Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä
19/2017

Pirjo Kuula
Heikki Luomala
Eveliina Pulkkinen
Pauli Kolisoja

Tukikerroksen toiminnan kehittäminen

Pirjo Kuula, Heikki Luomala,
Eveliina Pulkkinen, Pauli Kolisoja

Tukikerroksen toiminnan kehittäminen

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2017

Liikennevirasto
Helsinki 2017

Kannen kuva: Heikki Luomala

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)
ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-383-5

Liikennevirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelin 0295 34 3000

Pirjo Kuula, Heikki Luomala, Eveliina Pulkkinen ja Pauli Kolisoja: Tukikerroksen toiminnan kehittäminen. Liikennevirasto, tekniikka ja ympäristö -osasto. Helsinki 2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2017. 112 sivua ja 3 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-328-8.

Avainsanat: tukikerros, raidesepeli, raidesepelin hienontuminen, tukeminen, raidegeometria, rantarata

Tiivistelmä

Tukikerros on radan liikennöitävyyden edellyttämän raiteen tasaisuuden hallinnan kannalta keskeisin radan rakenneosa. Tukikerroksen raidesepelin hienonemisen ja uudelleenjärjestymisen sekä alempien rakenneosien pysyvien muodonmuutosten myötä muodostuvaa raiteen epätasaisuutta mitataan jatkuvasti ja korjataan tukemalla osana radan jatkuvaa kunnossapitoa. Tukikerroksen toimintaan liittyvän tutkimuskokonaisuuden tavoitteena on selvittää tukeutumistilanteen ja raidesepelin kunnon heikkenemiseen johtavia ilmiöitä ja tekijöitä. Tutkimuskokonaisuuden nyt julkaistu toinen pääraportti koostuu rantaradalle Kirkkonummi–Turku välille sijoitettujen koekohteiden tulosten raportoinnista sekä raidesepelin hienontumisen viimeaikaisia kansainvälisistä tutkimustuloksista ja tukikerroksen toiminnan parantamista käsittelevästä kirjallisuusselvityksestä.

Kallioleikkauksiin sijoitetuilla koekohteilla tehtyjen siirtymäanturimittausten tulosten perusteella voitiin todeta, että merkittävä osa tukemisen aikaisesta pölkkyjen nostosta palautuu melko nopeasti tuennan jälkeen. Kahdessa viikossa pölkyn pään asema on painunut 25–45 % nostosta ja kolmessa kuukaudessa pölkyn aseman muutosnopeus vakiintuu tasolle 0,25 mm/kuukaudessa. Kahden vuoden seuranta-aikana pölkkyjen päiden asema aleni 60–80 % noston suuruudesta. Raidesepelin iällä ei näyttänyt olevan suurta vaikutusta tukeutumistilan pysyvyyteen, uudempi kulmikkaampi sepeli painui jopa hieman nopeammin kuin vanhempi pyöristynyt sepeli.

Koekohteiden korkeuspoikkeamien seurannassa käytetyn takymetrimittauksen tulosten epävarmuus oli liian suuri, jotta mittaustuloksista olisi voitu tehdä tarkempia johtopäätöksiä. Takymetrimittausten tulokset eivät myöskään olleet vertailukelpoisia radantarkastustulosten kanssa. Tulosten perusteella nousi esille myös kysymys siitä, ovatko takymetrimittaukset riittävän luotettavia tukemisen nuotituksen suunnitteluun. Takymetrimittauksilla havaittu ratapölkyn liikkeiden suuruus oli instrumentoitujen ratapölkkyjen kohdalla kuitenkin samalla tasolla kuin siirtymäantureilla mitatut siirtymät.

Tutkimuksessa seurattujen koekohteiden raidesepelistä ja tukemisesta kerätyn historiatiedon perusteella ei päästy tarkkaan käsitykseen tukemisen aiheuttamasta lisäkuormituksesta, koska alkuperäisen sepelin tietoja ei kaikilta osin pystytty selvittämään. Kahdessa vanhimmasta sepelistä rakennetussa koekohteessa havaittiin, että ennusteen mukaan sepelin käyttöiäksi muodostuisi vain 25–30 vuotta. Kohteet olivat tuentahistorialtaan erilaisia, eikä kohteista pystytty erottelemaan toisistaan sepelin heikomman laadun ja tukemisen aiheuttamaa hienontumista. Oletettavasti vanhimmat sepelit olivat laadultaan heikompia kuin uudemmat sepelit. Historiatietojen perusteella laadittu ennuste osoitti uudempien vaatimusten mukaisten sepelien hienontuvan hitaammin kuin vanhemmat sepelit.

Alustavien kuormitusmallinnuksen tulosten perusteella heikon tuennan voitiin todeta aiheuttavan lähes kaksinkertaisen dynaamisen kuormitusvaikutuksen. Kun tähän lisätään noin kaksinkertainen kuormitusten uudelleen jakautumisesta tuleva vaikutus, voi yksittäisen ratapölkyn alapuolella olevan sepelin kuormitustaso olla ääritapauksessa jopa yli kolminkertainen hyvään tuentatilanteeseen verrattuna. Tämä vaikutus johtaa väistämättä myös raidesepelin suurempaan hienontumiseen radan epäjatkuvuuskohdissa.

Tukikerroksen toiminnan ja hyvän tukeutumistilan ylläpitoon on tarjolla muutamia kokeilemisen arvoisia tekniikoita, joista osaa kuten geolujitteita ja pohjaimia on Suomessa jo kokeiltu. Uusista menetelmistä polyuretaanikäsittelyä, sepelin hallittua pyöristämistä ja automaattisesti tukeutumistilaansa korjaavia pölkkyjä voidaan pitää lupaavimpina koerakentamiseen soveltuvina menetelminä.

Pirjo Kuula, Heikki Luomala, Eveliina Pulkkinen och Pauli Kolisoja: Utveckling av ballastens funktion. Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2017. Trafikverkets undersökningar och utredningar 19/2017. 112 sidor och 3 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-328-8.

Sammanfattning

Ballasten är den mest centrala konstruktionsdelen i en järnväg och behövs för att säkerställa järnvägsspårens jämnhet så att järnvägarna ska kunna trafikeras. Då spårmakadamen i ballasten pulveriseras och omfördelas och då komponenterna i de lägre skikten permanent ändrar form blir järnvägen ojämn, vilket kontinuerligt mäts samt åtgärdas genom stöd som en del av det kontinuerliga underhållet. Målet med den forskningshelhet som anknyter till ballastens funktion är att utreda de fenomen och faktorer som leder till att stödet och spårmakademens kondition försämras. Den nu publicerade andra huvudrapporten inom forskningshelheten består av resultatrapportering från testobjekt placerade vid kustbanan mellan Kyrkslätt och Åbo och av färska internationella forskningsresultat om pulverisering av spårmakadam samt av en litteratursökning om förbättring av ballastens funktion.

Utifrån resultaten från mätningar med förskjutningsgivare vid testobjekten placerade vid bergskärningar kunde man konstatera att en betydande del av den höjning som sker när sliprarna stöds rätt snabbt går tillbaka efter stödjandet. På två veckor har sliperänden sjunkit med 25–45 procent av höjningen och på tre månader stabiliseras förändringshastigheten för sliperns läge till 0,25 mm/månad. Under en uppföljningsperiod på två år sjönk sliperändarna med 60–80 procent av höjningen. Spårmakadamens ålder verkade inte ha stor betydelse för hur permanent stödet var; en nyare, mer kantig makadam sjönk till och med ihop något snabbare än den äldre rundare makadamen.

Osäkerheten i resultaten från takymetermätningarna som användes vid uppföljningen av testobjektens höjdavvikelser var för stor för att det skulle ha gått att dra exaktare slutsatser av mätningsresultaten. Resultaten från takymetermätningarna var inte heller jämförbara med resultaten från spårkontrollerna. Resultaten ledde också till frågan huruvida takymetermätningarna är tillräckligt tillförlitliga för planeringen av s.k. noter för stödet. Storleken på de rörelser som observerades med takymetermätningarna vid de instrumenterade sliprarna var emellertid av samma nivå som förskjutningarna som uppmättes med förskjutningsgivare.

De historiska uppgifter som samlats in om spårmakadamen och stödet vid de testobjekt som följdes upp under studien gav ingen exakt uppfattning om vilken extra belastning stödet orsakade, eftersom det inte till alla delar gick att få fram information om den ursprungliga makadamen. Enligt en prognos för två testobjekt som byggts upp med den äldsta makadamen var makadamens livslängd endast 25–30 år. Objekten hade olika stödhistoria, och det gick inte att skilja åt objekten med avseende på huruvida pulveriseringen orsakats av sämre makadamkvalitet eller av stödet. Man kan anta att den äldsta makadamen var av sämre kvalitet än nyare makadam. En prognos som utarbetats utifrån historiska uppgifter visade att makadam som uppfyllde nyare krav pulveriserades långsammare än äldre makadam.

Enligt preliminära resultat av en belastningsmodell kunde ett svagt stöd konstateras orsaka en nästan dubbelt så stor dynamisk belastningseffekt. Lägger man till detta effekten av omfördelningen av en cirka dubbelt så stor belastning, kan belastningsnivån på makadamen under en enskild sliper i extremfall vara upp till mer än trefaldig jämfört med ett bra stöd. Denna effekt leder oundvikligen också till en större pulverisering av makadamen vid banans diskontinuitetsställen.

När det gäller underhållet av ballasten och ett bra stöd finns det några tekniker som är värda att testa. En del av dem – såsom geoförstärkning och slipermattor – har redan testats i Finland. Av de nya metoderna kan polyuretanbehandling, kontrollerad rundning av makadam och sliprar som automatiskt korrigerar sitt stöd anses vara de mest lovande för testbyggen.

Pirjo Kuula, Heikki Luomala, Eveliina Pulkkinen and Pauli Kolisoja: Development of the ballast bed performance. Finnish Transport Agency, Technology and Environment. Helsinki 2017. Research reports of the Finnish Transport Agency 19/2017. 112 pages and 3 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-328-8.

Summary

The ballast bed is the most important structural layer when the management of smoothness of the rail is considered. The effects of the fouling and re-organisation of railway ballast and the permanent deformation of the lower structural layers are measured by the unevenness of rail and fixed by tamping. The objectives of this research on the performance of the ballast bed are to study the relationship between the fouling of railway ballast and packing conditions of the ballast bed. This report is the second main report of the research project. In this report the main content consist of reporting the results from the monitoring sites situated in rantarata between Kirkkonummi and Turku. Also the latest international research on fouling railway ballast and improvement methods of the ballast bed performance has been referred in this report.

The results of the monitoring sites set at railway cuttings showed that the raising of the track during tamping is recovered quite quickly back to a certain level after tamping. In two weeks after tamping the sleeper has been settled 25–45 % lower from the original lift and in three months the settlement is stabilizing to a level of 0.25 mm/month. After two years of monitoring the total settlement of the sleepers is 60–80 % of the original lift. When the age of the railway ballast was considered there was no clear correlation between the stability and age. According to the results the newer more angular ballast is settling slightly faster than the older more rounded ballast.

The theodolite-tacheometric survey used to monitor the vertical deviation of the test sites showed so much uncertainty that the results could not be used to draw exact conclusions. The correlation between the theodolite-tacheometric survey and the track inspection results was also poor. These results rise a question are the theodolite-tacheometric surveys a reliable method for detailed tamping plans. However, when the tacheometer results were compared to single sleeper telltale monitoring results the difference level between the results was acceptable.

The available information collected from the railway ballast and tamping history of the test sites did not give exact numerical values for the extra load caused by tamping, unfortunately the original quality of the ballast was not available. When the two oldest ballast beds were studied, the quality of the ballast indicated a service life of 25–30 years. The tamping history of these oldest ballast beds was different and therefore the cause of fouling could be either bad original quality of the ballast or tamping. The original quality of the older ballast is probably lower than the quality of the newer ones. The collected available history information indicated that the service life of the newer ballast is longer.

The preliminary load modelling results indicated that the poor packing will cause a double dynamic load effect. The extra dynamic load doubles also the load distribution and consequently the load level under a single sleeper might be triple when compared to normal packing situation. This phenomenon will increase the fouling of ballast especially in the irregularity points of the track.

The literature review showed that there are some new methods which could be tested to improve the stability of geometrical conditions. The polyurethane treatment, controlled rounding of the ballast grains and automatic stabilizing sleepers were the potential methods for future testing.

Esipuhe

Tämä tukikerroksen toimintaa käsittelevä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden yksikössä vuosien 2014–2016 aikana. Raportti on Tukikerroksen toimintaa käsittelevän hankekokonaisuuden toinen pääraportti. Työ kuuluu Liikenneviraston rahoittamaan tutkimusohjelmaan Elinkaaritehokas rata (TERA).

Raportin pääkirjoittaja ja DI Pirjo Kuula, lisäksi tutkimukseen ja kirjoitustyöhön ovat osallistuneet tekn.kand. Eveliina Pulkkinen (luku 7), DI Heikki Luomala ja professori Pauli Kolisoja. Liikenneviraston puolesta hankkeessa ovat olleet mukana Erkki Mäkelä, Panu Tolla ja Tuija Myllymäki.

Helsingissä maaliskuussa 2017

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO 11

2 TUKIKERROKSEN TOIMINTAAN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ 13
2.1 Tukikerroksen tehtävä ja toiminta 13
2.2 Raidesepelin vaikutus tukikerroksen toimintaan 15
2.2.1 Raidesepelin laatu ja hienontuminen 15
2.2.2 Raidesepelin hienontumisen mittaaminen 17
2.3 Tukemisen vaikutus raidesepelin kuntoon ja raidegeometrian pysyvyyteen 18
2.3.1 Tukemisen menetelmät ja toteutus 18
2.3.2 Tukemisen vaikutus sepelin hienontumiseen 19
2.3.3 Katsaus viimeaikaisiin kansainvälisiin tutkimuksiin 22
2.4 Puutteellisen tuennan vaikutukset kuormituksiin 26

3 KUORMITUSMALLINNUS 31

4 RANTARADAN KOEKOHTEIDEN MITTAUS- JA TUTKIMUSMENETELMÄT 34
4.1 Mittausten ja koekohteiden seurannan tavoite 34
4.2 Takymetrimittaukset ja tukemisen nuotitus 34
4.3 Siirtymäanturimittaus 35
4.4 Jäykkyysmittaukset ja radantarkastusajot 36
4.5 Raidesepelinäytteenotto ja sepelitutkimukset 37

5 RANTARADAN KOEOSUUDET 38
5.1 Yleistä rantaradasta 39
5.2 Kohde 112+600 – 113+600 41
5.3 Kohde 151+200 – 152+000 42
5.4 Kohde 158+200 – 158+840 43
5.5 Kohde 168+000 - 168+700 45
5.6 Kohde 186+520 – 187+580 46
5.7 Kohde 189+300 – 190+500 48

6 RANTARADAN SEURANTAMITTAUSTEN TULOKSET 50
6.1 Raidesepelitutkimukset 50
6.2 Pystygeometrian kehittyminen 55
6.2.1 Mittaukset tuentahetkellä 55
6.2.2 Takymetrimittaukset 59
6.2.3 Siirtymäanturimittaukset 62
6.2.4 Radantarkastusmittausten tulokset 66
6.3 Jäykkyysmittaukset 71
6.4 Yhteenveto seurantamittauksista 73

7 TUKIKERROKSEN PYSYVYYDEN PARANTAMISMENETELMÄT 75
7.1 Geolujitteet 75
7.1.1 Geoverkko 75
7.1.2 Geokomposiitti 79
7.1.3 Geokenno 80
7.1.4 Yhteenveto geolujitteista 81
7.2 Polyuretaanikäsittely 81
7.3 Pohjain 85
7.4 Stoneblowing 93

7.5 Kaksikerroksinen tukikerros 98
7.6 Muut menetelmät 99
7.7 Suomessa koerakentamiseen soveltuvat menetelmät 101

8 YHTEENVETO 103

LIITTEET
Liite 1 Raidesepelinäytteiden rakeisuuslukutulokset
Liite 2 Takymetrimittausten tulokset
Liite 3 Seurantakohteiden radantarkastusmittausten tulokset

1 Johdanto

Tukikerros on raiteen tasaisuuden ja radan käytettävyyden säilyttämisen kannalta keskeisin radan rakenneosa. Se tukee raidetta, jakaa ratapölkyistä välittyvän kuormituksen alempien rakennekerrosten sallimalle tasolle ja mahdollistaa raidegeometriavirheiden korjaamisen tukemiskoneella. Tukikerroksen toimintaan vaikuttavia tekijöitä on useita, joista voidaan mainita raidesepelin laatu ja kunto, kunnossapitotoimenpiteiden tehokkuus ja luonnollisesti muiden rakenneosien toiminta. Tukikerroksen raidesepeli hienonee ajan myötä sekä liikennekuormituksen että kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksesta.

Toistuvan liikennekuormituksen aiheuttaman raidesepelirakeiden hienonemisen ja rakeiden uudelleenjärjestymisen seurauksena raidesepelin ja ratapölkkyjen välinen kontakti heikentyy varsinkin ratapölkkyjen päiden alueella. Raidesepelin hienonemista tapahtuu koko rataverkolla, mutta erityisesti radan pystysuuntaisen jäykkyyden epäjatkuvuuskohdissa, kuten siltapäädyissä ja vaihteissa, ratapölkyn alle saattaa muodostua jopa tyhjätila.

Tukikerroksen hienonemisen ja uudelleenjärjestymisen sekä alempien rakenneosien pysyvien muodonmuutosten myötä raidegeometrian epätasaisuus kasvaa siten, että raiteen asentoa on korjattava tukemalla. Tukikerroksen kunnon oletetaan vaikuttavan suoraan tukemistyöllä saavutettavissa olevaan lähtötasoon ja ennen muuta tason pysyvyyteen. Hienontuneessa raidesepelissä tuentavaikutus on usein lyhytkestoinen rakeiden uudelleenjärjestymisen ollessa nopeaa. Tällöin tukemistarve on käytännössä jatkuvaa ja ongelman pysyvä korjaus edellyttää tukikerroksen puhdistusta tai vaihtoa.

Tukikerroksen toimintaan liittyvän tutkimuskokonaisuuden tavoitteena on selvittää tukeutumistilanteen ja raidesepelin kunnon heikkenemiseen johtavia ilmiöitä ja tekijöitä. Tutkimuksen ensimmäisessä vaiheessa on perehdytty Suomessa käytössä olevaan tukemiskalustoon ja -käytänteisiin, mistä on julkaistu oma raportti vuonna 2015. Tavoitteena on myös tutkia simuloinnin avulla heikentyneen tukeutumistilan ja raiteen epätasaisuuden vaikutuksia liikkuvan kaluston kokemiin kiihtyvyyksiin. Kenttäkoejärjestelyjen tavoitteena on selvittää raidesepelin kunnon ja tukemistyön vaikutusten pysyvyyden välistä yhteyttä. Kirjallisuuden avulla selvitetään tukeutumistilan heikkenemisen ehkäisemiseen ja tukemistoimien pysyvyyden parantamiseen maailmalla käytettyjä menetelmiä. Yhteenvetona esitetään suosituksia potentiaalisimmiksi nähtyjen parantamisratkaisuiden osalta. Tässä raportissa keskitytään projektin koekohteiden tulosten raportointiin ja tukikerroksen toiminnan parantamismenetelmiin.

