

Antti Pelho
Heikki Luomala

Raskaiden junien kuormitusvaikutusten monitorointi



Antti Pelho, Heikki Luomala

Raskaiden junien kuormitus- vaikutusten monitorointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2018

Liikennevirasto
Helsinki 2018

Kannen kuva: Juha Latvala

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-542-6

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Antti Pelho ja Heikki Luomala: Raskaiden junien kuormitusvaikutukset. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 21/2018. 111 sivua ja 5 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-542-6.

Avainsanat: rata, monitorointi, kuormitus, stabiliteetti, akselipaino, 250 kN

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa selvitettiin raskaiden junien kuormitusvaikutuksia Kouvola–Kotkarataosaan. 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 junakuormia. 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. Pohjamaan 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 arvioituilla lujuuksilla, koska kaikki laboratoriotulokset eivät valmistuneet vielä tämän tutkimuksen aikana.

Koko rataosalle tehtyjen mittausten avulla etsittiin kohteita, joissa radan jousto on suuri ja pengerveveys on kasvanut vuosien 2010–2017 välillä. Jousto oli tyypillisesti suurimmillaan kohteissa, jotka sijaitsevat pehmeällä pohjamaalla ja joissa ratarakenteet ovat alle 2 metriä paksut. Suuri jousto ei kuitenkaan korreloi selkeästi muodostuneen pengerveveyden tai seitsemän vuoden aikana tapahtuneen leviämisen kesken. Pengerlevevyys oli kauttaaltaan melko suuri, eikä merkittävää leviämistä nykytilanteessa tapahdu.

Antti Pelho och Heikki Luomala: Tunga tågs belastningseffekter. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 21/2018. 111 sidor och 5 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-542-6.

Sammanfattning

Denna undersökning gällde tunga tågs belastningseffekter på banavsnittet Kouvola–Kotka. Syftet var att utreda under vilka förutsättningar och med vilka begränsningar tyngre materiel kunde tillåtas på banavsnittet Kouvola–Kotka utan omfattande upp- rustningsåtgärder på banan. Banavsnittet monitorerades på två ställen som bedömdes vara ogynnsamma med tanke på stabilitet. Avsikten med monitoreringen var att generera mätdata som stöd för ovanstående beslut. Undersökningen innefattade dessutom laserskanning och elasticitetsmätning av hela banavsnittet samt preliminära 2D-stabilitetsberäkningar av de undersökta ställena.

Ställena instrumenterades med automatisk mätutrustning. Porvattentrycksgivare mätte ändringar i porvattentrycket orsakade av tågens belastning. Förskjutningsgivare och accelerationsgivare mätte sliprarnas vertikala förskjutningar. Töjningsgivare mätte tåglaster. Inklinometrar mätte sidoförskjutningen i undergrunden orsakad av tågens belastning. Geofoner mätte vibrationer orsakade av tågtrafiken.

Vid de utvalda ställena stoppades både inhemskt och ryskt tågmateriel. Vid båda instrumenterade ställen stoppades tre vagnpar med olika axeltryck. Det finska materieleet bestod av vagnar med ett axeltryck på 170 kN respektive 225 kN. Det ryska materieleet bestod av vagnar med ett axeltryck på 250 kN, vilket är tyngre än normalt. VR-Koncernen Ab såg till att tågen fanns tillgängliga för undersökningen.

Enligt undersökningen orsakade de tyngre vagnarna med ett axeltryck på 250 kN något större återhämtbara sättningar i banan än det materiel som för närvarande används. Sidoförskjutningarna i banans undergrund var små och gick tillbaka när belastningen avlägsnats. Enligt resultaten betedde sig undergrunden elastiskt med alla laster som användes i undersökningen. Under de tyngre vagnarnas uppehåll ökade porvattentrycket i undergrunden i förhållande till de ändringar som skedde i porvattentrycket i undergrunden under de lättare vagnarnas uppehåll. Under sommaren uppmätte emellertid en del av givarna en oförklarlig ökning av porvattentrycket på båda ställena utan belastning, vilket försvårade bedömningen av den ökning av porvattentrycket som skedde under belastning. Resultaten av vibrationsmätningarna visade att en större last och hastighet och ett större antal hjulplattor (ojämnt slitna hjul) ökar vibrationskraften.

Enligt preliminära 2D-stabilitetsberäkningar var totalsäkerheten tillräcklig vid båda ställena. Enligt stabilitetsberäkningar utifrån ytbelastningen orsakad av trycket per meter från ett boggipar i det ryska materieleet på 250 kN är det möjligt att stabiliteten måste följas upp med monitoreringsmätningar. Stabilitetsberäkningarna gjordes emellertid endast med de hårdheter som erhållits utifrån bedömningar av borrningsresultat, eftersom alla laboratorieresultat ännu inte var klara under denna undersökning.

Genom mätningar av hela banavsnittet försökte man hitta ställen där banans elasticitet är stor och banvallsbredden har ökat mellan 2010 och 2017. Elasticiteten var vanligen störst vid ställen där undergrunden är mjuk och där bankonstruktionerna är under 2 meter tjocka. Det förekom emellertid ingen klar korrelation mellan stor elasticitet och den uppstådda banvallsbredden eller den utbredning som skett under sju år. Banvallsbredden var överlag rätt stor och någon betydande utbredning sker inte i nuläget.

Antti Pelho and Heikki Luomala: Monitoring the loading effects of heavy trains Finnish Transport Agency, Engineering and Environment. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 21/2018. 111 pages and 5 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-542-6.

Summary

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 trains. Linear position transducers and acceleration transducers measured sleepers' vertical displacement. Strain gauge transducers measured axle loads of trains. Inclinometers measured the horizontal displacement of subsoil caused by trains. 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.

The continuous track stiffness measurements and laser scanning along the line were conducted to define locations, where track deflection is large and the embankment width has grown between the years 2010–2017. Track deflection was typically the largest in sites that were located on soft soil and where track structure thickness was under 2 meters. However, a large track deflection did not clearly correlate to the formed embankment width or to the widening that occurred during 2010–2017. At present, the embankment width is already rather large overall on the line and significant widening of the embankment due to train loads does not occur.

Esipuhe

Tämä tutkimus tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laboratorion Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Tutkimuksen tilaajana oli Liikennevirasto. Tutkimuksen toteutti tekniikan kandidaatti Antti Pelho diplomityönä. Tämä raportti on tehty diplomityön pohjalle. Raportista on jätetty pois diplomityön teoriaosuus ja sitä on täydennetty radan jouston ja pysyvän muodonmuutoksen tarkastelun osalta.

Työtä ohjasivat diplomi-insinööri Heikki Luomala ja professori Pauli Kolisoja TTY:ltä. Tilaajan edustajana työtä ohjasivat Liikenneviraston geotekniikan asiantuntijat Panu Tolla ja Jaakko Heikkilä sekä rakentamisen aluepäällikkö Erkki Mäkelä. Tutkimuksen toteuttamiseen osallistui VR Yhtymä Oy tarjoamalla testijunat radan kuormittamiseen sekä FinMeas Oy ja Finnrock Oy tarjoamalla monitorointipalveluita. Roadscanners Oy teki laserkeilauksen, yhdisti mittaustulokset aiempiin keilauksiin ja arvioi ratapenkeeseen leviämistä. Työssä ovat avustaneet myös TTY:n pohja- ja ratarakenteiden tutkimusryhmät sekä VR-Track Oy.

Helsingissä huhtikuussa 2018

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	9
2	KOUVOLA–KOTKA RATAOSA	10
2.1	Nykytilanne	10
2.2	Monitoroidut pehmeikkökohteet	11
2.3	Vanhat pohjatutkimukset ja stabiliteettilaskennat	13
3	TUTKIMUKSEN TESTIJUNAT	16
3.1	Suomalainen kalusto	16
3.2	Venäläinen kalusto	17
3.3	Vertailu	18
4	MITTAUSMENETELMÄT	19
4.1	Pehmeikkökohteilla tehdyt pistemäiset mittaukset	19
4.1.1	Sivuttaissiirtymän mittaus	19
4.1.2	Huokosvedenpaineen mittaus	20
4.1.3	Pystysiirtymän mittaus	21
4.1.4	Kuormien mittaus	23
4.1.5	Tärinän mittaus	23
4.1.6	Kairaukset	24
4.2	Koko rataosalle tehdyt mittaukset	24
4.2.1	Pysyvän muodonmuutoksen mittaus	24
4.2.2	Radan jäykkyyden mittaus	25
5	MITTAUS- JA KOEJÄRJESTELYT	26
5.1	Pehmeikkökohteiden koejärjestelyt	26
5.1.1	Pohjatutkimukset ja alustavat työt	26
5.1.2	Instrumenttien asennus	28
5.2	Koko rataosaa mittaavat koejärjestelyt	34
5.2.1	Radan jouston mittaus	34
5.2.2	Laserkeilaus	35
5.3	Testijunien pysäytykset ja ohiajot	37
6	MITTAUSTULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	40
6.1	Huokosvedenpaine	40
6.1.1	Kohde km 233+900	40
6.1.2	Kohde km 238+280	46
6.1.3	Huokosvedenpaineen mittaamisen haasteet	50
6.2	Pystysiirtymä	52
6.2.1	Kohde km 233+900	52
6.2.2	Kohde km 238+280	62
6.2.3	Kiihtyvyydsantureilla mitattu pystysiirtymä	70
6.2.4	Kokonaisjäykkyyden tarkastelu	72
6.3	Sivuttaissiirtymä	75
6.3.1	Kohde km 233+900	75
6.3.2	Kohde km 238+280	80
6.3.3	Sivuttaissiirtymien mittauksen yhteenveto	84
6.4	Junaliikenteen aiheuttama tärinä	86
6.4.1	Kohde km 233+900	86
6.4.2	Kohde km 238+280	90

6.5	Pohjatutkimukset ja radan stabiiliteettilaskennat.....	95
6.5.1	Kohde km 233+900.....	96
6.5.2	Kohde km 238+280.....	98
6.6	Radan pysyvä muodonmuutos	101
6.7	Radan jousto.....	103
7	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	105

LIITTEET

Liite 1	Vanhojen pohjatutkimusten geotekniset poikkileikkaukset
Liite 2	Uusien pohjatutkimusten geotekniset poikkileikkaukset
Liite 3	Venäläisistä vaunuista kootun testijunan vaunuluettelo
Liite 4	CPTU-koekairauksien tulokset
Liite 5	Laserkeilausten ja joustomittausten tulokset välillä Tavastila–Kotka Asema

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 kuormitusvaikutukset 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 päätöksenteon 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 radalle tapahtuneesta pysyvästä 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, mittausrakenteiden teoria ja toteutettavat monitorointijärjestelyt. Työssä lasketaan pehmeikkökohteiden stabiliteetti kairaustulosten perusteella käyttäen LEM-mallia. Laboratoriokokeista saatavien tuloksien mukaiset tarkat stabiliteettilaskennat esitetään aiheeseen liittyvässä jatkotyössä.

2 Kouvola–Kotka rataosa

2.1 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 kautta kulkevaa tavara- ja raaka-ainekuljetusta toisen valtion läpi kolmanteen valtioon.

Kouvola-Kotka rataosan päällysrakenneluokka on läntisen raiteen osalta Kouvola Paimenporttiin luokkaa D. (Kuva 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 1 on esitetty päällysrakenneluokat sekä näitä vastaavat suurimmat sallitut nopeudet eri akselipainoilla Kouvola-Kotka rataosalla.

Taulukko 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 Overbyggnadsklass Superstructure Category	ei sähköistetty icke-elektrifierad non-electrified	sähköistetty elektrifierad electrified	kiskotus räler rails	pölkkyt 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 1. Kartta Kaakkois-Suomen rataverkon päällysrakenneluokista sekä tau-lukko 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.

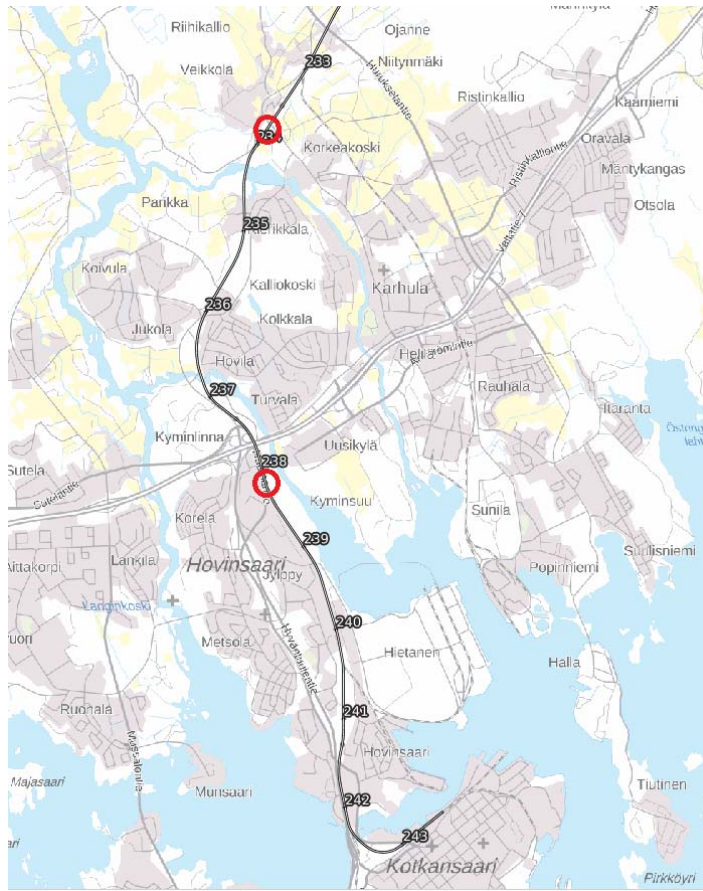
Kouvola-Kotka rataosalla on kaksi tärinistä johtuvaa nopeusrajoitusta. Myllykosken kohdalla km 201+500 - 203+100 kokonaispainoltaan yli 3000 tonnin junilla on nopeusrajoitus 40 km/h ja Keltakankaan kohdalla km 207+300 - 207+700 kaikkien junien nopeusrajoitus on 40 km/h. (Liikennevirasto 2015b, Liite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

2.2 Monitoroidut pehmeikkökohteet

Kouvola-Kotka rataosalta valittiin kaksi stabiliteetiltaan heikoimmaksi arvioitua kohdetta monitoroitavaksi. Kohteet valitsi Arcus Oy. Kohteiksi valikoitui pehmeikkökohteet km 233+900 ja km 238+280. Kuvassa 2 on esitetty tutkimuskohteiden sijainti kartalla. Molemmat kohteet sijaitsevat Juurikorpi-Paimenportti rataosuudella. Tällä rataosuudella päällysrakenneluokka on D eli pölkkyt ovat betonisia ja kiskotuksena on 60E1.

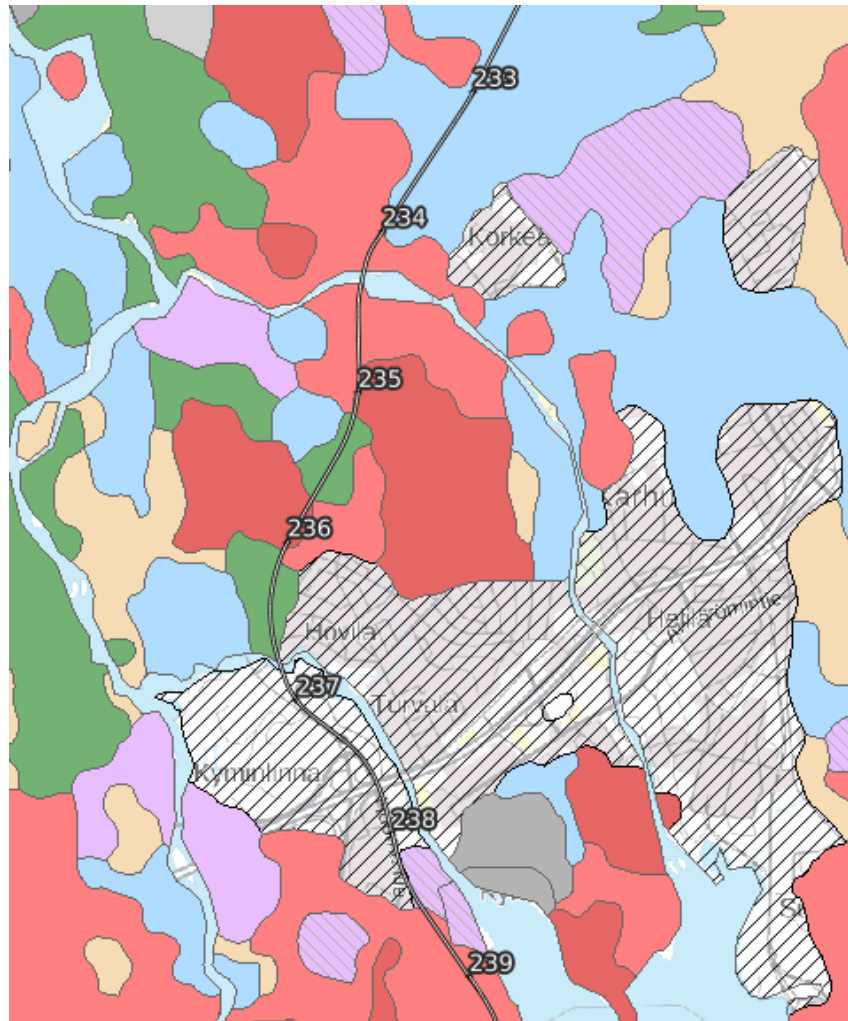
Suomen ratapehmeiköistä löytyy tietoa muun muassa pehmeikkökoterististä eli Liikenneviraston ratarekisteristä sekä ”Ratojen luokitus”- projektin puitteissa kerätystä Ratus-taulukosta ja Ratahallintokeskuksen aiemmista selvityksistä akselipainon nostoon liittyen. Näiden aineistojen pohjalta Kymin liikennepaikan lähistöltä valittiin pehmeikköjä, 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 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. Kymen liikennepaikka on rakennettu saman savikon varaan.

Kohde km 238+280 sijaitsee liejumaalla. Pehmeikkö jatkuu radasta itään päin kohti merenrantaa. Kymen liikennepaikan ja Hovinsaaren liikennepaikan välisen radan pohjasuhtediedot on esitetty kuvassa 3. GTK:n Maankamarapalvelu kertoo pohjasuhtediedot metrin syvyydeltä maanpinnasta. Palvelun aineisto on enemmän suuntaa antava kuin täysin oikea. Pohjasuhteet voivat myös muuttua syvyyssuunnassa, mitä Maankamarapalvelu ei ota huomioon.



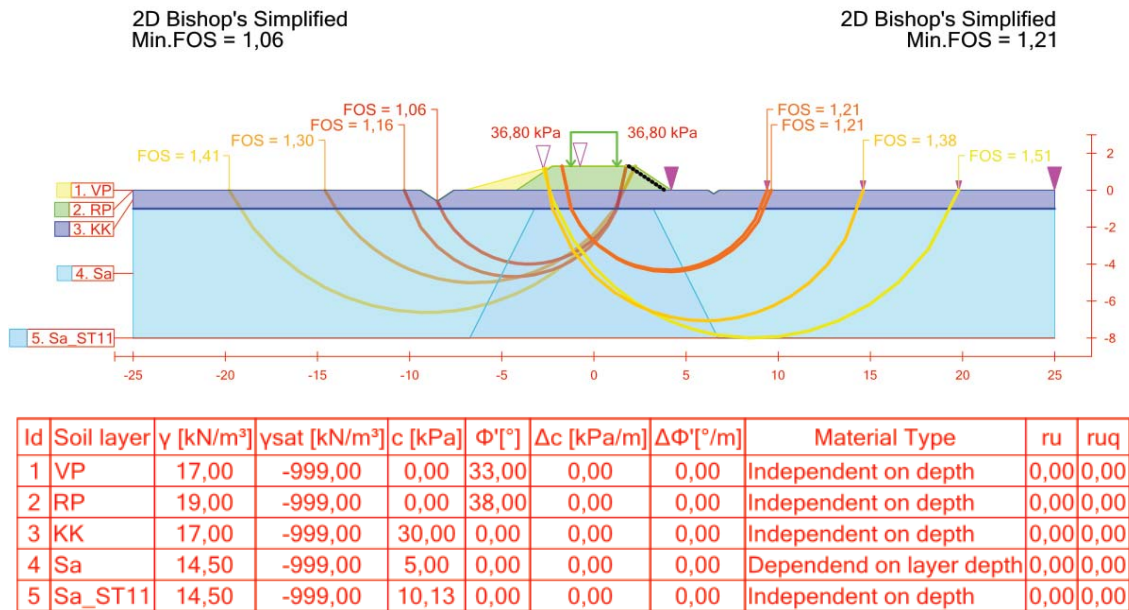
Kuva 3. Kymi ja Hovinsaaren liikennepaikkojen välisen radan pohjaolosuhteet. (RATADATA-karttapalvelin 2017)

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 juna-rata.

2.3 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. Stabiliteettilaskemat on tehnyt Arcus Oy Geocalc-ohjelmalla. Stabiliteettilaskemilla etsitään kohteen heikointa leikkauspintaa ja sen kokonaisvarmuuslukua. Tavanomaisen vanhan rata-

penkereen 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 on esitetty kohteen km 233+900 läheltä laskettu RATUS-hankkeeseen liittyvä 2D-stabiliateettilaskenta.

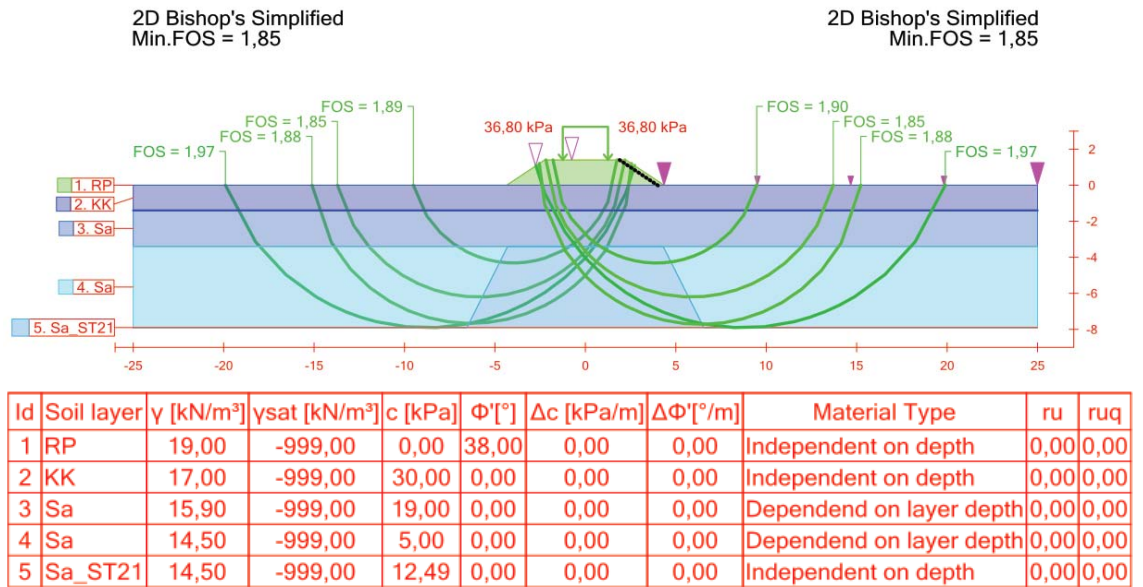


Kuva 4. Ratus-projektissa tehty 2D-stabiliateettilaskenta ratakilometritiltä 233+860. (RATADATA-karttapalvelin 2017)

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 kestäväen 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 5 on esitetty kohteen km 238+280 RATUS-hankkeeseen liittyvä 2D-stabiliateettilaskenta



Kuva 5. Ratus-projektissa tehty 2D-stabiliateettilaskenta 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.

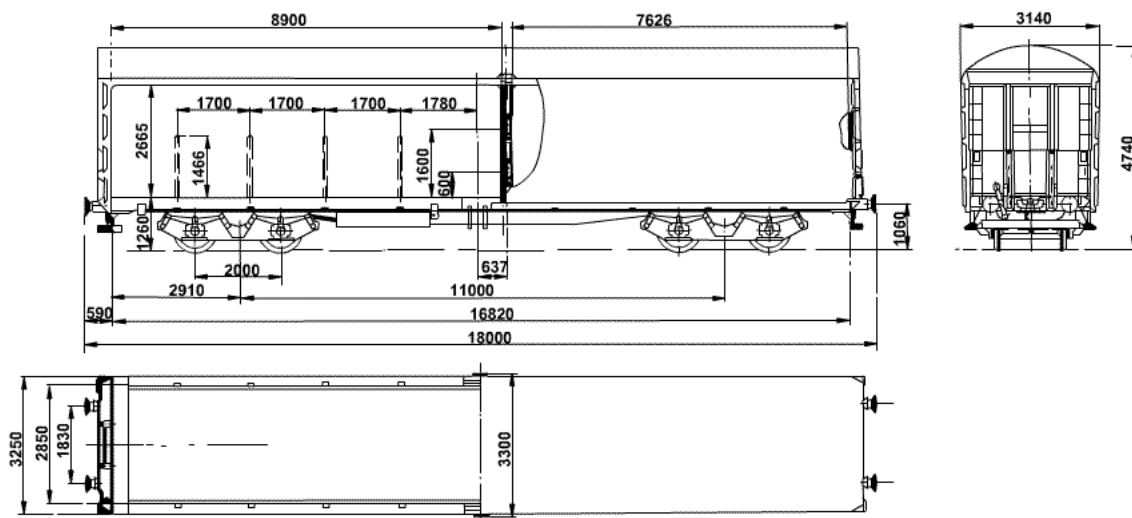
3 Tutkimuksen testijunat

3.1 Suomalainen kalusto

Suomen junaliikenteen kalusto on hyväksytty aikaisemmin LIMOn 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 YTEä. Edellä mainitut telimallit ovat rungoltaan H-runkoisia telejä. (Korkeamäki 2011, s.60) H-runkoisissa teleissä ei ole paljon jousittamatonta massaa verrattuna kolmiosisiin teleihin.

Tässä tutkimuksessa käytettävä suomalainen vaunu selluloosavaunu Hai on 18 000 mm pituinen vaunu. Vaunun mitat on esitetty kuvassa 6. Vaunun pituus lasetaan puskimesta puskimeen. Vaunun telit ovat 11 000 mm etäisyydellä toisistaan. Kahden eri vaunun viereisten telien kauimmaisten akseleiden etäisyys toisistaan on 9 000 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 6. Selluloosavaunu Hai. Suomalainen vaunu, jolla mittaukset tehtiin. (VR-Yhtymä Oy)

3.2 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 kehitysmalli versio Model 18-100 telistä. Kolmiosaisen Model 18-100-telin jousittamaton massa on suuri. (Korkeamäki 2011, s.70) Tästä syystä lovipyörät aiheuttavat tavannomaista 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. (Kuva 7) Tutkimuksessa käytettävät Hopper-vaunut ovat lyhyitä 14 720 mm pituisia vaunuja, joiden telien välinen etäisyys on 10 500 mm. Tällöin kahden peräkkäisen vaunun telien kauimmaisten akselien välinen etäisyys on 6 070 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–Kotkarataosalla liikennöivien 225 kN akselipainoisten Hopper-vaunujen teliparin metripaino on 148,3 kN/m.



Kuva 7. Hopper Model 19-9870-01. Mittauksissa käytetty venäläinen vaunu. (Tikhvin Freight Car Building Plant)

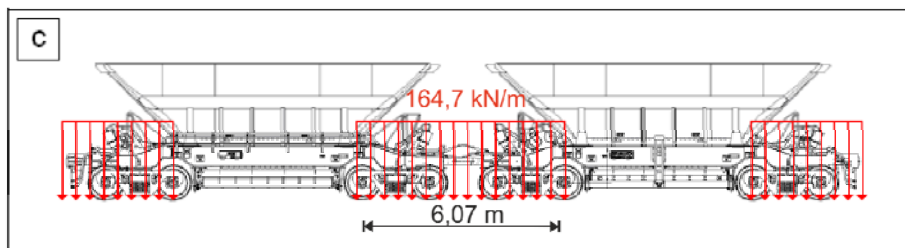
3.3 Vertailu

Taulukossa 2 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 2. 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 2 esitetyllä teliparin etäisyydellä tarkoitetaan tässä yhteydessä kahden eri vaunun viereisten telien kauimmaisten akselien etäisyyttä toisistaan. Kuvassa 8 on havainnollistettu teliparin etäisyys ja sen alueella vaikuttava teliparin metripaino.



Kuva 8. Venäläisien Model 18-100 vaunujen teliparin etäisyys ja metripaino, kun akselipaino on 250 kN. (Muokattu lähteestä Korkeamäki, 2009)

4 Mittausmenetelmät

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

4.1 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 tärinä, 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.

4.1.1 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 mittaustuloksen tarkkuus heikkenee anturimäärän kasvaessa, koska antureiden mittausrvirheet 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 ympäristäyttyä maaputkireiän ja inklinometriputken välissä. Mikäli ympäristäyttyä ei tehdä, voi inklinometriputki päästä liikkumaan aiheuttaen tuloksissa huojuntaa ja epäluotettavuutta. (Bäcklund. 2017) Tämän tutkimuksen inklinometreissä tehtiin ympäristäyttyä. Kuvassa 9 on esitetty asennettu inklinometri.

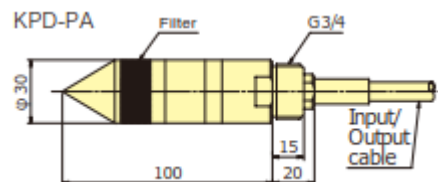


Kuva 9. FinMeasin inklinometri asennushetkellä tämän tutkimuksen kohteessa km 233+900.

Tässä tutkimuksessa käytetyt inklinometrit olivat FinMeas Oy:n digitaalisia kaltevuusantureihin perustuvia inklinometrejä, jotka mahdollistavat reaaliaikaisen mittauksen. Inklinometriputkeen asennettiin monta anturia samanaikaisesti, jolloin mitaus saatiin automatisoitua. Kaltevuusanturit oli asennettu putkeen metrin välein. FinMeas Oy:n mittalaite 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 inklinometrien lisäksi verkkopalvelua, josta mittaustuloksia voi seurata reaaliajassa.

4.1.2 Huokosvedenpaineen mittaus

Huokosvedenpainetta on Suomessa mitattu käyttäen sähköisiä huokosvedenpainantureita 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 10.



Kuva 10. Tokyo Sokki Kenkyujon Co. anturin KPD-KA mitat. (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.)

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

$$p = \frac{V_{mit}}{V_s} \cdot k - c, \quad (1)$$

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 nollatasolle. Anturien korjattu nollataso on erittäin lähellä normaalia vallitsevaa ilmanpainetta, jolloin anturi näyttää nollaa, kun se on ilmassa.

Anturin kalvon suojana on huokoskivi, jonka kautta paine välittyy kalvolle. Anturit täyttyy 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 orrenkaalla tiivistetyllä pleksillä. Pleksissä on painemittari sekä läpivienti, jonka kautta messinkiputkeen imetään tyhjiö.

4.1.3 Pystysiirtymän mitta

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 lineaaripotentiometriä 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. Lineaarisissa potentiometreissä resistiivisenä elementtinä käytetään yleensä resis-

tiivistä lankaa. Langan pituus ja resistanssi muuttuvat anturin kärjen ja/tai karan liikkeen mukana. Anturin mittaama mittaustulos voltteina ilmaisee karan siirtymää. (Doebelin 2004, s.231)

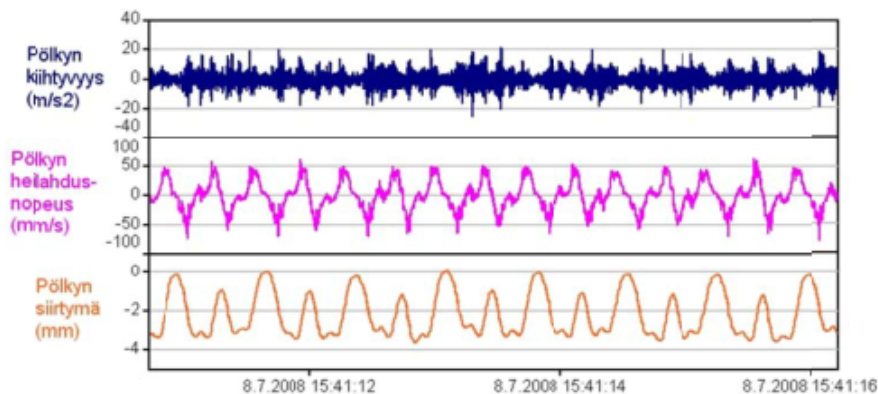
Tässä tutkimuksessa käytettävät siirtymäanturit ovat Novotechnikin valmistamia resistiivisiä lineaaripotentiometrityypin TRS 25-antureita, joiden mitta-alue on 25 mm. Antureille syötetään 5 voltin jännite. Anturi antaa mittaustuloksiksi jännitteen 0–5 V väliltä, jonka voi muuttaa suoraan millimetreiksi kalibrointikertoimen 27 mm/V/V avulla. Antureiden asennus esitetään luvussa 6. TRS 25-antureiden tarkkuudeksi luvataan jopa $\pm 0,075\%$ mitta-alueesta ja toistettavuudeksi $\pm 0,002$ mm (Novotechnik). Kuvassa 11 on Novotechnikin TRS50 anturi, joka on samanlainen kuin TRS25 anturi, mutta sen mitta-alue on 50 mm.



Kuva 11. Novotechnikin TRS50 anturi. (Novotechnik)

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 12. 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 ohiajossa tapahtuvaa pölkyn tai kiskon siirtymää eli radan palautuvaa painumaa. Mittauksessa siirtymän nollassa voi vaihdella junan 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 12. 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 kovalevylle. (Peltokangas et al. 2013, s.88)

4.1.4 Kuormien mittaus

Akselipainoja voidaan mitata kiskoon liimattavilla venymäliuskoilla. Venymäliuskat mittaavat 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 tavara-junia vetää yleensä SR1-veturi, jonka staattisen akselipainon tiedetään olevan noin 210 kN. Veturin aiheuttama leikkausmuodonmuutos voidaan muuttaa kuormaksi kertomalla se kalibrointikerroin. 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 kalibrointikerroimen selvittämiseen tarvitaan useiden junien mittaus, 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. Kiskovoimien mittauksessa näytteenottotaajuus oli 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)

4.1.5 Tärinän mittaus

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 Sigicom in INFRA V12 kolmiaksiaalisia geofoneja. Geofonit mittaavat värähtelynopeutta kolmiulotteisesti. Sigicom in geofonissa on sisäänrakennettu digitaalinen signaalinkäsittely, jolloin sen ulostulo on värähtelynopeus. 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) 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.

4.1.6 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. Kairauskokeessa maahan työnnetään määrättyllä vakionopeudella kärkikartiota. Kairauskokeen 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.

4.2 Koko rataosalle tehdyt mittaukset

Penkereen leventymisen nopeuden ja suuruuden on havaittu olevan riippuvainen pohjamaan 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 tietyistä kohdista enemmän kuin toisista, minkä perusteella voitaisiin arvioida radan kuormituskestävyyttä eli alttiutta pysyvien muodonmuutosten syntymiselle myös akselipainon nostamisen jälkeen. (Luomala. 2017)

4.2.1 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 kulkuaikaan 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 kaksikulotteisen pistepilven radan poikkileikkauksesta. Tässä tutkimuksessa 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 tulkittamista.

Mittaustuloksien paikannus perustuu ratametreihin ja mittaus tapahtuu suhteessa raiteeseen. Menetelmällä ei saada selville absoluuttisia koordinaatteja, mutta piste-pilvestä 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.

4.2.2 Radan jäykkyyden mittaus

Stiffmaster on Tampereen teknillisen yliopiston kehittämä jatkuvatoiminen radan jäykkyyden ja jouston mittalaite. Mittalaitteen toiminta perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen kuormittamattomasta ja kuormitetusta radasta. Mittalaite kiinnitetään täyteen lastattuun sepelivaunuun tai TKA7 ratakuorma-autoon. Mittalaitteessa käytetään virallista Suomessa käytössä olevaa S1002 pyöräprofiilia. Sepelivaunuun kiinnitetyssä 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)

Mittalaite 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. Kalibrointi voidaan tehdä myös mittaamalla radan jousto jollakin toisella menetelmällä, kuten kiihtyvyydantureilla tai siirtymäantureilla. Tässä tutkimuksessa kalibrointi tehtiin käyttäen näitä pistemäisiä mittaustapoja.

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

Mittauslaitteen toimintaperiaate pohjautuu junakuorman aiheuttamaan taipumasuppilon mittaamiseen. Jos taipumasuppilo 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.

5 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.

5.1 Pehmeikkökohteiden koejärjestelyt

5.1.1 Pohjatutkimukset ja alustavat työt

Kenttätyöt 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 pellolta ja pieniä näytteitä ST1-näytteenottimella yhdestä pisteestä radan keskilinjalta.

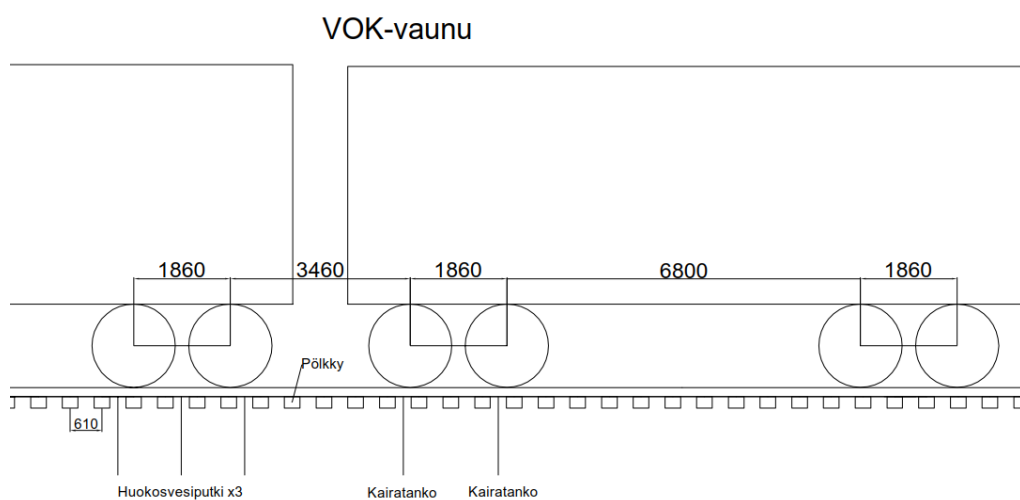
Kohteelta km 238+280 tehtiin kaksi siipikairausta sekä neljä CPTU-kairauskoetta TTY:n kairausvaunulla. Ensimmäisen luokan siipikairaukset tehtiin radan ulkopuolelta lujittumattomasta savesta. CPTU-kairauskoeteista kolme tehtiin radan ulkopuolelta lujittumattomasta savesta ja yksi penkereen luiskasta 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 kitka- maakerroksen läpi. Suojaputkista kolme asennettiin radan keskilinjalle kahden pölkyn välein ja viisi penkereen luiskaan. Suojaputken asentaminen on esitetty kuvassa 13. 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 13. 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, akselista 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 14 on esitetty suunnitellut huokosvedenpaineantureiden suojaputkien ja siirtymäantureiden kairatankojen paikat.



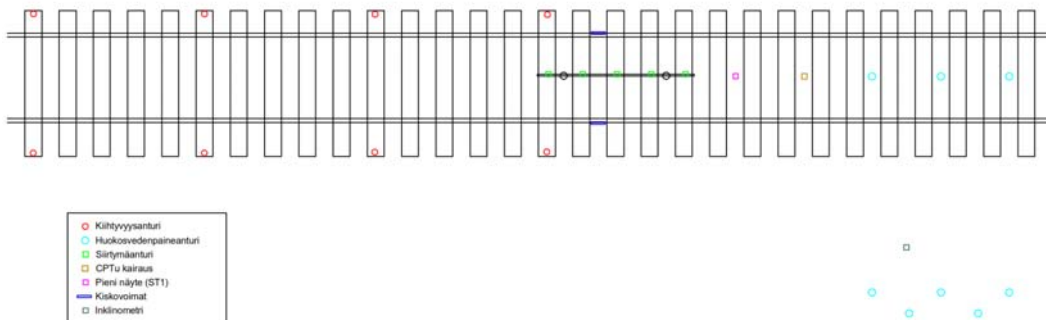
Kuva 14. Huokosvedenpaineantureiden ja siirtymäantureiden suunnitellut paikat VOK-vaunun mukaan.

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. Sängossa 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.

5.1.2 Instrumenttien asennus

Kuvassa 15 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 15. Periaatekuva instrumentoinnista molemmissa kohteissa.

Seuraavissa kappaleissa on kerrottu kuvan 15 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 ennakoimaan 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 keskilinjaa kohdalle syvyyteen +7,5 m merenpinnasta. Muut radan keskilinjaa 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 16 on esitetty luiskaan asennetut huokosvedenpaineanturit kyseisessä kohteessa.



Kuva 16. *FinMeas Oy:n asentama inklinometri sekä kolme asennettua huokosvedenpaineanturia kohteessa km 233+900.*

Toisella käynnillä kohteeseen km 233+900 lisättiin kaksi uutta huokosvedenpaineanturia luiskaan vinoon kohti radan keskilinjaa syvyyksille +7,1 m ja +7,5 m merenpinnasta. Anturien asennus onnistui painamalla ilman ongelmia. Taulukossa 3 on esitetty kohteeseen km 233+900 asennettujen huokosvedenpaineantureiden paikkatiedot.

Taulukko 3. Kohteeseen km 233+900 asennetut huokosvedenpaineanturit sekä niiden paikat maassa.

Km 233+900						
Tunnus	Paikka	Asento	Maanpinta	Syvyys	Asennusputken pituus maassa (m)	Asennuskulma (^o)
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 tavoitesyvyysiin pohjamaahan penkereen keskilinjalle 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 tavoitesyvyysiin, mutta anturit olivat kuitenkin CPTU-koekairaustulosten mukaan savikerroksessa lähellä mahdollista liukupintaa.



Kuva 17. Huokosvedenpaineanturin asennus kohteessa km 238+280.

Huokosvedenpaineantureita asennettiin lisää toisella asennuskäynnillä, jotta kohteessa km 238+280 olisi antureita myös suoraan penkereen keskilinjalla olevassa savikerroksessa. Kohteeseen lisättiin kolme anturia penkereen keskilinjalla kohdalle syvyyksille -0,8 m, -1 m ja -1,5 m merenpinnasta. Anturien asennus aloitettiin avaamalla asennusreikä iskemällä painokairan kärkikappaleta maahan. Kärkikappale saatiin iskettyä tukkeutuneen putken läpi pehmeään kerrokseen. Tämän jälkeen kairatanko ja kärkikappale nostettiin suojaputkesta pois ja anturi asennettiin saveen painamalla. Taulukossa 4 on esitetty kohteeseen km 238+280 asennettujen huokospaineantureiden paikkatiedot.

Taulukko 4. 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 vesisan-gossa asentamiseen saakka. Huokosvedenpaineanturit asennettiin pohjamaahan jäykällä asennusputkella. Asennushetkellä huokosvedenpaineanturi liitettiin asennus-putkeen kiinni. Kumikalvo irrotettiin juuri ennen asennusta aivan suojaputken yläpuo-
lella. (Kuva 17) 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. An-turien kunto ja toimivuus päätettiin testata nostamalla ne pois savikerroksesta ennen akselipainoltaan 250 kN testijunan kuormitusta. Antureiden huoltokäynti tutkimus-kohteille tehtiin 15.8-16.8.2017. Antureihin, jotka mittasivat suuria huokosvedenpai-neita 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 H2.

Samalla huoltokäynnillä muita huokosvedenpaineantureita nostettiin tunkilla muu-tamia senttimetrejä ja työnnettiin alkuperäistä asennuskohtaa noin 2-5 senttimetriä syvemmälle maahan. Huokospaineantureiden nostamisen ja takaisin painamisen aja-teltiin kumoavan mahdollinen asennusputkeen syntynyt vaippakitka, joka voisi ai-heuttaa antureiden mittaamisissa tuloksissa esiintyneet yllättävät paineenvaihtelut.

