyt mittaukset

Penkereen leventymisen nopeuden ja suuruuden on havaittu olevan riippuvainen pohjaan jäykkyydestä ja sen perusteella mobilisoituvasta muodonmuutostasosta eli palautuvan painuman suuruudesta. Tästä syystä Kouvola-Kotka -radalla tehtiin laserkeilaus ja joustomittaus keväällä 2017. Tavoitteena oli selvittää, leviääkö ratapenger joistakin tiettyistä kohdista enemmän kuin toisista, minkä perusteella voitaisiin arvioida radan kuormituskestävyyttä eli alttiutta pysyvien muodonmuutosten syntymiselle myös akselipainon nostamisen jälkeen. (Luomala 2017)

5.2.1 Pysyvän muodonmuutoksen mittaus

Pysyvä muodonmuutos pyrittiin määrittämään tutkimuksessa laserkeilauksen avulla. Laserkeilaus tapahtuu liikkuvasta junasta. Keilaukseen on käytetty mobiililaserkeilainta, joka mittaa pistepilven liikkuvan kaluston suhteen. Tutkimuksessa käytetty laserkeilain lähettää lasersäteitä 270 asteen laajuudella rataa kohti. Laserkeilaus perustuu lasersäteen kuluaikaan lähettimeltä ensimmäiselle fyysiselle esteelle ja sieltä takaisin vastaanottimelle. Koska lasersäde kulkee valon nopeutta, saadaan ajasta laskettua matka, jonka lasersäde kulki. Näin ollen yhdellä mittauksella laserkeilain muodostaa kaksiulotteisen pistepilven radan poikkileikkauksesta. Tässä tutkimuksessa käytetyllä laserkeilaimella otettiin mittaus 250 mm välein, jolloin mittauksista voidaan rakentaa kolmiulotteinen malli radasta ja sen ympäristöstä.

Radasta voidaan ottaa useita laserkeilauksia eri vuosien aikana. Näistä laserkeilauksista saatavia tuloksia voidaan verrata toisiinsa, jolloin nähdään ratapenkereen mahdollinen leviäminen. Laserkeilauksien tuloksien tulkinta on haastavaa, koska laserkeilain keilaa myös suuren osan kasveista penkereen reunoilta. Kasvillisuus haittaa penkereen reunojen löytämistä tuloksista, mikä vaikeuttaa penkereen leviämisen tulkitsemista.

Mittaustuloksien paikannus perustuu ratametreihin ja mittaus tapahtuu suhteessa raiteeseen. Menetelmällä ei saada selville absoluuttisia koordinaatteja, mutta pistepilvestä voidaan piirtää poikkileikkauksia halutuilta ratametreiltä. Vuosien 2010 ja 2017 laserkeilaukset on tehty keväällä ennen puiden lehtien puhkeamista. Kolmas mittaus vuonna 2015 on tehty kesäaikaan, eikä sitä siksi pidetty vertailukelpoisena.

5.2.2 Radan jäykkyyden mittaus

Stiffmaster on Tampereen teknillisen yliopiston kehittämä jatkuvatoiminen radan jäykkyyden ja jouston mittalaitte. Mittalaitteen toiminta perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen kuormittamattomasta ja kuormitetusta radasta. Mittalaitte kiinnitetään täyteen lastattuun sepelivaunuun tai TKA7 ratakuorma-autoon. Sepelivaunuun kiinnitettyssä mittalaitteessa on viisi kevyttä akselia, jotka mittaavat radan pystysuuntaisen geometrian kalustoyksikön tuottaman akselikuorman alaisena ja kuormittamattomana. Radan taipuma lasketaan mittaustulosten erotuksena. Radan kokonaisjäykkyys saadaan johdettua määritetystä taipumasta eli palautuvasta painumasta. (Luomala et al. 2015, s.112-116)

Mittalaitteessa käytetään virallista Suomessa käytössä olevaa S1002 pyöräprofiilia. Mittalaitte kalibroidaan, jotta antureiden absoluuttinen näyttämä suhteessa toisiinsa ja siten absoluuttinen taipuman suuruus saadaan selvitettyä. Kalibrointi toteutetaan työntämällä mittalaitetta tasaisella radalla käsivoimin ilman sepelivaunun akselipainon vaikutusta.

Mittaustulokseen voi syntyä virheitä mm. kaluston kulkuominaisuuksista, kaarteiden vaikutuksesta mittalaitteeseen tai mittalaitteiston värähtelyistä. Nämä virhelähteet voivat heikentää suhteellista tarkkuutta hetkittäin.

Mittauslaitteen toiminta perustuu junakuorman aiheuttamaan taipumasuppiloon. Jos taipuma suppilo on laaja, kuten suurilla pehmeikköalueilla voi olla, ei mittauslaitteisto ole riittävän pitkä mittaamaan joustoa taipumasuppilon keskeltä ja sen ulkopuolelta. Tällöin mitattu jouston arvo voi olla todellisuutta pienempi.

6. MITTAUS- JA KOEJÄRJESTELYT

Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö toteutti mittaus- ja koejärjestelyt yhteistyössä VR Trackin, Finmeas Oy:n, Roadscanners Oy:n ja Finnrock Oy:n kanssa. Pohjarakenteiden tutkimusryhmä sekä VR Track tekivät pohjatutkimukset ja muut tarvittavat kairaukset. Finmeas Oy asensi inklinometrit, Finnrock Oy asensi geofonit ja Roadscanners Oy teki rataosalta laserkeilaukset sekä muita ainetta rikkomattomia tutkimuksia.

6.1 Pehmeikkökohteiden koejärjestelyt

6.1.1 Pohjatutkimukset ja alustavat työt

Kenttätöitä valituilla tutkimuskohteilla aloitettiin huhtikuussa 2017 pohjatutkimuksilla. Kohteelta km 233+900 tehtiin kaksi ensimmäisen luokan siipikairausta ja viisi CPTU-kairauskoetta TTY:n kairausvaunulla sekä kaksi CPTU-kairauskoetta VR:n kairavaunulla. Tampereen teknillisen yliopiston kairavaunulla tehdyistä kairauksista siipikairaukset sekä neljä CPTU-kairauskoetta on tehty lujittumattomasta maasta radan vierestä ja yksi CPTU-kairauskoe on tehty ratapenkereen luiskasta. VR:n kairauksista toinen CPTU-kairauskoe tehtiin penkereen keskeltä ja toinen penkereen luiskasta. Kohteelta km 233+900 otettiin kaksi suurta näytettä lujittumattomasta savesta radan viereiseltä pelloilta ja pieniä näytteitä ST1-näytteenottimella yhdestä pisteestä radan keskilinjalta.

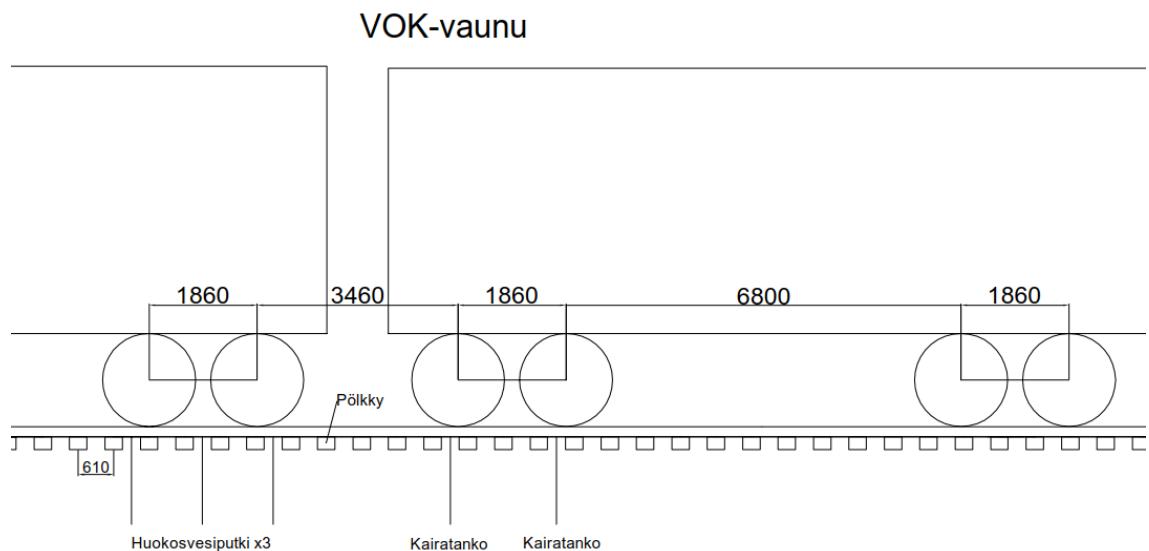
Kohteelta km 238+280 tehtiin kaksi siipikairausta sekä neljä CPTU-kairauskoetta TTY:n kairausvaunulla. Ensimmäisen luokan siipikairaukset tehtiin radan ulkopuolelta lujittumattomasta savesta. CPTU-kairauskoeteista kolme tehtiin radan ulkopuolelta lujittumattomasta savesta ja yksi penkereen luiskasta hieman lujittuneesta savesta. VR:n kairausvaunulla tehtiin yksi CPTU-kairauskoe radan keskilinjalta lujittuneesta savesta. Kohteelta otettiin pieniä näytteitä ST1-näytteenottimella yhdestä pisteestä radan keskeltä.

Pohjatutkimusten yhteydessä molempiin kohteisiin asennettiin inklinometriputki penkereen luiskaan ja kahdeksan huokosvedenpaineantureiden suojaputkea kitkamaakerroksen läpi. Suojaputkista kolme asennettiin radan keskilinjalle kahden pölkyn välein ja viisi penkereen luiskaan. Suojaputken asentaminen on esitetty kuvassa 6.1. Penkereen luiskaan asennetuista suojaputkista kolme on vinosti kohti radan keskilinjaa ja kaksi on asennettu pystysuoraan. Suunniteltu kulma, jossa putket tuli asentaa kohti radan keskilinjaa, oli 30 °. Samassa yhteydessä molempiin kohteisiin asennettiin myös pohjavesiputki radan viereen sekä kaksi kairatankoa radan keskilinjalle kovaan pohjaan saakka. Kairatangot asennettiin kovaan pohjaan saakka siirtymäantureita varten.



Kuva 6.1. Huokosvedenpaineantureiden suojaputkien asennus VR:n kairavaunulla kohteessa km 233+900.

Huokosvedenpaineantureiden suojaputket ja siirtymäantureiden kairatangot haluttiin asentaa kahden eri vaunun viereisten telien kohdalle, jotta kun juna pysäytetään, aksleista välittyvä kuorma siirtyisi mahdollisimman suoraan antureihin kohdalle. Koska tässä vaiheessa ei kuitenkaan vielä tiedetty Venäjältä tulevan vaunun mallia, käytettiin huokosvedenpaineantureiden suojaputkien ja siirtymäantureiden kairatankojen paikkojen määrittämisessä VOK-vaunun mittoja. Kuvassa 6.2 on esitetty suunnitellut huokosvedenpaineantureiden suojaputkien ja siirtymäantureiden kairatankojen paikat.



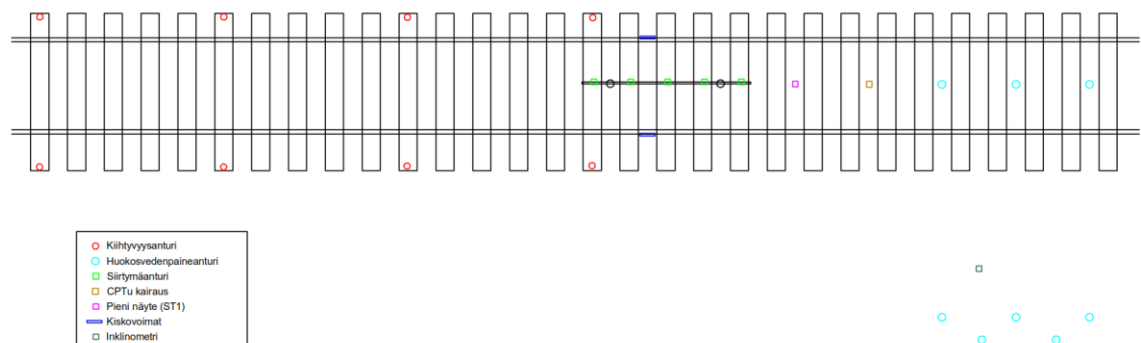
Kuva 6.2. Huokosvedenpaineantureiden ja siirtymäantureiden suunnitellut paikat VOK-vaunun mukaan.

Alustavat työt aloitettiin jo ennen Kotkaan menoa. Huokosvedenpaineanturit ilmattiin TTY:llä. Anturit täytettiin silikoniöljyllä, jonka jälkeen kärkikartio pyöritettiin anturiin kiinni. Öljy läpäisee huokoskiven hitaammin kuin vesi, jolloin anturia pystyisi käytännössä pitämään hetken ilmassa. Huokosvedenpaineantureiden ilmauksessa käytettiin suorakulman muotoista messinkiputkea. Anturi työnnettiin messinkiputken sisään ja kiristettiin O-renkaiden sekä messinkiputken korkin avulla siten, että putkeen ei päässyt ilmaa. Putki täytettiin öljyllä, jonka jälkeen siihen imettiin tyhjiö putken toisesta päästä. Kun putkeen saavutettiin lähes tyhjiö, tyhjiöpumppu kytkettiin pois ja messinkiputki öljyineen ja antureineen upotettiin vettä täynnä olevaan sankoon. Sangossa messinkiputken korkki avattiin ja poistettiin anturin ympäriltä. Lopuksi anturiin asennettiin kumikalvo vedessä ja se jätettiin vesisankoon odottamaan asennusta. Anturi ei päässyt ilmauksen jälkeen enää kosketuksiin ilman kanssa ennen asentamista.

Huokosvedenpaineantureiden asennusputket tehtiin suunnitelmien mukaan oikean mittaisiksi TTY:llä, jotta asennus työmaalla olisi helppoa. Asennusputket liitettiin toisiinsa holkilla, jonka kierteisiin asennettiin putkitekniikkaa varmistamaan putken vesitiiviys.

6.1.2 Instrumenttien asennus

Kuvassa 6.3 on esitetty kohteilla asennettujen instrumentointien sijainti ratapölkkyihin nähden. Molempien kohteiden instrumentointi oli pölkkyjen suhteen identtinen. Huokosvedenpaine-, siirtymä-, ja kiihtyvyyssanturit sekä venymäliuskat liitettiin johdoilla kiinni kytkentärasioihin, jotka oli kiinnitetty dataloggeriin, joka oli edelleen usb-kaapelilla kiinni tietokoneessa. Anturien tuottama data tallennettiin ja voidaan esittää graafisesti DasyLab-ohjelmistolla. Tietokoneissa oli etäyhteys, jotta niitä pystyi ohjaamaan muualta käsin esimerkiksi ongelmatilanteissa tai tietoja hakiessa. Kohteen km 233+900 tietokone sai virtansa vaihteenlämmityslaitteelta. Kohteen km 238+280 tietokoneeseen virta tuli kahdesta aurinkopaneelista, jotka keräsivät virtaa akkuihin ja sitä kautta vaihtosuuntajan välityksellä tietokoneeseen.



Kuva 6.3. Periaatekuva instrumentoinnista molemmissa kohteissa.

Seuraavissa kappaleissa on kerrottu kuvan 6.3 mukaisten instrumentointien suunnittelu ja asennus menetelmäkohtaisesti.

Huokosvedenpaineanturit

Huokosvedenpaineanturien paikat ja syvyydet päätettiin huhtikuussa tehtyjen kairaustulosten perusteella. Molempien kohteiden CPTU-kairauskokeiden tulokset on esitetty liitteessä 1. Kairaustulosten avulla pystyttiin määrittämään maalajien kerrosrajat sekä ennakoidaan mahdollista liukupinnan paikkaa, jos pengeri ja pohjamaa menettäisi stabiliteettinsa. Huokosvedenpaineanturit suunniteltiin asennettaviksi savikerrokseen ennakoitun liukupinnan kohdalle.

Kohteen km 233+900 huokosvedenpaineantureiden paikat suunniteltiin savikerrokseen puolen metrin välein penkereen alle. Penkereen korkeus oli +11,6 metriä merenpinnasta. Saven yläkerrokseen asennettava anturi suunniteltiin radan keskilinjan kohdalle syvyyteen +7,5 m merenpinnasta. Muut radan keskilinjan alle asennettavat anturit suunniteltiin asennettaviksi tästä anturista syvemmälle savikerrokseen. Luiskaan pystysuoraan asennettavat anturit suunniteltiin asennettaviksi syvyyksille +7,0 ja +6,5 m ja vinoon kohti radan keskilinjaa asennettava anturi syvyydelle +6,5 m merenpinnasta.

Huokosvedenpaineanturit asennettiin kahdella eri käynnillä molempiin kohteisiin. Ensimmäisellä käynnillä anturit onnistuttiin asentamaan suunnitelman mukaan tavoitesyvyyksiin kohteessa km 233+900. Kuvassa 6.4 on esitetty luiskaan asennetut huokosvedenpaineanturit kyseisessä kohteessa.



Kuva 6.4. FinMeas Oy:n asentama inklinometri sekä kolme asennettua huokospaineanturia kohteessa km 233+900.

Toisella käynnillä kohteeseen km 233+900 lisättiin kaksi uutta huokosvedenpaineanturia luiskaan vinosti kohti radan keskilinjaa syvyyksille +7,1 m ja +7,5 m merenpinnasta. Anturien asennus onnistui painamalla ilman ongelmia. Taulukossa 6.1 on esitetty kohteeseen km 233+900 asennettujen huokospaineanturien paikkatiedot.

Taulukko 6.1 Kohteeseen km 233+900 asennetut huokosvedenpaineanturit sekä niiden paikat maassa.

Km 233+900						
Tunnus	Paikka	Asento	Maanpinta	Syvyys	Asennusputken pituus maassa (m)	Asennuskulma (°)
24/HP1	Penger	Suora	+11,6	+7,5	4,1	
25/HP2	Penger	Suora	+11,6	+7,0	4,6	
26/HP3	Penger	Suora	+11,6	+6,5	5,1	
33/HP4	Luiska	Vino	+10,5	+6,5	5,7	44
34/HP5	Luiska	Suora	+10,3	+7	3,4	
35/HP6	Luiska	Suora	+10,3	+6,5	3,9	
32/HP7	Luiska	Vino	+10,5	+7,5	4,5	46
31/HP8	Luiska	Vino	+10,5	+7,1	5,2	44

Kohteessa km 238+280 huokosvedenpaineanturit suunniteltiin asennettaviksi keskilinjalle syvyyksiin -2,5, -2,0 ja -1,5 metriä merenpinnasta ja luiskaan syvyyksiin -3,5, -2,5 ja -2,0 metriä merenpinnasta.

Kohteen km 238+280 penkereen korkeus on +3,9 m merenpinnasta. Ensimmäisellä käynnillä anturien asentaminen tavoitesyvyyksiin pohjamaahan penkereen keskilinjan alle kuitenkin epäonnistui, koska suojaputken pää oli kitkamaassa, jonka läpi antureita ei pystytty asentamaan. Kaikki tällä asennuskerralla asennettavat anturit päätettiin asentaa luiskaan.

Luiskaan pystysuoraan asennettavat anturit painettiin syvyyksille -2,0 m ja -3,0 m merenpinnasta. Vinoon asennettavat anturit suunniteltiin asennettaviksi syvyyksille -1,5 m, -2 m ja -2,5 m merenpinnasta. Antureita oli kuitenkin vaikea työntää maahan myös luiskassa lyhyiden suojaputkien takia. Suojaputkien päät olivat kitkamaassa tai radan rakennekerroksissa, joiden läpi anturia oli vaikea painaa. Asennusputkea työnnettiin neljän miehen voimin ja vinoon kohti radan keskilinjaa asennettaviksi suunnitellut anturit saatiin painettua lopulta syvyyksille -1,5 m, -2 m ja -2 m. Pystysuoraan asennettavat anturit asennettiin syvyyksille -2,2 m ja -3,2 m. Antureita ei saatu asennettua aivan suunniteltuihin tavoitesyvyyksiin, mutta anturit olivat kuitenkin CPTU-koekairaustulosten mukaan savikerroksessa lähellä mahdollista liukupintaa.



Kuva 6.5. Huokosvedenpaineanturin asennus kohteessa km 238+280.

Huokosvedenpaineantureita asennettiin lisää toisella asennuskäynnillä, jotta kohteessa km 238+280 olisi antureita myös suoraan penkereen keskilinjan alla olevassa savikerroksessa. Kohteeseen lisättiin kolme anturia penkereen keskilinjan kohdalle syvyyksille -0,8 m, -1 m ja -1,5 m merenpinnasta. Anturien asennus aloitettiin avaamalla asennusreikä iskemällä painokairan kärkikappaletta maahan. Kärkikappale saatiin iskettyä tukkeutu-

neen putken läpi pehmeään kerrokseen. Tämän jälkeen kairatanko ja kärkikappale nostettiin suojaputkesta pois ja anturi asennettiin saveen painamalla. Taulukossa 6.2 on esitetty kohteeseen km 238+280 asennettujen huokospaineantureiden paikkatiedot.

Taulukko 6.2 Kohteeseen km 238+280 asennetut huokosvedenpaineanturit sekä niiden paikat maassa.

Km 238+280						
Tunnus	Paikka	Asento	Maanpinta	Syvyys	Asennusputken pituus maassa (m)	Asennuskulma (°)
HP1	Luiska	Vino	+2,7	-2	5,7	57
HP2	Luiska	Vino	+2,7	-1,5	5,1	55
HP3	Luiska	Vino	+2,7	-2	5,7	58
HP4	Luiska	Suora	+2,4	-2,2	4,6	
HP5	Luiska	Suora	+2,4	-3,2	5,6	
HP6	Penger	Suora	+3,9	-1,5	4,9	
HP7	Penger	Suora	+3,9	-0,8	4,7	
HP8	Penger	Suora	+3,9	-1	5,4	

Huokosvedenpaineanturit oli ilmattu TTY:llä ja pidetty kumikalvon sisällä vesisangossa asentamiseen saakka. Huokosvedenpaineanturit asennettiin pohjamaahan jäykällä asennusputkella. Asennushetkellä huokosvedenpaineanturi liitettiin asennusputkeen kiinni. Kumikalvo irrotettiin juuri ennen asennusta aivan suojaputken yläpuolella. (Kuva 6.5) Anturi oli kosketuksissa ilman kanssa vain sekunteja ennen maahan painamista.

Kesän aikana muutaman anturin antamien mittaustulosten mukaan savikerroksen huokosvedenpaine kasvoi odottamattomasti ilman kuormituksen vaikutusta. Tätä odottamatonta huokosvedenpaineen nousua käsitellään enemmän luvussa 7.1.3. Anturien kunto ja toimivuus päätettiin testata nostamalla ne pois savikerroksesta ennen akselipainoltaan 250 kN testijunan kuormitusta. Antureiden huoltokäynti tutkimuskohteille tehtiin 15.8.-16.8.2017. Antureihin, jotka mittasivat suuria huokosvedenpaineita ilman selvää syytä, vaihdettiin huokoskivet, ne ilmattiin uudelleen ja asennettiin takaisin maahan hieman syvemmälle kuin missä ne ennen olivat olleet. Uudelleen asennetut huokosvedenpaineanturit olivat kohteessa km 233+900 anturit 33/HP4 ja 26/HP3 ja kohteessa km 238+280 anturi HP2.

Samalla huoltokäynnillä muita huokosvedenpaineantureita nostettiin tunkilla muutamia senttimetrejä ja työnnettiin alkuperäistä asennuskohtaa noin 2-5 senttimetriä syvemmälle maahan. Huokospaineantureiden nostamisen ja takaisin painamisen ajateltiin kumoavan mahdollinen asennusputkeen syntynyt vaippakitka, joka voisi aiheuttaa antureiden mitaamisissa tuloksissa esiintyneet yllättävät paineenvaihtelut.

Siirtymäanturit

Tutkimuksessa käytettiin Novotechnikin valmistamia potentiometrityypin TRS 25-antureita, joiden mitta-alue on 25 mm. Siirtymäanturit asennettiin kairatankoihin siihen kiinnitetyn profiiliputkitelakan avulla viiden vierekkäisen pölkyn keskelle. Siirtymäantureita tuli molempiin kohteisiin viisi kappaletta. Profiiliputki kiinnitettiin pulttien ja lattarautojen avulla kiinni kairaustankoihin, jotka oli kairattu kovaan pohjaan saakka. Profiiliputki ja siirtymäanturit eivät näin ollen päässeet liikkumaan penkereen mukana junien kuormittaessa rataa. Siirtymäanturit mittasivat automaattisesti viiden peräkkäisen pölkyn pystysiirtymää junien ajaessa kohteiden yli. Kuvasta 6.6 nähdään neljä profiiliputkeen kiinnitettyä siirtymäanturia.

Siirtymäantureita huollettiin huoltokäynnin aikana testaamalla niiden toimivuus ja puhdistamalla niiden liitännät. Kaksi siirtymäanturia täytyi vaihtaa kohteessa km 233+900, koska ne eivät enää rekisteröineet anturin kärjen liikettä.



Kuva 6.6. Siirtymä- ja venymäliuska-anturit kohteessa km 233+900.

Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturit asennettiin viiden pölkyn välein neljän pölkyn molempiin päihin alkaen viimeisestä siirtymäanturista. Kahdella kiihtyvyyssanturilla mitattiin saman pölkyn pystysiirtymää kuin yhdellä siirtymäanturilla, jotta niiden välistä eroa voitiin vertailla. Kiihtyvyyssanturit olivat VTI Technologies Oy:n SCA620-sarjan kiihtyvyyssantureita, joiden mitta-alue oli 12 G.

Kiihtyvyyssanturit asetettiin niissä kiinteästi olevilla magneeteilla pölkkyihin kiinnitettyihin metallilevyihin, jotta anturit olisivat tasaisella alustalla ja kiihtyvyyksistä integroidut pystysiirtymät olisivat todellisia. Vinoon asennettavat kiihtyvyyssanturit eivät mittaisi

pystysuoria kiihtyvyyksiä, jolloin mittaustuloksista integroitu siirtymä ei myöskään olisi pystysiirtymää. Molempien kohteiden kiihtyvyyssanturit mittasivat automaattisesti kohteen ohittaneiden junien aiheuttamia kiihtyvyyksiä ja pystysiirtymiä pölkyissä. Kiihtyvyyssanturien paikka ratapölkyjen päissä on esitetty kuvassa 6.7.

Kiihtyvyyssanturit maadoitettiin asennuksen aikana, jotta mittaustulosten kohina väheni. Huoltokäynnillä anturien maadoitus tarkistettiin, koska muutaman anturin mittaustulosten kohina oli kasvanut kesän aikana.



Kuva 6.7. Kiihtyvyyssanturit ratakilometrin 233+900 kohteessa.

Venymäliuska-anturit

Venymäliuska-anturit asennettiin molempiin kiskoihin samaan pölkyväliin siirtymään-
anturien kohdalle. Kumpaankin kiskoon asennettiin kaksi venymäliuska-anturia. Samaan
kiskoon asennettavat anturit asennettiin 250 mm etäisyydelle toisistaan. Venymäliuskat
suojattiin Sikaflex-massalla, jotta vesi ei päässyt vahingoittamaan antureita. Venymä-
liuska-antureilla mitattiin ohi ajavien junien pyöräkuormat. Venymäliuska-antureiden
paikka kiskossa kohteessa km 233+900 on esitetty kuvassa 6.6

6.2 Koko rataosaa mittaavat koejärjestelyt

Kouvola-Kotka rataosalta tehtiin jatkuvia jäykkyys- ja laserkeilausmittauksia paikan suh-
teen. Radan jäykkyys mitattiin TTY:n kehittämällä Stiffmaster-mittauslaitteistolla. Rata-
osan laserkeilaus tehtiin Roadscanners Oy:n laserkeilaimella vuosina 2010, 2015 ja 2017.

6.2.1 Radan jäykkyyden mittaus

Radan jäykkyys mitattiin Stiffmaster-mittauslaitteistolla kesäkuussa. Viisiakselinen ns. pidempi Stiffmaster-mittauslaitteisto kiinnitettiin täyteen lastattuun sepelivaunuun, jota veti TKA7 ratakuorma-auto. Jäykkyyden mittaus aloitettiin Kouvolan ratapihalta ja lopetettiin Kotkan ratapihalle. Mittaus tehtiin läntiseltä raiteelta noin 50 km/h nopeudella. Stiffmaster-mittauslaitteisto ajettiin läntistä raidetta pitkin myös Kotkasta Kouvolaan. Kotkasta Kouvolaan ajettaessa Stiffmaster-mittauslaitteistosta loppui akku, jonka vuoksi mittaus Kotkasta Juurikorpeen epäonnistui. Kuvassa 6.8 esitetään Stiffmaster-mittauslaitteisto ajon aikana sepelivaunussa olevan videokameran ottamasta kuvasta.



Kuva 6.8. Stiffmaster-mittauslaitteisto kohteella km 233+900.

Jatkuvan jäykkyyden mittauksen aikana mitattiin myös pistemäisiä pystysiirtymän referenssimittauksia kiihtyvyyssantureilla. Referenssikohteet sijaitsivat pehmeikköalueilla läntisellä raiteella. Ensimmäinen kohde sijaitsi ratakilometrillä 207+970 ja toinen ratakilometrillä 231+655. Referenssikohteisiin asetettiin VTI Technologies Oy:n SCA620-sarjan kiihtyvyyssantureita, joiden mittausalue oli 12 G, sekä Kyowan AS-20B venymälius-katoimisia kiskoon kiinnitettäviä kiihtyvyyssantureita, joiden mittausalue oli 20 G. SCA620-sarjan kiihtyvyyssanturit asetettiin viiteen pölkkyyden keskelle pölkkyyden viiden pölkkyyden väleihin. Kyowan anturit asetettiin kuuden pölkkyyden kohdalle molempiin kiskoihin. Kiihtyvyyssantureilla mitattiin Stiffmaster-mittauslaitteiston, sepelivaunun sekä muutaman muun kohteiden ohittaneen junan aiheuttamat pystysiirtymät, jotta Stiffmaster-mittauslaitteiston tulokset voidaan kalibroida oikeaan tasoon.

Ensimmäiseltä referenssikohteelta km 207+970 mitattiin yksi Kouvolaa kohti ajanut kiskobussi sekä Stiffmaster-mittaustiliteisto. Toiselta kohteelta km 231+655 mitattiin Kotkaa kohti ajanut tavarajuna sekä Stiffmaster-mittaustiliteisto.

6.2.2 Laserkeilaus

Kouvola-Kotka rataosa on laserkeilattu vuosina 2010, 2015 ja 2017. Vuoden 2015 keilaus tehtiin kesällä, jolloin kasvillisuus haittasi penkereen muodon tunnistamista. Vuoden 2010 ja 2017 keilaukset tehtiin keväällä, jolloin kasvillisuutta ei esiintynyt yhtä häiritsevästi. Laserkeilauksella pyrittiin tunnistamaan penkereen muotoa, jotta vuosien 2010 ja 2017 välisiä mittauksia voitaisiin verrata toisiinsa.

Tavoitteena oli selvittää luiskan yläosan eli jätkänpolun ja luiskan taitepisteen perusteella pengerleveys eri mittaushetkillä ja tulosten avulla laskea paljonko penger on levinnyt eri poikkileikkauksissa. Roadscannereilla on käytössä joitakin automaattisia laskentamenetelmiä erilaisten muotojen selvittämiseen, mutta ne eivät suoraan sovellu pengerleveysten laskentaan, sillä taitepiste on useissa tapauksissa hyvin epämääräisen muotoinen ja toisaalta kasvillisuuden määrä on muuttunut mittausten välillä. Ainakin aluksi tarkastelua tullaan tekemään siten, että pengerleveys tulkitaan pistepilvestä piirrettyjen poikkileikkauksien avulla silmämääräisesti.

6.3 Testijunien pysäytykset ja ohiajot

Pehmeikkökohteille oli tarkoituksena pysäyttää 170 kN ja 225 kN akselipainoisia suomalaisia vaunuja sekä 250 kN akselipainoisia venäläisiä vaunuja. Venäläisillä vaunuilla tarkoituksena oli myös ajaa neljä ohiajota nopeuksilla 20 km/h, 30 km/h, 40 km/h ja 50 km/h.

Pysäytyksien oli tarkoitus tapahtua kesäkuun ensimmäisellä viikolla pari viikkoa instrumentoinnin jälkeen. Venäläiset vaunut eivät kuitenkaan päässeet tällöin tulemaan, joten mittaukset ja pysäytykset tehtiin vain suomalaisilla vaunuilla.

Pysäytykset aloitettiin kohteesta km 233+900 5.6.2017. Suomalaisia vaunuja oli kymmenen, joista viisi oli 170 kN akselipainoisia ja viisi 225 kN akselipainoisia. Rataosa oli varattu kapasiteettivarauksella, jotta juna saataisiin pysäyttää radalle ilman ratatyötä ja ratatyöstä vastaavaa. Kapasiteettivaraukseen päädyttiin Finrailin, Liikenneviraston sekä VR:n päätöksellä. Vaihtoehtoina mietittiin ajoa ratatyönä, mutta tällöin testijunat eivät saisi kulkea rataosalla junina sekä tavallista junana liikennöintiä Kymminlinnan liikennepaikalta Hovinsaaren liikennepaikalle. Tavallisena liikennöintinä juna ei kuitenkaan saa pysähtyä ratalinjalle.

Juuri ennen pysäytykseen varattua kapasiteettivarausta liikenteenohjaus ei kuitenkaan suostunut päästämään junaa liikkeelle, koska kapasiteettivaraukselle ei oltu määrätty ra-

tatyöstä vastaavaa. Asia hoidettiin rataliikennekeskuksen kautta, jossa junalle tehtiin uudet aikataulut, jolla juna saisi rataliikennekeskuksen ja liikenteenohjauksen luvalla pysähtyä ratalinjalle. Aikataulun mukaan junalla kestäisi yli tunti siirtyä Hovinsaaren liikennepaikalta Kymin liikennepaikalle ja takaisin.

Juna pysäytettiin ensin 170 kN akselipainoisten vaunujen ollessa instrumenttien kohdalla. (Kuva 6.9) Junan pysäytyksessä oikeaan kohtaan auttoi vaihtotyönjohtaja, joka oli radiopuhelimella yhteydessä junan kuljettajaan. Suomalaisen junan telit olivat huomattavasti kauempana toisistaan kuin instrumenttien paikkojen määrittämisessä käytetyn VOK-vaunun telit, minkä takia suomalaisten vaunujen viereisiä telejä ei saatu osumaan täsmälleen kohteeseen asennettujen siirtymäantureiden ja huokospaineantureiden kohdalle.

Junan ensimmäisen pysäytyksen kesto oli 35 minuuttia. Pysäytyksen jälkeen juna ajettiin Kymin liikennepaikalle, jossa veturi siirtyi junan toiseen päähän ja juna ajettiin takaisin kohteeseen 225 kN akselipainoisten vaunujen pysähtyessä instrumenttien kohdalle. Toinen pysäytys kesti noin 41 minuuttia.



Kuva 6.9. Pysäytetty Hai-selluloosavaunu kohteessa km 238+280.

Kohteen km 238+280 mittaukset suomalaisella kalustolla tehtiin seuraavana päivänä 6.6.2017. Pysäytykset tehtiin vaihtotyönä, koska kohde oli riittävän lähellä Hovinsaaren liikennepaikkaa ja kapasiteettivarausta ei saanut käyttää ilman ratatyöstä vastaavaa. Juna ajettiin Hovinsaaren liikennepaikalta kohteeseen, johon se pysäytettiin vaihtotyönjohtajan avustuksella. Pysäytyksen jälkeen se työnnettiin takaisin liikennepaikalle. Juna py-

säytettiin ensin 170 kN:n akselipainoisten vaunujen ollessa instrumenttien kohdalla ja pysäytys toistettiin sen jälkeen 225 kN:n akselipainoilla. Ensimmäinen pysäytys kesti noin 39 minuuttia ja toinen pysäytys kesti noin 71 minuuttia. Kuvassa 6.9 on kohteeseen km 238+280 pysäytetty suomalainen selluloosavaunu.

Venäläisten vaunujen kuormitusvaikutus mitattiin 23.8.2017, jolloin antureiden asennuksesta oli kulunut jo lähes kolme kuukautta. Viikkoa aikaisemmin instrumenttien kunto tarkastettiin, kuten kappaleessa 6.1.2 kuvattiin.