Raidesepelin hienontuneisuuden ja tukemistoimien vaikutusten pysyvyyden yhteyttä tutkitaan rantaradalla Kirkkonummi–Turku välille sijoitetuilla koekohteilla. Rantarata valikoitui koekohteeksi, koska siellä kumulatiivinen liikennekuormitus on vakio eri osuuksien välillä. Koeosuudet valittiin siten, että raidesepelin kunto koejärjestelyn alkutilanteessa vaihteli osuuksittain ja kultakin osuudelta tunnettiin ainakin pääpiirteet seulonta- ja tukemishistoriasta. Koeosuudet valittiin kallioleikkauskohteista, koska niissä pohjamaan vaikutus radan geometriaan on oletettavasti pieni.

Koekohteissa toteutettiin laaja näytteenotto vuonna 2014. Koekohteissa raidegeometrian ja tukeutumistilanteen kehittymistä on seurattu kantavaan pohjamaahan tukeutuviin referenssitankoihin perustuvalla ratapölkyn pitkäaikaista pystysuuntaista painumaa kuvaavalla monitorointimittauksella. Lisäksi on toteutettu jatkuvia jäykkyysmittauksia, joilla on seurattu laajemmin koeosuuden ratapölkkyjen tukeutumistilannetta ennen tukemista ja tukemisen jälkeen. Ratapölkkyjen absoluuttista korkeusasemaa tukemisvälin eri vaiheissa on mitattu takymetrimittauksin. Mittaustuloksia verrataan myös raiteentarkastusajoilla saataviin tuloksiin.

2 Tukikerroksen toimintaan vaikuttavia tekijöitä

2.1 Tukikerroksen tehtävä ja toiminta

Tukikerroksen tehtävä on tukea raidetta sivu- ja pystysuunnassa sekä pitää raide geometrisesti oikeassa asennossa ja asemassa. Tukikerros jakaa liikennekuormituksen alusrakenteelle ja muodostaa pölkyille ja kiskoille kantavan alustan. Tukikerroksen mitat määräytyvät sallitun nopeuden, kiskonpituuden, tukikerrosmateriaalin ja pölkkytyypin perusteella. Betoniratapölkkyjä käytettäessä tukikerroksen paksuus on 550 mm.

Tukikerroksen toiminnan heikkeneminen on havaittavissa esimerkiksi radantarkastuksessa, kun raidegeometriaa mitataan säännöllisesti. Raidegeometria mittauksista tuotetaan taulukko- ja käyrämuotoista tietoa. Raidegeometrian kuntoa arvioidaan taulukossa 1 esitettyjen muuttujien avulla. Lisäksi määritellään päällysrakenteen geometrisen kunnon tunnusluku (GKPT) sovittujen periaatteiden mukaan. (Ratahallintokeskus 2004)

Radantarkastustulosten arvioinnissa käytetään seuraavaa kolmiportaista virheluokittelua:

- C-luokka: Virhe on alkava virhe, jonka kehittymistä on tarkkailtava ja virhe on mahdollisesti korjattava.
- D-luokka: Virhe on sisällytettävä kunnossapitosuunnitelmaan ja korjattava saman kunnossapitokauden aikana ennen seuraavaa tarkastusta. Lisäksi D-luokan virheet vaikuttavat mitatun kilometrin virhemetrimäärään.
- *-luokka: Virhe on korjattava välittömästi, ns. ”tähtiluokan” virhe

Radantarkastustulosten perusteella ei välttämättä suoraan löydetä toiminnan heikkenemisen syytä, mutta virheiden perusteella tehdyt kunnossapitotoimenpiteet kohdennetaan usein tukikerrokseen. Yksi merkittävimmistä virheiden syistä on puutteellinen tuenta, joka tarkoittaa tilannetta, joissa ratapölkyt eivät tukeudu tukikerrokseen tasaisesti eli toisin sanoen yksi tai useampi ratapölkky on roikkuva. Roikkuvia pölkkyjä esiintyy esimerkiksi silloin, kun tukikerroksen pinta on epätasainen. Epätasaisuus johtuu epätasaisista muodonmuutoksista, jotka puolestaan ovat peräsin joko epätasaisesta kuormituksesta, tukikerroksesta itsestään tai pohjamaasta, kysymyksessä voi olla myös kaikkien edellä mainittujen yhteisvaikutus (Lundqvist, Dahlberg 2005). Tukikerroksen toiminta heikentyy myös sepelin hienontumisen vuoksi. Myös routiminen tai pohjarakenteisiin liittyvä ongelma voi aiheuttaa toiminnan heikkenemistä.

Useissa tukikerroksen toimintaan liittyvissä tutkimuksissa on keskitytty radan epäjatkuvuuskohdissa tapahtuvan käyttäytymisen monitorointiin ja mallinnukseen. Epäjatkuvuuskohdiksi voidaan määritellä esimerkiksi siltojen päädyt, alikulkutunnelit, tunnelien päätyrakenteet ja erilaisista pohjarakenteista tai -olosuhteista johtuvat epäjatkuvuuskohdat. Myös vaihteiden tai risteysten alueet voidaan lukea epäjatkuvuuskohdiksi. Epäjatkuvuuskohtien vaikutusta syntyviin kuormituksiin on käsitelty

tarkemmin kappaleessa 2.4. Epäjatkuvuuskohtien toimintaa on pyritty käytännössä parantamaan muun muassa erilaisilla siirtymärakenteilla.

Taulukko 1. Raidegeometrian arvioinnissa käytetyt parametrit (Ratahallintokeskus 2005b).

Tunnus	Kuvaus	Huom.
GKPT	Geometrisen kunnon palvelutasoa kuvaava indeksi: lasketaan kaavalla: 100%+(P%-T%)-ET%	P% =15 (sovittu arvo) T% = Tyydyttävien kilometrien määrä ET% = epätyydyttävien kilometrien määrä
KIERR	Kahdesta, toisistaan määritellyllä etäisyydellä sijaitsevasta kohdasta mitattu kiskojen kallistuseroa	Suomessa kierous lasketaan kallistuksen muutosarvoista ja se tulostetaan laskennallisesti 3,5 metrin matkalta.
KALS	Kiskojen kulkupintojen korkeusero	Kallistus mitataan Suomessa mittausvaunun lattiaan kiinnitetyllä gyroskoopilla.
RL	Raideleveys	Raideleveyden nimellisarvo 1524 mm ja vaihteluväli 1514–1559 mm
RLK	Raideleveyden kapenema	
NKV20 tai NKO20	Nuolikorkeus vasemmalle (V) tai oikealle (O). Kiskon suurin sivusuuntainen poikkeamana suorasta mittakannan pituisesta jänteestä.	Tulostetaan tuloksissa matemaattisena nuolikorkeutena 20 metrin jänteellä.
KPV tai KPO	Vasemman tai oikean kiskon korkeuspoikkeama. Kiskon kulkupinnan korkeussuuntainen poikkeama kiskon keskimääräisestä asemasta. Teoreettisen jänteen keskipisteen etäisyys todellisesta kulkupinnasta.	Korkeuspoikkeamat mitataan Suomessa radantarkastusvaunun 12 metrin (5+7 metriä) mittakannalla kummastakin kiskosta, mutta ne tulostetaan 5 metrin mittakannalla. Tarkoittaa kiskon todelliselle kulkupinnalle asetetun viiden metrin mittaisen suoran keskikohdan kohtisuoraa etäisyyttä kiskon todelliseen kulkupintaan.
10000/R	Kaaren muotoa kuvaava suure	Arvon avulla voidaan laskea kaaren todellinen säde.
TQI	Radan geometrian laatuindeksi (Track Quality Index) eli keskihajontaindeksiksi	Suomessa keskihajonta lasketaan 200 m osuuksilla kallistukselle, korkeuspoikkeamille ja nuolikorkeuksille. Suomessa keskihajontaindeksi lasketaan 95 % luotettavuustasolla.

Sallitut raja-arvot taulukon suureille on esitetty kunnossapitoluokittain muun muassa Ratateknisten ohjeiden osan 13 liitteenä.

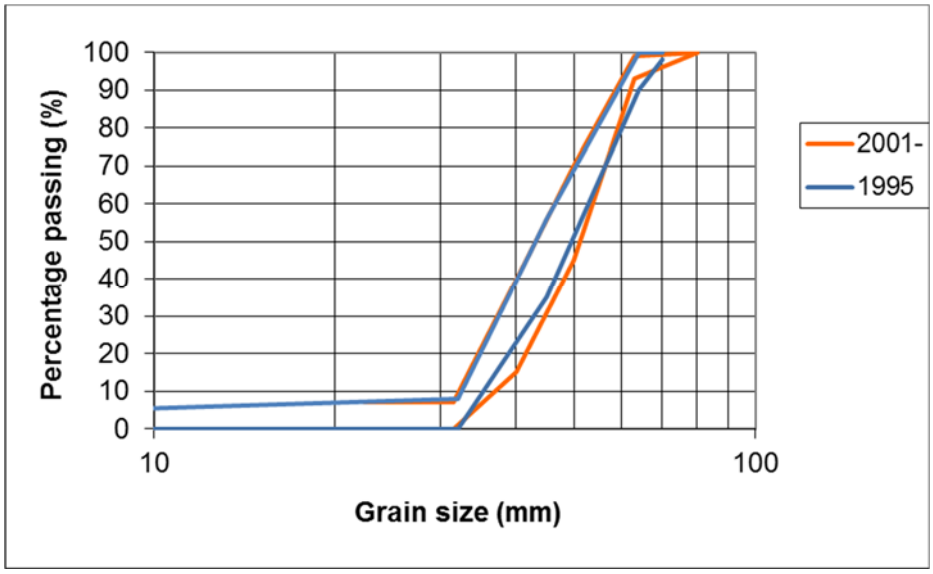
2.2 Raidesepelin vaikutus tukikerroksen toimintaan

2.2.1 Raidesepelin laatu ja hienontuminen

Uuden raidesepelin laatu muodostuu sen geometrisista ja mekaanisista ominaisuuksista. Geometriset ominaisuudet ovat raekokojakautuma ja raemuoto. Mekaanisina ominaisuuksina määritetään iskunkestävyyttä kuvaava Los Angeles-luku ja hiovan kulutuksen kestävyyttä kuvaava micro-Deval-arvo. (Kuula 2015) Raidesepeli on standardin SFS-EN 13450 mukaan CE-merkitty rakennustuote, jonka tuotannon laadunvalvontajärjestelmä on kolmannen osapuolen hyväksymä (AVCP-luokka 2+).

Suomessa käytettävä raidesepeli on rakeisuudeltaan pääosin kuvassa 1 esitetyn luokan F mukaista, mutta myös hienompirakeista sepeliä tai raidesoraa voidaan käyttää vähäliikenteisillä rataosilla. Uudessa F-luokan raidesepelissä 22,4 mm seulan läpäisy on SFS-EN 13450 standardin mukaisissa 0/63 mm rakeisuusluokissa enintään 7 prosenttia. Raidesepelin rakeisuusvaatimukset ovat Suomessa säilyneet vuosikymmenien ajan lähes samanlaisina (kuva 1). Myös raidesepelin muotovaatimukset ovat olleet pitkään samanlaiset eli sepelissä ei saa olla muotoarvoltaan pitkulaisia rakeita yli 20 %, pitkulaiset rakeet ovat sellaisia, joiden pisimmän ja lyhimmän akselin suhde on > 3 (taulukko 2). Suomessa raidesepeli jaetaan lujuuden perusteella kolmeen luokkaan (R1/R2; R3 ja R4) Los Angeles-luvun perusteella (LA_{RB}). Micro-Deval-arvolle on vain yksi vaatimusluokka. (SFS 2003, SFS 2007)

Kun jatkossa tarkastellaan sepelin hienontumista on otettava huomioon, että raidesepelin kestoikään ja valintaan vaikuttavat lujuusominaisuudet on määritetty ennen vuotta 2001 asennettujen sepelien osalta kansallisilla testausmenetelmillä (Taulukko 2). Sepelien luokkamerkinnät ovat myös vuosien saatossa muuttuneet (Kuula 2015). Taulukossa 2 on esitetty kooste sepelin lujuus- ja muotovaatimuksista vuodesta 1987 lähtien.



Kuva 1. *Nykyiset ja vuodelta 1995 olevat pääratojen raidesepelin rakeisuusvaatimukset.*

Taulukko 2. Raidesepelin lujuus ja muotovaatimukset vuosilta 1987–2007. (Kuula 2015).

Ajankohta	Sepelin lujuusluokat	Luokituksen perusteet
1987–1994	Käytössä vain yksi vaatimusluokka Haurausarvo (HA) 22 Jälkeenpäin vanhojen sepelien osalta uudestaan, koska mini-rapsuissa esiintyy vuoden 1987 sepelin kohdalla esimerkiksi luokka R3.	Laboratoriossa murskatusta materiaalista testattu haurausarvo (HA) 22, hioutuvuusluku 2,7, muotoarvo/litteys enintään 15–20 % litteitä tai pitkulaisia rakeita. (Harjula 1990)
1995–2000	R1 (HA <10 ja KM < 8) R2 (HA<12 ja KM<10) R3(HA<15 ja KM<12) R4(HA<18 ja KM<14)	Laboratoriossa murskatusta materiaalista testattu haurausarvo, hioutuvuusluku tai kuulamylly (KM). Testatun murskeen muoto-ominaisuudet vaikuttivat lopulliseen luokkaan. Tuotteessa saa olla puikkoisia rakeita enintään 20 % (VR 1995)
2001–	R1/R2 ($LA_{RB}12$ ja KM<14) R3 (LA_{RB} 16 ja KM<14) R4 ($LA_{RB}20$ ja KM < 14)	Valmiista sepelistä tehty Los Angeles testi (LA_{RB}) ja muoto-arvo (SI), laboratoriossa murskatusta tehty kuulamylly-testi (KM). Siirtymäkaudella tehtiin myös micro-Deval testejä, mutta ei vielä asetettu luokkavaatimusta. Muotoarvo SI_{20}. (Ratahallintokeskus 2001)
2005–2006	R1/R2 ($LA_{RB}12$ ja $M_{DE}RB11$) R3 ($LA_{RB}16$ ja $M_{DE}RB11$) R4 ($LA_{RB}20$ ja $M_{DE}RB11$)	CE-merkintä määrättiin pakolliseksi. Kuulamyllytestin tilalle sepelilajitteesta tehtävä micro-Deval testi ($M_{DE}RB$). (Ratahallintokeskus 2005c)
2007–	R1/R2 ($LA_{RB}12$ ja $M_{DE}RB11$) R3 ($LA_{RB}16$ ja $M_{DE}RB11$) R4 ($LA_{RB}20$ ja $M_{DE}RB11$)	Kansallinen soveltamis-standardi. (SFS 2007)

Suomen rataverkolla käytössä olevien sepeleiden ikä vaihtelee melko paljon vanhimpien sepeleiden ollessa 1960-luvulta. Pääradoilla käytettävän R1/R2-luokan sepeli on pääosin asennettu 1990-luvun alkupuolen jälkeen eli sepelin ikä on enintään 25 vuotta. Luokan R3 ja R4 sepeleiden ikähaarukka on laajempi alkaen aina 1960-luvulta nykypäivään. Kuten taulukosta voidaan havaita, vanhimpien sepeleiden vaatimukset ovat olleet täysin erilaiset kuin nykyisin. Vanhimpien jopa 1960-luvulla asennettujen sepeleiden lujuusvaatimuksista ei ole enää saatavissa tarkkoja tietoja, mutta ne on valittu silloisen parhaan geologisen ja teknisen asiantuntemuksen mukaan.

Sepeliluokan valinta eri rataosille tehdään liikennemäärän ja hankinnan elinkaari-kustannuksiin perustuvan laskentamallin perusteella. Periaatteena on kuitenkin, että R1/R2 sepeliä käytetään raskaimmin liikennöidyillä rataosilla (liikennemäärä > 9 milj. brt/v), jolloin sepelin käyttöikä tonneissa mitattuna olisi 350 Mbrt. Luokan R3 sepelin käyttöikä on 250 Mbrt ja sepeliluokassa R4 käyttöikä on 150 Mbrt. Nykyiset valintaperusteet perustuvat alun perin Nurmikolun (2000) tutkimuksessa käytettyihin

vuoden 1995 lujuusvaatimuksiin. Valintaperusteita on päivitetty raidesepelin testausmenetelmien ja lujuusluokkien muutosten myötä. (Ratahallintokeskus 2005a) Valintaperusteissa on hyödynnetty myös rakeisuuslukututkimuksia 1960- ja 1970-luvuilla asennetuista tukikerroksista, jotka todennäköisesti ovat hienontuneet eri tavalla kuin nykyisten vaatimusten mukaiset sepelit. Nykyisten laatuvaatimusten mukaisia sepeleitä on käytetty noin 20 vuotta. Vuosina 1995–2001 käytetyt vaatimukset olivat jopa tiukempia kuin nykyiset, koska lujuusominaisuudet testattiin laboratoriossa murskatusta tuotteesta.

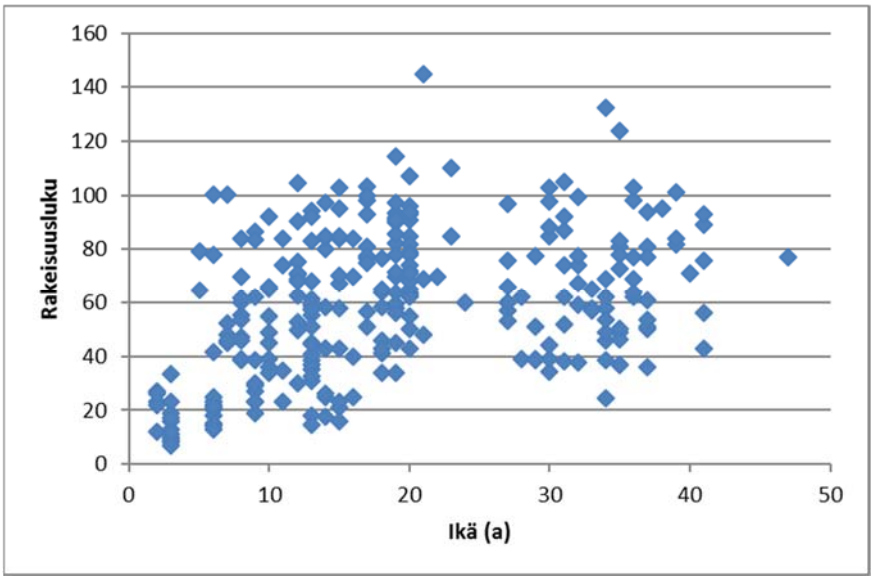
2.2.2 Raidesepelin hienontumisen mittaaminen

Suomessa raidesepelin kuntoa voidaan seurata ottamalla näytteitä ja tutkimalla näytteistä rakeisuusluku, joka määritetään laskemalla yhteen 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosentit (Ratahallintokeskus 1997). Jos rakeisuusluku ylittää raja-arvon 88, sepeli on vaihdettava tai seulottava (Ratahallintokeskus 2002). On myös esitetty, että sepelin laadun arvioinnissa käytettäisiin rakeisuusluvun sijaan 1 mm ja 8 mm seulojen läpäisyprosentin summaa hienontuneisuutta kuvaavana parametrina. P1+P8-parametrin käyttöä on perusteltu muun muassa sen riippumattomuudella alkuperäisestä raekokojakautumasta. Lisäksi rakeisuusluvun laskennassa käytetty 25 mm seulan läpäisyprosentti on erittäin herkkä näytteenoton virheille, esimerkiksi yksi 25 mm rae voi muuttaa rakeisuuslukua 4 yksikköä. P1+P8 parametrin rakeisuuslukua 88 vastaava raja-arvo on 35 ja erittäin hyvällä raidesepelillä parametrin arvo on < 10. (Nurmikolu 2005)

European Rail Research Instituten (ERRI) suosituksissa käytetään raidesepelin hienontumisen kuvaamiseen termiä ”soiling level”, joka on 22,4 mm seulan läpäisyprosentti. Sepelin puhdistus pitäisi aloittaa, kun läpäisyarvo on tasolla 30–40 %. (Esveld 2001) Pohjoisamerikkalaisten tutkimusten mukaan hienontumista kuvaa parhaiten Seligin kehittämä indeksi, jossa lasketaan 4,75 ja 0,075 mm seulojen läpäisyprosenttien summa. Sepeliä pidetään hienontumattomana, jos indeksin arvo on < 10, vastaavasti erittäin hienontuneen sepelin indeksi on yli 40. (Selig, Waters 1994) Useat tutkijat ovat kehittäneet sekä laboratoriotutkimusten että käytännön kokeiden tuloksiin perustuvia omia hienontumisindeksejä, esimerkkejä löytyy muun muassa lähteestä (Indraratna, Salim & Rujikiatkamjorn 2011).