Siirtymäanturit

Tutkimuksessa käytettiin Novotechnikin valmistamia potentiometriyypin TRS 25-antureita, joiden mittausalue on 25 mm. Siirtymäanturit asennettiin kairatankoihin siihen kiinnitetyn profiiliputkitelakan avulla viiden vierekkäisen pölkyn keskelle. Siir-tymäantureita tuli molempiin kohteisiin viisi kappaletta. Profiiliputki kiinnitettiin pulttien ja lattarautojen avulla kiinni kairaustankoihin, jotka oli kairattu kovaan poh-jaan saakka. Profiiliputki ja siirtymäanturit eivät näin ollen päässeet liikkumaan pen-kereen mukana junien kuormittaessa rataa. Siirtymäanturit mittasivat automaattises-ti viiden peräkkäisen pölkyn pystysiirtymää junien ajaessa kohteiden yli. Kuvasta 18 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 18. 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 mittausalue oli 12 G.

Kiihtyvyyssanturit asetettiin niissä kiinteästi olevilla magneeteilla pölkkyihin kiinnitettyihin metallilevyihin, jotta anturit olisivat tasaisella alustalla ja kiihtyvyyksistä integroidut pystysiirtymät olisivat todellisia. Vaino 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 pölkkyissä. Kiihtyvyyssanturien paikka ratapölkkyjen päissä on esitetty kuvassa 19.

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



Kuva 19. Kiihtyvyyssanturit kohteessa km 233+900.

Venymäliuska-anturit

Venymäliuska-anturit asennettiin molempiin kiskoihin samaan pölkkyväliin siirtymä-anturien kohdalle. Kumpaankin kiskoon asennettiin kaksi venymäliuska-anturia. Samaan kiskoon asennettavat anturit asennettiin 250 mm etäisyydelle toisistaan. Venymäliuskat suojattiin Sikaflex-massalla, jotta vesi ei päässeet vahingoittamaan antureita. Venymäliuska-antureilla mitattiin ohii ajavien junien pyöräkuormat. Venymäliuska-antureiden paikka kiskossa kohteessa km 233+900 on esitetty kuvassa 18.

5.2 Koko rataosaa mittaavat koejärjestelyt

Kouvola-Kotka rataosalta tehtiin jousto- ja laserkeilausmittauksia. Radan jousto mitattiin TTY:n kehittämällä Stiffmaster-mittauslaitteistolla. Rataosan laserkeilaus tehtiin Roadscanners Oy:n laserkeilaimella vuosina 2010, 2015 ja 2017.

5.2.1 Radan jouston mittaus

Radan jousto mitattiin Stiffmaster-mittauslaitteistolla kesäkuussa. Viisiakselinen ns. pidempi Stiffmaster-mittauslaitteisto kiinnitettiin täyteen lastattuun sepelivaunuun, jota veti TKA7 ratakuorma-auto. Jouston 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 osittain epäonnistui. Kuvassa 20 esitetään Stiffmaster-mittauslaitteisto ajon aikana sepelivaunussa olevan videokameran ottamasta kuvasta. Liitteessä 5 on esitetty jouston mittaustulokset rataosalta Tavastila–Kotka Asema.



Kuva 20. Stiffmaster-mittauslaitteisto kohteella km 233+900.

Jatkuvan jäykkyyden mittauksen aikana mitattiin myös pistemäisiä pystysiirtymän referenssimittauksia kiihtyvyyssantureilla. Referenssikohteet sijaitsivat pehmeikkö-alueilla 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 venymäliuskatoimisia kiskoon kiinnitettäviä kiihtyvyyssantureita, joiden mittausalue oli 20 G. SCA620-sarjan kiihtyvyyssanturit asetettiin viiteen pölkkyyn keskelle pölkkyä viiden pölkyn välein. Kyowan anturit asetettiin kuuden pölkyn 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 Kouvolaan kohti ajanut kiskobussi sekä Stiffmaster-mittauslaitteisto. Toiselta kohteelta km 231+655 mitattiin Kotkaa kohti ajanut tavarajuna sekä Stiffmaster-mittauslaitteisto.

5.2.2 Laserkeilaus

Kouvola-Kotka rataosa on laserkeilattu vuosina 2010, 2015 ja 2017. Vuoden 2015 keilaus tehtiin kesällä, jolloin kasvillisuutta oli runsaasti ja se häiritsevästi penkereen muodon tunnistamista. Vuoden 2010 ja 2017 keilaukset tehtiin keuhällä, jolloin kasvillisuutta ei esiintynyt yhtä häiritsevästi. Laserkeilauksen perusteella pyrittiin tunnistamaan penkereen muoto, jotta vuosien 2010 ja 2017 välisiä mittauksia voitaisiin verrata toisiinsa. Liitteessä 5 on esitetty laserkeilauksen mittauksien tulokset rataosalta Tavastila-Kotka Asema.

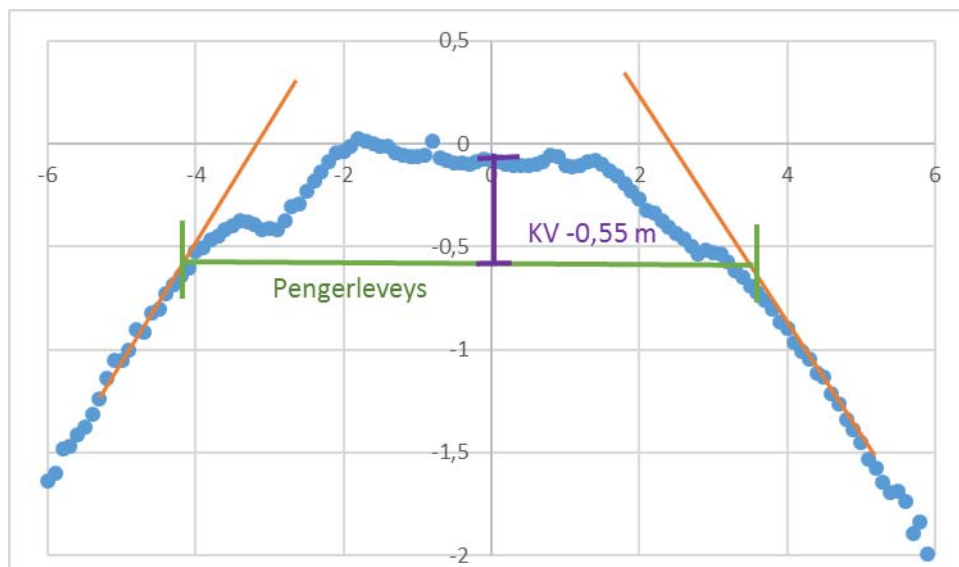
Tavoitteena oli selvittää luiskan yläosan eli jätkänpolun ja luiskan taitepisteen perusteella pengereleveys eri mittaushetkillä ja tulosten avulla laskea paljonko pengere on levinnyt eri poikkileikkauksissa. Roadscannereilla on käytössä joitakin automaattisia laskentamenetelmiä erilaisten muotojen selvittämiseen, mutta ne eivät suoraan so-

vellu pengerleveyden laskentaan, sillä taitepiste on useissa tapauksissa hyvin hankalasti tunnistettavissa ja toisaalta kasvillisuuden määrä on muuttunut mittausten välillä. Aluksi tarkastelua tehtiin siten, että pengerleveys tulkittiin pistepilvestä piirrettyjen poikkileikkausten avulla silmämääräisesti.

Tulkinnan avulla saatiin selville pengerleveys eri ajankohtina, mutta määritetyn pengerleveyden suuruus ja tarkkuus vaihtelivat merkittävästi. Pengerleveys vaihteli tyyppillisesti 6,5 ja 9 metrin välillä. Kahden mittauksen erotus vaihteli välillä $-0,5 \dots 1,0$ metriä siten, että keskimäärin penger olisi leventynyt 0,12 metriä. Penkereen leviämisen suuruusluokka keskimäärin vaikutti järkevältä, mutta lähempi tarkastelu poikkileikkauksittain heikensi tulkinnan uskottavuutta. Poikkileikkauksista monet olivat sellaisia, joissa pensaikko häiritsi mittaustuloksen tulkintaa merkittävästi. Havaittiin, että tulosten tulkinta vaatii suodatusta pensaikon osalta ja objektiivisen tavan arvioida pengerleveys numeerisella tavalla.

Valmista sabluunaa tällaiseen analyysiin ei ollut olemassa. Aluksi haettiin tapoja, joilla pensaikon vaikutus pystytään minimoimaan. Käyttökelpoiseksi tavaksi havaittiin penkereen pienimmän poikkileikkausmuodon etsintä ratalinjan pituussuunnassa. Laskenta tehtiin etsimällä pistepilvestä poikkileikkauksen minimi matkan suhteen. Laskenta tehtiin erikseen määrittämällä 100 mm etäisyyskaistoilla raiteen keskilinjasta lukien jokaisen kaistan matalin piste valitulta matkalta. Näin saatiin selville minimipoikkileikkaus esimerkiksi 20 metrin matkalta. Laskentatapa ei ole täydellinen, sillä luiskassa saattaa olla koloja tai kuoppia, jotka pienentävät poikkileikkausta tarpeettomasti. Muodostuva poikkileikkaus ei ole myöskään täysin todellinen, sillä se koostuu eri poikkileikkausten muodostamista pisteistä. Pensaikon vaikutus kuitenkin poistuu tehokkaasti, jos yksikin etäisyyskaistan piste osuu maanpintaan tarkasteltavalla matkalla.

Saadusta poikkileikkauksesta laskettiin luiskan kaltevuus 4,0–5,4 metrin etäisyydeltä raiteen keskilinjasta. Luiskan kaltevuus saatiin selville sovittamalla suora kyseisten pisteiden päälle pienimmän neliösumman periaatteella. Suoran kulmakertoimen sekä suoran ja raiteen keskilinjan leikkauspisteen avulla pystyttiin laskemaan pengerleveys tietyltä syvyydeltä. Pengerleveys laskettiin 0,55 metrin syvyydeltä korkeusviivasta lukien. Kuvassa 21 on havainnollistettu laskentaperiaatetta.



Kuva 21. Pengerleveyden määrittäminen luiskankaltevuuden avulla valitulta syvyydeltä.

Edellä kuvattu laskenta ei toimi, jos luiska ei ole riittävän pitkä suoran sovitusta varten. Tästä syystä aineisto rajattiin siten, että laskentatulokset kelpuutettiin vain silloin, kun

- ojasyvyys molemmilla puolin rataa oli vähintään 1 metri kv:stä lukien
- luiskakaltevuus molemmin puolin rataa oli välillä 1:1,5...1:2,5
- määritetty pengerleveys oli välillä 6...9 metriä.

Rajaukset poistivat käytännössä liikennepaikat sekä maa- ja kallioleikkaukset pois tuloksista.

5.3 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 ohiajoa 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. Rata-osa 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 liikennöintiä juna ei kuitenkaan saa pysähtyä ratalinjalle.

Juuri ennen pysäytykseen varattua kapasiteettivarausta liikenteenohjaus ei kuitenkaan suostunut päästämään junaa liikkeelle, koska kapasiteettivaraukselle ei oltu määrätty ratatyöstä 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 Kymmin liikennepaikalle ja takaisin.

Juna pysäytettiin ensin 170 kN akselipainoisten vaunujen ollessa instrumenttien kohdalla. (Kuva 22) 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 huokospainantureiden kohdalle.

Junan ensimmäisen pysäytyksen kesto oli 35 minuuttia. Pysäytyksen jälkeen juna ajettiin Kymmin 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 22. 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 pysäytettiin ensin 170 kN akselipainoisten vaunujen ollessa instrumenttien kohdalla ja pysäytys toistettiin sen jälkeen 225 kN akselipainoilla. Ensimmäinen pysäytys kesti noin 39 minuuttia ja toinen pysäytys kesti noin 71 minuuttia. Kuvassa 22 on kohteeseen km 238+280 pysäytetty suomalainen selluloosavaunu.

Venäläisten vaunujen kuormitusvaikutus mitattiin 23.8.2017, jolloin antureiden asennuksesta oli kulunut jo yli kaksi kuukautta. Viikkoa aikaisemmin instrumenttien kunto tarkastettiin, kuten kappaleessa 5.1.2 kuvattiin.



Kuva 23. Pysäytetty 250 kN:n akselipainoisista vaunuista koottu testijuna kohteessa km 233+900.

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 23 testi-vaunu on pysäytettynä kohteelle km 233+900.

Taulukossa 5 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 mittaussuurekohtaisille referenssitasoille pysäytysten välissä.

Taulukko 5. 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

6 Mittaustulokset ja niiden analysointi

6.1 Huokosvedenpaine

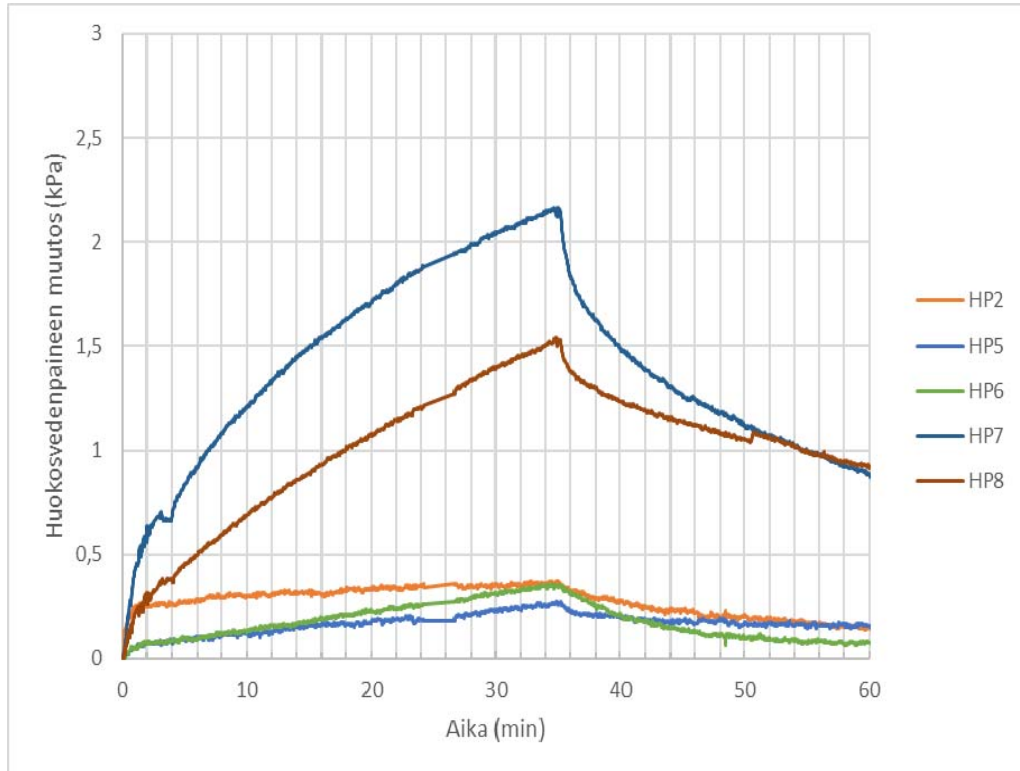
Huokosvedenpaineen muutosta mitattiin penkereen alla olevassa savikerroksessa. Mittaustuloksien tulkinnassa keskityttiin testijunien pysäytyksien aiheuttamiin paineen muutoksiin. Keskeisimpinä ilmiöinä tutkittiin huokosvedenpaineen muutoksen nopeutta ja suuruutta kuormitusten aikana.

6.1.1 Kohde km 233+900

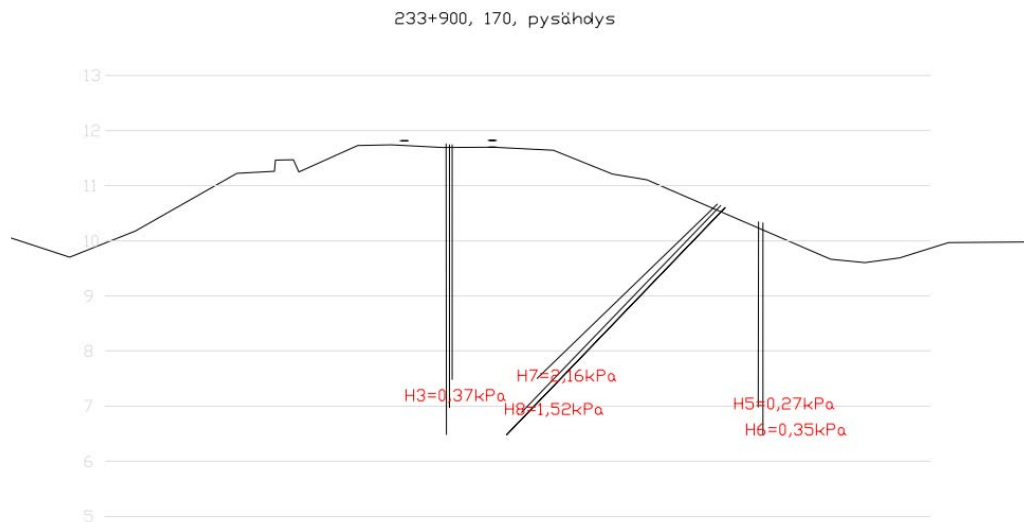
Kohteen km 233+900 pehmeikön staattiset kuormituksen aloitettiin 170 kN akselipainoisilla vaunuilla, kuten luvussa 5.3 kerrottiin. Suomalaisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin instrumentoituun kohteeseen siten, että kahden eri vaunun telit olivat siirtymä- ja huokosvedenpaineantureiden kohdalla.

Huokosvedenpaine alkoi odotetusti kasvamaan, kun vaunut pysäytettiin suunniteltuun paikkaan. Kuvassa 24 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 hidastui ajan suhteen.

Kaksi anturia reagoivat 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 24 ja 25. Anturit HP2, HP5 ja HP6 mittasivat hitaan kasvun huokosvedenpaineessa kuormituksen aikana. Kuvassa 25 on esitetty huokospaineantureiden paikat ja suurimmat mitatut paineen muutokset radan poikkileikkauksessa.



Kuva 24. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.



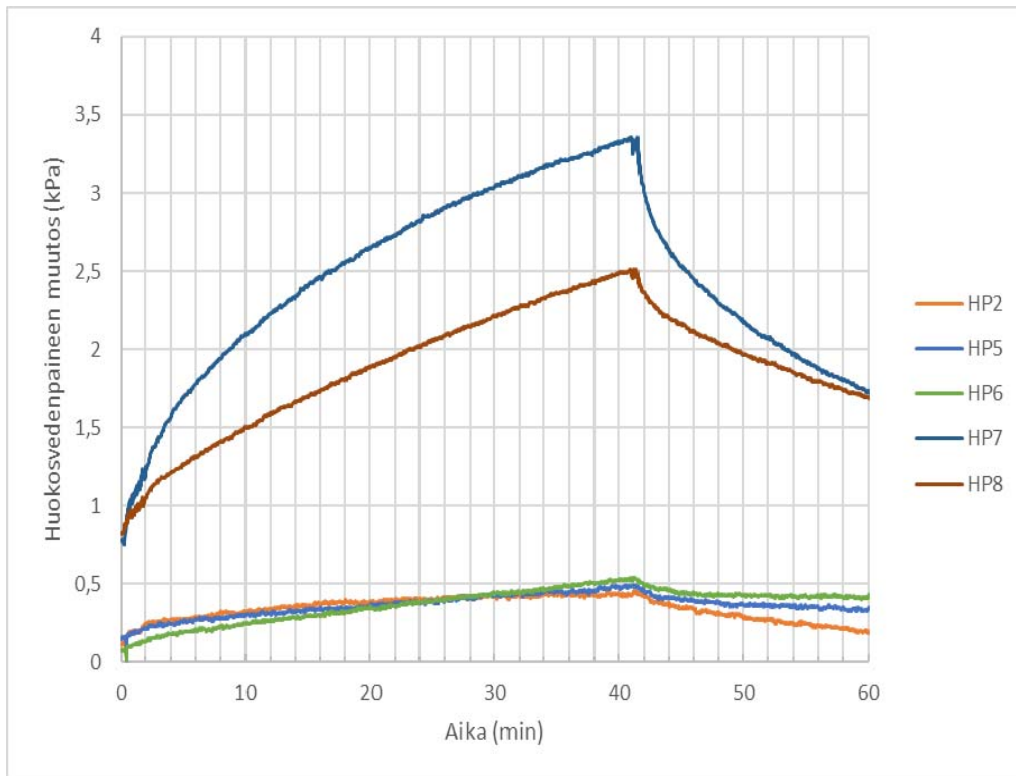
Kuva 25. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

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

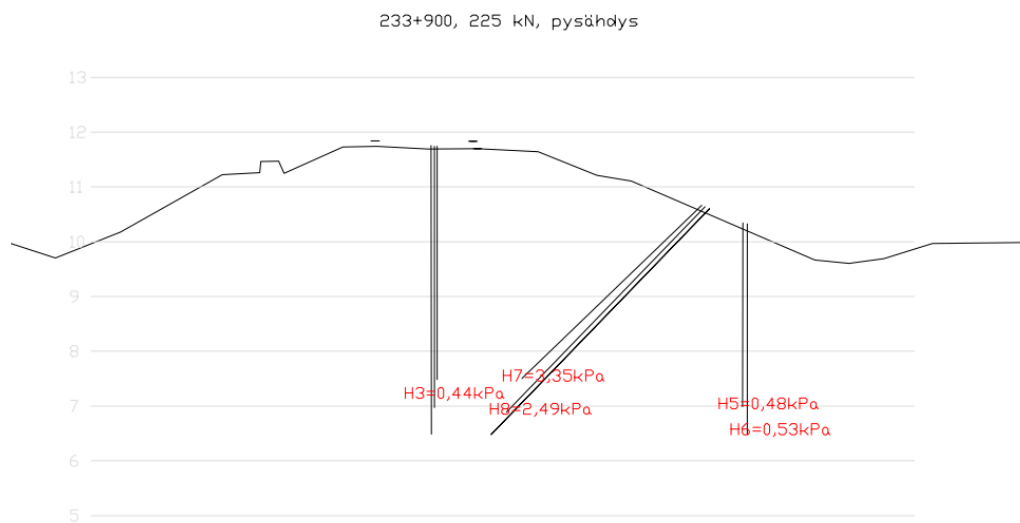
Seuraava kuormitus tehtiin 225 kN akselipainoisilla vaunuilla. Raskaammat vaunut pysäytettiin siirtymä- ja huokospaineantureiden kohdalle. Huokosvedenpaineen nousu savikerroksessa ei ajan suhteen ollut paljon nopeampaa kuin aikaisemmassa pysäytyksessä, minkä voi selittää maahan jäänyt ylipaine. Huokosvedenpaineen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

Anturien mittaamat 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 26 referenssitaso on edelleen hetki ennen ensimmäistä kuormitusta. Kuvan pystyakselin kohdalta nähdään anturikohtainen huokosvedenpaine ennen 225 kN akselipainoisen vaunun kuormitusta. Kuvassa 27 on esitetty huokosvedenpaineen kokonaismuutos kuormitusten ajalta kohteen km 233+900 poikkileikkauksessa esitettynä.



Kuva 26. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

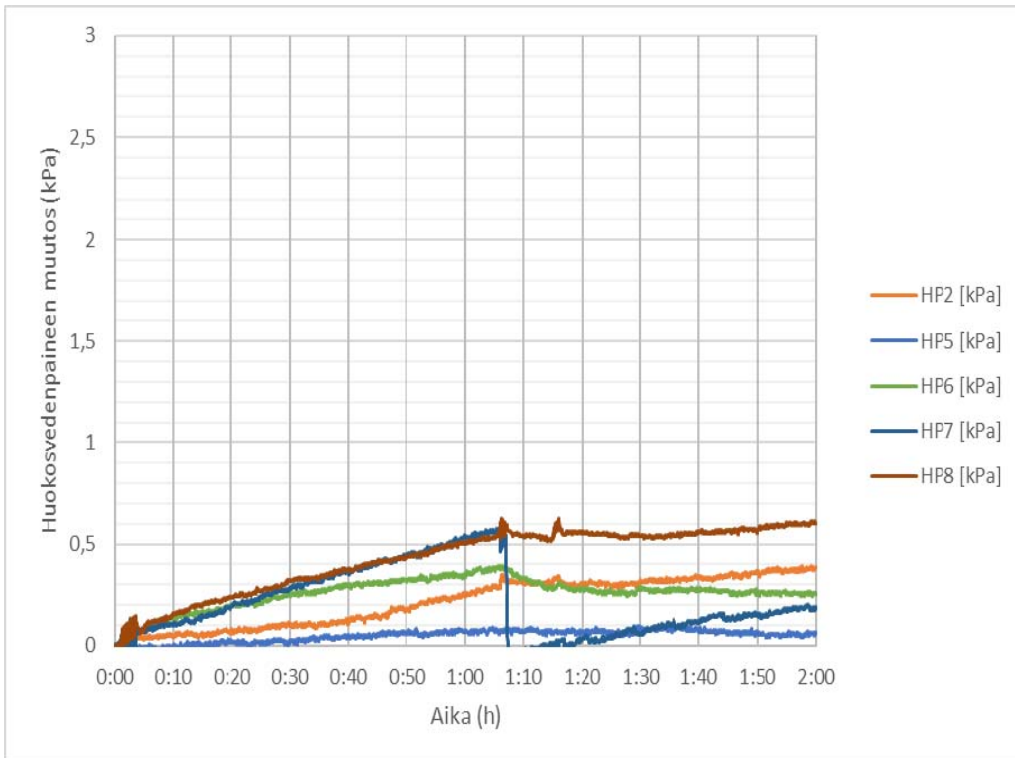


Kuva 27. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

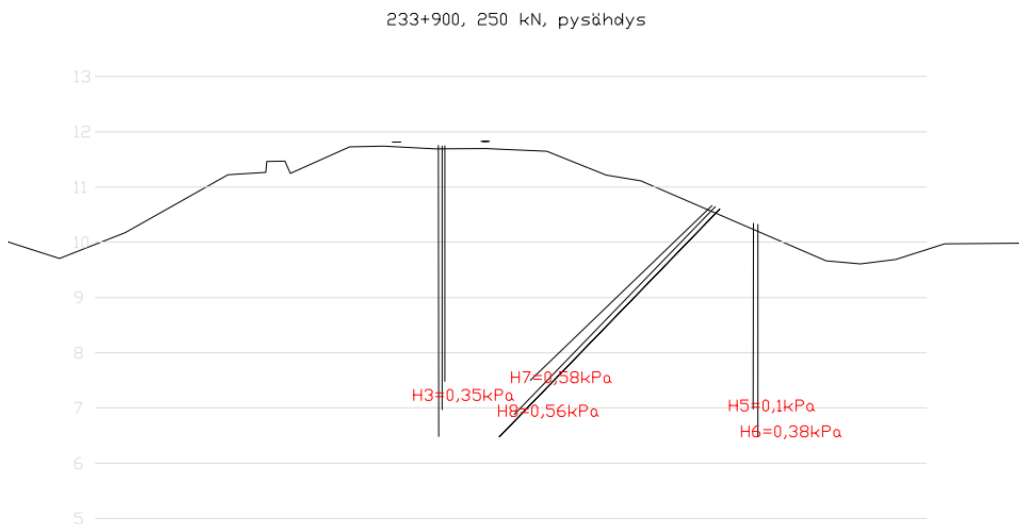
Kuten luvussa 5.3 todettiin, venäläisistä 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin kohteeseen, kun huokosvedenpaineanturit olivat olleet asennettuina pohjamaahan vajaat kolme kuukautta.

Kohteessa km 233+900 250 kN akselipainoisilla vaunuilla tehty kuormitus oli ajaltaan hieman pidempi kuin alkukesällä tehdyt suomalaisten vaunujen pysäytykset. Mittattu 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 28 on esitetty viiden anturin tulokset, joissa kuormitus ilmeni hitaana noin 0,5 kPa/h huokosvedenpaineen kasvuna. Kuvassa 29 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.

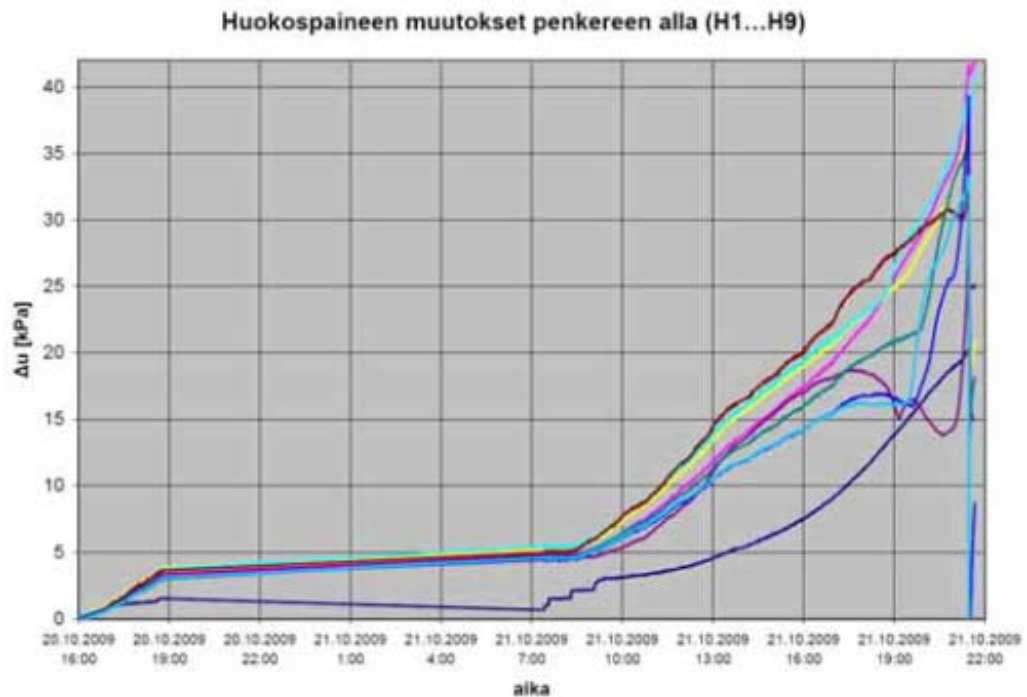
Näiden antureiden mittaamaa huokosvedenpaineen nousua voi verrata Perniön sorrutuskokeessa tapahtuneeseen huokosvedenpaineen nousuun, kun penkereellä seistettiin merikonttia ilman kuorman kasvattamista sortumaa edeltävänä päivänä. Perniön sorrutuskokeen huokospaineen nousu on esitetty kuvassa 30. (Lehtonen 2010) Perniön sorrutuskokeessa staattisen muuttumattoman kuorman kuormittaessa rataa huokosvedenpaine nousi hitaalla noin 0,2 kPa/h nopeudella.



Kuva 28. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.

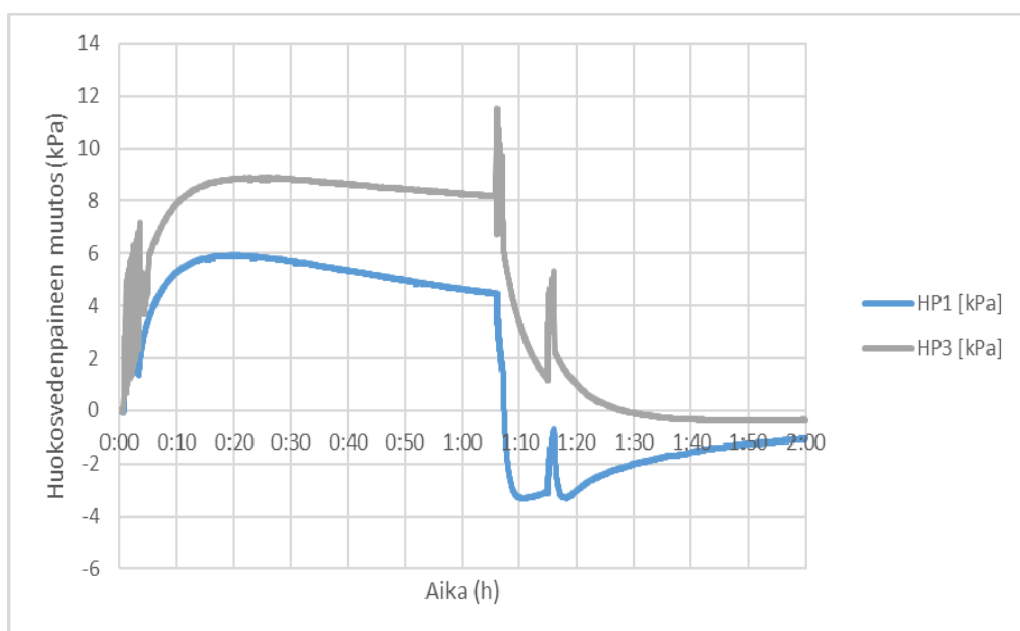


Kuva 29. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisen vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 233+900.



Kuva 30. Perniön sorrutuskokeen huokosvedenpaineen muutokset penkereen alla. (Lehtonen 2010)

Anturien HP1 ja HP3 mitaamat huokosvedenpaineet kasvoivat voimakkaasti kuormituksen aikana. (Kuva 31) 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 mittauskohteelle painumaan radan mukana hieman syvemmälle saveen aiheuttaen suurta ylipainetta. Kuorman poistuttua huokosvedenpaine laski referenssitaso alemmaksi ja lähti hiljaa palautumaan kohti referenssitaso.

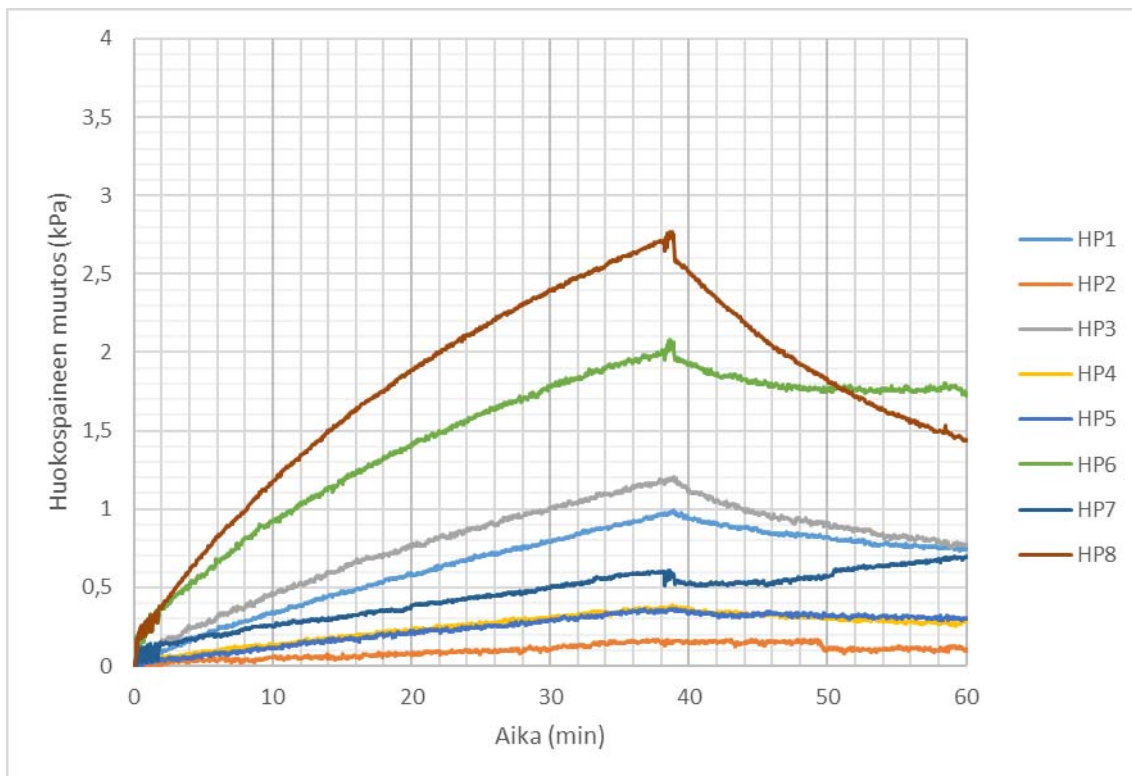


Kuva 31. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainosten vaunujen kuormituksen alla antureissa HP1 ja HP3.

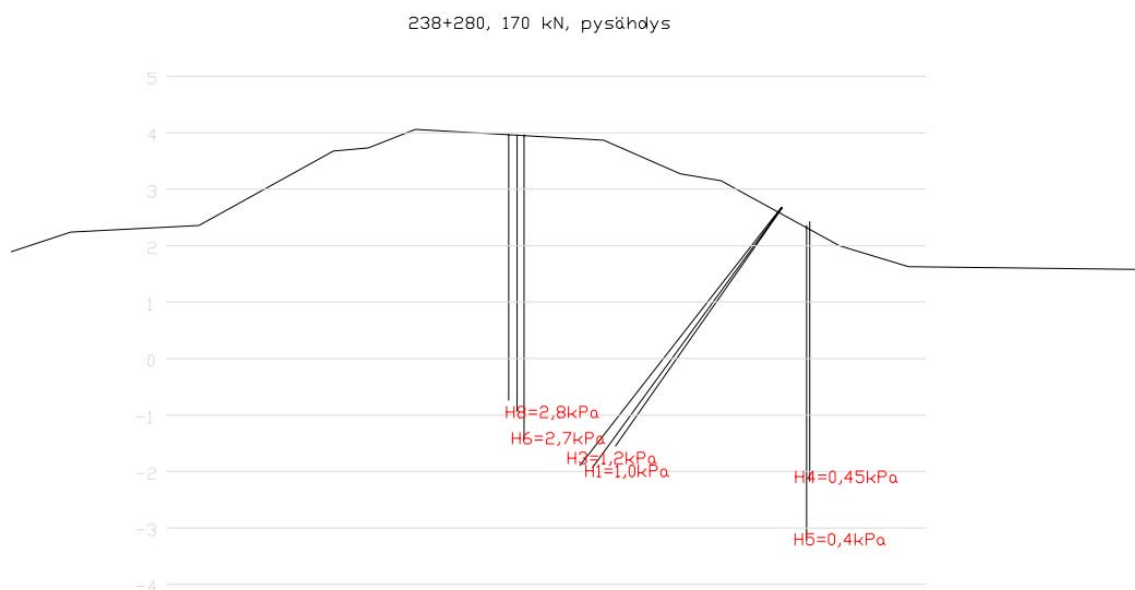
6.1.2 Kohde km 238+280

Huokosvedenpaineantureita oli asennettu kahtena eri ajankohtana tutkimuskohteeseen km 238+280, kuten luvussa 5.1.2 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 keskilinjan kohdalle savikerrokseen, jossa huokosvedenpaineen tulisikin kasvaa voimakkaimmin.

Huokosvedenpaine alkoi odotetusti nousemaan junan pysähtyessä mittauskohteelle. Kuvassa 32 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 33 on esitetty anturikohtainen suurin huokosvedenpaineen muutos radan poikkileikkauksessa.



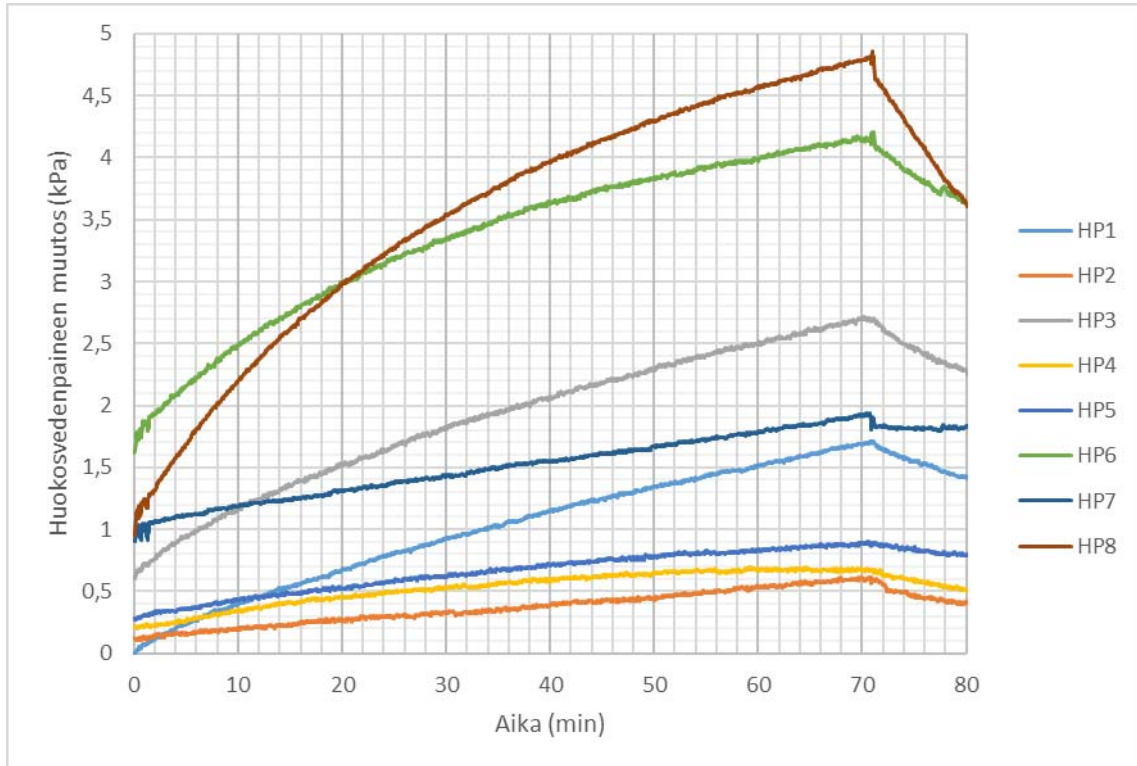
Kuva 32. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.



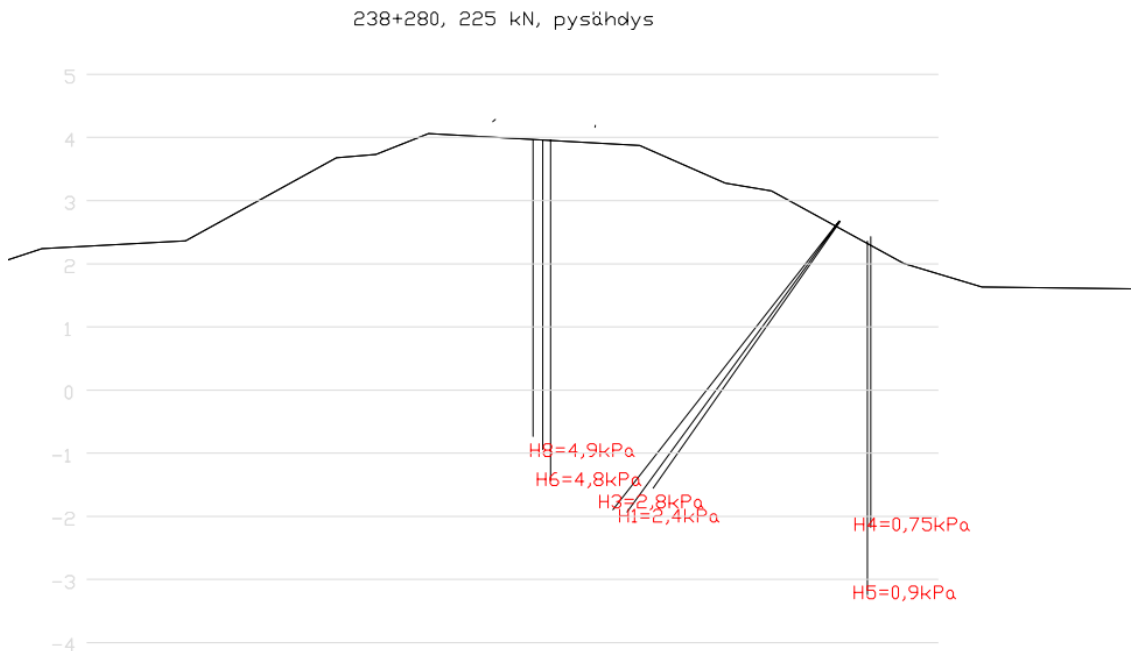
Kuva 33. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 170 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

Kuvasta 33 huomataan, kuinka huokosvedenpaineen muutos on suurinta ratapenkeeseen 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 syvemmillä kuin radan keskeltä asennetut anturit olivat, mistä syystä myös huokosvedenpaineen kasvu on hieman pienempää. Savikerroksessa kauempana radasta huokosvedenpaine kasvoi selvästi vähemmän kuin suoraan radan keskilinjalla.

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 34 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.