Venäläisistä vaunuista koottu testijuna ajoi kahdeksan ohiajoa ja pysähtyi kerran molemmissa kohteissa. Testijunalla ajettiin eri nopeuksilla Hovinsaaren liikennepaikan ja Juurikorven liikennepaikan välillä. Testijunan nopeudet vaihtelivat 50 km/h ja 10 km/h välillä. Pysäytykset molempiin kohteisiin tehtiin vaihtotyönä, jonka oltiin kesäkuussa huomattu olevan helpoin tapa saada pysäytettyä juna kohteisiin. Kohteelle km 238+280 juna vedettiin Hovinsaaren liikennepaikalta ja työnnettiin takaisin pysäytyksen jälkeen. Kohteelle km 233+900 testijuna vedettiin Kymin liikennepaikalta ja pysäytyksen jälkeen työnnettiin takaisin Kymin liikennepaikalle. Kuvassa 6.10 testivaunu on pysäytettynä kohteelle km 233+900.



Kuva 6.10. Pysäytetty 250 kN:n akselipainoisista vaunuista koottu testijuna kohteessa km 233+900.

Taulukossa 6.3 on listattu testijunien pysäytysten ajankohdat ja kestot molemmissa tutkimuskohteissa. Suomalaisella testijunalla tehdyt pysäytykset ajoittuivat peräkkäin, jolloin penkereiden ja pohjamaiden huokosvedenpaineet, pystysiirtymät ja sivuttaissiirtymät eivät ehtineet täysin palautua takaisin mittausuurekohtaisille referenssitasoille pysäytysten välissä.

Taulukko 6.3 Testijunien pysäytysten ajankohdat ja kestot.

Kohde	Akselipaino			
	[kN]	Päivämäärä	Kellonaika	Kesto [min]
km 233+900	170	5.6.2017	23:23	35
km 233+900	225	6.6.2017	0:30	41
Km 233+900	250	23.8.2017	10:35	67
km 238+280	170	6.6.2017	7:40	39
km 238+280	225	6.6.2017	9:00	71
km 238+280	250	24.8.2017	10:38	67

7. MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI

7.1 Huokosvedenpaine

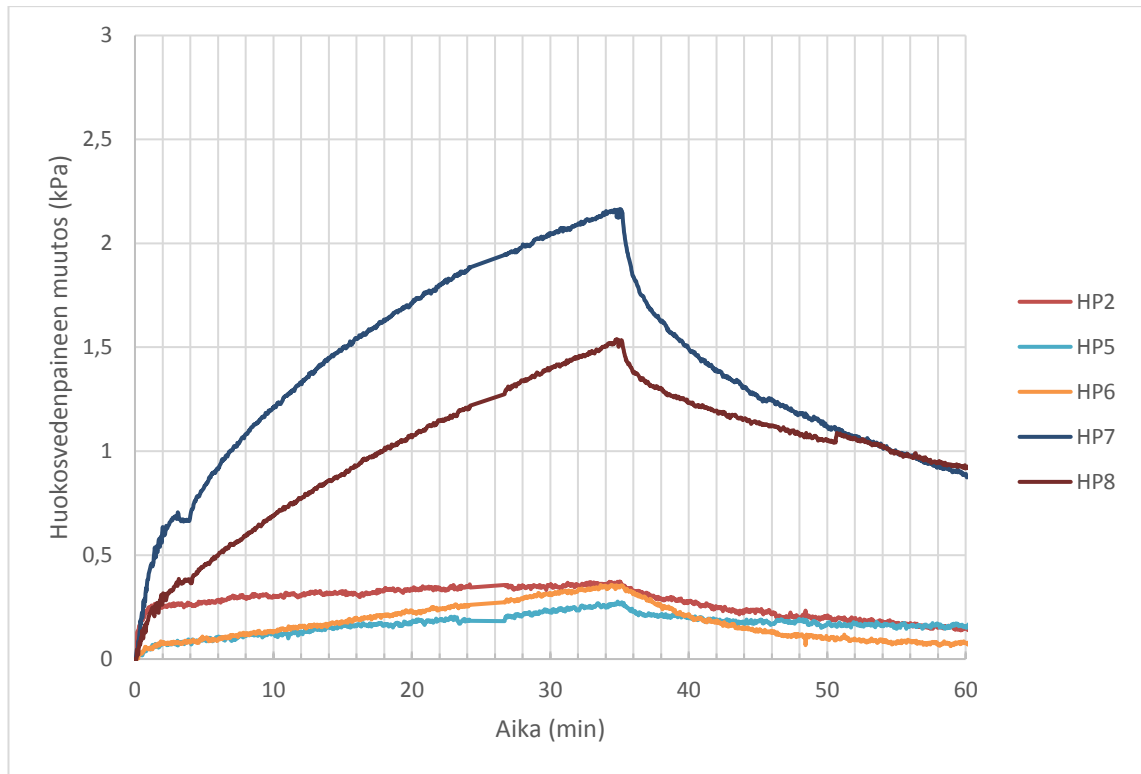
Huokosvedenpaineen muutosta mitattiin penkereen alla olevassa savikerroksessa. Mittaustuloksien tulkinnassa keskityttiin testijunien pysäytyksien aiheuttamiin paineen muutoksiin. Keskeisimpinä ilmiöinä tutkittiin huokosvedenpaineen muutoksen nopeutta ja suuruutta kuormitusten aikana.

7.1.1 Kohde km 233+900

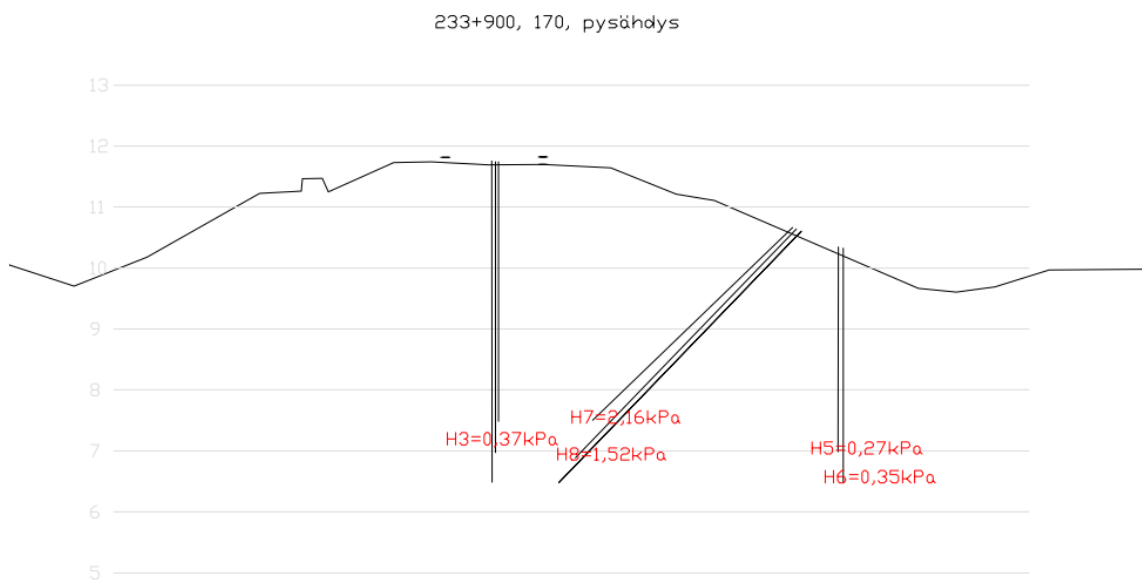
Kohteen km 233+900 pehmeikön staattiset kuormituksen aloitettiin 170 kN akselipainoisilla vaunuilla, kuten luvussa 6.3 kerrottiin. Suomalaisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin instrumentoituun kohteeseen siten, että kahden eri vaunun telit olivat siirtymä- ja huokosvedenpaineantureiden kohdalla.

Huokosvedenpaine alkoi odotetusti kasvamaan, kun vaunut pysäytettiin suunniteltuun paikkaan. Kuvassa 7.1 on esitetty huokosvedenpaineiden nousu 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormittaessa rataa ja pohjamaata huokosvedenpaineantureiden kohdalla. Mitattu huokosvedenpaine savikerroksessa käyttäytyi lähes logaritmisesti pysäytyksen ajan. Logaritminen kasvu näkyi varsinkin myöhemmin asennetuissa antureissa. Paineen kasvu siis hidastui ajan suhteen.

Kaksi anturia reagoi voimakkaasti kuormituksen lisääntymiseen. Huokosvedenpaineanturit HP7 ja HP8 mittasivat noin 1,5 kPa ja 2,2 kPa suuruisen huokosvedenpaineen kasvun referenssitason nähden. Referenssitasona käytettiin anturikohtaista, juuri ennen pysäytystä, mitattua huokosvedenpaineen arvoa. Antureiden HP1, HP3 ja HP4 mittaustulos ei kasvanut kuormituksen vaikutuksesta, joten niiden tulos on jätetty pois kuvista 7.1 ja 7.2. Anturit HP2, HP5 ja HP6 mittasivat hitaan kasvun huokosvedenpaineessa kuormituksen aikana. Kuvassa 7.2 on esitetty huokospaineantureiden paikat ja suurimmat mitatut paineen muutokset radan poikkileikkauksessa.



Kuva 7.1. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.



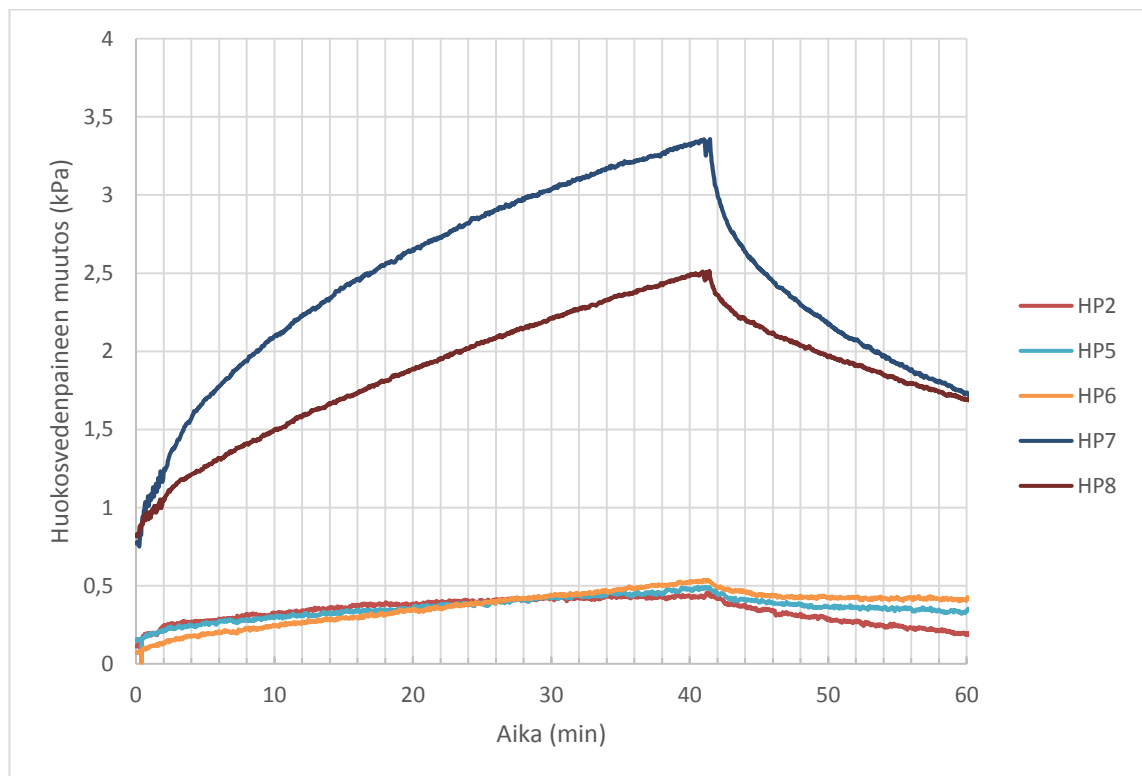
Kuva 7.2. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

Toinen kuormitus tapahtui noin 32 minuuttia ensimmäisen kuormituksen jälkeen. Ensimmäisen kuormituksen aiheuttama huokosveden ylipaine palautui kuormitusten välisen ajan. Palautumisen aikana antureiden mitaamat huokosveden ylipaineet laskivat noin puoleen ensimmäisen kuormituksen aiheuttamasta ylipaineesta.

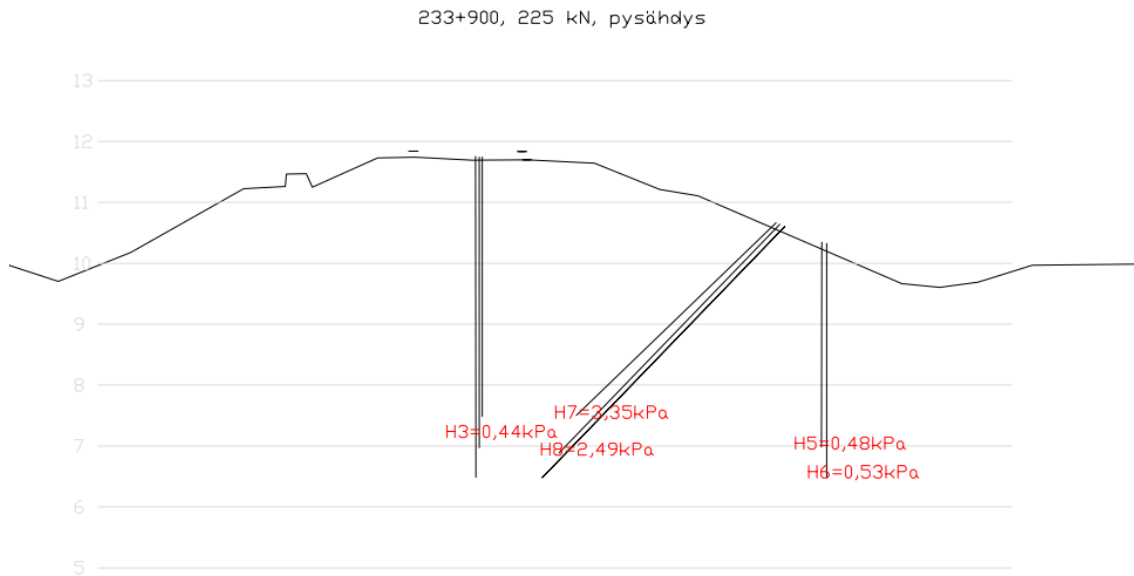
Seuraava kuormitus tehtiin 225 kN akselipainoisilla vaunuilla. Raskaammat vaunut pysäytettiin siirtymä- ja huokospaineantureiden kohdalle. Huokosvedenpaineen nousu savi-kerroksessa ei ajan suhteen ollut paljon nopeampaa kuin aikaisemmassa pysäytyksessä, minkä voi selittää maahan jäänyt ylipaine. Huokosvedenpaineen logaritminen kasvu on kuitenkin saman muotoinen kuin 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksessa.

Anturien mitaamat huokosvedenpaineet kasvoivat anturikohtaisesti samalla tavalla kuin ensimmäisessä kuormituksessa. Anturit HP7 ja HP8 mittasivat hieman suuremman huokosvedenpaineen kasvun 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksessa kuin 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksessa.

Kuvassa 7.3 referenssitaso on edelleen hetki ennen ensimmäistä kuormitusta. Kuvan pysäytyselin kohdalla nähdään anturikohtainen huokosvedenpaine ennen 225 kN akselipainoisen vaunun kuormitusta. Kuvassa 7.4 on esitetty huokosvedenpaineen kokonaisuutos kuormitusten ajalta kohteen km 233+900 poikkileikkauksessa esitettynä.



Kuva 7.3. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

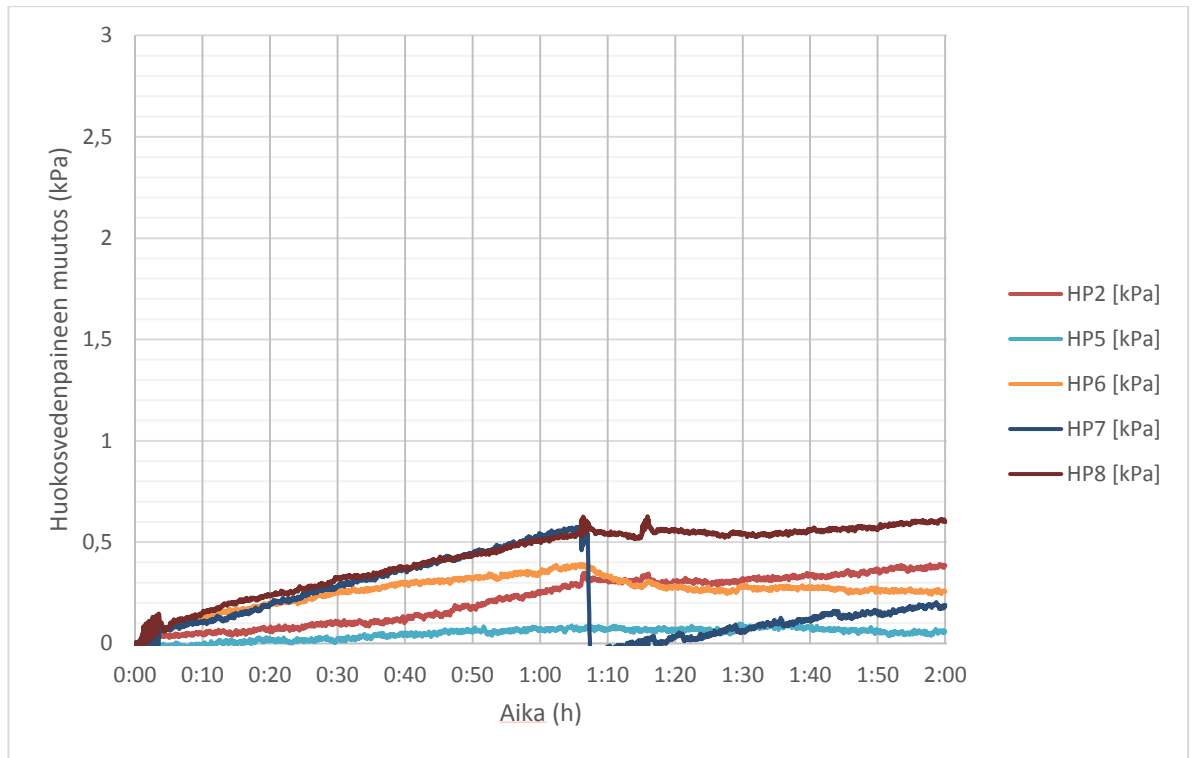


Kuva 7.4. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

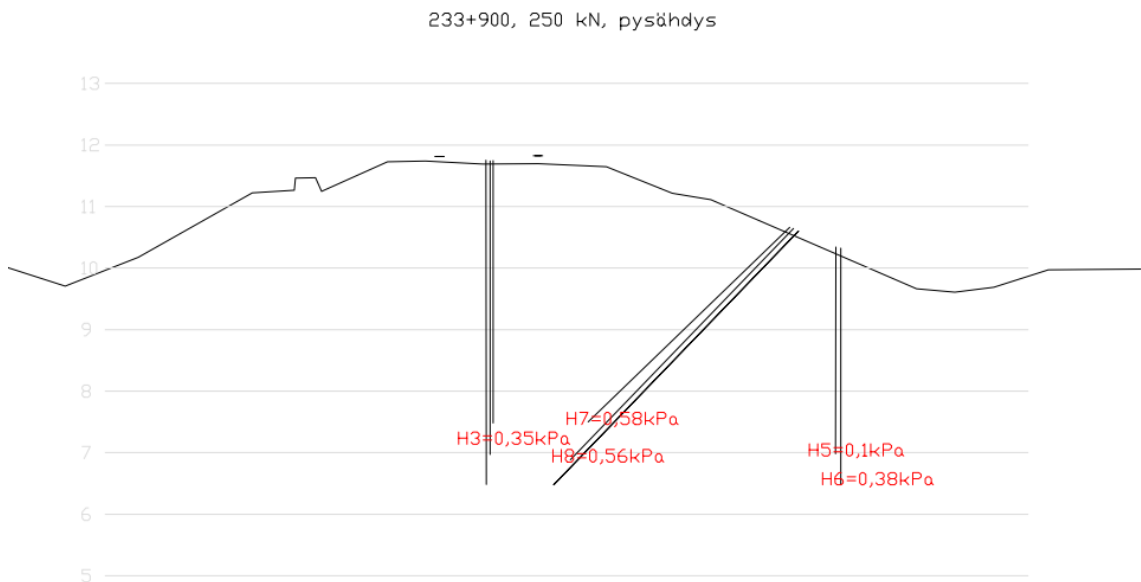
Kuten luvussa 6.3 todettiin, venäläisistä 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin kohteeseen, kun huokosvedenpaineanturit olivat olleet asennettuina pohjamaahan vajaat kolme kuukautta.

Kohteessa km 233+900 250 kN akselipainoisilla vaunuilla tehty kuormitus oli ajaltaan hieman pidempi kuin alkukesällä tehdyt suomalaisten vaunujen pysäytykset. Mitattu huokosvedenpaine ei käyttäytynyt samalla tavalla kuin aikaisemmissa 170 kN ja 225 kN akselipainoisilla vaunuilla tehdyissä kuormituksissa. Tällä kertaa mikään anturi ei reagoinut odotetusti pysäytykseen. Antureiden odotettiin mittaavan noin 3-4 kPa:n ylipainetta kuormituksen aikana. Kuvassa 7.5 on esitetty viiden anturin tulokset, joissa kuormitus ilmeni hitaana noin 0,5 kPa/h huokosvedenpaineen kasvuna. Kuvassa 7.6 on esitetty suurimmat anturikohtaiset huokosvedenpaineen muutokset kohteen km 233+900 poikkileikkauksessa. Kasvu oli samaa tasoa kuin antureiden HP2, HP5 ja HP6 mittaamissa huokosvedenpaineissa edellisissä pysäytyksissä.

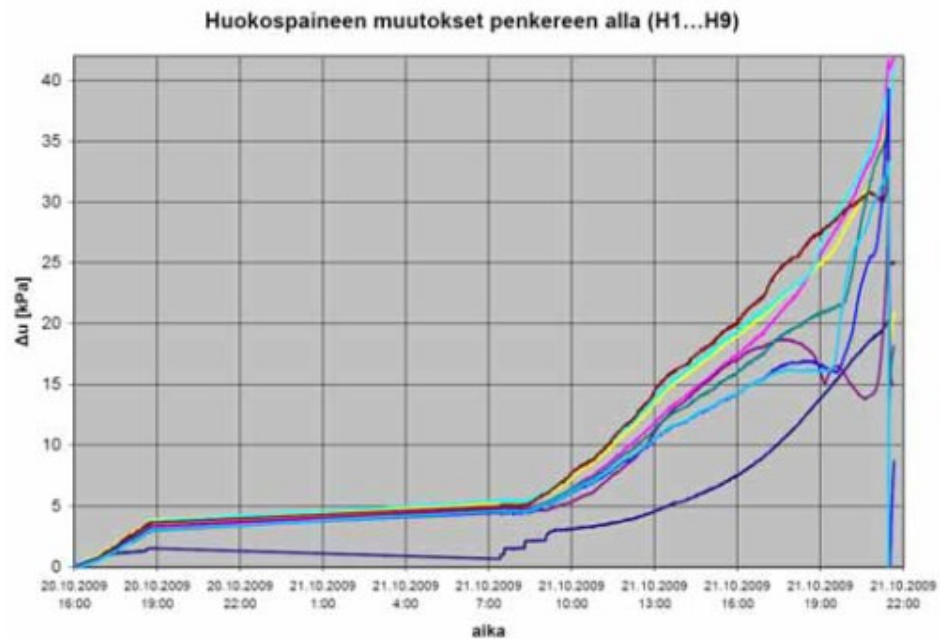
Näiden antureiden mittaamaa huokosvedenpaineen nousua voi verrata Perniön sorrutuskokeessa tapahtuneeseen huokosvedenpaineen nousuun, kun penkereellä seisotettiin merikonttia ilman kuorman kasvattamista sortumaa edeltävänä päivänä. Perniön sorrutuskokeen huokospaineen nousu on esitetty kuvassa 7.7. (Lehtonen 2010) Perniön sorrutuskokeessa staattisen muuttumattoman kuorman kuormittaessa rataa huokosvedenpaine nousi hitaalla noin 0,2 kPa/h nopeudella.



Kuva 7.5. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

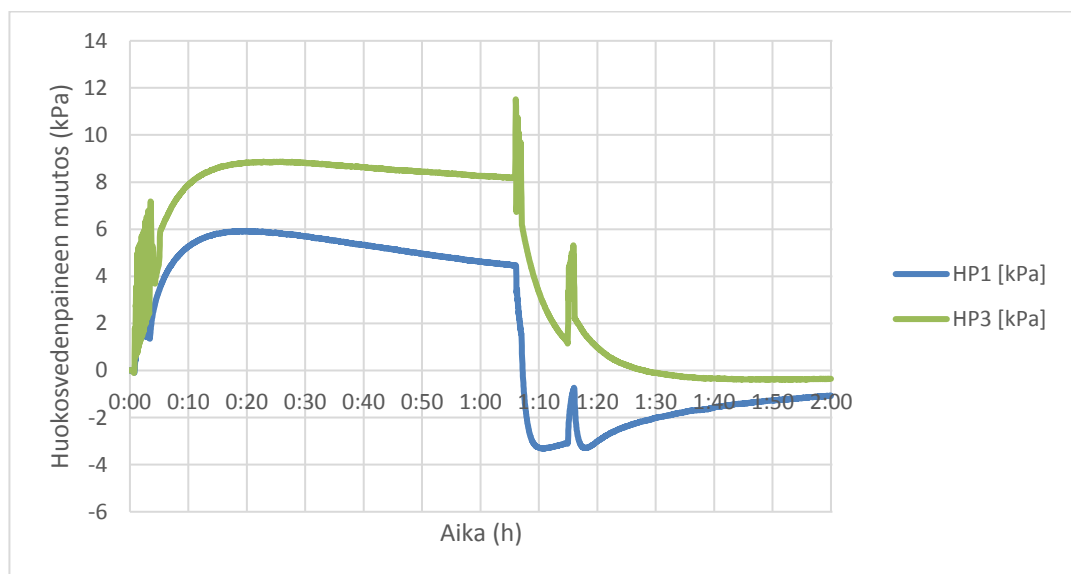


Kuva 7.6. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisen vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.



Kuva 7.7. Perniön sorrutuskokeen huokosvedenpaineen muutokset penkereen alla. (Lehtonen 2010)

Anturien HP1 ja HP3 mitaamat huokosvedenpaineet kasvoivat voimakkaasti kuormituksen aikana. (Kuva 7.8) Mitattu huokosvedenpaineen arvo nousi näissä antureissa jopa tasolle 10 kPa, mutta lähti laskemaan heti nopean nousun jälkeen hitaasti. Anturien mitaama huokosvedenpaineen muutos vaikutti asennustilanteessa tapahtuneelta paineen muutokselta, joten voi olettaa, että anturi pääsi junan tullessa mittaushetkelle painumaan radan mukana hieman syvemmälle saveen aiheuttaen suurta ylipainetta. Kuorman poistuttua huokosvedenpaine laski referenssisitasoa alemmaksi ja lähti hiljaa palautumaan kohti referenssisitasoa.

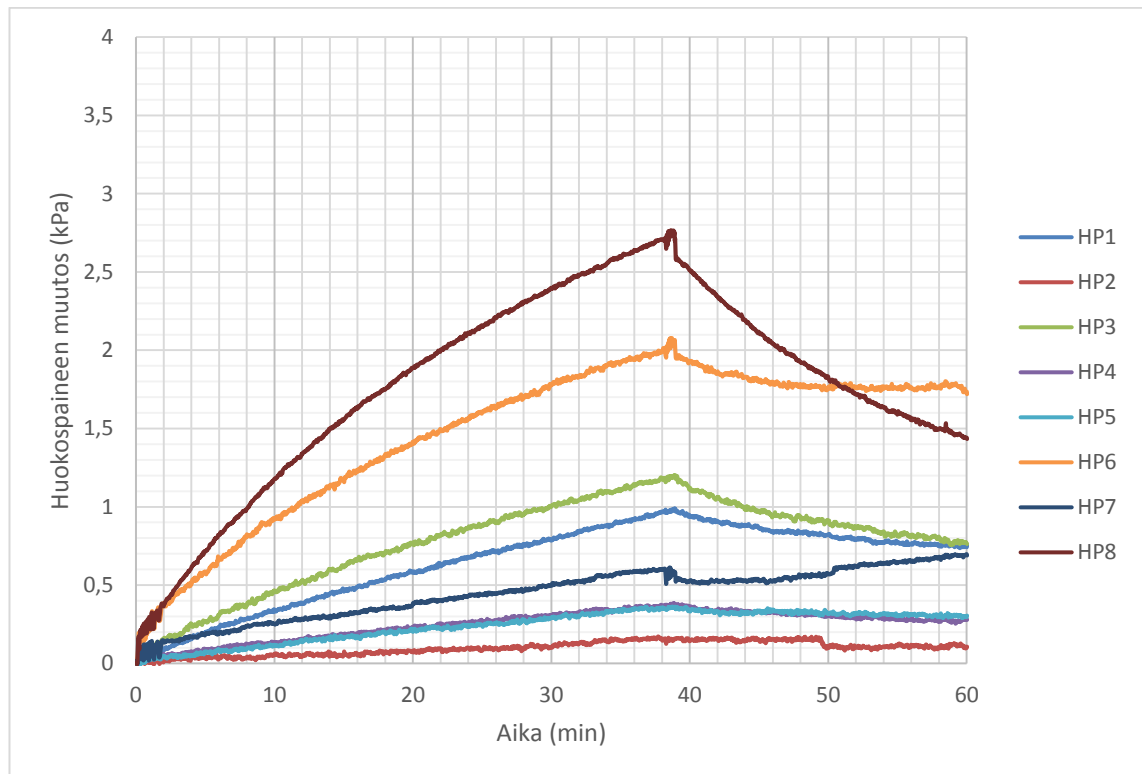


Kuva 7.8. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla antureissa HP1 ja HP3.

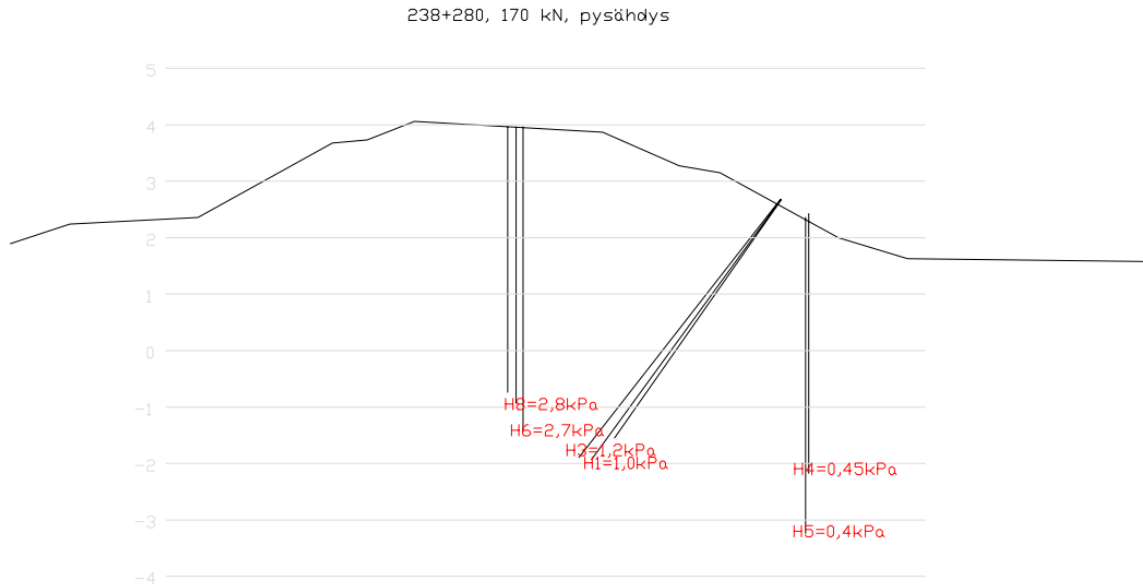
7.1.2 Kohde km 238+280

Huokosvedenpaineantureita oli asennettu kahtena eri ajankohtana tutkimuskohteeseen km 238+280, kuten luvussa 6.1.2 kerrottiin. Pysäytyksen aikana kohteeseen myöhemmin asennetut anturit reagoivat aikaisemmin asennettuja antureita voimakkaammin kuorman vaikutukseen. Kohteeseen km 238+280 myöhemmin asennetut anturit oli asennettu suoraan radan keskilinjän kohdalle savikerrokseen, jossa huokosvedenpaineen tulisikin kasvaa voimakkaimmin.

Huokosvedenpaine alkoi odotetusti nousemaan junan pysähtyessä mittauskohteelle. Kuvassa 7.9 on esitetty huokosvedenpaineiden nousu 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksessä. Huokosvedenpaine kasvoi hidastuen pysäytyksen ajan. Referenssitasona käytettiin anturikohtaista huokosvedenpaineen arvoa juuri ennen testijunan pysäyttämistä kohteelle km 238+280. Kuvassa 7.10 on esitetty anturikohtainen suurin huokosvedenpaineen muutos radan poikkileikkauksessa.



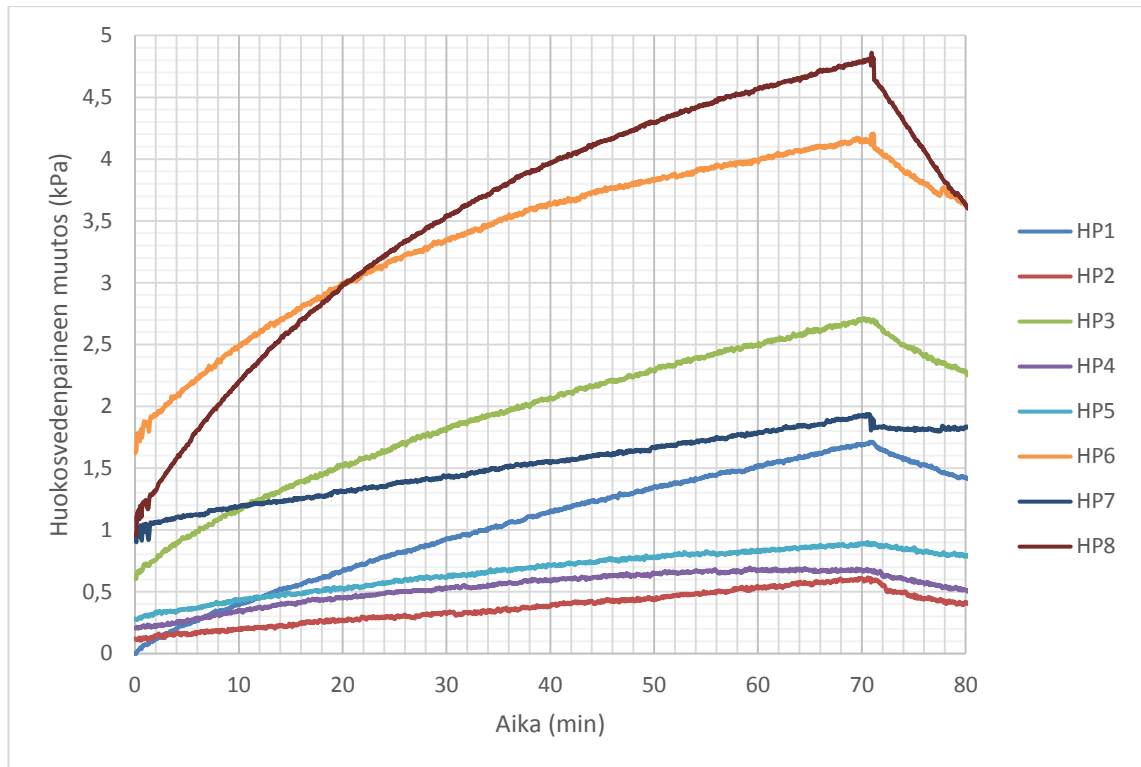
Kuva 7.9. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.