Jos tukikerroksen toimintaa parannetaan seulomalla, rataan palautetun sepelin laatua ei yleensä tutkita. Koko tukikerroksen sepelin laatu voi olla oletettua heikompi, vaikka lisäsepeli on täyttänytkin laatuvaatimukset eli koko tukikerroksen toiminnan kannalta on saatettu heikentää tilannetta. Nurmikolun ja Kolisojan (2010) tutkimuksessa ei kuitenkaan saatu selkeää tulosta uuden lisäsepelin kuluttavuutta lisäävästä vaikutuksesta, vaikka viitteitä siihen suuntaan saatiinkin joissakin tutkituissa tapauksissa.

Suomessa toteutettiin 1990-luvun lopulla laaja raidesepelin käyttöikätutkimus, jonka perusteella suositeltiin sepelin vaihtoja eri rataosille. Käyttöikätutkimus perustui rakeisuuslukujen määrittämiseen. Kuvassa 2 on esitetty rakeisuuslukututkimusten tuloksia. Tiedot on saatu VR Track Oy:n arkistosta ja kerätty opinnäytetöistä.



Kuva 2. *Rakeisuusluvun ja raidesepelin iän välinen suhde. Tiedot on kerätty VR Track Oy:ltä saaduista aineistoista ja TTY:llä toteutetuista opinnäytetöistä.*

Kuvasta 2 voidaan havaita, että hyvin vähän aikaa radassa olleet sepelit voivat hienontua puhdistusrajalle (88) ja vastaavasti yli 30 vuotta tukikerroksessa ollut sepeli voi olla erittäin vähän hienontunutta. Nurmikolun (2000) tutkimuksen mukaan rakeisuusluvun keskivirhe on melko pieni 4,4, vaikka yksi kiviainesrae 25 mm seulalla voi muuttaa rakeisuuslukua jopa 4 yksikköä. Toki näytteenotosta voi aiheutua merkittäviäkin virheitä. Havaintoja rantaradalla tapahtuneesta sepelin hienontumisesta käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.1.

Ainetta rikkomattomien menetelmien kuten maatutkan käyttö tukikerroksen laadun arvioinnissa on mahdollista, kuten jo vuonna 2010 julkaistussa tutkimuksessa on osoitettu. (Silvast et al. 2010) Maatutkamittausten tuloksia käsitellään rantaradan monitorointitulosten yhteydessä.

2.3 Tukemisen vaikutus raidesepelin kuntoon ja raidegeometrian pysyvyyteen

2.3.1 Tukemisen menetelmät ja toteutus

Tukemisen avulla radan geometria palautetaan valittuun tavoitetasoon. Tukemistyön tarve todetaan esimerkiksi radantarkastusmittausten perusteella, lisäksi uudisrakennus- ja parantamiskohteissa raide saatetaan oikeaan tasoon tukemalla. Korkean kunnossapitotason radoilla tehdään tuentaa suunnitelmallisesti. Tukeminen perustuu raiteen nostoon ja sepelitukikerroksen uudelleen järjestäytymiseen ja tiivistymiseen. Noston minimiarvo on 20 mm ja maksimiarvo 70 mm. Tunnisen (2015) mukaan tukemistyön kannalta ajantasaisen raidegeometriatiedon saatavuus koko verkon kattavasti on ajoittain haastavaa. Liikenneviraston toimeksiannosta ollaan laatimassa tukemiseen uutta ohjeistusta, joka julkaistaneen lähitulevaisuudessa. (Tunninen 2015)

Tuennan työmenetelmät jaetaan suhteelliseen menetelmään ja tarkkuusmenetelmään. Suhteellinen menetelmä on tukemisen työmenetelmä, joka perustuu tukemiskoneen omaan mittakantaan. Suhteellista menetelmää käytetään tyypillisesti silloin, kun radan olemassa olevaa geometriaa ei ole haluttu tai ehditty selvittää etukäteen ennen tukemistyötä. Menetelmää käytetään myös silloin, kun raiteen absoluuttisen geometrisen aseman virheet ovat vähäisiä ja tukemistyön pääpaino on raiteen asennon virheiden korjaamisella. Suomessa suhteellista menetelmää voidaan käyttää pistemäisiin kunnossapitotuentoihin. Tarkkuusmenetelmää käytettäessä tukemistyö tehdään ennakkoon tehdyn nuotituksen mukaisesti. Tyypillisimmät tarkkuusmenetelmän käyttökohteet ovat korkeampiluokkaisten ratojen kunnossapidon työt, joilla korjataan raiteen asemassa olevia suuria virheitä sekä esimerkiksi radan perusparannukseen tai uudisrakentamiseen liittyvät raiteen aseman muutostyöt. Vaihteet tulisi aina tukea tarkkuusmenetelmää käyttäen. (Peltokangas&Nurmikolu 2015)

Kunnossapidossa tukemistavat voidaan luokitella läpituentaan ja kunnossapitotuentaan, läpituenta tarkoittaa minimipituudeltaan 200 m yhtäjaksoista tukemistyötä ja kunnossapitotuenta radan tarkastuksissa (yleensä < 200 m) havaittujen virheiden korjaamista. (Tunninen 2015) Tunnisen (2010) mukaan läpituentatavalla tehtävän tukemistyön tavoitteena tulee aina olla yhtenäisen, suunnitellun raidegeometrian saavuttaminen. Läpituentatarpeen määrittämisen tulee aina perustua yhteen tai useampaan seuraavista tekijöistä:

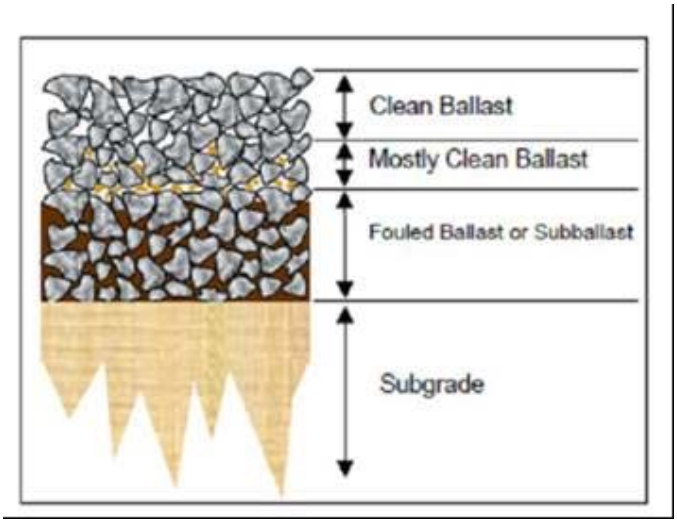
- Keskihajontaindeksien osoittaman raidegeometrian vaihtelun aiheuttama tarve tukemistyölle korkean kunnossapitotason radoilla
- Rataosalla on huomattavasti alkavaa systemaattista virhettä, kuten esimerkiksi kehittyviä kallistusvirheitä kaksiraiteisilla rataosilla
- Selkeä tarve muodostaa rataosalle yhtenäinen raidegeometria esimerkiksi rataosalla, jossa on tehty paljon tukemistöitä suhteellisella menetelmällä ja geometria on päässyt ”vaeltamaan”
- Tarve varmistaa rataosan laajuudessa betoniratapölkyille yhtenäinen tukeutumispinta-ala ja tukikerroksen tasalaatuinen kuormituskäyttäytyminen. (Tunninen 2010)

Tukemisen teoriaa, tukemiseen käytettävää kalustoa ja menetelmiä on esitelty tarkemmin muun muassa Liikenneviraston raportissa 23/2015 (Peltokangas & Nurmikolu 2015).

2.3.2 Tukemisen vaikutus sepelin hienontumiseen

Tukikerroksessa olevan raidesepelin laatua ei Suomessa järjestelmällisesti seurata mittauksin, vaan radantarkastusmittaukset kuvaavat myös osittain tukikerroksen kuntoa. Tukemistarve määräytyy näin ollen radan kunnossapitäjän tekemien tarkastusten ja radantarkastusvaunujen tuottamien geometrista kuntoa kuvaavien mittaustulosten perusteella. Radan geometrisen kunnon tavoitetaso määritellään yleensä kunnossapitosopimuksissa, joissa käytetään myös radantarkastustulosten keskihajontaindeksejä pitkäjänteisempää tarkastelua varten. (Tunninen 2015)

Tukemisen aiheuttamaa raidesepelin hienontumista pidetään yleisesti liikennekuormituksen lisäksi merkittävimpänä sepelitukikerroksen kuntoon ja käyttöikään vaikuttavana tekijänä. Kuvassa 3 on havainnollistettu sepelin periaatteellista hienontumista ja kuvassa 4 on havainnollistettu sepelin hienontumista todellisessa tilanteessa. Esveldin (2001) mukaan yksi tukemiskierros vastaa 20 MBrt liikennekuormaa. Tukikerroksen kunnon seuranta ja monitorointi on haastava tehtävä, koska uusi sepelirakenne on jäykkä eli muodonmuutokset ovat pieniä ja pääosin palautuvia, mutta sepelin ikääntyessä raemuoto muuttuu ja syntyy hienoainesta (kuva 4), mikä lisää muodonmuutoksia ja aiheuttaa näin ollen myös lisäkuormitusta muille päällysrakenteen osille. Tästä johtuen kunnossapitotoimenpiteidenkin tehokkuus laskee, koska pyöristyneet rakeet palautuvat nopeasti samaan asemaan kuin ennen kunnossapitoa. Esveld (2001) toteaa radan geometrian muuttumisen olevan hyvä indikaatio sepelikerroksen kunnosta, vaikka radan muut rakenteet (esim. sillat), alemmat rakennekerrokset ja pohjamaa sekä päällysrakenteen muut osat vaikuttavatkin omalta osaltaan radan geometriseen kuntoon. (Esveld 2001)

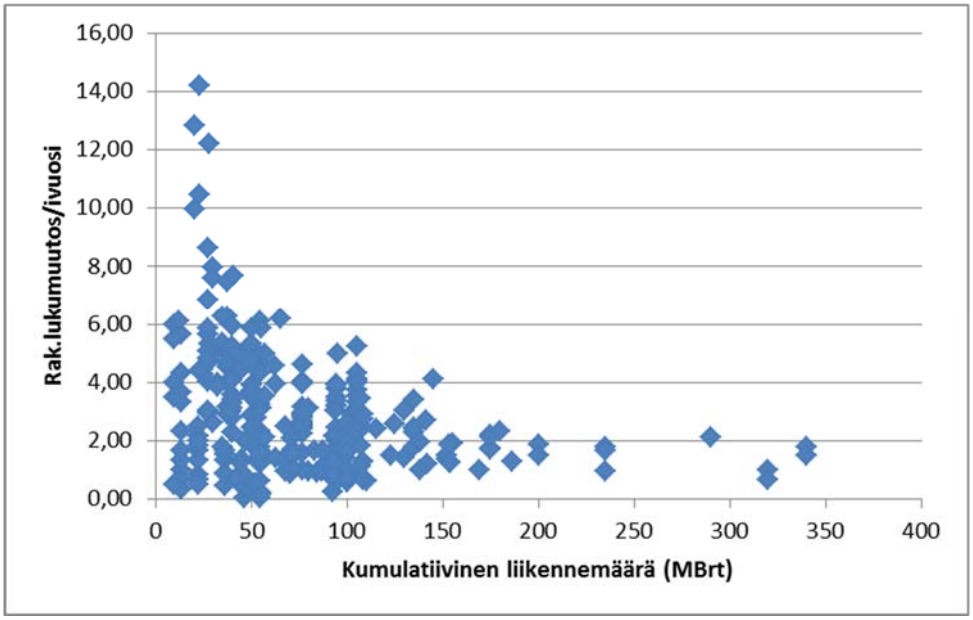


Kuva 3. *Periaatekuva tukikerroksen hienontumisesta*. (Perales et al. 2011)

Kuva 4. *Pakkaantunutta ja hienontunutta sepeliä risteysalueella Vinnilän liikennepaikalla lokakuussa 2015. (Heikki Luomala 2015)*

Tukemisen tukikerrosta hienontavasta vaikutuksesta on tehty Suomessakin joitakin tutkimuksia, joissa on todennettu esimerkiksi useiden peräkkäisten tuentahakkujen upottamisen hienontavan suurimpia rakeita (40–50 mm). Tutkimusten mukaan esimerkiksi 20 kertaa upotetut tuentahakut lisäävät myös hienon kiviaineksen määrää useita prosenttiyksikköjä. Nurmikolun jo vuonna 2000 tekemän selvityksen mukaan runsaasti tuetuilla rataosilla raidesepeli hienonee 20 % enemmän kuin vähän tuetuilla osuuksilla. (Nurmikolu 2000) Myös myöhemmissä tutkimuksissa on todettu sama ilmiö (Nurmikolu 2005; Nurmikolu&Kolisoja 2010). Tutkimustulokset tukevat sepelin hienontumisen lineaarista luonnetta, tosin tutkimuksissa on todettu elinkaaren ensimmäisten vuosien aikana hienontumisen olevan suurempaa, koska kiviaineksen muoto paranee, eikä rikkoutuvia särmiä ole enää jäljellä. Kuvassa 5 on esitetty rakeisuusluvun muutosnopeus suhteessa kumulatiiviseen liikennekuormitukseen. Kuvasta voidaan havaita edellä mainittu muutosnopeuden hidastuneen kuormituksen lisääntyessä. Kuva 5 on koottu VR Track Oy:lta saadusta aineistosta ja TTY:llä toteutetuista opinnäytetyöaineistoista.

Nurmikolun ja Kolisojan (2010) havaintojen mukaan sepelinpuhdistuksen jälkeen rataan palautettavan sepelin rakeisuusluku pieneni arvoon 8, mutta alkutuennan jälkeen sepeli hienoni nopeasti erityisesti pölkkyjen päiden alapuolella. Alkutuentojen jälkeen voitiin havaita tukikerroksen pohjalla rakeisuuslukujen arvojen vaihtelevan 19–25 välillä. Näin ollen on selvää, että alkutuenta ja ensimmäiset junan ylitykset hienontavat raidesepeliä voimakkaasti. Osittain edellä mainittu käyttäytyminen johtuu siitä, että sepelinpuhdistuksessa vanha sepeli sijoittuu kriittisille alueille pölkkyjen päiden alle ja uusi täydennyssepeli jää pääasiassa raiteen keskelle. Tutkimuksessa havaittiin myös palautuvan muodonmuutoksen osalta hienontuneen ja huokostilaltaan tukkiutuneen tukikerroksen lisäävän palautuvaa joustoa junakuorman alla. (Nurmikolu & Kolisoja 2010)



Kuva 5. *Rakeisuusluvun muutosnopeus suhteessa kumulatiiviseen liikennemäärään. Tiedot on kerätty VR Track Oy:ltä saaduista aineistoista ja TTY:llä toteutetuista opinnäytetöistä, aineisto on sama kuin kuvassa 2.*

Käytännössä tukemisen vaikutusten seuranta on kuitenkin erittäin haastavaa, koska tietoja ei kerätä järjestelmällisesti mihinkään rekisteriin. Esimerkiksi Tunnisen (2015) mukaan tukemistyön suoritetietojen kerääminen yhteiseen rekisteriin samoin kuin geometriarekisterin kehittämisen olevan erittäin tärkeitä lähiajan kehityskohteita. Näin mahdollistuisi muun muassa tukikerroksen elinkaaren tarkempi seuranta ja ennakoiva kunnossapito.

2.3.3 Katsaus viimeaikaisiin kansainvälisiin tutkimuksiin

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi tukemisen sepeliä rikkovaan vaikutukseen liittyviä viimeaikaisia kansainvälisiä tutkimuksia. Laboratoriomittakaavassa tukemisen vaikutusta on tutkittu Aursudkijin (2007) väitöskirjassa. Tutkimuksessa käytettiin pinta-alaltaan 2*4 m ja syvyydeltään 2 m kiinteäseinämäistä betonilaatikkoa, johon oli asennettu myös ratapölkyt. Tukikerrosmateriaalia (300 mm tai 445 mm kerros) kuormitettiin syklisesti ja rakennetta tuettiin kuvan 6 mukaisella tukemiskalustolla. Tukemisessa käytettiin 20 mm nostoa. Koejärjestelyssä mitattiin pölkkyihin kohdistuvaa kuormitusta, pölkkyjen painumista, alusrakenteen yläpinnan jännitystilaa ja sepelin alla olevan kerroksen muodonmuutoksia. Alusrakenne oli silttiä. Sepelin ja siltin väliin asennettiin geosynteetti, jotta sepelistä irtoava kiviaines voitiin ottaa talteen. Rakennetta kuormitettiin kolmella erilaisella testisarjalla, joissa tukemiskertojen väli oli pääosin miljoona kuormitusykliä. Kokeissa käytettiin graniittia ja kalkkikiveä. Kokeiden tulosten perusteella todettiin tukemisen rikkovan sepeliä. Kiviaineksen mekaaniset indeksiominaisuudet mitattuna LA- ja MD-arvoina korreloivat tukemisen aiheuttaman hienontumisen kanssa. Tulosten mukaan tukemisen toteutuksessa puristus aiheutti vähemmän hienontumista kuin tukemishakkujen upottaminen tukikerrokseen. (Aursudkij 2007)

Kuva 6. *Laboratoriokoejärjestely tukemisen vaikutuksen tutkimiseksi.* (Aursudkij 2007)

Tukemisen vaikutuksia raidesepelin raemuotoon ja hienontumiseen on tutkittu Ranskassa tehdyssä kenttäkokeessa, jossa ratarakenteeseen asennetuissa suursäkeissä olevaa sepeliä tuettiin yhteensä 45 kertaa. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että tukemisen seurauksena rakeet, joiden koko oli suurempi kuin 50 mm rikkoutuvat eniten. Tutkimuksen mukaan raekooltaan 35,5–50 mm rakeiden osuus kasvoi ja kokonaan uusien rakeiden koko oli keskimäärin 25 mm. Tutkimuksessa ei kuitenkaan havaittu hienoaineksen määrän merkittävää lisääntymistä, mihin lienee vaikuttanut myös artikkelin kuvien (kuva 7) mukaan kuivat koeolosuhteet ja liikennekuormituksen puute. Myöskään rakeiden kulmikkuus ei muuttunut tukemisen aikana merkittävästi. (Perales et al. 2011)

Kuva 7. Sepelin hienontumistutkimuksen koejärjestelyt Ranskassa (Perales et al 2011).