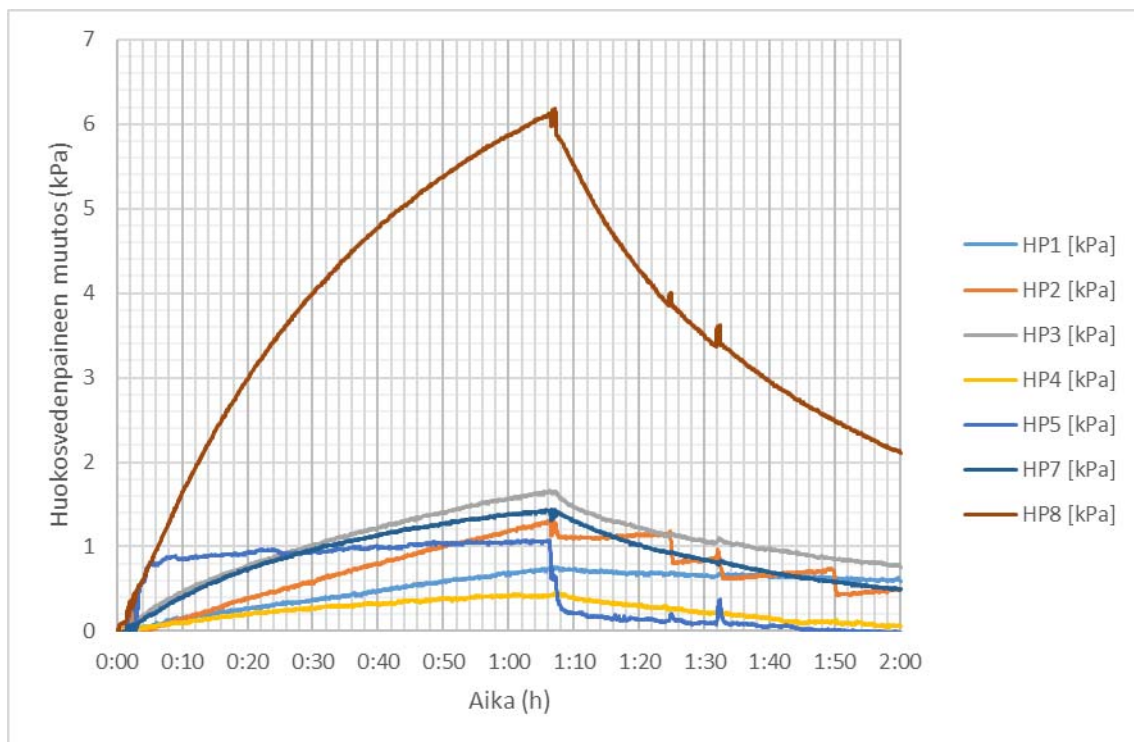
Kuva 34. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.



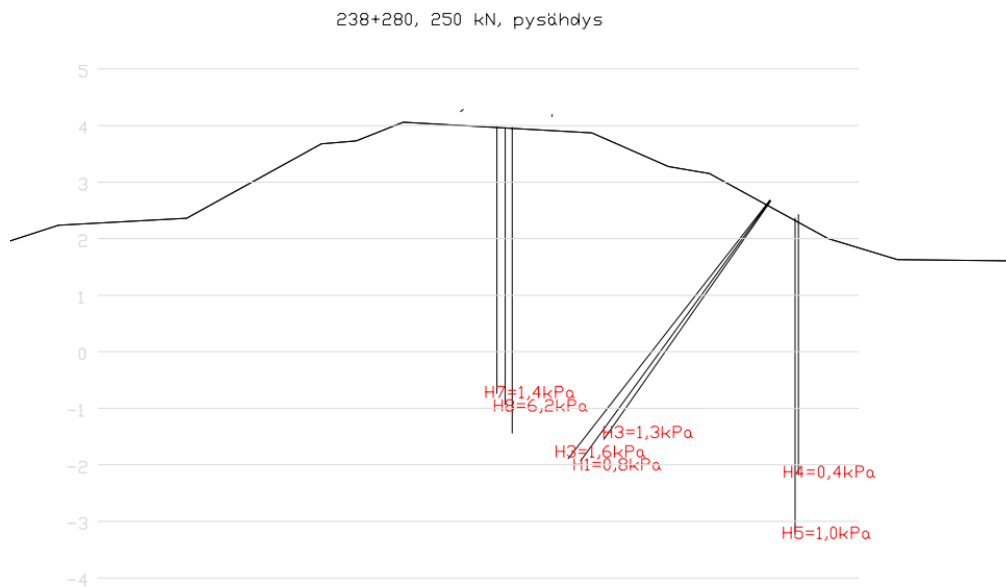
Kuva 35. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 225 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

Kuvassa 35 on huokosvedenpaineantureiden mittaamat suurimmat huokosvedenpaineen nousut kahden kuormituksen ajalta radan poikkileikkaukseen piirrettynä. Huokosvedenpaineen 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 mittaaman huokosvedenpaineen odotettiin kasvavan hieman enemmän kuin aikaisemmissa pysäytyksissä. Kuitenkin vain anturi HP8 mittasi odotetun huokosvedenpaineen kasvun. Muiden antureiden mittaamat huokosvedenpaineen muutokset olivat lähes samankaltaisia kuin aikaisemmissa pysäytyksissä, mutta huokosvedenpaineen kasvu oli hitaampaa. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset on esitetty Kuvassa 36. Kuvassa 37 mittaustulokset on esitetty ratapenkereen poikkileikkauksessa.



Kuva 36. Mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.



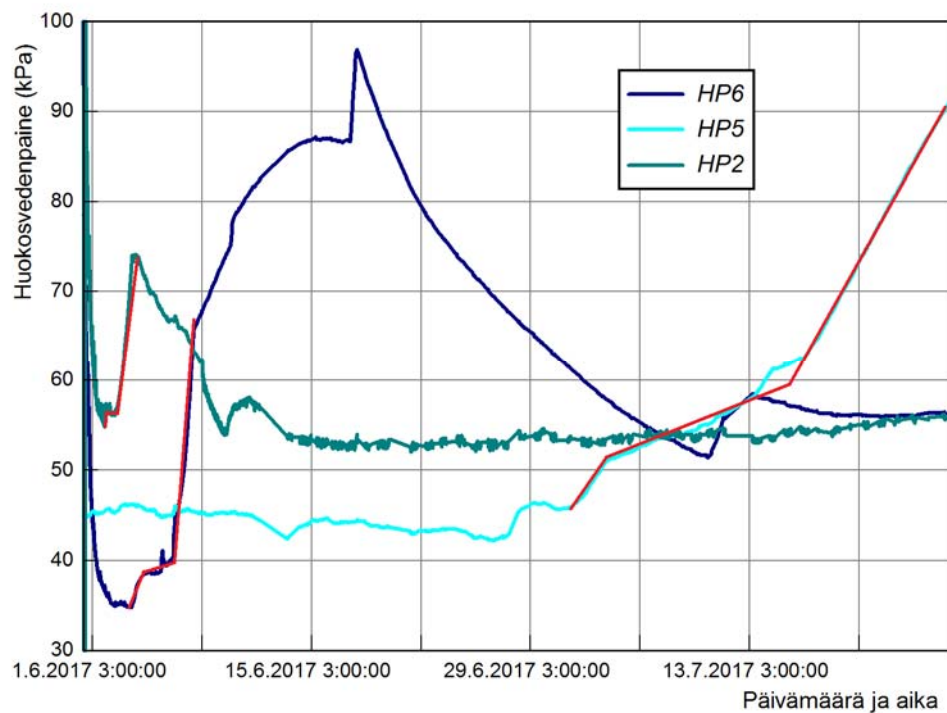
Kuva 37. Suurimmat mitatut huokosvedenpaineen muutokset pohjamaassa 250 kN akselipainoisten vaunujen kuormituksen alla kohteessa km 238+280.

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. Suomalaisten vaunujen kuormituksissa huokosvedenpaine kasvoi savikerroksessa lähes odotetusti, mutta venäläisten vaunujen kuormittaessa ratarakennetta ja pohjamaata olivat anturien mitaamat huokosvedenpaineet pienempiä kuin odotettiin.

6.1.3 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 mitaamat 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 jälleen muutaman vuorokauden aikana anturista riippuen 20–50 kPa. Tämän ylipaineen kehittymisen jälkeen anturien mitaamat paineet alkoivat laskea hiljalleen kohti normaalia painetta. Muutaman anturin mittaustuloksissa erittäin suuri paine pysyi viikkoja. Anturien mitaamat huokosvedenpaineet eivät palautuneet koskaan laskennalliselle huokosvedenpaineen tasolle vaan jäivät jopa 40 kPa ylipaineeseen. Kuvassa 38 on esitetty kolmen anturin mittaustulokset, joissa ilmiö on merkitty punaisella viivalla. Samanlaista ylipaineen kehittymistä on havaittu muun muassa Järvenpäässä vuonna 2017 (Ylönen. 2017; Tolla. 2017).



Kuva 38. Kolmen anturin mittaama huokosvedenpaineen selittämätön käyttäytyminen.

Ylipaineen kehittymiselle etsittiin teorioita ja hypoteeseja mittausten 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 teoriat 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 laskemassa hieman syvemmälle saveen. Anturien nostaminen hieman ylempään oletettiin kumoavan asennusputken pintaan syntynyttä vaippakitkaa.

Koska vaippakitkateoria ei ollut ainakaan ainut syy anturien mitaamille 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 ennätysellisen 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 syntyttä ylipainetta ei voida vielä selittää.

6.2 Pystysiirtymä

Pystysiirtymää mitattiin siirtymä- ja kiihtyvyyssantureilla. Radassa tapahtuva palautuva painuma on pystysuuntaista, joka palautuu täysin kuormituksen poistuttua. Pystysuuntaisen 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)

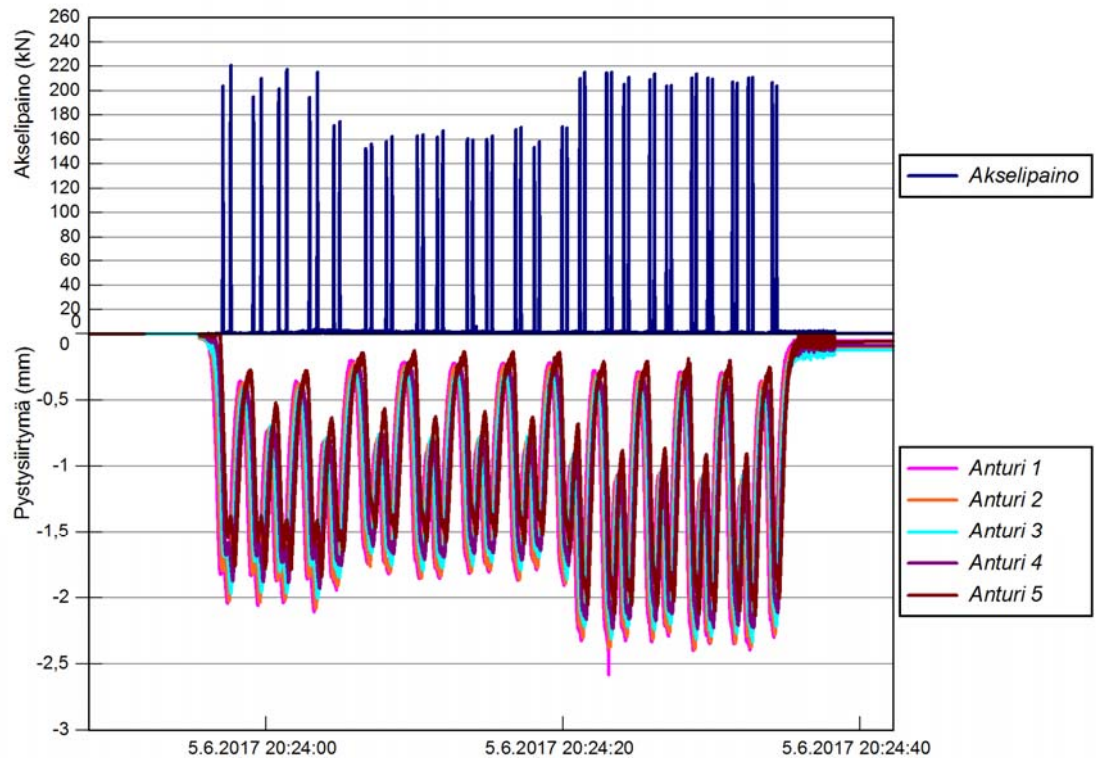
Pystysuuntaisen mittaustulokset on esitetty tässä tutkimuksessa viiden siirtymäanturin mittaamina arvoina. Siirtymäanturit olivat asennettu pölkkyjen keskelle viiteen peräkkäiseen pölkkyyn ja kiihtyvyyssanturit neljään eri pölkkyyn viiden pölkyn väleihin pölkkyjen molempiin päihin. Pystysuuntaista verrataan kuvissa akselipainoon, jotta sen vaikutusta pystysuuntaisen 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.

6.2.1 Kohde km 233+900

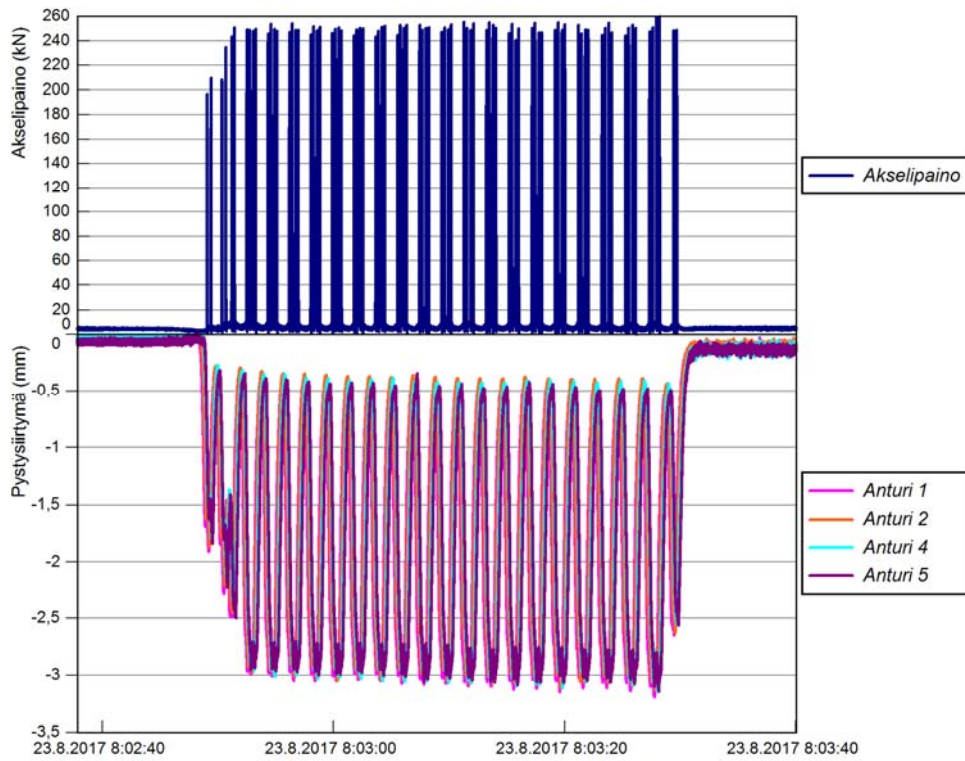
Pystysuuntaista tutkittiin kohteessa jatkuvasti jokaisesta ohiajavasta junasta. Anturit ohjelmoitiin aloittamaan mittaus jokaisen junan ajaessa mittaustuloksen yli, jolloin mittaustuloksia saatiin runsaasti. Mittaustuloksista tarkasteltiin tarkemmin suomalaisista ja venäläisistä vaunuista koottuja testijunia.

Kuvassa 39 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 mittaustarkkuuden huomioiden kokonaan eli pystysiirtymistä voidaan käyttää termiä palautuva painuma.



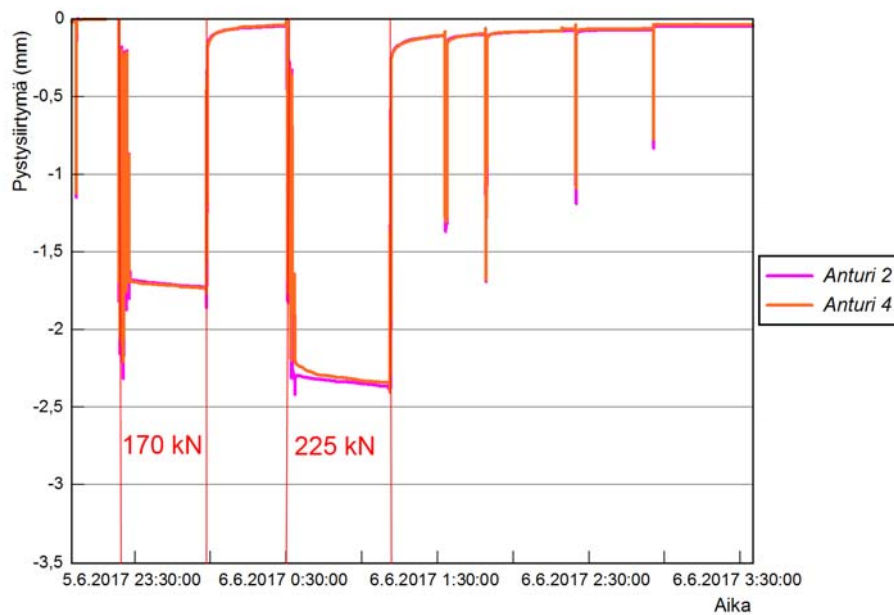
Kuva 39. Suomalaisen testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkkyjen keskeltä mitattuna kohteessa km 233+900.

Venäläisten 250 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttamat pystysiirtymät on esitetty kuvassa 40. 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 referenssitasolle.



Kuva 40. Venäläisillä vaunuilla kootun testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkkyjen keskeltä mitattuna kohteessa km 233+900.

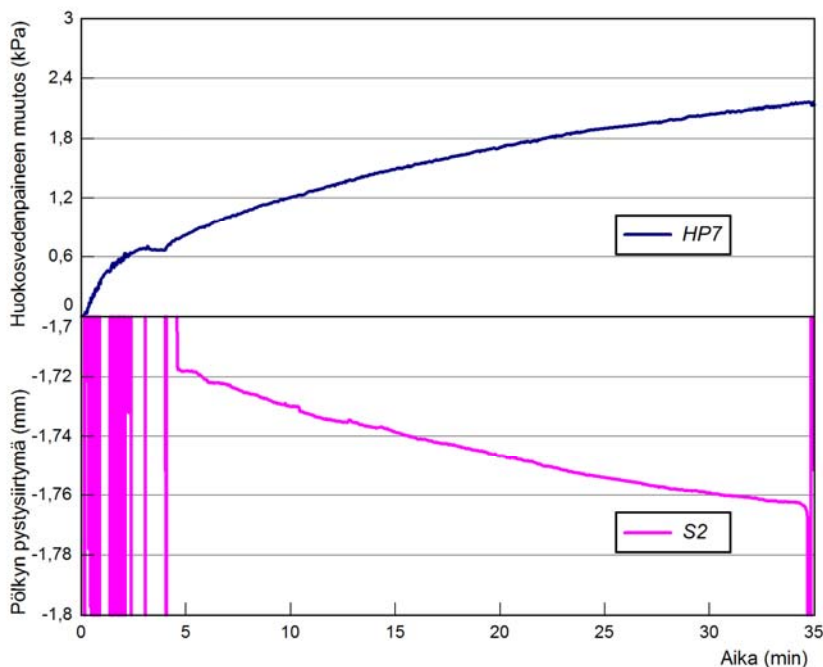
Suomalaisilla vaunuilla kootun testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät on esitetty kahden parhaiten kuorman alla sijainneen anturin osalta ajan suhteen kuvassa 41.



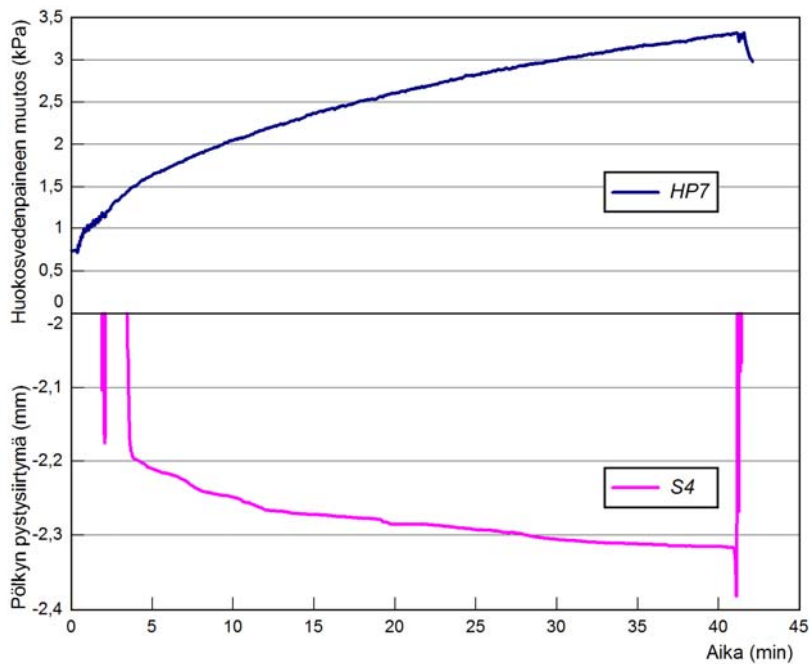
Kuva 41. Suomalaisilla vaunuilla kootun testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät ja niiden palautuminen kohteessa km 233+900.

Kuvasta 41 nähdään 170 kN akselipainoisen vaunun aiheuttavan ensin noin 1,7 mm pystysiirtymän, joka pysäytyksen jatkuessa kasvaa noin 0,1 mm. Pystysiirtymä palautuu lähes referenssitasolle 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.

Kuvissa 42 ja 43 esitetään pysäytyksien aikana tapahtuvien painumien ja huokospaineiden muutokset 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksessä ja 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksessä. Pystysiirtymän kuvaajassa näkyy junan hidastamisesta aiheutuvien dynaamisten voimien vaikutus pölkyn pystysiirtymään. Huokosvedenpaine alkaa kasvaa jo ennen kuin juna pysähtyy täysin. Kuvista nähdään, että huokosvedenpaineiden ja painumien kehitys on lähes samanlaista ja molempien muutos hidastuu pysäytyksen edetessä.

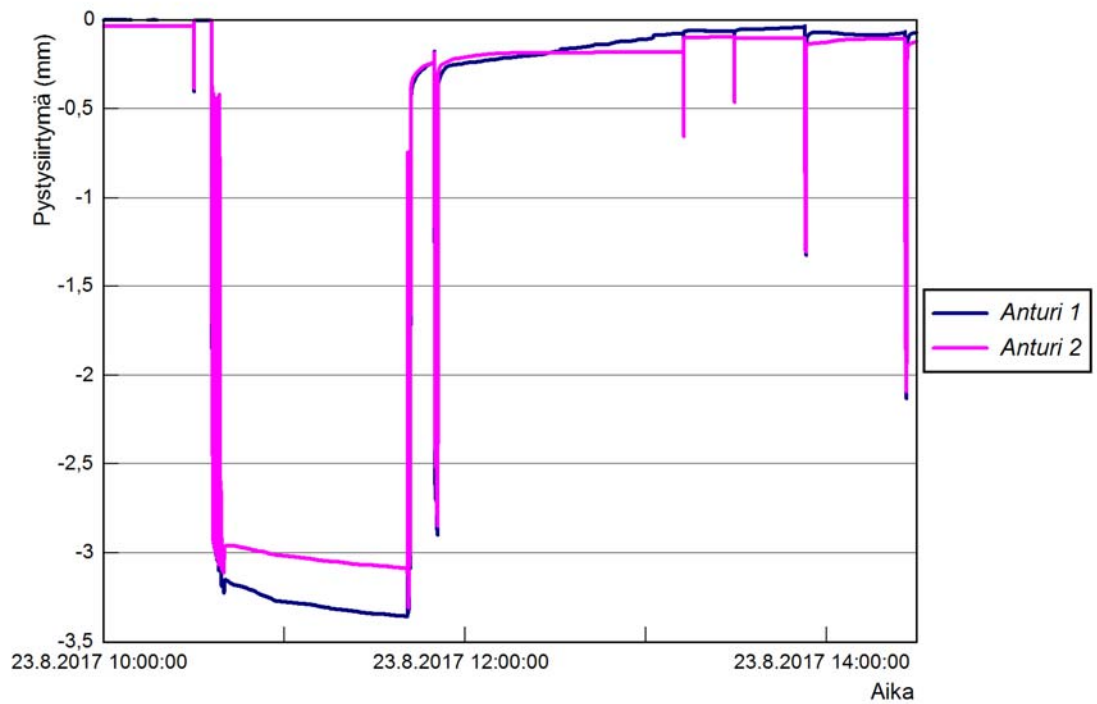


Kuva 42. 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aiheuttamat mitatut huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän suurimmat muutokset kohteessa km 233+900.



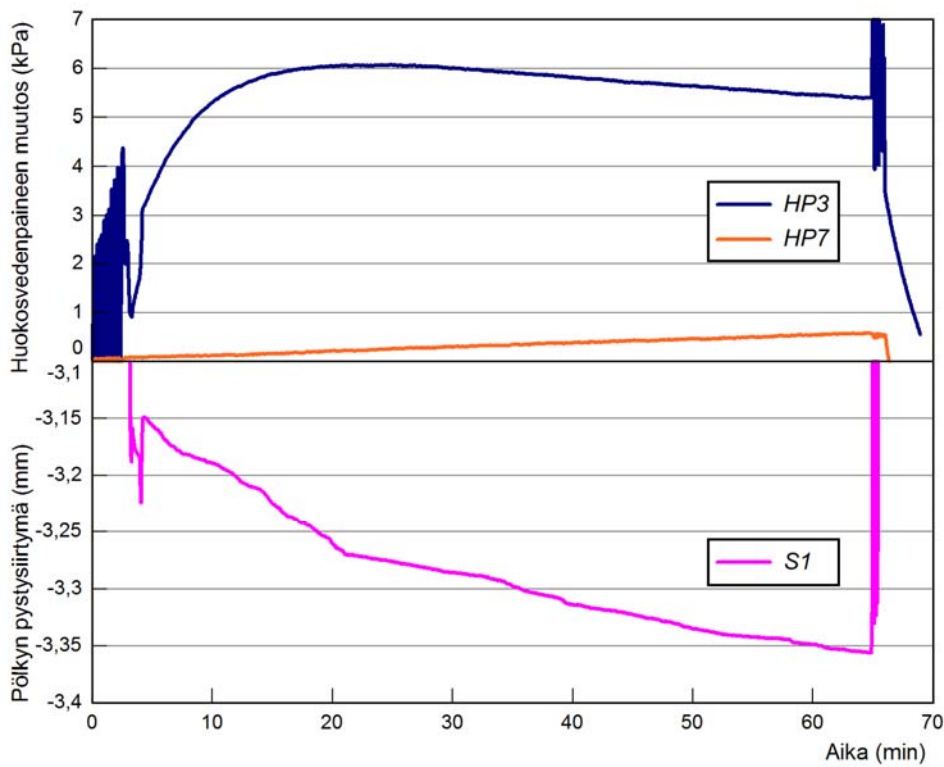
Kuva 43. 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aiheuttamat mitatut huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän suurimmat muutokset kohteessa km 233+900.

Siirtymäanturien kohdalle pysäytetyn venäläisistä vaunuista koostuvan junan vaunun kokonaispaino oli 99200 kg, mikä selviää testijunan vaunuluettelosta (Liite 3). 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 44.



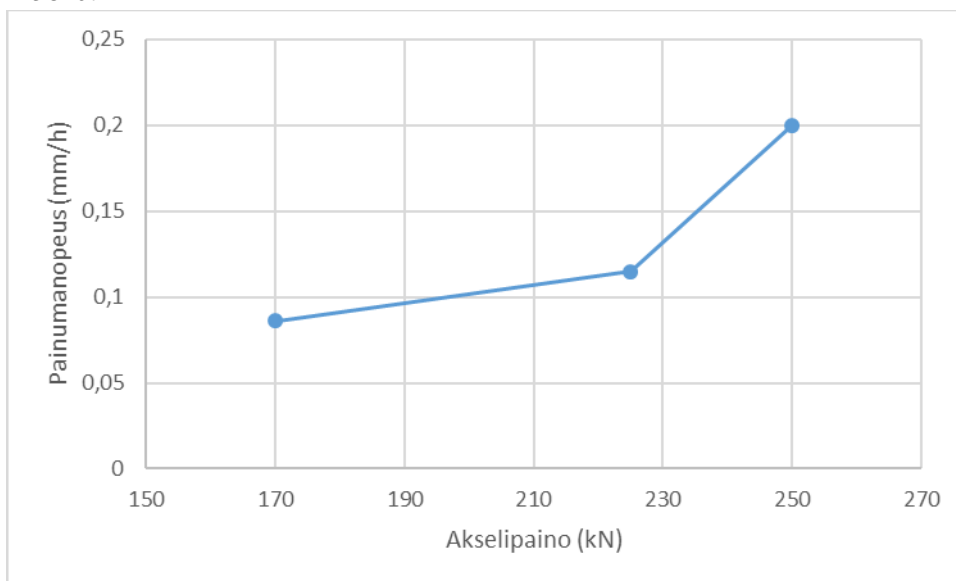
Kuva 44. Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksen aiheuttama pystysiirtymä ja sen palautuminen kohteessa km 233+900.

Kuvassa 45 esitetään 250 kN akselipainoisten vaunujen aiheuttamat huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän muutokset pysäytyksen aikana. Alussa näkyvät nopeat muutokset, johtuvat junan siirtämisestä parempaan paikkaan pysäytyksen alussa. Mitatuista huokosvedenpaineista on esitetty kaksi eri tavalla käyttäytynyttä huokosvedenpaineen nousua. Kuvasta nähdään, että siirtymä on ajan suhteen hidastuvaa.



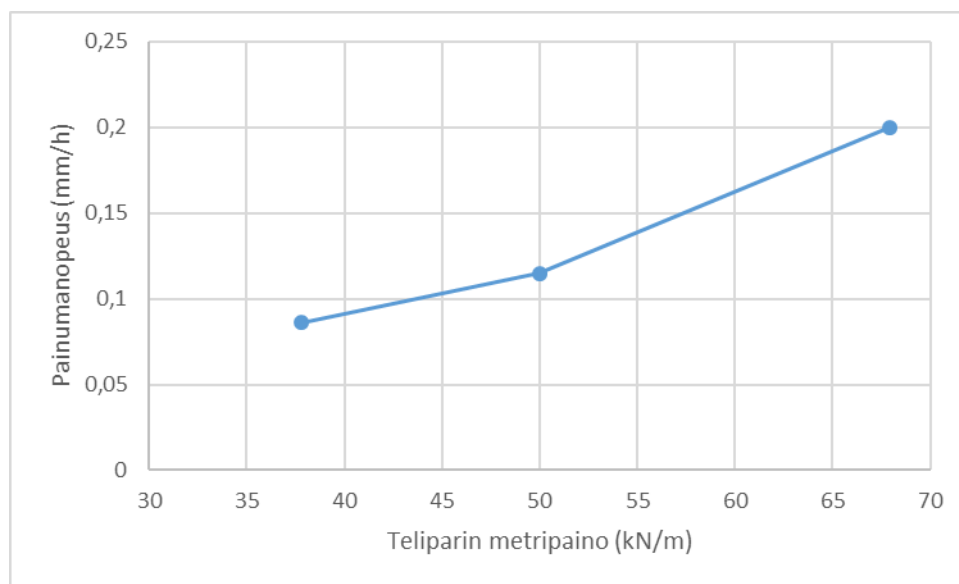
Kuva 45. 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aiheuttamat mitatut huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän suurimmat muutokset kohteessa km 233+900.

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 46 on esitetty painumanopeus jokaisesta pysäytyksestä ensimmäisen puolen tunnin ajalta akselipainon funktiona.



Kuva 46. Painumanopeus pysäytyksien aikana akselipainon funktiona kohteessa km 233+900.

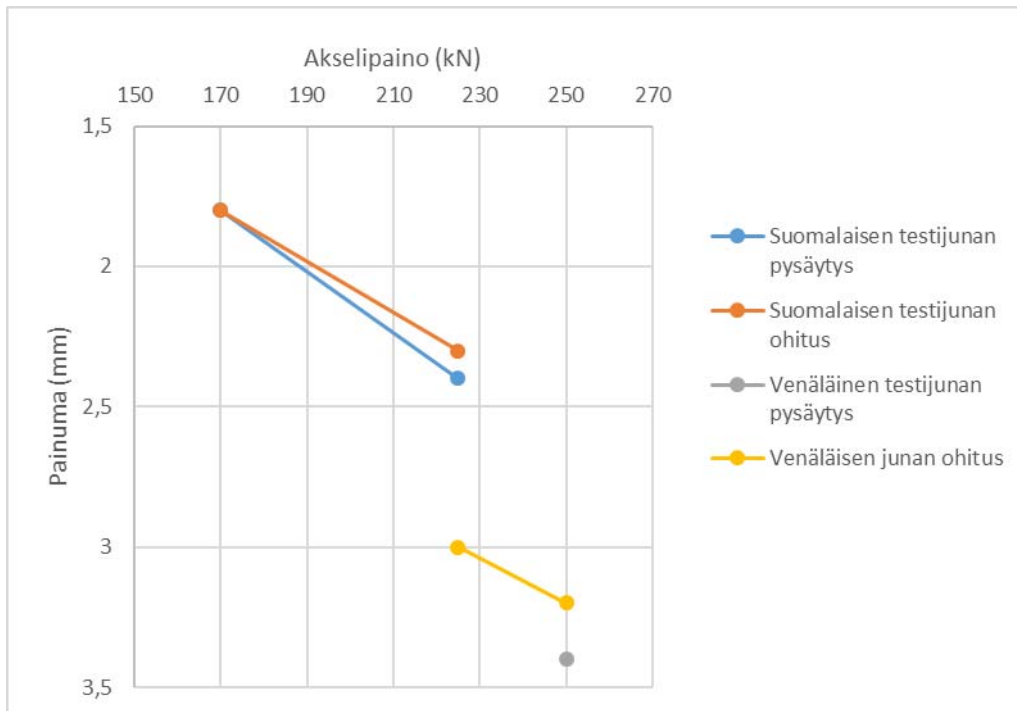
Painumanopeuden odotettiin kasvavan lineaarisesti kuormituksen kasvaessa. Painumanopeus akselipainon suhteen kasvaa kolmella eri akselipainolla tehtyjen mittausten mukaan kuitenkin eksponentiaalisesti. Tämän havainnon mukaan voisi todeta, että akselipainon nostaminen normaalia suuremmaksi kasvattaa pysäytetyn 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 rataa ja pohjamaahan.



Kuva 47. Painumanopeus pysäytyksen aikana teliparin metripainon funktiona kohteessa km 233+900.

Kuvassa 47 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 46 ja 47 perusteella teliparin metripaino kuvaa paremmin painumannopeutta eri suuruisten kuormitusten alla, ottaen huomioon myös kalustojen eroavaisuudet.

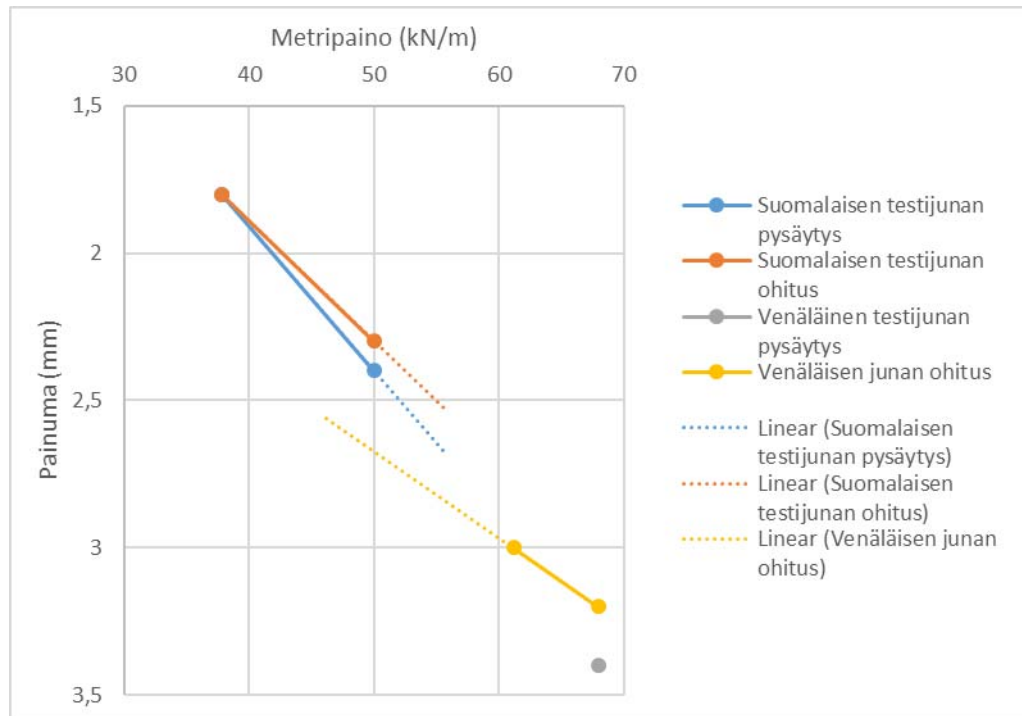
Mittaustulosten mukaan venäläinen 250 kN akselipainoinen vaunu aiheutti pölkkyihin huomattavasti suuremman painuman kuin suomalainen 225 kN akselipainoinen vaunu. Mittaustuloksia tarkasteltiin tarkemmin, jotta saatiin selville, onko suuremman painuman syynä 25 kN korotus akselipainossa vai löytyykö suuremman painuman syy kalustojen eroavaisuudessa. Mittaustuloksista analysoitiin akselipainon sekä vaunutyypin vaikutusta palautuvaan painumaan junien ohiajoissa ja pysäytyksissä. Akselipainon vaikutus palautuvaan painumaan on esitetty kuvassa 48.



Kuva 48. Eri kalustojen akselipainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 233+900.

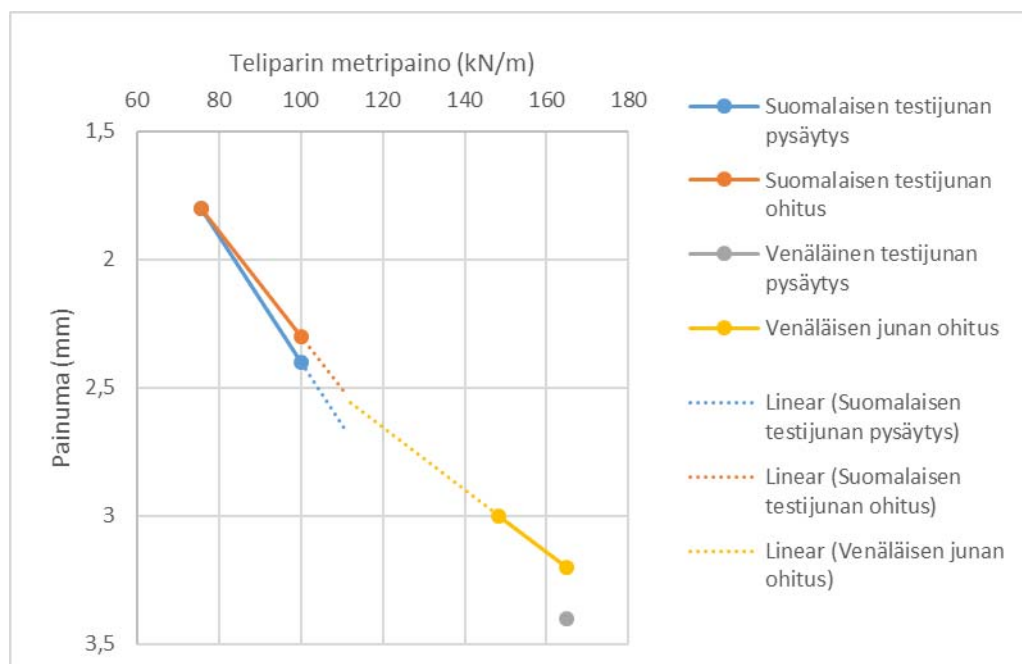
Pysäytysten aiheuttaman palautuvan painuman arvo otettiin puoli tuntia kestäneen pysäytyksen ajanhetkeltä. Ohituksessa tapahtuneen palautuvan painuman arvo otettiin viimeisen vaunun ensimmäisen akselin aiheuttamasta palautuvan painuman arvosta. Odotetusti pysäyksissä palautuvat painumat ovat hieman suurempia 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 49 verrataan samoja pystysiirtymän mittaustuloksia samojen ohiajojen ja pysäytysten metripainoon ja kuvassa 50 teliparin metripainoon. Metripainon ja teliparin metripainon kuvaajissa esitetyt trendiviivat osoittavat arvioidun palautuvan painuman suuruuden, jos suomalaisten vaunujen akselipaino olisi 250 kN ja venäläisten vaunujen akselipaino olisi 170 kN.



Kuva 49. 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. Arvioidut suomalaisen kaluston aiheuttamat palautuvat painumat eivät ole yhtä suuria arvioidujen venäläisen kaluston aiheuttamien palautuvien painumien kanssa samalla metripainolla.



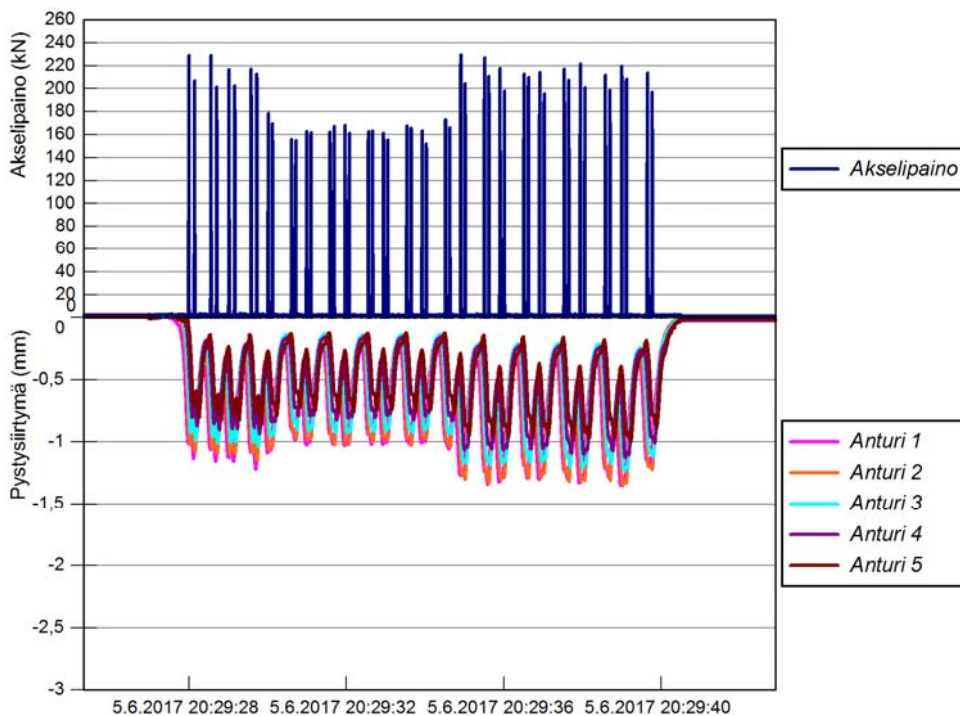
Kuva 50. Eri kalustojen teliparin metripainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 233+900.

Kuvassa 50 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.

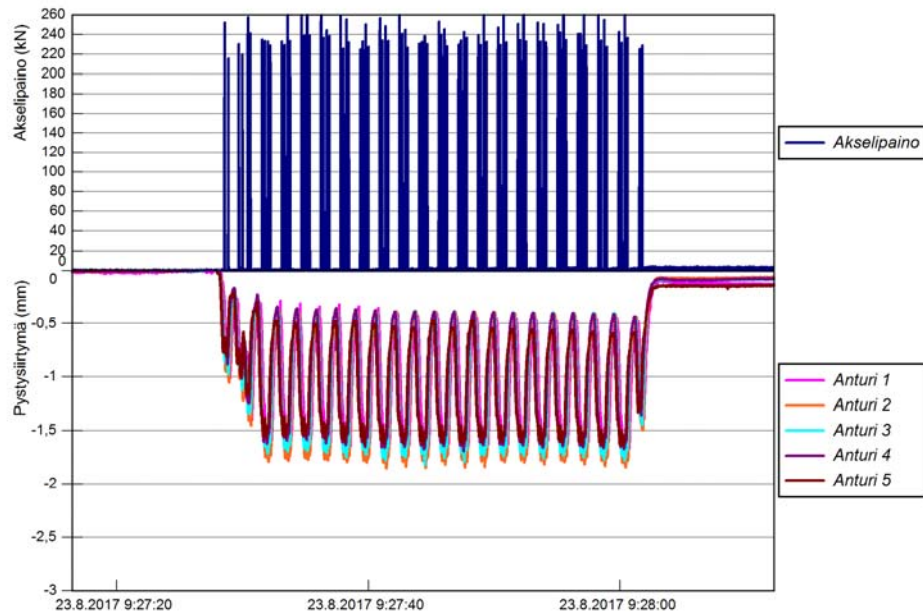
6.2.2 Kohde km 238+280

Lähempänä Hovinsaaren liikennepaikkaa olevalla kohteella km 238+280 junien aiheuttamat pystysiirtymät pölkyyssä 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 venymäliuskaantureilla mitatut akselipainot on esitetty kuvassa 51.