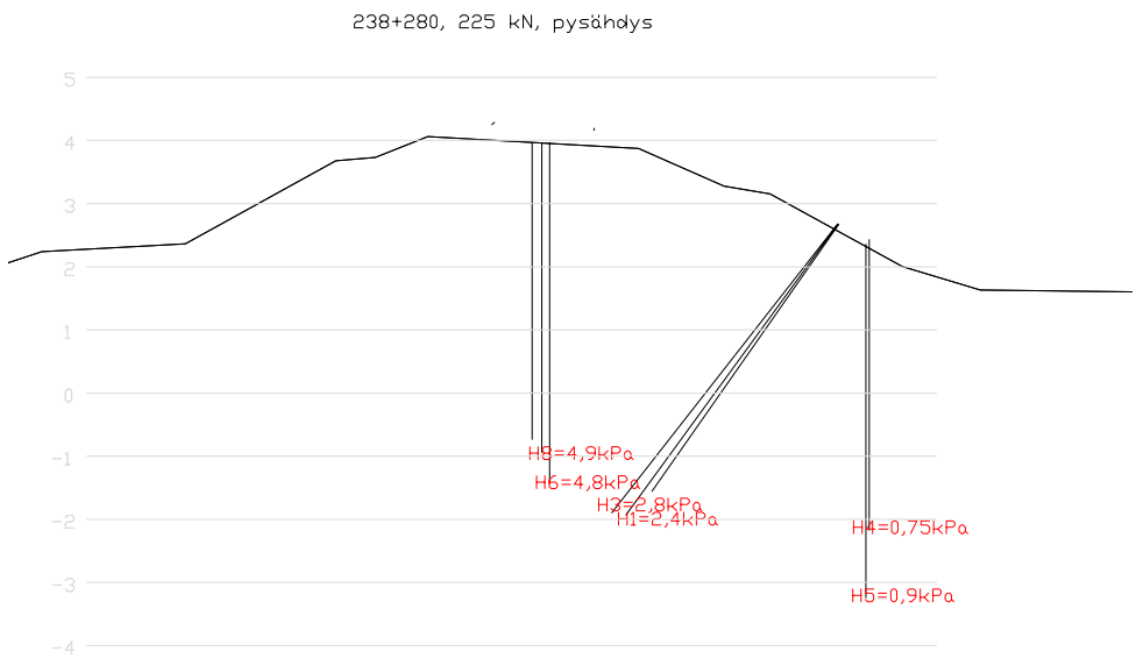
Kuva 7.10. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

Kuvasta 7.10 huomataan, kuinka huokosvedenpaineen muutos on suurinta ratapenkereen keskellä, missä pohjamaan kuormitus on suurin. Savikerroksen yläosassa muutos on hieman suurempaa kuin alempana savikerroksessa. Luiskasta vinosti kohti radan keskilinjaa asennettujen anturien mittaamat huokosvedenpaineet kasvoivat staattisen kuorman vaikutuksesta odotetusti. Niillä mitattu muutos oli huomattavasti pienempää kuin radan keskilinjalta asennetuilla antureilla mitatuissa huokosvedenpaineissa. Nämä anturit olivat hieman syvemmällä kuin radan keskeltä asennetut anturit olivat, mistä syystä myös huokosvedenpaineen kasvu on hieman pienempää. Savikerroksessa kauempana radasta huokosvedenpaine kasvoi selvästi vähemmän kuin suoraan radan keskilinjan alla.

Ensimmäisen pysäytyksen jälkeen kohteen pohjamaa ennätti palautua noin 40 minuuttia. Tämän jälkeen kohteeseen pysäytettiin 225 kN akselipainoiset vaunut. Huokosvedenpaine pieneni palautumisen aikana lähes logaritmisesti anturista riippuen noin puoleen siihen syntyneestä ylipaineesta. Tällöin 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksessä huokosvedenpaine oli vielä hieman ylipaineen puolella. Kuvassa 7.11 on esitetty huokosvedenpaineen muutokset anturikohtaisesti ajan funktiona 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana. Kuvan mittaustulosten referenssitasona on ajanhetki juuri ennen 170 kN pysäytystä, mistä johtuen kuvan ajanhetkellä nolla mittaustulos on ylipaineen puolella.



Kuva 7.11. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

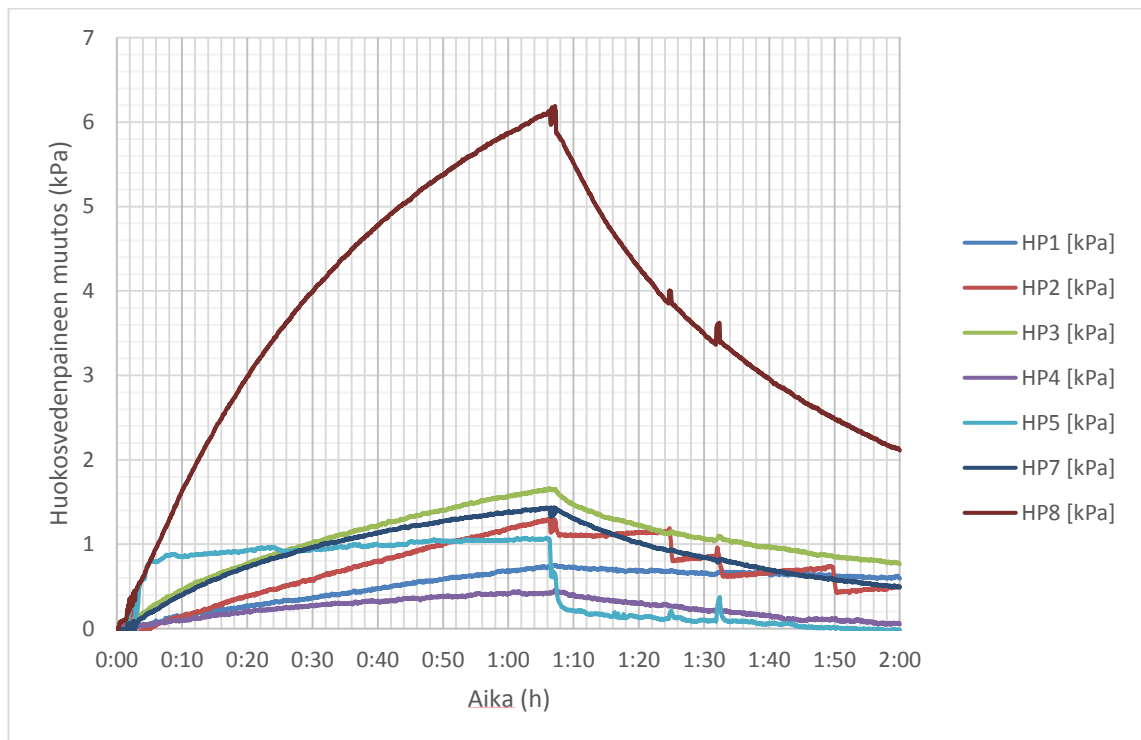


Kuva 7.12. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

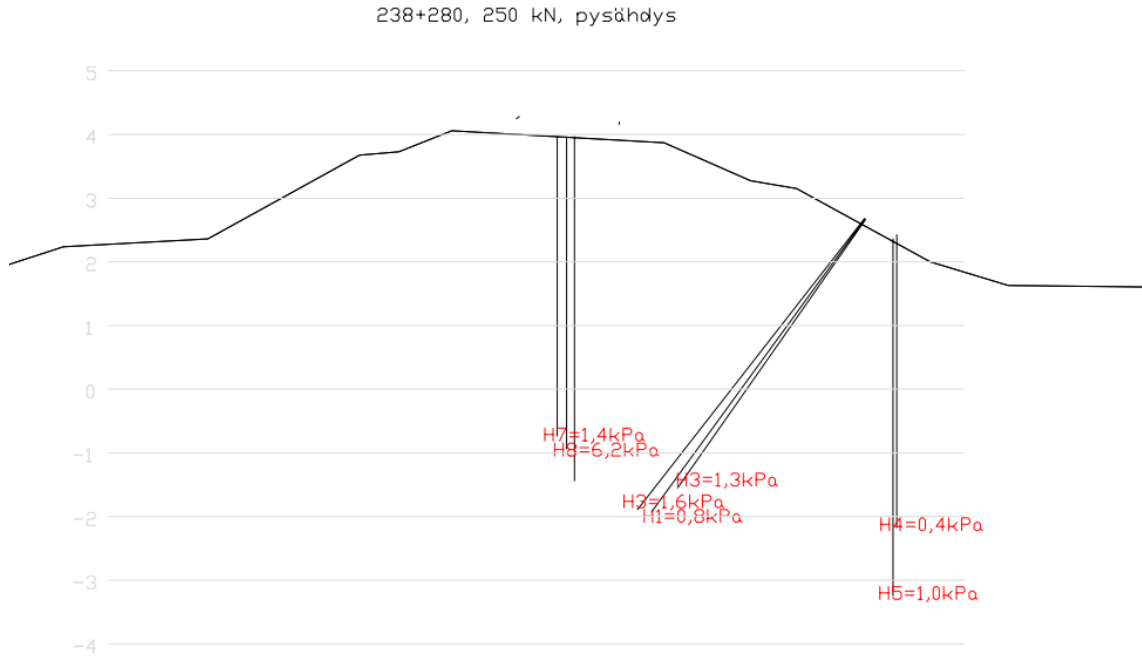
Kuvassa 7.12 on huokosvedenpaineantureiden mittaamat suurimmat huokosvedenpaineen nousut kahden kuormituksen ajalta radan poikkileikkaukseen piirrettynä. Huokos-

vedenpaineen muutos pohjamaassa oli samankaltaista kuin aikaisemmassa 170 kN akselipainoisen junan pysäytyksessä. Suurin ylipaine mitattiin suoraan penkereen alla olevasta savikerroksesta ja pienin ylipaine pystysuoraan luiskasta asennetuilla antureilla. Ylipaine oli mittaustulosten mukaan koko savikerroksessa suurempaa kuin 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana.

Venäläisistä 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin kohteeseen km 238+280 24.8.2017, jolloin anturit olivat olleet maassa jo lähes kolme kuukautta. Antureiden mitaaman huokosvedenpaineen odotettiin kasvavan hieman enemmän kuin aikaisemmissa pysäytyksissä. Kuitenkin vain anturi HP8 mittasi odotetun huokosvedenpaineen kasvun. Muiden antureiden mitaamat huokosvedenpaineen muutokset olivat lähes samankaltaisia kuin aikaisemmissa pysäytyksissä, mutta huokosvedenpaineen kasvu oli hitaampaa. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset on esitetty kuvissa 7.13 ja 7.14. Kuvassa 7.14 mittaustulokset on esitetty ratapenkereen poikkileikkauksessa.



Kuva 7.13. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.



Kuva 7.14. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

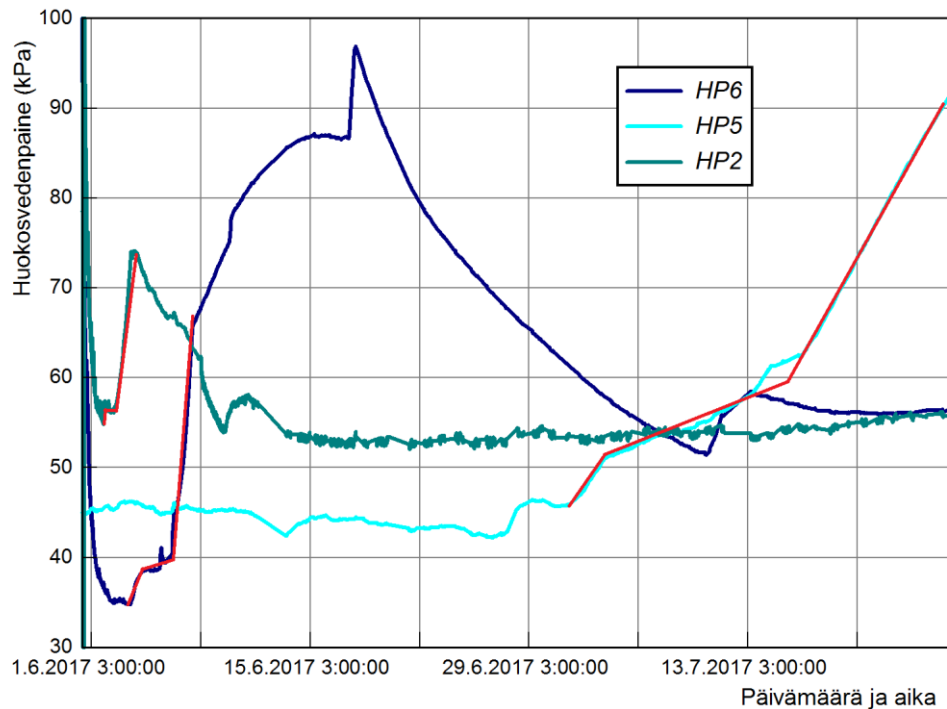
Huokosvedenpaineen käyttäytyminen kuormitusten alla ei ollut jokaisen anturin mittaustuloksen osalta odotettua. Kohteessa km 238+280 odotettiin huokosvedenpaineen kasvavan lähes kaikissa mittaustuloksissa anturin HP8 mittaustuloksen tavoin. Suomalaisen vaunujen kuormituksissa huokosvedenpaine kasvoi savikerroksessa lähes odotetusti, mutta venäläisten vaunujen kuormittaessa ratarakennetta ja pohjamaata olivat anturien mittaamat huokosvedenpaineet pienempiä kuin odotettiin.

7.1.3 Huokosvedenpaineen mittaamisen haasteet

Huokosvedenpaineen mittaamisessa oli koko mittausten ajan haasteita. Kaikki anturit mittasivat suurempaa huokosvedenpainetta kuin anturien syvyydessä vallitseva pohjavedenpaine edellyttäisi. Anturit mittasivat koko ajan pientä ylipainetta, mikä voi vaikuttaa pysäytyksien aikana mitattuihin huokosvedenpaineen kasvuihin. Mitattujen huokosvedenpaineiden kasvu voi olla hitaampaa, koska savessa vallitsee valmiiksi jo ylipaine. Mittausten perusteella ei tiedetä, oliko mitattu huokosvedenpaine todellinen savessa vallitseva paine vai pelkästään anturissa vallitseva paine.

Anturien asentamisen jälkeen muutamat anturit alkoivat myös mitata erittäin suuria huokosvedenpaineita. Eri anturien mittaamat ylipaineet eivät kehittyneet samaan aikaan eivätkä samalla aikavälillä, mutta ylipaineen kehittyminen oli samankaltaista. Ylipaine kehittyi ensin nopeasti muutamia kilopascaleita, jonka jälkeen nousu hidastui anturista riippuen 1-4 päiväksi. Tämän hitaamman ylipaineen kehittymisen jälkeen paine kehittyi jäl-

leen muutaman vuorokauden aikana anturista riippuen 20-50 kPa. Tämän ylipaineen kehittymisen jälkeen anturien mitaamat paineet alkoivat laskea hiljalleen kohti normaalia painetta. Muutaman anturin mitaustuloksissa erittäin suuri paine pysyi viikkoja. Anturien mitaamat huokosvedenpaineet eivät palautuneet koskaan laskennalliselle huokosvedenpaineen tasolle vaan jäivät jopa 40 kPa ylipaineeseen. Kuvassa 7.15 on esitetty kolmen anturin mitaustulokset, joissa ilmiö on merkitty punaisella viivalla. Samanlaista ylipaineen kehittymistä on havaittu muun muassa Järvenpäässä vuonna 2017 (Ylönen 2017; Tolla 2017).



Kuva 7.15 Kolmen anturin mitaama huokosvedenpaineen selittämätön käyttäytyminen.

Ylipaineen kehittymiselle etsittiin teorioita ja hypoteeseja mitausten ajan sekä mitausten jälkeen. Hypoteeseja varten konsultoitiin monia alan ammattilaisia kuten dosentti Antti Ojalaa Geologian tutkimuskeskuksesta ja projektipäällikkö Pirjo Kuulaa Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä.

Ensimmäiset teorit keskittyivät huokosvedenpaineantureiden asennustapaan. Anturit asennettiin kiinteän asennusputken varassa ja putket jätettiin maahan kiinni antureihin. Putkiin oletettiin muodostuvan vaippakitkaa, joka vaikuttaisi alaspäin, työntäen anturia koko ajan pienellä voimalla saveen. Anturi olisi tällöin koko ajan asennustilanteen kaltaisessa tilassa. Tämän teorian pohjalta huokospaineantureita käytiin nostamassa ja laskeudessa hieman syvemmälle saveen. Anturien nostaminen hieman ylemmäs oletettiin kumoavan asennusputken pintaan syntynyttä vaippakitkaa.

Koska vaippakiteoria ei ollut ainakaan ainut syy anturien mittaamille huokosveden ylipaineille, alettiin pohtia antureiden sisällä tai pinnalla tapahtuvia kemiallisia reaktioita. Anturin huokoskiven läpi on mahdollista tapahtua osmoosia, jolloin anturin sisällä oleva öljy korvautuisi savessa olevalla vedellä tai muulla nesteellä. Yhtenä hypoteesina pohdittiin, että anturiin voisi päästä maassa muodostuvia kaasuja kuten metaania, jotka aiheuttaisivat ylipaineen anturin sisällä.

Hypoteesi esitettiin dosentti Ojalalle. Ojalan mukaan kaasu voisi aiheuttaa antureissa ylipainetta, mutta ei aivan niin paljon kuin mitä kesällä havaittiin. Ojalan mukaan savessa voi olla erilaisia kerrostumia, joita pitkin kaasut, kuten metaani, voivat liikkua vaakasuunnassa maassa. Yhtenä teoriana esitettiin, että kaasut pääsisivät anturiin sisään, mutta eivät enää ulos aiheuttaen mittaustuloksissa suurta painetta. Paineen purkautuminen voisi selittyä kaasun karkaamisella anturin huokoskiven ja kärjen välisen tiivisteiden peittäessä junaliikenteen aiheuttaman värinän vaikutuksessa.

Ojala kertoi vuonna 2017 pohjavesien olleen ennätyskellisen alhaalla aiheuttaen joidenkin maakerroksien pääsyn tekemisiin hapen kanssa. Nämä maakerrokset eivät ole olleet hapen kanssa tekemisissä moniin vuosiin tai jopa vuosikymmeniin, minkä takia niistä voi muodostua kaasuja maahan ja sitä kautta pohjaveteen. Nämä kaasut pystyvät liikkumaan maassa ja voivat päätyä anturien luokse aiheuttaen mahdollista paineen kasvua mittaustuloksissa. Kaasujen olemassaolo savessa on myös erittäin vaikea määrittää, koska maassa olevista kaasuista on hyvin hankalaa ottaa näytteitä tai kokeita.

Muiden teorioiden ja hypoteesien ohessa antureissa epäiltiin tapahtuvan jonkinlainen pintareaktio saven ja huokoskiven kanssa, joka kasvattaisi painetta anturin sisällä. Tämän teorian innoittamana kaksi Kotkasta pois haettua anturia asetettiin Kotkan savella täytetyn kumin sisälle ja upotettiin muutaman metrin syvyyteen veteen. Paineen nousua ei kuitenkaan saatu aikaiseksi.

Kotkasta tuotuja suuren ylipaineen mitanteita antureita testattiin Tampereen teknillisellä yliopistolla. Anturit näyttivät ilmassa sekä muutaman metrin syvyydessä vedessä oikeita arvoja, joten anturit toimivat mittauksissa täysin oikein. Antureihin syntynyttä ylipainetta ei voida vielä selittää.

7.2 Pystysiirtymä

Pystysiirtymää mitattiin siirtymä- ja kiihtyvyyssantureilla. Radassa tapahtuva palautuva painuma on pystysiirtymää, joka palautuu täysin kuormituksen poistuttua. Pystysiirtymän mittaustuloksista saadaan myös selville penkereessä tai pohjamaassa mahdollisesti tapahtuvat pysyvät muodonmuutokset. RATO 3:n mukaan suurin sallittu palautuva painuma mitoitusakselipainon suuruisen kuorman vaikutuksesta saa olla enintään 4 mm. (Liikennevirasto 2014)

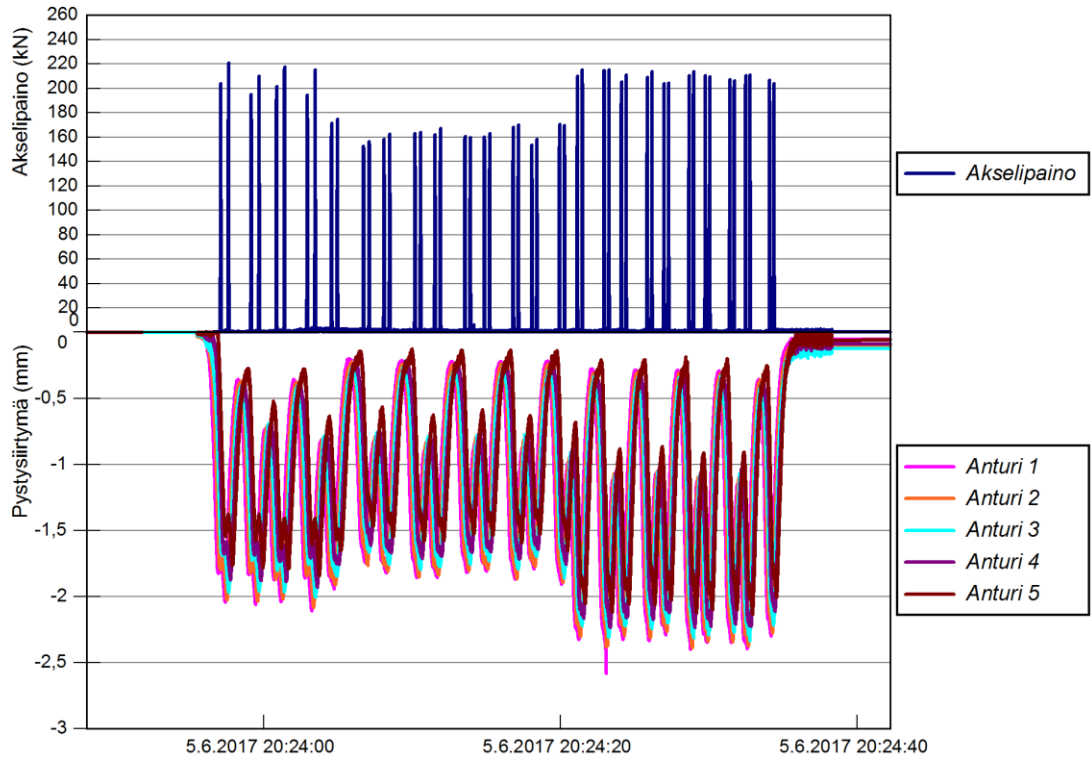
Pystysiirtymän mittaustulokset on esitetty tässä tutkimuksessa viiden siirtymäanturin mitaamina arvoina. Siirtymäanturit olivat asennettu pölkkyjen keskelle viiteen peräkkäiseen pölkkyyn ja kiihtyvyysanturit neljään eri pölkkyyn viiden pölkyn välein pölkkyjen molempiin päihin. Pystysiirtymää verrataan kuvissa akselipainoon, jotta sen vaikutusta pystysiirtymän suuruuteen on helpompi arvioida. Akselipaino on mitattu kiskossa olevilla venymäliuskoilla.

Siirtymäanturien virheenä voidaan pitää noin $\pm 0,1$ mm. Virhe johtuu kairatankojen ja siirtymäanturien mahdollisesta liikkeestä toisiinsa nähden esimerkiksi lämpölaajenemisen seurauksena, kairatankojen liikkeestä suhteessa rataan tai antureiden liikkeestä suhteessa ratapölkkyihin. Mittaustuloksista kuitenkin huomataan, että junan yliajon vaikutus nollakohtaan on ollut maksimissaan 0,1 mm.

7.2.1 Kohde km 233+900

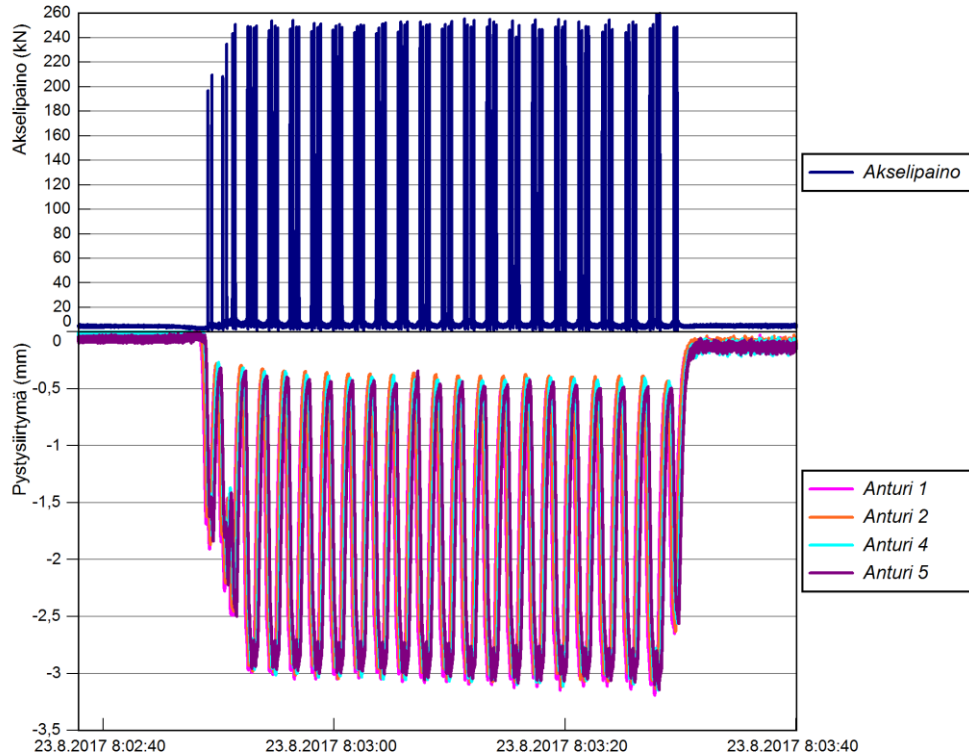
Pystysiirtymää tutkittiin kohteessa jatkuvasti jokaisesta ohiajavasta junasta. Anturit ohjelmoitiin aloittamaan mittaus jokaisen junan ajaessa mittauskohteen yli, jolloin mittaustuloksia saatiin runsaasti. Mittaustuloksista tarkasteltiin tarkemmin suomalaisista ja venäläisistä vaunuista koottuja testijunia.

Kuvassa 7.16 on esitetty suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat pölkkyjen pystysiirtymät. Kevyemmät 170 kN akselipainoiset vaunut aiheuttavat pölkkyissä noin 1,8 mm pystysiirtymän. Painavammat 225 kN akselipainoiset vaunut aiheuttavat pölkkyissä noin 2,3 mm pystysiirtymän. Mitatut pystysiirtymät palautuivat antureiden mitaustarkkuuden huomioiden kokonaan eli pystysiirtymistä voidaan käyttää termiä palautuva painuma.



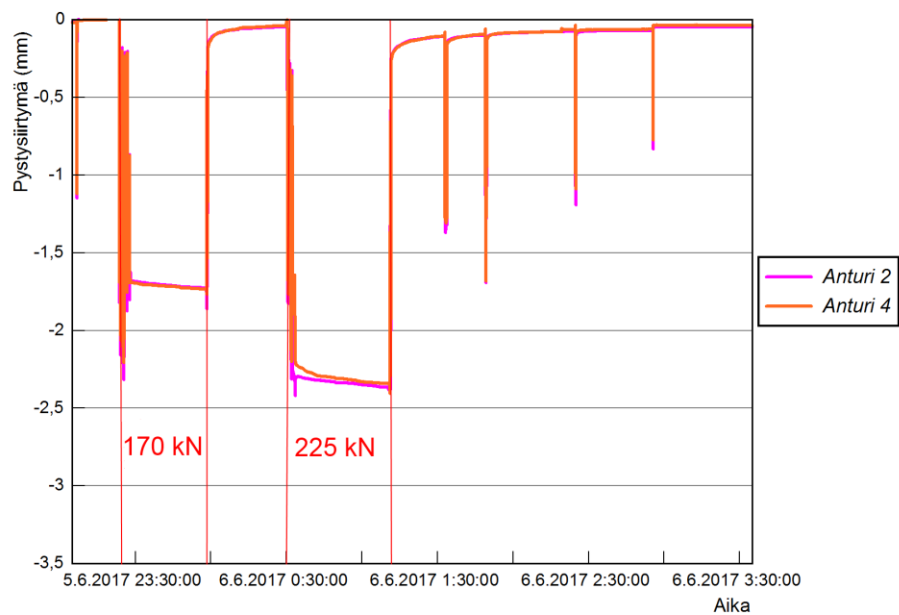
Kuva 7.16 Suomalaisen testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkkyjen keskeltä mitattuna kohteessa km 233+900.

Venäläisten 250 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttamat pystysiirtymät on esitetty kuvassa 7.17. Pystysiirtymän suuruudeksi mitattiin noin 3,1 mm. Pystysiirtymä kasvoi jokaisen akselin jälkeen hieman enemmän edelliseen verrattuna jättäen pölkkyyn lopulta noin 0,1 mm painuman, joka palautui kuitenkin nopeasti takaisin referenssitilalle.



Kuva 7.17 Venäläisillä vaunuilla kootun testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkkyjen keskeltä mitattuna kohteessa km 233+900.

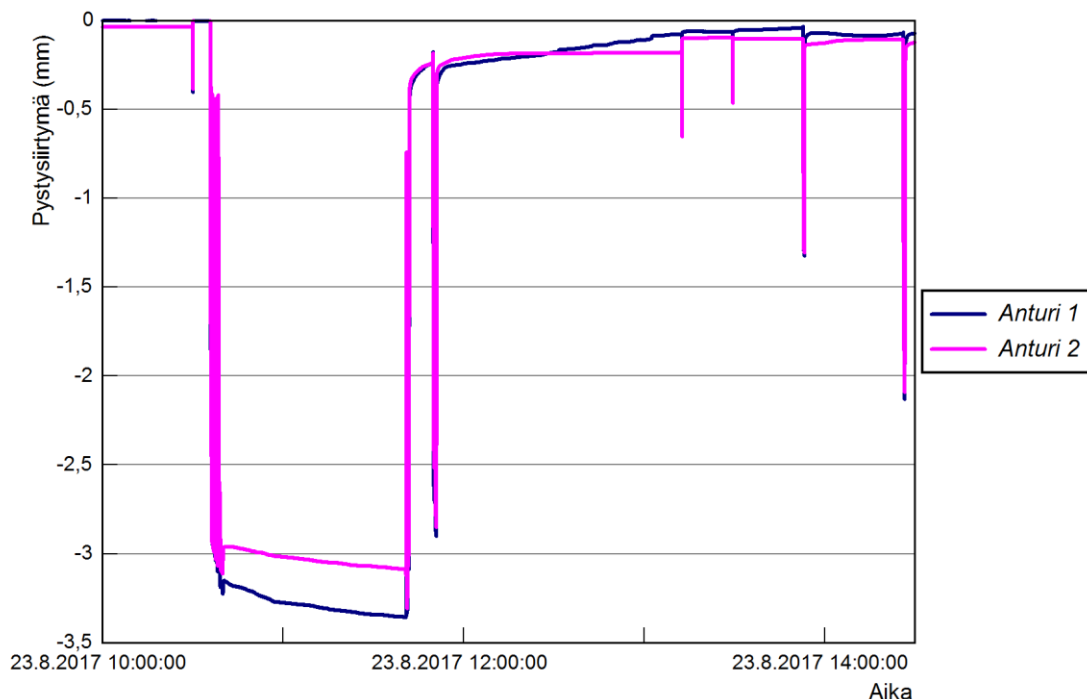
Suomalaisilla vaunuilla kootun testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät on esitetty kahden parhaiten kuorman alla sijainneen anturin osalta ajan suhteen kuvassa 7.18.



Kuva 7.18. Suomalaisilla vaunuilla kootun testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät ja niiden palautuminen kohteessa km 233+900.

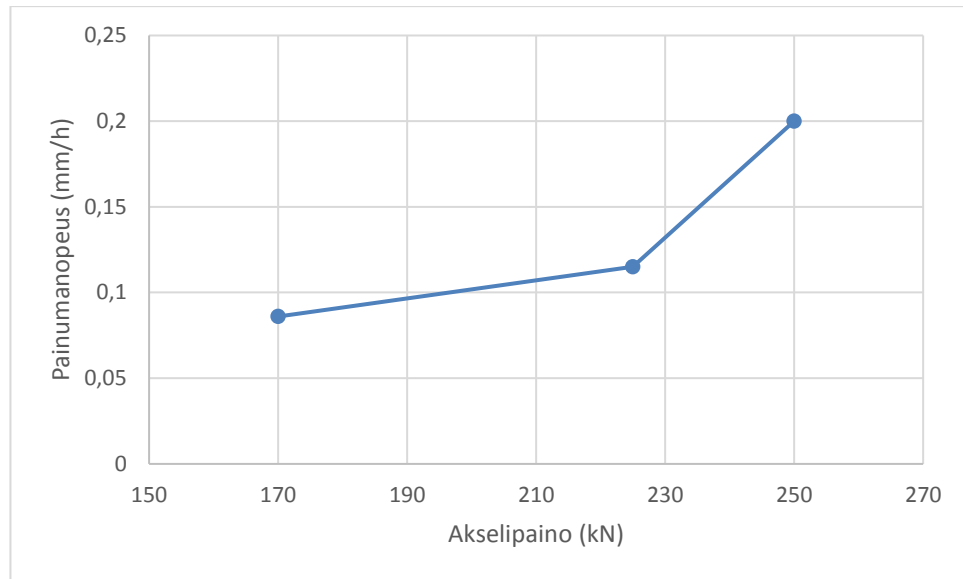
Kuvasta 7.18 nähdään 170 kN akselipainoisen vaunun aiheuttavan ensin noin 1,7 mm pystysiirtymän, joka pysäytyksen jatkuessa kasvaa noin 0,1 mm. Pystysiirtymä palautuu lähes referenssisitasolle pysäytyksien välissä. Seuraava 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytys aiheuttaa pysäytyksen aluksi noin 2,3 mm pystysiirtymän, joka pysäytyksen jatkuessa kasvaa noin 0,1 mm. Rata palautuu takaisin referenssiarvoon muutamissa tunneissa, eikä rataa jää mittaustulosten mukaan pysyvää muodonmuutosta.

Siirtymäanturien kohdalle pysäytetyn venäläisistä vaunuista koostuvan junan vaunun kokonaispaino oli 99200 kg, mikä selviää testijunan vaunuluettelosta (liite 2). Siirtymäanturien kohtaa kuormittaneen vaunun akselipaino oli täten noin 248 kN. Vaunu aiheutti pölkkyihin noin 3,2 mm pystysiirtymän. Pysäytyksen aikana pystysiirtymä kasvoi noin 0,2 mm. Kuorman poistuttua pystysiirtymä palautui nopeasti alle 0,5 mm ja palautui hidastuen takaisin referenssisitasolle. Venäläisen vaunun aiheuttama pystysiirtymä pölkkyissä on esitetty kuvassa 7.19.



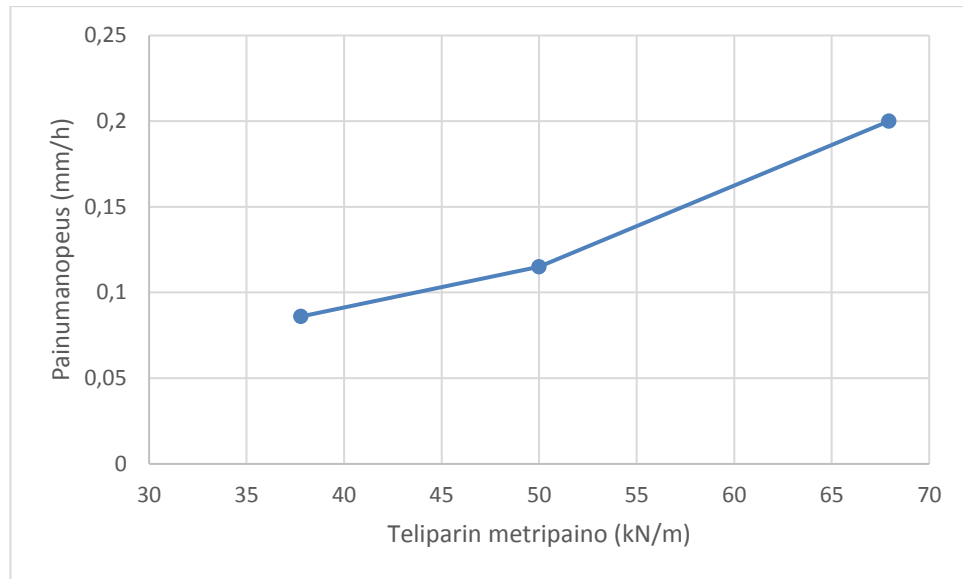
Kuva 7.19 Venäläisistä vaunuista kootun testijunan pysäytyksen aiheuttama pystysiirtymä ja sen palautuminen kohteessa km 233+900.