Iranissa Teheranin ympäristössä on tutkittu stabilisaattorin vaikutusta 15 km pituisella koeosuudella. Koeosuuksilla käytettiin pelkkää tuentaa sekä tuentaa ja stabilisaattoria. Radan kuntoa mitattiin geometriasuureisiin ja niiden keskihajontoihin perustuvien indeksien avulla. Tutkimuksen tuloksena todettiin, että stabilisaattorin vaikutusta geometrian pysyvyyteen ei havaittu 8 kuukauden mittaisena seuranta-aikana. (Jadidirendi, Zakeri & Teng 2015)

Radan vaurioitumista on yritetty mallintaa jo vuosikymmenten ajan radan geometria-tietoon perustuvan matemaattisen ja tilastollisen mallinnuksen avulla. Tarkastelujen tuloksena on esitetty muun muassa kaarresäteen, pölkkytyypin, kiskotyypin ja liikenteen nopeuden vaikutuksia geometrian muuttumiseen. Eri aineistoihin ja tilastollisiin tarkasteluihin perustuen on saatu myös keskenään ristiriitaisia tuloksia, esimerkiksi vuosittaisen liikennemäärän kasvun on osoitettu sekä vähentävän että lisäävän vaurioitumisnopeutta. (Audley&Andrews 2013)

Useat tutkijat ovat todenneet, että geometrian korjaamisen tehokkuuteen vaikuttaa kaikkein merkittävimmin ennen korjausta tai kunnossapitoa havaittu radan kunto. Myös kunnossapitotoimenpiteiden määrän on todettu olevan merkittävä tekijä. Yhteenvetona voidaan todeta, että radan geometrian kehittymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat ympäristöolosuhteet kuten sää, liikenteen kuormitus ja nopeus, käytetyt materiaalit ja menetelmät sekä kunnossapitohistoria. Käytetty kunnossapitotekniikka on yhdistelmä saatavilla olevasta kalustosta, kunnossapitohistoriasta ja kunnossapito-insinöörin henkilökohtaisista mieltymyksistä menetelmän valinnan suhteen. (Audley & Andrews 2013)

Isossa-Britanniassa on tehty tutkimus tukemisen vaikutuksesta radan geometriaan analysoimalla kuuden vuoden aikana tehtyjä geometriamittauksia ja kunnossapito-toimenpiteitä. Tuloksia on käsitelty tilastollisesti käyttämällä Weibullin jakautumaan perustuvaa analyysiä, jota käytetään usein myös erilaissa elinkaari-, vikaantumis- ja luotettavuusanalyyseissä. Tutkimuksessa on käsitelty tukemisen vaikutusta 35 m aallonpituudella mitattuun pystysuuntaiseen tasaisuuteen. Kerättyä dataa analysoi-malla löydettiin 11000 erilaista heikkenemistyyppiä, joita analysoimalla päädyttiin lineaariseen malliin. Luotettavuusanalyysissä verrattiin useita erilaisia jakautumia ja parhaat sovitukset saatiin kolmi- ja kaksiparametrisella Weibullin jakautumalla. (Audley&Andrews 2013)

Audleyn ja Andrewsin (2013) analyysien perusteella tehtiin seuraavat johtopäätökset: Weibullin jakautuma sopii parhaiten kuvaamaan radan kunnon kehittymistä. Weibullin parametreihin vaikuttivat nopeus, kunnossapitohistoria ja vaadittu kunnossapitotaso. Jakaumassa esiintyvä elinikää tai käyttöikää kuvaava parametri pieneni tukemiskertojen lisääntyessä, mikä osaltaan myös todistaa tukemisen rikkovan sepeliä ja näin ollen lisäävän geometrian heikentymisnopeutta. Käytännössä tukemiskertojen lisääntyessä on entistä vaikeampi päästä pieniin pystysuuntaisen tasaisuuden keskihajontoihin. Tutkimuksessa käsiteltiin vain kaksi tuentakierrosta tukikerroksen uusimisen jälkeen. Esimerkkinä tutkijat esittävät, että kymmenessä vuodessa 63,2 % rataosista, joilla nopeus on 115–125 mailia/h on muuttunut laadultaan heikommaksi kuin ”hyvä”. Vastaavat rataosat, joilla on tehty kaksi tuentaa muuttuvat laadultaan samaan tilaan kahdeksassa vuodessa. Weibullin jakautuman muotoa kuvaava parametri kasvaa, kun geometrinen kunto heikkenee eli mitä enemmän rata heikkenee, sitä nopeammin heikkeneminen tapahtuu. Tulosten perusteella havaittiin myös, että liikenteen nopeuden kasvaessa tarvitaan enemmän kunnossapitoa, jotta voidaan säilyttää hyväksyttävä kuntotaso. Tutkimuksen tulokset vahvistivat edelleen käsitystä tukemisen aiheuttamasta sepelin hienontumisesta. (Audley&Andrews 2013)

Tukemista on mallinnettu DEM-menetelmällä viime vuosina useissakin eri tutkimuksissa käyttäen erilaisia mallinnusohjelmistoja (muun muassa Zhou et al. 2013, Saussine et al. 2008, Tutumluer et al. 2006) DEM-menetelmän on todettu soveltuvan tukemisen simulointiin. Koska tukemisen käytännön toteutuksen teoreettinen perusta on haastava esimerkiksi tuentasyvyyden suhteen, mallien validointi on vielä tulevaisuuden haaste (Peltokangas&Nurmikolu 2015)

Kokeelliset mittaukset ovat osoittaneet, että päällysrakenteen vaakasuuntainen vastus pienenee sepelin puhdistamisen ja tukemisen vuoksi. Raidesepelin stabilointi voidaan tehdä stabilisaattorilla tai voidaan odottaa alennetulla nopeudella kulkevan liikenteen stabiloivaa vaikutusta. Puolalaisessa tutkimuksessa on mitattu tukemisen aikana kiskojen ja pölkkyjen siirtoon tarvittavan vaakasuuntaisen voiman ja siirtymän suuruutta. Mittaukset toteutettiin optisesti suhteessa tukemiskoneen alustaan sijoitettuun kiintopisteeseen. Menetelmää validoitiin ensin testialueella ja sen jälkeen tehtiin mittauksia normaalin tukemistyön yhteydessä. Testialueella tehtyjen mittausten perusteella saatiin käsitys mitattavien voimien suuruudesta ja pystyttiin vertaamaan tukemiskoneesta mitattuja voimia todellisiin kiskoista mitattuihin voimiin ja siirtymiin. Testialueen mittaustulokset osoittivat, että mittausjärjestelmä toimii. Normaalin tukemistyön aikana tehdyt mittaukset osoittivat mittausjärjestelmän toimivan, mutta sitä pitää vielä kehittää. Myös tulosten analysointijärjestelmää on vielä kehitettävä. (Koc et al. 2011)

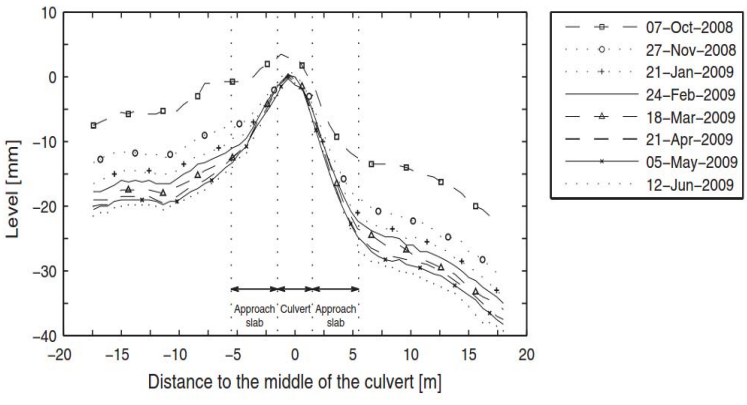
Koc ja Wilk (2009) ovat tutkineet myös kiskoissa esiintyvien pysty- ja pitkittäisvoimien mittaamista tukemisen aikana. Mittausjärjestelmä on toteutettu samalla periaattella kuin edellä esitetty vaakasuuntaisen vastuksen mittaus eli menetelmä validoitiin testialueella, jonka jälkeen sitä testattiin normaalin tukemistoiminnan aikana. Kokeilun tulokset osoittavat mittausmenetelmän olevan kohtuullisesti toimiva, mutta vaativan vielä lisää tutkimusta. (Koc&Wilk 2009)

Tukemisen on todettu alentavan ainakin hetkellisesti myös ratapölkyn ja tukikerroksen aikaansaamaa sivuttaisvastusta. Tuennan arvioidaan alentavan vastusta 40–50 % täysin tiiviiseen tukikerrokseen nähden. (Lichtberger 2007)

Isossa-Britanniassa on toteutettu monitorointihanke, jossa on tutkittu tasoristeysten käyttäytymistä liikennekuormituksessa pölkkyihin asennettujen geofonien ja digitaalisen videokuvauksen avulla (kuva 8). Tutkimuksessa hyödynnettiin myös radantarkastusmittausten tuloksia. Tutkimustulokset osoittivat, että in-situ mittausten avulla pystyttiin tunnistamaan kunnossapidon, kuten tukemisen ja sepelin vaihdon vaikutuksia radan tuentatilanteeseen. Tulosten perusteella havaittiin, että tukeminen ei poistanut roikkuvien pölkkyjen ongelmaa tasoristeysalueilta. Tutkijat ehdottavat asemaansa korjaavien pölkkyjen koekäyttöä tasoristeysalueilla, koska rutiininomaisella kunnossapidolla risteysalueiden roikkuvia pölkkyjä on vaikea korjata. (Le Pen et al. 2014)

Kuva 8. *Pölkyn liikkeiden monitorointia geofonien ja digitaalisen kuvauksen avulla.* (Le Pen et al. 2014)

Hollannissa tehdyssä monitorointitutkimuksessa mitattiin pölkkyjen liikkeitä alikulkusillan aiheuttamassa epäjatkuvuuskohdassa. Tutkimuksessa seurattiin alikulkusillan alueella syntyviä pystysuuntaisia muodonmuutoksia yhden kunnossapitosyklin aikana. Kunnossapitotuennan jälkeen pölkyt painuivat kuvassa 9 esitetyn mukaisesti. Kuvasta 9 voidaan havaita, että ensimmäisen kuukauden aikana tapahtuva muodonmuutos on lähes puolet koko kahdeksan kuukauden jakson aikana tapahtuvasta muodonmuutoksesta. Suurimmillaan pystysuuntaiset muodonmuutokset olivat lähes 20 mm 8 kuukauden aikana. (Coelho et al. 2011)



Kuva 9. *Alikulkusillan ympäristössä havaitut tukemisen jälkeiset pystysiirtymät* (Coelho et al. 2011)

Radan epäjatkuvuuskohtien vaikutus sekä ratarakenteen jäykkyyteen että kuormitusten aiheuttamiin muodonmuutoksiin ja näistä johtuviin toistuviin kunnossapitotoimenpiteisiin on jatkuva ongelma kaikkialla maailmassa. Epäjatkuvuuskohdissa vaikuttaa kaksi merkittävää ilmiötä: radan jäykkyyden muuttuminen radan rakenteissa käytettävien erilaisten materiaalien ominaisuuksista johtuen ja täyttöjen sekä perustusten muodonmuutokset suhteessa esimerkiksi siltarakenteisiin (Sañudo et al. 2016) Ongelmat johtuvat sekä radan rakenteellisista ongelmista että pohjaolosuhteiden vaihtelusta. Sanudon (2016) mukaan roikkuvien pölkkyjen ongelmia esiintyy erityisesti siltojen päädyissä. Jäykkyyden lisääntyminen pienentää muodonmuutoksia, mutta voi lisätä dynaamista kuormitusta ja näin ollen lisätä sepelin ja pölkkyjen kulumista ja väsymistä.

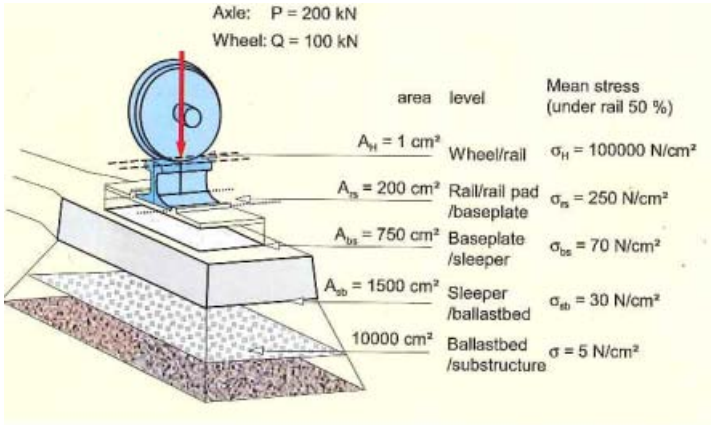
Epäjatkuvuuskohdissa tapahtuvalle rakenteen heikentymiselle voidaan Sanudo et al (2016) mukaan esittää primäärisiä ja sekundäärisiä syitä. Primäärisiä syitä ovat jäykkyyden epätasainen vaihtelu, geotekniset syyt kuten maapohjan vaurioitumisherkkyys, leikkausmurtuma tai jatkuvasti lisääntyvä pysyvä muodonmuutos ja rakenteen vedenherkkyys (kuivuminen ja kastuminen). Suomessa listaan voidaan lisätä myös pakkasenkestävyys ja routivuus. Sekundäärisiä vaurioitumisen syitä ovat akselipaino, penkereen korkeus, perustusrakenteet, junan nopeus ja epäjatkuvuuskohdat kuten esimerkiksi siltapäädyt. Sanudo et al (2016) ovat koonneet yhteenvedon niistä menetelmistä, joiden avulla voidaan suunnitella parempia siirtymärakenteita. On kuitenkin todettava, että erilaisista rakenneosista muodostuvan ratarakenteen, perustusten ja liikenteen muodostama kompleksinen yhteistoiminta on hankala mallinnettava, eikä yhtä parannusratkaisua ole olemassa. Paras ratkaisu voi muodostua erilaisista päällys- ja alusrakenteellisista ratkaisuista ja niiden yhdistelmistä.

Zakeri et al (2015) ovat tehneet herkkyysanalyysiä pölkkyvälin suhteen kokonaan tuettuja, osittain tuettuja ja roikkuvia pölkkyjä matemaattisesti mallintaen. Malli koostui 60 pölkystä. Mallinnuksessa on käytetty Matlab-ohjelmistoa. Mallinnuksen tulokset osoittavat, että pölkkyvälin kasvaessa kiskon muodonmuutokset lisääntyvät ja roikkuvat pölkyt lisäävät entisestään pystysuuntaisia muodonmuutoksia. Kun pölkkyväliä kasvatettiin 50 cm:stä 75 cm:iin roikkuvien pölkkyjen muodonmuutos kasvoi 7 %:sta 22%:iin, kun rako pölkyn ja sepelin välillä oli 0,8 mm. Suurimmat vaihtelut havaittiin, kun rakenteessa oli viisi roikkuvaa pölkkyä. Tutkimuksessa on laskettu myös kontaktivoimia ja niiden lisääntymistä, mutta tuloksista ei pysty päättelemään, mistä kohtaa kontaktivoimat on laskettu. Laskenta osoittaa kuitenkin kontaktivoimien lisääntyvän roikkuvien pölkkyjen määrän lisääntyessä. (Zakeri, Fattahi & Ghanimoghadam 2015)

2.4 Puutteellisen tuennan vaikutukset kuormituksiin

Rataan kohdistuva kuormitus syntyy ensisijaisesti liikennekuormituksesta. Liikennekuormitus siirtyy ratarakenteen komponenttien välityksellä lopulta pohjamaahan. Kuvassa 10 on hahmoteltu kuormien suuruutta ja siirtymistä yleisellä tasolla. Kuormitusten suuruuteen vaikuttavia tekijöitä on listattu useissakin eri lähteissä. Pystysuuntaisiin kuormituksiin voidaan lukea staattinen, lähinnä junan akselipainosta johtuva kuormitus, dynaaminen kuormitus, joka johtuu junan kuorman liikkeestä radan geometriassa ja iskumainen voima, joka voi muodostua lyhyistä geometriamuutoksista

tai pyörän epätasaisuudesta. Kaikilla ratarakenteen komponenteilla on oma roolinsa kuormien välittymisessä ja kaikkien osien on toimittava oikein, jotta rakenne toimii optimaalisesti. Ratarakenteen kokonaisjäykkyydellä ja sen vaihtelulla on myös merkittävä rooli kuormitusten synnyssä ja jakautumassa. Komponenteissa esiintyvät viat voivat lisätä kuormitusvaikutuksia.

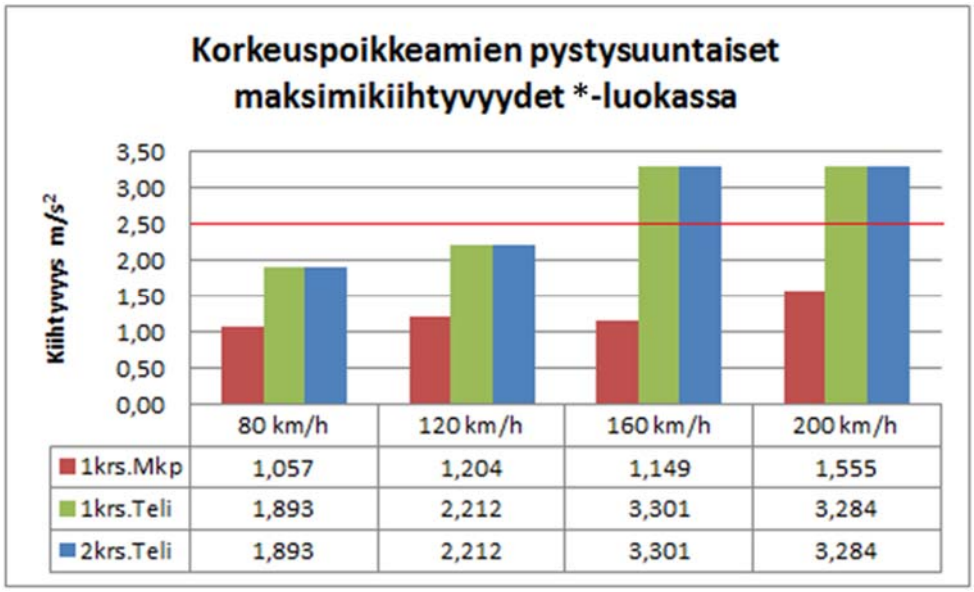


Kuva 10. Kuormien periaatteellinen siirtyminen ratarakenteessa (Esveld 2001)

Tukikerrokseen kohdistuva jännitys ei ole luonnollisestikaan enää niin suuri kuin esimerkiksi kiskoon tai pölkkyyn kohdistuva kuormitus, mutta epätasainen tukikerros voi aiheuttaa merkittäviä kuormituslisäyksiä myös muihin rakenteisiin ja kalustoon. Kirjallisuudesta löytyy useita esimerkkejä, joissa puutteellisen tuennan vaikutuksia muodonmuutoksiin ja kuormituksiin on mitattu tai mallinnettu. Lundqvistin ja Dahlbergin (2005) mallinnuksen mukaan jo 1 mm ero pölkyn ja sepelin välissä aiheuttaa roikkuvasta pölkystä seuraavaan pölkkyyn jopa 70 % kuormituslisäyksen, kun kuormittavan junan nopeus on 90 m/s (=324 km/h). Viereisen pölkyn siirtymät lisääntyvät mallinnuksen mukaan 40 %. Kirjoittajat toteavat 30 m/s (60 → 90 m/s) nopeuden lisäyksen lisäävän kuormituksia 10 %. Tutkimuksen mukaan pahin tapaus siirtymien kannalta on kolmen peräkkäisen roikkuvan pölkyn esiintyminen.