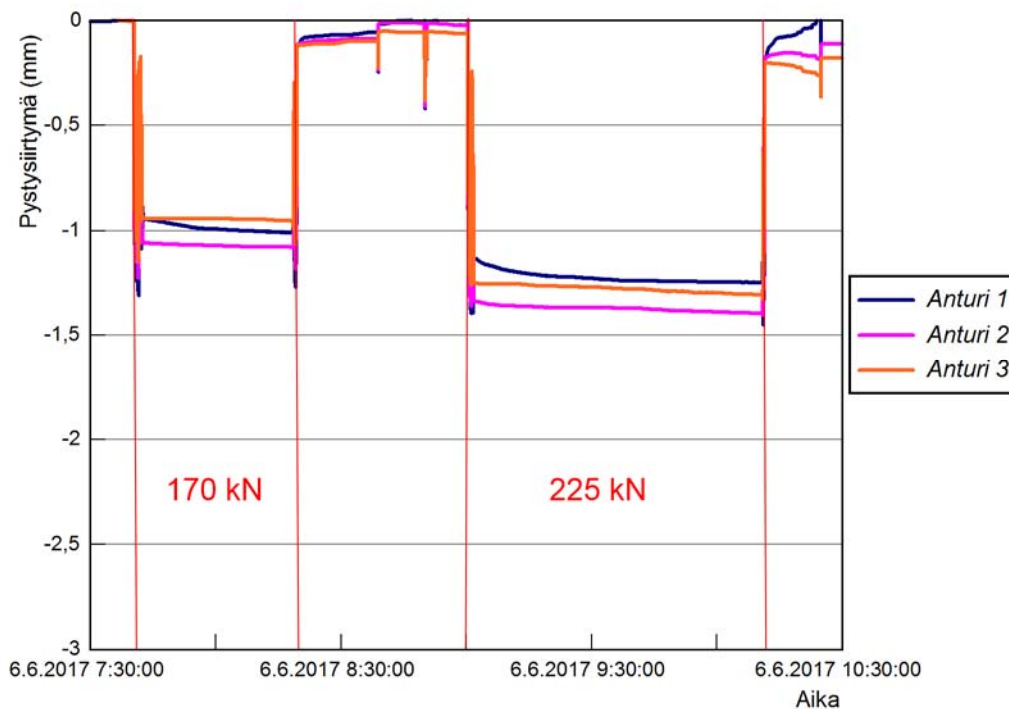
Kuva 51. Suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkyn keskeltä mitattuna kohteessa km 238+280.

Venäläisistä 250 kN akselipainoisista vaunuista koostuva testijuna aiheutti noin 1,8mm palautuvan painuman pölkyyssä. Venäläisen testijunan ohiajon aikana mitatut tulokset on esitetty kuvassa 52.



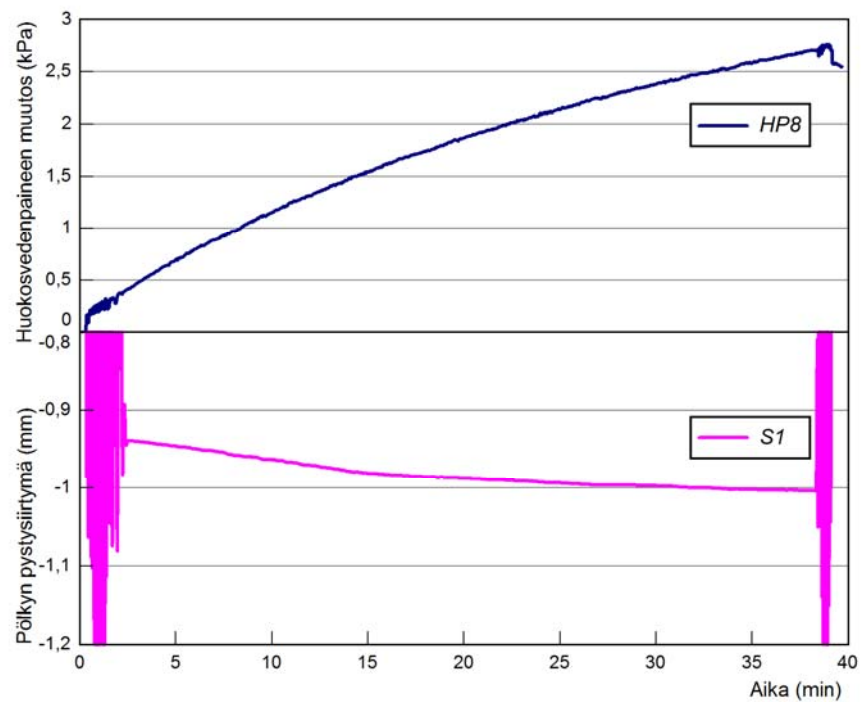
Kuva 52. Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat pystysiirtymät pölkyn keskeltä mitattuna kohteessa km 238+280.

Suomalaisen testijunan 170 kN akselipainoiset vaunut pysäytettiin tutkimuskohteelle 6.6.2017. Kuvassa 53 on esitetty kolmen pölkyn pystysiirtymä vaunujen ollessa pysäytettynä 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.

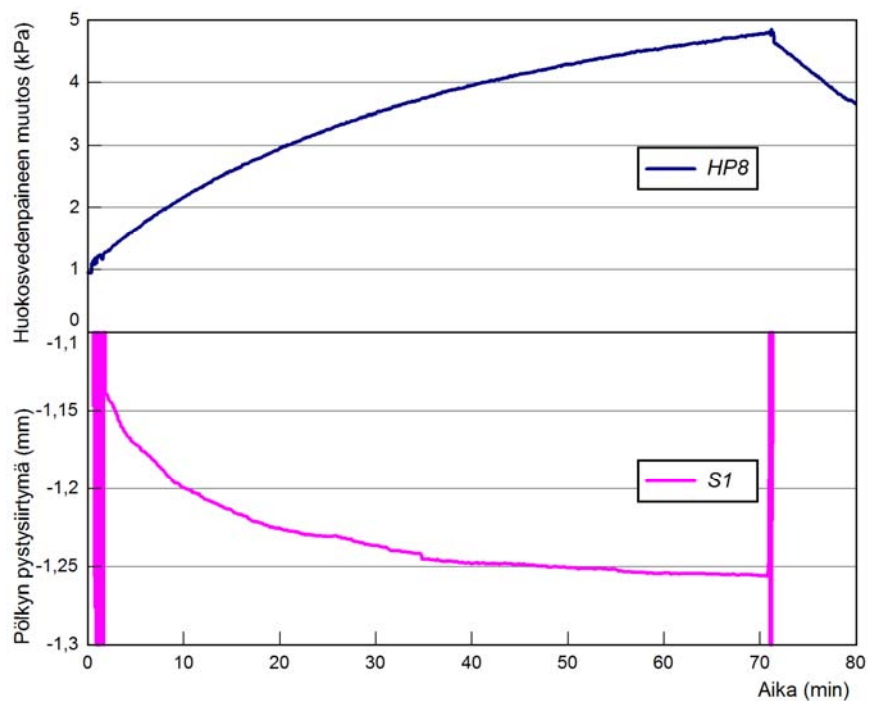


Kuva 53. Suomalaisista vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät ja niiden palautuminen kohteessa km 238+280.

Kuvissa 54 ja 55 esitetään pysäytyksien aikana tapahtuvien painumien ja huokospaineiden muutokset 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksessä ja 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksessä kohteessa km 238+280. Kuvista nähdään, että huokosvedenpainneiden ja painumien kehitys on lähes samanlaista ja molempien muutos hidastuu pysäytyksen edetessä.

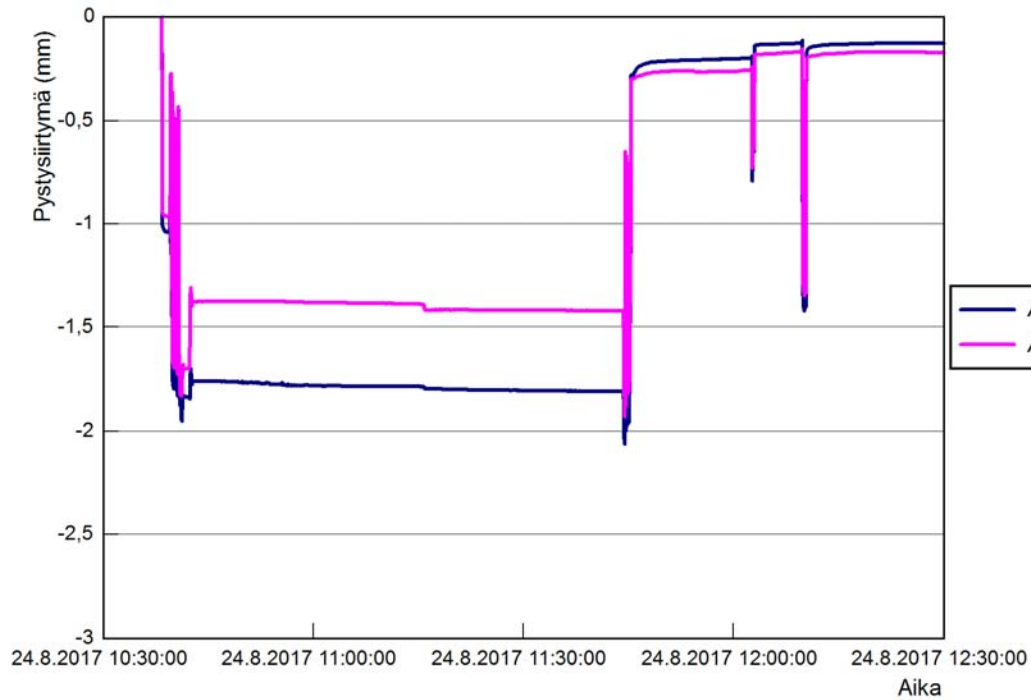


Kuva 54. 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aiheuttamat mitatut huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän suurimmat muutokset kohteessa km 238+280.



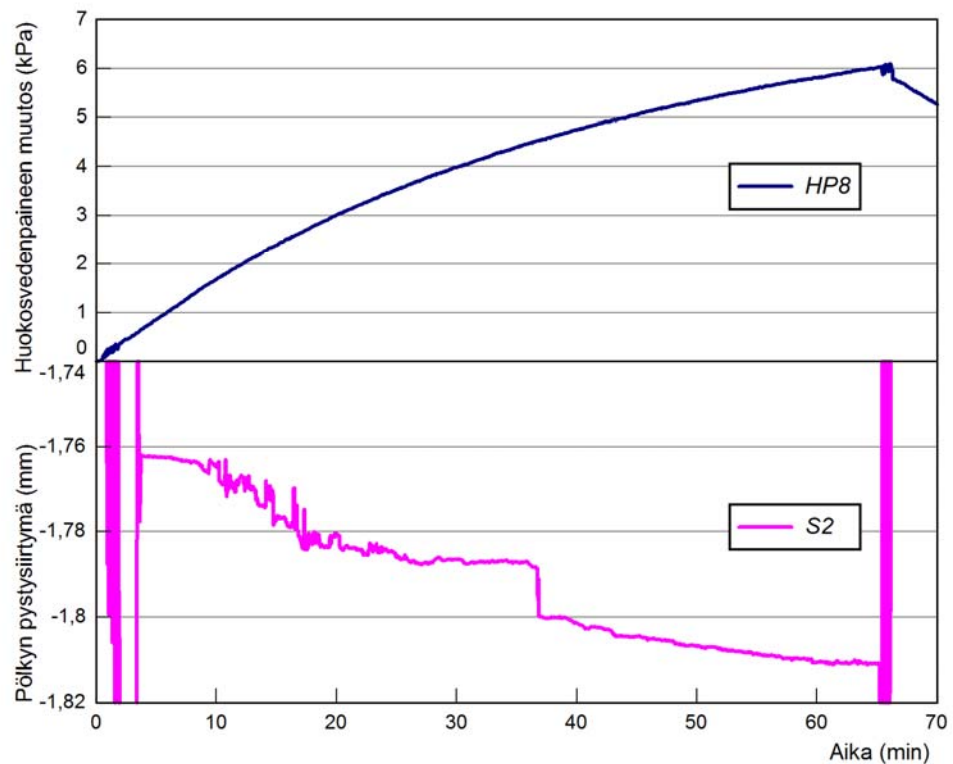
Kuva 55. 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aiheuttamat mitatut huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän suurimmat muutokset kohteessa km 238+280.

Venäläinen 250 kN vaunu pysäytettiin hieman antureiden viereen, jotta viereisen vauunun teli olisi paremmin huokosvedenpaineantureiden kohdalla. Vain kaksi siirtymäantureilla varustettua pölkkyä jäi kuormituksen alaiseksi. Kuvassa 56 on esitetty näiden kahden pölkyn pystysiirtymät venäläisen vauunun 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.



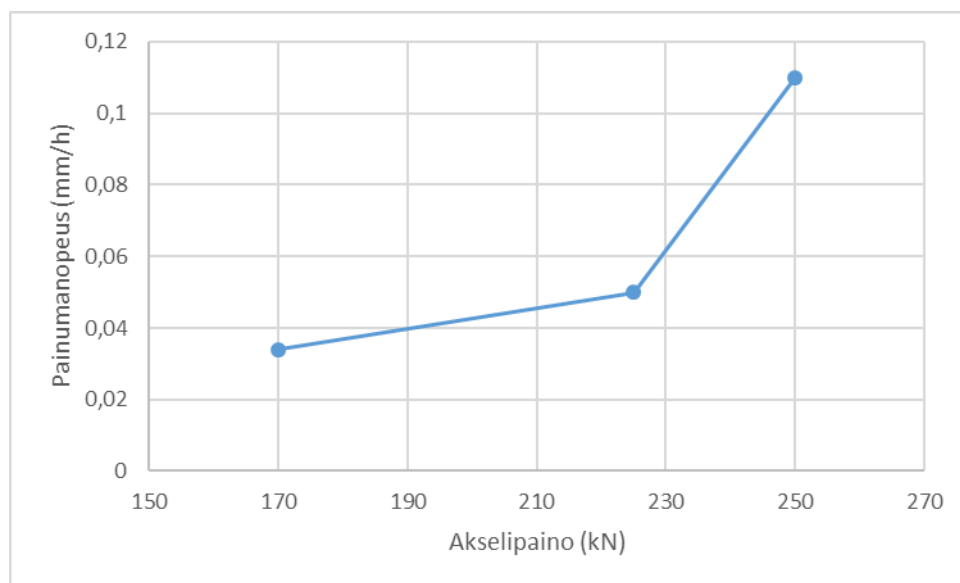
Kuva 56. Venäläisistä vauunuista koostuvan testijunan pysäytyksien aiheuttamat pystysiirtymät ja niiden palautuminen kohteessa km 238+280.

Kuvassa 57 on esitetty suurin mitattu huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän muutos 250 kN akselipainoisten vauunujen pysäytyksen aikana. Pystysiirtymän tuloksessa näkyvä 0,1 mm hyppy aiheutui, kun yhtä antureista liikutettiin, jotta anturin mittaustuloksessa havaittu häiriö poistuisi. Anturin liikuttaminen aiheutti kaikkiin siirtymäantureihin hetkellisen häiriön. Anturit mittasivat liikuttamisen jälkeen kuitenkin tasaisemmin ilman suurempia häiriöitä. Kuvasta nähdään, että huokosvedenpaineen ja pystysiirtymän muutos on ajan suhteen hidastuvaa.



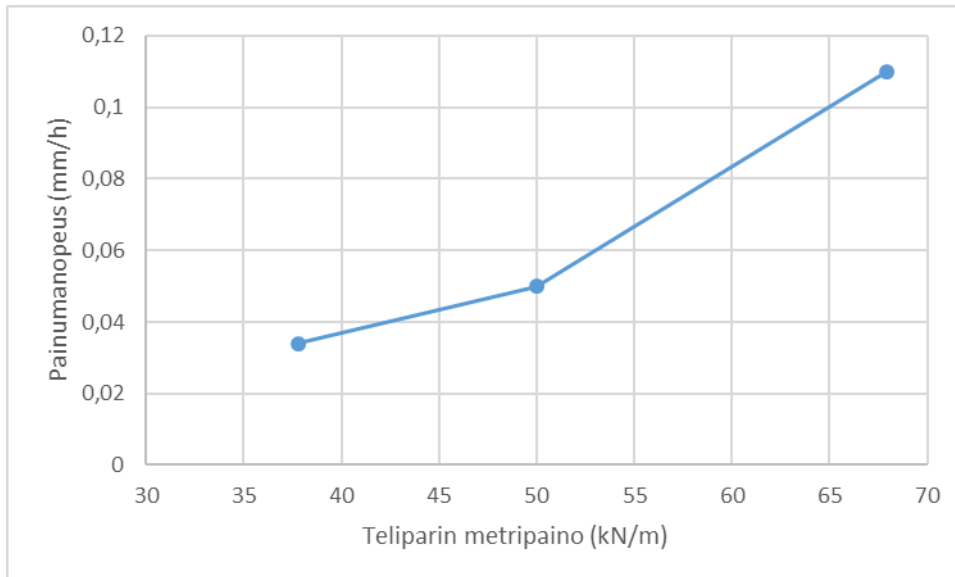
Kuva 57. 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aiheuttamat mitatut huokosvedenpaineen ja pölkyn pystysiirtymän suurimmat muutokset kohteessa km 238+280.

Painumanopeudella tarkoitetaan pysäytysten aikana mitatun pystysiirtymän muutosta ensimmäisen puolen tunnin aikana. Painumanopeus pysäytyksen aikana suhteessa akselipainoon oli eksponentiaalinen. (Kuva 58) Pelkästään akselipainoa tarkasteltaessa painumanopeuden suuri kasvu voi rataosalla suunnitellun akselipainon noston takia näyttää huolestuttavalta.



Kuva 58. Painumanopeus akselipainon funktiona kohteessa km 238+280.

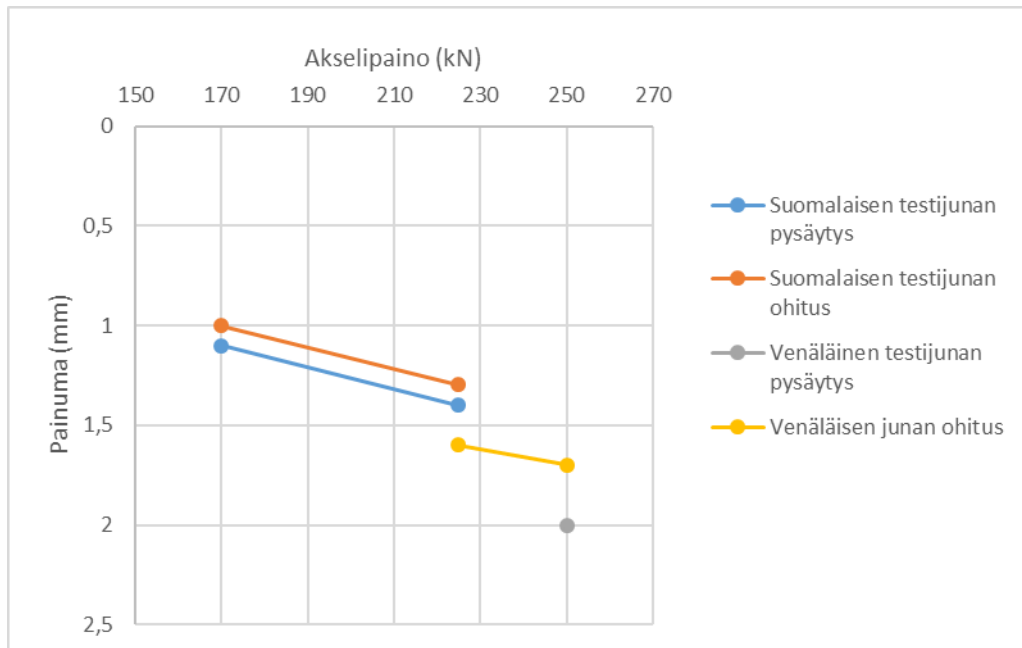
Kuitenkin kuten kohteen km 233+900 tapauksessa huomattiin, akselipaino ei ole paras tapa kuvata junan kuormituksen vaikutuksia pölkyn, radan ja pohjamaan pystysiirtymään. Kuvassa 59 on esitetty painumanopeus suhteessa teliparin metripainoon kohteessa km 238+280. Kuvaajan mukaan painumanopeus kasvaa lähes lineaarisesti teliparin metripainon kasvaessa.



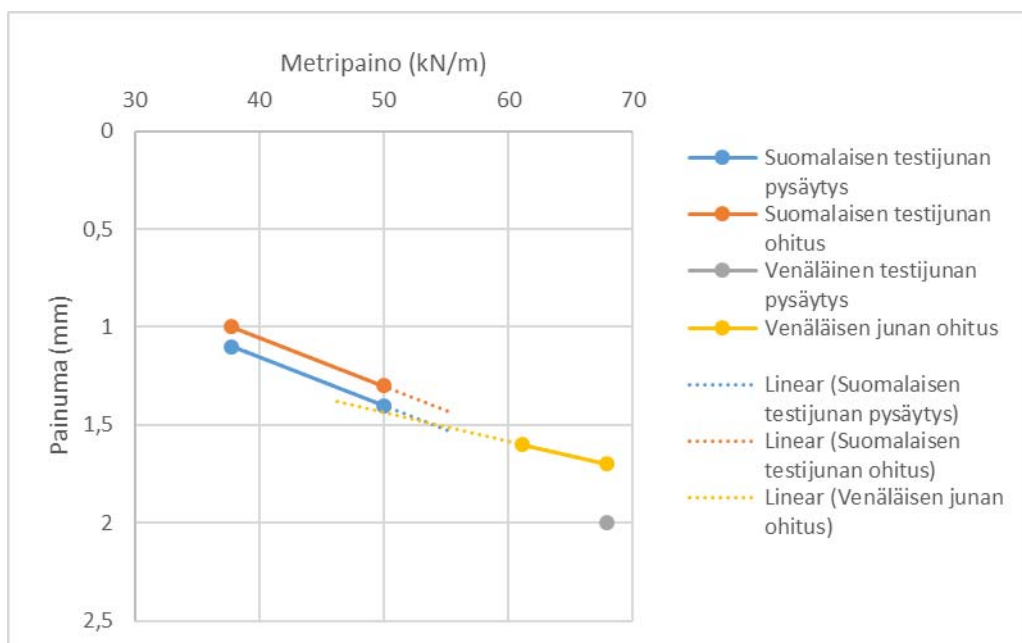
Kuva 59. Painumanopeus teliparin metripainon funktiona kohteessa km 238+280.

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 60) Verrattaessa palautuvia painumia vaunujen metripainoon on kuvaaja lähes lineaarinen, mutta yhtä raskaat erilaista kalustotyyppiä edustavat vaunut aiheuttavat arvion mukaan silti eri suuruisen painuman. (Kuva 61) Erilaisten kalustojen aiheuttamien palautuvien painumien vertailu vaunun metripainolla ei hävitä tuloksista kalustojen eroavaisuutta.

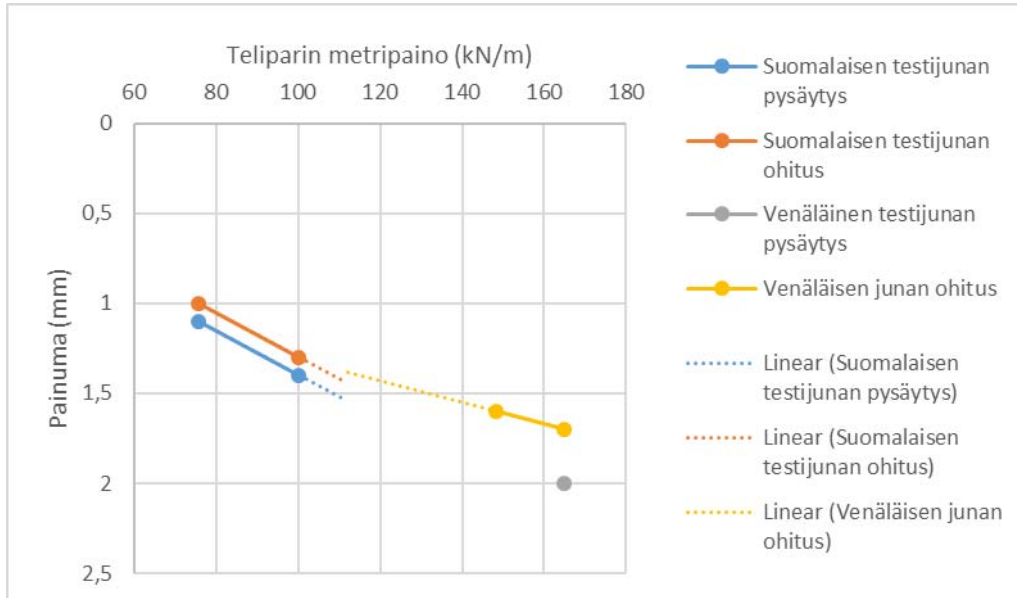
Teliparin metripaino kuvaa tässäkin kohteessa paremmin palautuvan painuman suuruutta suhteessa kuormittavaan vaunun painoon. Kuvan 62 mukaan teliparin metripaino on lähes lineaarinen mitattujen palautuvien painumien kanssa.



Kuva 60. Eri kalustojen akselipainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 238+280



Kuva 61. Eri kalustojen metripainon vaikutus palautuvaan painumaan kohteessa km 238+280.



Kuva 62. 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.

6.2.3 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.

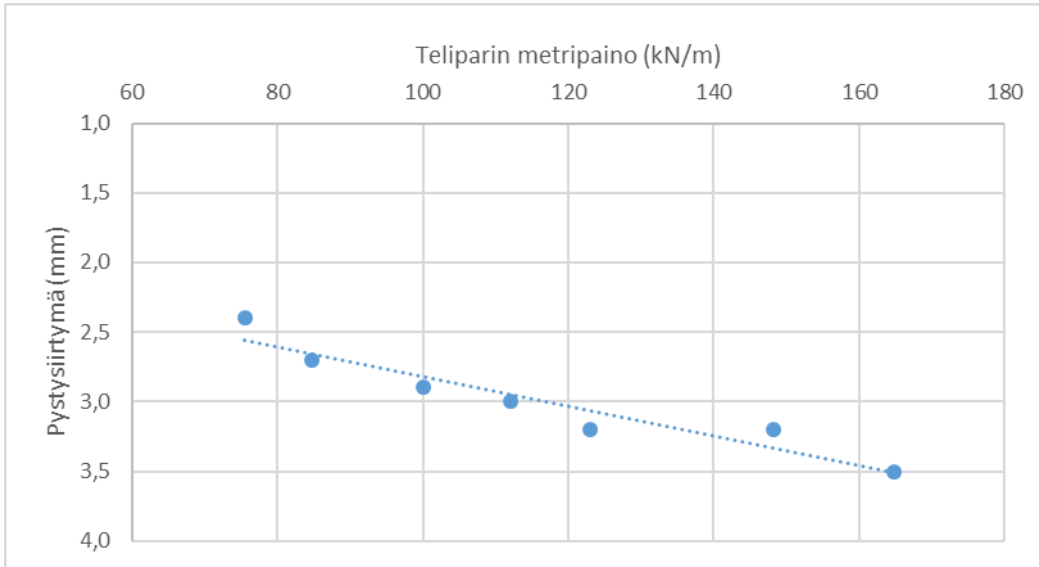
Kiihtyvyyssantureilla mitattu pystysiirtymä on keskiarvo kahdeksan anturin tuloksista, joista kaksi suurinta ja kaksi pienintä arvoa on jätetty pois. Kiihtyvyyssantureilla mitattiin jokaisen ohiajavan junan aiheuttamat pystysiirtymät. Analyysiin on pyritty löytämään mahdollisimman laaja kattaus eri akselipainoisia 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 6 on esitetty kiihtyvyyssantureilla ja siirtymäantureilla mitatut pystysiirtymät eri painoisista junista.

Taulukko 6. Kiihtyvyy- ja siirtymäantureilla mitatut pystysiirtymät eri painoisista junista.

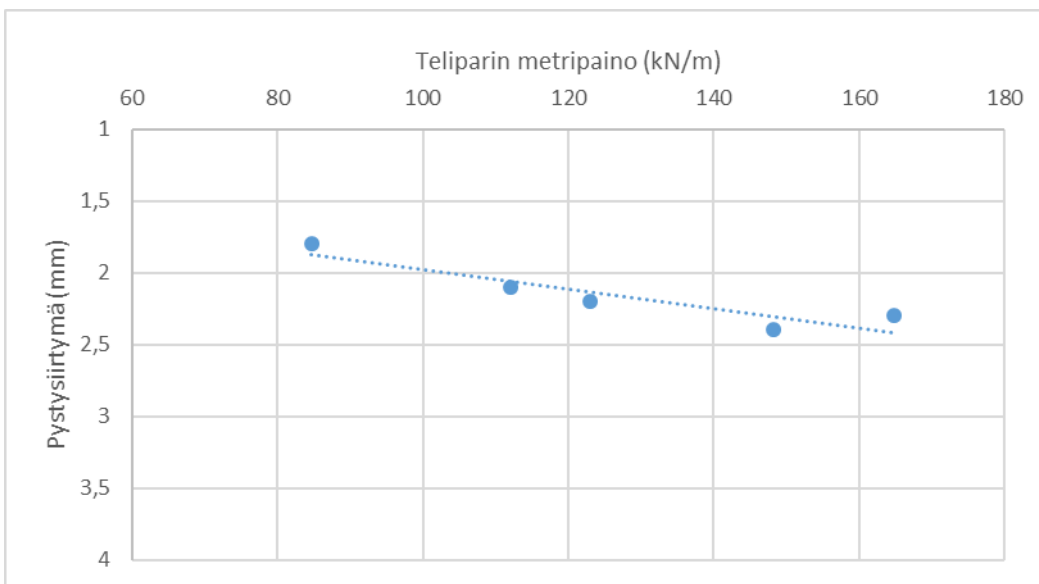
Kohde	Akselipaino (kN)	Teliparin metripaino (kN/m)	Pystysiirtymä siirtymäantureilla (mm)	Pystysiirtymä kiihtyvyyksantureilla (mm)
233+900	170	112,0	2,0	3,0
233+900	170	75,6	1,8	2,4
233+900	180	84,7	1,9	2,7
233+900	200	123,1	2,4	3,2
233+900	225	100,0	2,4	2,9
233+900	225	148,3	2,9	3,2
233+900	250	164,7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

Kiihtyvyyksanturien mitaamat pystysiirtymät ovat teliparin metripainoihin nähden oikeaa kokoluokkaa. Mitä suurempi teliparin metripaino on, sitä suurempi on myös pystysiirtymä. Kuvassa 63 ja 64 on esitetty kohteisiin km 233+900 ja km 238+280 asennetuilla kiihtyvyyksantureilla mitatut pystysiirtymät teliparin metripainon suhteen. Pystysiirtymät ovat kasvavat lähes lineaarisesti teliparin metripainon suhteen.



Kuva 63. Kohteessa km 233+900 kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät teliparin metripainon suhteen.

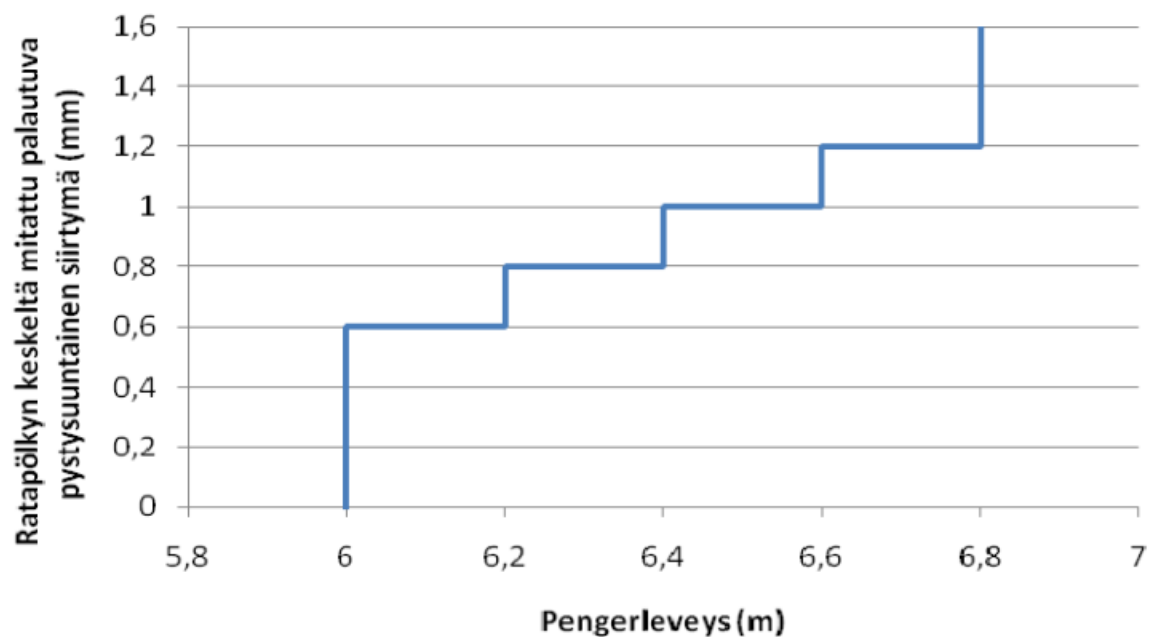


Kuva 64. Kohteessa km 238+280 kiihtyvyyssantureilla mitatut pystysiirtymät teliparin metripainon suhteen.

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.

6.2.4 Kokonaisjäykkyyden tarkastelu

Ratapölkyn keskeltä mitattuja palautuvien pystysiirtymien arvoja käytetään Suomessa radan pengerlevyyden mitoittamiseen. Radan pengerlevyydellä tarkoitetaan normaalisti välikerroksen yläpinnan leveyttä. Radan jäykkyyden lisäksi pengerlevyyden valinta riippuu monista muista tekijöistä, kuten alusrakenneluokka ja geometria. Vaadittu penkereen vähimmäisleveys määräytyy kuvan 65 sekä taulukon 7 mukaisesti.



Kuva 65. Ratapenkereen vähimmäisleveys alusrakenneluokissa 2 ja 3. (Liikennevirasto 2014, s. 19)

Taulukossa 7 esitettyä kaarrelevitystä käytetään vain kaarteissa, joiden kaarresäde on pienempi kuin 3 000 m. Kaarrelevitys tehdään kokonaisuudessaan ulkokaarten puolelle.

Taulukko 7. 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 65 ja taulukon 7 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 pengervelevyden 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 pengervelevyden.

Mitattujen pystysiirtymien avulla voidaan laskea myös tutkimuskohteiden radan kokonaisjäykkyyden kaavalla:

$$K_{rp} = \frac{(G_{akselit} + G_{ratapölkky})}{Y_{rp}}, \quad (2)$$

missä

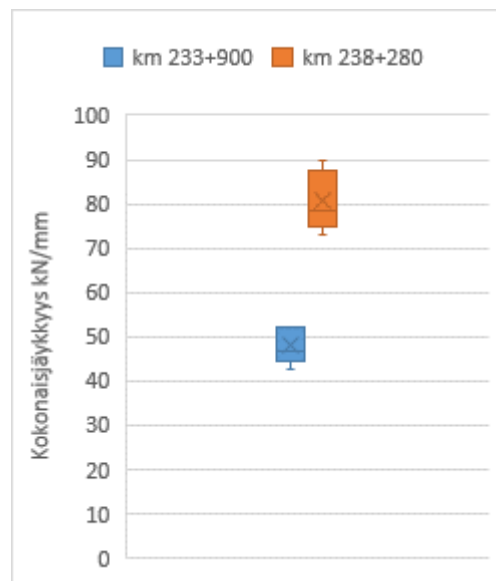
K_{rp} = yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys

$G_{akselit}$ = mitattu staattinen akselipaino

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

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 59 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 66. Tutkimuskohteiden laskettu kokonaisjäykkyys.

Kuvan 66 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 otaksunan mukaan tutkimuskohteen km 233+900 kokonaisjäykkyys olisi pienempi kuin hyvin toimivan radan minimiarvo.

Peltokankaan tutkimuksessa esitetty kaava 2 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 2 saadaan siis huomattavasti eri kokoluokan tuloksia, riippuen millaisella kalustolla kuormitus tehdään.

6.3 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.

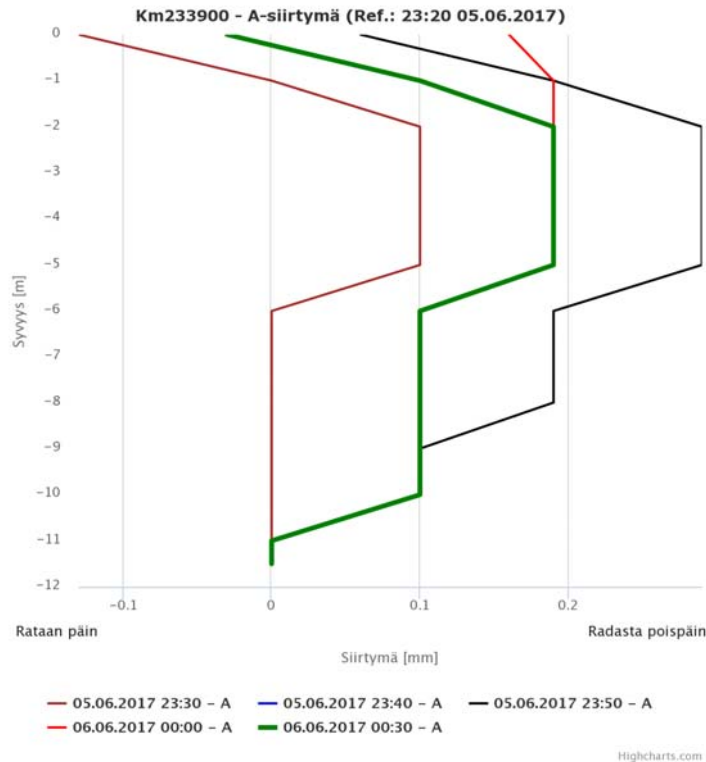
Tutkimuksessa keskityttiin testijunien pysäytyksien aiheuttamiin sivuttaissiirtymiin rataa vasten kohtisuorassa suunnassa. Suurempi akselipaino voisi teoriassa jättää pohjamaahan pysyviä muodonmuutoksia, jos maa ei pysyisi kimmoisalla alueella. Sivuttaissiirtymän muutosta eri syvyyksillä, maan pinnasta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

6.3.1 Kohde km 233+900

Pohjamaan sivuttaissiirtymän referenssitasoksi määrättiin ajanhetki muutamia minuutteja ennen ensimmäistä pysäytystä. Referenssitaso kuvaa pohjamaan tasapainotilaa ilman kuormitusta. Suomalaisten vaunujen pysäytysten aikana tehtyjen mittaus-ten 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 pois päin radasta ja negatiivinen muutos tarkoittaa maan siirtymistä rataa kohti.

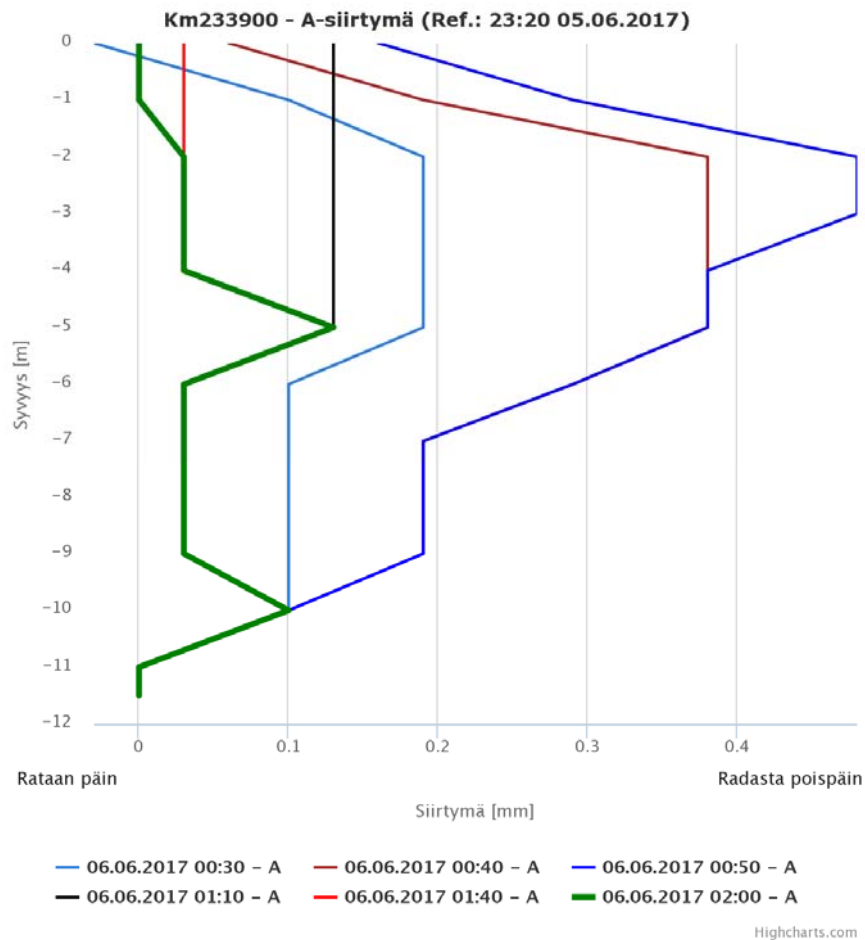
Vaunut, joiden akselipaino oli 170 kN, pysäytettiin kohteeseen km 233+900 klo 23.23 ja ne poistuivat kohteesta klo 23.59. Kuvassa 67 on esitetty sivuttaissiirtymän muutos pysäytyksen aikana ja palautuminen sen jälkeen. Palautumiseen ei jäänyt kuin puoli tuntia aikaa, koska seuraava 225 kN akselipainoisten 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 67 voi tulkitta, 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 67. Sivuttaissiirtymän muutos 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 233+900.

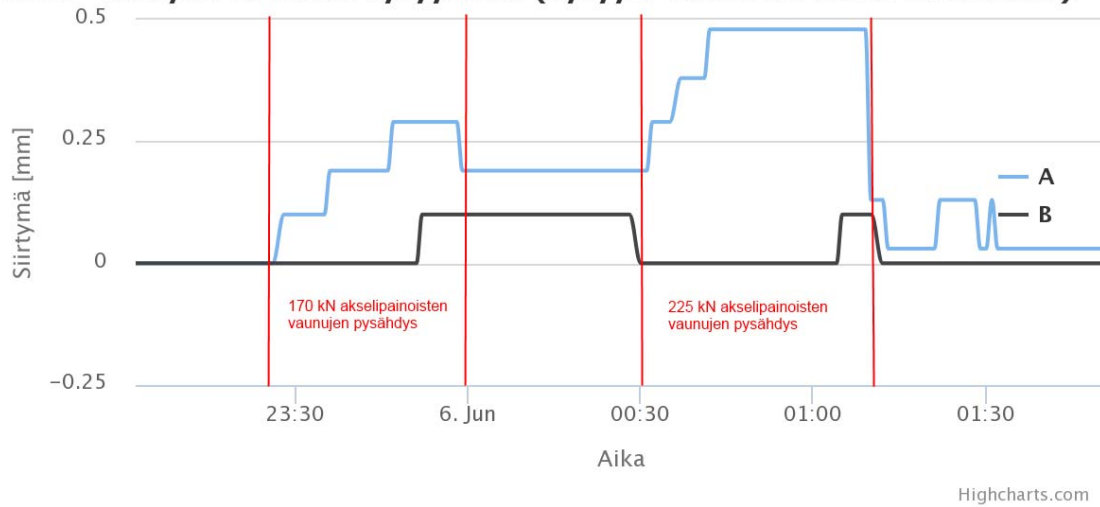
Pysäytettäessä suomalaiset 225 kN akselipainoiset vaunut kohteeseen, pohjamaan sivuttaissiirtymä ei ollut vielä palautunut kokonaan referenssitasolle. Referenssitasona tässäkin pysäytyksessä pidettiin ajanhetkeä 5.6.2017 klo 23.20. Pysäytyksen aikainen sivuttaissiirtymän muutos on esitetty kuvassa 68. 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 mittausvyvydellä yleisesti hitaammin. Syvyyksissä -5 m ja -10 m palautuminen oli hitaampaa kuin muualla.