Pysäytyksen aikana tapahtuva pystysiirtymä kasvoi jokaisessa pysäytyksessä hiljalleen. Pystysiirtymän kasvunopeutta kutsutaan tässä kappaleessa painumanopeudeksi. Painumanopeudesta voidaan päätellä, onko syntyvän pystysiirtymän kasvu hidastuvaa vai kiihtyvää ja siten vaarallista radalle. Pystysiirtymän kasvu ei ollut missään tutkimuksessa suoritetussa pysäytyksessä kiihtyvää. Kuvassa 7.20 on esitetty painumanopeus jokaisesta pysäytyksestä ensimmäisen puolen tunnin ajalta akselipainon funktiona.



Kuva 7.20. Painumanopeus pysäytyksien aikana akselipainon funktiona kohteessa km 233+900.

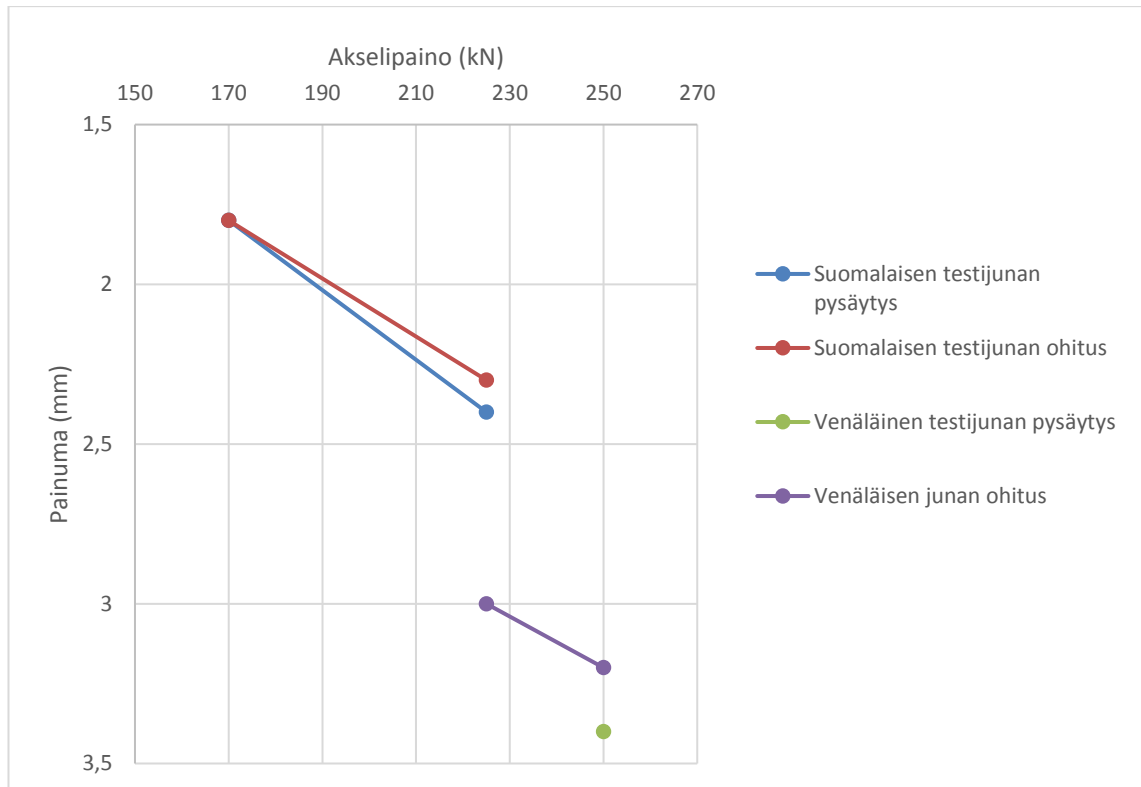
Painumanopeuden odotettiin kasvavan lineaarisesti kuormituksen kasvaessa. Painumanopeus akselipainon suhteen kasvaa kolmella eri akselipainolla tehtyjen mittausten mukaan kuitenkin eksponentiaalisesti. Tämän havainnon mukaan voisi todeta, että akselipainon nostaminen normaalia suuremmaksi kasvattaa pysäytetyn junan alla syntyvän painuman nopeutta verrattuna nykyään sallittujen akselipainojen aiheuttamien painumien nopeuksiin. Tämän havainnon perusteella ei kuitenkaan voi sanoa, olisiko venäläisen 225 kN akselipainoisen vaunun aiheuttama painumanopeus yhtä suuri kuin suomalaisella kalustolla mitattiin tai suomalaisen 250 kN akselipainoisen vaunun aiheuttama painumanopeus yhtä suuri kuin venäläisellä kalustolla mitattiin. Pelkkä akselipaino on siis huono suure verrata eri kaluston välisiä kuormitusvaikutuksia rataan ja pohjamaahan.



Kuva 7.21. Painumanopeus pysäytyksen aikana teliparin metripainon funktiona kohteessa km 233+900.

Kuvassa 7.21 painumanopeutta verrataan teliparin metripainoon. Kuvasta huomataan painumanopeuden olevan käytännössä lineaarista teliparin metripainoon nähden. Painavin 250 kN akselipainoinen vaunu on venäläistä kalustoa ja kaksi kevyempää vaunua on suomalaisesta kalustosta, joten piirretty kuvaaja huomioi kalustojen eroavaisuudet ja kuormitusten erilaisen jakautumisen. Kuvien 7.20 ja 7.21 perusteella teliparin metripaino kuvaa paremmin painumanopeutta eri suuruisten kuormitusten alla, ottaen huomioon myös kalustojen eroavaisuudet.

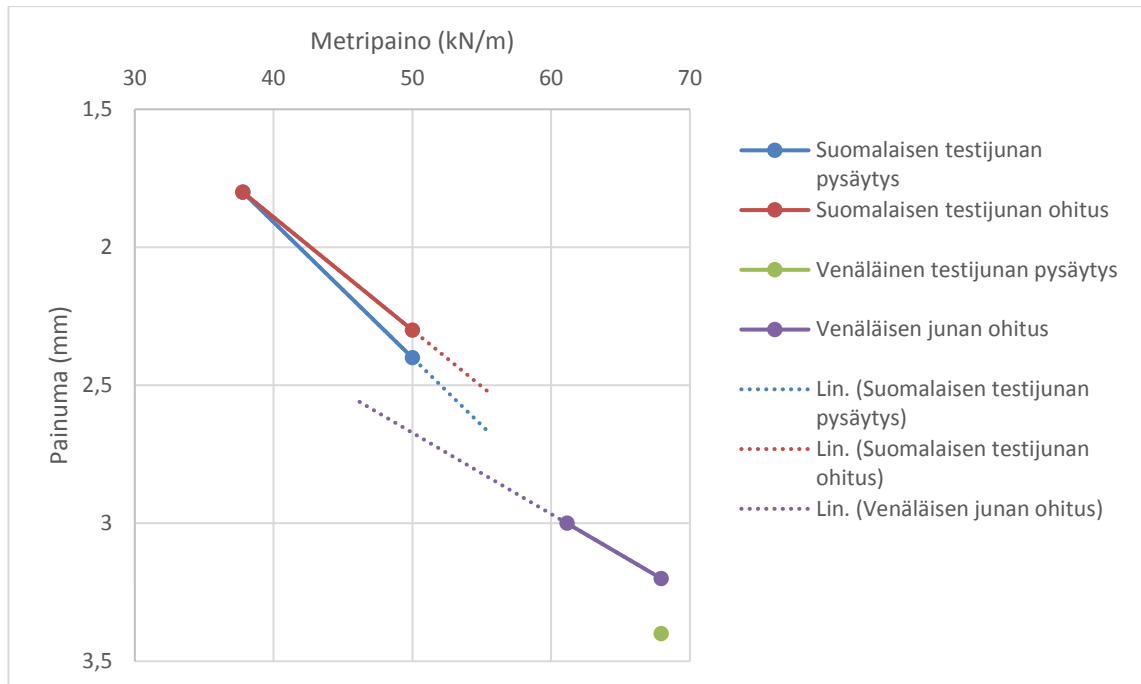
Mittaustulosten mukaan venäläinen 250 kN akselipainoinen vaunu aiheutti pölkkyihin huomattavasti suuremman painuman kuin suomalainen 225 kN akselipainoinen vaunu. Mittaustuloksia tarkasteltiin tarkemmin, jotta saatiin selville, onko suuremman painuman syynä 25 kN korotus akselipainossa vai löytyykö suuremman painuman syy kalustojen eroavaisuudessa. Mittaustuloksista analysoitiin akselipainon sekä vaunutyyppin vaikutusta palautuvaan painumaan junien ohiajoissa ja pysäytyksissä. Akselipainon vaikutus palautuvaan painumaan on esitetty kuvassa 7.22.



Kuva 7.22 Eri kalustojen akselipainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 233+900.

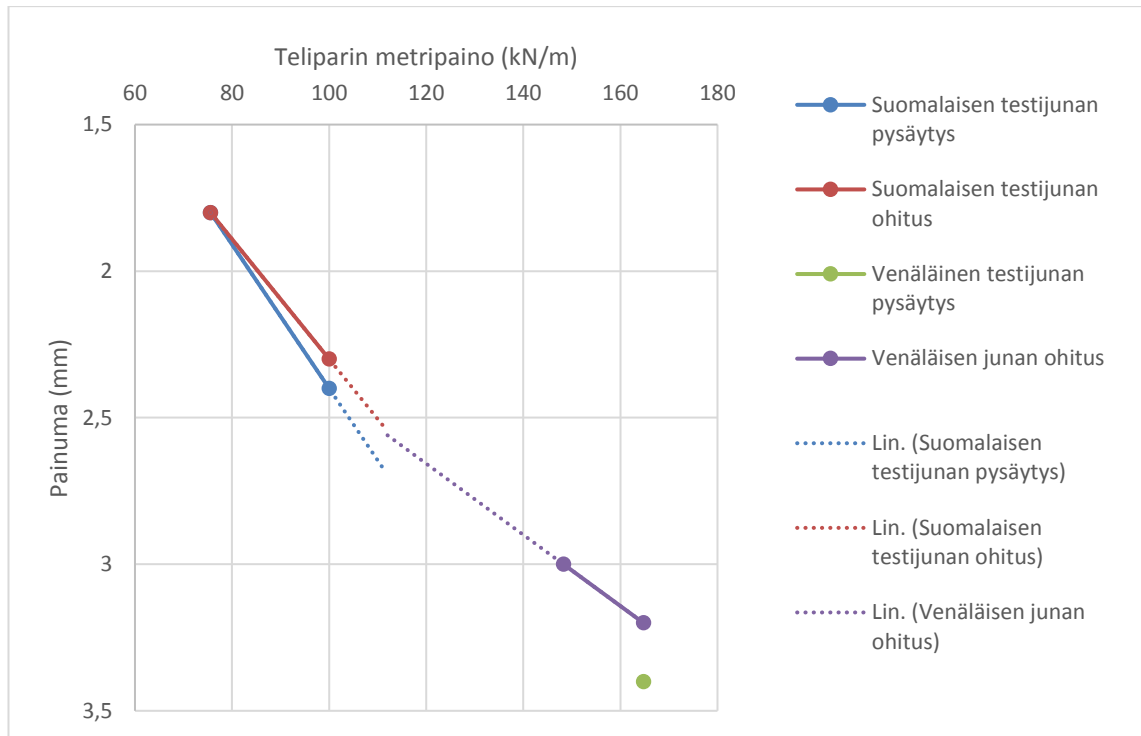
Pysäytysten aiheuttaman palautuvan painuman arvo otettiin puoli tuntia kestäneen pysäytysten ajanhetkeltä. Ohituksessa tapahtuneen palautuvan painuman arvo otettiin viimeisen vaunun ensimmäisen akselin aiheuttamasta palautuvan painuman arvosta. Odotetusti pysäyksissä palautuvat painumat ovat hieman suurempia kuin ohituksissa. Verrattaessa palautuvaa painumaa akselipainoon huomataan venäläisen 225 kN akselipainoisen vaunun ohituksen aiheuttavan pölkkyssä huomattavasti suuremman palautuvan painuman kuin mitä akselipainoltaan yhtä raskas suomalainen vaunu aiheuttaa. Tämä mittaustulos antaa viitteitä, että kalustojen erolla on vaikutusta kuormien välittymisessä rataan ja pohjamaahan.

Kuvassa 7.23 verrataan samoja pystysiirtymän mittaustuloksia samojen ohiajojen ja pysäytysten metripainoon ja kuvassa 7.24 teliparin metripainoon. Metripainon ja teliparin metripainon kuvaajissa esitetyt trendiviivat osoittavat arvioitun palautuvan painuman suuruuden, jos suomalaisten vaunujen akselipaino olisi 250 kN ja venäläisten vaunujen akselipaino olisi 170 kN.



Kuva 7.23 Eri kalustojen metripainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 233+900.

Verrattaessa palautuvia painumia metripainoon huomataan, että kuvaaja muuttuu lähes lineaarisesti laskevaksi. Kuitenkin metripainoon verrattaessa eri kaluston aiheuttamat palautuvat painumat eivät sovi samalle käyrälle. Arvioitujen suomalaisen kaluston aiheuttamat palautuvat painumat eivät ole yhtä suuria arvioitujen venäläisen kaluston aiheuttamien palautuvien painumien kanssa samalla metripainolla.



Kuva 7.24 Eri kalustojen teliparin metripainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteissa km 233+900.

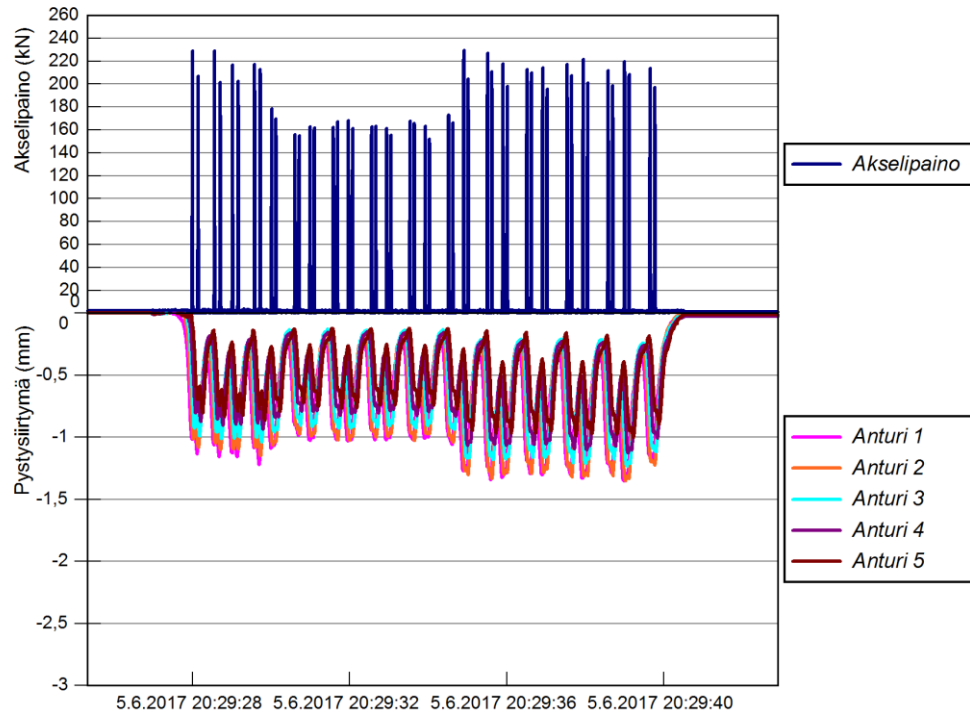
Kuvassa 7.24 mitattuja palautuvia painumia verrataan teliparin metripainoihin. Jos suomalaisen vaunun voisi lastata siten, että sen akselipaino olisi 250 kN, olisi laskettu teliparin metripaino lähes sama kuin venäläisellä vaunulla, jonka akselipaino olisi 170 kN. Verrattaessa arvioituja palautuvia painumia huomataan, että arvioitu suomalaisten 250 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttama palautuva painuma olisi myös lähes sama kuin arvioitu venäläisten 170 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttama palautuva painuma. Havainnon perusteella voi todeta, että erilaisen kaluston yhtä suuret teliparin metripainot aiheuttavat tutkimuskohteissa lähes yhtä suurta palautuvaa painumaa. Tulosten perusteella palautuvat painumat ovat lähes lineaarisia teliparin metripainon funktiona.

Analysoinnin mukaan raskaamman kaluston aiheuttamat suuremmat palautuvat painumat johtuvat suuresta teliparin metripainon erosta eri kaluston vaunujen välillä. Näiden tuloksien pohjalta akselipainoa tai metripainoa ei kannata pitää kuormituksen suuruutta radan stabiiliteetin ja painumakäyttäytymisen kannalta hyvin kuvaavana tekijänä, vaan akselipainon ja metripainon sijaan kannattaa keskittyä teliparin metripainon tarkasteluun arvioidessa palautuvia painumia.

7.2.2 Kohde km 238+280

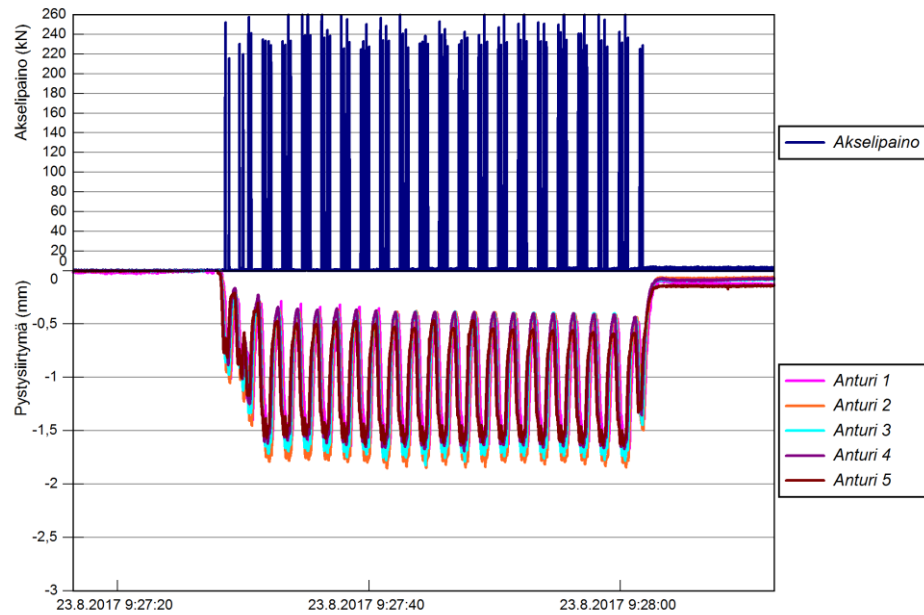
Lähempänä Hovinsaaren liikennepaikkaa olevalla kohteella km 238+280 junien aiheuttamat pystysiirtymät pölkyissä eivät olleet yhtä suurta kuin kohteella km 233+900. Kaikki pystysiirtymät palautuivat kuormituksen poistuessa, joten niistä voidaan käyttää termiä

palautuva painuma. Suomalaisista vaunuista koostuva testijuna aiheutti 170 kN akselipainoisilla vaunuilla noin 1 mm palautuvan painuman ja 225 kN akselipainoisilla vaunuilla noin 1,3 mm palautuvan painuman. Suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat palautuvat painumat ja venymäliuska-antureilla mitatut akselipainot on esitetty kuvassa 7.25.



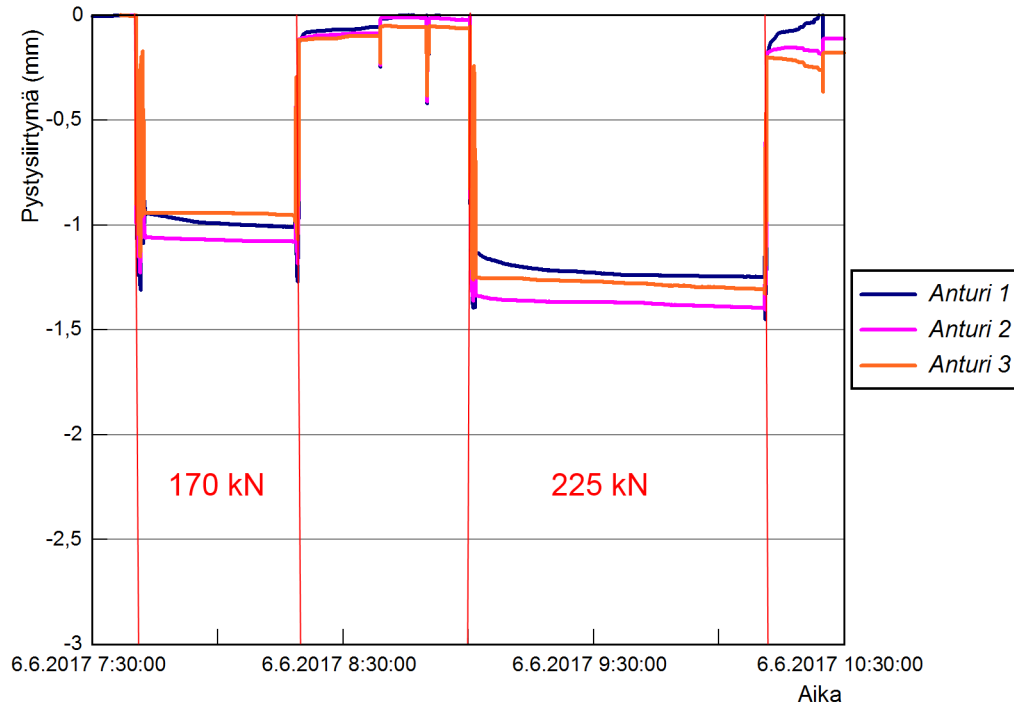
Kuva 7.25 Suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkyn keskeltä mitattuna kohteessa km 238+280.

Venäläisistä 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuva testijuna aiheutti noin 1,8 mm palautuvan painuman pölkyyissä. Venäläisen testijunan ohiajon aikana mitatut tulokset on esitetty kuvassa 7.26.



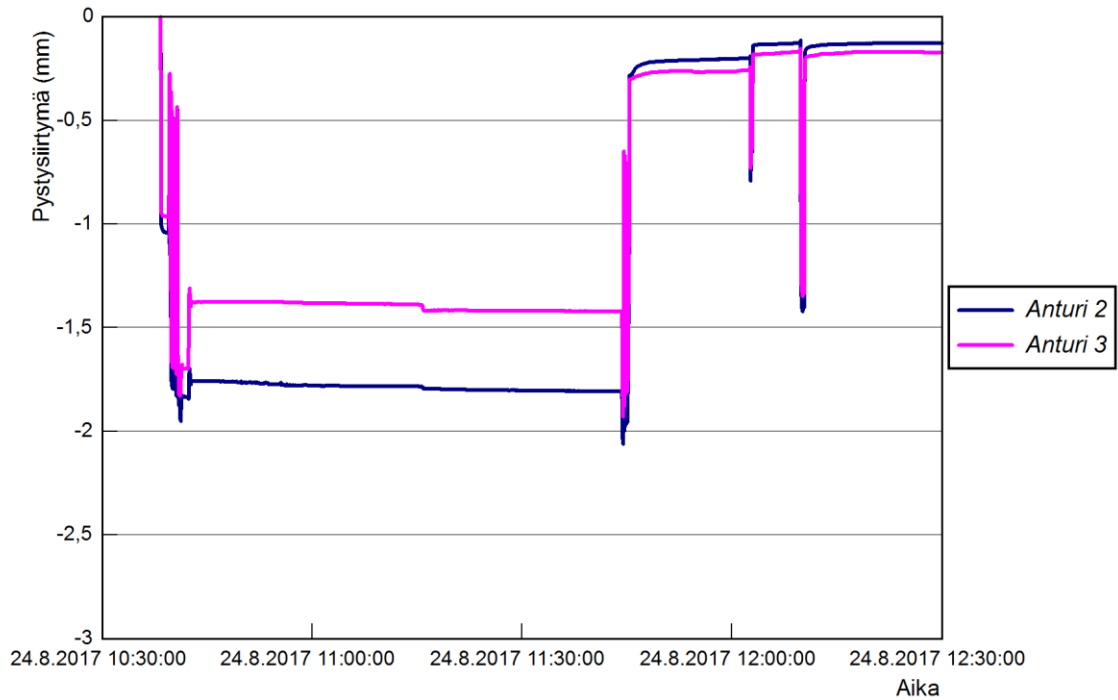
Kuva 7.26 Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkyn keskeltä mitattuna kohteessa km 238+280.

Suomalaisen testijunan 170 kN akselipainoiset vaunut pysäytettiin tutkimuskohteelle 6.6.2017. Kuvassa 7.27 on esitetty kolmen pölkyn pystysiirtymä vaunujen ollessa pysäytettyinä radalla. Kevyemmät 170 kN akselipainoiset vaunut aiheuttivat pysäytyksen aikana 1,1 mm pystysiirtymän. Ennen ja jälkeen ensimmäistä pysäytystä näkyvät suuremmat pystysiirtymät johtuvat raskaampien vaunujen yliajasta. Pölkkyjen eri suuruiset pystysiirtymät selittyvät pyöräkertojen paikasta pysäytyksen aikana. Tässä tapauksessa anturin 2 mittaama pystysiirtymä oli parhaiten pyöräkerran alla ja täten siihen aiheutui suurin kuormitus ja pystysiirtymä. Testijunan 225 kN akselipainoiset vaunut aiheuttivat noin 1,4 mm pystysiirtymän pölkkyyn, joka oli parhaiten pyöräkerran kuormituksen vaikutuksessa. Junakuorman vaikutuksesta syntynyt pystysiirtymä palautui pois kokonaan melko nopeasti kuormituksen poistumisen jälkeen.



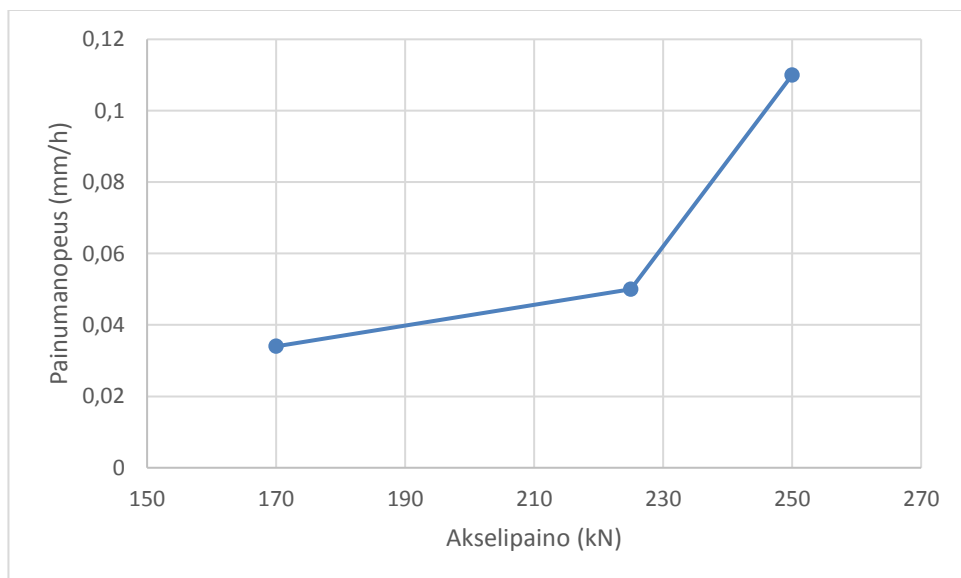
Kuva 7.27 Suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät ja niiden palautuminen kohteessa km 238+280.

Venäläinen 250 kN vaunu pysäytettiin hieman antureiden viereen, jotta viereisen vaunun teli olisi paremmin huokosvedenpaineantureiden kohdalla. Vain kaksi siirtymäantureilla varustettua pölkkyä jäi kuormituksen alaiseksi. Kuvassa 7.28 on esitetty näiden kahden pölkyn pystysiirtymät venäläisen vaunun kuormituksessa. Ennen pysäytystä ja pysäytyksen jälkeen näkyvät piikit kertovat parhaiten, kuinka paljon pölkky olisi siirtynyt, jos akselipaino olisi ollut suoraan sen päällä. Pysäytyksen aikana syntynyt pystysiirtymä oli noin 2 mm.



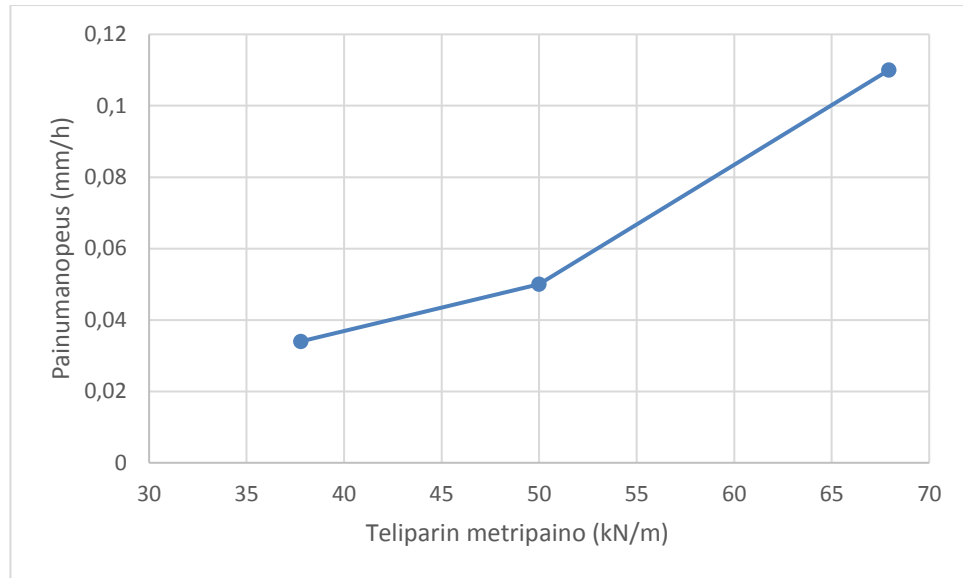
Kuva 7.28 Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät ja niiden palautuminen kohteessa km 238+280.

Painumanopeudella tarkoitetaan pysäytysten aikana mitatun pystysiirtymän muutosta ensimmäisen puolen tunnin aikana. Painumanopeus pysäytyksen aikana suhteessa akselipainoon oli eksponentiaalinen. (Kuva 7.29) Pelkästään akselipainoa tarkasteltaessa painumanopeuden suuri kasvu voi rataosalla suunnitellun akselipainon noston takia näyttää huolestuttavalta.



Kuva 7.29 Painumanopeus akselipainon funktiona kohteessa km 238+280.

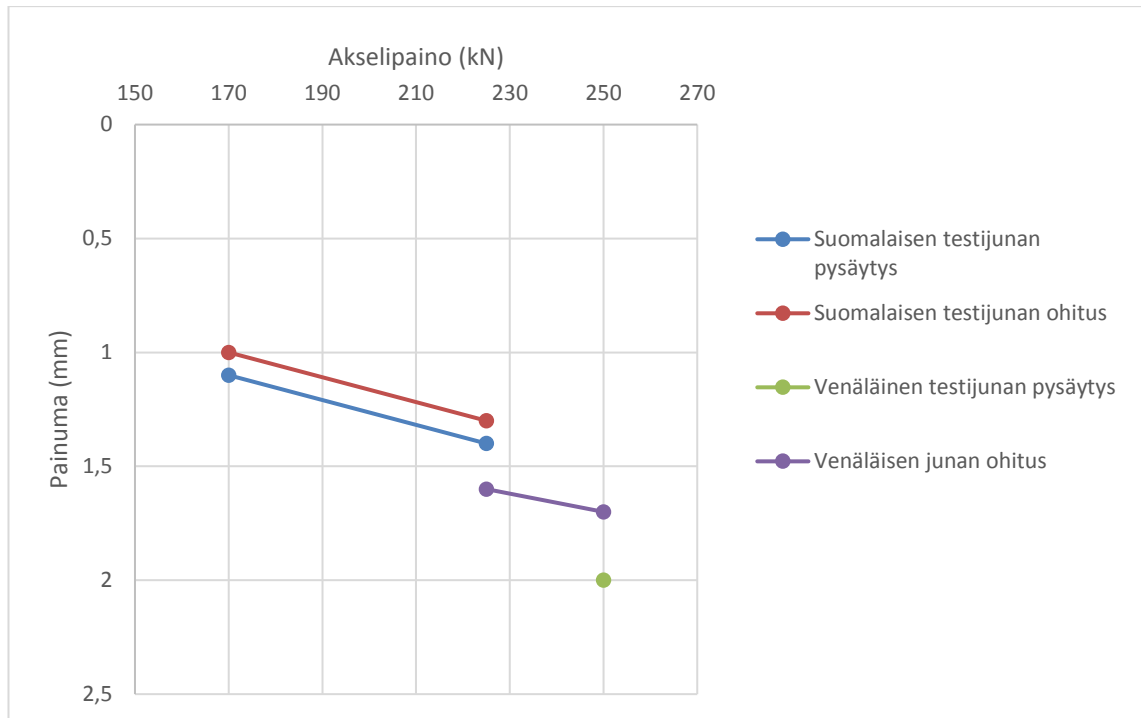
Kuitenkin kuten kohteen km 233+900 tapauksessa huomattiin, akselipaino ei ole paras tapa kuvata junan kuormituksen vaikutuksia pölkyn, radan ja pohjamaan pystysiirtymään. Kuvassa 7.30 on esitetty painumanopeus suhteessa teliparin metripainoon kohteessa km 238+280. Kuvaajan mukaan painumanopeus kasvaa lähes lineaarisesti teliparin metripainon kasvaessa.



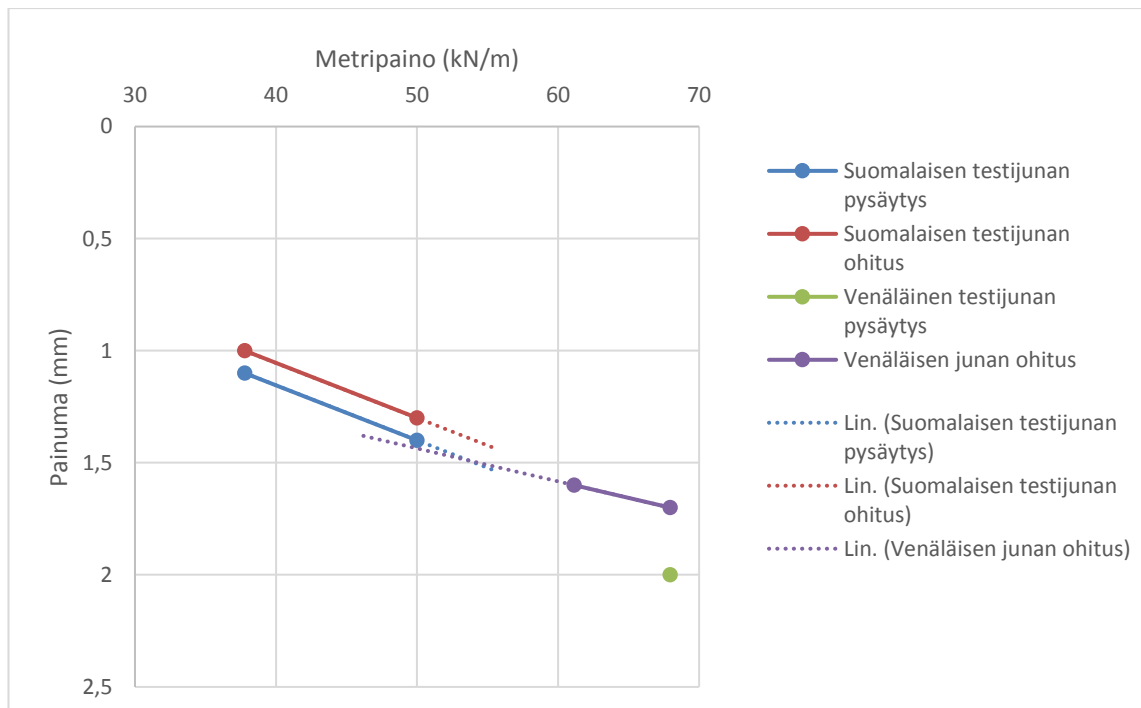
Kuva 7.30 Painumanopeus teliparin metripainon funktiona kohteessa km 238+280.