Kalustoon kohdistuvat kuormitukset on kuvattu useissakin eri lähteissä, esimerkiksi (Pesonen 2016) mukaan tärkeimmät kuormitusvaikutukset johtuvat toisaalta radan epätasaisuuden ja jäykkyyden vaihtelusta ja toisaalta radalla kulkevan kaluston ominaisuuksista, joista erityisesti kulkunopeudella ja akselipainolla on suuri vaikutus rataan kohdistuviin kuormituksiin. Lisäksi radan geometria vaikuttaa suuresti syntyviin vuorovaikutuksiin. Luonnollisesti kaikissa vuorovaikutustilanteissa tapahtuvat häiriöt kuten lovipyörät tai kiskoviat voivat lisätä kuormitusvaikutuksia paikallisesti. Heikentyneen tuennan ja raiteen epätasaisuuden vaikutuksia kalustoon ja rataan kohdistuviin voimiin on tarkasteltu tietokonemallinnuksella luvussa 3.

Radan geometriaan liittyvien raja-arvojen lisäksi on asetettu raja-arvot vaunun korista tai telistä mitattaville poikittais- ja pystykiihtyvyyksille (Ratahallintokeskus 2004). Kiihtyvyysominaisuuksien mittaamistarve liittyy usein matkustusmukavuuteen. Pesosen (2016) työssä on mallinnettu erilaisten geometriavirheiden vaikutusta kalustossa havaittuihin kiihtyvyyksiin ja siirtymiin. Työssä on mallinnettu muun muassa erisuuruisten korkeuspoikkeamien vaikutusta 80 ja 120 km/h nopeuksilla.

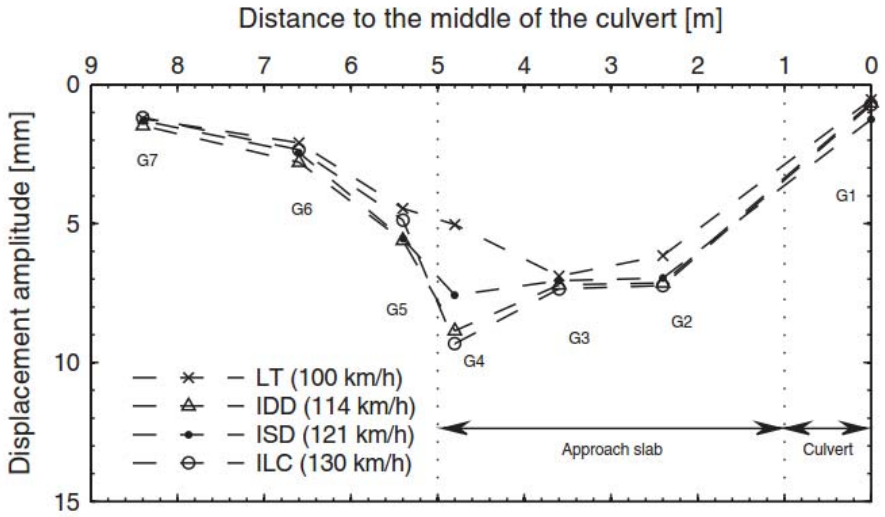


Kuva 11. *Simuloinnilla määritetty *-luokan korkeuspoikkeaman aiheuttamat kiihtyvyydet kaksikerrosvaunun massakeskipisteessä ja telien kohdalla ensimmäisessä ja toisessa kerroksessa. Kiihtyvyyden raja-arvo on 2,5 m/s². Pesonen (2016)*

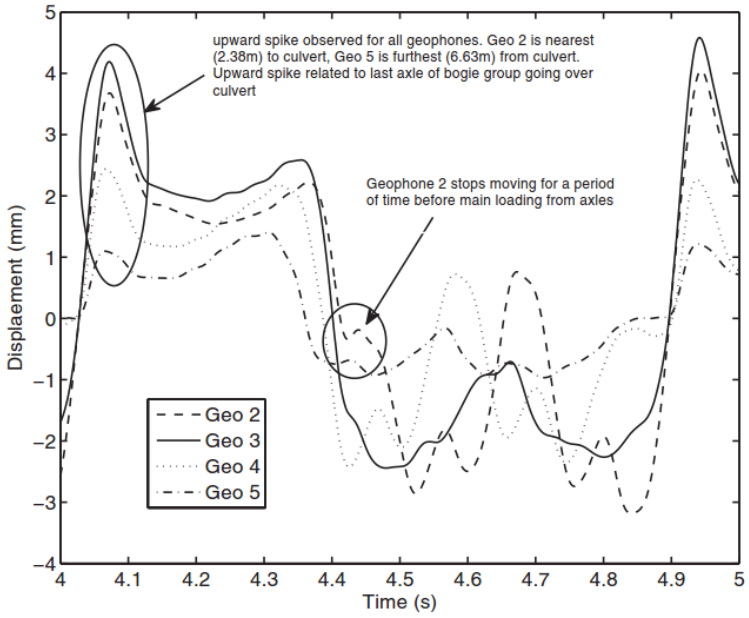
Korkeuspoikkeamat ovat Pesosen (2016) mukaan ongelmallisia erityisesti kaksikerrosvaunuissa havaittujen kiihtyvyyksien suhteen. Malliin tehtyjen *-luokan korkeuspoikkeamien todettiin aiheuttavan enimmillään 8 mm siirtymiä. Pääsääntöisesti mallinnuksen perusteella voitiin todeta, että mitä suurempia korkeuspoikkeamat ja nopeus olivat, sitä suurempia olivat myös kiihtyvyydet ja siirtymät.

Radan dynaamisen käyttäytymisen ja epäjatkuvuuskohtien välistä yhteyttä on tarkasteltu myös Wangin (2015) tutkimuksessa, jossa esitellään dynaaminen FEM-malli kuvaamaan epäjatkuvuuskohtien aiheuttamaa suhteellista muodonmuutosta. Mallinnus on tehty sillan päätyä simuloimalla. Tutkimustulosten mukaan dynaamiset pyörävoimat lisääntyvät 85 % epäjatkuvuuskohdissa. Epäjatkuvuuskohdassa sepeliin kohdistuvat jännitykset eivät muutu, vaan jännitykset lisääntyivät kahden seuraavan pölkyn matkalla 50 %. Kiskon jännitys kaksinkertaistui ja pystysuuntainen kiihtyvyys lisääntyi ainakin kolminkertaiseksi. (Wang et al. 2015).

Hollannissa tehdyssä monitorointitutkimuksessa mitattiin pölkkyjen liikkeitä ja liikennekuormituksen vaikutuksia alikulun aiheuttamassa epäjatkuvuuskohdassa. Junakuormituksen aiheuttamien muodonmuutoksen suuruutta mitattiin eri kohdissa, alikulun kohdalla muodonmuutos vaihteli -0,6…+0,6 mm välillä. Kun taas suurimmat muodonmuutokset mitattiin siirtymärakenteen kohdalta -4…4 mm. Ennen siirtymärakennetta mitattu pystysuora muodonmuutos vaihteli -1…0,5 mm välillä. Tulosten perusteella voitiin siis havaita siirtymärakenteen toimimattomuus, koska se ei tasoittanut muodonmuutoksia vaan lisäsi niitä. Erilaisten kalustojen aiheuttamat muodonmuutokset olivat lähes samanlaisia lukuun ottamatta siirtymälaatan alussa olevaa mittauspistettä, jossa suurimmat muodonmuutokset saatiin akselipainoltaan raskaimmalla kalustolla (kuva 12). (Coelho et al. 2011)



Kuva 12. *Instrumentoitujen pölkkyjen siirtymät eri kalustoilla ja etäisyyksillä alikulkusillan keskikohdasta. LT= paikallisjuna IDD=kaksikerroksinen intercity juna ISD = yksikerroksinen intercity juna ja ILC = veturivetoinen intercity-juna (Coelho et al. 2011)*

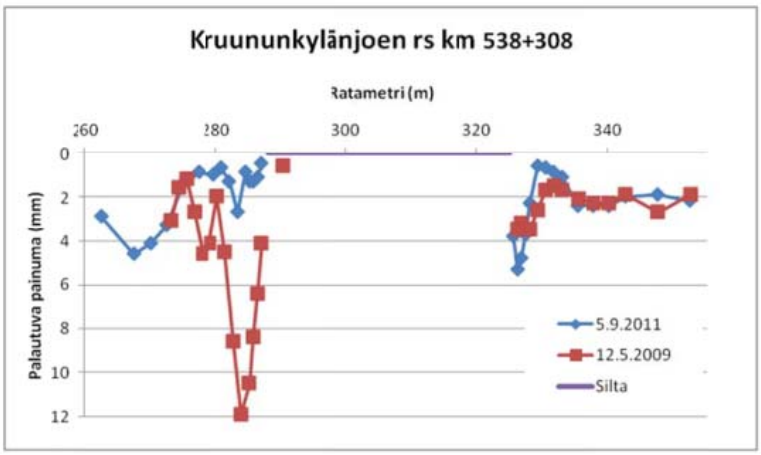


Kuva 13. *Pölkkyihin asennetuista geofoneista havaitut siirtymät, kun kaksikerroksinen intercity-junan kääntötelipari ylittää alikulkusillan siirtymälaatan.* (Coelho et al. 2011)

Coelhon et al (2011) tutkimuksen mukaan kuvan 13 mukaisessa tilanteessa tapahtuu liikettä sekä ylös- että alaspäin, mikä kuvastaa pölkkyjen huonoa kontaktia tukikerrokseen eli pölkkyjen roikkumista siirtymälaatan alueella.

Suomessa tehdyssä siltapäätyjen monitorointitutkimuksessa havaittiin pölkkyjen päistä mitattujen junaliikenteen aiheuttamien muodonmuutosten olevan hyväkuntoisella radalla 0,5…2 mm. Tutkimuksessa todettiin useiden muidenkin tutkimusten tapaan roikkuvien pölkkyjen ja pohjamaan merkittävä vaikutus muodonmuutoksiin. Mittauksissa havaittiin siltojen päädyissä jopa yli 10 mm siirtymiä erityisesti jokia ylittävillä silloilla (kuva 14). Alikulkusilloilla siirtymät olivat yleensä < 5 mm.

Tutkimuksessa havaittiin poikkeuksellisesti korjattujen ja uudelleen sepelöityjen silta-päätyjen painuvan jopa enemmän korjauksen jälkeen. Syynä tähän poikkeukselliseen käyttäytymiseen voi olla uuden sepelin pienemmästä irtotiheydestä johtuvat suuremmat muodonmuutokset ja poikkeukselliset routaolosuhteet seurantaa edeltävänä talvena. (Luomala, Nurmikolu 2012)



Kuva 14. *Esimerkki pölkkyjen päästä tehtyjen siirtymämittausten tuloksista ennen ja jälkeen sillan korjauksen.* (Luomala et al. 2015)

Edellä esitetyn hollantilaisen Coelho et al (2011) monitorointitutkimuksen tuloksia on käytetty myös numeerisen mallin validointiin. Mallin avulla saadut tulokset osoittivat sepeliin kohdistuvien liikenteen aiheuttamien kuormitusten vaihtelevan epäjatkuvuus-kohdissa merkittävästi ja erityisen suuria vaihteluita havaittiin roikkuvien pölkkyjen alueella. Mallin ja mittausten mukaan sepeliin kohdistuva kuormitus oli roikkuvien pölkkyjen kohdalla ennen rumpua enimmillään 30 kPa, kun se rummun kohdalla oli enimmillään 80 kPa. Junan aiheuttamat muodonmuutokset olivat suurimmillaan 6 mm. Mittauksissa havaittiin roikkuvien pölkkyjen olevan enimmillään 6 mm etäisyydellä sepelistä. (Varandas, Hölscher & Silva 2011)

Zhu, Thompson ja Jones (2011) ovat tutkineet roikkuvien pölkkyjen vaikutuksia kuormituksiin 1:5 mittakaavaan rakennetulla pyörä-kiskovuorovaikutusta mittaavalla testiradalla. Testiradan tulosten perusteella on kehitetty matemaattinen malli, josta on laskettu roikkuvien pölkkyjen aiheuttamia kuormitustilanteita ja pölkkyjen siirtymiä. Tulosten perusteella kolmea peräkkäistä roikkuvaa pölkkyä seuraavan pölkyn siirtymän maksimiarvo kasvaa tasolta 0,4 mm tasolle noin 1 mm. Vastaavasti pyörän ja kiskon välinen voima kasvaa vakiotasolta 80 kN vaihteluvälille 45…105 kN. Laskelmissa käytetty kaluston nopeus oli 320 km/h ja kalustossa oli neljä vaunua. (Zhu, Thompson & Jones 2011)

Espanjassa on monitoroitu radan alikulkukohteita samalla rataosalla siten, että toisen alikulun kohdalle on asennettu 44 pölkkyyn pohjaimet ja toinen monitorointikohde on rakenteeltaan lähes vastaava ja rata varustettu normaaleilla pölkyillä. Rataosalla junan enimmäisnopeus on 220 km/h. Monitorointitulosten perusteella havaittiin, että pohjaimet lisäävät merkittävästi ratarakenteen joustavuutta ja voimistavan kiskojen siirtymiä ja pölkkyjen kiihtyvyyttä verrattuna tilanteeseen, jossa ei ole pohjaimia. Kiskojen siirtymät olivat 2,3…3,6 kertaa suurempia ja kiihtyvyydet olivat nelinkertaisia. (Paixão et al. 2015) Edellä esitetyn Espanjassa toteutetun monitorointi-tutkimuksen tuloksia on käytetty 2D FEM-mallin kalibroinnissa ja validoinnissa, mallinnuksessa käytettiin ANSYS-ohjelmistoa. (Alves Ribeiro et al. 2015)

3 Kuormitusmallinnus

Mallinnuksen tavoitteena oli selvittää heikentyneen tuentatilanteen vaikutusta liikkuvan kaluston aiheuttamiin radan kuormituksiin. Kuormitusmallinnus toteutettiin monikappaledynamiikkaan perustuvalla Vampire pro -ohjelmalla. Mallinnuksessa käytettiin TTY:llä rakennettua IC-junan kaksikerroksisen ED-vaunun kalustomallia. Kalustomallia verifiointiin samaan aikaan tämän projektin kanssa. Aikataulullisista syistä mallinnusosuus jäi lopulta melko pintapuoliseksi, koska luotettavasti toimiva kalustomalli valmistui vasta varsin myöhään. Dynaamista mallinnusta on käsitelty yksityiskohtaisesti myös Liikenneviraston raportissa 14/2016. (Loponen, Salmenperä & Nurmikolu 2016)

Mallinnus toteutettiin teoreettisella geometrialla siten, että täysin vaakasuoraan geometriaan tehtiin lyhyen aallonpituuden muutoksia mallintamaan radan epäjatkuvuuskohtia. Epäjatkuvuuskohtien oli tarkoitus kuvata heikkoa tuentaa siten, että radassa on yhdestä neljään peräkkäistä huonosti tukeutunutta ratapölkkyä. Tavoitteena oli mallintaa sellaisia tilanteita, joissa kiskon taipuma on niin pieni, että roikkuvat pölkyt eivät johda kunnossapitotoimenpiteisiin radantarkastustulosten perusteella.

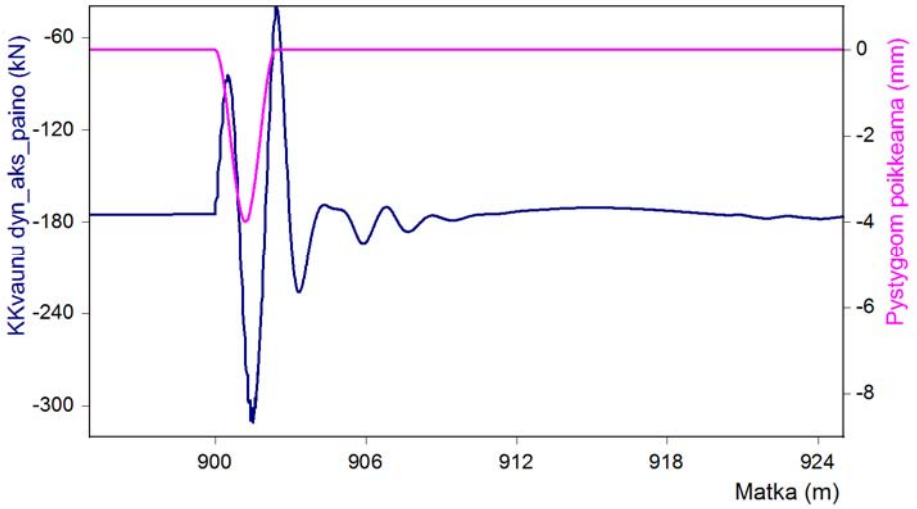
Heikentynyt tuentatilanne mallinnettiin pystygeometriavirheenä, jonka muotona käytettiin alaspäin suuntautunutta siniaaltoa. Aallonpituutta ja amplitudia vaihdettiin eri mallinnustilanteissa. Aallonpituuden vaihteluväli oli 1,2–3 metriä, joka vastaa 2–5 pölkkyväliä. Amplitudin valintaa varten tehtiin yksinkertaisia laskelmia palkkiteoriaan ja minimienergiaperiaatteeseen perustuvilla kaavoilla, jotta varmistuttiin mallinnettujen kiskon taipumien olevan mahdollisia ja realistisia. Mallinnetut geometriavirheet ja niistä seuraavat akselipainon dynaamiset kasvut on esitetty taulukossa 3. Esimerkinomaiset tulokset on esitetty käyrämuodossa kuvissa 15 ja 16, joista ensimmäisessä on kuvattu tapauksen 0,3 mm/1,2 m mallinnustulos ja jälkimmäisessä tapauksen 4 mm/2,4 m mallinnustulos.

Mallinnuksessa juna kulki 200 km/h ja ED-vaunun staattinen akselipaino oli 175 kN. Itse kalustomallin parametreja ei kuvata tässä yhteydessä tämän tarkemmin, mutta ne löytyvät soveltuvin osin lähteestä (Pesonen 2016). Joiltakin osin ED-vaunun mallia on verifioitu vielä lähteessä esitetyn jälkeenkin, joten simuloinneissa käytetty kalustomalli vastasi vielä paremmin todellista vaunun käyttäytymistä. Lopulliset ED-vaunun kalustoparametrit raportoidaan kalustomallien verifiointiprojektin loppuraportissa.

Taulukko 3. Erilaisten lyhytaaltoisten korkeuspoikkeamien vaikutus liikkuvan kaluston dynaamiseen akselipainoon Vampire-simulaation mukaan.