Kuva 68. Sivuttaissiirtymän muutos 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 233+900.

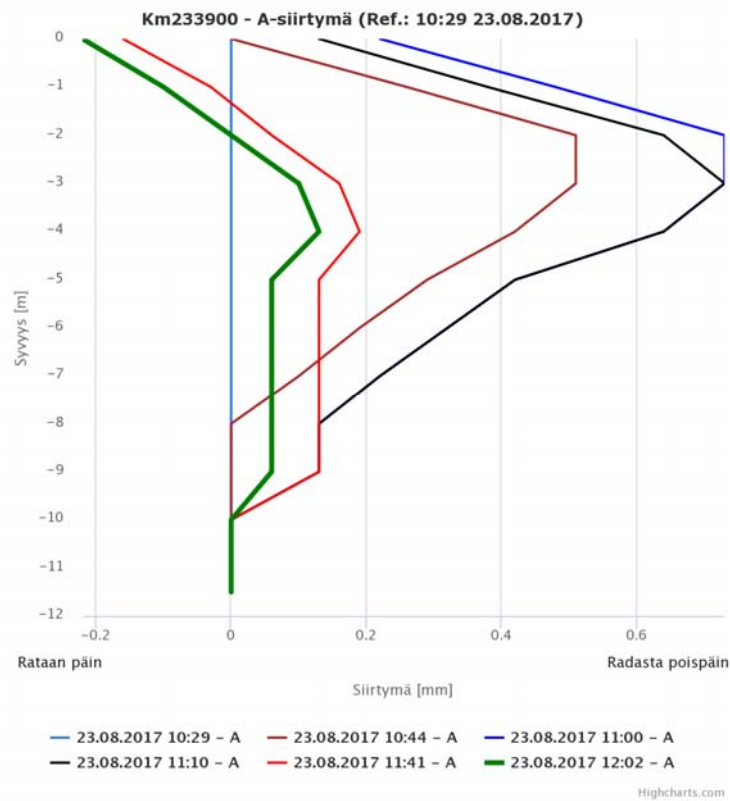
Edellä mainittujen tulosten pohjalta huomataan, että suurin sivuttaissiirtymä tapahtui kohteella km 233+900 syvyydellä -3 metriä maanpinnasta. Siirtymä oli 0,48 mm poispäin radasta. Kuvassa 69 on esitetty syvyydellä -3 m tapahtuneet sivuttaissiirtymät ajan suhteen, kun referenssitasona pidetään ajankohtaa 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)



Kuva 69. Sivuttaissiirtymien muutos ajan suhteen suomalaisten vaunujen pysäytyksien aikana syvyydellä -3 m kohteessa km 233+900. A=rataa kohti-suora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

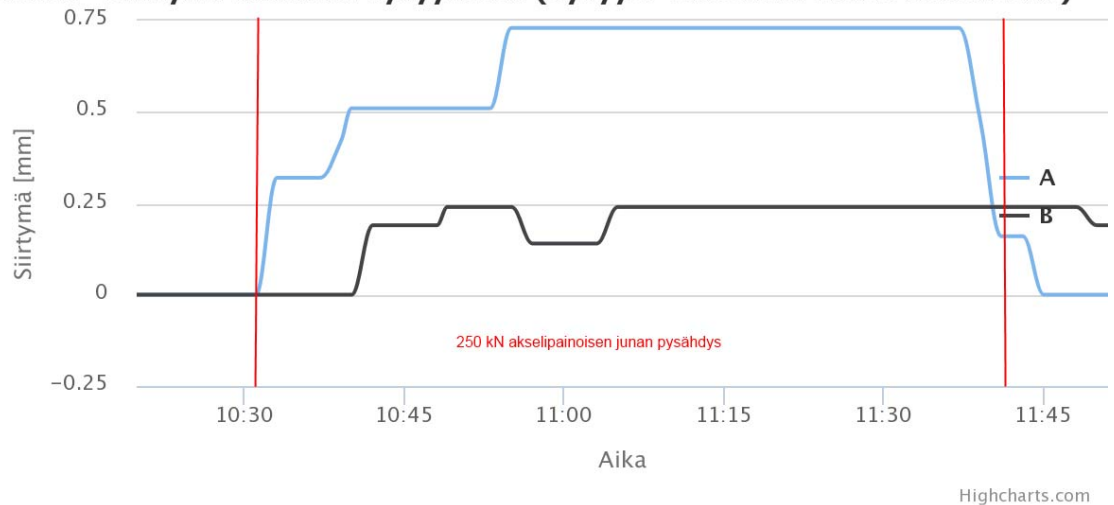
Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan pysäytyksen referenssitaso määrättiin ajanhetkelle 23.8.2017 klo 10.29. Pysäytys kohteessa km 233+900 tapahtui 23.8.2017 klo 10.35-11.42. Kuvassa 70 on esitetty sivuttaissiirtymän muutos eri syvyyksillä maan pinnasta kovaan pohjaan saakka. Tuloksista nähdään, 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 70. Sivuttaissiirtymän muutos 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 233+900.

Kuvassa 71 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)

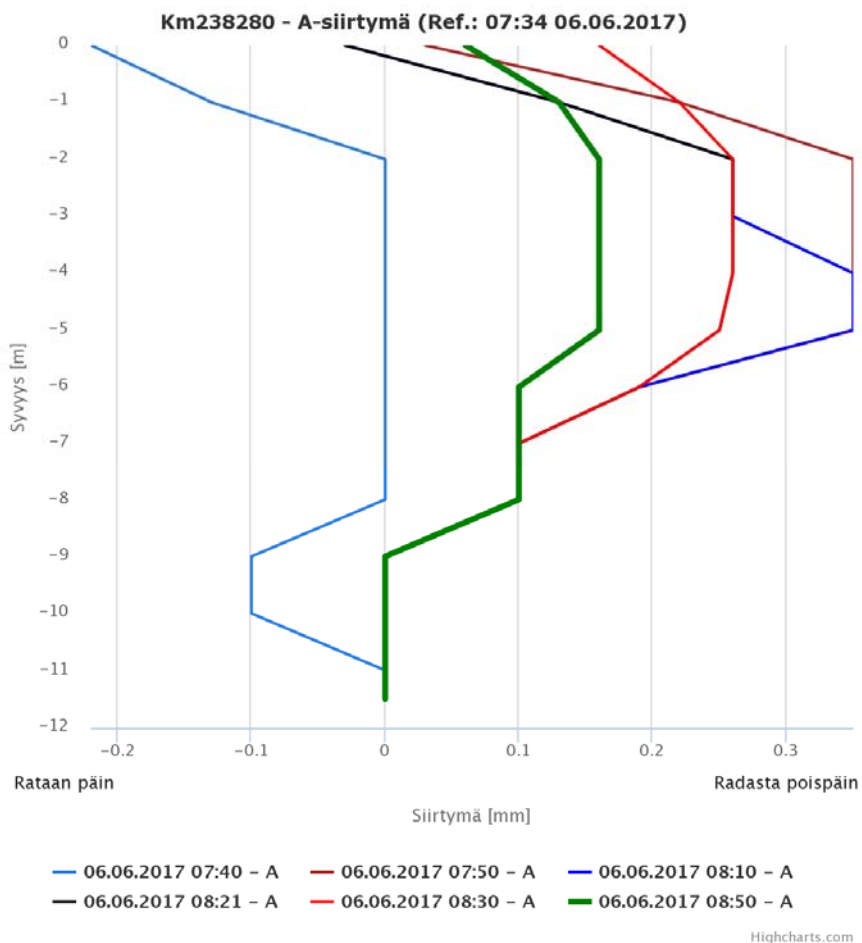


Kuva 71. Sivuttaissiirtymien kehitys ajan suhteen venäläisten vaunujen pysäytyksen aikana syvyydellä -3 m kohteessa km 233+900. A=rataa kohtisuora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

Kohteen km 233+900 sivuttaissiirtymien suuruus on kuorman suhteen melko lineaarisista. 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 kasvaaneet kuormituksen alaisena, vaan vakiintuvat tietylle tasolle, minkä seurauksena voi olettaa, että pidempi kuormitus ei olisi aiheuttanut suurempia sivuttaissiirtymiä, eikä pysyviä muodonmuutoksia.

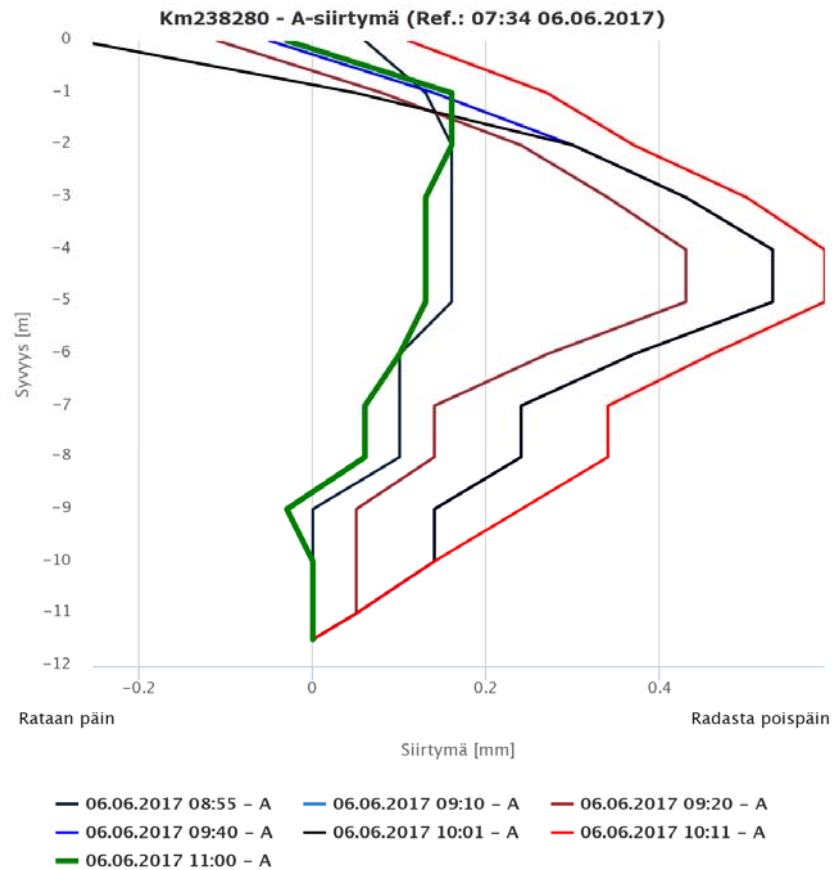
6.3.2 Kohde km 238+280

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 72. 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.



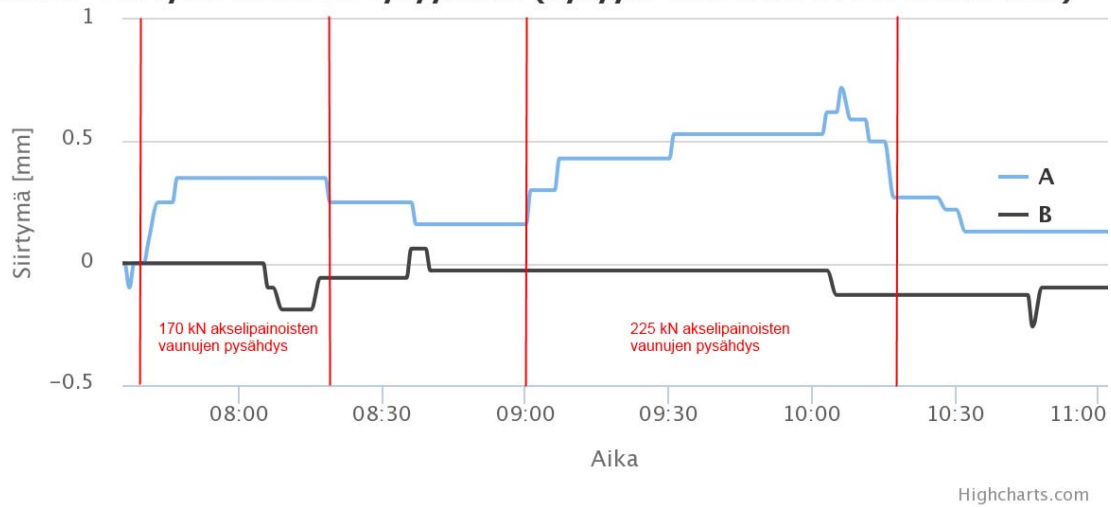
Kuva 72. Sivuttaissiirtymän muutos 170 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 238+280.

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 73.



Kuva 73. Sivuttaissiirtymän muutos 225 kN akselipainoisten vaunujen pysäytyksen aikana ja jälkeen kohteessa km 238+280.

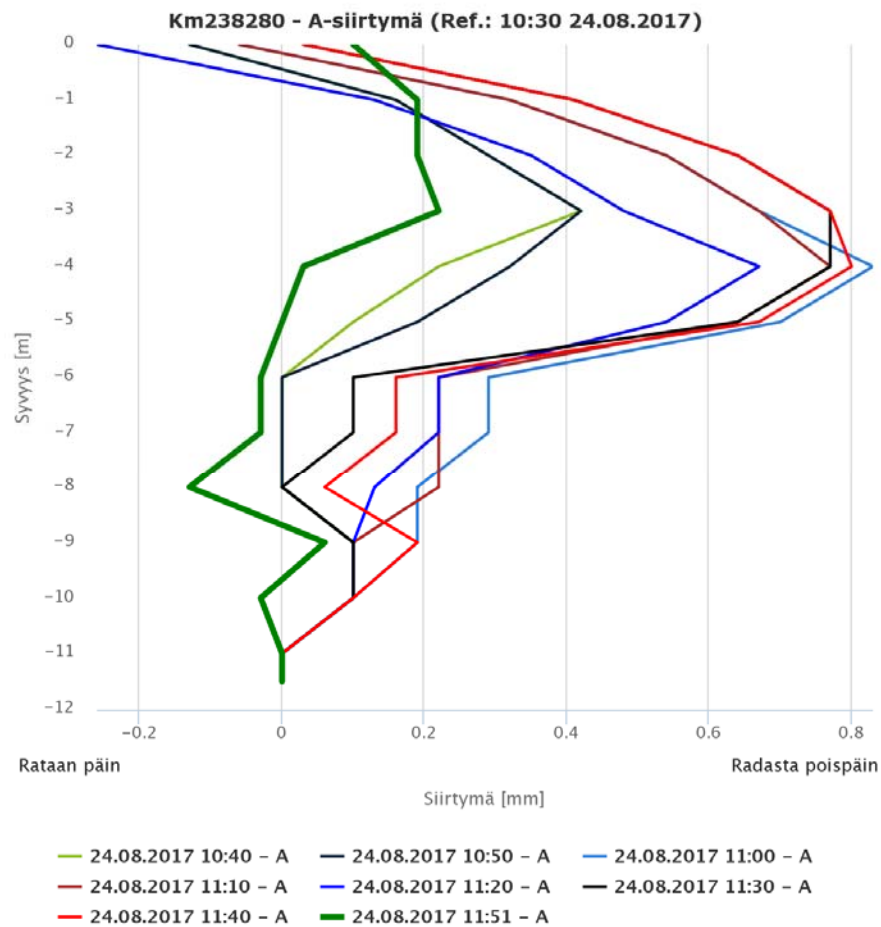
Suurin sivuttaissiirtymä tapahtui kohteessa km 238+280 molemmissa suomalaisten vaunujen pysäytyksissä syvyydellä -5 m maan pinnasta. Sivuttaissiirtymä ajan suhteen tällä korkeustasolla on esitetty kuvassa 74.

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


Kuva 74. Sivuttaissiirtymien muutos ajan suhteen suomalaisten vaunujen pysäytyksien aikana syvyydellä -5 m kohteessa km 238+280. A=rataa kohti-suora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

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

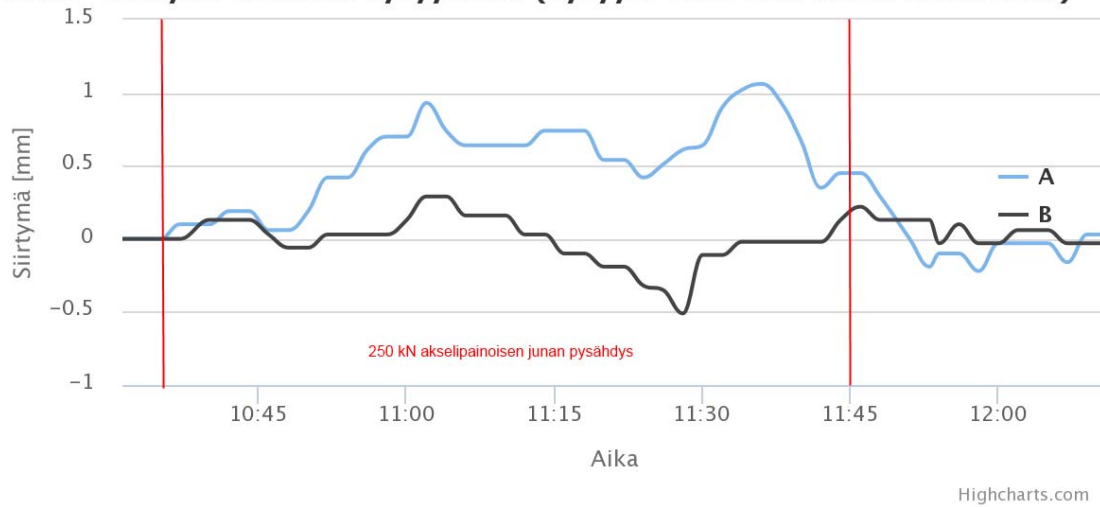
Venäläisistä vaunuista koostuvan junan pysäytyksessä inklinometrituloksien referenssitasoksi asetettiin 24.8.2017 klo 10.30 tehdyn mittauksen tulos. 250 kN akselipainoisten vaunujen pysäytys tapahtui klo 10.38-11.45. Sivuttaissiirtymä kasvoi nopeasti arvoon noin 0,8 mm radasta poispäin verrattuna referenssitasoon. Pysäytyksen aikana sivuttaissiirtymä 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 syvyysprofiili on esitetty kuvassa 75.



Kuva 75. 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 esitettyjä CPTU-koekairauksen tuloksia huomataan samalla syvyydellä selvä maakerrosraja. Maakerrokset on esitelty myös stabiliteettilaskentojen yhteydessä taulukossa 9. Suurimmat sivuttaissiirtymät tapahtuvat taulukon 9 mukaisessa maakerroksessa 3. Kerroksessa 4 sivuttaissiirtymät ovat huomattavasti pienemmät. Kerroksen 4 savi on tilavuuspainoltaan suurempi kuin kerroksen 3 savi, mikä viittaisi silttisempään saveen.

Ajan suhteen piirretyssä kuvassa 76 mitattu sivuttaissiirtymä syvyydellä -5 metriä maan pinnasta kasvoi pysäytyksen alkaessa, pieneni pysäytyksen puolivälissä, kasvoi taas pysäytyksen loppua kohti ja lähti laskemaan ennen pysäytyksen lopettamista. Pysäytyksen jälkeen sivuttaissiirtymä vakiintui nopeasti referenssitasolle.

1238280 - Siirtymä valitussa syvyydessä (Syvyys: -5.00 Ref.: 10:30 24.08.2017)


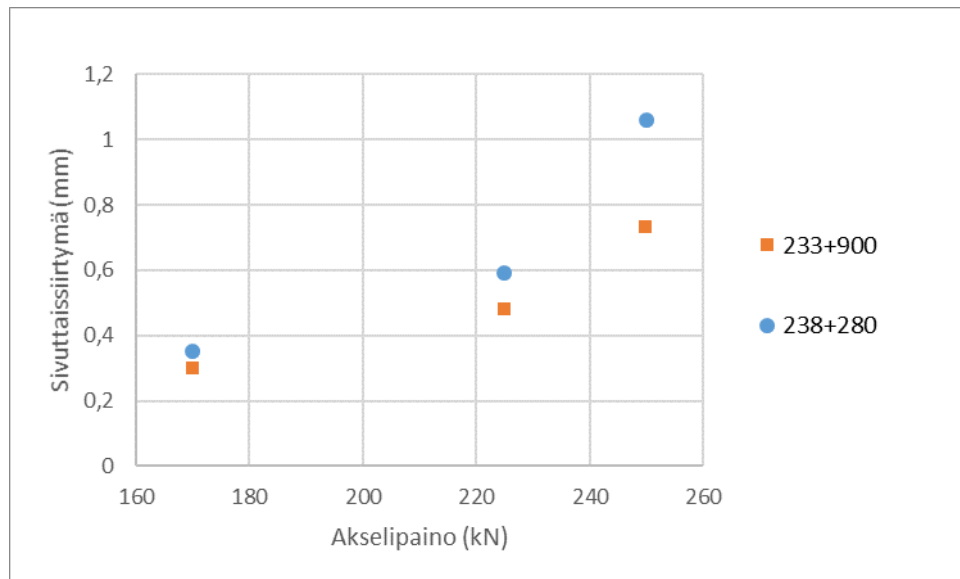
Kuva 76. Sivuttaissiirtymien muutos ajan suhteen venäläisten vaunujen pysäytyksen aikana syvyydellä -5 m kohteessa km 238+280. A=rataa kohtisuora siirtymä, B=radan suuntainen siirtymä.

Mitattu sivuttaissiirtymä syvyydellä -5 maanpinnasta ei pysynyt yhtä vakaana koko kuormituksen ajan kuin muissa pysäytyksissä. Inklinometrien mittaustarkkuus on näin pienillä siirtymätasoilla äärirajoillaan, mikä voi vaikuttaa mittaustulosten vaihteluun pysäytyksen aikana. Kuvien 75 ja 76 mukaan sivuttaissiirtymän suurin arvo 250 kN akselipainon kuormittaessa rataa on noin 0,8 mm.

6.3.3 Sivuttaissiirtymien mittauksen yhteenveto

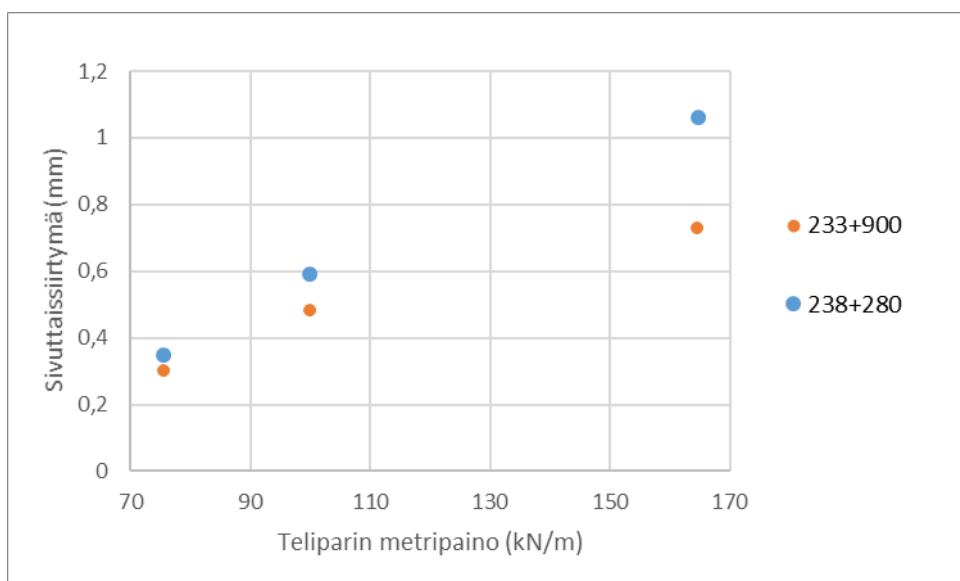
Yhteenvetona voidaan todeta, että sivuttaissiirtymät eivät kasvaneet jatkuvasti pysäytysten aikana. Sivuttaissiirtymä saavutti lähes jokaisella pysäytyksellä mittauksen maksiminsa melko pian, jäi sille tasolle kuormituksen ajaksi ja palautui käytännössä kokonaan pois kuorman poistuttua. Pohjamaa käyttäytyi 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 77. Kohdekohtaiset suurimmat sivuttaissiirtymät tapahtuivat kohteessa km 233+900 syvyydellä -3 metriä maanpinnasta ja kohteessa km 238+280 syvyydellä -5 metriä maanpinnasta.



Kuva 77. 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 78)



Kuva 78. Mitatut suurimmat sivuttaissiirtymät pysäytyksien aikana suhteessa teliparin metripainoon.

Kuten kuvasta 78 huomataan, kohteen km 238+280 sivuttaissiirtymät ovat hieman suuremmat kuin kohteen km 233+900 sivuttaissiirtymät. Kuitenkin pystysiirtymissä asia on juuri toisinpäin. Sivuttaissiirtymien syntymisen teorian mukaan pohjamaan sivuttaissiirtymät 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 rataa 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.

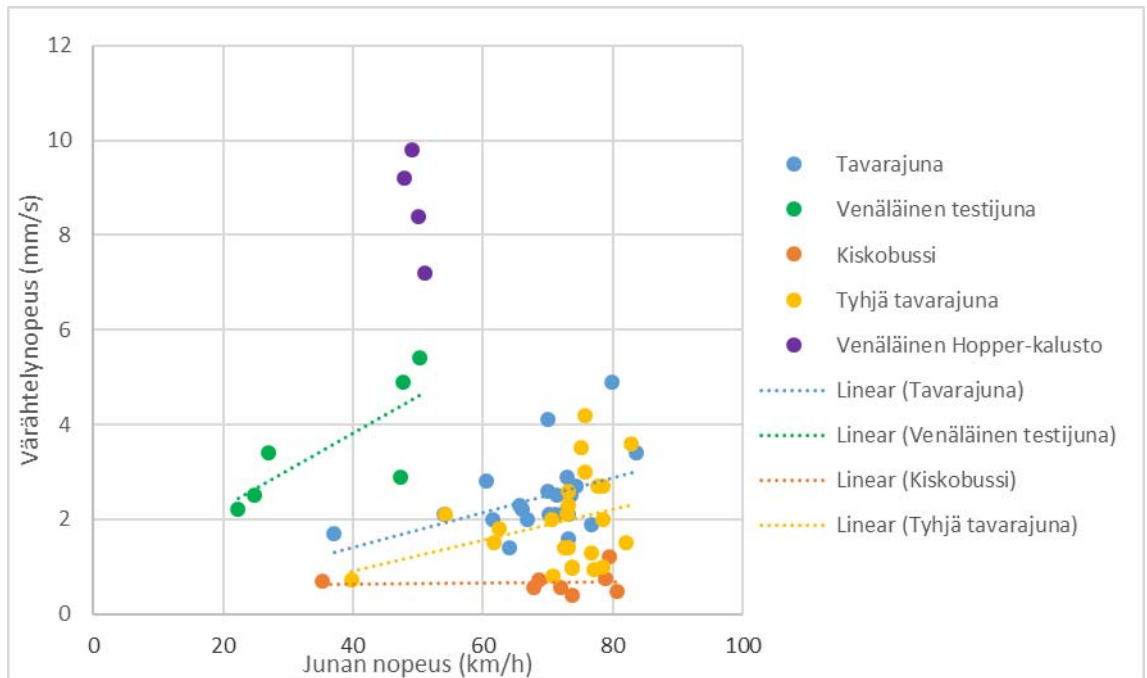
6.4 Junaliikenteen aiheuttama tärinä

Junaliikenteen aiheuttamaa tärinää rataympäristössä tutkittiin geofoneilla, jotka mittaavat 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 siirtymäanturien 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.

6.4.1 Kohde km 233+900

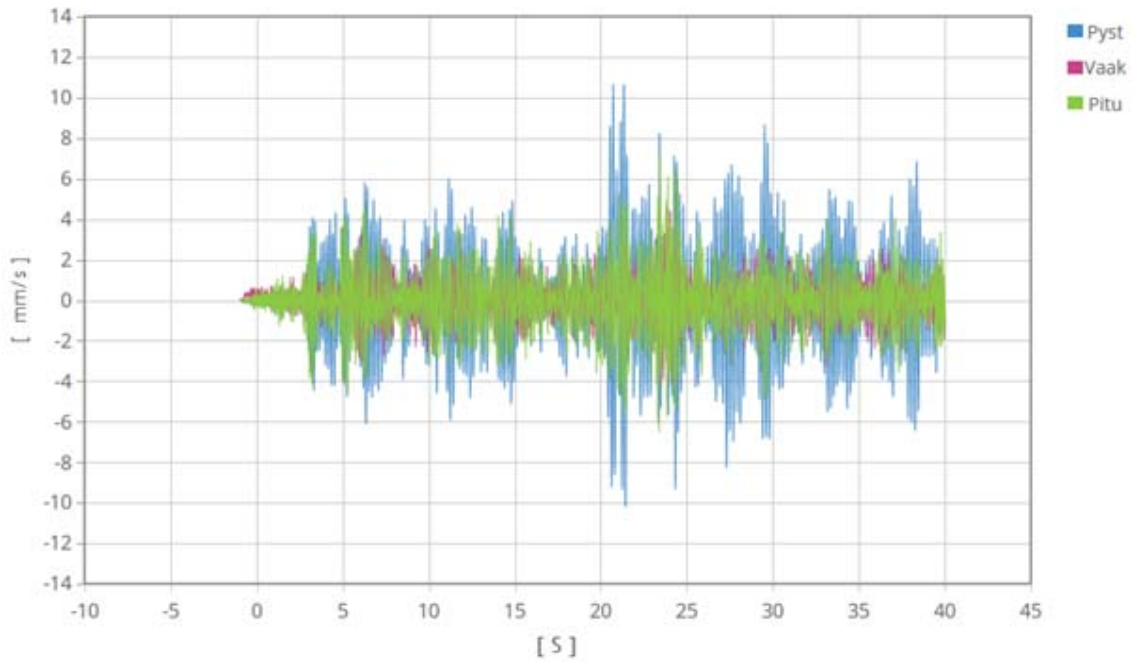
Kuvassa 79 on esitetty erilaisten junakalustojen aiheuttaman tärinän värähtelyn nopeutta verrattuna junakalustojen ajonopeuteen 20 metrin päästä radasta kohteessa km 233+900. Kuvasta nähdään, että raskaat junat aiheuttavat suurempia värähtelyn nopeuksia, kuin kevyemmät junat. Kuvasta huomataan myös ajonopeuden vaikuttavan värähtelyn nopeuteen. Suuremmat ajonopeudet aiheuttavat suurempia värähtelyn nopeuksia.



Kuva 79. Mitattu värähtely 20 metrin päässä radasta junan nopeuden funktiona kohdeksella km 233+900.

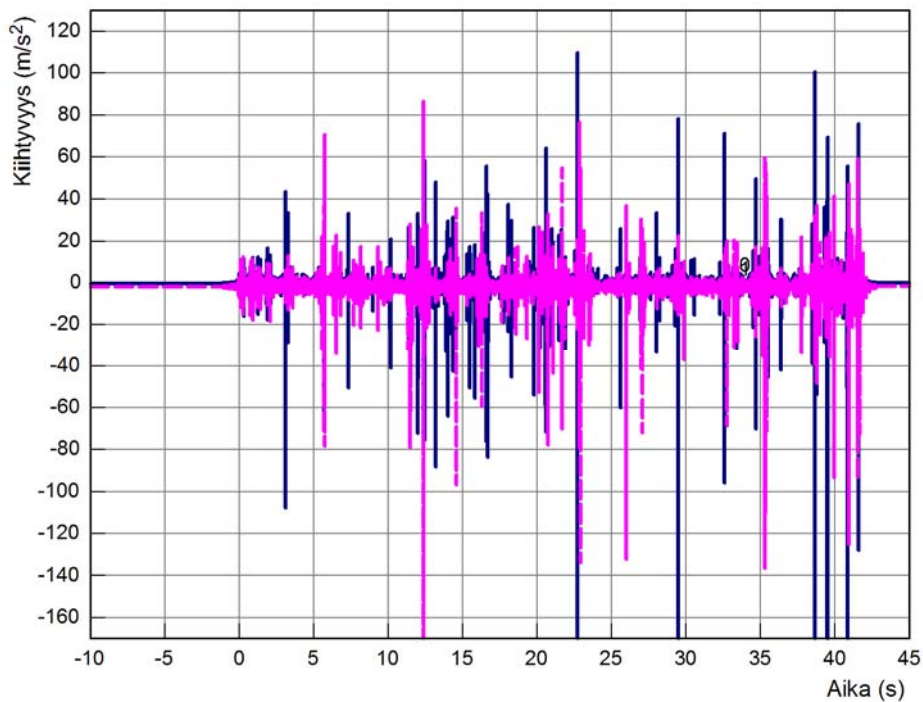
Venäläinen rataosalla liikennöivä 225 kN akselipainoinen Hopper-kalusto aiheutti suurimpia värähtelyn nopeuksia. Suurten värähtelyn nopeuksien ajateltiin ensin johtuvan tietystä nopeudesta, jossa värähtelytaajuus olisi sama maaperän resonanssitaajuuksien kanssa. Sutela kutsuu tätä ilmiötä diplomityössään 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 värähtelyn nopeuksiin etsittiin kaluston kunnosta.

Kaluston kuntoa tutkittiin värähtelysignaalin ja pölkkyistä mitattujen kiihtyvyydestuloksien 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 80.



Kuva 80. Hopper-kaluston aiheuttama värähtelysignaali 20 metrin päässä radasta kohteessa km 233+900.

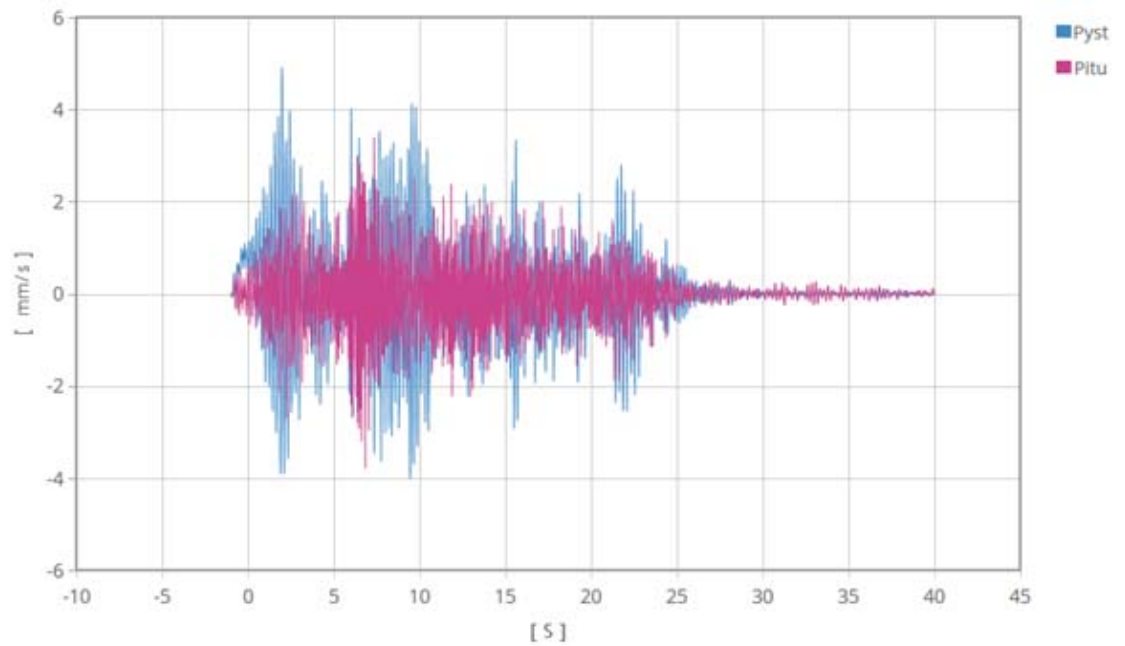
Värähtelysignaalissa on selviä yksittäisiä lyhyitä piikkejä, jotka vaikuttavat lovipyörrien aiheuttamalta värähtelyltä. Värähtelysignaalia verrattiin kahden kiihtyvyyssanturin pölkystä mittaamiin kiihtyvyyssanturien samasta ajasta. Koska analysoinnissa on käytetty vain kahta anturia, ei lovipyörä välttämättä osu anturien kohdalle, jolloin suurin kiihtyvyys voi jäädä mittaamatta. Kiihtyvyyssignaali on esitetty kuvassa 81.



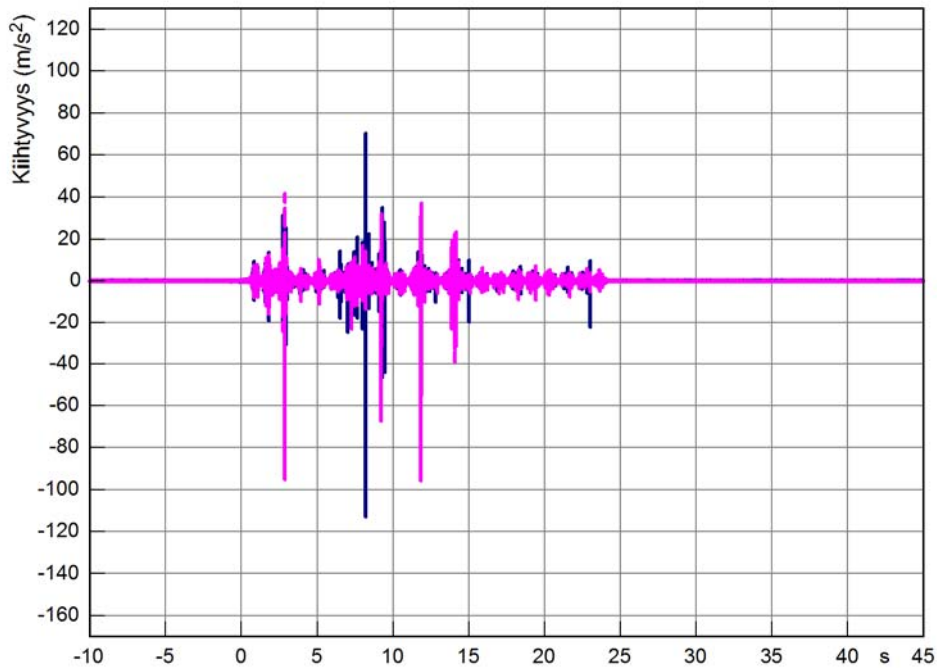
Kuva 81. Hopper-kaluston pölkkyyn aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 233+900.

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.

Samantyyppinen 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 82. Kiihtyvyyssignaali on esitetty kuvassa 83.



Kuva 82. Akselipainoltaan 250 kN vaunuista koostuvan testijunan aiheuttama värähtelysignaali kohteessa km 233+900.



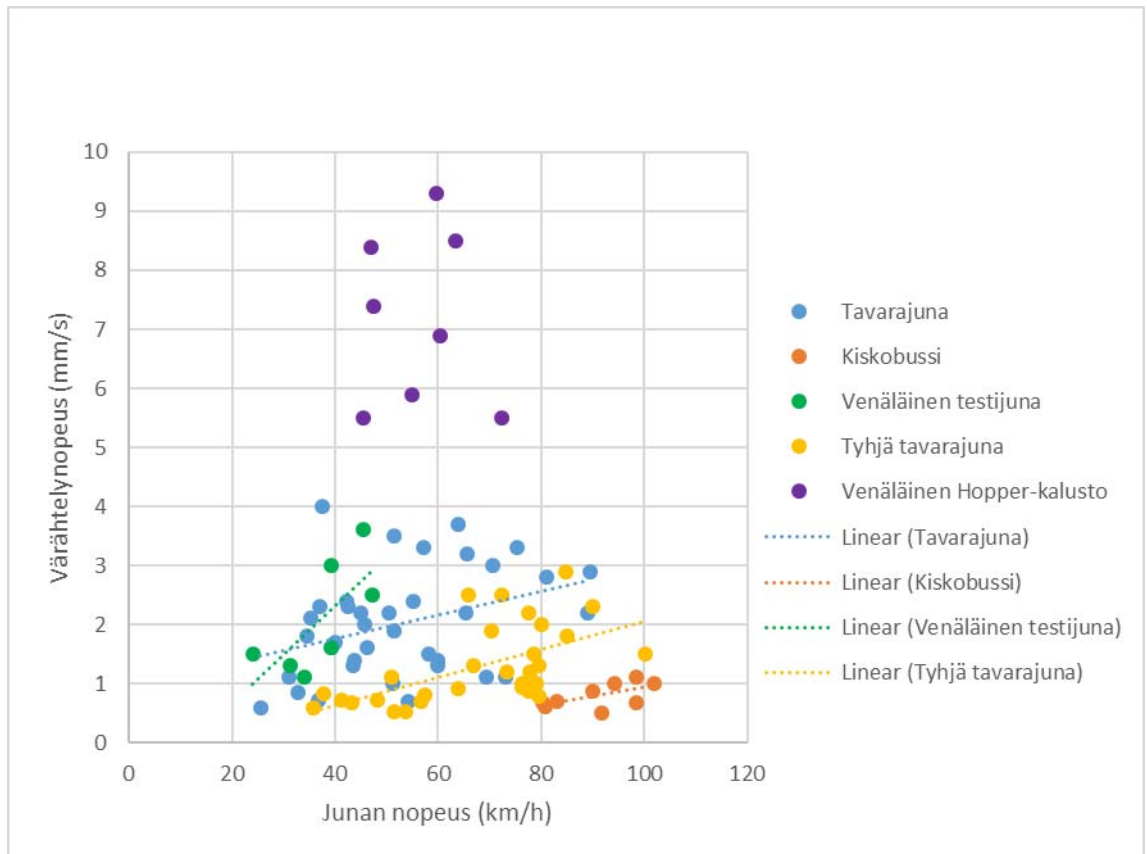
Kuva 83. Akselipainoltaan 250 kN vaunuista koostuvan testijunan pölkkyyn aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 233+900.

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 tulosten 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.

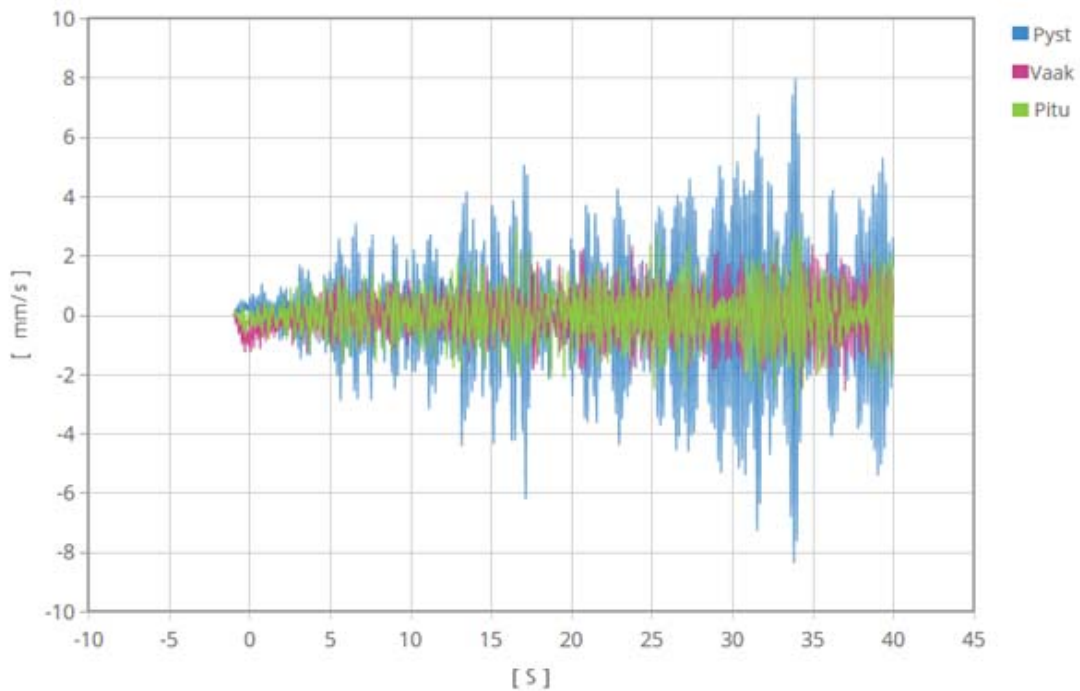
6.4.2 Kohde km 238+280

Kohteessa km 238+280 mitatut värähtelynopeudet suhteessa junien nopeuksiin on esitetty kuvassa 84. Kuvasta nähdään, että junan kuorma ja nopeus vaikuttavat tärinän suuruuteen. Täyteen lastatut tavarajunat aiheuttavat suurempaa tärinää kuin tyhjä tavarajunat, jotka taas aiheuttavat voimakkaamman tärinän kuin kiskobussit. Tärinän suuruus kalustokohtaisesti kasvaa nopeuden kasvaessa. Tässä tutkimuksessa ei havaita selvää kriittistä nopeutta, jolla tärinän voimakkuus olisi suurempi kuin muilla nopeuksilla.