Myös kohteessa km 238+280 venäläisen vaunun aiheuttama palautuva painuma oli suuri verrattuna suomalaisen hieman kevyemmän vaunun aiheuttamaan palautuvaan painumaan. Akselipainon, metripainon sekä teliparin metripainon vaikutusta palautuvan painuman suuruuteen tutkittiin tässäkin kohteessa. Tulokset olivat samanlaisia kuin kohteessa km 233+900. Eri kalustoa olevat vaunut, joissa on yhtä suuri akselipaino aiheuttavat eri suuruisen pystysiirtymän. (Kuva 7.31) Verrattaessa palautuvia painumia vaunujen metripainoon on kuvaaja lähes lineaarinen, mutta yhtä raskaat erilaista kalustotyyppiä edustavat vaunut aiheuttavat arvion mukaan silti eri suuruisen painuman. (Kuva 7.32) Erilaisten kalustojen aiheuttamien palautuvien painumien vertailu vaunun metripainolla ei hävitä tuloksista kalustojen eroavaisuutta.

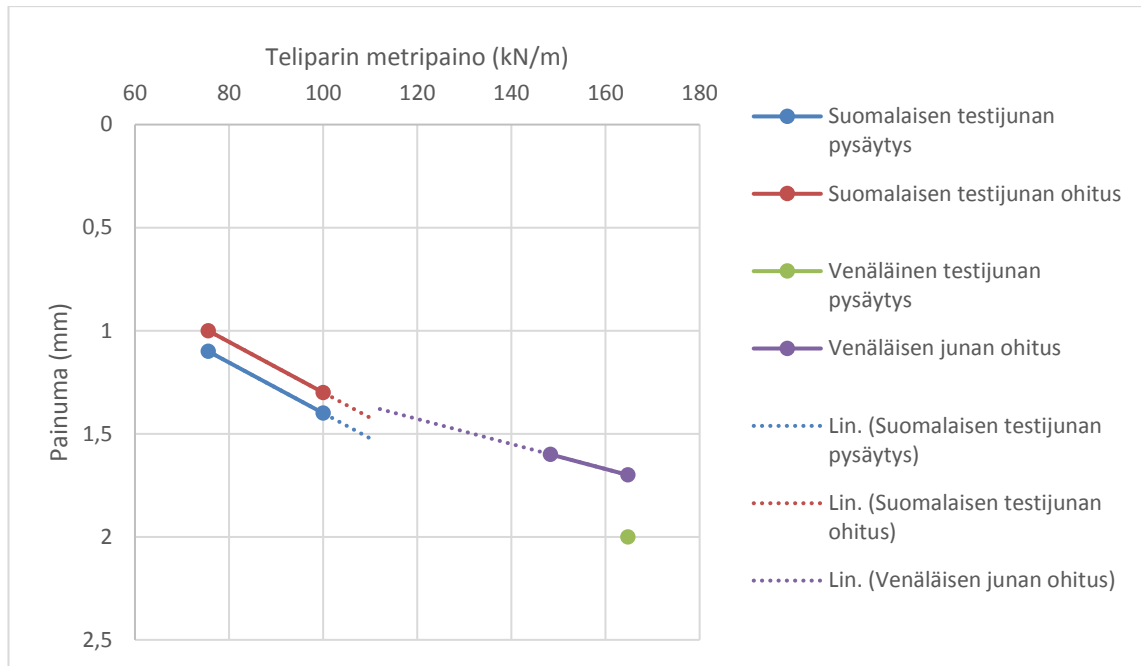
Teliparin metripaino kuvaa tässäkin kohteessa paremmin palautuvan painuman suuruutta suhteessa kuormittavaan vaunun painoon. Kuvan 7.33 mukaan teliparin metripaino on lähes lineaarinen mitattujen palautuvien painumien kanssa.



Kuva 7.31 Eri kalustojen akselipainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 238+280.



Kuva 7.32 Eri kalustojen metripainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 238+280.



Kuva 7.33 Eri kalustojen teliparin metripainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 238+280

Tuloksien mukaan teliparin metripaino kuvastaa parhaiten kuorman suuruuden vaikutusta palautuvan painuman suuruuteen eri kalustojen välillä.

7.2.3 Kiihtyvyyssantureilla mitattu pystysiirtymä

Kiihtyvyyssantureilla pystyttiin mittaamaan vain ohiajaviin junien aiheuttamia pystysiirtymiä. Kiihtyvyyssanturit mittasivat suurempia pystysiirtymiä kuin siirtymäanturit. Tämän voi selittää pölkkyjen taipuminen suuren kuorman alla. Junakuormituksessa pölkkyt painuvat päistään hieman enemmän kuin keskeltä.

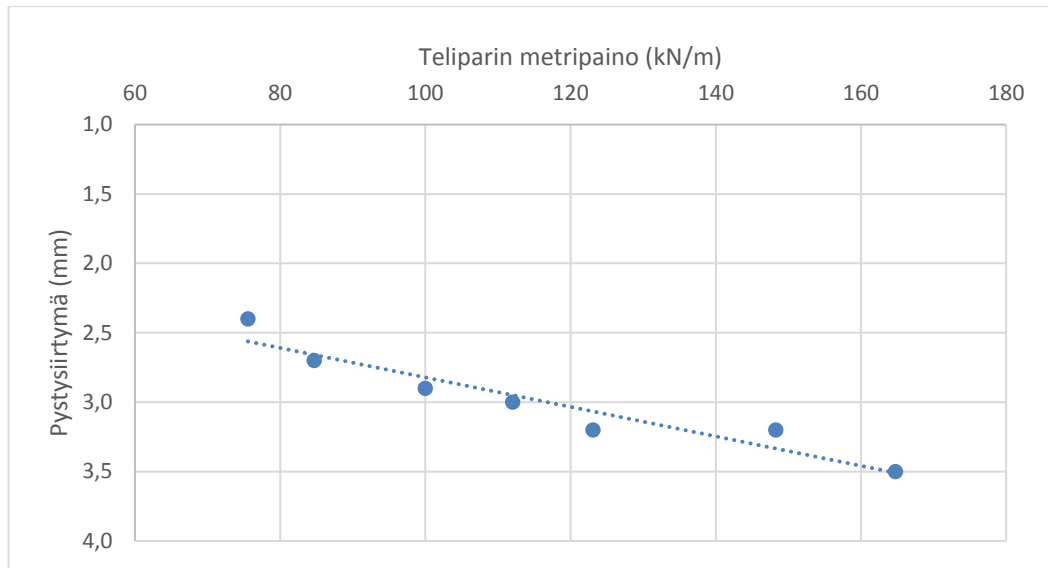
Kiihtyvyyssantureilla mitattu pystysiirtymä on keskiarvo kahdeksan anturin tuloksista, joista kaksi suurinta ja kaksi pienintä arvoa on jätetty pois. Kiihtyvyyssantureilla mitattiin jokaisen ohiajavan junan aiheuttamat pystysiirtymät. Analyysihin on pyritty löytämään mahdollisimman laaja kattaus eri akselipainoisia junia. Analyysissä käytettävät akselipainot on määritetty venymäliuska-antureilla. Alle 250 kN akselipainoisten junien tulokset on kerätty ajanjaksolta 5.6-7.6.2017 ja 250 kN akselipainoisten junien tulokset on kerätty tutkimuksessa käytetystä venäläisistä 250 kN vaunuista koostuvasta testijunasta. Kohteelta km 238+280 tuloksia on vähemmän, koska kiihtyvyyssantureiden tuloksissa havaittiin kohinaa, joka vaikeutti tulosten tulkintaa. Taulukossa 7.1 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät eri painoisista junista.

Taulukko 7.1 Kiihtyvyyys- ja siirtymäantureilla mitatut pystysiirtymät eri painoisista junista.

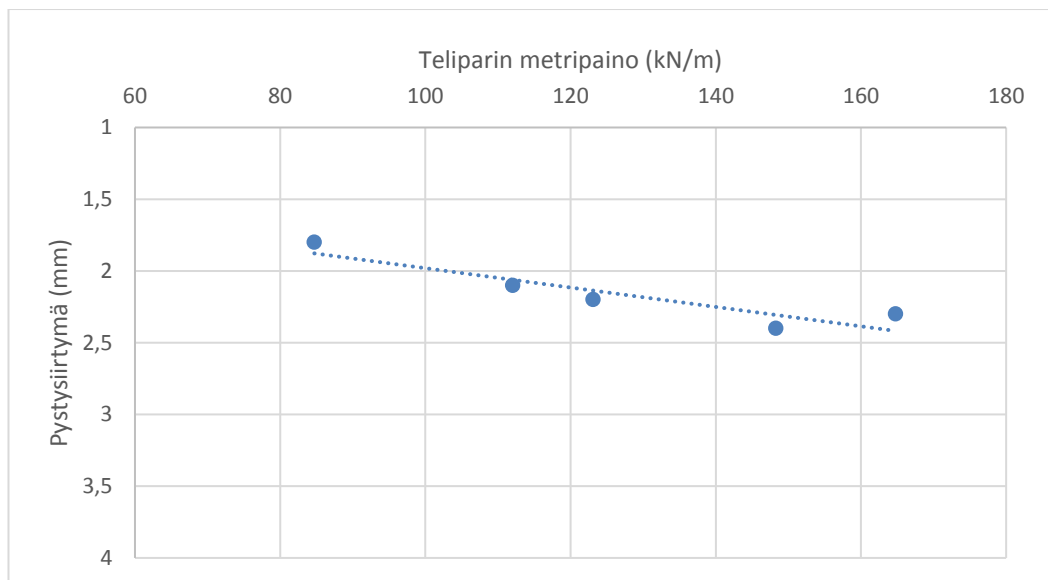
Kohde	Akselipaino (kN)	Teliparin metripaino (kN/m)	Pystysiirtymä siirtymäantureilla (mm)	Pystysiirtymä kiihtyvyyssantureilla (mm)
233+900	170	112,0	2,0	3,0
233+900	170	75,6	1,8	2,4
233+900	180	84,7	1,9	2,7
233+900	200	123,1	2,4	3,2
233+900	225	100,0	2,4	2,9
233+900	225	148,3	2,9	3,2
233+900	250	164,7	3,1	3,5
238+280	170	112,0	1,1	2,1
238+280	180	84,7	1,1	1,8
238+280	200	123,1	1,4	2,2
238+280	225	148,3	1,7	2,4
238+280	250	164,7	1,8	2,3

Junien teliparin metripaino on laskettu siirtymä-antureiden ja venymäliuska-antureiden mittaustuloksista. Junan nopeus määritettiin kahden siirtymäanturin välisen matkan ja tietyn akselin sen matkan kulkemiseen käyttämän ajan avulla. Nopeuden ja teliparin pituuden määrävien akseleiden aiheuttamien venymäliuskatulosten välisen ajan avulla laskettiin teliparin määrävien akseleiden etäisyys eli teliparin pituus. Teliparin metripaino laskettiin kertomalla akselipaino neljällä ja jakamalla tulos teliparin pituudella.

Kiihtyvyyssanturien mittaamat pystysiirtymät ovat teliparin metripainoihin nähden oikeaa kokoluokkaa. Mitä suurempi teliparin metripaino on, sitä suurempi on myös pystysiirtymä. Kuvassa 7.34 ja 7.35 on esitetty kohteisiin km 233+900 ja km 238+280 asennetuilla kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät teliparin metripainon suhteen. Pystysiirtymät kasvavat lähes lineaarisesti teliparin metripainon suhteen.



Kuva 7.34 Kohteessa km 233+900 kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät teliparin metripainon suhteen.



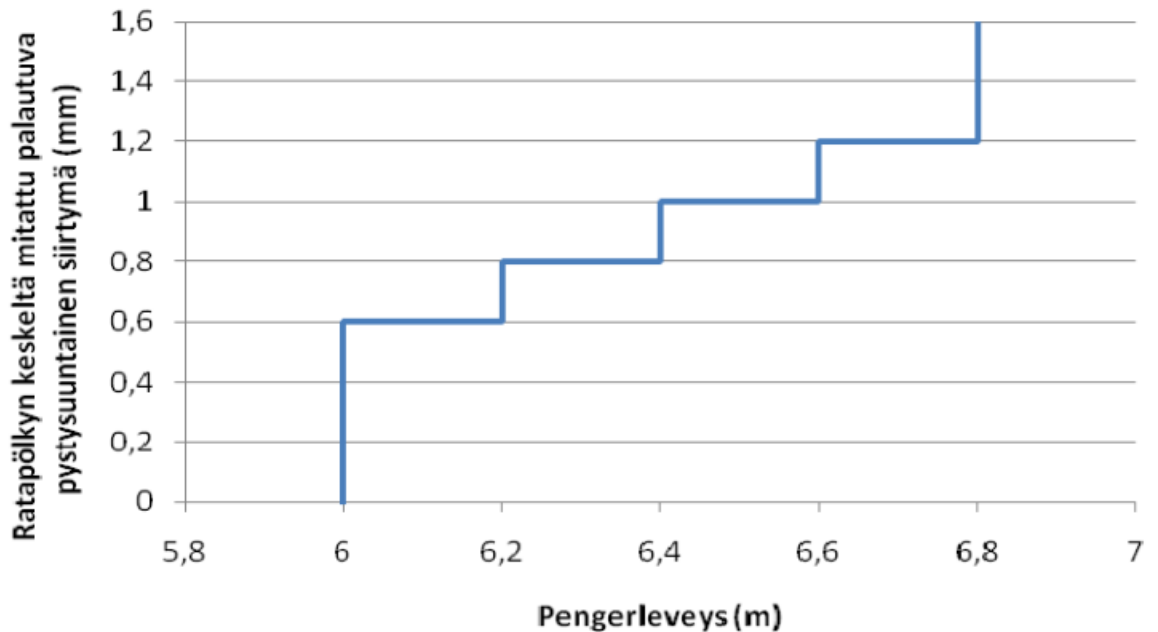
Kuva 7.35 Kohteessa km 238+280 kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät teliparin metripainon suhteen.

Kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät vahvistavat otaksumaa, että teliparin metripaino on hyvä tapa kuvata eri kalustojen aiheuttamia pystysiirtymiä sekä vertailla niitä keskenään. Kiihtyvyyssanturien tulokset varmistavat myös pohjamaan ja ratarakenteen kimmoisen käyttäytymisen raskaan 250 kN akselipainoisen junan kuormituksen alaisena.

7.2.4 Kokonaisjäykkyyden tarkastelu

Ratapolkyn keskeltä mitattuja palautuvien pystysiirtymien arvoja käytetään Suomessa radan pengerleveyden mitoittamiseen. Radan pengerleveydellä tarkoitetaan normaalisti välikerroksen yläpinnan leveyttä. Radan jäykkyyden lisäksi pengerleveyden valinta riippuu

monista muista tekijöistä, kuten alusrakenneluokka ja geometria. Vaadittu penkereen vähimmäisleveys määräytyy kuvan 7.36 sekä taulukon 7.2 mukaisesti.



Kuva 7.36 Ratapenkereen vähimmäisleveys alusrakenneluokissa 2 ja 3. (Liikennevirasto 2014, s. 19)

Taulukossa 7.2 esitettyä kaarrelevitystä käytetään vain kaarteissa, joiden kaarresäde on pienempi kuin 3000 m. Kaarrelevitys tehdään kokonaisuudessaan ulkokaarten puolelle.

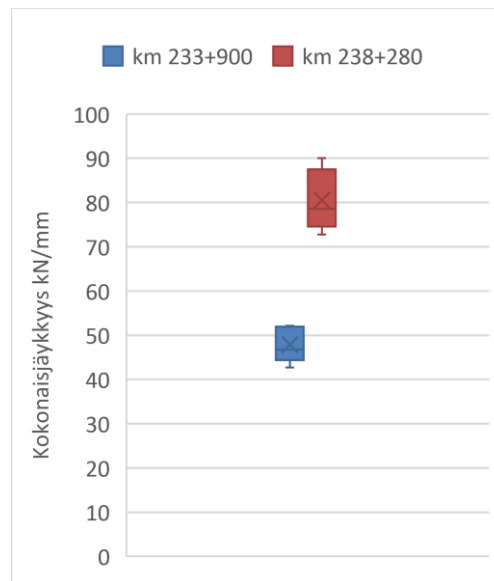
Taulukko 7.2. Ratapenkereen vähimmäisleveys alusrakenneluokissa 2 ja 3. (Liikennevirasto 2014, s. 19)

Pengerleveys [m]		Mitattu ratapölkyn pystysuuntainen palautuva siirtymä [mm]
Suoralla	Kaarteessa	
6	6,4	<0,6
6,2	6,6	0,6..0,8
6,4	6,8	0,81..1,0
6,6	7,0	1,01..1,2
6,8	7,2	>1,2

Kuvan 7.36 ja taulukon 7.2 ratapölkyn pystysiirtymän mittaamisessa käytetään kuormittavana kalustona veturia Sr2 (Liikennevirasto 2014, Liite 3). Veturin akselipaino on noin 210 kN. Tässä tutkimuksessa 200-225 kN akselipainoiset kalustot aiheuttivat kohteessa km 233+900 noin 2,4 mm palautuvan pystysiirtymän ja kohteessa km 238+280 noin 1,4...1,7 mm palautuvan pystysiirtymän. Verrattaessa näitä tuloksia pengerveyden mitoituksessa käytettäviin pystysiirtymiin huomataan, että kohteista mitatut pystysiirtymät ovat huomattavasti suurempia kuin mitoituksessa kapeampien pengervaihtoehtojen käytön mahdollistavat pystysiirtymät. Molemmat kohteet ovat siis kokonaisjäykkyydeltään heikkoja ja tarvitsisivat 6,8 m pengerveyden.

Mitattujen pystysiirtymien avulla voidaan laskea myös tutkimuskohteiden radan kokonaisjäykkyyden arvo luvussa 2.2.4 esitetyn kaavan 4 avulla. Kaavalla laskettu kokonaisjäykkyys on yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys. Kaava on kehitelty Peltokankaan tutkimukseen, jossa tutkittiin radan kokonaisjäykkyyttä. Kyseisessä tutkimuksessa on laskettu radan kokonaisjäykkyys 13 kohteessa eri puolilla Suomea. (Peltokangas et al. 2013)

Kuvassa 7.37 on esitetty lasketut kokonaisjäykkyydet tämän tutkimuksen kohteissa. Kokonaisjäykkyyden laskennassa käytetty pystysiirtymä on mitattu siirtymäantureilla. Kuvassa näkyy kokonaisjäykkyyden laskettu maksimi- ja minimiarvo, sekä rastilla merkitty kokonaisjäykkyyden keskiarvo lasketuista tuloksista.



Kuva 7.37 Tutkimuskohteiden laskettu kokonaisjäykkyys.

Kuvan 7.37 mukaan kohteessa km 233+900 radan kokonaisjäykkyys vaihteli välillä 43...52 kN/mm ja kohteessa km 238+280 kokonaisjäykkyys vaihteli välillä 73...90 kN/mm. Kohteen km 233+900 kokonaisjäykkyydet ovat suuruudeltaan pieniä ja vaihteluväliltään pienempiä kuin suurin osa Peltokankaan tutkimuksessa lasketuista kokonaisjäykkyyksistä. Peltokankaan tutkimuksessa syksyllä mitatut radan jäykkyyden arvot vaihtelivat kohteesta riippuen 25...190 kN/mm välillä. (Peltokangas et al. 2013, s. 170) Samassa tutkimuksessa huomattiin, että suhteellisen alhaista keskimääräistä jäykkyyttä edustavien kohteiden kohdalla kohdekohtaisen jäykkyyden vaihteluväli on pieni, noin 20 kN/mm, joka edustaa hyvin tämän tutkimuksen kohteiden kokonaisjäykkyyden vaihteluväliä. Tulosten vertailu kertoo tämän tutkimuksen kohteen km 233+900 olevan kokonaisjäykkyydeltään keskimääräistä pienempi kuin Suomen pääradat, joita Peltokangas tarkasteli. Kohteen km 238+280 kokonaisjäykkyys on tutkimusten puitteissa keskitasoinen verrattuna muihin Suomessa mitattuihin kohteisiin.

Selig & Li pitävät kiskon taipumasta määritettyä ratamoduulia 28 kN/mm/mm minimiarvona hyvin toimivalle radalle. Kun tämä muutetaan radan kokonaisjäykkyydeksi, on se kiskotyypillä UIC 60 noin 55 kN/mm. (Selig & Li 1994, s. 47-54; Peltokangas et al. 2013, s. 175) Tämän otaksuman mukaan tutkimuskohteen km 233+900 kokonaisjäykkyys olisi pienempi kuin hyvin toimivan radan minimiarvo.

Peltokankaan tutkimuksessa esitetty kaava 6 ei ota huomioon, millainen kalusto rataa kuormittaa, vaan se keskittyy pelkästään kuormittavan kaluston akselipainoon. Kaava ottaa huomioon yhden akselin painon vaikutuksen ratapölkkyssä. Kyseisessä tutkimuksessa ratapölkyn palautuva painuma mitattiin kahdeksan erisuuruisen akselipainon kuormituksessa, eikä samalla akselipainolla tehty useampaa kuormitusta. Kuitenkin tässä tutkimuksessa on tullut ilmi, että eri kalusto aiheuttaa huomattavasti erisuuruista palautuvaa painumaa ratapölkkyyn, vaikka akselipaino olisi sama. Kaavalla 6 saadaan siis huomattavasti eri kokoluokan tuloksia, riippuen millaisella kalustolla kuormitus tehdään.

7.3 Sivuttaissiirtymä

Pohjamaan sivuttaissiirtymää radan suuntaisesti ja rataa vasten kohtisuoraan suuntaan mitattiin inklinometreillä. Inklinometrien mittaustuloksia pystyi tarkastelemaan reaaliajassa FinMeas Oy:n internetpalvelusta. Palvelun kautta sai myös verrattua eri ajankohtien mittaustuloksia toisiinsa ja esitettyä tuloksia graafisesti. Inklinometrien mittaustarkkuus on yleensä millimetriluokkaa. Tässä tutkimuksessa mittaustulokset ovat alle millimetrin, mutta tuloksia voidaan silti pitää valideina niiden käyttäytymisen perusteella. Sivuttaissiirtymät kasvavat, kun juna pysäytetään kohteeseen ja palautuvat, kun juna poistuu kuormittamasta.

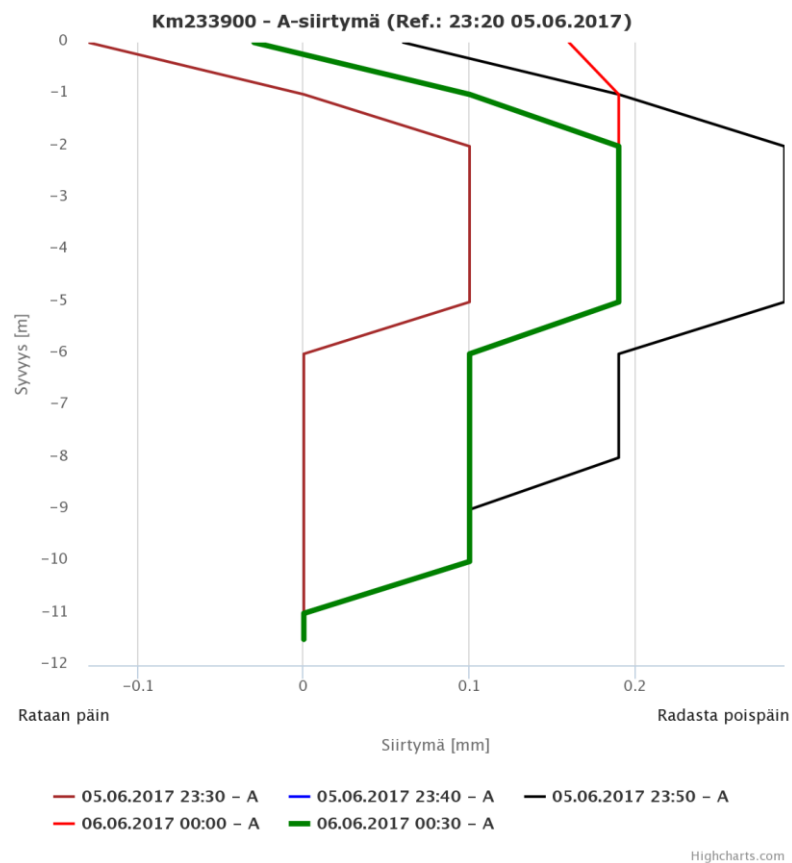
Tutkimuksessa keskityttiin testijunien pysäytyksien aiheuttamiin sivuttaissiirtymiin rataa vasten kohtisuorassa suunnassa. Suurempi akselipaino voisi teoriassa jättää pohjamaahan pysyviä muodonmuutoksia, jos maa ei pysyisi kimmoisalla alueella. Sivuttaissiirtymän muutosta eri syvyyksillä, maan pinnasta kovaan pohjaan saakka, mitattiin junien pysäytyksien aikana noin minuutin välein.

7.3.1 Kohde km 233+900

Pohjamaan sivuttaissiirtymän referenssitasoksi määrättiin ajanhetki muutamia minutteja ennen ensimmäistä pysäytystä. Referenssitaso kuvaa pohjamaan tasapainotilaa ilman kuormitusta. Suomalaisten vaunujen pysäytysten aikana tehtyjen mittausten referenssitasoksi määrättiin ajankohta 5.6.2017 klo 23.20. Maan liikettä kuormitusten vaikutuksesta verrattiin referenssitasoon, jolloin saatiin selville kuormitusten aiheuttamien sivuttaissiirtymien suuruus. Positiivinen muutos tarkoittaa maan siirtymistä poispäin radasta ja negatiivinen muutos tarkoittaa maan siirtymistä rataa kohti.

Vaunut, joiden akselipaino oli 170 kN, pysäytettiin kohteeseen km 233+900 klo 23.23 ja ne poistuivat kohteesta klo 23.59. Kuvassa 7.38 on esitetty sivuttaissiirtymän muutos pysäytyksen aikana ja palautuminen sen jälkeen. Palautumiseen ei jäänyt kuin puoli tuntia aikaa, koska seuraava 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytys tapahtui nopeasti ensimmäisen pysäytyksen jälkeen 6.6.2017 klo 00.30.

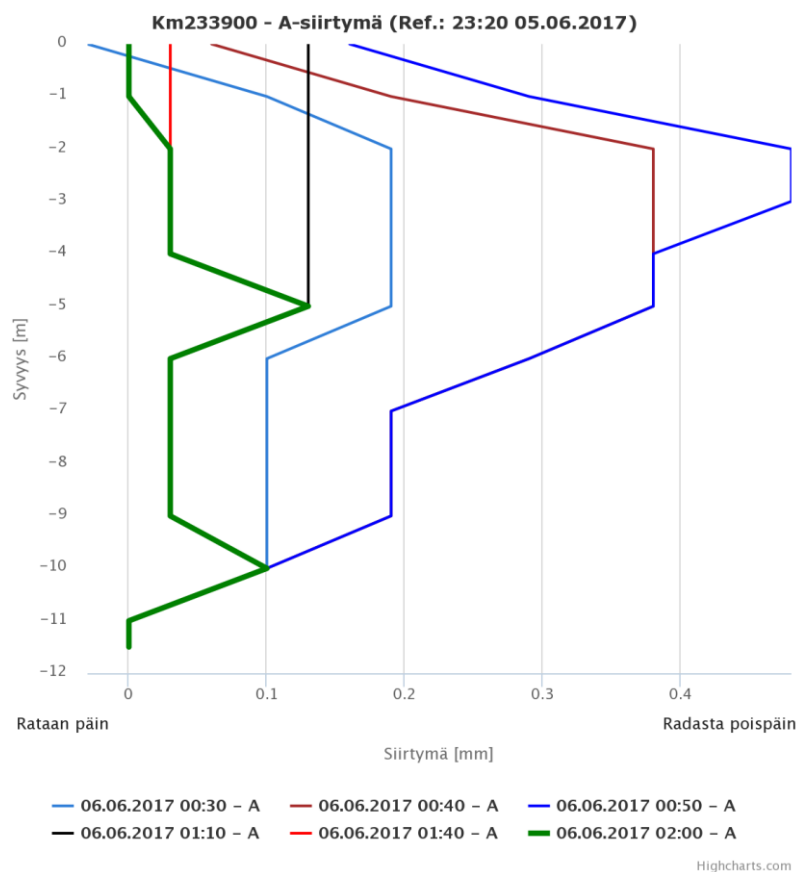
Suomalaisten 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormittaessa rataa suurin sivuttaissiirtymä rataa vasten kohtisuorassa suunnassa oli noin 0,3 mm. Kuvasta 7.38 voi tulkita, että suurin sivuttainen muodonmuutos tapahtui syvyyksien -3 ja -5 metriä maanpinnasta välillä. Kuvassa sinisellä viivalla esitetty klo 23.40 mitattu tulos on kuvan vihreän klo 00.30 mitatun tuloksen kanssa yhtä suuri. Sivuttaissiirtymä alkoi palautua heti testijunan poistuttua kohteelta.



Kuva 7.38. Sivuttaissiirtymän muutos 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 233+900.

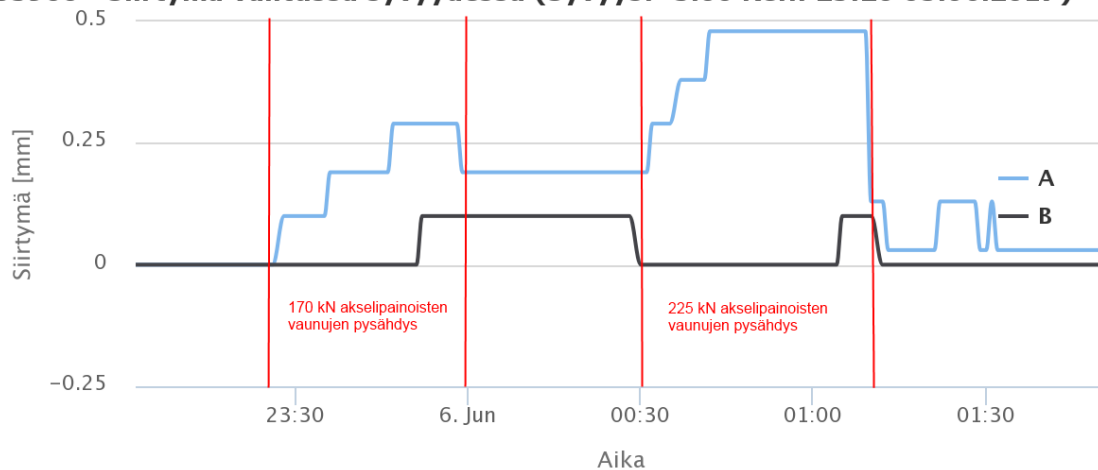
Pysäytettäessä suomalaiset 225 kN akselipainoiset vaunut kohteeseen, pohjamaan sivuttaissiirtymä ei ollut vielä palautunut kokonaan referenssitasolle. Referenssitasona tässäkin pysäytyksessä pidettiin ajanhetkeä 5.6.2017 klo 23.20. Pysäytyksen aikainen sivuttaissiirtymän muutos on esitetty kuvassa 7.39. Syvyydellä -3 metriä maanpinnasta sivuttaissiirtymä oli palautunut tasolle 0,18 mm. Akselipainoltaan raskaammat vaunut kasvattivat sivuttaissiirtymän syvyydellä -3 metriä maanpinnasta pysäytyksen ensimmäisen 20

minuutin aikana arvoon 0,48 mm eli sivuttaissiirtymä kasvoi 0,3 mm pois päin radasta. Sivuttaissiirtymä ei enää loppupysäytyksen aikana kasvanut. Palautuminen junan poistuttua oli nopeaa. Melkein heti staattisen painon poistuessa kuormittamasta rataa, sivuttaissiirtymä syvyydellä -3 m palautui tasolle 0,13 mm. Palautuminen siitä eteenpäin tapahtui koko mittaussyvyydellä yleisesti hitaammin. Syvyyksissä -5 m ja -10 m palautuminen oli hitaampaa kuin muualla.



Kuva 7.39. Sivuttaissiirtymän muutos 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 233+900.

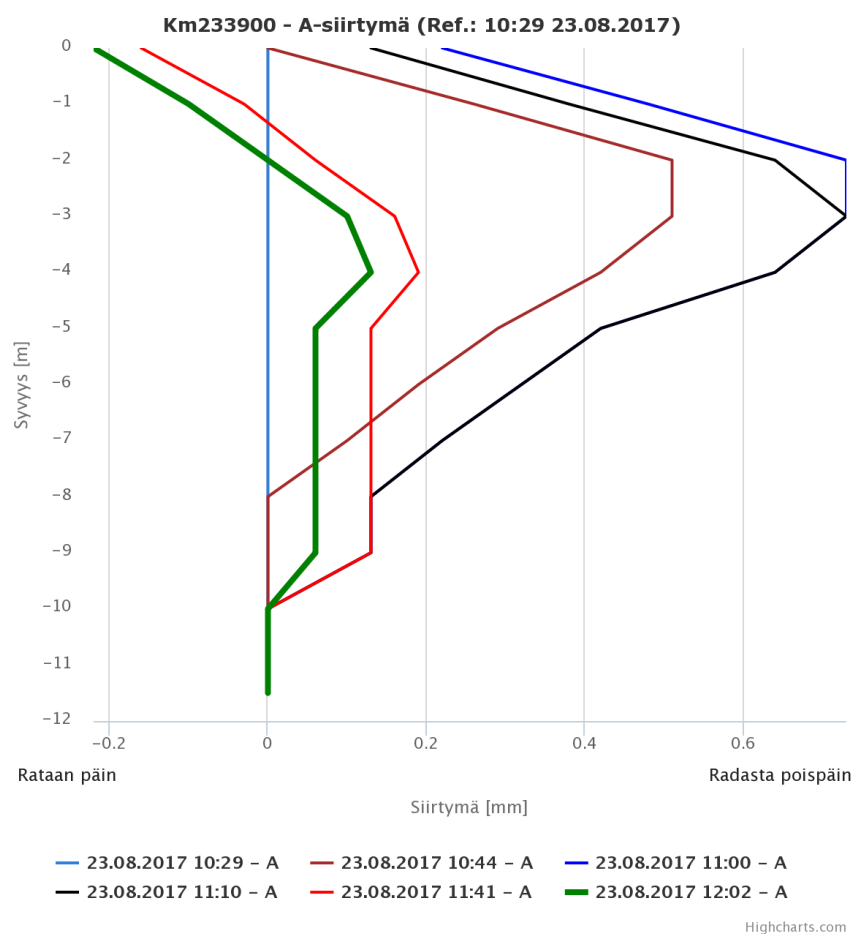
Edellä mainittujen tulosten pohjalta huomataan, että suurin sivuttaissiirtymä tapahtui kohteella km 233+900 syvyydellä -3 metriä maanpinnasta. Siirtymä oli 0,48 mm pois päin radasta. Kuvassa 7.40 on esitetty syvyydellä -3 m tapahtuneet sivuttaissiirtymät ajan suhteen, kun referenssitasona pidetään ajankohtaa 23.20. Kuvasta nähdään, kuinka kuorma aiheuttaa pohjamaassa pientä sivuttaissiirtymää, joka kuitenkin palautuu nopeasti kuorman poistuttua. Pysyvää muodonmuutosta ei suomalaisten vaunujen kuormituksessa tapahtunut.