Amplitudi (mm)	Aallonpituus (m)	Akselipainon kasvu (kN)
0,3	1,2	24,6
0,6	1,2	49,3
1,8	2	99
2	2	96,2
2	3	40,3
4	2,4	135,9

Kuva 15. *Mallinnustulos ED-vaunun akselipainon muutoksesta 200 km/h nopeudessa, kun radassa on yksi heikosti tukeutunut ratapölkky.*



Kuva 16. *Mallinnustulos ED-vaunun akselipainon muutoksesta 200 km/h nopeudessa, kun radassa on kolme heikosti tukeutunutta ratapölkkyä.*

Mallinnustuloksista voidaan havaita, että liikennöintinopeuden ollessa suuri, pienikin korkeuspoikkeama aiheuttaa selkeästi kuormituslisää. Jo vähäinen 0,3 mm korkeuspoikkeamaero kahden peräkkäisen pölkyn välillä tuottaa noin 25 kN lisäkuormituksen. Myöskin melko vähäisenä pidettävä 2 mm korkeuspoikkeama 3 metrin matkalla tuotti 40 kN lisäkuorman. Tällaisia pieniä korkeuspoikkeamia esiintyy radassa todennäköisesti hyvin paljon, varsinkin epäjatkuvuuskohtien kuten siltapäätyjen yhteydessä. Suuremmat korkeuspoikkeamat tuottivat suurempia lisäkuormituksia, mutta niiden esiintymistaajuus radalla lienee vähäisempi. Mallinnuksen suurin epätasaisuus 4 mm 2,4 metrin matkalla lähestyy jo D-luokan korkeuspoikkeamavirhettä ja täyttääkin sen, jos virheitä esiintyy useita peräkkäin. Tällainen ääripään tukeutumattomuus tuottaakin jo 1,77-kertaisen kuormitusvaikutuksen staattiseen akselipainoon verrattuna. Toisaalta kuormitus myös pienenee merkittävästi tietyssä kohdassa epätasaisuutta, mutta kontakti kiskon ja pyörän välillä ei kuitenkaan vielä irtoa.

Mallinnustulos kuvaa staattisen akselipainon muuttumista geometriapoikkeamassa ja tuloksessa otetaan huomioon vaunun jousituksen sekä hitausvoimien yms. vaikutus. Heikentynyt tuenta on mallinnettu nimenomaan korkeuspoikkeamana ja radan jäykkyys on oletettu vakioksi. Simulointeja tehtiin myös siten, että vastaava geometriavirhe tuotettiin malliin jäykkyysvaihtelun avulla. Jos jäykkyysvaihtelusta aiheutuva kiskon taipuma kuorman alla vastasi geometriavirheenä toteutettua korkeuspoikkeamaa, tulokset olivat hyvin tarkasti yhteneviä.

Lienee makuasia ajatella, seuraako heikentyneestä tukeutumistilanteesta korkeuspoikkeamia vai jäykkyysvaihtelua – todennäköisesti molempia. Selvää on sekin, että kuormitusten mallinnuksessa tehtiin yksinkertaistuksia ja mallinnustulokset ovat vain suuntaa-antavia. Mallinnustulokset kuitenkin osoittavat tukeutumistilanteella olevan hyvin merkittävä vaikutus realisoituviin kuormituksiin kiskon tasolla. Tukikerroksen kohtaama rasitus vaihtelee vielä tätäkin enemmän, koska heikosti tukeutuneet ratapölkyt eivät ota vastaan yhtä suurta kuormitusta kuin paremmin tukeutuneet ratapölkyt. Suurimmillaan vaikutukset lienevät tapauksessa, jossa huonosti tukeutuneita ratapölkkyjä on kolme peräkkäin. Tällöin on mahdollista, että telin tuottama kuormitus kohdistuu lähestulkoon kokonaan ensimmäisenä telin edessä ja takana olevalle ratapölkylle. Näin voi käydä, jos kisko taipuu voimakkaasti akseleiden välissä alaspäin roikkuvien pölkkyjen vuoksi ja vastaavasti kuormaa kantavien ratapölkkyjen jälkeen ylöspäin. Tämä skenaario johtaa kaksinkertaiseen kuormitukseen normaalitilanteeseen verrattuna, jossa yhdelle ratapölkylle kohdistuu kiskon kuormia jakavan vaikutuksen seurauksena korkeintaan puolet akselipainosta. Mallinnuksen tulokset ovat myös vertailukelpoisia kappaleessa 2.4 esitettyihin kansainvälisten tutkimusten tuloksiin.

Yhdistettynä heikosta tuennasta aiheutuva lähes kaksinkertainen dynaaminen kuormitusvaikutus ja noin kaksinkertainen kuormitusten jakautumisesta tuleva vaikutus, voi yksittäisen ratapölkyn alapuolella olevan sepelin kuormitustaso olla ääritapauksessa jopa yli kolminkertainen hyvään tuentatilanteeseen verrattuna. Tuentatilanteen vaikutus tukikerroksen käyttöikään on täten erittäin merkittävä. Heikko tuentatilanne johtaa nopeutuneeseen tukikerroksen hienonemiseen ja voi myös vaurioittaa ratapölkkyjä ja kiskoja ja johtaa ennenaikaiseen päällysrakenteen vaurioitumiseen. Vaurioituminen ja lyhentynyt rakenteen käyttöikä johtavat väistämättä myös lisääntyviin kunnossapito- ja investointikustannuksiin.

4 Rantaradan koekohteiden mittaus- ja tutkimusmenetelmät

4.1 Mittausten ja koekohteiden seurannan tavoite

Mittausten ja monitoroinnin tavoitteena oli tutkia, miten tukemisen jälkeinen geometrinen kunto kehittyy eri-ikäisillä sepeleillä. Koekohteista otettiin raidesepelinäytteitä laboratoriotestejä varten. Geometrian kehittymistä seurattiin radantarkastusmittausten tulosten lisäksi seuraamalla pölkkyjen päiden korkeusaseman muutosta jokaisessa kohteessa kolmessa pölkyssä. Kaikissa kohteissa tehtiin myös koko kohdealueen kattavia takymetrimittauksia. Yhdessä koekohteessa tutkittiin myös tukemissyvyyden vaikutusta geometrian kehittymiseen.

Koekohteiden valinta tehtiin keväällä 2014 saatavilla olevan tiedon perusteella siten, että kohteiden sepelien ikä oli selkeästi erilainen. Koekohteiden valinnassa hyödynnettiin myös Roadscanners Oy:n tuottamaa maatutkadataa. Koska kaikessa monitorointiin perustuvassa tutkimuksessa on erittäin paljon muuttujia, päädyttiin valitsemaan noin kilometrin mittaiset koekohteet pohjaolosuhteiltaan lähes samanlaisista kohteista kallioleikkausten alueelta.

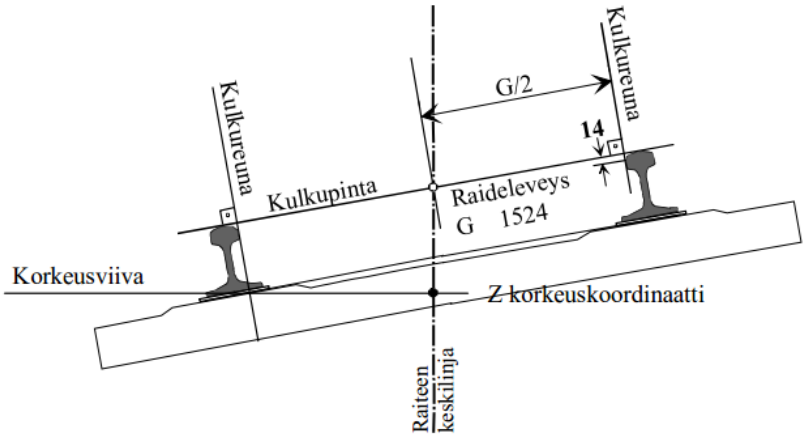
Tässä luvussa kuvataan käytetyt mittausmenetelmät lyhyesti. Tarkempia tietoja esimerkiksi monitorointiin käytetyistä menetelmistä löytyy muun muassa Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä sarjan raporteista 22/2010 ja 22/2015 (Luomala 2010, Pylkkänen&Nurmikolu 2015).

4.2 Takymetrimittaukset ja tukemisen nuotitus

Tukemisen nuotitus perustuu Suomen rataverkolla useimmiten takymetrimittauksiin (Peltokangas, Nurmikolu 2015). Nuotittajat määrittelevät mittausten perusteella tarvittavat nostot ja mahdolliset raiteen sivusuuntaiset siirrot. Alustavien nuottien perusteella laaditaan lopulliset nuotit tukemiskoneelle. Yleensä kunnossapitotuennoissa käytettyä suhteellista menetelmää varten ei kuitenkaan laadita erillisiä nuotteja.

Takymetrimittaukset ovat kohtuullisen tarkkoja ja edullisia, mutta eivät reaaliaikaisia. Käytettävissä olevien kiintopisteiden määrä vaikuttaa luonnollisesti tuloksiin. Perinteisten käsikäyttöisten takymetrimittausten tarkkuutta ja tehokkuutta on pyritty parantamaan kevyellä radanmittausvaunulla (käytetään termiä ratavaunu), joka etenee rataa pitkin kävelyvauhtia. Ratavaunulla mitataan samanaikaisesti molempien kiskojen sijainti, vaaka- ja pystykallistus ja niiden muutokset sekä raideleveys. Ratavaunun mittaustulokset voidaan siirtää sähköisesti suoraan tukemiskoneelle nuotitusta varten. Ratavaunulla ei korvata radantarkastusmittauksia, mutta tuloksilla voidaan täydentää tai tarkentaa tuloksia. (Alkki 2015)

Radan keskilinjan ja korkeusviivan taso- ja korkeuskoordinaattien maksimivirheeksi on annettu RATO 2:ssa +/- 20 mm, jolloin mittauksen keskivirhe saa olla enintään 8 mm suhteessa lähimpiin mittausperustan pisteisiin. Raiteen korkeusviiva kulkee kaarteen sisemmän kiskon aluslevyn alapinnan tasossa (kuva 17). (Liikennevirasto 2010)



Kuva 17. *Raiteen korkeusviiva ja keskilinja kallistetussa raiteessa.* (Liikennevirasto 2010)

Tämän tutkimuksen takymetrimittaukset tehtiin kiskon päältä, ja mittaustuloksia verrattiin ennen tukemista ja tukemisen jälkeen samalla menetelmällä tehtyihin mittauksiin. Käytännön syistä ensimmäinen seurantamittaus jouduttiin tekemään vasta muutama päivä tukemisen jälkeen. Tulosten vertailussa otettiin huomioon se, että ihanteellinen tavoitegeometria on määritetty korkeusviivan tasoon.

Mittaukset on tehnyt T:mi Mikko Pyytövaara Trimble 5605 sdr ja Nikon 730 dtm-laitteistoilla. Mittauksia toteutettiin koekohteiden seurannan aikana (6/2014…6/2016) yhteensä 8 kertaa noin 4 kuukauden välein. Mittaukset on tehty 10 tai 20 metrin välein molemmista kiskoista. Normaalissa nuotituksessa mittaukset tehdään usein vain toisesta kiskosta nk. johtokiskosta. Mittausten tarkkuus on ihanteellisissa olosuhteissa 5 mm luokkaa, mutta käytännön olosuhteet ja kiintopisteiden tarkkuus johtanee noin 10 mm tarkkuuteen.

4.3 Siirtymäanturimittaus

Pölkyn päähän asennettavia siirtymäantureita asennettiin neljään kohteeseen. Jokaisessa kohteessa instrumentoitiin kolme ratapölkkyä siten, että siirtymiä mitattiin pölkkyjen molemmista päistä. Mittausjärjestely perustuu ratapölkyn päähän rata-rakenteeseen upotettavaan suojaputkeen sijoitettuun terästankoon (kuva 18). Koekohteissa terästanko kiinnitettiin alapäästään kallion pintaan. Terästangon yläpäähän kiinnitettiin vastinkappale siirtymäanturia varten ja siirtymäanturi kiinnitettiin ratapölkyn päähän. Vastaavaa mittausjärjestelyä on käytetty esimerkiksi aiemmin toteutetuissa roudanseurantakohteissa. (Luomala 2010; Pylkkänen et al. 2012; Pylkkänen&Nurmikolu 2015)

Pölkkyjen asema tallentui kolmen tunnin välein eli mittauksia kertyi 8 kpl vuorokaudessa. Mittausdata käytiin hakemassa yhteensä neljä kertaa koekohteiden seurannan aikana. Valitettavasti muutamissa kohteissa osa johdoista irtosi ja yksi anturi ja loggeri rikkoutuivat; mutta kaikista kohteista saatiin kuitenkin riittävästi dataa. Lisäksi tuennan aikana tehtiin jatkuvaa mittausta.

Kuva 18. Pölkyn päähän asennettu siirtymäanturi. (Ossi Peltokangas 2014)

4.4 Jäykkyysmittaukset ja radantarkastusajot

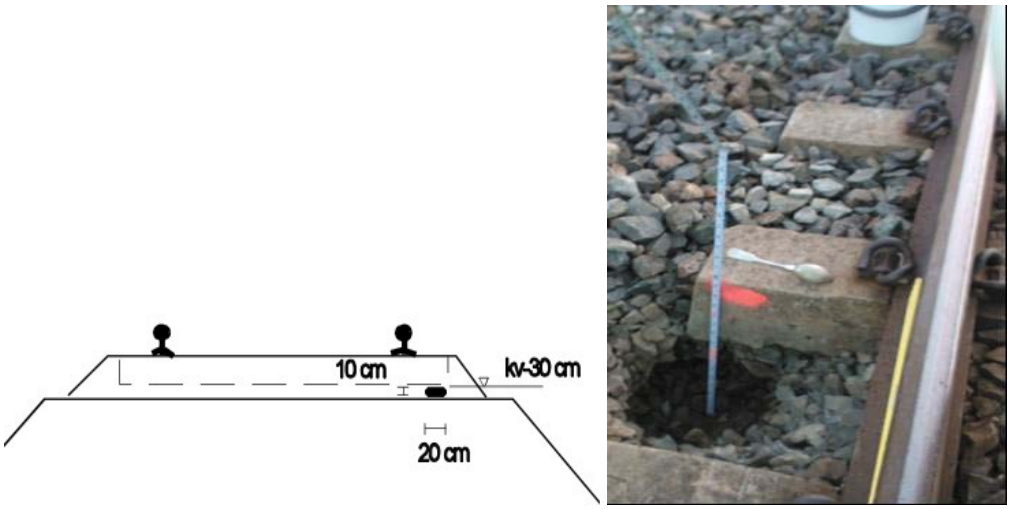
Mittauksissa käytettiin TTY:ssä kehitettyä jatkuvatoimista radan jäykkyyden mittalaitetta, jonka toiminta perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen sekä kuormittamattomasta että kuormitetusta radasta. Mittalaite koostuu kolmesta kevyestä akselista, jotka mittaavat radan pystysuuntaisen geometrian ensin kalustoyksikön tuottaman akselikuorman alaisena ja tämän jälkeen kuormittamattomana. Radan taipuma saadaan selville näiden kahden mittaustuloksen erotuksena ja edelleen radan kokonaisjäykkyys johdetaan määritetystä taipumasta eli palautuvasta painumasta. Radan kokonaisjäykkyyden mittaamista ja siihen kehitettyä Stiffmaster-mittauslaitteistoa on käsitelty yksityiskohtaisesti muun muassa Liikenneviraston raportissa 19/2015. (Luomala et al. 2015)

Tulosten tulkinnassa hyödynnettiin myös VR Track Oy:n tekemien radantarkastusajojen tuloksia. Radantarkastusmittausten tulosten tulkinnan periaatteet on selitetty lyhyesti kappaleessa 2.1. Tukemisen vaikutuksia tulkittiin korkeuspoikkeamien avulla. Alustavassa kohteiden valinnassa ja tulosten tulkinnassa käytettiin myös Roadscanners Oy:n tekemiä maatutkamittauksia ja niihin yhdistettyjä radantarkastustulosten yhteenvetoja. Jäykkyysmittaukset toteutettiin ennen koekohteiden tuentaa 17.5.2014 ja tuennan jälkeen 9.6.2014.

4.5 Raidesepelinäytteenotto ja sepelitutkimukset

Näytteitä otettiin kesäkuun alussa 2014 Ratahallintokeskuksen ohjeen mukaan (Ratahallintokeskus 1997). Näytteitä otettiin yhteensä kuudesta kohteesta siten, että 9–12 näytteenottopistettä sijoitettiin tasaisin välein (50–100 m) koko tutkimuskohteen noin kilometrin pituiselle matkalle. Näytteet otettiin 10 cm korkuiselta ja 20*20 cm laajuiselta alueelta noin 30 cm syvyydeltä pölkyn vierestä (kuva 19). Otettujen näytteiden massa oli 7–8 kg. Näytteitä otettiin tasaisesti pölkkyjen oikealta ja vasemmalta puolelta (menosuunta Turkuun päin), mutta kaarteissa näyte otettiin aina sisäkiskon puolelta.

Raidesepelinäytteistä tutkittiin raekokojakautuma menetelmän SFS-EN 933-1 mukaisesti ja tuloksista laskettiin rakeisuusluvut (1, 8, 25 mm seulat). Lisäksi rakeisuusnäytteistä koostettiin mahdollisimman edustavat näytteet lujuus- ja muotoarvotutkimuksia varten. Koostenäytteistä tutkittiin lujuusominaisuudet määrittämällä Los Angeles -luku (SFS-EN 1097-2) ja näytemäärän ollessa riittävä myös micro-Deval-arvo (SFS-EN 1097-1). Kaikista lujuustestinäytteistä määritettiin muotoarvo (SFS-EN 933-4) ja litteysluku (SFS-EN 933-3). Sepelinäytteistä tutkittiin myös petrografia silmämääräisesti (SFS-EN 932-3). Sepelitutkimusten tulokset on esitetty kohteittain luvussa 6.



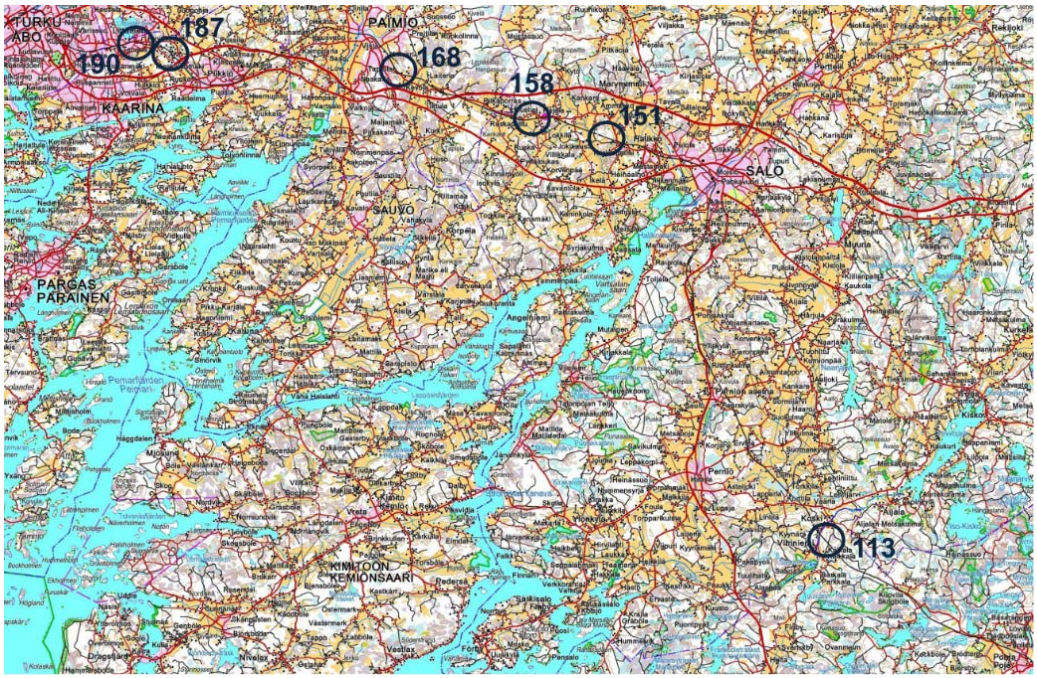
Kuva 19. Näytteenottokohdan periaatteellinen sijainti ratarakenteessa ja näytteenottokuoppa kohteessa km 189+350.