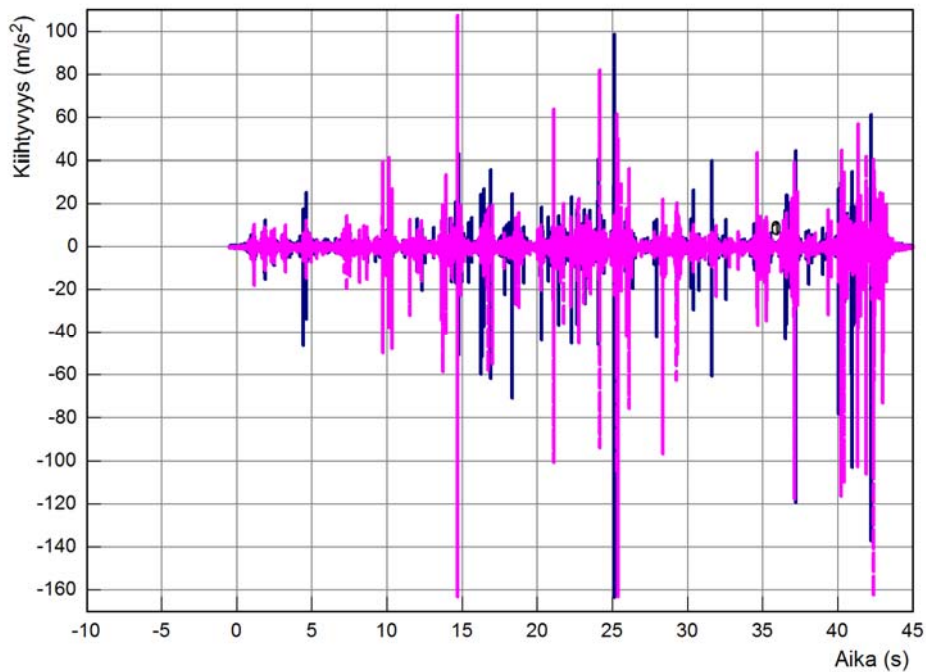


Kuva 84. Tärinä 20 metrin päässä radasta junan nopeuden funktiona kohteessa km 238+280.

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 kiihtyvyydetulokset on esitetty kuvissa 85 ja 86.



Kuva 85. Hopper-kaluston aiheuttama värähtelysignaali kohteessa km 238+280.

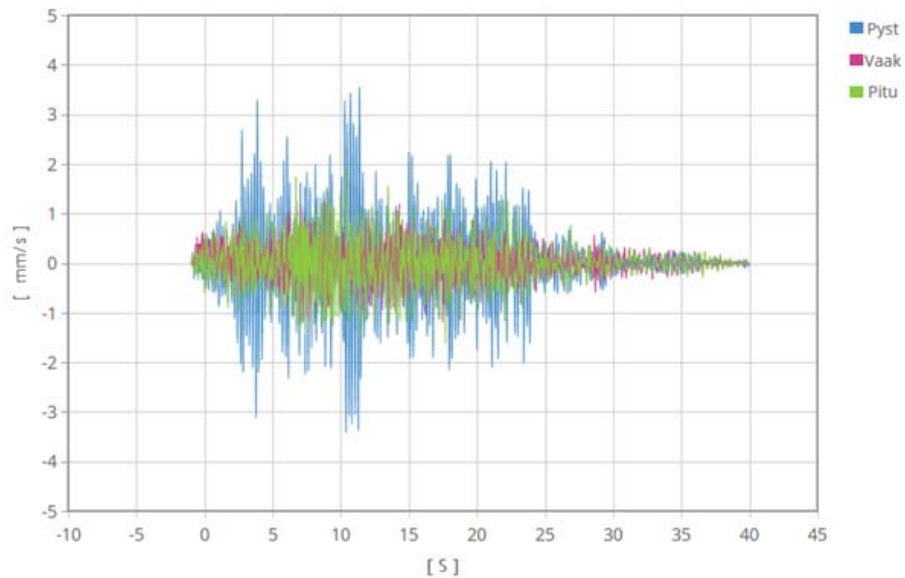


Kuva 86. Hopper-kaluston pölkkyyn aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 238+280.

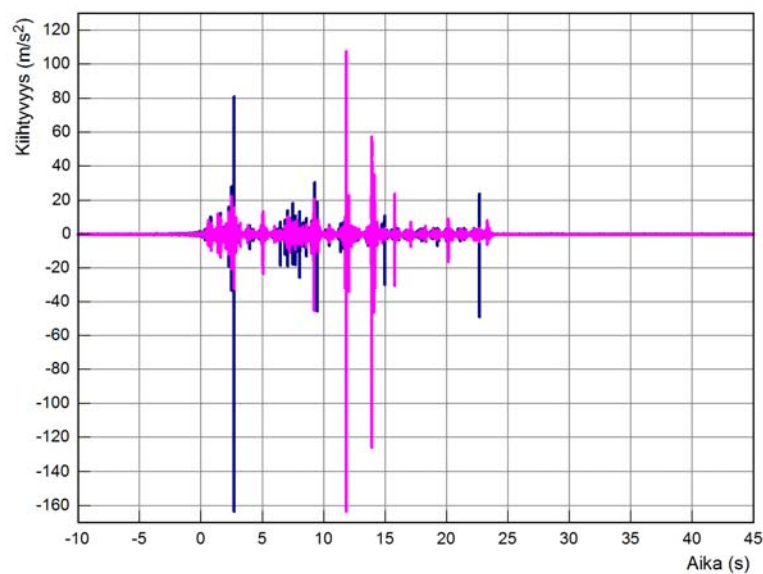
Hopper-kaluston kunto on kiihtyvyyssanturien mittaamien tulosten mukaan heikko. Junassa olevat lovipyörät huomataan kiihtyvyyssuorituksen suurista piikeistä. Lovipyörät aiheuttavat suurta värähtelyä rataympäristöön. Värähtelysignaalin suurimpaan arvoon ei kuitenkaan löydy yksiselitteistä selitystä kaluston kunnosta, koska sillä ajanhetkellä kaluston vaunuissa ei ole kiihtyvyyssmittausten tulosten mukaan lovipyöriä. Värähtelysignaalin suuret arvot voivat johtua junan pituuden ja lovipyörien yhteisvai-

kutuksesta. Värähtelyaallot liikkuvat rataympäristössä samalla taajuudella ja voimistuvat junan ohiajon edetessä.

Venäläisistä vaunuista koostuvan testijunan aiheuttamat värähtely- ja kiihtyvyyssignaalit on esitetty kuvissa 87 ja 88. Kyseessä on sama ajo kuin toisen kohteen edellisessä kappaleessa tarkasteltu ajo.



Kuva 87. Akselipainoltaan 250 kN testijunan aiheuttama värähtelysignaali kohteessa km 238+280.

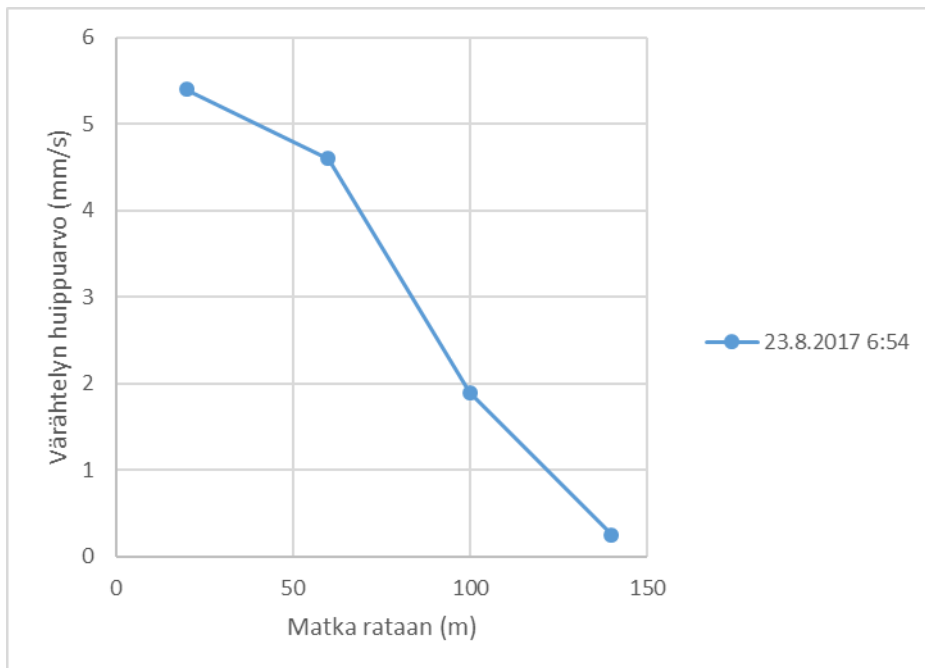


Kuva 88. Akselipainoltaan 250 kN testijunan aiheuttama kiihtyvyyssignaali kohteessa km 238+280.

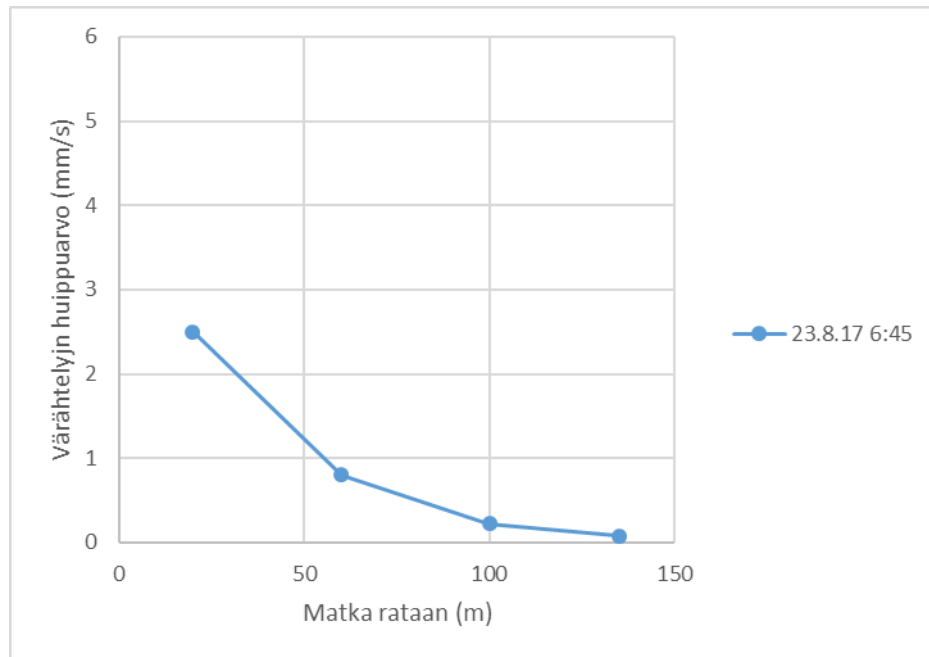
Junan ensimmäisissä vaunuissa havaitaan lovipyörä, joka voi aiheuttaa värähtelysignaalien alussa olevan suuren pystyvärähtelyn. Värähtelysignaalien suurimman arvon aiheuttaa tarkastelun mukaan lovipyörä, joka kiihtyvyyssatassa on mitattu noin 11 sekunnin kohdalla.

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 89 ja 90.



Kuva 89. Tärinän vaimeneminen kohteessa km 233+900.



Kuva 90. Tärinän vaimeneminen kohteessa km 238+280.

6.5 Pohjatutkimukset ja radan stabiliteettilaskennat

Stabiliteettilaskennassa 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. Liitteessä 4 on esitetty CPTU-kairauksien tulokset molemmista kohteista.

Suljettu leikkauslujuus tulkittiin CPTU-kairauskokeiden sekä siipikairauksien perusteella. Tulkinnassa oletettiin, että penkereen alapuolinen maa on normaalikonsolidoitunut, ja että sen jännitystila ei ole muuttunut penkereen rakentamisesta. Kärkivastuksen kärkikerroin määritettiin 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:

$$s_u = \frac{q_T \sigma_D}{N_k} \cdot \left(\frac{OCR}{1.3} \right)^{-0.5} \quad (3)$$

missä

- | | |
|------------|--|
| s_u | = suljettu leikkauslujuus |
| q_T | = korjattu kärkivastus |
| σ_D | = tehokas pystyjännitys maassa |
| N_k | = kärkikerroin |
| OCR | = ylikonsolidoitumisaste. (Larsson & Åhnberg 2003) |

Ylikonsolidoitumisasteen selvittämiseen käytettiin ödometrikoeetta. Pengerkuormituksen jakautumista pohjamaahan arvioitiin 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 puoliavuus. (RIL 1985, s.314-320) Teorialla selvitetään maan tehokas pystyjännitys eri kerroksissa.

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. 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 laboratoriokokeiden 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:

$$q_{stab} = \frac{p \cdot l}{l_{pölkky}} \quad (4)$$

missä

q_{stab}	= 2D-stabiliteetilaskennassa käytettävä kuorma [kPa]
p	= vaunun metripaino [kN/m]
$l_{pölkky}$	= pölkyn pituus [m]

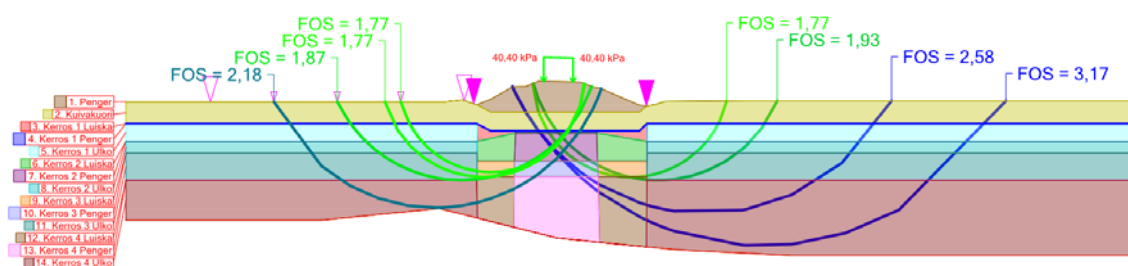
Ratapenkereen ja ympäristön pinnanmuodot on mitattu tarkkuus-GPS -laitteella. Pinnan muodot vastaavat todellisia muotoja muutaman senttimetrin tarkkuudella.

6.5.1 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 8 on esitetty stabiliteetilaskennassa käytetyt eri kerroksien suljetun leikkauslujuuden ja tilavuuspainojen arvot ja kuvassa 91 stabiliteetilaskennan tulokset. Liitteessä 2 on esitetty tämän tutkimuksen aikana tehdyt pohjatutkimukset.

Taulukko 8. Kohteen km 233+900 2D-stabiliateettilaskennassa 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	r_u	r_{uq}	$r_{u'}$
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			

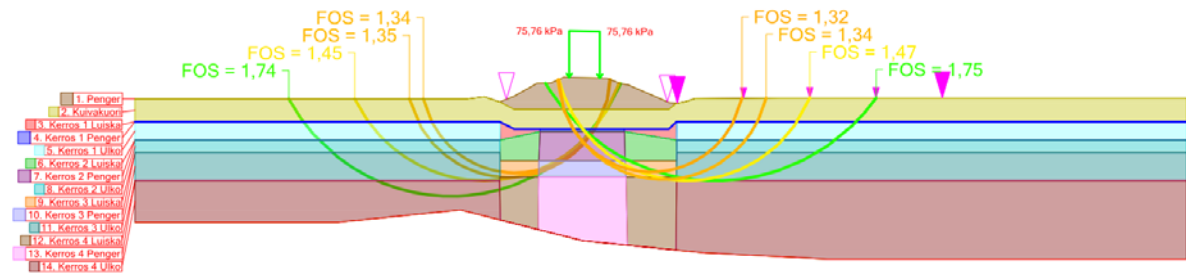
Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, r_u off, r_{uq} off, $r_{u'}$ off

Kuva 91. EN-rataluokkien E4 ja E5 kuormilla tehty stabiliateettilaskenta kohteesta km 233+900. Kuva pieneneviin ratakilometreihin päin.

Stabiliateettilaskennat tuottivat huomattavasti suurempia varmuuksia, kuin aikaisemmin kohteesta tehdyt stabiliateettilaskennat. 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.

Stabiliteettilaskenta tehtiin myös teliparin metripainolla. (Kuva 92.) 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-stabiliteettilaskennassa 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 92. Teliparin metripainon aiheuttamalla pintakuormalla tehty stabiliteettilaskenta 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 stabiliteetin parantamisen toimenpiteitä.

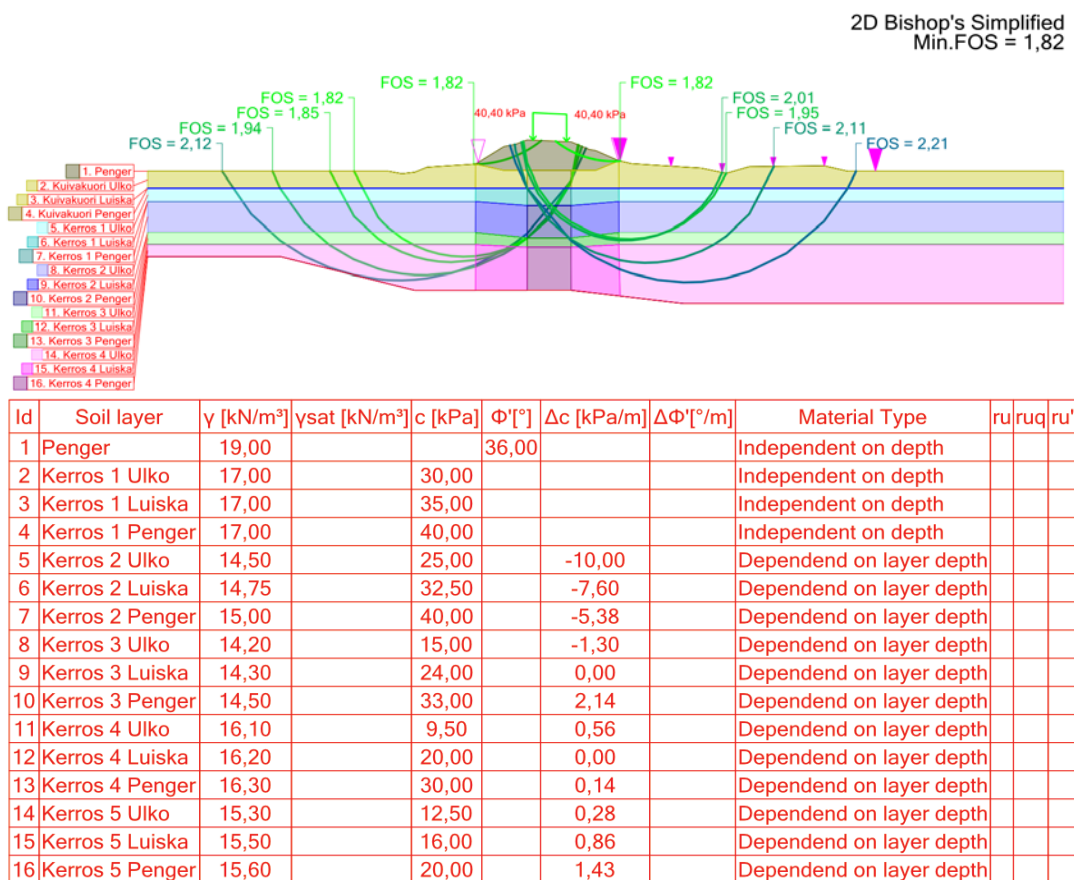
6.5.2 Kohde km 238+280

Kohteen km 238+280 stabiliteettilaskennassa käytettävät arvot määräytyivät CPTU-kairauskokeiden ja redusoitujen siipikairauksien perusteella. Taulukossa 9 on esitetty kohteessa km 238+280 käytetyt suljetun leikkauslujuuden ja tilavuuspainojen arvot eri kerroksissa. Kohteen itä puolella noin 20 metrin päässä radasta kulkevan pienen hiekkatien rakennekerroksia tai sen aiheuttamaa saven lujittumista ei huomioitu ratapenkereen ja pohjamaan stabiliteettilaskennassa.

Taulukko 9. 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 93.

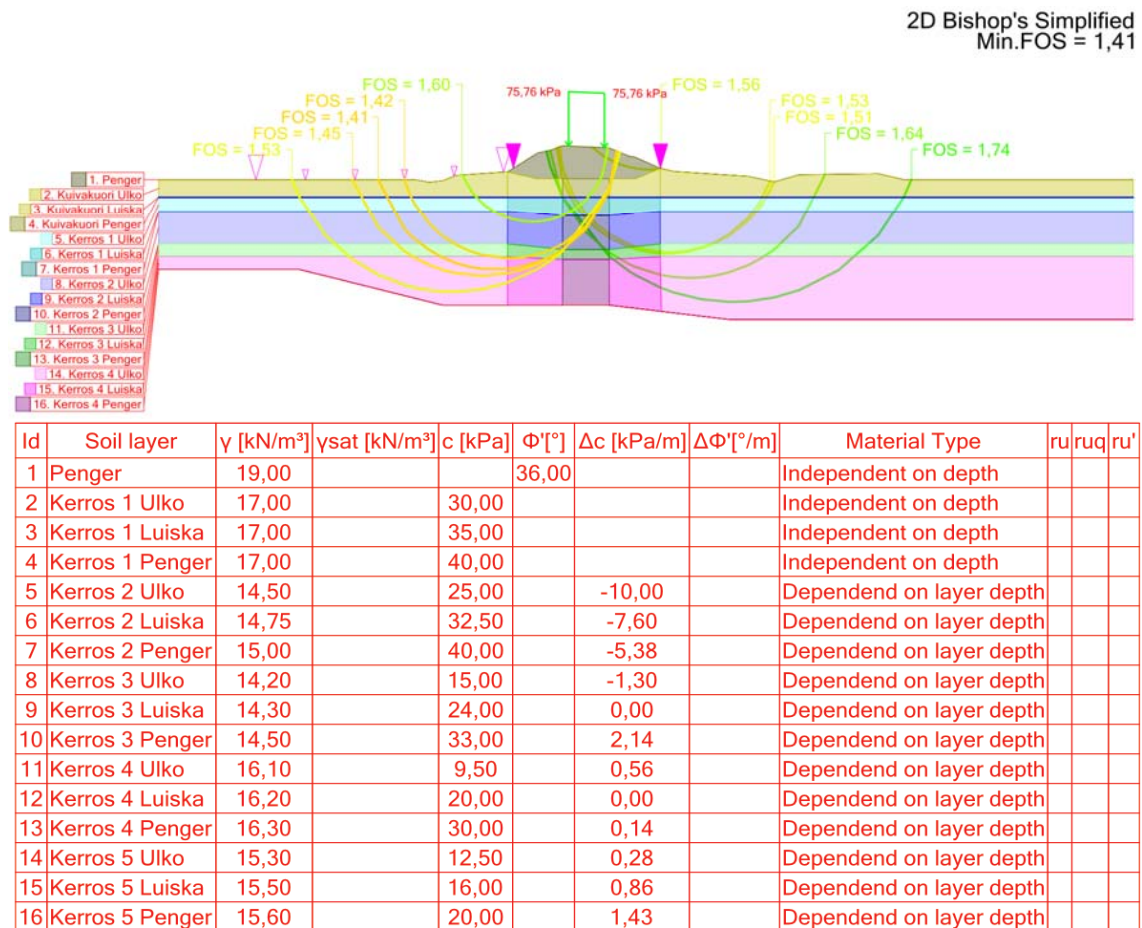


Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, ru off, ruq off, ru' off

Kuva 93. EN-rataluokkien E4 ja E5 kuormilla tehty stabiliteettilaskenta kohteessa km 238+280. Kuva pieneneviin ratakilometreihin päin.

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

Stabiliteettilaskenta tehtiin myös tässä kohteessa venäläisen testijunan 250 kN akselipainoisten vaunujen teliparin metripainosta lasketulla pintakuormalla. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 94.



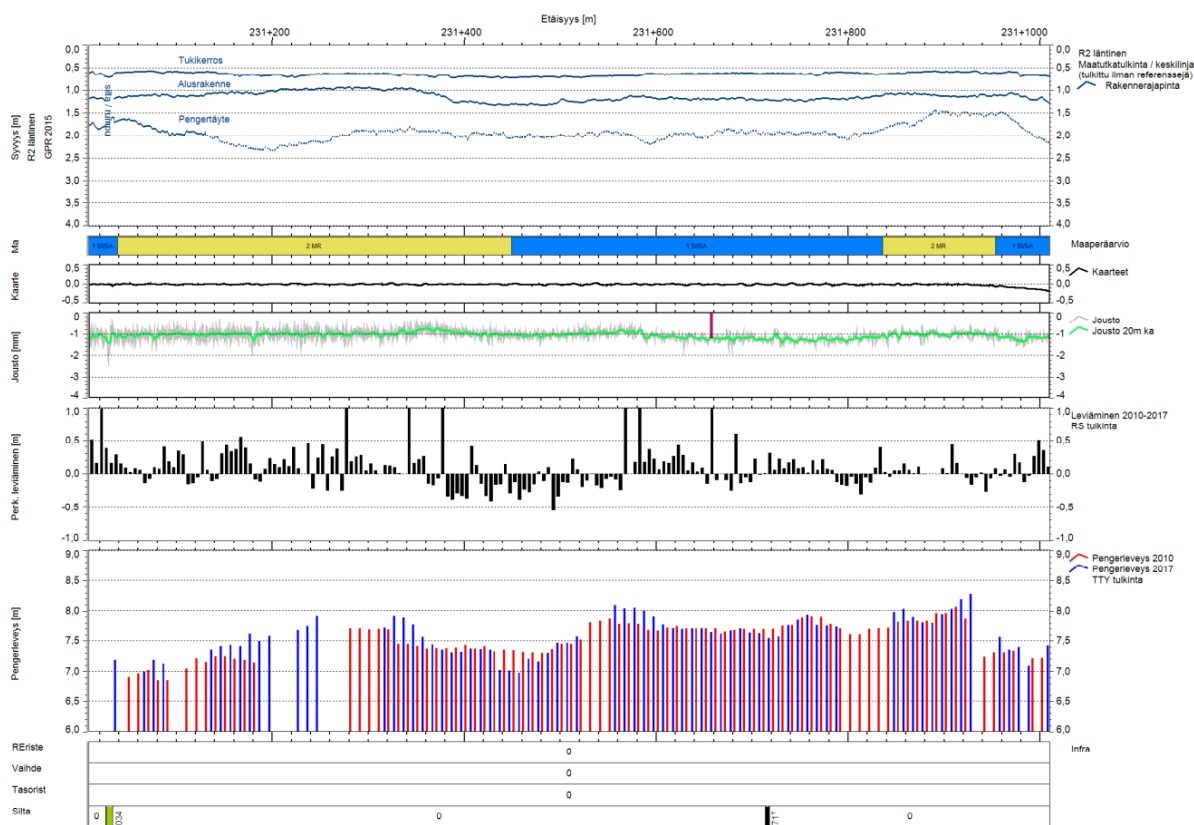
Pore Pressure Settings: GW on, PW off, PPC off, ru off, ruq off, ru' off

Kuva 94. 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.

6.6 Radan pysyvä muodonmuutos

Pengerleveyden arvioinnissa käytettiin luvussa 4.2.2. esitettyä tapaa, jonka avulla pengerleveys määritettiin luiskaan sovitettujen suorien perusteella 0,55 metrin syvyydeltä kv:stä. Laskennan mukaan pengerleveys olisi kasvanut keskimäärin 0,2 metriä seitsemän vuoden tarkastelujakson aikana. Keskimääräinen tulos on järkevässä suuruusluokassa, vaikkakin hieman suurehkolta vaikuttava. Kun tarkastellaan laskentatuloksia lähemmin, syntyy paikoitellen epäily laskentamenetelmän toimivuudesta. Joissakin kohdin rataa pengerleveys on pysynyt käytännössä samana ja vain harvoissa kohdin penger on kaventunut, mikä vaikuttaa uskottavalta. Sen sijaan yli puolen metrin levenemiset eivät voi johtua pelkästä heikosta kuormituskestävyydestä. Esimerkki pengerleveyden laskentatuloksista on esitetty kuvassa 95. Kuvassa mustilla pylväillä on esitetty Roadscanners Oy:n tekemän tulkinnan perusteella laskettu pengerleveyden muutos ja punaisilla ja sinisillä pylväillä TTY:n määrittämä pienimmän poikkileikkauksen perusteella laskettu pengerleveys vuosina 2010 ja 2017. Jälkimmäinen tulkinta ei onnistu kaikkiin poikkileikkauksiin, mutta kuvassa on esitetty ratakilometri, jossa tulkinta on onnistunut varsin useista poikkileikkauksista.



Kuva 95. Esimerkki pengerleveyden laskentatuloksista luiskakaltevuuden avulla määritettynä ja pengerleveyden muutoksesta subjektiivisen pengerleveystulkinnan avulla määritettynä.

Esimerkiksi km 231+640 – km 231+800 pengerleveys on muuttunut varsin vähän ja tulos on muutenkin luotettava, sillä pensainko ei haitannut tulkintaa. Kyseisessä kohdassa penger on noin 2 metriä korkea ja palautuva painuma on kohtalaisen suuri 1,2 mm. Penger on kuitenkin valmiiksi yli 7,5 metriä leveä, mikä todennäköisesti hidastaa leväimistä.

Esimerkiksi km 231+160 penger vaikuttaisi leventyneen molempien tulkintojen mukaan vähintään 200–300 mm. Olosuhteet ovat ainakin pohjamaan laadun osalta erilaiset kuin edellisessä esimerkissä, sillä kyseisen kohdan pohjamaa on maaperäkartan mukaan moreenia. Jousto on vähän pienempi ja penger kapeampi. Leviäminen voi kuitenkin olla seurausta virheellisestä tulkinnasta vesakoitumisen takia, sillä vuoden 2010 pistepilvessä on selvästi kasvillisuudesta aiheutuvaa häiriötä.

Mielenkiintoinen esimerkki on myös km 230+440 esiintyvä penkereen kaventuminen. Fysikaalista selitystä penkereen kapenemiselle ei ole kovin helppo keksiä. Eroosio tai muu rakennustoiminta tai kunnossapito saattaisi joissakin tapauksissa toimia selityksenä. TTY:n käyttämä pengerleveyden laskentamenetelmä reagoi korkeusviivassa tapahtuviin muutoksiin, kuten sepelin lisäykseen tai tukikerroksen tiivistymiseen. Tukikerroksen lisäys voisi siis selittää osin penkereen kapenemisen, mutta Roadscannersin käyttämässä menetelmässä laserkeilaimen korkeusasemalla ei ole vaikutusta tulkintaan. Tukikerroksen paksuuden muuttuminen seitsemän vuoden aikana on kuitenkin mahdollista ja siksi maatutkan perusteella määritettiin tukikerroksen paksuus osalta mittausväliä kaikilla kolmella mittauskerralla 2010, 2015 ja 2017. Eri ajankohtien maatutkatulkinnat ovat varsin yhteneviä eikä suuria eroja yleisesti ottaen esiintynyt. Tulkinnat on tehty ilman referenssikairauksia, joten absoluuttista tukikerroksen paksuutta ei täsmällisesti tunneta. Hieman yllättävää oli se, että tukikerros olisi vuoden 2017 tulkinnan mukaan paksuuntunut kauttaaltaan noin 20 mm. Tämä johtuu todennäköisesti tukikerroksen hienonemisen ja/tai mittausajanhetkellä vallinneen runsaamman vesipitoisuuden aiheuttamasta maatutkasignaalin kulkuajan kasvusta. Muutokset tukikerroksen paksuudessa saattaisivat olla enimmillään suuruusluokassa noin 20 - 30 mm tiivistymistä tai vastaavasti sepelin lisäystä. Tällainen muutos vaikuttaisi pengerleveyden tulkinnassa hieman luiskakaltevuudesta riippuen jopa 100 mm.

Laserkeilauksesta voidaan todeta, että menetelmä on mobiilisovelluksenakin melko tarkka ja tehokas mittausmenetelmä. Esimerkiksi kuivatussyvyyden määrittäminen on yksinkertaista, helppoa ja nopeaa. Pengerleveyden määrittäminen on kuitenkin paljon hankalampaa, sillä pistepilvessä on runsaasti kasvillisuuden aiheuttamaa häiriötä. Erilaiset suodatustekniikat auttavat kasvillisuuden poistamisessa, mutta tiheän kasvillisuuden kohdissa maanpintaa edustavia pisteitä ei ole välttämättä lainkaan. Pengerleveyden laskeminen on hankalaa myös siksi, että jätkänpolun ja luiskan taitepiste on usein epämääräinen. Silmämääräinen taitepisteen tulkinta ei onnistu kovin hyvin edes maastossa eikä siten myöskään pistepilvestä tulkitsemalla. Yksi varteenotettava keino on määrittää pengerleveys valitulta syvyydeltä korkeusviivasta lukien. Koneellinen laskenta edellyttää pensaikon suodatusmenetelmien käyttämistä. Suodatuksen jälkeen voidaan päästä parhaimmillaan muutaman senttimetrin tarkkuuteen pengerleveyden tulkinnassa käytössä olleilla pistepilvillä. Käytetty laserkeilain edustaa vanhemman sukupolven tekniikkaa ja tarkempiakin laitteita on nykyisin olemassa. Tässä tarkastelussa oli kuitenkin perusteltua käyttää saman laitteen mittaamia pistepilviä, jotta vertailtavuus säilyy.

Tarkastellulla rataosalla pengerleveyden muutokset ovat todennäköisesti olleet varsin pieniä, vaikka vaihtelua mittauksissa esiintyykin. Käytännössä muutokset ovat olleet niin pieniä, että laserkeilauksen perusteella levenemistä ei pysty määrittämään riittävän tarkasti. Mitatut pengerleveydet olivat myös kauttaaltaan suuria, alkaen 6,8 metriä. Monin paikoin havaittiin yli 7 metrin pengerleveyksiä ja varsin usein myös yli 7,5 metrin pengerleveyksiä. Suurten pengerleveyksien perusteella pen-

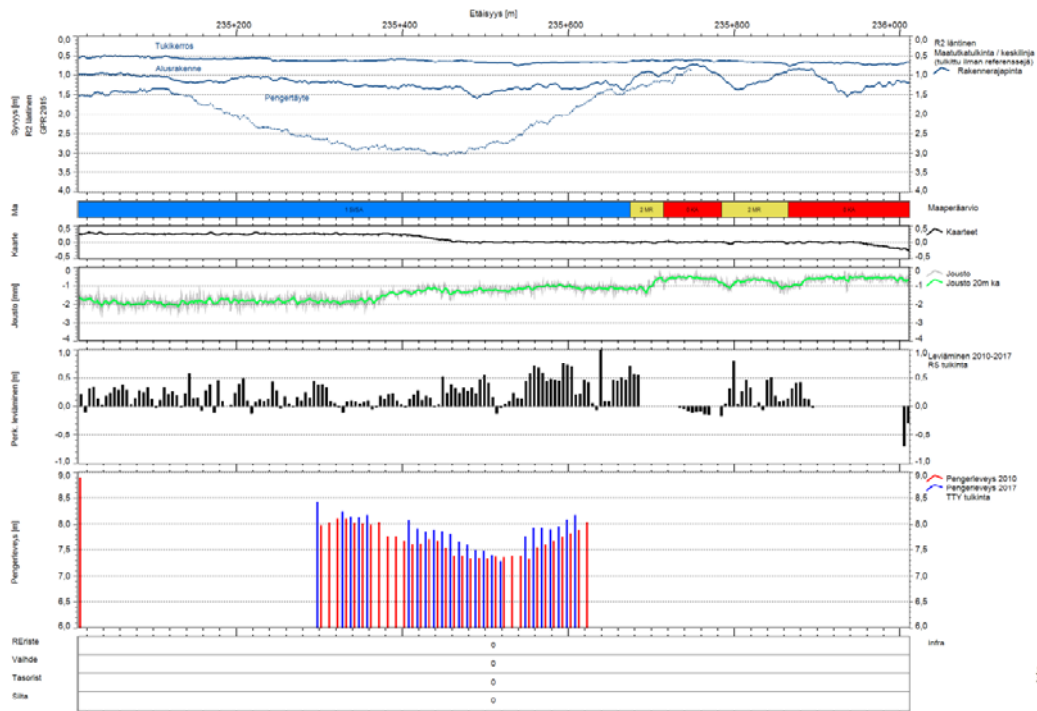
kereen leviäminen ei myöskään pitäisi olla merkittävä ongelma akselipainon noston yhteydessä.

6.7 Radan jousto

Ratapenkereen kuormituskestävyyttä voidaan arvioida osaltaan myös radan jouston avulla. Jatkuva joustomittaus tehtiin Kouvola-Kotka-rataosalla sepelivaunuun kiinnitetyllä mittauslaitteella. Kaksiraiteisilla osuuksilla mitattiin vain läntinen raide. Mittaustuloksissa havaittiin vastaavia ilmiöitä kuin muillakin rataosilla:

- Jousto vaihtelee absoluuttisesti melko vähän ratalinjalla, jos päällysrakenne pysyy samana.
- Jousto on yleensä pienimmillään kallioleikkauksissa ja tukikerroksellisten siltojen kohdalla, joissa maarakenteet ovat ohuet.
- Alusrakenteen ja pengertäytteen paksuneminen lisää joustoa tiettyyn rajaan asti. Noin 2 metrin jälkeen edelleen paksuneva pengertäyte alkaa pienentää joustoa.
- Pehmeiköt eivät välttämättä kasvata joustoa, koska pehmeiköillä on tyypillisesti varsin paksu pengertäyte. Jousto on suurimmillaan pehmeiköillä, joilla ratarakenne on ohut, alle 2 metriä.
- Siltapäädyyssä ja vaihteissa esiintyy roikkuvia pölkkyjä.
- Monet radan laitteet, kuten baliisit, aiheuttavat joustovaihtelua eli roikkuvia pölkkyjä.

Radan joustolla ei vaikuttaisi olevan suoraa yhteyttä muodostuneeseen pengerleveyteen, sillä pengerleveys vaihtelee toisinaan merkittävästi, vaikka jousto pysyy lähes vakiona. Pienen jouston kohdissa, kuten kallioleikkauksissa, pengerleveyttä ei useinkaan pystytä luotettavasti määrittämään eikä vertailu ole siksi edes mahdollista. Miellenkiintoisia kohtia ovat keskimääräistä suuremman jouston kohdat, jotka omaavat potentiaalisen riskin heikkoon kuormituskestävyyteen. Tällainen kohta on esimerkiksi km 235+100, jossa rata on maaperäkartan mukaan pehmeiköllä, pengerkorkeus on suhteellisen pieni 1,5 metriä ja jousto on suuri yli 2 mm. Kohde sijaitsee kaarteessa, joka voi virheellisesti lisätä jouston suuruutta, mutta ks. kohdassa on suhteellisestikin katsottuna suurentunut jousto myös kaarten matkalla (kuva 96). Kyseisessä kohdassa pengerleveys on kasvanut yhden tulkinnan mukaan noin 200 mm, mutta toinen tulkinta ei tuota järkevää tulosta. Pengerleveys on hyvinkin kahdeksan metriä tai enemmän ja luiskat ovat varsin epämääräisen muotoiset, mikä voi viitata voimakkaaseen leviämiseen aikaisemmassa vaiheessa.



Kuva 96. Esimerkki suuren jouston alueesta km 235+100

Toista ääripäätä edustaa poikkikeikkaus km 235+760, joka sijaitsee kallioleikkauksessa. Siellä jousto on vain 0,5 mm ja rakennekerrokset ovat alle metrin paksuiset. Yhden tulkinnan mukaan pengerleveys ei olisi juurikaan muuttunut kyseisessä kohdassa. Käytännössä pengerleveyttä ei voida kunnolla määrittää, koska ojat ovat ole mattomat ja pengertä on vain tukikerroksen leveydeltä näkyvillä. Kyseinen kallioleikkaus omaa potentiaalisen riskin kuormituskestävyysspuutteelle heikon kuivatuksen näkökulmasta. Hyvin pieni jousto myös saattaa lisätä liikennekuorman rasittavuutta.

Koko rataosan suurin jousto mitattiin puupölkkyvaihteissa km 204+420 – km 204+560 Myllykosken seisakkeen liikennepaikan eteläpäässä. Jousto oli kyseisessä kohdassa yllättävänkin suuri, keskimäärin noin 3,5 mm. Suuri jousto vaihteissa ei tarkoita suoraan kuormituskestävyysongelmaa, koska jousto kasvaa puisten ratapölkkyjen kokoonpuristuman takia. Jouston kasvu kyseisissä vaihteissa on kuitenkin tavanomaista suurempi. Toisaalta tällaiset havainnot lisäävät mittausmenetelmän uskottavuutta ainakin rakenteen yläosissa tapahtuvan joustovaihtelun havaitsemisen suhteen.

Kuormituskestävyyšnäkökulmasta ehkäpä rataosan heikoimmalta vaikuttava kohta jouston perusteella arvioituna sijaitsee turvepehmeiköllä km 218+200 – km 218+340. Kyseisissä kohdassa jousto on yli 1,5 mm ollen selvästi ympäröivää rataosuutta suurempi. Hieman suurentuneen jouston alue alkaa kyseisellä pehmeiköllä noin km 217+980. Suurimman jouston alueella rakennekerrospaksuudeksi on tulkittu maatumakan avulla noin 1,7 metriä.

Suurta joustoa havaittiin myös monilla liikennepaikoilla, joissa radan rakenteiden vaihtuminen saattaa selittää osan jouston kasvusta. Kuitenkin esimerkiksi Kymen liikennepaikalla havaittiin erittäin suuren jouston kohta pääraiteella km 233+200, jossa jousto oli jopa 2,5 mm betonipölkkyraiteella. Tasamaalla olevalla ratapihalla penkereen leviäminen ei ole mahdollista, mutta lisääntyntä kunnossapitotarvetta suurentunut jousto saattaa sielläkin aiheuttaa.

7 Yhteenveto ja päätelmät

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

Kohteet instrumentoitiin automaattisilla mittauslaitteistoilla. Molempiin tutkimuskohteisiin asennettiin kahdeksan huokosvedenpaineanturia eri syvyyksille ratapenkeereen 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. Huokosvedenpaineantureiden lisäksi kohteisiin asennettiin viisi siirtymäanturia viiteen peräkkäiseen pölkkyyn ja kahdeksan kiihtyvyydsenturia neljän pölkyn molempiin päihin mittaamaan pölkkyjen pystysiirtymiä sekä venymäliuskaanturit kiskoon mittaamaan junien kuormia. Kohteisiin asennettiin myös inklinometrit mittaamaan pohjamaassa kuormituksen vaikutuksesta tapahtuvaa vaakasiirtymää sekä radan että 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 stabiliteetin kannalta epäedullisin tilanne. Pysäytetty juna aiheuttaa pidempiaikaista kuormitusta radalle ja pohjamaalle, mikä voi vaikuttaa pysty- ja sivusiirtymien suuruuteen ja johtaa huokosvedenpaineen kasvuun. Venäläisistä vaunuista koostuvalla testijunalla tehtiin myös testiajoja eri nopeuksilla.

Kohteisiin tehtiin tutkimuksen aluksi kattavat pohjatutkimukset. Kohteissa tehtiin CPTU-kairauskokeita ja siipikairauksia sekä otettiin laboratorionäytteitä. Kairaustuloksia käytettiin instrumentoinnin suunnittelussa sekä stabiliteetilaskelmissa. 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 välisten 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 stabi-
liteettilaskelmissa, jotka tehdään elementtimenetelmällä.

Mittaaminen ei onnistunut ongelmitta. Kesän aikana osa antureista mittasi saviker-
roksessa tapahtuvaa selittämätöntä huokosvedenpaineen kasvua ilman ulkoisen
kuormituksen vaikutusta. Tämä selittämätön huokosvedenpaineen kasvu vaikutti tes-
tijunien aiheuttamien huokosvedenpaineiden muutoksien mittaamiseen, sillä huok-
osvesi oli mittausten mukaan jo valmiiksi ylipaineessa ennen kuormitusten aloitta-
mista. Kuormituksen aikana mitattu huokosvedenpaineen kasvu oli tästä syystä
useimmissa antureissa todennäköisesti todellista pienempi.