233900 - Siirtymä valitussa syvyydessä (Syvyys: -3.00 Ref.: 23:20 05.06.2017)


Highcharts.com

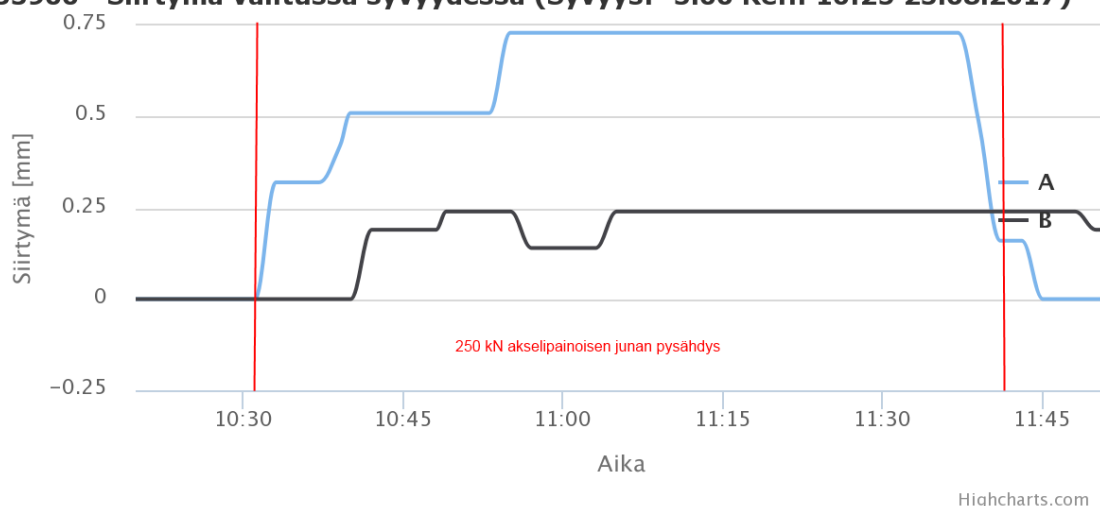
Kuva 7.40. Sivuttaissiirtymien muutos ajan suhteen suomalaisten vaunujen pysäytyksien aikana syvyydellä -3 m kohteessa km 233+900. A=rataa kohtisuora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksen referenssitaso määrättiin ajankohdalle 23.8.2017 klo 10.29. Pysäytys kohteessa km 233+900 tapahtui 23.8.2017 klo 10.35-11.42. Kuvassa 7.41 on esitetty sivuttaissiirtymän muutos eri syvyyksillä maan pinnasta kovaan pohjaan saakka. Tuloksista nähdään, että suurin sivuttaissiirtymä tapahtuu jälleen syvyydellä -3 metriä maanpinnasta. Mitatun suurimman sivuttaissiirtymän arvo oli 0,73 mm, joka oli 0,25 mm suurempi kuin suomalaisten 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormittaessa rataa. Sivuttaissiirtymä kasvoi nopeasti ja palautui kuorman poistuttua nopeasti lähelle referenssitasoa.



Kuva 7.41. Sivuttaissiirtymän muutos 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 233+900.

Kuvassa 7.42 esitetään siirtymät -3 metrin syvyydessä ajan suhteen venäläisten 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormittaessa rataa. Sivuttaissiirtymä syntyy nopeasti portaittain kuorman tullessa penkereen päälle. Ensin siirtymän suurin arvo tasaantuu noin tasolle 0,5 mm, mutta nousee noin 10 minuutin kuluttua mitattuun maksimiarvoonsa 0,73 mm. Kun kuorma siirtyy pois penkereeltä, sivuttaissiirtymä palautuu nopeasti referenssitasolle.

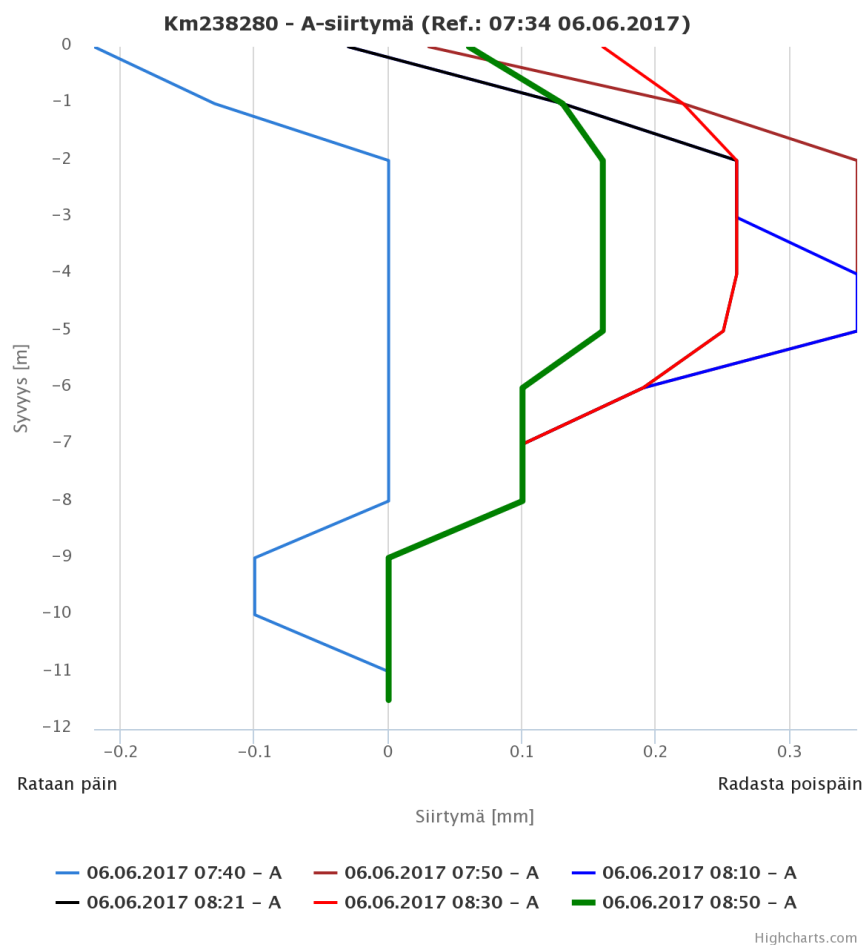
233900 - Siirtymä valitussa syvyydessä (Syvyys: -3.00 Ref.: 10:25 23.08.2017)

Kuva 7.42. Sivuttaissiirtymien kehitys ajan suhteen 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana syvyydellä -3 m kohteessa km 233+900. A=rataa kohtisuora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

Kohteen km 233+900 sivuttaissiirtymien suuruus on kuorman suhteen melko lineaarista. Pohjamaa pysyi kuormituksen aikana oletettavasti lähes kokonaan kimmoisalla alueella. Siirtymät syntyvät nopeasti kuormituksen alkaessa ja palautuivat pois kuormituksen poistuessa. Sivuttaissuunnassa pohjamaassa ei tapahtunut tehtyjen pysäytysten aikana mitattujen tulosten mukaan pysyvää muodonmuutosta. Siirtymät eivät kasvaneet kuormituksen alaisena, vaan vakiintuvat tietylle tasolle, minkä seurauksena voi olettaa, että pidempi kuormitus ei olisi aiheuttanut suurempia sivuttaissiirtymiä, eikä pysyviä muodonmuutoksia.

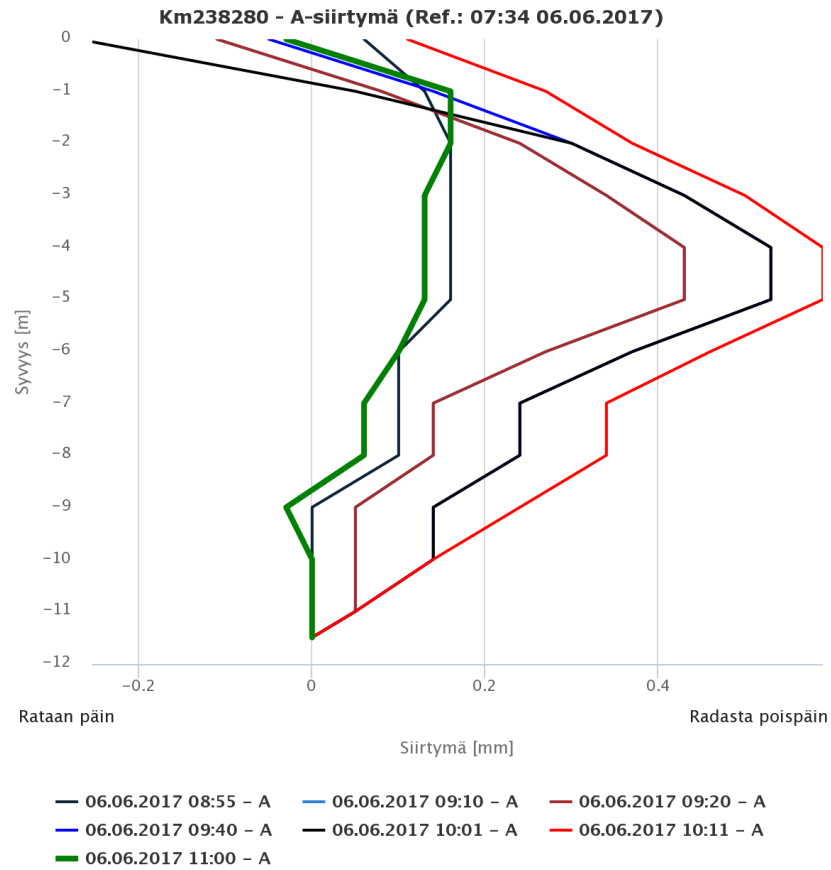
7.3.2 Kohde km 238+280

Suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksien referenssitasoksi päätettiin 6.6.2017 klo 7.34 tehdyn mittauksen tulos. Ensimmäinen pysäytys, jossa pysäytettiin 170 kN akselipainoiset vaunut kohteella km 238+280 tapahtui 6.6.2017 klo 7.40-8.20. Pysäytyksen aiheuttama pohjamaan sivuttaissiirtymä kohtisuoraan rataa nähden on esitetty kuvassa 7.43. Suurin sivuttaissiirtymä tapahtui syvyydellä -5 m maan pinnasta. Sivuttaissiirtymän suuruus oli 0,35 mm radasta poispäin. Siirtymä kasvoi nopeasti noin kymmenessä minuutissa maksimiarvoonsa ja laski jo pysäytyksen aikana syvyydellä -3 m ja -4 m maan pinnasta arvoon 0,26 mm. Syvyydellä -5 m maan pinnasta siirtymä pysyi arvossa 0,35 mm referenssitasoon nähden. Kuorman poistuttua palautuminen tapahtui nopeasti ja sivuttaissiirtymän maksimiarvo ennätti palautua noin 0,2 mm ennen seuraavana pysäytystä.



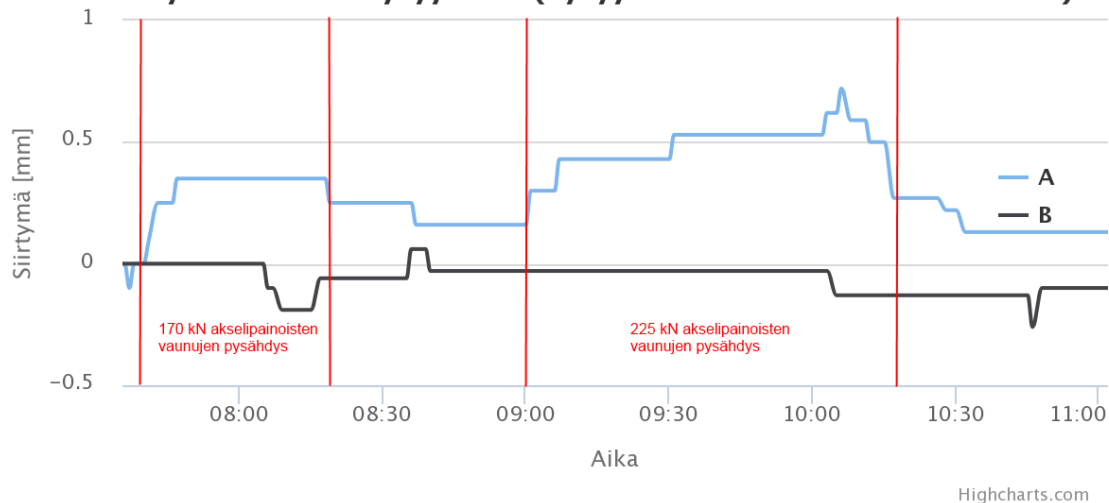
Kuva 7.43. Sivuttaissiirtymän muutos 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 238+280.

225 kN akselipainoisten suomalaisten vaunujen pysäytys tapahtui klo 9.00-11.45. Referenssitaso pidettiin samana kuin aikaisemmassa tarkastelussa. Suurin sivuttaissiirtymä 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormittaessa rataa tapahtui -5 m syvyydellä maan pinnasta ja sen suuruus oli 0,59 mm. Sivuttaissiirtymän syvyysprofiilit eri ajanhetkillä pysäytyksen aikana on esitetty kuvassa 7.44.



Kuva 7.44. Sivuttaissiirtymän muutos 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 238+280.

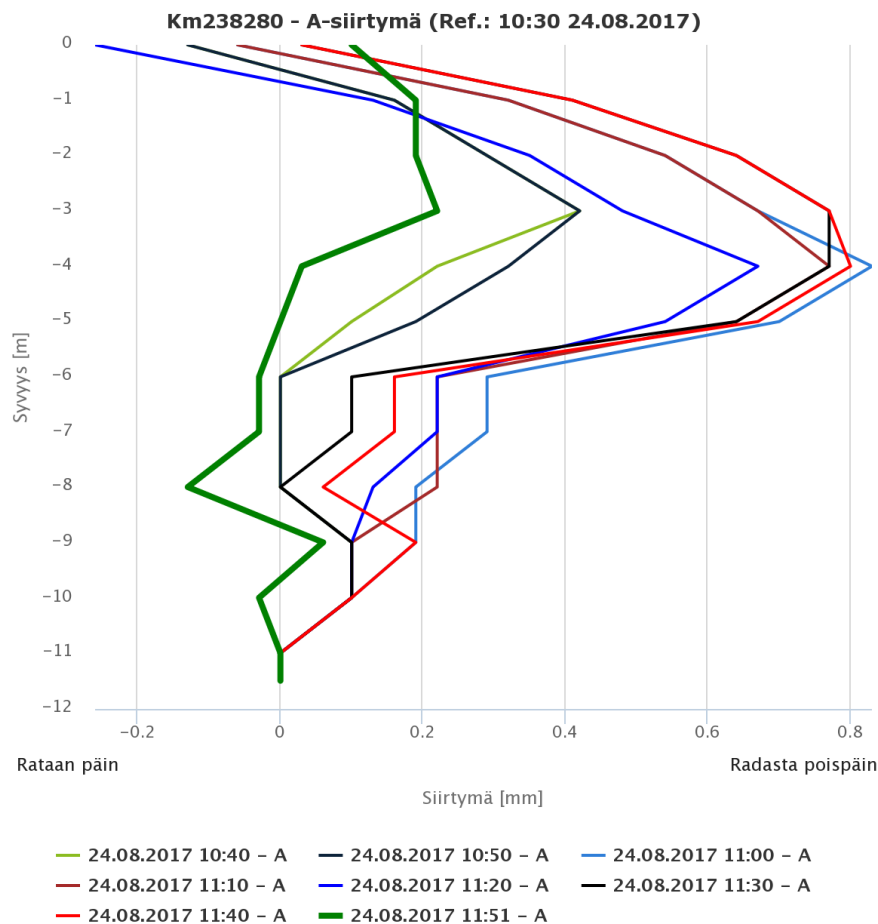
Suurin sivuttaissiirtymä tapahtui kohteessa km 238+280 molemmissa suomalaisten vaunujen pysäytyksissä syvyydellä -5 m maan pinnasta. Sivuttaissiirtymä ajan suhteen tällä korkeustasolla on esitetty kuvassa 7.45.

238280 - Siirtymä valitussa syvyydessä (Syvyys: -5.00 Ref.: 07:34 06.06.2017)


Kuva 7.45. Sivuttaissiirtymien muutos ajan suhteen suomalaisten vaunujen pysäytyksien aikana syvyydellä -5 m kohteessa km 238+280. A=rataa kohtisuora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

Ensimmäisen pysäytyksen aikana sivuttaissiirtymä radasta poispäin kasvoi aluksi nopeasti ja pysyi vakiona pysäytyksen loppuajan. Pysäytyksien välissä siirtymä palautui hie-man, muttei aivan referenssitasolle. Toisessa pysäytyksessä sivuttaissiirtymä vakiintui ensin arvoon 0,53 mm, mutta aivan pysäytyksen lopussa siirtymä kasvoi maksimiarvoonsa.

Venäläisistä vaunuista koostuvan junan pysäytyksessä inklinometrituloksien referenssi-tasoksi asetettiin 24.8.2017 klo 10.30 tehdyn mittauksen tulos. 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytys tapahtui klo 10.38-11.45. Sivuttaissiirtymä kasvoi nopeasti arvoon noin 0,8 mm radasta poispäin verrattuna referenssitasoon. Pysäytyksen aikana sivuttais-siirtymä pieneni arvoon 0,42 mm, mutta nousi vielä lopuksi suuremmaksi kuin alussa. Siirtymä oli noin puolitoistakertainen 225 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttamaan siirtymään verrattuna. Testijunan pysäytyksen aiheuttamien sivuttaissiirtymien sy-vyysprofiili on esitetty kuvassa 7.46.

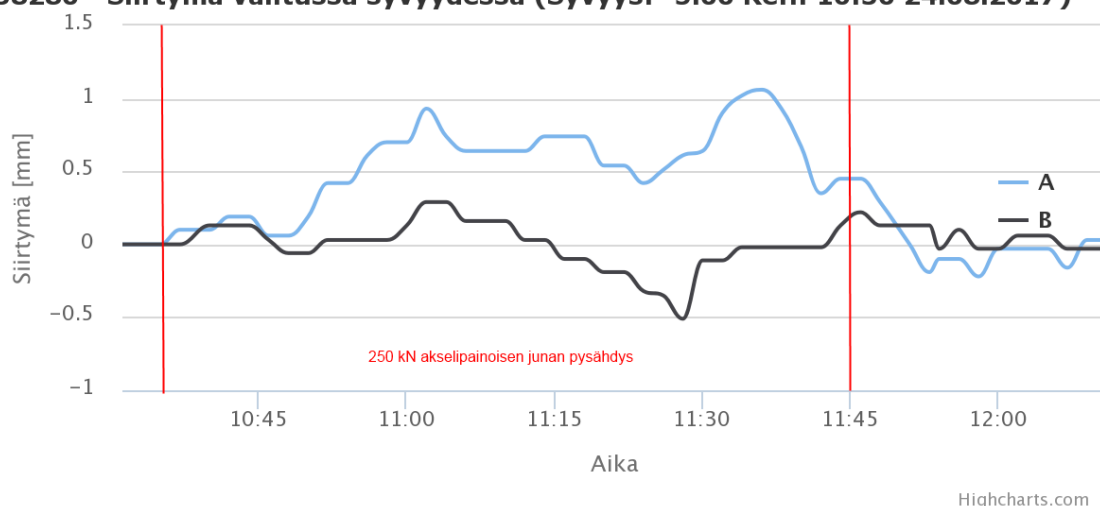


Highcharts.com

Kuva 7.46. Sivuttaissiirtymän muutos 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 238+280.

Pohjamaassa tapahtuva sivuttaissiirtymä on huomattavasti pienempi syvyydellä -6 metriä maanpinnasta kuin syvyydellä -5 metriä maanpinnasta. Tarkasteltaessa liitteessä 3 esitetyt CPTU-koekairauksen tuloksia huomataan samalla syvyydellä selvä maakerrosraja. Maakerrokset on esitelty myös stabiliteettilaskentojen yhteydessä taulukossa 7.4. Suurimmat sivuttaissiirtymät tapahtuvat taulukon 7.4 mukaisessa maakerroksessa 3. Kerroksessa 4 sivuttaissiirtymät ovat huomattavasti pienemmät. Kerroksen 4 savi on tilavuuspainoltaan suurempi kuin kerroksen 3 savi, mikä viittaisi siltisempään saveen.

Ajan suhteen piirrettyssä kuvassa 7.47 mitattu sivuttaissiirtymä syvyydellä -5 metriä maanpinnasta kasvoi pysäytyksen alkaessa, pieneni pysäytyksen puolivälissä, kasvoi taas pysäytyksen loppua kohti ja lähti laskemaan ennen pysäytyksen lopettamista. Pysäytyksen jälkeen sivuttaissiirtymä vakiintui nopeasti referenssitilalle.

238280 - Siirtymä valitussa syvyydessä (Syvyys: -5.00 Ref.: 10:30 24.08.2017)

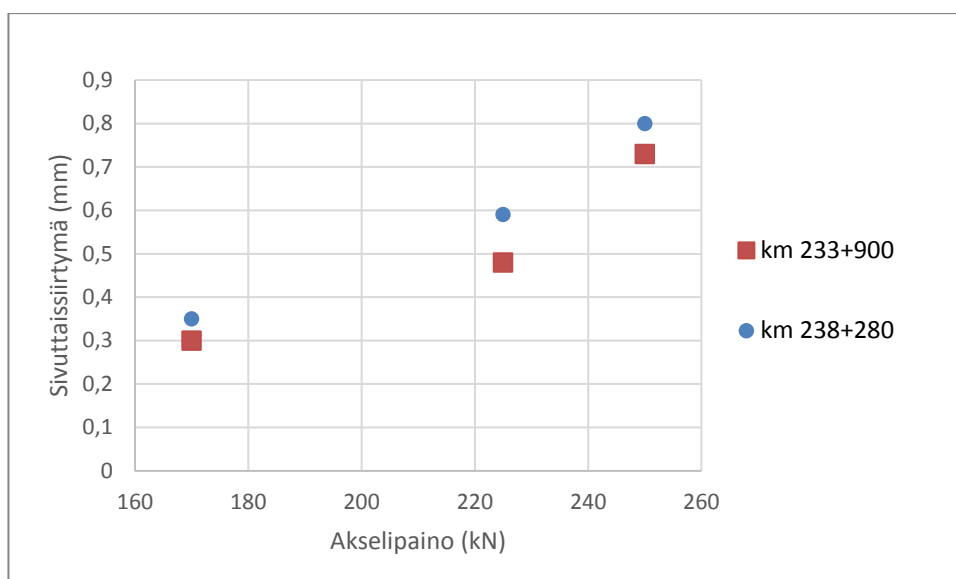
Kuva 7.47. Sivuttaissiirtymien muutos ajan suhteen 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksien aikana syvyydellä -5 m kohteessa km 238+280. A=rataa kohtisuora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

Mitattu sivuttaissiirtymä syvyydellä -5 maanpinnasta ei pysynyt yhtä vakaana kuormituksen ajan kuin muissa pysäytyksissä. Inklinometrien mittaustarkkuus on näin pienillä siirtymätasolla ääriarajoillaan, mikä voi vaikuttaa mittaustulosten vaihteluun pysäytyksen aikana. Kuvien 7.46 ja 7.47 mukaan sivuttaissiirtymän suurin arvo 250 kN akselipainon kuormittaessa rataa on noin 0,8 mm.

7.3.3 Sivuttaissiirtymä mittausten yhteenveto

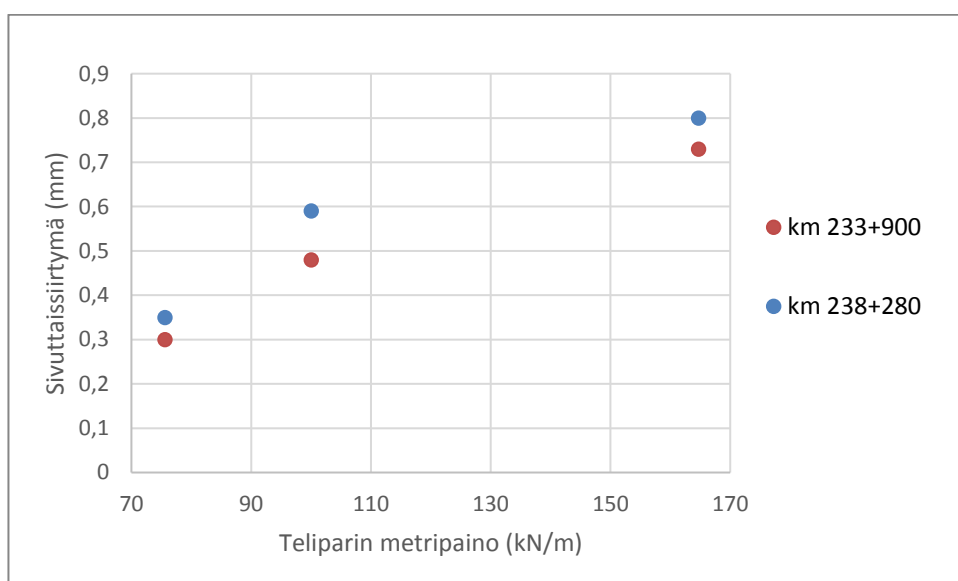
Yhteenvetona voidaan todeta, että sivuttaissiirtymät eivät kasvaneet jatkuvasti pysäytysten aikana. Sivuttaissiirtymä saavutti lähes jokaisella pysäytyksellä mittauksen maksiminsa melko pian, jäi sille tasolle kuormituksen ajaksi ja palautui käytännössä kokonaan pois kuorman poistuttua. Pohjamaa käyttäytyi kimmoisasti testijunien pysäytyksien kuormituksessa. Tulosten perusteella voi olettaa, että vaikka pysäytyksiä pidennettäisiin ei pohjamaassa tapahtuisi merkittäviä pysyviä muodonmuutoksia tutkituilla akselipainoilla.

Pysäytyksien aikana mitatut sivuttaissiirtymien maksimit suhteessa akselipainoon on esitetty kuvassa 7.48. Kohdekohtaiset suurimmat sivuttaissiirtymät tapahtuivat kohteessa km 233+900 syvyydellä -3 metriä maanpinnasta ja kohteessa km 238+280 syvyydellä -5 metriä maanpinnasta.



Kuva 7.48 Mitatut suurimmat sivuttaissiirtymät pysäytyksien aikana suhteessa akselipainoon.

Mittaustuloksista saatavan kuvaajan mukaan sivuttaissiirtymän suhde akselipainoon on eksponentiaalisesti kasvava. Kuitenkin jos mitattuja suurimpia sivuttaissiirtymiä verrataan teliparin metripainoon, huomataan siirtymien kasvun olevan teliparin metripainon suhteen lähes lineaarista. (Kuva 7.49.)



Kuva 7.49 Mitatut suurimmat sivuttaissiirtymät pysäytyksien aikana suhteessa teliparin metripainoon.

Kuten kuvasta 7.49 huomataan, kohteen km 238+280 sivuttaissiirtymät ovat hieman suuremmat kuin kohteen km 233+900 sivuttaissiirtymät. Kuitenkin pystysiirtymissä asia on juuri toisinpäin. Kuten kappaleessa 2.2.5 kerrotaan, teorian mukaan pohjamaan sivuttais-

siirtymät suljetussa tilassa ovat verrannollisia pohjamaan pinnassa tapahtuviin pystysiirtymiin. Teorian mukaan kohteen km 238+280 sivuttaissiirtymien pitäisi siis olla pienempiä kuin kohteessa km 233+900.

Suuremmat sivuttaissiirtymät kohteessa km 238+280 voivat johtua inklinometrien sijainnista rataan nähden. Kohteessa km 238+280 inklinometri on asennettu noin 3,9 metrin etäisyydelle radan keskilinjasta, kun taas kohteessa km 233+900 inklinometri on asennettu noin 5,5 metrin etäisyydelle radan keskilinjasta. Toisena syynä voidaan pitää kaarteesta johtuvaa radan kallistusta kohteessa km 238+280. Radan kallistus kaarteessa aiheuttaa suuremman kuorman pohjamaahan kaarteeseen sisäpuolelle, jossa inklinometri sijaitsee. Tällaisessa tutkimuksessa sivuttaissiirtymien mittaukset olisi syytä tehdä radan molemmin puolin, varsinkin jos tutkimuskohteessa radassa on kaarre.

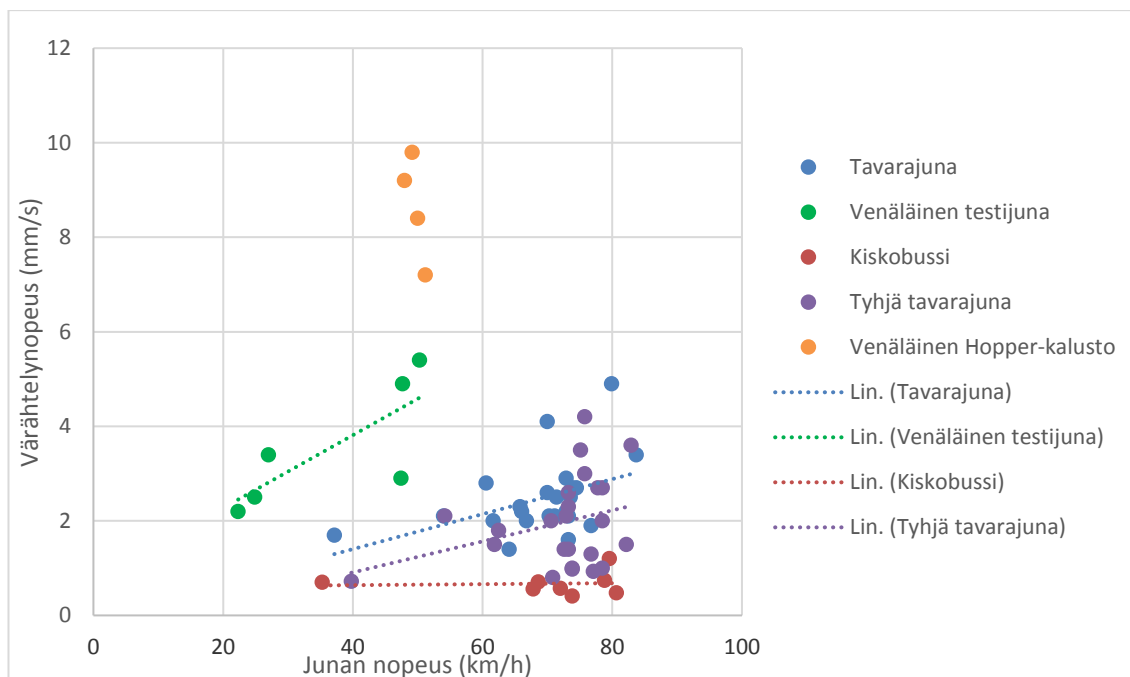
7.4 Junaliikenteen aiheuttama tärinä

Junaliikenteen aiheuttamaa tärinää rataympäristössä tutkittiin geofoneilla, jotka mittasivat maan värähtelyn nopeutta kolmessa eri suunnassa. Tutkimuksessa tarkasteltiin pystysuuntaista värähtelyä.

Värähtelytuloksia tulkittiin junien nopeuden funktiona. Junien nopeudet määritettiin siirtymäantureiden tuloksista. Niistä saatiin selville, kuinka kauan aikaa tietyllä akselilla kesti kulkea kahden eri siirtymäanturin välinen matka. Koska siirtymäanturien keskinäiset etäisyydet tiedettiin, voitiin siirtymäanturien tuloksista laskea junan nopeus. Siirtymäanturien tuloksista voitiin myös määrittää karkeasti junan tyyppi. Junat jaettiin tässä tarkastelussa viiteen eri luokkaan: venäläisistä vaunuista koostuvaan testijunaan, muuhun venäläiseen Hopper-kalustoon, suomalaisiin lastattuihin tavarajuniin, tyhjiin tavarajuniin sekä kiskobusseihin.

7.4.1 Kohde km 233+900

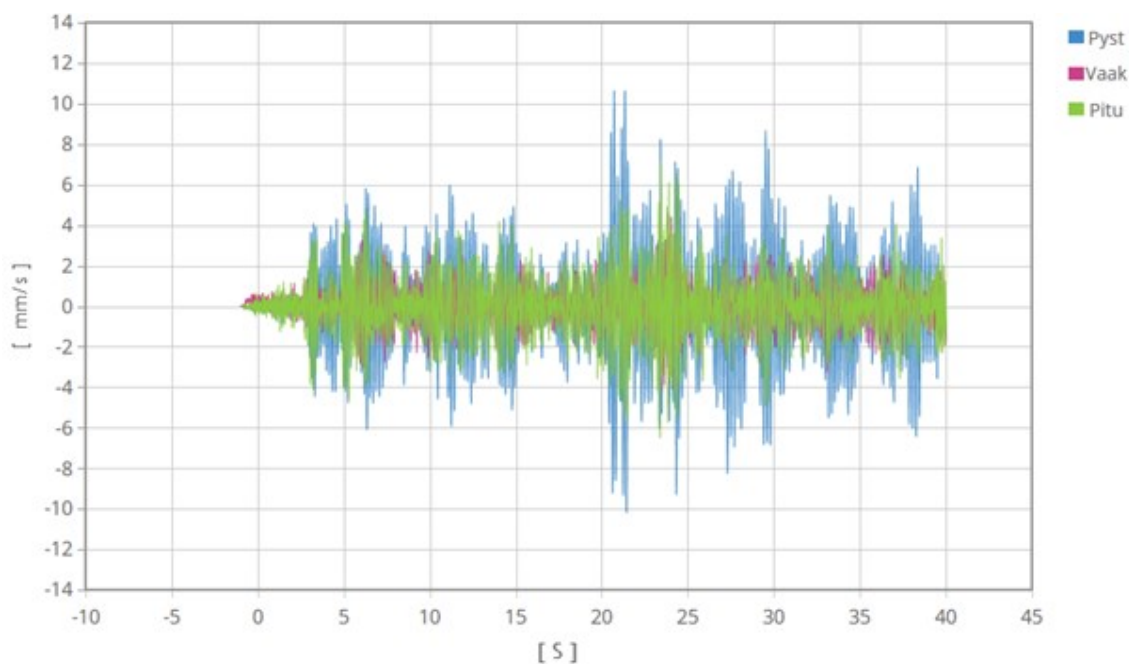
Kuvassa 7.50 on esitetty erilaisten junakalustojen aiheuttaman tärinän värähtelyn nopeutta verrattuna junakalustojen ajonopeuteen 20 metrin päästä radasta kohteessa km 233+900. Kuvasta nähdään, että raskaat junat aiheuttavat suurempia värähtelyn nopeuksia, kuin kevyemmät junat. Kuvasta huomataan myös ajonopeuden vaikuttavan värähtelyn nopeuteen. Suuremmat ajonopeudet aiheuttavat suurempia värähtelyn nopeuksia.



Kuva 7.50 Mitattu värinä 20 metrin päässä radasta junan nopeuden funktiona kohteessa km 233+900.

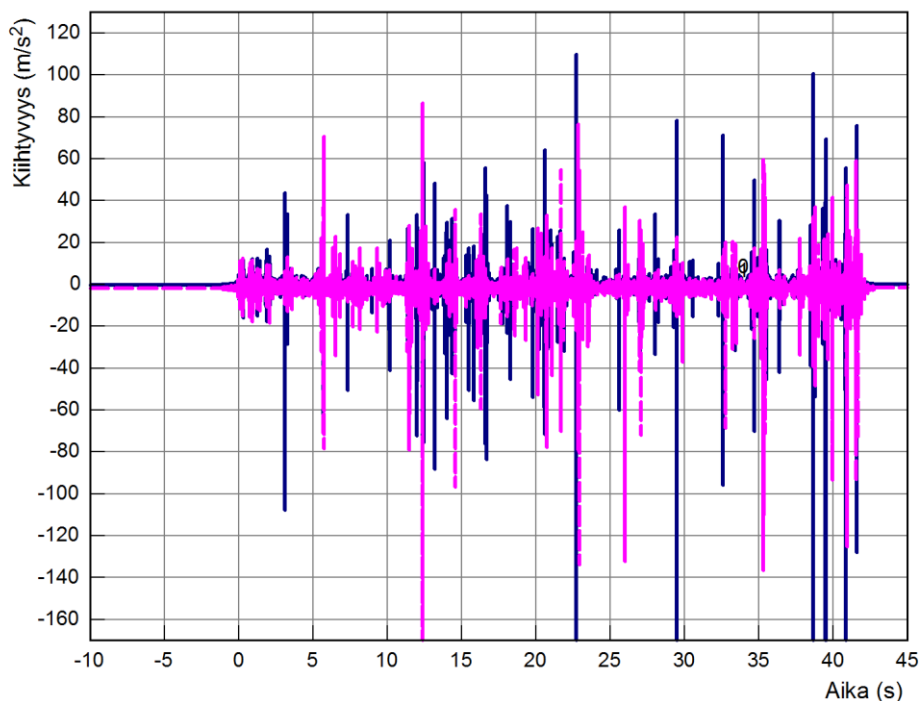
Venäläinen rataosalla liikennöivä 225 kN akselipainoinen Hopper-kalusto aiheutti suurimpia värähtelynopeuksia. Suurten värähtelynopeuksien ajateltiin ensin johtuvan tietystä nopeudesta, jossa värähtelytaajuus olisi sama maaperän resonanssitaajuuden kanssa. Sutela kutsuu tätä ilmiötä diplomityössään kriittiseksi nopeudeksi, jota ei kuitenkaan pidä sekoittaa Winklerin alustamallin mukaiseen kriittiseen nopeuteen. Sutelan kriittinen nopeus on käsite, joka kertoo kohdekohtaisesti junien nopeuden, jolla junat aiheuttavat voimakkainta värähtelyä rataympäristöön (Sutela 2016). Kuitenkin tämän olisi pitänyt näkyä myös venäläisillä vaunuilla kootun testijunan tuloksissa, koska testijuna ajoi samaa nopeutta kuin muu Hopper-kalusto. Tämän seurauksena syytä venäläisen Hopper-kaluston aiheuttamiin suuriin värähtelynopeuksiin etsittiin kaluston kunnosta.