5 Rantaradan koeosuudet

Tässä luvussa esitellään seurantakohteiden merkittävimmät perusominaisuudet ja perusteet kohteiden valinnalle. Kevättalvella 2014 seurantaa suunniteltaessa ei vielä ollut käytettävissä tietoja esimerkiksi raidesepelinäytteiden rakeisuuksista tai kohteissa tehdyistä maaperätutkimuksista ja näin ollen kohteiden valinnassa tukeuduttiinkin hyvin pitkälti raidesepelin asennus- ja seulontavuosiin sekä Roadscanners Oy:n tuottamaan maatutkadataan.

Koeosuudet valittiin kallioleikkausten kohdalta, koska tällöin mahdollinen pohjamaan vaikutus tukikerroksen toimintaan ja raidegeometrian muutoksiin voidaan jättää huomiotta. Valinnan toisena kriteerinä oli raidesepelin ikä ja kohdealueilla tiedossa olevat ja suunnitellut kunnossapitotoimenpiteet. Yksi ennakkoon valituista kohteista jouduttiin kuitenkin jättämään pois lopullisesta seurannasta, koska siellä toteutettiin sepelinvaihto. Kolme koekohdetta tuettiin kesäkuussa 2014 ja yksi syyskuussa 2014. Tuenta tehtiin tutkimusta varten eli koeosuuksia ei olisi tuettu normaalin kunnossapidon yhteydessä. Koekohteiden sijainti on esitetty kuvassa 20.

Tukemistyön suoritetietoja ei kerätä vielä toistaiseksi yhtenäiseen tietokantaan. Koekohteiden kunnossapidosta saatiin tarkempia tietoja rantaradan kunnossapitäjältä. Myös niin kutsutuista minirapsuista ja rataverkon kuvauksesta saatiin tarvittavia tietoja. Lisäksi takymetrillä seurantamittauksia tehnyt Mikko Pyytövaara raportoi havaitsemistaan muutoksista koeosuuksilla.



Kuva 20. Seurankohteiden sijainti rantaradalla (Maanmittauslaitoksen peruskartta-aineisto 8/2014)

5.1 Yleistä rantaradasta

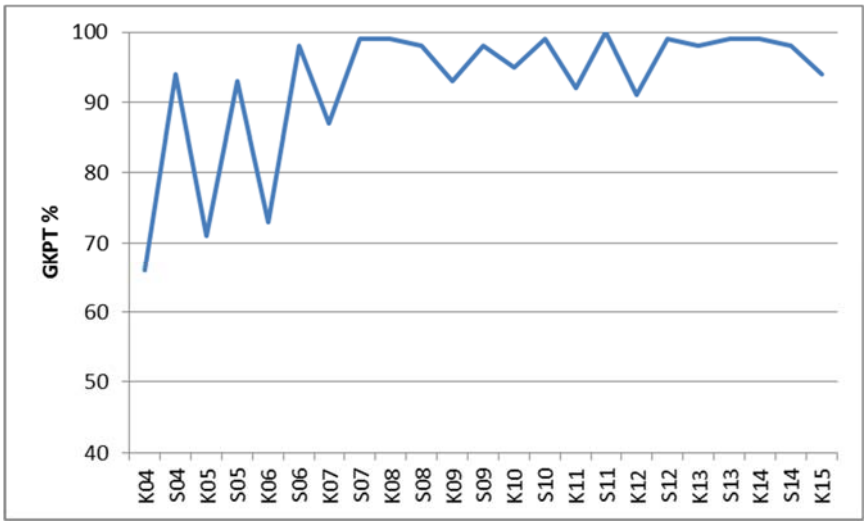
Rantaradan rakentaminen aloitettiin 1890-luvun loppupuolella. Radan rakentamisen perusteena oli sen kulkeminen eteläisten vauraimpien ja tiheimmin asuttujen alueiden halki eikä niinkään Turun ja Helsingin välinen kaukoliikenneyhteys. Rata Turusta Karjaalle avattiin liikenteelle marraskuussa 1899. Koska vanhan merenpohjan maaperäolosuhteet tiedettiin jo tuolloin haastaviksi, pyrittiin jyrkkien kaarteiden avulla pääsemään savialueilta nopeasti kantaville pohjamaille. Toinen syy radan mutkaisuuteen oli kustannusten säästäminen eli kalliopaljastumat mieluummin kierrettiin kuin tehtiin louhintaa (Ratahallintokeskus 2008b). Rata Helsingin Pasilasta Karjaalle valmistui syyskuussa 1903. Rantarata on ensimmäinen rataosa, jossa käytettiin raidesepeliä raidesoran asemesta vuonna 1922. (Zetterberg 2011, Nummelin 2008).

Rantaradan pituus on 161 rd-km ja rataosa on sähköistetty pääosin yksiraiteinen rata. Rataosalla liikennöi säännöllisesti vain henkilöliikennekalustoa. Välillä Kirkkonummi-Karjaa, liikennöi 46 junaa ja välillä Karjaa–Turku 36 junaa vuorokaudessa. Tavarajuna-liikennettä on jonkin verran tällä hetkellä Salo–Turku välillä (taulukko 4). Vuosittainen liikennemäärä on 3–4 miljoona bruttotonnia. Rataosuus kuuluu henkilöliikenteen nopean liikenteen ja tavaraliikenteen 225 kN akselipainon rataverkkoon.

Rataosalle on ominaista useat eri ajankohtina tehdyt peruskorjaukset. Rata risteilee uusien ja vanhojen ratapenkereiden ja rakenteiden perustusten päällä. Maasto vaihtelee pehmeikköjen ja kallion välillä, mikä tarkoittaa myös suurta siirtymäkiila-rakenteiden määrää. Rataosan suuri peruskorjaus tehtiin vuosina 1978–1995, jolloin puupölkkyraide vaihdettiin betonipölkkyraiteeksi, kiskotyypiksi vaihdettiin 54E1 tai UIC60. Tukikerros koostuu sepelistä, joka on keskimääräiseltä iältään noin 20–30 vuotta vanhaa, mutta uudempaakin sepeliä löytyy. Vuosina 1992–1995 rataosa sähköistettiin ja rataosalle rakennettiin JKV-kulunvalvonta ja kauko-ohjaus. Myös rataosan pahimpia kaarteita on oikaistu vuosien 1980 ja 1995 välisenä aikana. (Jokiniemi 2007) (Liikennevirasto 2015) Rata on edelleen Kirkkonummen ja Turun välillä yksiraiteinen ja kohtauspaikkoja on harvakseltaan, mikä osaltaan rajoittaa radalle henkilökaukoliikenteen lisäksi mahtuvan tavara- ja paikallisliikenteen määrää. (Ratahallintokeskus 2008b)

Rantaradan uudistamisesta on keskusteltu useaan otteeseen, muun muassa vuonna 2006 on julkaistu tarveselvitys (Ratahallintokeskus 2006). Viimeaikaiset selvitykset ovat keskittyneet niin kutsuttuun tunnin junaan Helsingin ja Turun välillä, mikä käytännössä tarkoittaisi merkittävää investointia rataoikaisuun (http://www.tunninjuna.fi/).

Rantarata kuuluu Etelä-Suomen isännöintialueeseen ja kunnossapitoalueeseen 2. Rantaradan kunnossapitotaso on 1A, mikä tarkoittaa kuutta radantarkastusvaunulla tehtävää mittausta vuodessa. Tällä kunnossapitotasolla korkeuspoikkeaman raja-arvot ovat C-luokan virheellä 2 mm, D-luokan virheellä 4 mm ja *-luokan virheellä 7 mm. Lisäksi vuosittain tehdään liikkuvasta kalustosta kuusi mittausta ja kaksi kävelytarkastusta sekä neljä vaihdetarkastusta. Kunnossapitoluokassa 1A tukeminen tulisi tehdä aina tarkkuusmenetelmällä, ainoastaan tukemiskoneen mittakantaa lyhyemmät korjaukset voidaan tehdä suhteellisella menetelmällä. (Tunninen 2015) Rantaradan rataisännöintiä hoitaa RR Management Oy ja kunnossapidosta vastaa VR Track Oy.



Kuva 21. *Kunnossapitoalueen 2 radan kunto vuodesta 2004 alkaen radantarkastuspalvelujen ilmoittaman päällysrakenteen geometrisen kunnon tunnusluvun (GKPT) perusteella. Kuva on piirretty lähteestä poimittujen lukuarvojen perusteella.* (VR Track Oy 2015)

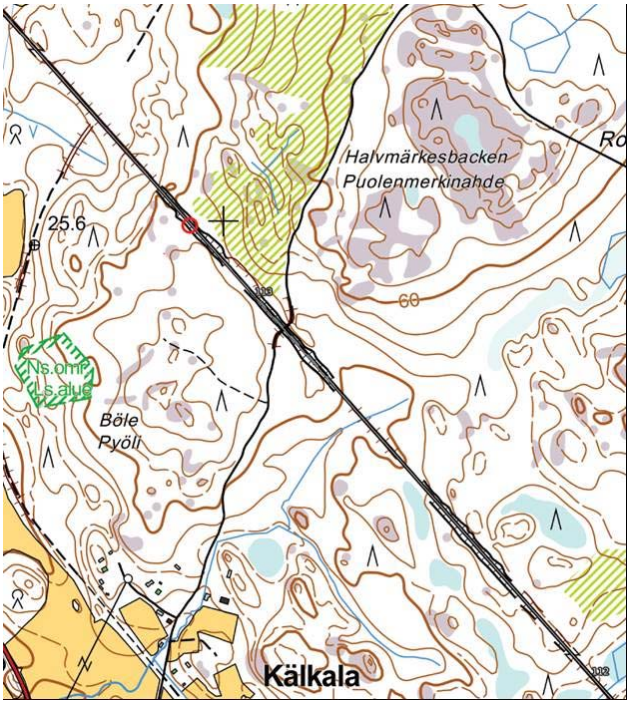
Taulukko 4. *Rantaradan tonnimäärät* (Vehkalahti 2015)

	Karjaa-Salo		**Salo-Turku**	
2014	Tonnit	Akselit	Tonnit	Akselit
06	237485	16876	249528	17852
07	214083	15172	221851	15812
08	237822	16944	247408	17760
09	243151	17336	252472	18104
10	232930	16568	245482	17576
11	219576	15304	236000	16724
12	218266	15480	233560	16512
Keskiarvo/kk	229045	16240	240900	17191
2015				
01	228284	16188	244780	17364
02	215720	15384	229139	16248
03	238545	16984	254387	18272
04	229697	16464	239540	17228
05	240351	17160	242126	17392
06	213029	15164	229148	16204
07	202682	14344	211443	15112
08	221244	15792	226682	16240
09	218652	15640	225555	16200
Keskiarvo/kk	223134	15902	233644	16696

Rantaradan sepelivaatimuksena on minirapsujen mukaan ollut ennen vuotta 2001 luokka R4 ja vuodesta 2001 vaatimusluokka on ollut pääsääntöisesti R3. Vanhimmista sepelivaatimuksista ja käytetyistä kiviaineksista ei valitettavasti löytynyt tietoja.

5.2 Kohde 112+600 – 113+600

Jatkossa kohteesta käytetään lyhennettyä merkintää Kohde 113. Kohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Pohjankuru–Ervelä ratakilometrivälillä 112+600 – 113+600. Instrumentoidut ratapölkyt sijaitsevat ratakilometreillä 113+188, 113+194 ja 113+200. Kohteen sijainti peruskartalla on esitetty kuvassa 21, josta saa melko hyvän yleiskuvan kohteen ympäristön maanpinnan korkeuksista. Seurantaosuuden päällysrakenne koostuu jatkuvaksi hitsatusta 54E1-profiilin kiskosta ja B88-tyypin betoniratapölkyistä. Seurantakohde kuuluu päällysrakenneluokkaan C2. Kohteen sepelivaatimukseksi on merkitty luokka R3 ja sepeli on viimeksi vaihdettu vuonna 2011. Uusi sepeli on toimitettujen laatutietojen mukaan kuitenkin luokkaa R1/R2.



Kuva 21. *Yleiskartta kohteen 113 sijainnista. Siirtymäanturimittausten sijainti on merkitty punaisella ympyrällä. Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen maastokartta-aineistoa 10/2015.*

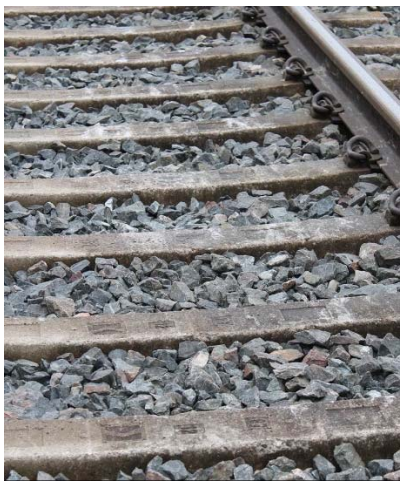
Seurantaosuuden tukikerroksen uusimisen syyksi vuonna 2011 on raportoitu jatkuvan koneellisen tuennan tarve km-välillä 102-116. Edellinen tukikerros oli vuodelta 1987.

Siirtymäantureiden referenssitankojen asennuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella ratakilometrivälillä 113+188 – 113+200 kalliopinta sijaitsee noin 0,8… 1,2 metrin syvyydellä korkeusviivasta. Samassa yhteydessä havaittiin rakennekerrosten alapinnassa kalliopinnan läheisyydessä olevan runsaasti kosteutta. Kuvassa 22a) on esitetty yleiskuva ratakilometriltä 113+200 pienenevien ratakilometrien suuntaan ja kuvassa 22b) on yleiskuva samasta paikasta kasvavien ratakilometrien suuntaan eli Turkuun päin.

a)

b)

Kuva 22. Kuva kohteen 113 siirtymäanturien sijaintipaikasta a) Karjaalle päin ja b) Turkuun päin (Kuvat Ossi Peltokangas 2014)



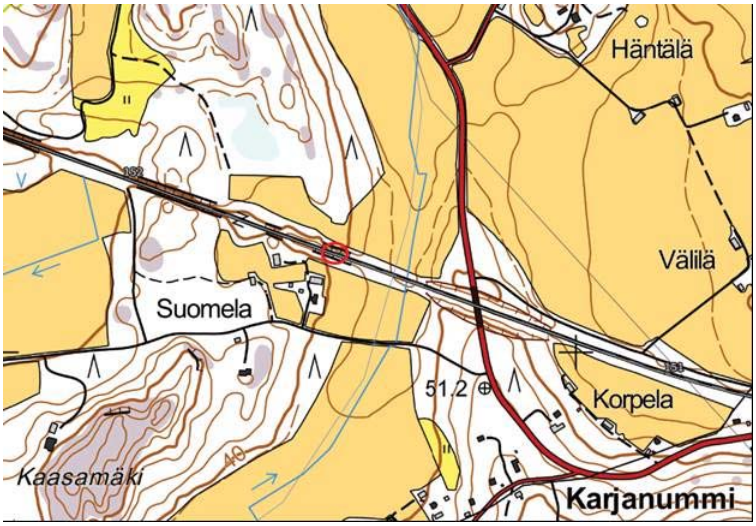
Kuva 23. Lähikuva kohteen 113 pölkyistä ja sepelistä. (Kuva Pirjo Kuula 2015)

Vaakageometrialtaan rata kulkee seurantaosuudella suoralla. Pystygeometrialtaan rata laskee kohti Turkua eli kasvavien ratakilometrien suuntaan suunnilleen kaltevuudella 8:1000. Koekohde tuettiin 26.–27.5.2014 välisenä yönä Plasser& Theuerin kolmen ratapölkyn tukemiskoneella (Ttk1 833).

5.3 Kohde 151+200 – 152+000

Jatkossa kohteesta käytetään lyhennettyä merkintää Kohde 151. Kohde sijaitsee kilometrivälillä 151+200 – 152+000 ja liikennepaikkavälillä Salo-Paimio. Kohteessa on kallioleikkaus välillä 151+580 – 151+980. Kohteen sijainti on esitetty kuvassa 24. Kohteessa on instrumentoitu kolme ratapölkkyä ratametreillä 151+620, +626, +632. Terästankojen asennuksen aikana havaittiin kallion pinnan olevan 1–1,2 m syvyydellä korkeusviivasta.

Seurantaosuuden päällysrakenne koostuu jatkuvaksi hitsatusta 54E1-profiilin kiskosta ja PB89-tyypin betoniratapölkyistä, jotka on asennettu vuonna 1989. Seurantakohde kuuluu päällysrakenneluokkaan D. Sepelivaatimuksena on luokka R3 ja sepeli on myös vaihdettu vuonna 1989. Kiskot on minirapsun 2013 mukaan hiottu vuonna 2006. Kohde tuettiin 26.–27.5.2014 välisenä yönä Plasser& Theuerin kolmen ratapölkyn tukemiskoneella (Ttk1 833).



Kuva 24. *Kohteen 151 sijainti kartalla. Siirtymäanturien sijainti on merkitty punaisella ympyrällä. Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen maastokartta-aineistoa 10/2015.*

a) *b)*

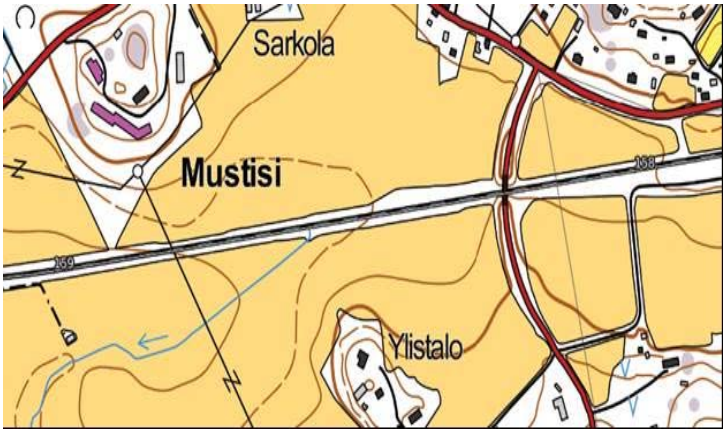
Kuva 25. *Kuva kohteen 151 siirtymäanturien sijaintikohdasta a) Turun suuntaan)* ja *b) Salon suuntaan. (Kuva Ossi Peltokangas 2014)*

Vaakageometrialtaan rata kulkee seurantaosuudella suoralla. Pystygeometrialtaan rata laskee kohteen alueella kohti Turkua eli kasvavien ratakilometrien suuntaan keskimäärin 7,5:1000 kaltevuudella.