Suurin osa antureiden mittaamista huokosvedenpaineista kasvoi hidastuen testiju-
nien kuormituksen vaikuttaessa savikerrokseen. Huokosvedenpaineen kasvu olisi to-
dennäköisesti jatkunut ajan suhteen hidastuvana, jos junien pysäytykset olisivat voi-
neet kestää pidempään. Mitatun huokosvedenpaineen kasvun hitauden syynä voivat
olla todelliset hitaasti tapahtuvat leikkausmuodonmuutokset pohjamaassa, mutta
myös esimerkiksi huonosti ilmattu anturi, jonka merkitystä korostaa saven pieni ve-
denläpäisevyys tai edellä mainittu savikerroksessa vallinnut huokosveden ylipaine.

Pysäytettäessä raskaammat 250 kN vaunut kohteeseen km 233+900, huokosveden-
paineen kasvu savikerroksessa oli hitaampaa kuin kevyempien vaunujen pysäytyksis-
sä, mikä viittaa ennemmin eroihin antureiden asennusolosuhteissa, kuin savikerrok-
sen käyttäytymisessä. Kun suomalaisista vaunuista koostuva testijuna pysäytettiin,
osa huokospaineantureista oli asennettu vasta edellisellä viikolla ja anturit olivat si-
ten herkempiä reagoimaan paineen muutoksiin. Venäläisistä vaunuista koostuvan
testijunan pysäyttämishetkellä huokospaineanturit olivat olleet maassa jo lähes kol-
me kuukautta ja sen seurauksena anturit reagoivat hitaammin kuormituksen vaiku-
tuksiin.

Kohteessa km 238+280 huokosvedenpaineen mittaaminen onnistui paremmin. Huokosve-
denpaineen muutos oli sitä suurempi, mitä suuremmalla kuormalla rataa kuormitet-
tiin. 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 myös-
kään käyttäytynyt kaikissa tilanteissa kuten odotettiin. Kaikkien huokosvedenpai-
neantureiden mittaustulokset eivät olleet vertailtavissa pohjamaahan vaikuttavien
kuormitusten suhteen.

Stabiliteetti

Pehmeikkökohteiden stabiliteettilaskennat tehtiin kairaustulosten perusteella arvioi-
tujen maan ominaisuuksien pohjalta. Radan ulkopuolelta lujittumattomasta saviker-
roksesta otettu siipikairaus redusoiitiin ja siihen verrattiin samasta savikerroksesta
tehdyn CPTU-kairauskokeen kärkivastusta. Radan alla tapahtunut lujittuminen arvioi-
ttiin radan keskilinjalta tehdyn CPTU-kairauskokeen kärkivastuksen kautta.

Stabiliteettilaskelmat tehtiin 2D-stabiliteetilaskentana GeoCalc-ohjelmalla. Stabi-
teettilaskelmissa käytettiin Bishopin yksinkertaistettua menetelmää ja maan lujuutta
kuvattiin suljetulla leikkauslujuudella. Stabiliteettilaskenta tehtiin molempiin kohte-
isiin 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 riit-
tävä eli $F > 1,5$. Teliparin metripainosta saadulla pintakuormalla laskettaessa koko-
naisvarmuusluvut 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 tois-
tuva pintakuorma. Laskettaessa stabiliteettia kaksiulotteisesti laskentaohjelma ei
tarkastele pintakuorman aiheuttamia radansuuntaisia liukupintoja. Teliparin metri-
painolla laskeminen onnistuisi paremmin käyttäen kolmiulotteista stabiliteetin las-
kentaohjelmaa.

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.

Pystysiirtymä

Radan pystysiirtymää mitattiin siirtymä- ja kiihtyvyyssantureilla pölkkyistä. Testijunilla
tehtyjen pysäytysten ja ohitusten aikana mitatut pystysiirtymät palautuivat referens-
sitasolle kuormitusten poistuttua. Kaikki junakuormien aiheuttamat mitatut pystysiir-
tymät olivat siis palautuvia. Mitatut palautuvat painumat pysyivät RATO 3:ssa määri-
tettyjen raja-arvojen sisällä.

Pystysiirtymä kasvoi molemmissa kohteissa hitaasti koko pysäytyksen ajan. Painu-
manopeus pysäytyksien aikana hidastui ajan suhteen, mikä viittaa siihen, että painu-
mat tasaantuisivat tiettyyn arvoon pysäytyksien ollessa pitkäkestoisempia. Painuma-
nopeus teliparin metripainon suhteen oli lineaarista eli raskaampi kalusto ei aiheut-
tanut suhteellisesti nopeampaa painuman kasvua pysäytyksen aikana.

Verrattaessa testiajojen ja pysäytyksien aiheuttamia suurimpia pystysiirtymiä telipa-
rin metripainoon olivat siirtymät lähes lineaarisesti kasvavia. Radan rakenneerrokset
ja pohjamaa käyttäytyivät tutkimuksessa käytettyjen testijunien kuormituksen alaise-
na mittausten mukaan kimmoisasti.

Sivuttaissiirtymä

Sivuttaissiirtymiä mitattiin molemmissa kohteissa radan luiskan kohdalta inklinomet-
reillä. Sivuttaissiirtymät pohjamaassa syntyivät melko nopeasti testijunien kuormi-
tuksen vaikuttaessa mittauskohteilla. Suurimmassa osassa pysäytyksiä pohjamaan
sivuttaissiirtymät eivät kasvaneet koko pysäytyksen ajan, vaan tasoittuivat tiettyyn
arvoon, jossa pysyivät pysäytyksien loppuun saakka. Poikkeuksen teki 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 värähtelyn 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 molemmilla 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 perusteella 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 rataa 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 pysäytettyinä oleva juna.

Radan pysyvä muodonmuutos

Radan pengerialueita ja sen muutosta seitsemän vuoden ajanjakson aikana arvioitiin laserkeilauksen avulla. Penger yksiraiteisella Juurikorpi-Kotka-osuudella oli lähes poikkeuksetta vähintään 6,8 metriä leveä. Monin paikoin pengerialueiden leveys oli myös yli 7 metriä, koko osuuden pengerialueiden keskiarvon ollessa noin 7,6 metriä.

Pengerleveyden kasvun suuruus vuosien 2010-2017 aikana oli hankalaa määrittää runsaan kasvillisuuden ja kasvillisuuden muuttumisen takia. Käytettävissä olevien pistepilvien avulla oli mahdollista päästä korkeintaan muutamien senttimetrin tarkkuuteen pengerleveyden arvioinnissa. Yleisesti ottaen pengerleveys oli eri tulkintojen mukaan muuttunut vain vähän, joissakin yksittäisissä kohdissa vähän selvemmin, sillä kasvua havaittiin enimmillään jopa yli 0,5 metriä. Useimmissa suuren pengerleveyden kasvun kohdissa oli kuitenkin tapahtunut jokin rakenteellinen muutos radassa eikä leviäminen ollut seurausta yksin liikennekuormituksesta. Esimerkiksi kaapelikourun asentaminen oli muuttanut penkereen poikkileikkausta merkittävästi. Rata-penger leviää hitaasti liikennekuormituksen vaikutuksesta, mutta pääsääntöisesti tämä muutos mahtuu laserkeilauksen mittaustarkkuuden sisään eikä muutosta siksi saatu täysin luotettavasti selville.

Radan jousto

Radan jouston perusteella voidaan myös arvioida heikon kuormituskestävyyden omaavia kohtia radassa. Suurimmat havaitut joustot esiintyvät kohteissa, joissa rakennekerrokset ovat alle 2 metriä paksuja ja pohjamaa on pehmeää, joko savea tai turvetta. Rakennekerrospaksuuden kasvaessa edelleen, jousto tavallisesti alkaa pienentyä, vaikka oltaisiin samalla pehmeiköllä. Tutkimuksessa monitoroidut poikkileikkaukset eivät näkyneet joustomittauksessa erityisen suuren jouston kohteina, koska molemmissa kohteissa penger oli noin 3 metriä paksu.

Joustomittausten avulla havaitaan epäjatkuvuuskohtia, joissa radan jousto vaihtelee lyhyellä matkalla merkittävästi. Useimmiten kyse on heikosta tuennasta, jonka seurauksena muutama ratapölkky on heikossa kontaktissa tukikerrokseen. Tällaisia kohteita löytyy tyypillisesti vaihteista, siltapäädystä ja turvalaitteiden kohdalta.

Jatkotutkimustarpeita

Kouvola-Kotka rataosan tutkimuksesta on suunnitteilla elementtimenetelmää ja 3D-laskentaa hyödyntävä stabiliteetilaskentaan 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

Jalle Bäcklund, Sähköpostikeskustelu, 2017.

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

Esveld, C. (2001). Modern Railway Track, Second Edition ed., MRT-Productions, The Netherlands.

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 kuljetuskapasiteettilaskelmat, Ratahallintokeskus, Helsinki.

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.

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. Viitattu 20.7.2017, Saatavilla: www.ratadata.fi.

Heikki Luomala, Diplomityön ohjauskeskustelu, 2017.

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

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

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

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

Tommi Puhakka, Sähköpostikeskustelu, 2017.

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.

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

Juha Selänpää, Haastattelu 1.11.2017.

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

SGY (1999). Kairausopas II. 2. painos. Helsinki.

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

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

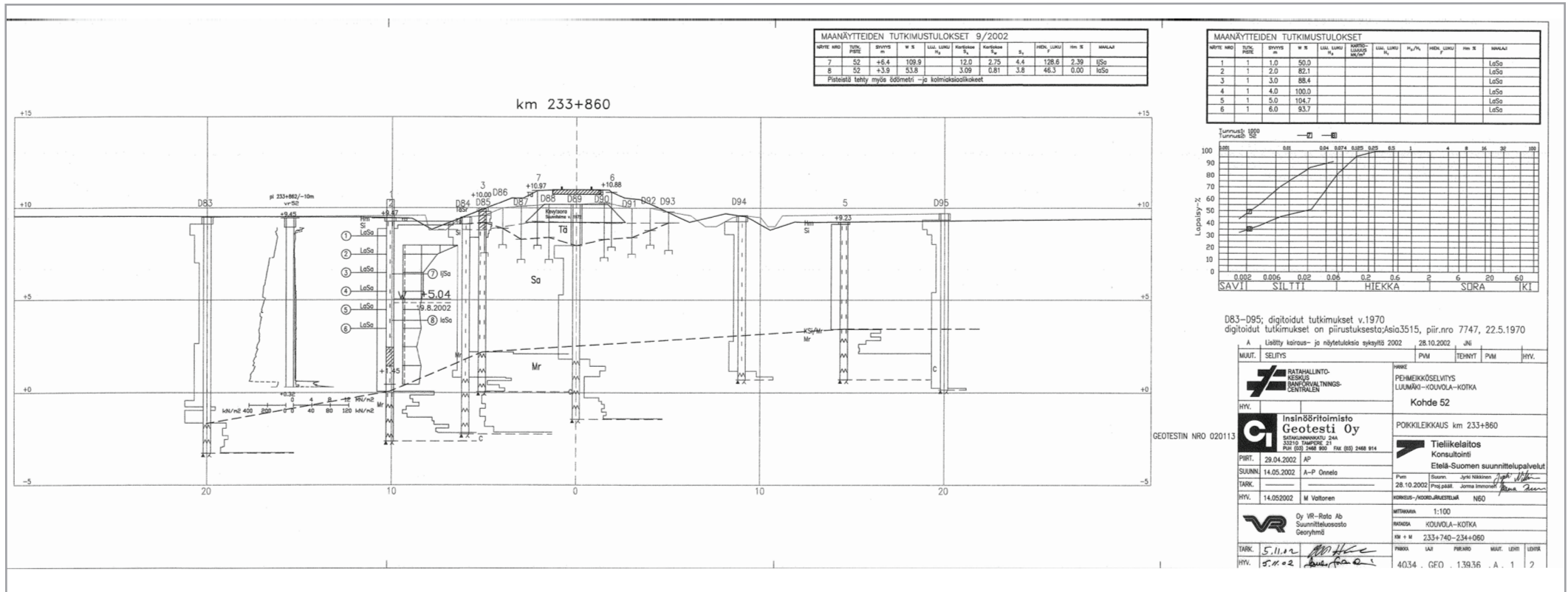
Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. KPC-PA/KPD-PA|Pore Pressure Gauges|Civil Engineering Transducers|TRANSDUCERS|Products|Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd. Viitattu 19.9.2017. Saatavilla: http://www.tml.jp/e/product/transducers/civil_eng/pore_pressure/kpc_kpd.html

Panu Tolla, Haastattelu 2017.

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

Sami Ylönen, Haastattelu 2017.

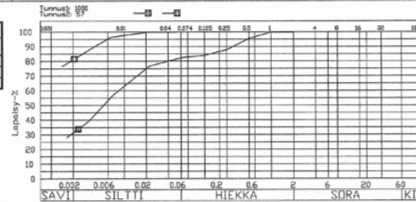
Vanhojen pohjatutkimusten geotekniset poikkileikkaukset



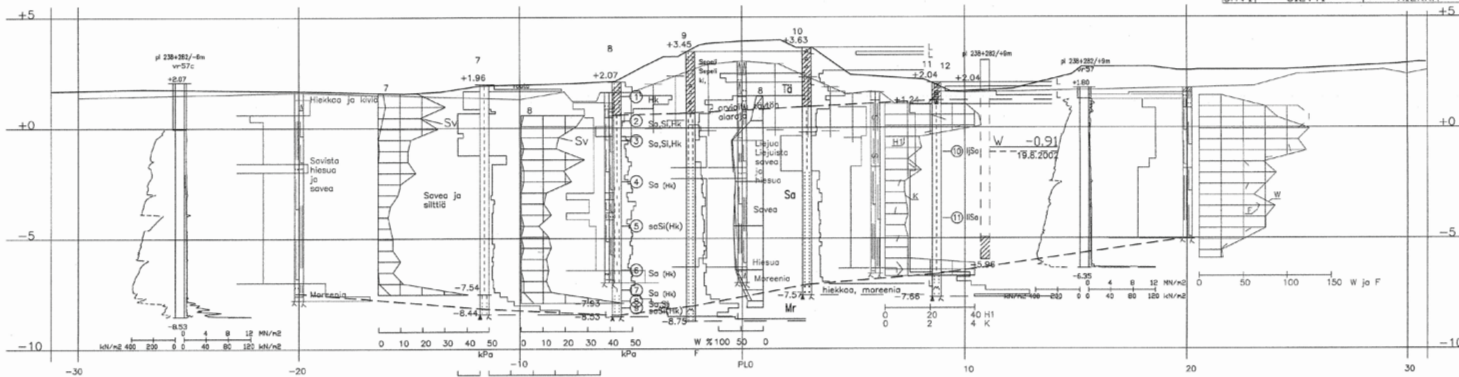
MAANÄYTEIDEN TUTKIMUSTULOKSET 9/2002

AVIM. NO	SYV. (m)	SYVYS (m)	K	LIU. (kPa)	KOHTEEN	KÄYTTÄMÄ	MITT. NO	MITT. KUVA		
10	57	-1.1	126.4		19.8	7.18	9.2	130.0	5.72	10c
11	57	-4.1	80.7		7.04	0.68	10.4	57.0	0.00	10c

Potentit tehty myös komokajälkeä



LEIKKAUS Km 238+280
1:100/1:100



NO	K	PK/0,2 m	S	PK
10	378.6	377.8	378.5	379.6
11	472.3	476.1	481.4	486.6
				380.8
				492.3

Tutkimusajankohta	Mittaus	27.3.2002
	Käiväus	2.-10.4.2002
Työnjohtaja	Mittaus	J.MARTTILA
	Käiväus	J.MARTTILA
Korkeuskiintopiste		
Koordinaatisto	Eriiliskoordinaatisto	
Monikulmiopistettä / Lisätietoja	Korkeuslähde: pylväs nro 228-1 perustuksen yp+6.00 N60	

GEO SAVI 0.002 SILTI 0.008 HIEKKA 2 SORA 60

100 hieno 0.006 keski 0.2 korkea hieno 0.2 keski 0.8 korkea hieno 0.8 keski 2.0 korkea

Näytteen numero	5	9
rotteusaste	5	9

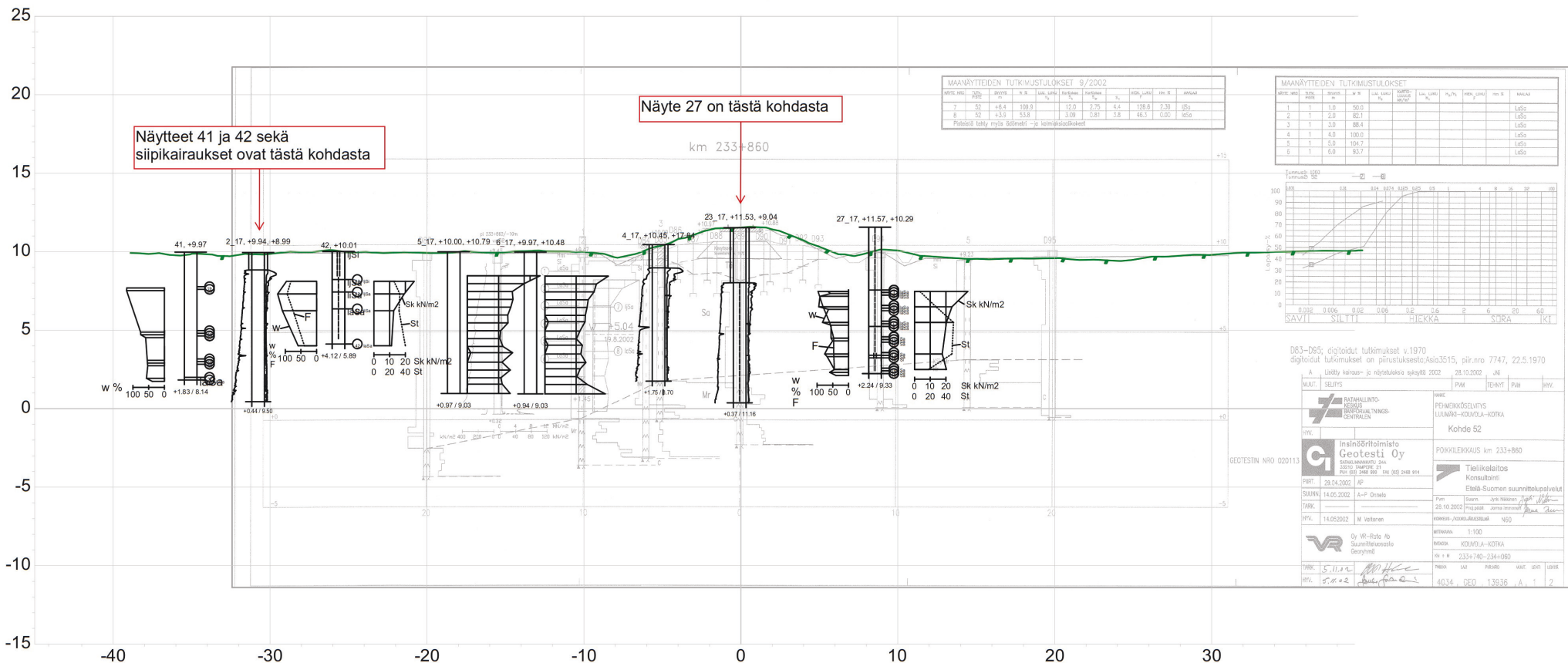
9 Lisätyt käiväus- ja näyteluokitukset 2002

MAK 10 2002 JK

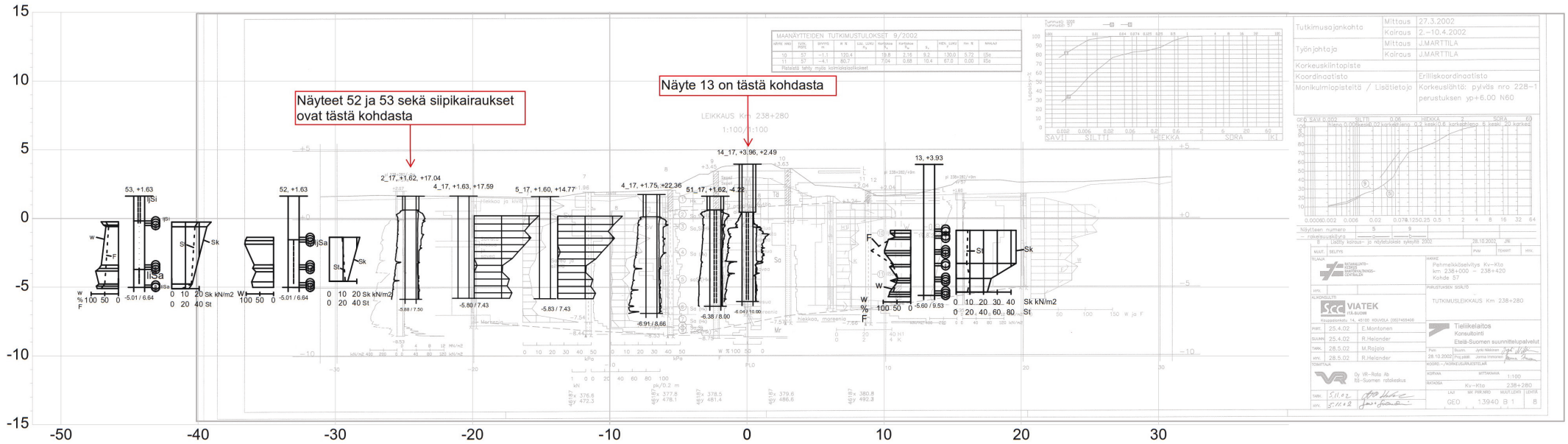
TYÖALUE	PAIKKE	PAIK	TYÖKÖ	HYV.
 VIATEK OY Suomalainen ja ulkomaalaisen tekniikan erikoisyritys	Pohjämekaniikka Oy -Kto			
	Km 238+000 - 238+420			
ALUEIDEN KÄYTTÖ		TUTKIMUSLEIKKAUS Km 238+280		
Projekti: E-Monttonen Suunnittaja: R.Helander Tarkastaja: M.Rajala Päivä: 28.10.2002		Tieliikelaitos Konsultointi Eteä-Suomen suunnittelupalvelut Pääsuunnittelija: Jarmo Neittaan Projektinjohtaja: Jarmo Neittaan		
Toimittaja: Oy VR-Rata Ab Rå-Suomen rautatiekeskus		KOKOAJA: MTK/MKAA SUUNNITTELU: 1:100 KÄYTTÖ: Kv-Kto 238+280 LAI: MK PIKANO MÄÄRITELMÄ: LEHTA GEOMETRIAN: 1.3940 B 1 8		

Uusien pohjatutkimusten geotekniset poikkileikkaukset

km 233+900



km 238+280



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	MSS	AMMONIUMSULF	KOEAJO
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

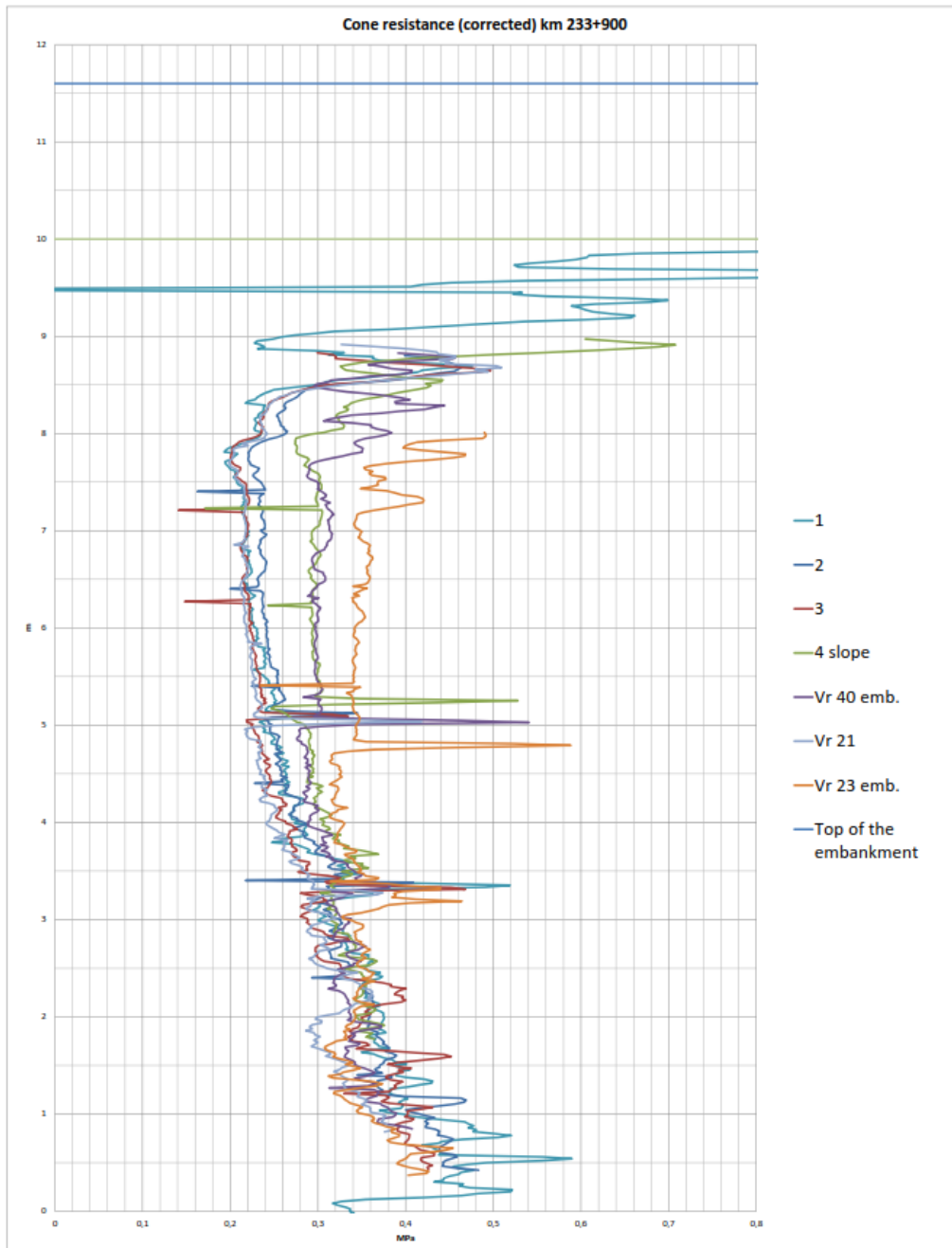
				ENNAKOITU		TESTATTU			
AKS	TN	VETURI	PIT	PAINO	JP	JPP	JP	JPP	PT
HOS	JRI	80	1984	1 SR1	314	2070	527	25	00257

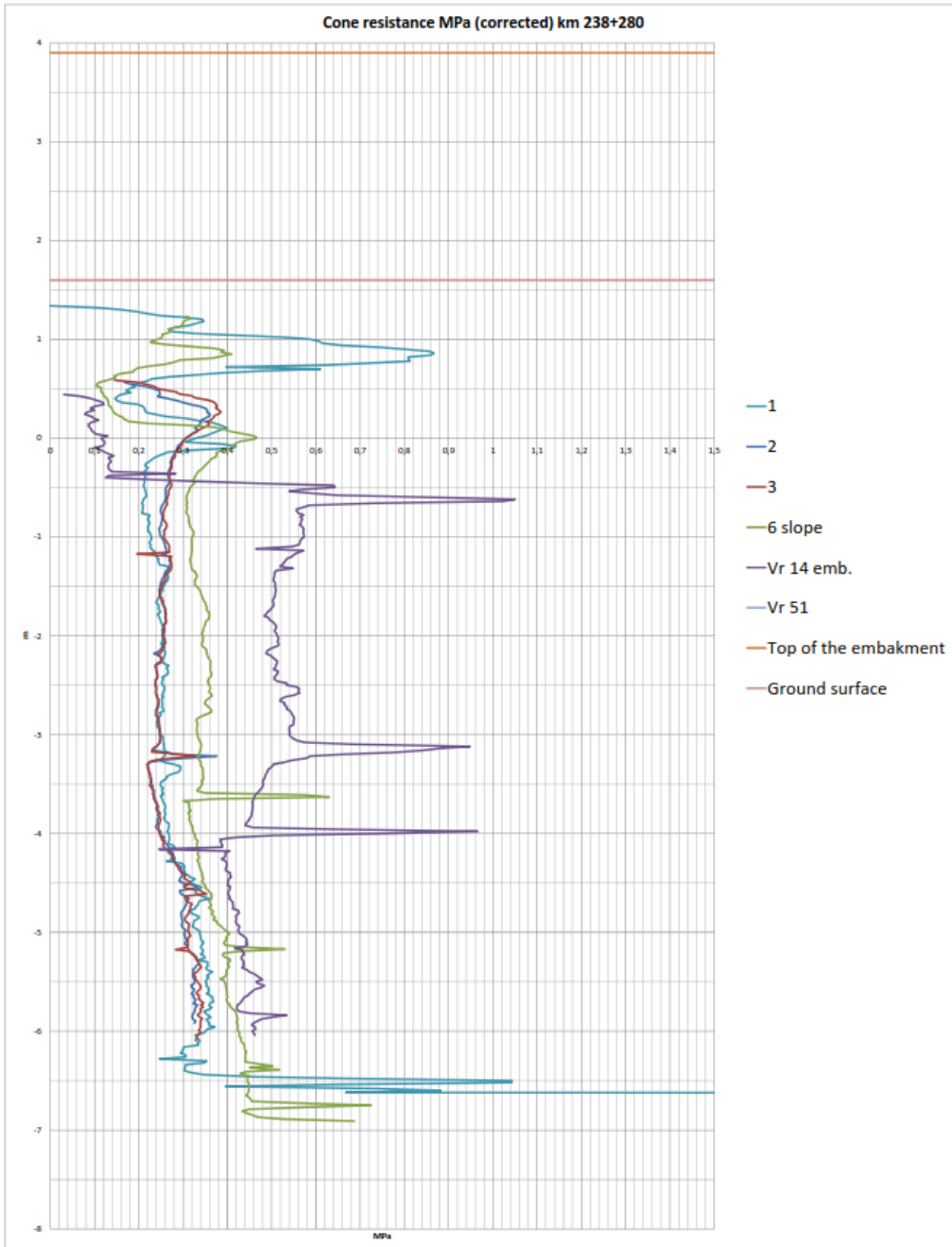
TÄYDELLINEN JARRUJENTESTAUS TEHTY AIKALEIMAA EI LÖYDY

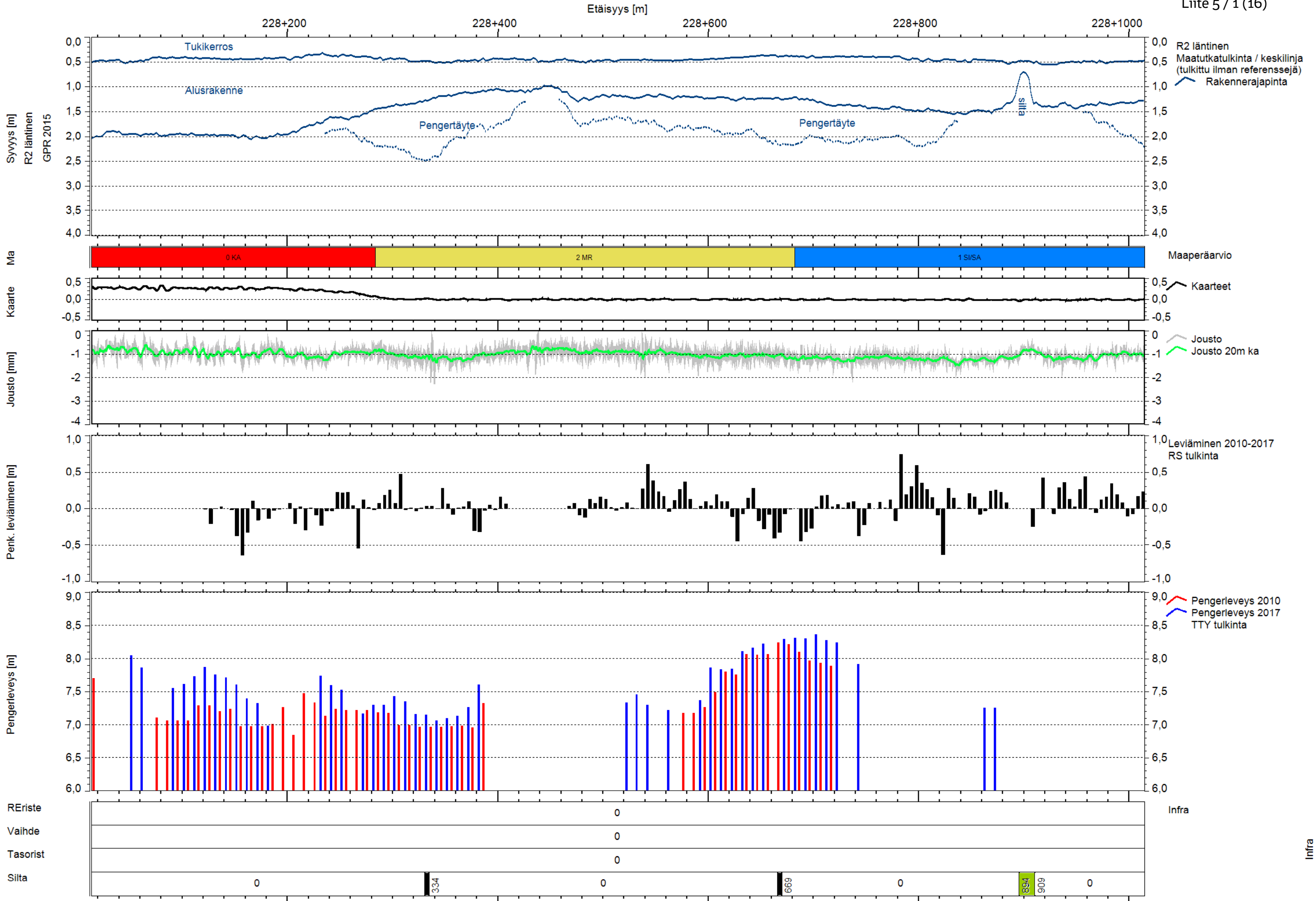
 * JUNASSA ON YLI 22,5 T AKSELIPAINOJA TAI VENÄLÄISIÄ VAUNUJA! *
 * SN 20 POIKKEAVASSA VAIHTEESSA JA SIVURAITTEELLA EI JKV-ALUEELLA! *