Kaluston kuntoa tutkittiin värähtelysignaalin ja pölkkyistä mitattujen kiihtyvyytuloksien kuvaajista. Värähtelysignaalin kuvaajasta etsittiin selviä piikkejä, jotka voisivat johtua lovipyöristä. Kohteelta km 233+900 tarkasteluun valittiin 24.8.2017 klo 14.06 ajanut venäläinen Hopper-kalustosta koostuva juna. Junan aiheuttama värähtelysignaali on esitetty kuvassa 7.51.



Kuva 7.51 Hopper-kaluston aiheuttama värähtelysignaali 20 metrin päässä radasta kohteessa km 233+900.

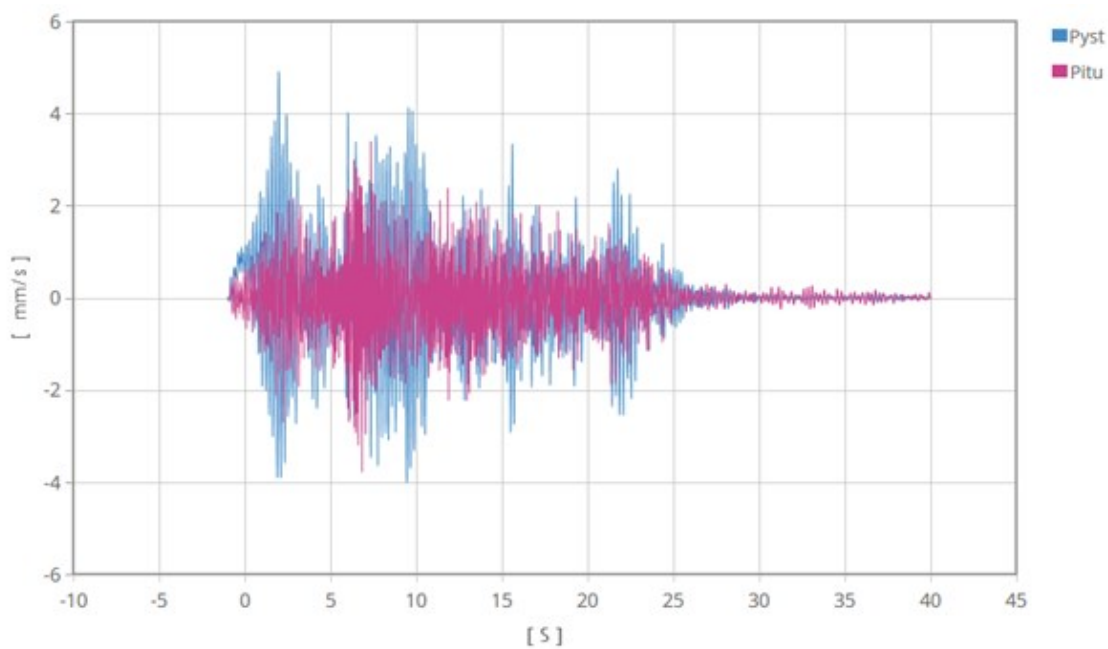
Värähtelysignaalissa on selviä yksittäisiä lyhyitä piikkejä, jotka vaikuttavat lovipyörien aiheuttamalta värähtelyltä. Värähtelysignaalia verrattiin kahden kiihtyvyyssanturin pölkystä mittaamiin kiihtyvyytuloksiin samasta ajosta. Koska analysoinnissa on käytetty vain kahta anturia, ei lovipyörä välttämättä osu anturin kohdalle, jolloin suurin kiihtyvyys voi jäädä mittaamatta. Kiihtyvyyssignaalit on esitetty kuvassa 7.52.



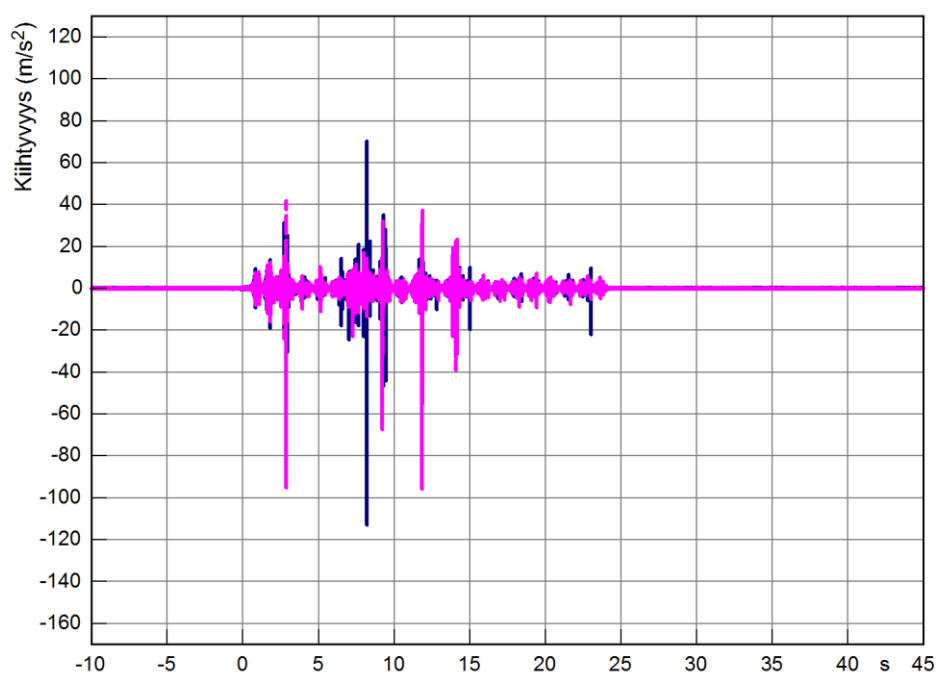
Kuva 7.52 Hopper-kaluston pölkkyyn aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 233+900.

Kiihtyvyyssanturien tuloksista nähdään lovipyörien aiheuttamat kiihtyvyydessä tapahtuvat piikit. Verrattaessa näitä värähtelysignaaliin voidaan todeta, että suurimmat värähtelyt johtuvat kaluston lovipyöristä. Hyväkuntoinen kalusto aiheuttaisi huomattavasti pienempää tärinää.

Samanlainen tarkastelu tehtiin myös tutkimuksessa käytetyille venäläisistä vaunuista koostuvalle testijunalle. Kohteelta km 233+900 valittiin testijunan ajo 24.8.2017 klo 8.48. Testijunan aiheuttama värähtelysignaali on esitetty kuvassa 7.53. Kiihtyvyyssignaali on esitetty kuvassa 7.54.



Kuva 7.53 Akselipainoltaan 250 kN vaunuista koostuvan testijunan aiheuttama värähtelysignaali kohteessa km 233+900.



Kuva 7.54 Akselipainoltaan 250 kN vaunuista koostuvan testijunan pölkkyyn aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 233+900.

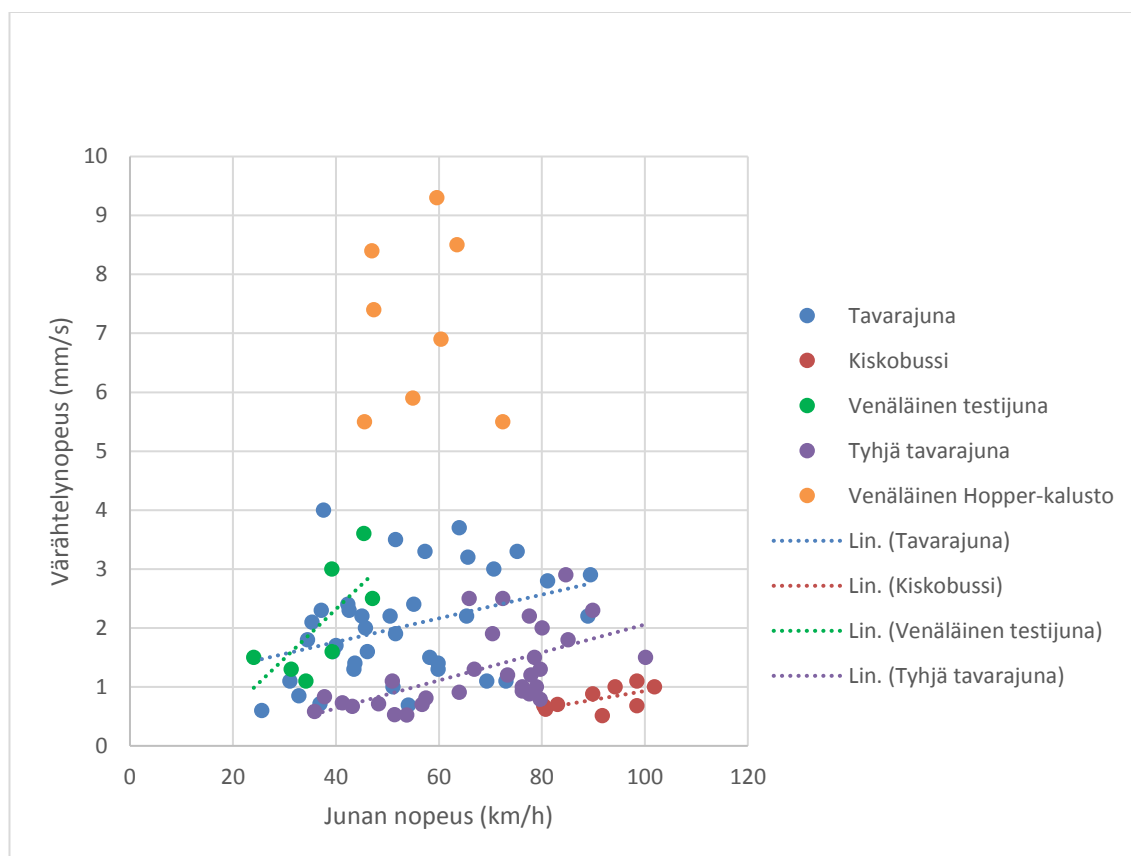
Kiihtyvyyssantureiden tuloksista nähdään, että junassa on kuusi lovipyörää. Lovipyörät vastaavat värähtelysignaalin huippujen kanssa. Värähtelysignaalissa 20-25 sekuntien kohdalla tapahtuva hieman suurempi värähtelynopeus ei johdu kiihtyvyyssmittausten tu-

losten mukaan kalustosta. Suuremman värähtelyn voi selittää eri värähtelyaaltojen yhteisvaikutus. Samassa vaiheessa olevat aallot vahvistavat toinen toistaan aiheuttaen suuremman yhteisen värähtelynopeuden.

Analyysin mukaan lovipyörät aiheuttavat rataympäristölle suurinta tärinää. Tähän tutkimukseen liittyvät tulokset viittaavat, että 250 kN akselipainoiset junat voivat aiheuttaa aiempaa suurempaa tärinää rataympäristölle, jos kalustossa olisi useita lovipyöriä ja juna olisi pitkä.

7.4.2 Kohde km 238+280

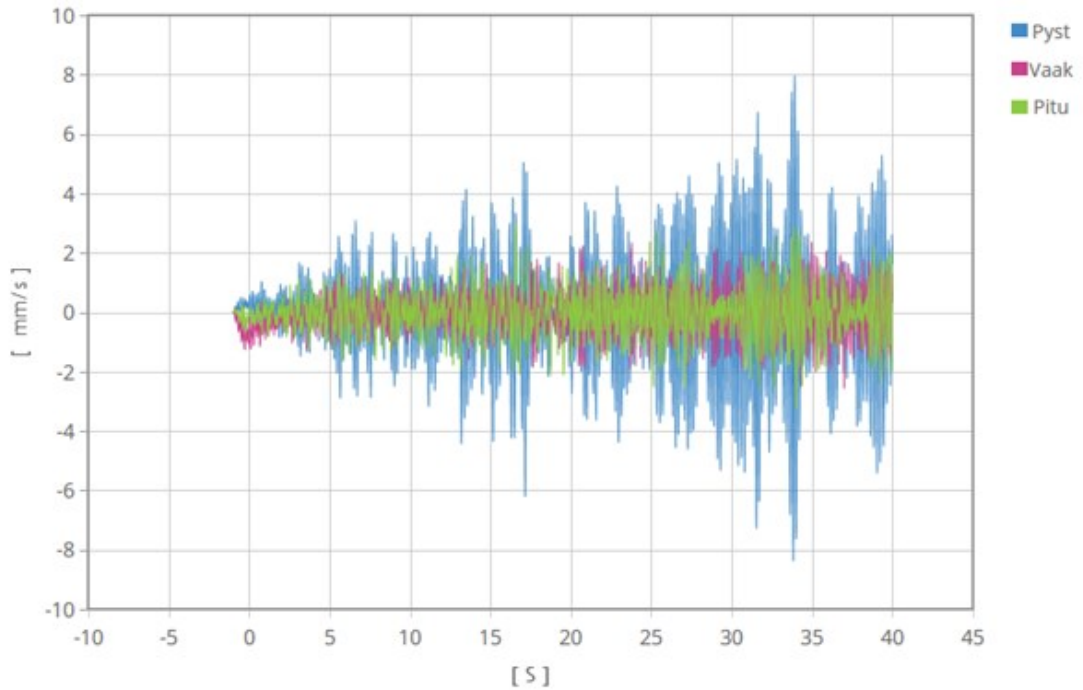
Kohteessa km 238+280 mitatut värähtelynopeudet suhteessa junien nopeuksiin on esitetty kuvassa 7.55. Kuvasta nähdään, että junan kuorma ja nopeus vaikuttavat tärinän suuruuteen. Täyteen lastatut tavarajunat aiheuttavat suurempaa tärinää kuin tyhjä tavarajuna, jotka taas aiheuttavat voimakkaamman tärinän kuin kiskobussit. Tärinän suuruus kalustoikohtaisesti kasvaa nopeuden kasvaessa. Tässä tutkimuksessa ei havaita selvää kriittistä nopeutta, jolla tärinän voimakkuus olisi suurempi kuin muilla nopeuksilla.



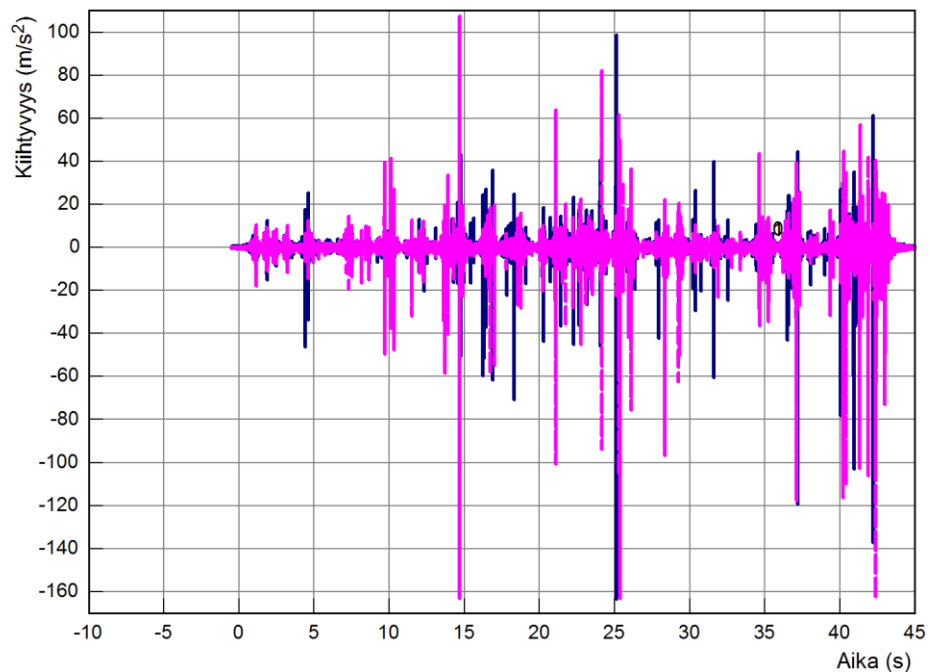
Kuva 7.55 Tärinä 20 metrin päässä radasta junan nopeuden funktiona kohteessa km 238+280.

Venäläinen Kouvola-Kotka rataosalla liikennöivä 225 kN akselipainoinen Hopper-kalusto aiheutti tässäkin kohteessa suuria värähtelynopeuksia. Kalustojen kuntoa tutkittiin

samalla tavalla kuin edellisessä kohteessa. Hopper-kaluston tarkasteltavaksi ajoksi valittiin 24.8.2017 klo 14.14 ja venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan ajoksi 24.8.2017 klo 8.45. Junat ovat samat kuin toisessa kohteessa. Hopper-kaluston värähtelysignaali ja kiihtyvyydet on esitetty kuvissa 7.56 ja 7.57.



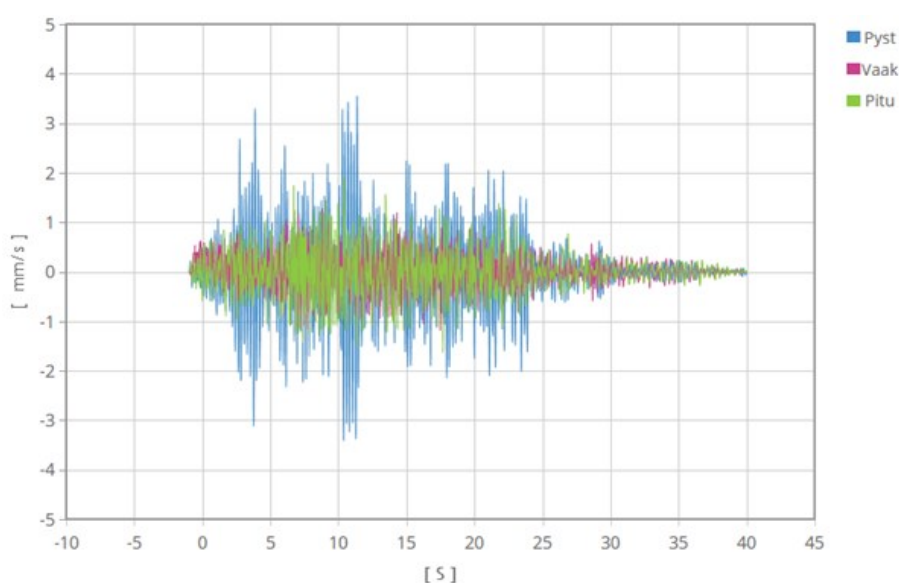
Kuva 7.56 Hopper-kaluston aiheuttama värähtelysignaali kohteessa km 238+280.



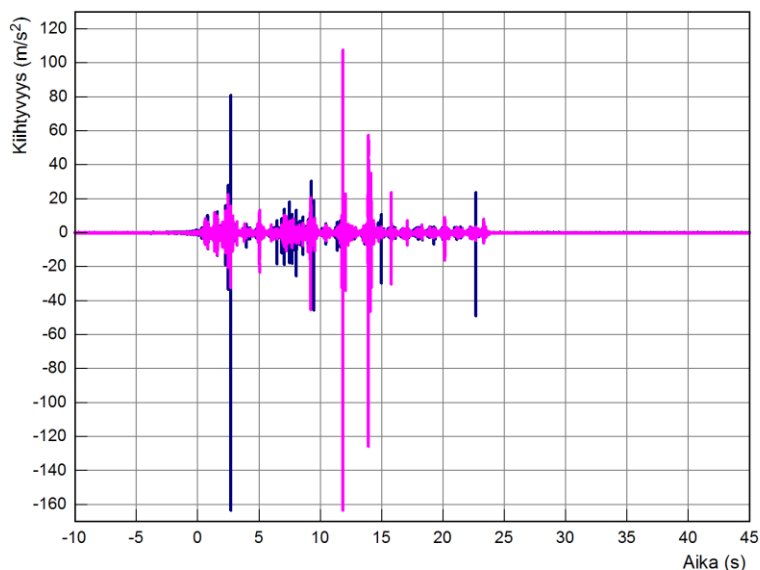
Kuva 7.57 Hopper-kaluston pölkkyyn aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 238+280.

Hopper-kaluston kunto on kiihtyvyyssanturien mittaamien tulosten mukaan heikko. Junassa olevat lovipyörät huomataan kiihtyvyyssuureista suurista piikeistä. Lovipyörät aiheuttavat suurta värähtelyä rataympäristöön. Värähtelysignaalin suurimpaan arvoon ei kuitenkaan löydy yksiselitteistä selitystä kaluston kunnosta, koska sillä ajanhetkellä kaluston vaunuissa ei ole kiihtyvyyssmittausten tulosten mukaan lovipyöriä. Värähtelysignaalin suuret arvot voivat johtua junan pituuden ja lovipyörien yhteisvaikutuksesta. Värähtelyaallot liikkuvat rataympäristössä samalla taajuudella ja voimistuvat junan ohiajon edetessä.

Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat värähtely- ja kiihtyvyyssignaalit on esitetty kuvissa 7.58 ja 7.59. Kyseessä on sama ajo kuin toisen kohteen edellisessä kappaleessa tarkasteltu ajo.



Kuva 7.58 Akselipainoltaan 250 kN testijunan aiheuttama värähtelysignaali kohteessa km 238+280.

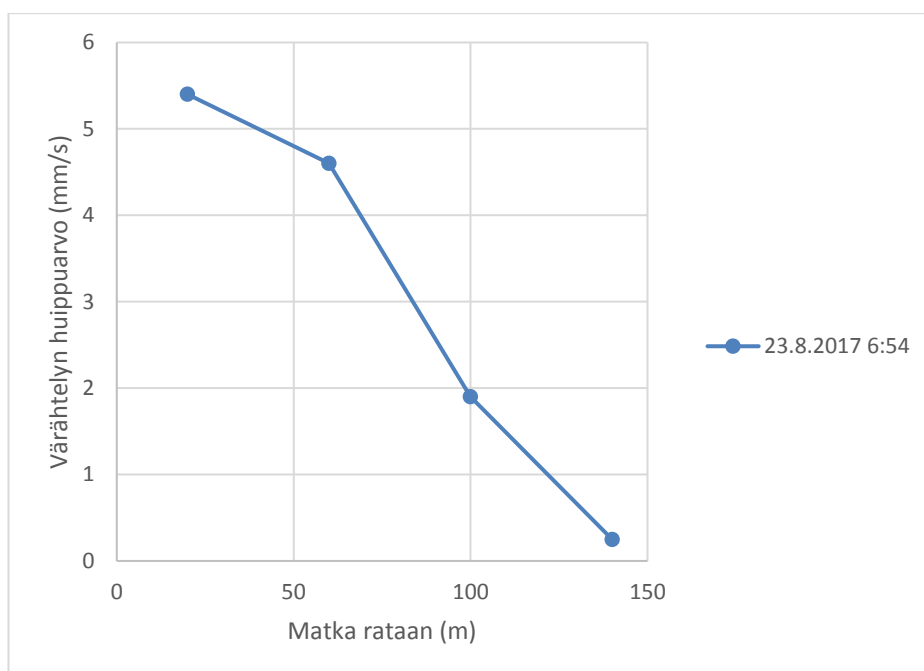


Kuva 7.59 Akselipainoltaan 250 kN testijunan aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 238+280.

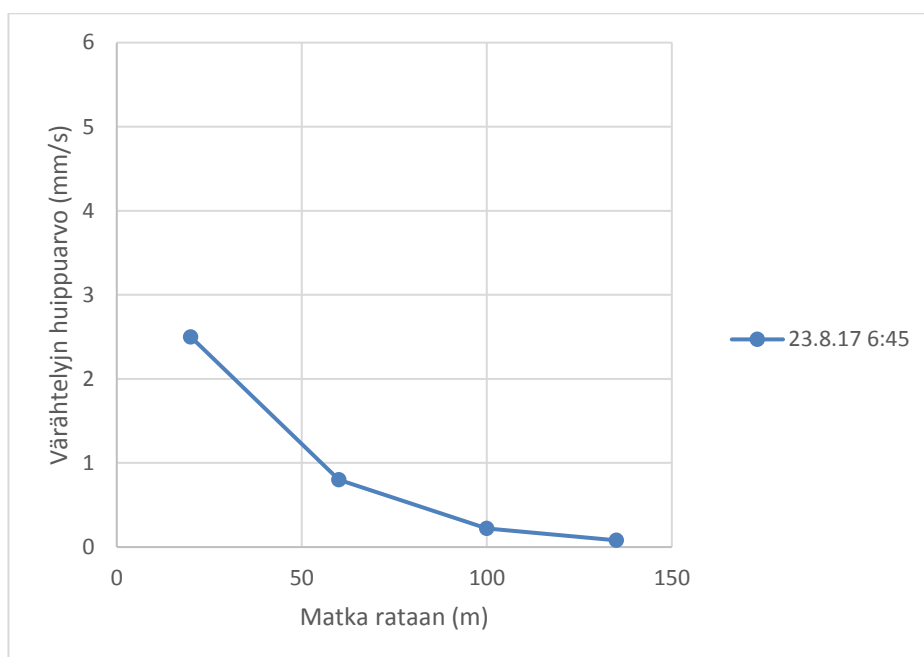
Junan ensimmäisissä vaunuissa havaitaan lovipyörä, joka voi aiheuttaa värähtelysignaalin alussa olevan suuren pystyvärähtelyn. Värähtelysignaalin suurimman arvon aiheuttaa tarkastelun mukaan lovipyörä, joka kiihtyvyyssatassa on mitattu noin 11 sekunnin kohdalla.

Verrattaessa 225 kN akselipainoisen Hopper-kaluston ja venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan välisiä värähtelyn voimakkuuksia nähdään, että kaluston kunto aiheuttaa värähtelyjen suuret erot. Testijunien vaunut olivat varsin hyvässä kunnossa. Tällä hetkellä liikennöivä kalusto ei ole niin hyvässä kunnossa kuin testijunien vaunut olivat. Tarkastelun perusteella on vaikea sanoa aiheuttaisiko raskaampi 250 kN akselipainoinen juna suurempia värähtelynopeuksia rataympäristöön kuin tällä hetkellä liikennöivä 225 kN akselipainoinen juna.

Tärinän vaimenemista rataympäristössä tutkittiin venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan yhden ajon perusteella molemmista kohteista. Tarkastelun mukaan tärinä vaimenee kohteessa km 238+280 lyhyemmällä matkalla kuin kohteessa km 233+900. Tärinän vaimeneminen on esitetty kuvissa 7.60 ja 7.61.



Kuva 7.60 Tärinän vaimeneminen kohteessa km 233+900.



Kuva 7.61 Tärinän vaimeneminen kohteessa km 238+280.

7.5 Pohjatutkimukset ja radan stabiliteetilaskennat

Stabiliteetilaskennassa radan alla oleva pohjamaa on jaettu molemmissa kohteissa viiteen kerrokseen CPTU-kairauskokeen kärkivastuksen perusteella. Kerroksille määritettiin tilavuuspainot alustavien laboratoriotutkimustuloksien perusteella sekä suljettu leikkauslujuus CPTU-kairauskokeen ja siipikairauksien perusteella.

Penkereen alta pohjamaa otaksutaan lujittuneeksi penkereen painon ja liikennekuormituksen vaikutuksesta. Lujittunut maa on jaettu laskennassa kahteen vyöhykkeeseen. Vahvemmin lujittunut maa on suoraan radan alla ja hieman vähemmän lujittunut maa penkereen alla luiskien kohdalla. Penkereen alla olevan maan lujittuminen arvioitiin siipikairauksien ja CPTU-koekairauksien perusteella, kuten kappaleessa 2.6 kerrottiin. Luiskien alla olevan lujittuneen maan suljetun leikkauslujuuden oletettiin olevan penkereen vaikutuksesta lujittuneen maan ja lujittumattoman maan keskiarvo.

Siipikairausta ja CPTU-kairauskoetta ei yleisesti käytetä tutkittaessa pohjamaan lujittumista penkereen alla, vaan lujittuminen todetaan penkereen alta otettujen näytteiden laboratorionkokeiden tuloksista.

Molemmissa kohteissa laskenta tehtiin kahdella eri pintakuormalla. Raskaat suomalaiset 250 kN akselipainoiset junat, joiden metripaino on 80-88 kN/m, kuuluvat EN-rataluokkiin E4 ja E5. SFS-EN15528 mukaisten EN-rataluokkien 2D-stabiliteetilaskennassa käytettävät nauhakuorman arvo EN-rataluokilla E4 ja E5 on RATO 3:n mukaan 101 kN/m. Kun tämä arvo jaetaan pölkyn pituudella, ratapengertä kuormittavaksi pintakuormaksi saadaan 40,4 kPa.

Taulukoituja arvoja tarkasteltaessa huomataan, että 2D-stabiliteetilaskennassa käytettävä kuorman arvo lasketaan kaavalla:

$$q_{stab} = \frac{p \cdot 1,15}{l_{pölkky}}, \quad (9)$$

missä

q_{stab} = 2D-stabiliteetilaskennassa käytettävä kuorma [kPa]

p = vaunun metripaino [kN/m]

$l_{pölkky}$ = pölkyn pituus [m]

Ratapenkereen ja ympäristön pinnanmuodot on mitattu tarkkuus-GPS -laitteella. Pinnan muodot vastaavat todellisia muotoja muutaman senttimetrin tarkkuudella.

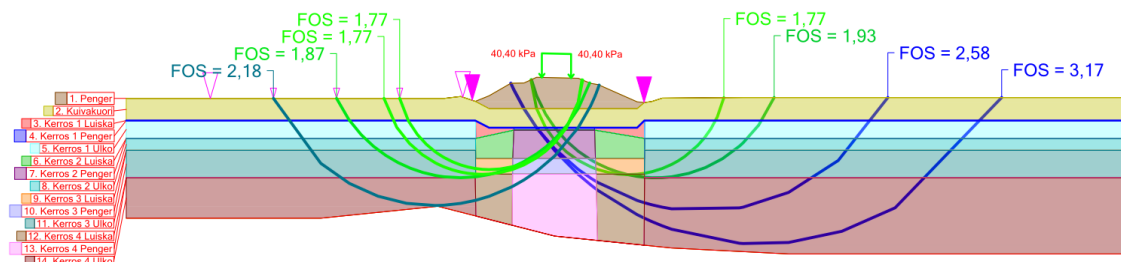
7.5.1 Kohde km 233+900

Kohteella km 233+900 stabiliteetilaskenta tehtiin Bishopin yksinkertaistetulla menetelmällä. Liukupinnan muotona käytettiin puoliympyrää. Stabiliteetti laskettiin molemmilla puolilla ratapengertä. Kovan pohjan sijainti arvioitiin vanhojen pohjatutkimusten perusteella (liite 1). Taulukossa 7.3 on esitetty stabiliteetilaskennassa käytetyt eri kerroksien suljetun leikkauslujuuden ja tilavuuspainojen arvot ja kuvassa 7.62 stabiliteetilaskennan tulokset.

Taulukko 7.3 Kohteen km 233+900 2D-stabiliateetilaskennassa käytetyt lähtöarvot.

Kohde km 233+900						
	Radan ulkopuolella			Penkereen alla		
	Korkeustaso [m]	Suljettu leikkauslujuus [kPa]	Tilavuuspaino [kN/m ³]	Korkeustaso [m]	Suljettu leikkauslujuus [kPa]	Tilavuuspaino [kN/m ³]
Penger				11,8		19
				9,5		
Kerros 1	10	30	17	9,5	30	17
	8,5	30		7,6	30	
Kerros 2	8,5	18	14,2	7,6	30	15
	7,5	13		7,4	21	
Kerros 3	7,5	13	14,5	7,4	21	14,8
	5,2	10,5		5	19,5	
Kerros 4	5,2	9	16	5	14,5	16,3
	4,2	9		3,7	16	
Kerros 5	4,2	11	14,8	3,7	17	15,5
	1	17		0,6	22	

2D Bishop's Simplified
Min.FOS = 1,77



Id	Soil layer	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	Φ [°]	Δc [kPa/m]	$\Delta \Phi$ [°/m]	Material Type	ru	ruq	ru'
1	Penger	19,00			36,00			Independent on depth			
2	Kerros 1	17,00		30,00				Independent on depth			
3	Kerros 2 Luiska	14,50		25,00		-5,00		Dependend on layer depth			
4	Kerros 2 Penger	15,00		30,00		-45,00		Dependend on layer depth			
5	Kerros 2 Ulko	14,20		18,00		-5,00		Dependend on layer depth			
6	Kerros 3 Luiska	14,60		18,00		-0,80		Dependend on layer depth			
7	Kerros 3 Penger	14,80		21,00		-0,63		Dependend on layer depth			
8	Kerros 3 Ulko	14,50		13,00		-1,09		Dependend on layer depth			
9	Kerros 4 Luiska	16,00		12,00				Independent on depth			
10	Kerros 4 Penger	16,30		14,50		1,15		Dependend on layer depth			
11	Kerros 4 Ulko	16,00		9,00				Independent on depth			
12	Kerros 5 Luiska	15,00		12,00		1,70		Dependend on layer depth			
13	Kerros 5 Penger	15,50		15,50		1,61		Dependend on layer depth			
14	Kerros 5 Ulko	14,80		11,00		1,88		Dependend on layer depth			

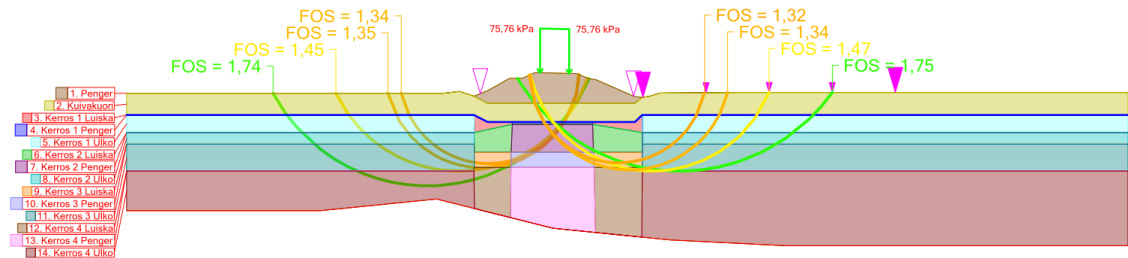
Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, ru off, ruq off, ru' off

Kuva 7.62 EN-rataluokkien E4 ja E5 kuormilla tehty stabiliateetilaskenta kohteesta km 233+900. Kuva pieneneviin ratakilometreihin päin.

Stabiliateetilaskennat tuottivat huomattavasti suurempia varmuuksia, kuin aikaisemmin kohteesta tehdyt stabiliateetilaskennat. Pienimmäksi kokonaisvarmuudeksi saatiin $F=1,77$. Pienin varmuus oli liukupinnalla, jonka suuntaa ei instrumentoitu tutkimuksessa. Varmuus on huomattavasti suurempi kuin aikaisempi 1,06 ja myös suurempi kuin tavanomaisen vanhan ratapenkereen pienin sallittu kokonaisvarmuusluku 1,5.

Stabiileettilaskenta tehtiin myös teliparin metripainolla. (Kuva 7.63.) Tätä laskentaa voi pitää herkkyytarkasteluna penkereen osalta. Laskennassa käytettävä kuorma on suurempi, kuin todellisuudessa junan kohdistama kuorma rataan on. Raskaiden 250 kN akselipainoisen venäläisten testivaunujen teliparin metripainoa käytettäessä 2D-stabiileettilaskennassa käytettävän kuorman arvoksi saatiin näin 75,76 kPa.

2D Bishop's Simplified
Min.FOS = 1,32



Id	Soil layer	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	Φ [°]	Δc [kPa/m]	$\Delta\Phi$ [°/m]	Material Type	ru	ruq	ru'
1	Penger	19,00			36,00			Independent on depth			
2	Kerros 1	17,00		30,00				Independent on depth			
3	Kerros 2 Luiska	14,50		25,00		-5,00		Dependend on layer depth			
4	Kerros 2 Penger	15,00		30,00		-45,00		Dependend on layer depth			
5	Kerros 2 Ulko	14,20		18,00		-5,00		Dependend on layer depth			
6	Kerros 3 Luiska	14,60		18,00		-0,80		Dependend on layer depth			
7	Kerros 3 Penger	14,80		21,00		-0,63		Dependend on layer depth			
8	Kerros 3 Ulko	14,50		13,00		-1,09		Dependend on layer depth			
9	Kerros 4 Luiska	16,00		12,00				Independent on depth			
10	Kerros 4 Penger	16,30		14,50		1,15		Dependend on layer depth			
11	Kerros 4 Ulko	16,00		9,00				Independent on depth			
12	Kerros 5 Luiska	15,00		12,00		1,70		Dependend on layer depth			
13	Kerros 5 Penger	15,50		15,50		1,61		Dependend on layer depth			
14	Kerros 5 Ulko	14,80		11,00		1,88		Dependend on layer depth			

Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, ru off, ruq off, ru' off

Kuva 7.63 Teliparin metripainon aiheuttamalla pintakuormalla tehty stabiileettilaskenta kohteesta km 233+900. Kuva pieneneviin ratakilometreihin päin.