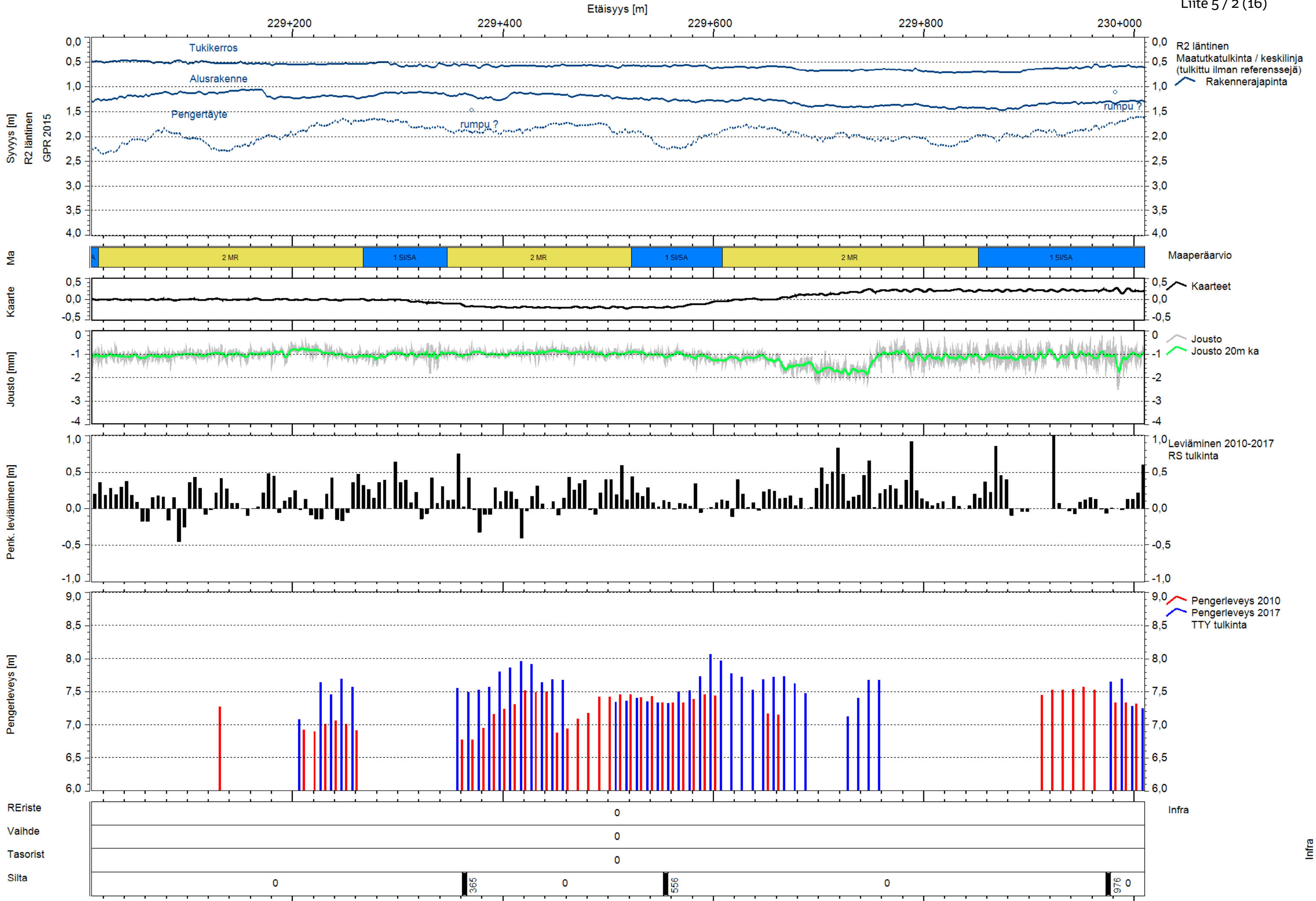
 LISTA LOPPU *****

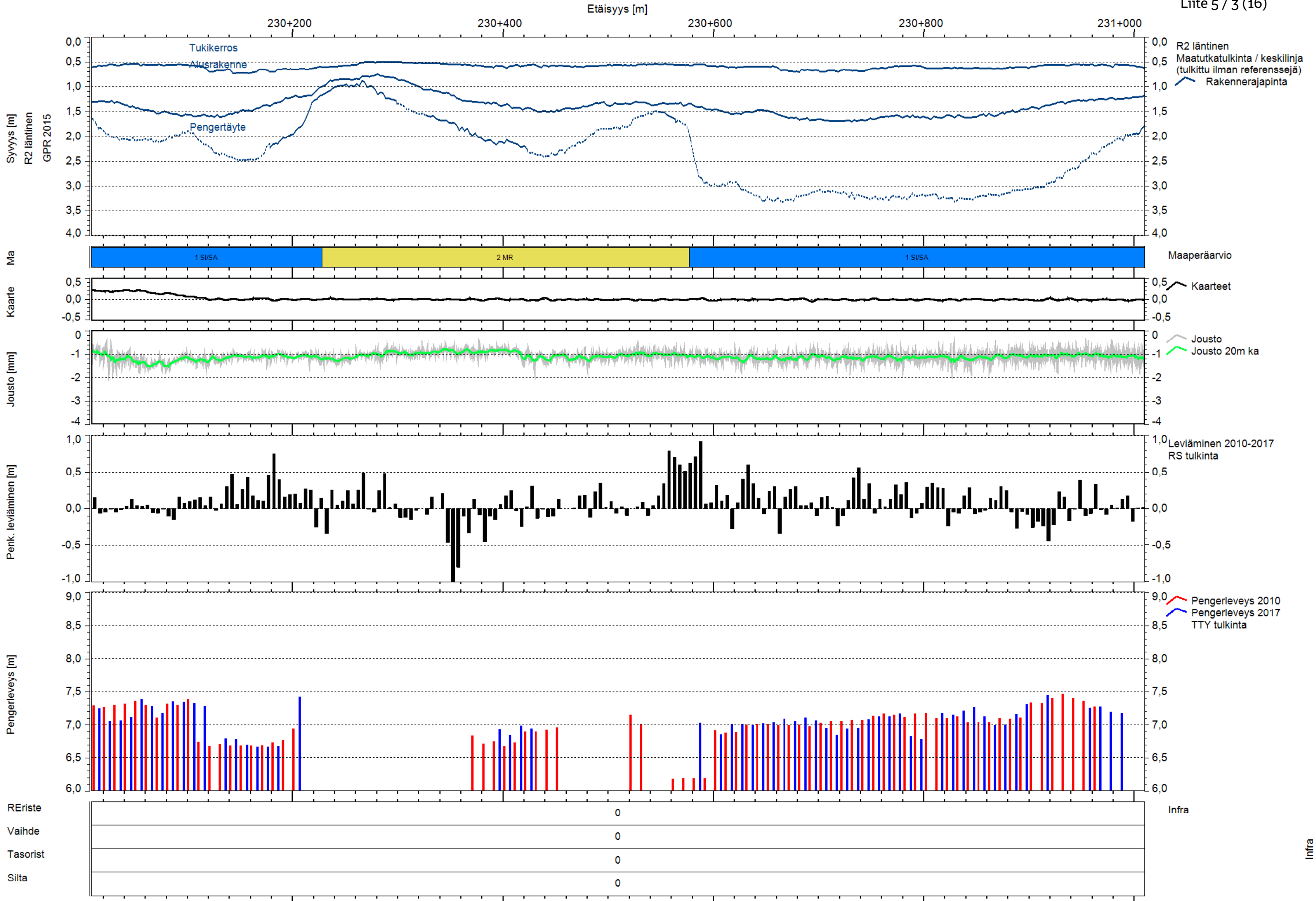
CPTU-koekairauksien tulokset

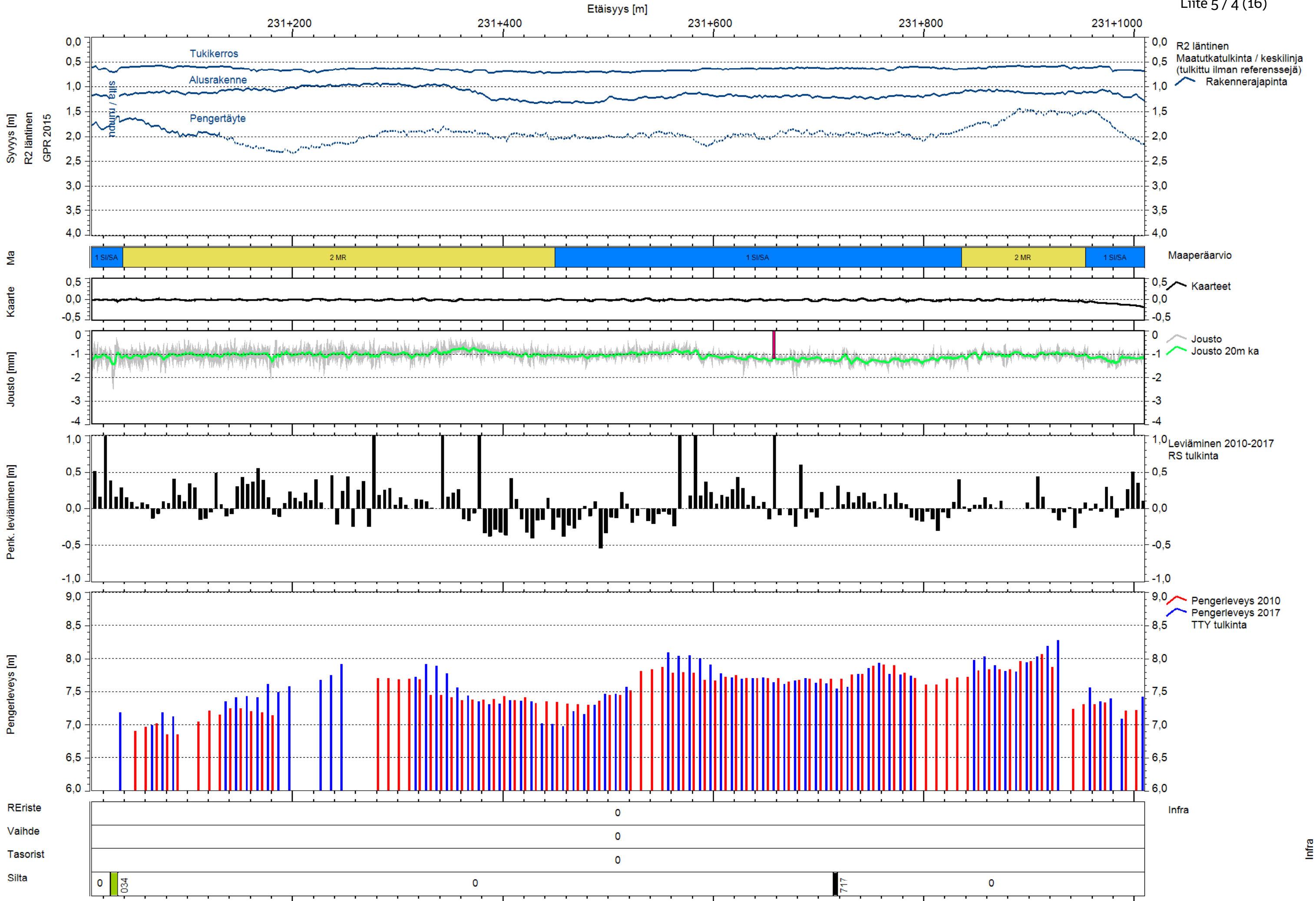




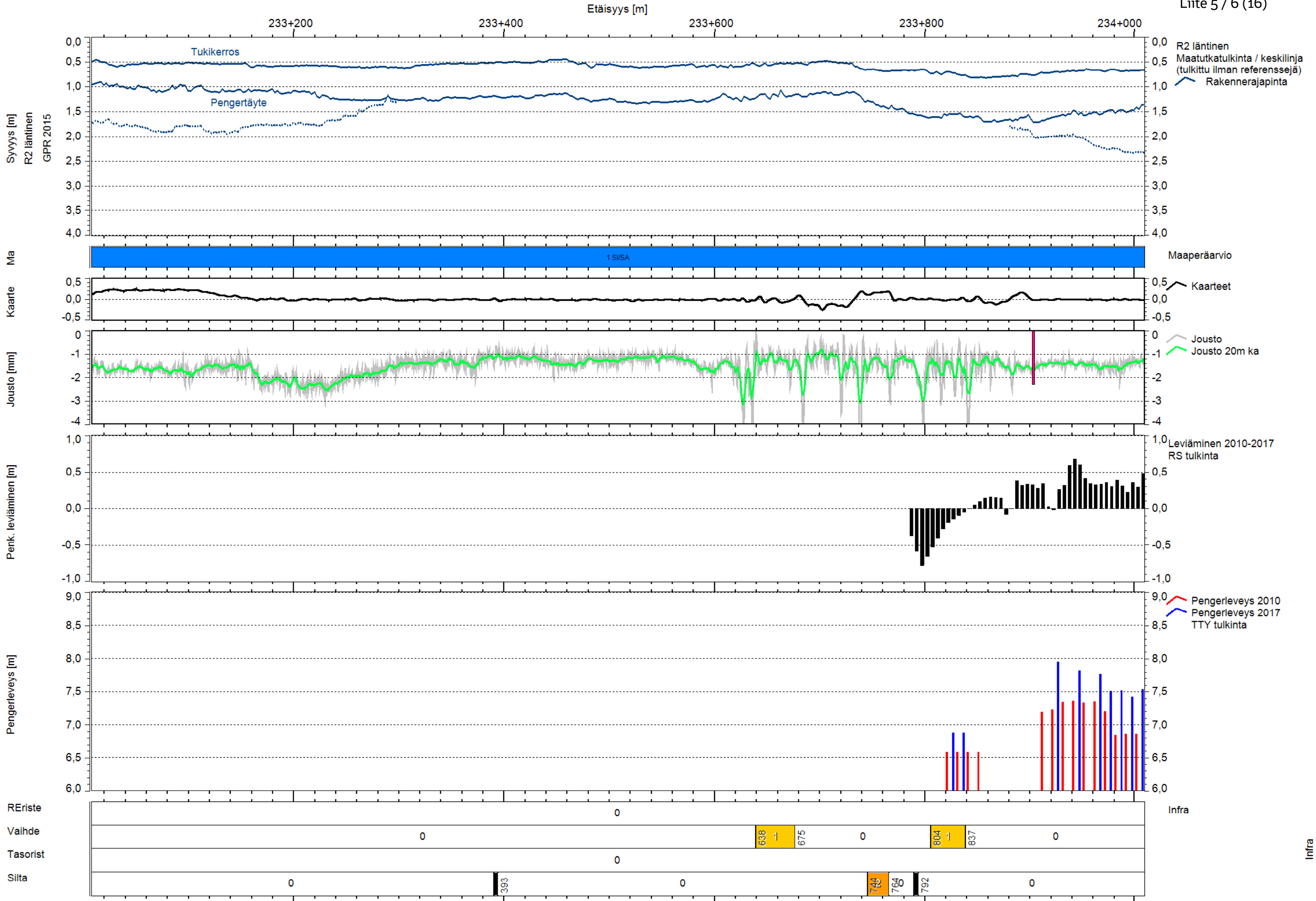


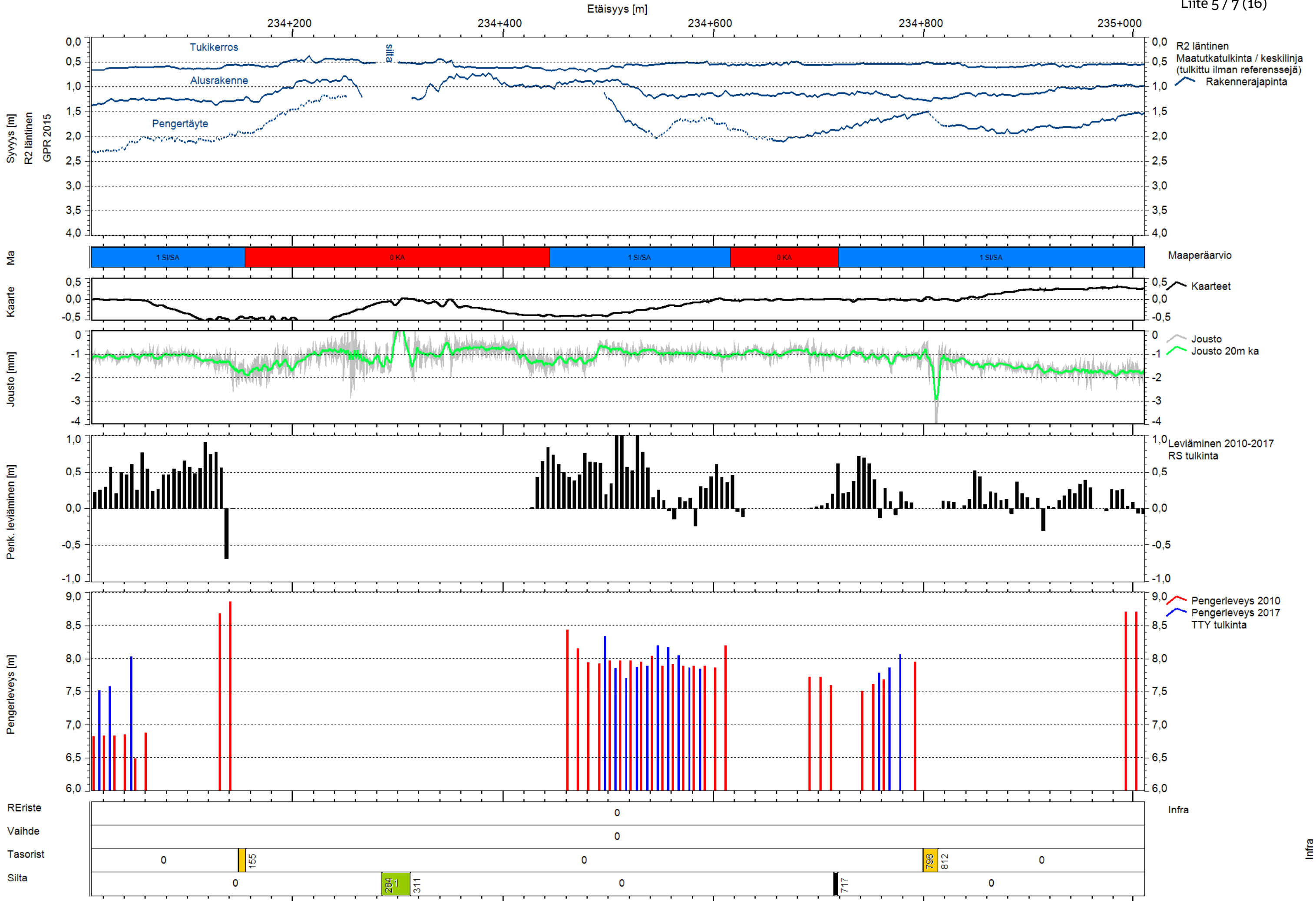


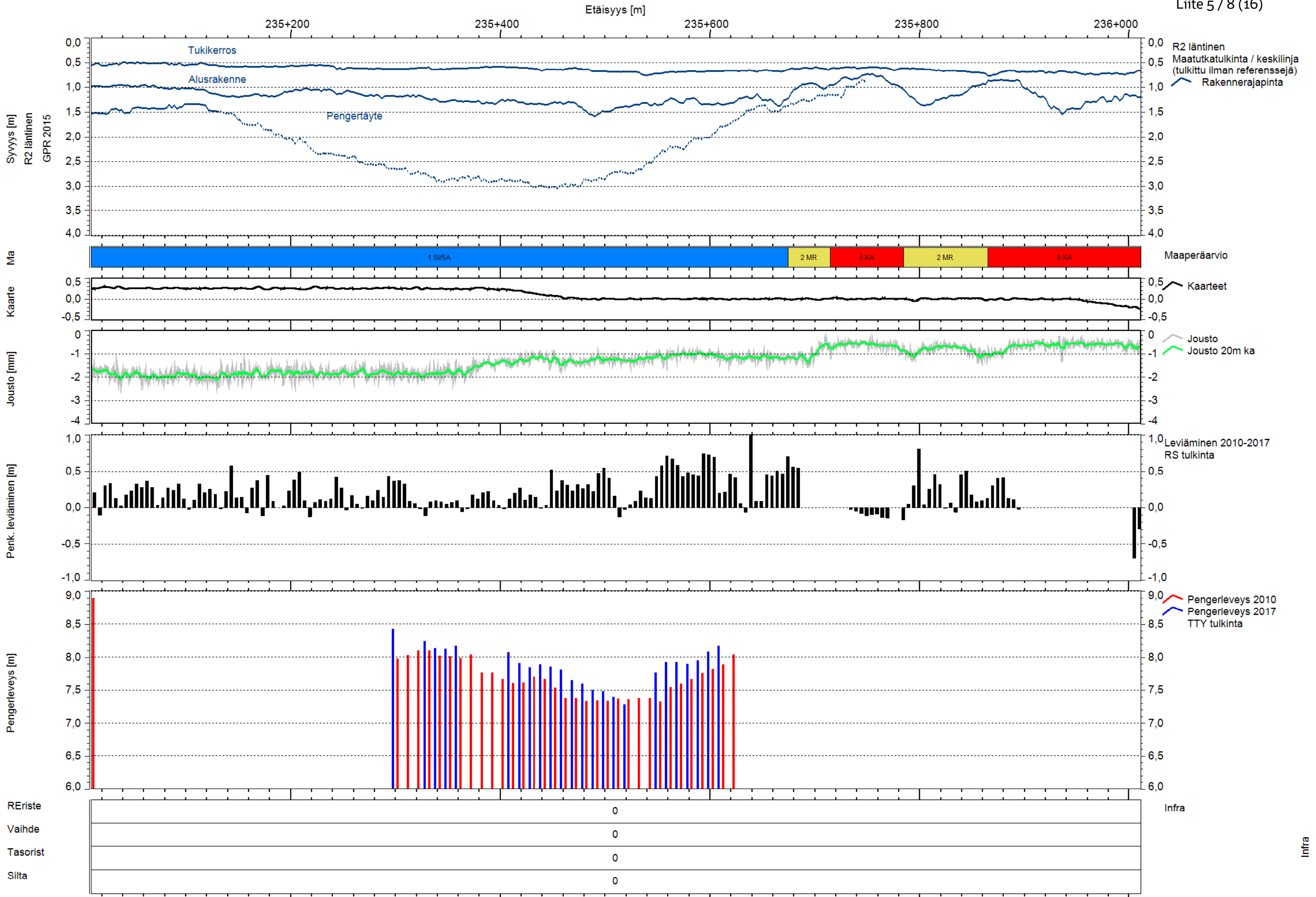


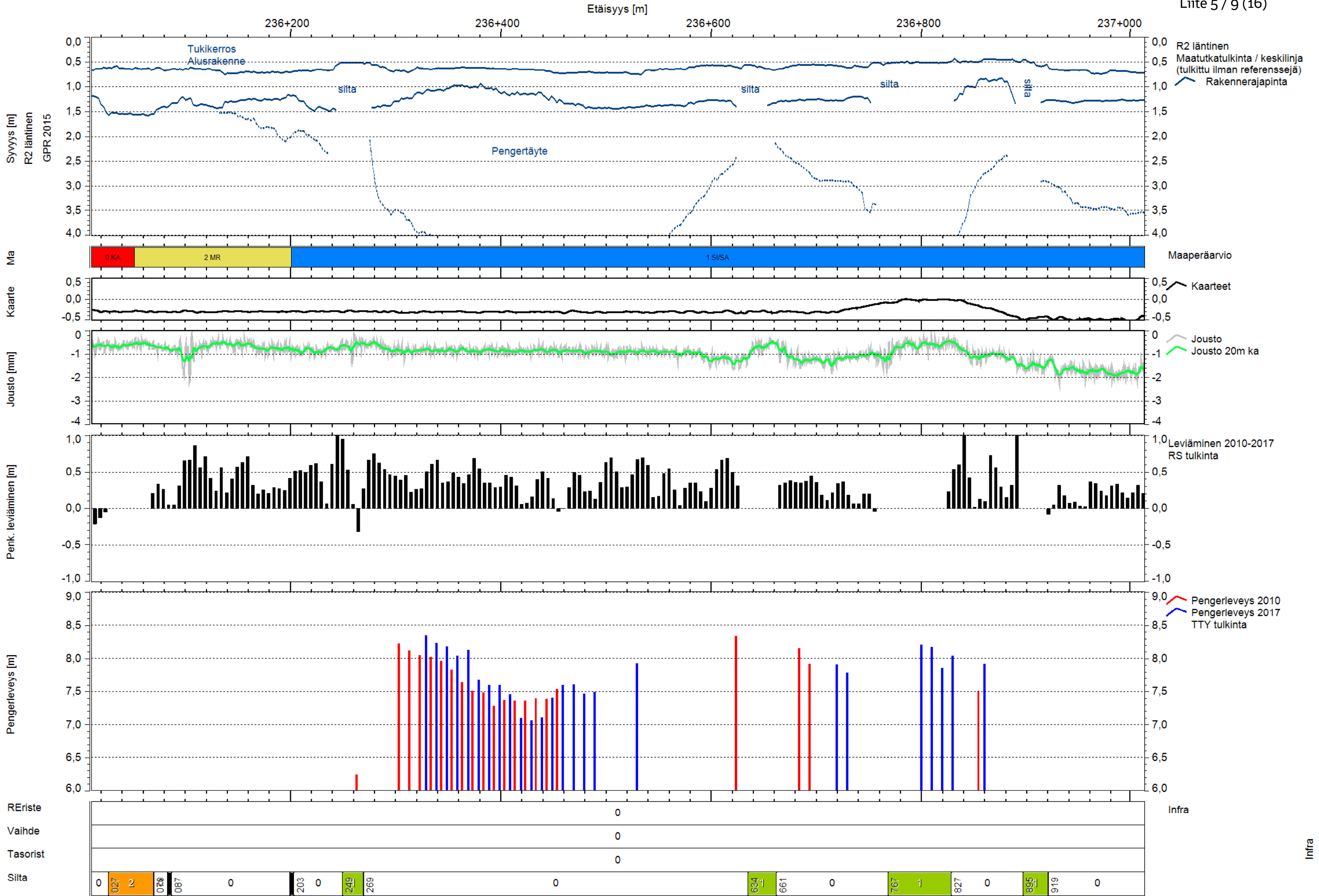


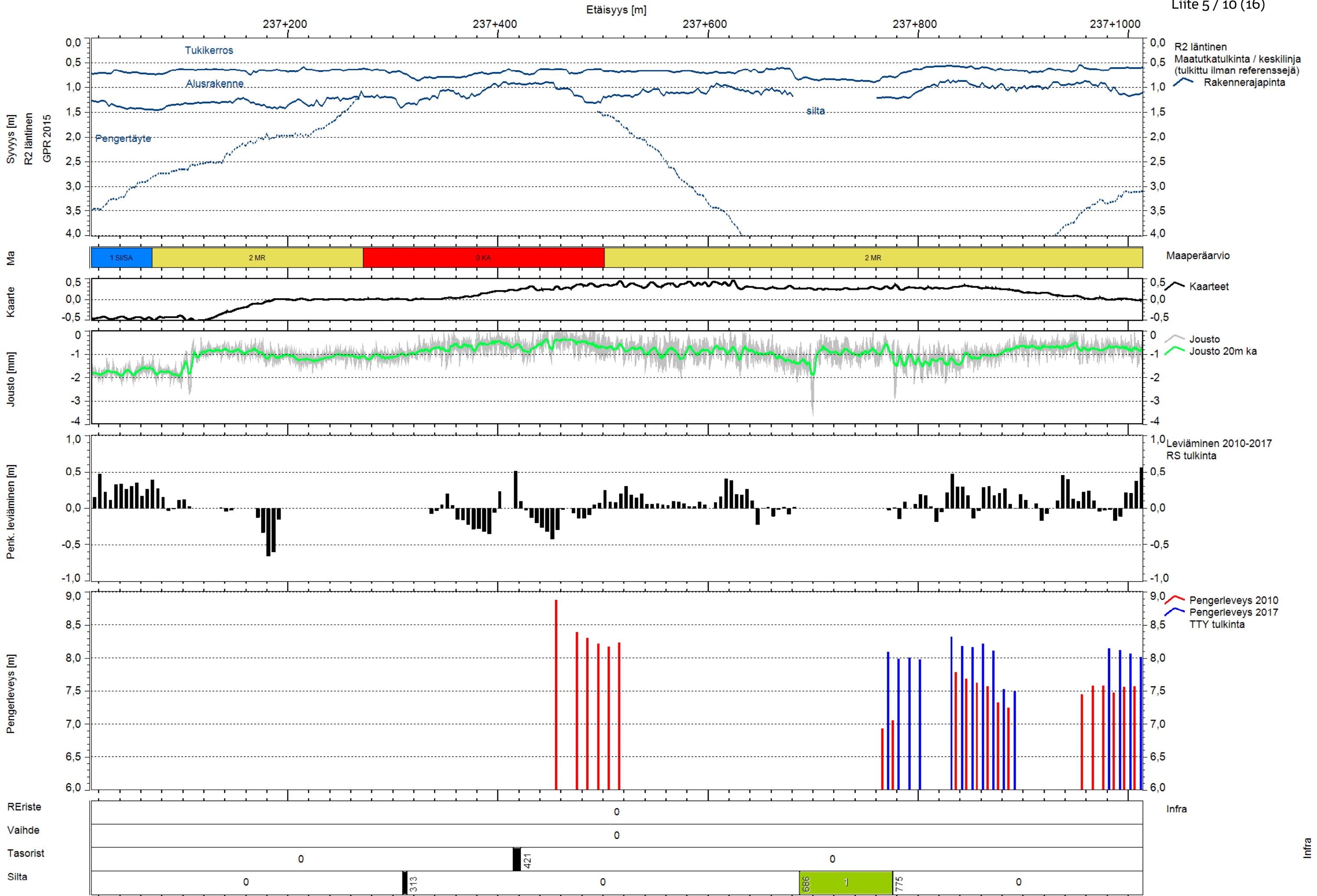
Infra

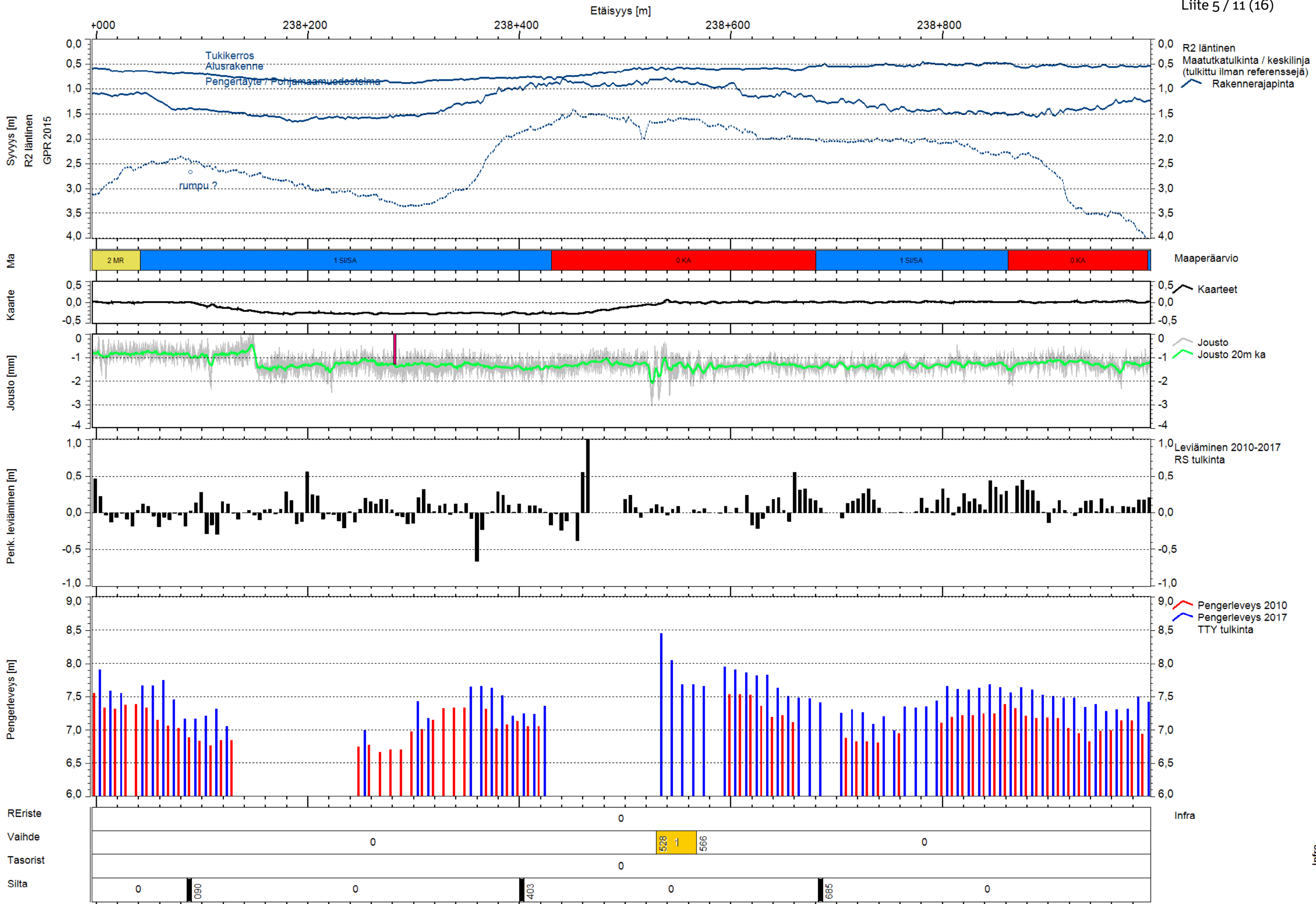


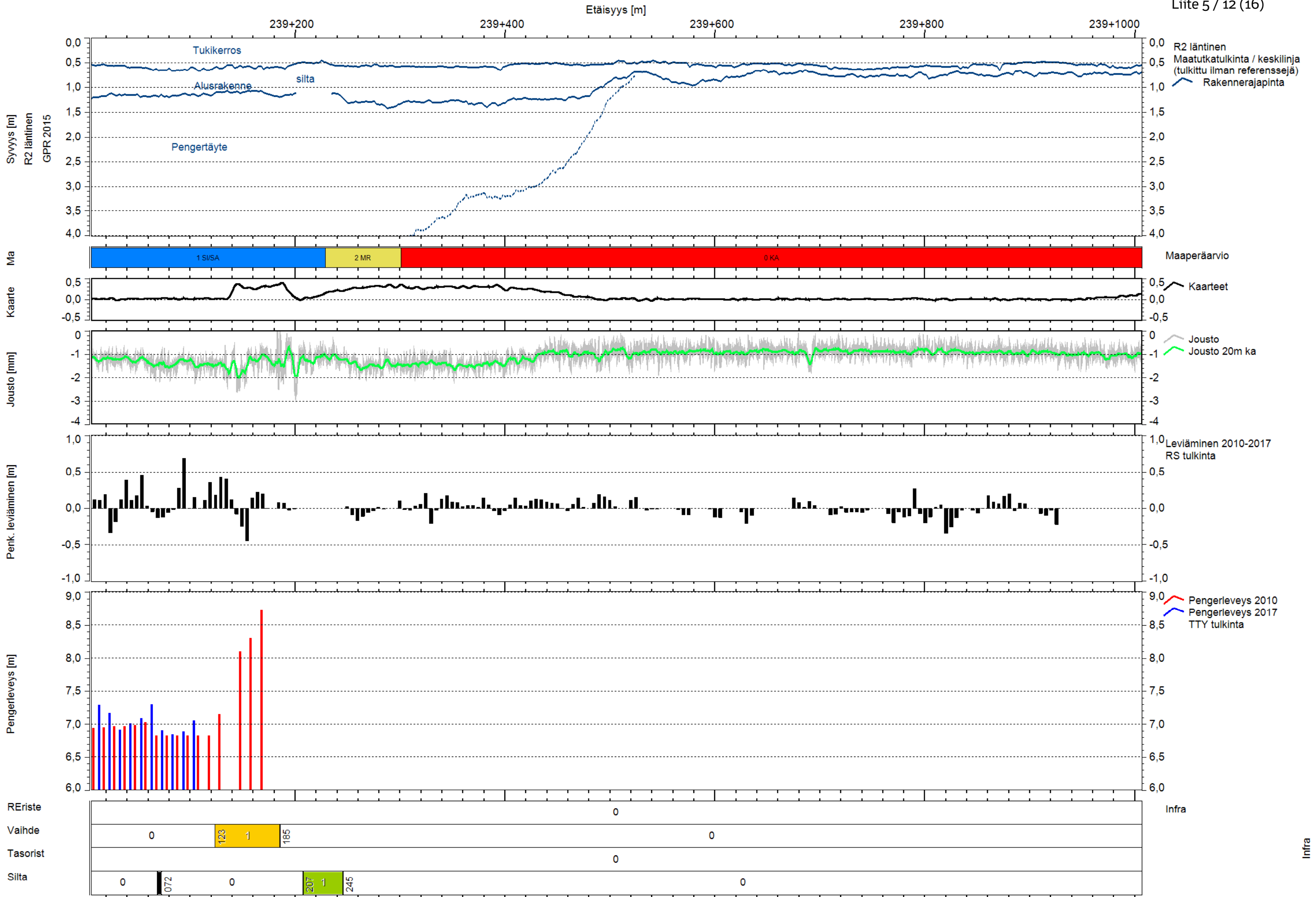


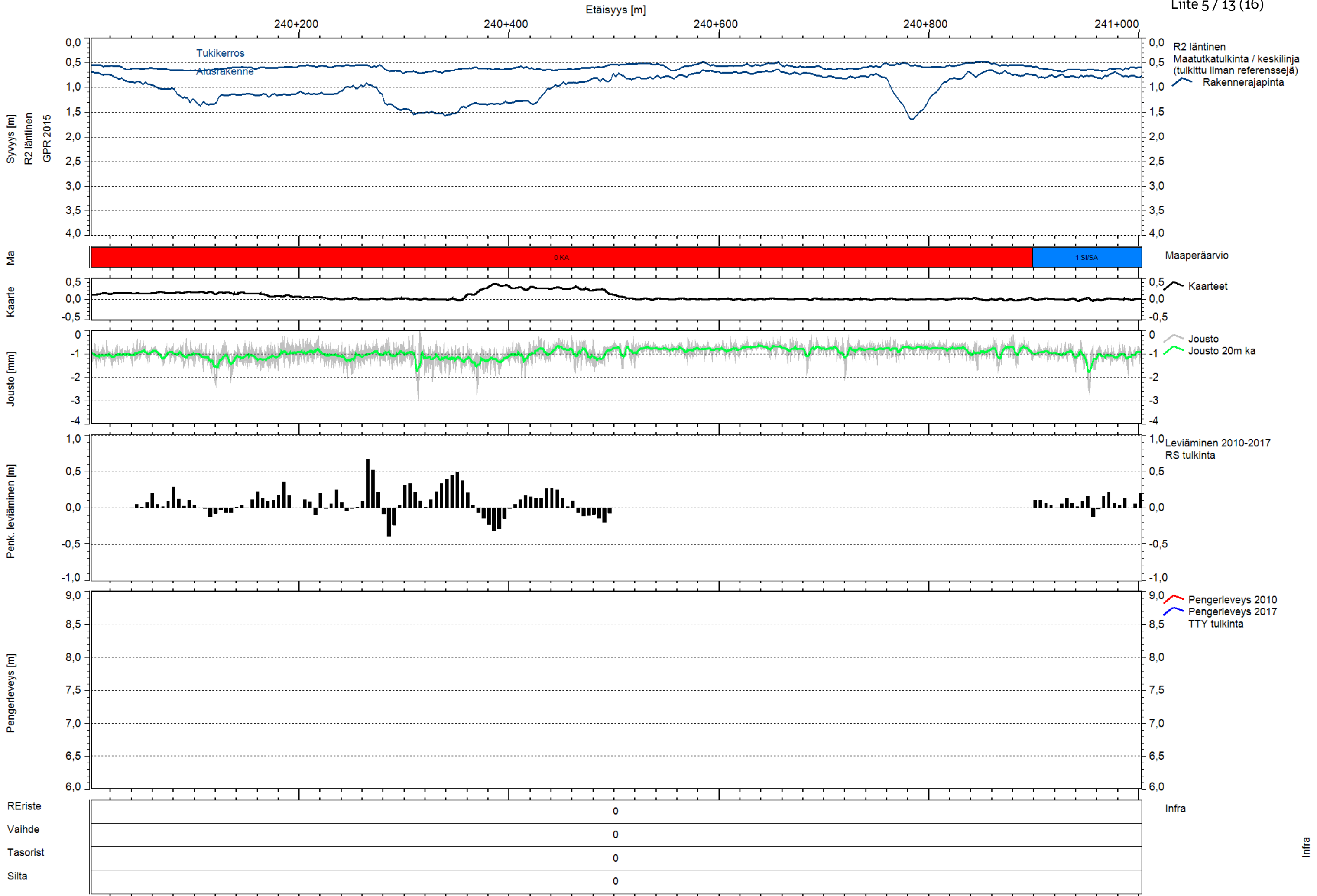


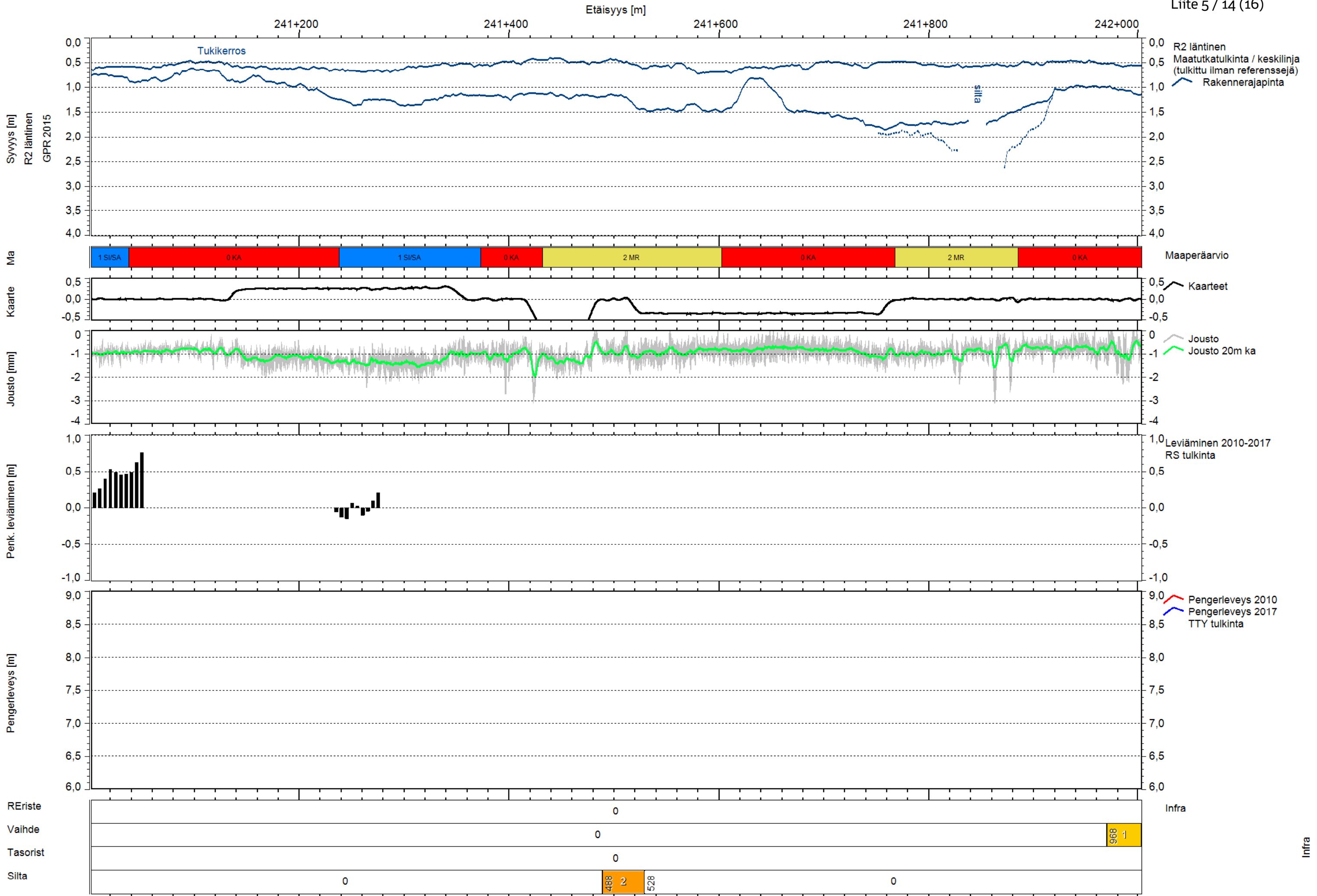


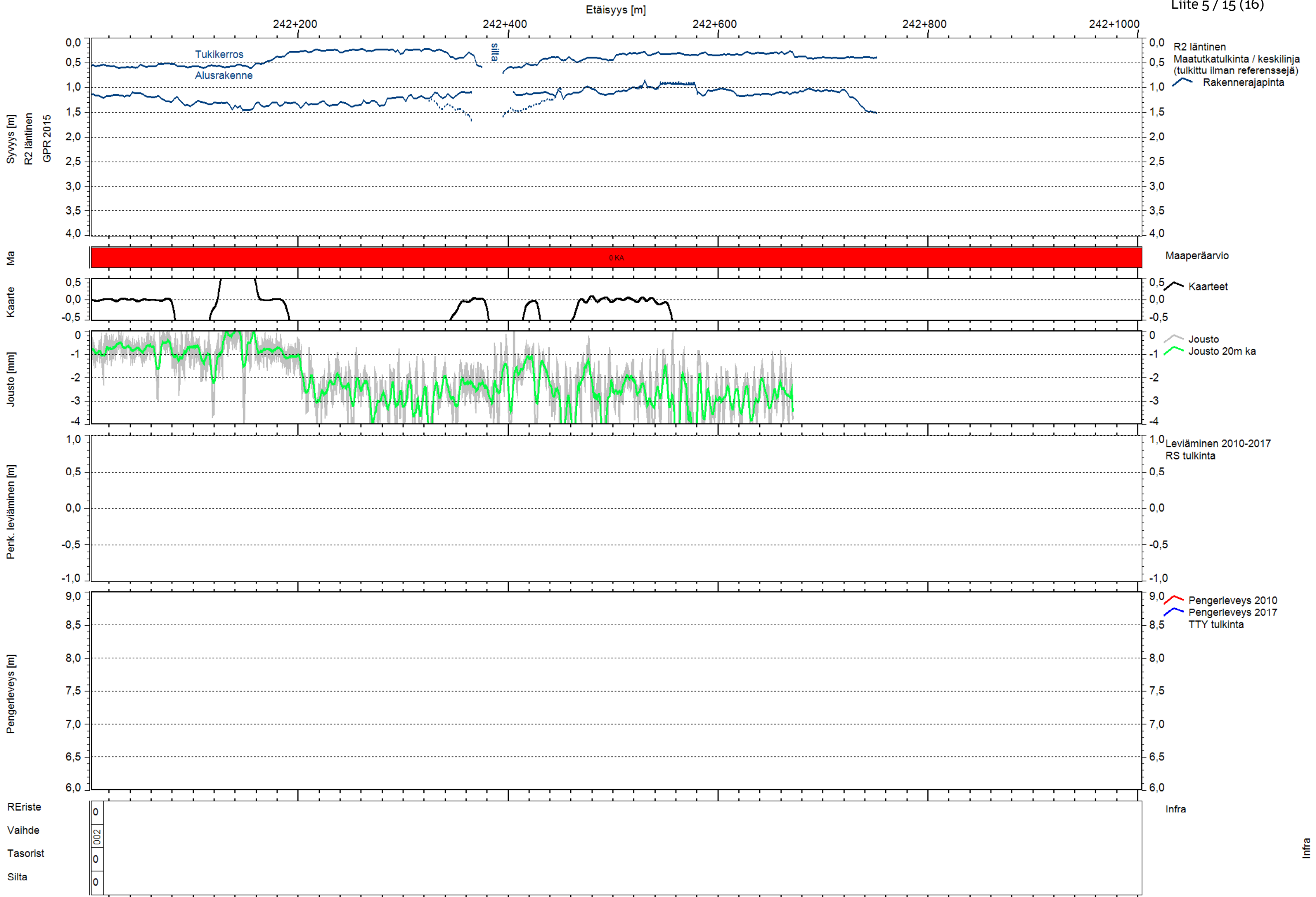












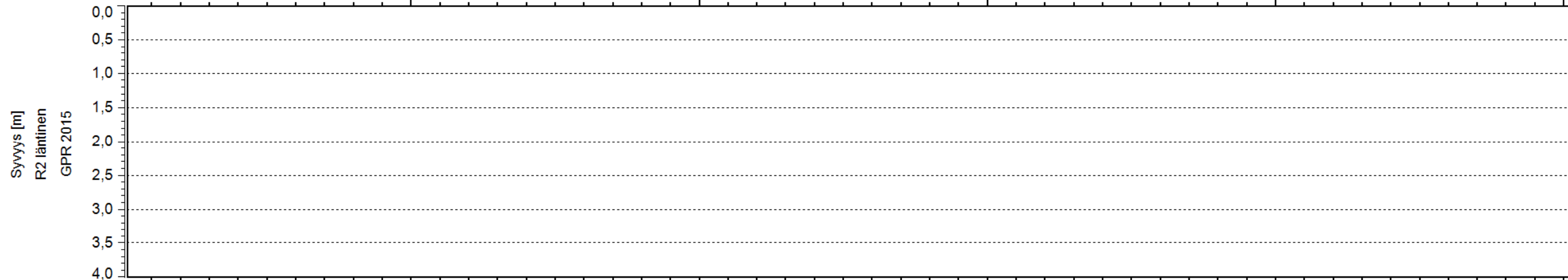
242+1200

242+1400

242+1600

242+1800

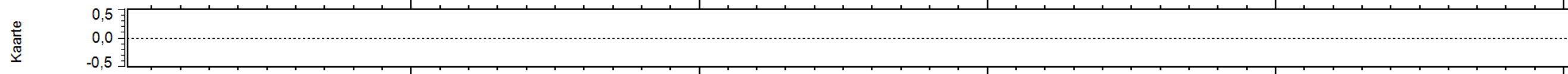
242+2000



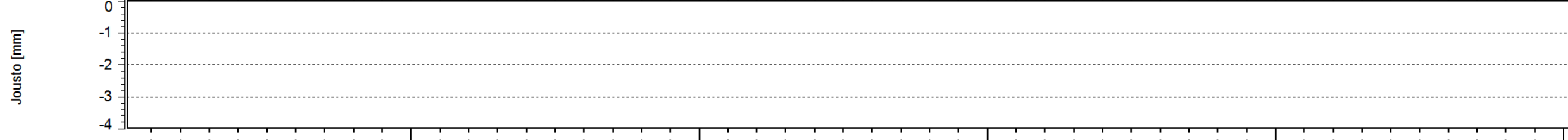
R2 läntinen
Maatutkatulkinta / keskilinja
(tulkittu ilman referenssejä)
Rakenerajapinta



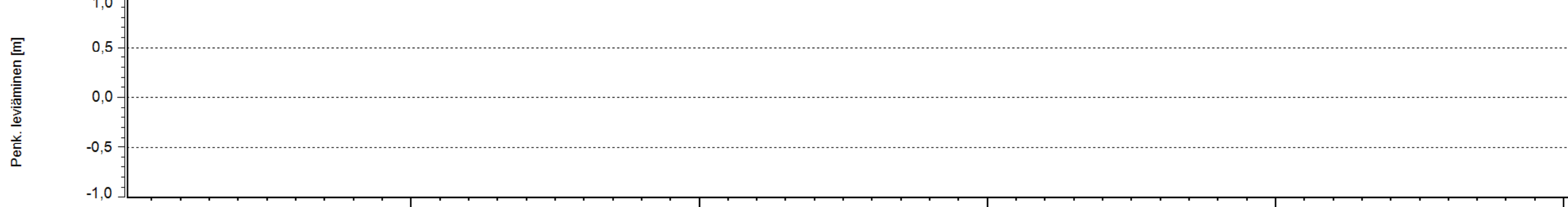
Maaperäarvio



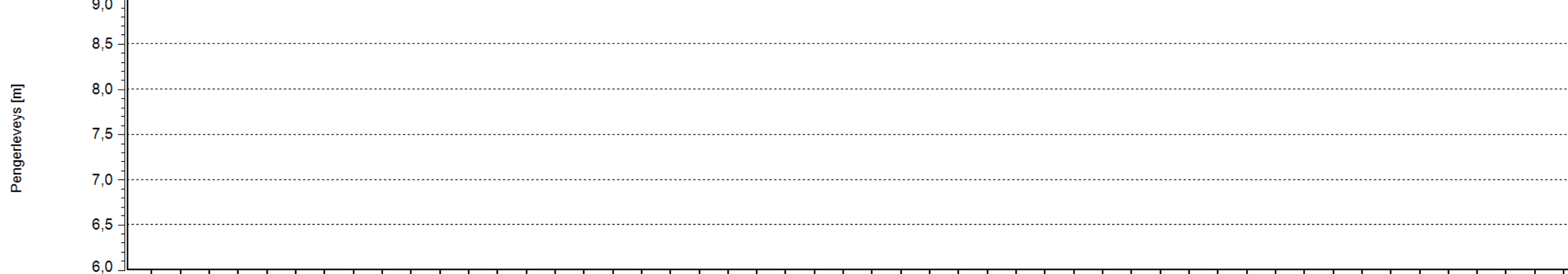
Kaarteet



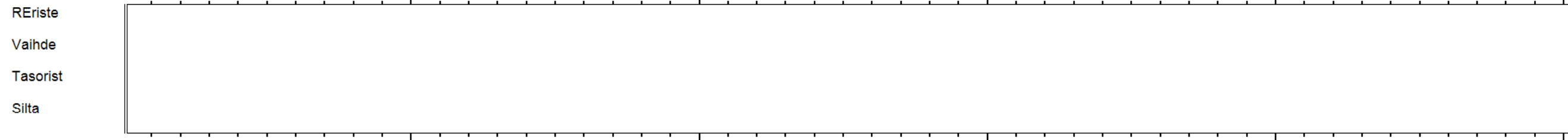
Jousto
Jousto 20m ka



Leviäminen 2010-2017
RS tulkinta



Pengerleveys 2010
Pengerleveys 2017
TTY tulkinta



Infra

Infra

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-542-6
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