Teliparin metripainon aiheuttamalla pintakuormalla laskiessa kohteen km 233+900 pienimmäksi varmuusluvuksi saatiin 1,32. Varmuusluku ei ole riittävä vanhalle tavanomaiselle ratapenkereelle, mutta se ei silti vaatisi välittömiä radan stabiileetin parantamisen toimenpiteitä.

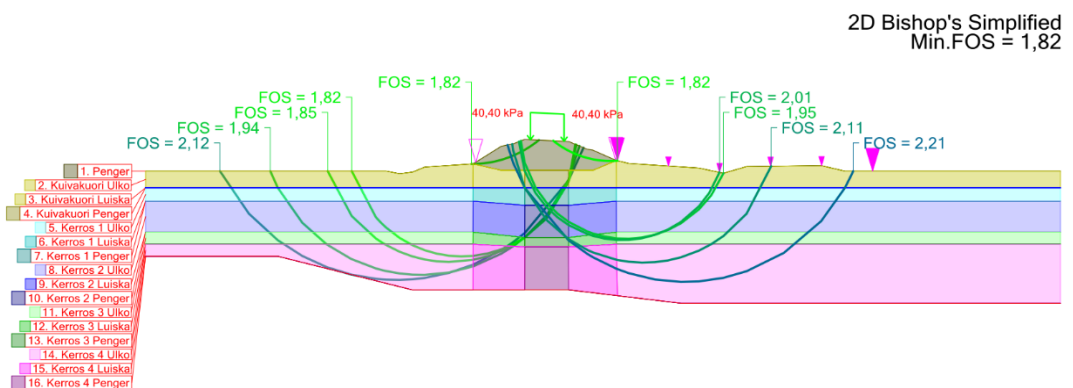
7.5.2 Kohde km 238+280

Kohteen km 238+280 stabiileettilaskennassa käytettävät arvot määräytyivät CPTU-kairauskokeiden ja redusoitujen siipikairauksien perusteella. Taulukossa 7.4 on esitetty kohteessa km 238+280 käytetyt suljetun leikkauslujuuden ja tilavuuspainojen arvot eri kerroksissa. Kohteen itäpuolella noin 20 metrin päässä radasta kulkevan pienen hiekkatien rakennekerroksia tai sen aiheuttamaa saven lujittumista ei huomioitu ratapenkereen ja pohjamaan stabiileettilaskennassa.

Taulukko 7.4 Kohteessa km 238+280 stabiliteettilaskennassa käytetyt lähtöarvot.

Kohde km 238+280						
	Radan ulkopuolella			Penkereen alla		
	Korkeustaso [m]	Suljettu leikkauslujuus [kPa]	Tilavuuspaino [kN/m ³]	Korkeustaso [m]	Suljettu leikkauslujuus [kPa]	Tilavuuspaino [kN/m ³]
Penger				4		19
				1,5		
Kerros 1	2	30	17	1,5	40	17
	0,5	30		0,5	40	
Kerros 2	0,5	25	14,5	0,5	40	15
	-0,5	15		-0,8	33	
Kerros 3	-0,5	15	14,2	-0,8	33	14,8
	-2,8	12		-3,2	36	
Kerros 4	-2,8	9,5	16,1	-3,2	30	16,3
	-3,7	10		-3,9	24	
Kerros 5	-3,7	12,5	15,3	-3,9	20	15,6
	-8,1	13		-7,1	23	

Stabiliteettilaskenta tehtiin Bishopin yksinkertaistetulla menetelmällä. EN-rataluokkien E4 ja E5 kuormilla tehdyn stabiliteettilaskennan tulokset on esitetty kuvassa 7.64.



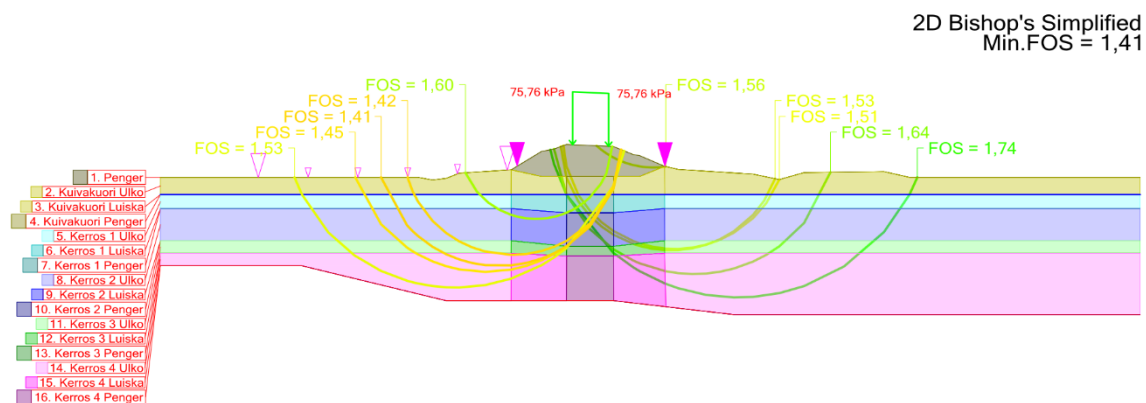
Id	Soil layer	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	Φ [°]	Δc [kPa/m]	$\Delta \Phi$ [°/m]	Material Type	ru	ruq	ru'
1	Penger	19,00			36,00			Independent on depth			
2	Kerros 1 Ulko	17,00		30,00				Independent on depth			
3	Kerros 1 Luiska	17,00		35,00				Independent on depth			
4	Kerros 1 Penger	17,00		40,00				Independent on depth			
5	Kerros 2 Ulko	14,50		25,00		-10,00		Dependend on layer depth			
6	Kerros 2 Luiska	14,75		32,50		-7,60		Dependend on layer depth			
7	Kerros 2 Penger	15,00		40,00		-5,38		Dependend on layer depth			
8	Kerros 3 Ulko	14,20		15,00		-1,30		Dependend on layer depth			
9	Kerros 3 Luiska	14,30		24,00		0,00		Dependend on layer depth			
10	Kerros 3 Penger	14,50		33,00		2,14		Dependend on layer depth			
11	Kerros 4 Ulko	16,10		9,50		0,56		Dependend on layer depth			
12	Kerros 4 Luiska	16,20		20,00		0,00		Dependend on layer depth			
13	Kerros 4 Penger	16,30		30,00		0,14		Dependend on layer depth			
14	Kerros 5 Ulko	15,30		12,50		0,28		Dependend on layer depth			
15	Kerros 5 Luiska	15,50		16,00		0,86		Dependend on layer depth			
16	Kerros 5 Penger	15,60		20,00		1,43		Dependend on layer depth			

Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, ru off, ruq off, ru' off

Kuva 7.64 EN-rataluokkien E4 ja E5 kuormilla tehty stabiliteettilaskenta kohteessa km 238+280. Kuva pieneneviin ratakilometreihin päin.

Tuloksien mukaan penkereen stabiliteetti on suunnilleen yhtä suuri kuin RATUS-hankkeessa oltiin laskettu. Pienimmäksi kokonaisvarmuusluvuksi saatiin 1,82, mikä on riittävä kokonaisvarmuusluku vanhalle tavanomaiselle ratapenkereelle.

Stabiliteettilaskenta tehtiin myös venäläisen testijunan 250 kN akselipainoisten vaunujen teliparin metripainosta lasketulla pintakuormalla. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 7.65.



Id	Soil layer	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	Φ ' [°]	Δc [kPa/m]	$\Delta \Phi$ ' [°/m]	Material Type	ru	ruq	ru'
1	Penger	19,00			36,00			Independent on depth			
2	Kerros 1 Ulko	17,00		30,00				Independent on depth			
3	Kerros 1 Luiska	17,00		35,00				Independent on depth			
4	Kerros 1 Penger	17,00		40,00				Independent on depth			
5	Kerros 2 Ulko	14,50		25,00		-10,00		Dependend on layer depth			
6	Kerros 2 Luiska	14,75		32,50		-7,60		Dependend on layer depth			
7	Kerros 2 Penger	15,00		40,00		-5,38		Dependend on layer depth			
8	Kerros 3 Ulko	14,20		15,00		-1,30		Dependend on layer depth			
9	Kerros 3 Luiska	14,30		24,00		0,00		Dependend on layer depth			
10	Kerros 3 Penger	14,50		33,00		2,14		Dependend on layer depth			
11	Kerros 4 Ulko	16,10		9,50		0,56		Dependend on layer depth			
12	Kerros 4 Luiska	16,20		20,00		0,00		Dependend on layer depth			
13	Kerros 4 Penger	16,30		30,00		0,14		Dependend on layer depth			
14	Kerros 5 Ulko	15,30		12,50		0,28		Dependend on layer depth			
15	Kerros 5 Luiska	15,50		16,00		0,86		Dependend on layer depth			
16	Kerros 5 Penger	15,60		20,00		1,43		Dependend on layer depth			

Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, ru off, ruq off, ru' off

Kuva 7.65 Venäläisen testijunan teliparin metripainon aiheuttamalla pintakuormalla tehty stabiliteettilaskenta kohteessa km 238+280. Kuva pieneneviin ratakilometreihin päin.

Teliparin metripainoilla laskettaessa pienimmäksi kokonaisvarmuusluvuksi saatiin 1,41. Arvo ei ole riittävä vanhalle tavanomaiselle ratapenkereelle, mutta ei myöskään liian pieni, jotta stabiliteettia olisi välittömästi parannettava.

7.6 Radan jousto ja pysyvä muodonmuutos

Koko rataosan käsittävän jouston ja pysyvän muodonmuutoksen mittaustulokset tullaan käsittelemään tähän tutkimukseen liittyvässä erillisessä Liikenneviraston julkaisussa.

Diplomityöprosessin aikana päätettiin, että radan jouston ja pysyvän muodonmuutoksen analysointi jätetään pois diplomityöstä ja sisällytetään aiheesta julkaistavaan raporttiin.

8. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tutkimuksessa selvitettiin 250 kN akselipainoisten junien kuormitusvaikutuksia Kouvola-Kotka rataosalla. Raskaiden junien kuormitusvaikutuksia tutkittiin monitoroimalla kahta pohjamaaltaan heikkoa tutkimuskohdetta, km 233+900 ja km 238+280. Samassa yhteydessä koko Kouvola-Kotka rataosalle tehtiin jatkuva radan jäykkyyden mittausta sekä laserkeilaus, joilla pyrittiin arvioimaan rataosan kuormituskestävyyttä laajemmalla alueella.

Kohteet instrumentoitiin automaattisilla mittauslaitteistoilla. Molempiin tutkimuskohteisiin asennettiin kahdeksan huokosvedenpainanturia eri syvyyksille ratapenkereen alla olevaan savikerrokseen mittaamaan huokosvedenpaineen muutosta kuormituksen vaikutuksesta. Kolme antureista asennettiin savikerrokseen pystysuoraan radan keskeltä, kolme vinosti radan luiskasta kohti radan keskilinjaa ja kaksi pystysuoraan luiskan juureen. Huokosvedenpainantureiden lisäksi kohteisiin asennettiin viisi siirtymäanturia viiteen peräkkäiseen pölkkyyn ja kahdeksan kiihtyvyydianturia neljän pölkyn molempiin päihin mittaamaan pölkkyjen pystysiirtymiä sekä venymäliuska-anturit kiskoon mittaamaan junien kuormia. Kohteisiin asennettiin myös inklinometrit mittaamaan pohjamaassa kuormituksen vaikutuksesta tapahtuvaa vaakasiirtymää radansuunnassa ja rataa vasten kohtisuorassa suunnassa. Mittauslaitteistot mittasivat junien kuormitusvaikutuksia automaattisesti kesän 2017 ajan.

Tutkimuksessa pysäytettiin kaksi testijunaa molempiin kohteisiin, joista toinen pysäytettiin kesäkuussa ja toinen elokuussa. Kesäkuussa pysäytetty testijuna koostui 170 kN ja 225 kN akselipainoisista suomalaisista vaunuista. Suomalaisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin molempiin kohteisiin kaksi kertaa eri akselipainoisten vaunujen ollessa instrumentoitujen kohteiden kohdalla. Elokuussa pysäytetyn testijunan vaunut olivat 250 kN akselipainoisia venäläisiä vaunuja. Junan pysäyttäminen radalle on pohjamaan stabiiliteetin kannalta epäedullisin tilanne. Pysäytetty juna aiheuttaa pidempiaikaista kuormitusta radalle ja pohjamaalle, mikä voi vaikuttaa pysty- ja sivusiirtymien suuruuteen. Venäläisistä vaunuista koostuvalla testijunalla tehtiin myös testiajoja eri nopeuksilla.

Kohteisiin tehtiin tutkimuksen aluksi kattavat pohjatutkimukset. Kohteissa tehtiin CPTU-kairauskokeita ja siipikairauksia sekä otettiin laboratorionäytteitä. Kairauksien tuloksia käytettiin instrumentoinnin suunnittelussa sekä stabiiliteettilaskelmissa. Laboratoriosta saatavia tuloksia tullaan hyödyntämään tähän tutkimukseen liittyvässä jatkotyössä.

Seuraavissa kappaleissa on esitetty yhteenvedot ja päätelmät eri mittaustuloksista. Tutkimuksen aikana huomattiin, että pelkkä akselipaino tai metripaino ei kuvaa hyvin erilaisten kalustojen kuormitusvaikutuksia. Tutkimuksessa selvitettiin myös eri kalustojen erojen, kuten telien sijainnin, vaikutuksia kuormituksen suuruuteen ja jakautumiseen.

Huokosvedenpaine

Huokosvedenpainetta mitattiin jatkuvasti ajan suhteen koko tutkimuksen ajan. Mittaustuloksissa keskityttiin huokosvedenpaineen kasvuun testijunien pysäytyksien aikana, koska huokosvedenpaineen äkillinen tai kiihtyvä kasvu voisi viitata pohjamaan leikkausjännitysten liialliseen kasvamiseen ja siten stabiliteetin pettämiseen. Huokosvedenpaineen mittaustuloksia käytetään lähtötietona jatkotutkimuksen stabiliteettilaskelmissa, jotka tehdään elementtimenetelmällä.

Mittaaminen ei onnistunut ongelmitta. Kesän aikana osa antureista mittasi savikerroksessa tapahtuvaa selittämätöntä huokosvedenpaineen kasvua ilman ulkoisen kuormituksen vaikutusta. Tämä selittämätön huokosvedenpaineen kasvu vaikutti testijunien aiheuttamien huokosvedenpaineiden muutoksien mittaamiseen, sillä huokosvesi oli mittausten mukaan jo valmiiksi ylipaineessa ennen kuormitusten aloittamista. Kuormituksen aikana mitattu huokosvedenpaineen kasvu oli tästä syystä useimmissa antureissa todennäköisesti todellista pienempi.

Suurin osa antureiden mittaamista huokosvedenpaineista kasvoi hidastuen testijunien kuormituksen vaikuttaessa savikerrokseen. Huokosvedenpaineen kasvu olisi todennäköisesti jatkunut ajan suhteen hidastuvana, jos junien pysäytykset olisivat voineet olla pidempiä. Mitatun huokosvedenpaineen kasvun hitauden syynä voi olla myös esimerkiksi huonosti ilmattu anturi, jonka merkitystä korostaa saven pieni vedenläpäisevyys tai edellä mainittu savikerroksessa vallinnut huokosveden ylipaine.

Pysäytettäessä raskaammat 250 kN vaunut kohteeseen km 233+900, huokosvedenpaineen kasvu savikerroksessa oli hitaampaa kuin kevyempien vaunujen pysäytyksissä, mikä viittaa ennemmin eroihin antureiden asennusolosuhteissa, kuin savikerroksen käyttäytymisessä. Kun suomalaisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin, osa huokospaineantureista oli asennettu vasta edellisellä viikolla ja anturit olivat siten herkempiä reagoimaan paineen muutoksiin. Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan pysäyttämishetkellä huokospaineanturit olivat olleet maassa jo lähes kolme kuukautta ja sen seurauksena anturit reagoivat huomattavasti kuormituksen vaikutuksiin.

Kohteessa km 238+280 huokosvedenpaineen mittaaminen onnistui paremmin. Huokosvedenpaineen muutos oli sitä suurempi, mitä suuremmalla kuormalla rataa kuormitettiin. Suurin huokosvedenpaineen muutos tapahtui 250 kN akselipainoisen venäläisen vaunun kuormittaessa rataa.

Huokosvedenpaineen mittaaminen herätti enemmän kysymyksiä kuin antoi vastauksia. Selittämätön huokosvedenpaineen kasvu ilman kuormittavaa tekijää jäi mysteeriksi tämän tutkimuksen aikana. Huokosvedenpaineen muutos kuormituksessa ei myöskään käyttäytynyt kaikissa tilanteissa kuten odotettiin. Kaikkien huokosvedenpaineantureiden mittaustulokset eivät olleet vertailtavissa pohjamaahan vaikuttavien kuormitusten suhteen.

Stabiliteetti

Pehmeikkökohteiden stabiliteettilaskennat tehtiin kairaustulosten perusteella arvioitujen maan ominaisuuksien pohjalta. Radan ulkopuolelta lujittumattomasta savikerroksesta otettu siipikairaus redusoitiin ja siihen verrattiin samasta savikerroksesta tehdyn CPTU-kairauskokeen kärkivastusta. Radan alla tapahtunut lujittuminen arvioitiin radan keskilinjalta tehdyn CPTU-kairauskokeen kärkivastuksen kautta.

Stabiliteettilaskelmat tehtiin 2D-stabiliteettilaskentana GeoCalc-ohjelmalla. Stabiliteettilaskelmissa käytettiin Bishopin yksinkertaistettua menetelmää ja maan lujuutta kuvattiin suljetulla leikkauslujuudella. Stabiliteettilaskenta tehtiin molempiin kohteisiin RATO 3:n mukaisella E5 rataluokan nauhakuormalla. Kohteista laskettiin myös herkkyystarkastelu, jossa kuormana käytettiin venäläisen 250 kN akselipainoisen vaunun teliparin metripainosta laskettua pintakuormaa 75,76 kPa.

Kokonaisvarmuusluku molemmissa kohteissa E5 rataluokan nauhakuormalla oli riittävä eli $F > 1,5$. Teliparin metripainosta saadulla pintakuormalla laskettaessa kokonaisvarmuusluvut olivat molemmissa kohteissa välillä 1,3...1,5, mikä tarkoittaisi, että radalla pitäisi aloittaa seurantamittaukset.

Venäläisen testijunan teliparin metripainosta johdettu pintakuorma yliarvioi 2D-stabiliteettilaskennassa käytettävän junan kuormitusvaikutuksen, koska teliparin metripaino ei ole koko junan mittainen nauhakuorma, vaan säännöllisin väliajoin toistuva pintakuorma. Laskettaessa stabiliteettia kaksiulotteisesti laskentaohjelma ei tarkastele pintakuorman aiheuttamia radansuuntaisia liukupintoja. Teliparin metripainolla laskeminen onnistuisi paremmin käyttäen kolmiulotteista stabiliteetin laskentaohjelmaa.

Tämän työn yhteydessä tehtyjen alustavien 2D-stabiliteettilaskelmien perusteella näyttäisi siis siltä, että mittauskohteiden stabiliteetin näkökulmasta akselipainon nostaminen 250 kN on mahdollista tutkituissa kohteissa. Asiaa on kuitenkin syytä tutkia tarkemmin 3D-stabiliteettilaskentaa ja elementtimenetelmää hyödyntäen.

Pystysiiirtymä

Radan pystysiiirtymää mitattiin siirtymä- ja kiihtyvyyssantureilla pölkyistä. Testijunilla tehtyjen pysäytysten ja ohitusten aikana mitatut pystysiiirtymät palautuivat referenssitasolle kuormitusten poistuttua. Kaikki junakuormien aiheuttamat mitatut pystysiiirtymät olivat palautuvia. Radassa ja pohjamaassa ei tapahtunut koeajojen ja pysäytyksien aikana palautumatonta painumaa. Mitatut palautuvat painumat pysyivät RATO 3:ssa määritettyjen raja-arvojen sisällä.

Painumanopeus pysäytyksien aikana hidastui ajan suhteen, mikä viittaa siihen, että painumat tasaantuisivat tiettyyn arvoon pysäytyksien ollessa pitkäkestoisempia. Painumanopeus teliparin metripainon suhteen oli lineaarisesti eli raskaampi kalusto ei aiheuttanut suhteellisesti nopeampaa painuman kasvua pysäytyksen aikana.

Verrattaessa testiajojen ja pysäytyksien aiheuttamia suurimpia pystysiirtymiä teliparin metripainoon olivat siirtymät lähes lineaarisesti kasvavia. Radan rakennekerrokset ja pohjamaa käyttäytyivät tutkimuksessa käytettyjen testijunien kuormituksen alaisena mittausten mukaan kimmoisasti.

Sivuttaissiirtymä

Sivuttaissiirtymiä mitattiin molemmissa kohteissa radan luiskan kohdalta inklinometreillä. Sivuttaissiirtymät pohjamaassa syntyivät melko nopeasti testijunien kuormituksen vaikuttaessa mittaushetkillä. Suurimmassa osassa pysäytyksiä pohjamaan sivuttaissiirtymät eivät kasvaneet koko pysäytyksen ajan, vaan tasoittuivat tiettyyn arvoon, jossa pysyivät pysäytyksien loppuun saakka, poikkeuksena kohteen km 238+280 venäläisten 250 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttama sivuttaissiirtymä, joka aluksi kasvoi muiden mittaustulosten tavoin, muttei tasoittunut tiettyyn arvoon, vaan vaihteli koko ajan hieman pysäytyksen aikana.

Pysäytyksien jälkeen sivuttaissiirtymät palautuivat kokonaan eli plastisia muodonmuutoksia pohjamaassa ei sivuttaissuunnassa tapahtunut. Pohjamaan maamateriaali käyttäytyi näin ollen kimmoisasti. Sivuttaissiirtymien mitatut maksimiarvot olivat lineaarisesti kasvavia verrattaessa niitä teliparin metripainoon.

Tärinä

Junaliikenteestä aiheutuvan tärinän huomattiin kasvavan junaliikenteen nopeuden ja/tai kuorman kasvaessa. Värähtelyn huippuarvojen huomattiin kasvavan lähes jokaisella kalustolla junan nopeuden noustessa. Tämän tutkimuksen tuloksista ei havaittu kriittistä nopeutta, jolla värähtely olisi suurempaa kuin muilla junan nopeuksilla.

Suurimmat värähtelynopeudet aiheutti Kouvola-Kotka rataosalla kulkeva venäläinen Hopper-kalusto, jonka akselipaino on 225 kN. Analyysin mukaan kaluston lovipyörät aiheuttivat suuret mitatut värähtelynopeudet. Lovipyörät havaittiin kiihtyvyyssanturien mittaamista tuloksista.

Venäläisistä 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuvan testijunan aiheuttama tärinä 20 metrin päässä radasta kasvoi lähes lineaarisesti ajonopeuden kasvaessa molemmissa kohteissa. Testijunan pyöräkerrat olivat paremmassa kunnossa kuin normaaliliikenteen Hopper-vaunuissa. Tästä syystä normaalia liikennettä raskaamman testijunan aiheuttama tärinä oli pienempää, kuin normaaliliikenteen aiheuttama tärinä. Tutkimustulosten perus-

teella on vaikea arvioida, kuinka suurta tärinää huonompikuntoiset 250 kN akselipainoiset pyöräkerrat aiheuttaisivat. Analyysin perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että raskaampi kuorma kasvattaa tärinän voimakkuutta, joten huonokuntoinen 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuva juna oletettavasti aiheuttaa suurempaa tärinää, kuin tällä hetkellä liikennöivät 225 kN akselipainoisista vaunuista koostuva juna.

Kalustojen kuormitusvaikutusten erot

Kalustojen kuormitusvaikutusten eroja tutkittiin niiden ominaisuuksien ja kuormien jakautumisen kautta. Pystysiirtymien tuloksissa huomataan, että teliparin metripainolla voi verrata lineaarisesti erilaisten kalustojen rataan aiheuttamia pystysiirtymiä. Akselipainolla tai metripainolla kahden eri kaluston vertailu ei samalla tavoin onnistu.

Tutkimustulosten perusteella akselipaino ja metripaino eivät ole sellaisenaan hyviä indikaattoreita junan kuormittavalle vaikutukselle tutkituissa kohteissa. Tuloksien mukaan teliparin metripaino kuvaa hyvin junan kuormituksen suuruutta, oli kyseessä liikkuva tai pysäytettynä oleva juna.

Jatkotutkimustarpeita

Kouvola-Kotka rataosan tutkimuksesta on suunnitteilla elementtimenetelmää ja 3D-laskentaa hyödyntävä stabiliteettilaskentaan keskittyvä jatkotyö, jossa lähtötiedot määritetään pehmeikkökohteiden näytteistä tehtyihin laboratoriotutkimuksiin perustuen ja jonka laskelmissa maan lujuudessa huomioidaan huokosvedenpaineen kasvu kuormitustilanteessa. Muita tämän tutkimukset aikana todettuja jatkotutkimustarpeita ovat:

- Ilman ulkoista kuormitusta tapahtuva, radan alla olevasta savikerroksesta mitatun huokosvedenpaineen kasvun syy.
- Olisi selvitettävä tapahtuuko huokosvedenpaineen kasvu maassa vai pelkästään anturissa.
- Teliparin metripainon tutkiminen määräävämpänä junakuorman suuruutta kuvaavana tekijänä kuin vaunun metripaino tai akselipaino.
- Laserkeilausmittauksen käyttö ratapenkereen leviämisen tutkimisessa.
- Kaluston ja pohjamaan yksittäisten ominaisuuksien vaikutukset junaliikenteen aiheuttamaan tärinään.

LÄHTEET

Bäcklund, J. (2017) Sähköpostikeskustelu.

Doebelin, E.O. (2004). Measurement systems: application and design, 5th edition, McGraw-Hill, New York.

Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet, Rakennustieto Oy, Tampere.

Esveld, C. (2001). Modern Railway Track, 2nd edition, MRT-Productions, The Netherlands.

Kalliainen, A. & Kolisoja, P. (2013). Ratapenkereen leveys ja luiskakaltevuus, Liikennevirasto, Helsinki.

Kalliainen, A., Kolisoja, P. & Nurmikolu, A. (2014). Radan 3D-rakennemalli ja ratarakenteen kuormituskestävyys, Liikennevirasto, Helsinki.

Kolisoja, P., Levomäki, M., Mäkelä, E. & Niskanen, P. (1999). Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Korkeamäki, S. (2011). Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa, Liikennevirasto, Helsinki.

Korkeamäki, S. & Nurmikolu, A. (2009). Raskaat rautatiekuljetukset ulkomailla ja vau-nukaluston kuljetuskapasiteetilaskelmat, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Kouroussis, G., Verlinden, O. & Conti, C. (2011). Free field vibrations caused by high-speed lines: Measurement and time domain simulation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (31), pp. 692-707.

Larsson, R. & Åhnberg, H. (2003). Long-term effects of excavations at crests of slopes. Swedish geotechnical institute, Linköping.

Lehtonen, V. (2010). Ratapenkereen sorrutuskokeen instrumentointi ja analysointi, Liikennevirasto, Helsinki.

Lehtonen, V. (2016) Tampereen teknillisen yliopiston Geotekniikka kurssin luentokalvot.

Levomäki, M. (1999). Rautatieliikenteen aiheuttama värinä, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Liikennevirasto (2015a). Kotkan ja Haminan liikennepaikkojen liikennöitävyys selvitys, Liikennevirasto, Helsinki.

Liikennevirasto (2014). Ratatekniset ohjeet (RATO) Osa 3 Radan rakenne, Liikennevirasto, Helsinki.

Liikennevirasto (2015b). Rautateiden verkkoselostus 2017, Liikennevirasto, Helsinki.

Liikennevirasto, Arcus Oy & Roadscanners Oy RATADATA -karttapalvelin. Saatavissa (Viitattu 20.7.2017): www.ratadata.fi.

Luomala, H. (2017) Diplomityön ohjauskeskustelu.

Luomala, H. (2010). Ratapenkereiden monitorointi, Liikennevirasto, Helsinki.

Luomala, H., Peltokangas, O., Tommi & Nurmikolu, A. (2015). Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi, Liikennevirasto, Helsinki.

Malassu, E. (2016). Esiselvitys radan kuormituskestävyysmitoituksen kehittämisestä. Diplomityö.

Mäkelä, E. (2002). Raiteen, ratapenkereen ja -rummun yhteistoiminta. Lisensiaatintyö.

Niemimuukko, O. & Nummelin, M. (2005). Standardin SFS-EN 13450 raideseppelikivialuekset kansallinen soveltamisohje, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Novotechnik Position Transducer with return spring potentiometric up to 100 mm. Saatavissa (Viitattu 19.9.2017): www.novotechnik.com/pdfs/TRTRS.pdf.

Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. (2013). Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen, Liikennevirasto, Helsinki.

Puhakka, T. (2017) Sähköpostikeskustelu.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tamminne, M. (1979). Geotekniikka. 16. painos. Helsinki, Otatieto Oy.

Ratahallintokeskus (2006). Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto. Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus (1995). Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 1 Yleiset perusteet, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus (2004). Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 13 Radan tarkastus, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus (2002). RATO 11 Radan päällysrakenne, Ratahallintokeskus, Helsinki.

RIL (1985). RIL 157-I Geomekaniikka I, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki.

Selig, E.T. & Waters, J.M. (1994). Track geotechnology and substructure management, Thomas Telford Publications, London.

SGY (1999). Kairausopas II Siipikairaus. Toinen painos. Helsinki. Suomen geoteknillinen yhdistys r.y.

Selänpää, J. (2015). CPTU-kairauskokeen käyttäminen liikenneväylien pohjatutkimusmenetelmänä, Liikennevirasto, Helsinki.

Selänpää, J. (2017) Haastattelu.

Sigicom INFRA V12 Triaxial Geophone Product Sheet. Saatavissa (Viitattu 9.10.2017): http://www.sigicom.com/wp-content/uploads/2016/09/infra-v12_datasheet_ds089_d3112hr-enb.pdf.

Sutela, P. (2016). Junan nopeuden vaikutus rautatieliikenteen aiheuttamaan tärinäan, Diplomityö, pp. 72-76.

Tavenas, F. & Leroueil, S. (1980). The behaviour of embankments on clay foundations, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17(2), pp. 236-260.

Tavenas, F., Trak, B. & Leroueil, S. (1980). Remarks on the validity of stability analyses, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 17, p. 63.

Tielaitos (1994). Maanvarainen tiepenger savikolla. Suunnitteluohje. Tielaitos, Helsinki.

Tikhvin Freight Car Building Plant High-tech innovations for railways. Saatavissa (Viitattu 2.11.2017): www.tvsz.ru/en/products/TVSZ_booklet_ENG.pdf.

Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. KPC-PA/KPD-PA|Pore Pressure Gauges|Civil Engineering Transducers|TRANSDUCERS|Products|Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.. Saatavissa (Viitattu 19.9.2017): http://www.tml.jp/e/product/transducers/civil_eng/pore_pressure/kpc_kpd.html.

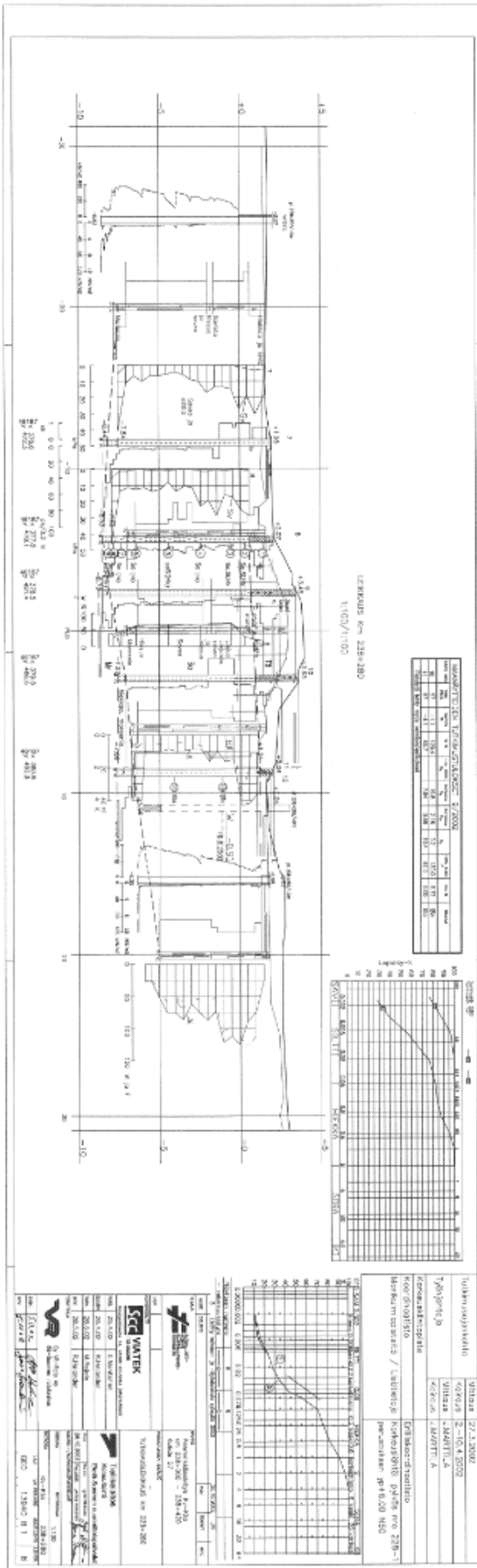
Tolla, P. (2017) Haastattelu.

Törnqvist, J. & Talja, A. (2006). Suositus liikennetärinän arvioimiseksi maankäytön suunnittelussa, VTT, Helsinki.

VR-Yhtymä Oy Kalustokuvasto, VR-Yhtymä Oy. Saatavissa (Viitattu 12.7.2017): <https://www.vrtranspoint.fi/fi/vr-transpoint/asiakkaan-opas/kalusto/#tiedot..>

Wood, D. (1990). Soil behaviour and critical state soil mechanics, Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge.

Ylönen, S. (2017) Haastattelu.



LIITE 2: VENÄLÄISISTÄ VAUNUISTA KOOTUN TESTIJUNAN VAUNULUETTELO

***** EI JARRUPAINOHUOMAUTUKSIA *****

24/08/2017 0604 JP-ENNAKKOLISTAUS
LÄHTÖJUNAN VAUNULUETTELO (ENNAKOITU) SIVU 1

65753 24.8. KTT -JRI 1 SR1 JUNAN JARRULAJI: G
(E) VAHVISTETTU VAUNULUETTELO () JPP EI VAHVISTETTU

VAUNUN NUMERO	KJ	JP	PAINOKG	KULA	LAS	MAS			
1	V90212630	24	99500	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
2	V90021395	24	99400	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
3	V90213836	24	99150	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
4	V90001694	24	99350	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
5	V90083494	24	99050	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
6	V90017591	24	99350	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
7	V90068792	24	99200	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
8	V90098393	24	98950	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
9	V90239500	24	99150	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
10	V90241019	24	99500	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
11	V90070095	24	99200	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
12	V90002197	24	99200	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
13	V90095191	24	98900	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
14	V90017195	24	99050	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
15	V90070293	24	99200	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
16	V90221839	24	99300	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
17	V90017492	24	99350	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
18	V90291683	24	99150	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
19	V90292764	24	99350	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	
20	V90089293	24	98950	VKT	VNAR	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO	

JRI 80 AKS 295 M 1984 TN EROASEMA JRI

				ENNAKOITU		TESTATTU			
AKS	TN	VETURI	PIT	PAINO	JP	JPP	JP	JPP	PT
HOS	JRI	80	1984	1 SR1	314	2070	527	25	00257

TÄYDELLINEN JARRUJENTESTAUS TEHTY AIKALEIMAA EI LÖYDY

 * JUNASSA ON YLI 22,5 T AKSELIPAINOJA TAI VENÄLÄISIÄ VAUNUJA! *
 * SN 20 POIKKEAVASSA VAIHTESSA JA SIVURAITTEELLA EI JKV-ALUEELLA! *

 ***** LISTA LOPPU *****

LIITE 3: CPTU-KOEKAIRAUKSIEN TULOKSET