5.4 Kohde 158+200 – 158+840

Jatkossa kohteesta käytetään merkintää Kohde 158. Kohde sijaitsee kilometrivälillä 158+200 – 158+840 ja liikennepaikkavälillä Salo-Paimio (kuva 26). Kohteessa on tehty vain näytteenotto. Kohde valikoitui loppujen lopuksi pois seurantatutkimuksesta, koska sepeli vaihdettiin vuonna 2014.

Kohteessa on sekä uutta että vanhaa raidesepeliä. Kohteen alkupään sepeli on ratametrille noin 158+500 saakka uutta sepeliä vuodelta 2012 ja se kuuluu minirapsun mukaan luokkaan R1/R2. Kohteen loppuosan sepelin on vuodelta 1987 ja kuuluu luokkaan R3. Vuonna 2014 on tehty sepelin vaihtoa, joka on ulottunut VR Track Oy:ltä saatujen tietojen mukaan kohteen alueelle ratametrille 158+313. Kuvassa 27 on havaittavissa uutta lisäsepeliä ja vanhempaa sepeliä. Betonipölkyt ja 54E1-kiskot ovat vuodelta 1987. Kiskot on minirapsun mukaan hiottu vuonna 2006. Kohde on tuettu kunnossapidon kevään 2014 tuentalistan mukaisesti. Vaakageometrialtaan rata kulkee seurantaosuudella suoralla. Pystygeometrialtaan rata kohteen alueella myös tasainen.



Kuva 26. *Kohteen 158 sijainti. Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen maastokartta-aineistoa 10/2015*

Kuva 27 *Kohteelta 158 kesäkuussa 2014 otettu valokuva. (Ossi Peltokangas 2014)*

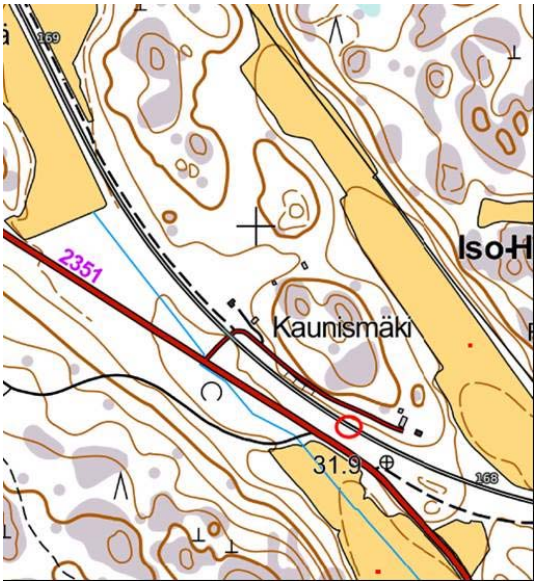
Kuva 28. Näytteenottokohtia kohteelta 158. Kuvissa näkyy sekä vanhaa että uutta sepeliä. (Ossi Peltokangas 2014)

5.5 Kohde 168+000 - 168+700

Jatkossa kohteesta käytetään lyhennettyä merkintää Kohde 168. Kohde sijaitsee kilometrivälillä 168+000 – 168+700 ja sijaitsee liikennepaikkavälillä Salo–Paimio (kuva 29). Kohteessa on instrumentoitu kolme ratapölkkyä ratametreillä 168+232, +238, +244. Kohteen instrumentoinnissa kallioon tukeutuvat tankojen alapäät olivat 1,8…2,2, m etäisyydellä korkeusviivasta.

Seurantaosuuden päällysrakenne koostuu jatkuvaksi hitsatusta 54E1-profiilin kiskosta ja betoniratapölkyistä, jotka on asennettu vuonna 1986. Seurantakohde kuuluu päällysrakenneluokkaan C1. Sepeli on vaihdettu vuonna 2008 ja sepelin laatuluokaksi ilmoitetaan minirapsussa R1/R2. Kiskot on hiottu minirapsun 2013 mukaan vuonna 2006.

Vaakageometrialtaan rata kulkee seurantaosuudella kaarteessa (kuva 30), jonka kaarresäde (R) on 1050 m ja kallistus (H) on 150 mm. Pystygeometrialtaan rata on tasainen ja alkaa nousta kohteen lopussa kohti Turkua eli kasvavien ratakilometrien suuntaan keskimääräisellä kaltevuudella 11:1000.



Kuva 29. *Kohteen 168 kartta. Instrumentoitujen pölkkyjen paikka merkitty punaisella ympyrällä. Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen maastokartta-aineistoa 10/2015.*

Kohde tuettiin 26.–27.5.2014 välisenä yönä Plasser& Theuerin kolmen ratapölkyn tukemiskoneella (Ttk1 833).

a)

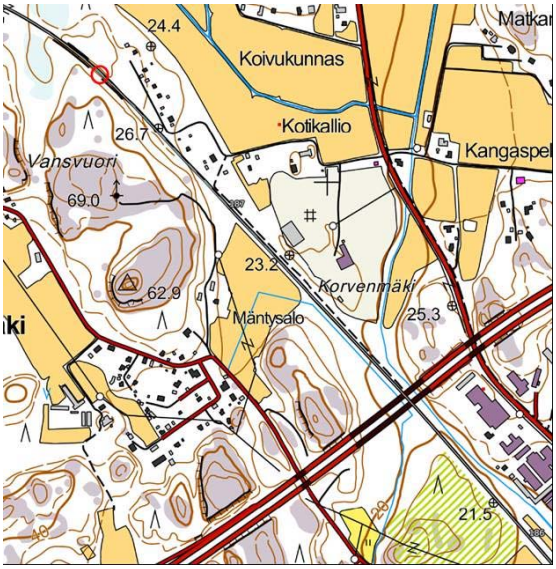
b)

Kuva 30. *Kuva kohteen 168 siirtymäanturien sijaintipaikasta a) Turkuun päin ja 168 b) Saloon päin. (Ossi Peltokangas 2014)*

5.6 Kohde 186+520 – 187+580

Jatkossa kohteesta käytetään lyhennettyä merkintää Kohde 187. Kohde sijaitsee välillä km 186+520 – 187+580 ja liikennepaikkavälillä Piikkiö-Kupittaa (kuva 31). Kohteessa on instrumentoitu kolme ratapölkkyä ratametreillä 187+400, +406, +412. Mittauslaitteiden asennuksen yhteydessä havaittiin kallion pinnan olevan noin 1 m etäisyydellä korkeusviivasta.

Seurantaosuuden päällysrakenne koostuu jatkuvaksi hitsatusta 60E1-profiilin kiskosta ja betoniratapölkyistä PB89, jotka on asennettu vuonna 1995. Seurantakohde kuuluu päällysrakenneluokkaan C1. Sepeli on vaihdettu vuonna 1995 ja sepelin laatuluokaksi ilmoitetaan minirapsussa R1/R2. Kiskot on hiottu vuonna 2006 minirapsun 2013 mukaan.



Kuva 31. *Kohteen 187 kartta. Instrumentoitujen pölkkyjen sijainti on merkitty punaisella ympyrällä. Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen maastokartta-aineistoa 10/2015.*

Vaakageometrialtaan rata kulkee seurantaosuudella noin km 187+200 saakka suoralla ja sen jälkeen kaarteessa, jonka kaarresäde R on 1000 m ja kallistus H on 140 mm. Pystygeometrialtaan rata on tasainen. Kohde tuettiin 26.–27.5.2014 välisenä yönä Plasser& Theuerin kolmen ratapölkyn tukemiskoneella (Ttk1 833).

a)

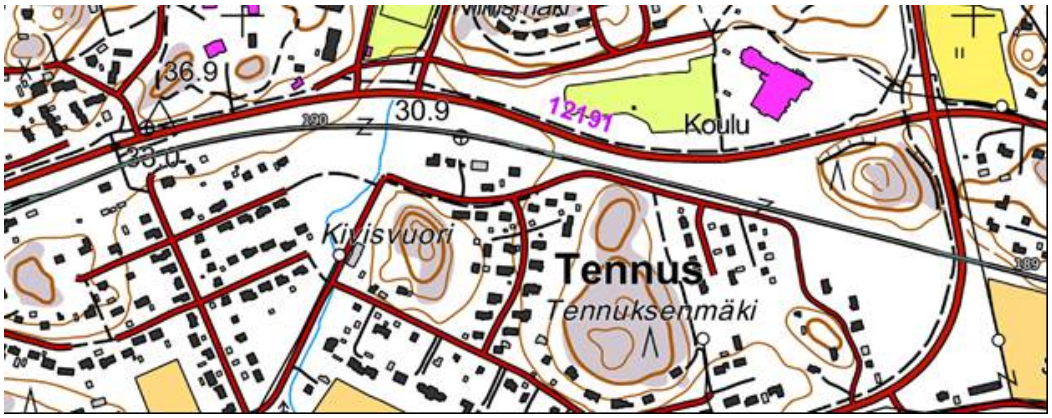
b)

Kuva 32 *Kuva kohteen 187 siirtymäanturien sijaintipaikasta a) Turkuun päin ja b) Saloon päin. (Ossi Peltokangas 2014)*

5.7 Kohde 189+300 – 190+500

Jatkossa kohteesta käytetään lyhennettyä merkintää Kohde 190. Kohde sijaitsee välillä km 189+300 – 190+500 ja liikennepaikkavälillä Piikkiö–Kupittaa (kuva 33). Kohteen alusta noin ratametrille +800 sepeli on vuodelta 2005 ja sen luokaksi on merkitty R1/R2. Kohteen loppuosan sepeli on vuodelta 1995 ja luokka on myös R1/R2. Kiskotyyppi vaihtuu kohdassa 189+850 (kuva 34) siten, että välillä +300 -+850 kiskotyyppi on 54E1 vuodelta 1981 ja loppuosan kisko on tyyppiä 60E1 vuodelta 1995. Vastaavasti pölkkytyyppi muuttuu myös eli alkupäässä noin ratametrille +820 saakka betonipölkky on tyyppiä B75 ja loppupäässä pölkkytyyppi on PB89. Kunnossapitäjältä saadun tiedon mukaan kohteeseen on vaihdettu tukikerros massanvaihtokoneella vuonna 2015 kilometrivälille km 189+784…189+839. Sama alue 189+784…839 on seulottu vuonna 2008.

Vaakageometrialtaan rata kulkee seurantaosuudella noin km 189+700 saakka suoralla ja sen jälkeen kaarteessa, jonka kaarresäde R on 950 m ja kallistus H on 150 mm.



Kuva 33. Kuva kohteen 190 sijainnista. Kuva sisältää Maanmittauslaitoksen maastokartta-aineistoa 10/2015.

Kuva 34. Kiskotyypin vaihtumiskohta noin km 189+850. (Heikki Luomala 2015)

Kohteessa seurataan raidegeometrian kehittymistä takymetrimittauksin. Kohteeseen ei ole asennettu instrumentointeja. Kohde tuettiin vasta syksyllä 2014 Plasserin 09-3X tukemiskoneella (Ttk1 832).

Kohteessa oli tarkoitus seurata tukemissyvyyden vaikutusta geometrian kehittymiseen. Kohteessa suunniteltiin tuennat seuraavasti:

- Km 189+300 – 189+600, tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys normaali 20 mm
- Km 189+600 – 190+200, tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys 60 mm
- Km 190+200 – 190+500, tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys normaali 20 mm

Tuennat toteutuivat kuitenkin seuraavasti (tieto perustuu Ossi Peltokankaan vuonna 2014 tekemiin muistiinpanoihin).

- Kohteen alusta Km 189+467 saakka tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys oli 40 mm
- Km 189+467 – 189+600 tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys oli normaali 20 mm
- Km 189+600 – 189+850 tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys oli 40 mm
- Km 189+850 tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys oli 43 mm (kiskotyypin muutos)
- Km 190+191 – 190+500 tukemishakun lapun yläpinnan ja ratapölkyn alapinnan välys oli normaali 20 mm

Tuentasyvyyden vaikutuksen tutkimiseen päädyttiin sveitsiläisen tutkimuksen perusteella. Laboratorio-olosuhteissa toteutetussa tutkimuksessa havaittiin tukemissyvyyden kasvattamisen 20 mm:stä 60 mm:iin lisäävän geometrian ja kantavuuden pysyvyyttä. (Paderno 2010)

6 Rantaradan seurantamittausten tulokset

6.1 Raidesepelitutkimukset

Taulukkoon 5 on koottu yhteenveto sepelinäytteiden rakeisuus- ja lujuustestien tuloksista. Rakeisuusluvut ovat keskiarvoja koko kohteesta otetuista näytteistä. Rakeisuuskäyristä on laskettu myös 1 ja 8 mm seulan läpäisyprosenttien summa P1+P8, jonka rakeisuuslukua 88 vastaavana raja-arvona voidaan pitää arvoa 35. Kohteissa 158 ja 190 sepelin asennusvuosi vaihtuu kesken kohteen. Vanhimpien sepeleiden rakeisuusluku oli keskimäärin 77, mutta molemmissa kohteissa havaittiin myös rakeisuusluvun raja-arvon (88) ylittäviä näytteitä. Kohteessa 151 rakeisuus-lukujen vaihteluväli oli 50–94 ja kohteessa 187 vaihteluväli oli 63–107. Myös kohteiden 158 ja 190 vanhoissa sepeleissä oli nykyisten raja-arvojen ylittäviä tuloksia. Yksityiskohtaiset testaustulokset on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 5. Raidesepelin rakeisuusluvut sekä lujuus- ja muoto-ominaisuudet.

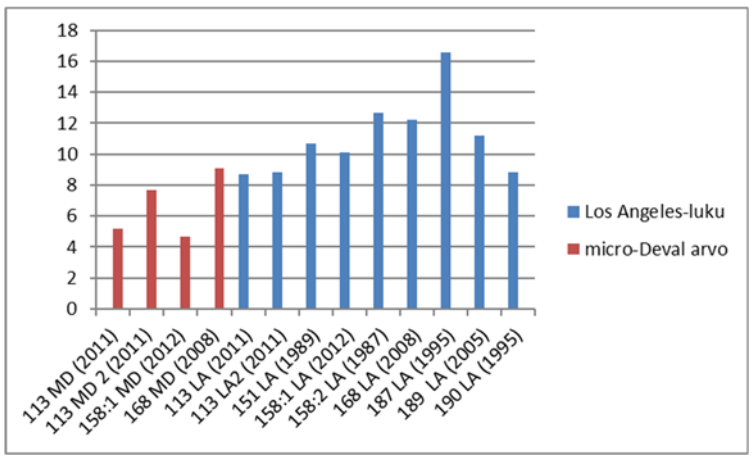
Ominaisuus	**Kohde 113** (2011)	**Kohde 151** (1989)	**Kohde 158** 158+260 (2012) & 158+500 (1987)	**Kohde 168** (2008)	**Kohde 187** (1995)	**Kohde 190** 189+350 (2005) & 189+950 (1995)
Rakeisuuslukujen keskiarvo (näyte-määrä)	13 (10)	77 (10)	+260:22(5) +500:62 (5) Keskiarvo 42	18 (10)	77 (10)	+350:25 (6) +950:60 (6) Keskiarvo:43
P1+P8 (keskiarvo)	1	24	+260:3 +500:19 Keskiarvo 11	1	23	189+350:4 189+950:15 Keskiarvo: 9
Los Angeles-luku (LA_{RB})	9	11	+260:10 +500:13 Keskiarvo:12	12	17	189+350:11 189+950:9 Keskiarvo: 10
Micro deval- arvo ($M_{DE}RB$)	6,5	NA	+260:4	9	NA	NA
Muotoarvo (SI)	18	6	+260:15 +500:6 Keskiarvo 11	26	10	25
Litteysluku (FI)	11	6	+260:11 +500:7 Keskiarvo 9	13	11	9

Lujuusominaisuuksien perusteella uusimmat sepelit vuosilta 2005–2012 täyttivät luokan R1/R2 vaatimukset eli Los Angeles luku oli ≤ 12 ja micro-Deval arvo oli ≤ 11. Kohteen 168 materiaali oli kuitenkin aivan raja-arvon tasolla (kuva 35). Liikennemäärän (n. 4 Mbrt/vuosi) perusteella rantaradalle kelpaisi kuitenkin lujuudeltaan heikompikin R3-luokan sepeli. Taulukon 6 mukaan uusimmat sepelit ovat pääosin vulkaniittia, jota Turun alueella on saatavilla ainakin Pöytyän kiviaineksen (intermediäärinen vulkaniitti) ja Koskin Kumilan ottopaikalta (hapan vulkaniitti). Vuosina 2005–2012 rantaradalle asennetuista uusista sepeleistä on ilmoitettu seuraavat ominaisuustiedot:

- Raekoko 31,5/63 mm
- Rakeisuusluokka F
- Raemuoto SI_{20}
- Iskunkestävyys $LA_{RB}12$
- Kulutuksenkestävyys MDERB11
- Hienoaineksenmäärä B (≤ 1 %)
- Jäädytys-sulatuskestävyys - vedenimeytyminen W_{cm} ≤0,5 %

Vuonna 1987 ja 1995 asennettujen sepelien LA-luvut olivat suurimpia. Kohteen 187 sepelin LA-luvun arvo 17 osoittaa sepelin kuuluvan nykyiseen luokkaan R4. Vanhimpien sepelien osalta tulosten vertailu nykyisiin vaatimuksiin on kuitenkin kyseenalaista, koska rakeet ovat kuluneet ja pyöristyneet tukikerroksessa yli 20 vuotta ja niiden lujuustulokset voivat olla kulumisesta johtuen alkuperäistä laatua parempia. Kohteen 187 osalta voidaan kuitenkin todeta, että sepeli ei täytä enää nykyistä rantaradan R3-luokan vaatimusta.

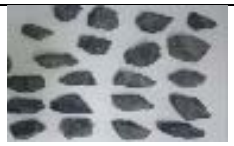
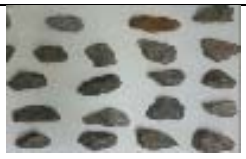
Sepelien alkuperästä ei valitettavasti saatu tarkkoja tietoja tai alkuperäisiä lujuustuloksia. Sepeliä on valmistettu muun muassa rataoikaisujen yhteydessä louhituista kallioista. Esimerkiksi vuonna 1989 Pitkänkaaren oikaisulle toimitettiin raidesepeli Karjaa-Pohjankuru väliltä, jossa hyvää kiveä sisältäneitä kallioleikkauksia levennettiin normaalia leveämmäksi. Raidesepeliä ovat saatujen tietojen mukaan toimittaneet myös Rudus Oy ja Laatumaa Oy. Rudus Oy:n toimittama sepeli on otettu Piikkiön louhintapaikalta (kinzigiitti ja granaatti-kordieriittikiillegneissi). Myös Perniössä on ollut pieni kiviaineksen ottopaikka, josta sepeliä on toimitettu. Yksinkertaistetun petrografian perusteella vanhimmat sepelit koostuvat pääosin graniittia ja gneissiä sisältävistä kiviaineksista. Erityisesti vanhimmista raidesepelinäytteistä voitiin havaita merkittävää heterogeenisyyttä (kuva 36) eli näytteiden alkuperäisen louhoksen selvittäminen oli mahdotonta.



Kuva 35. Lujuustestien tulokset.

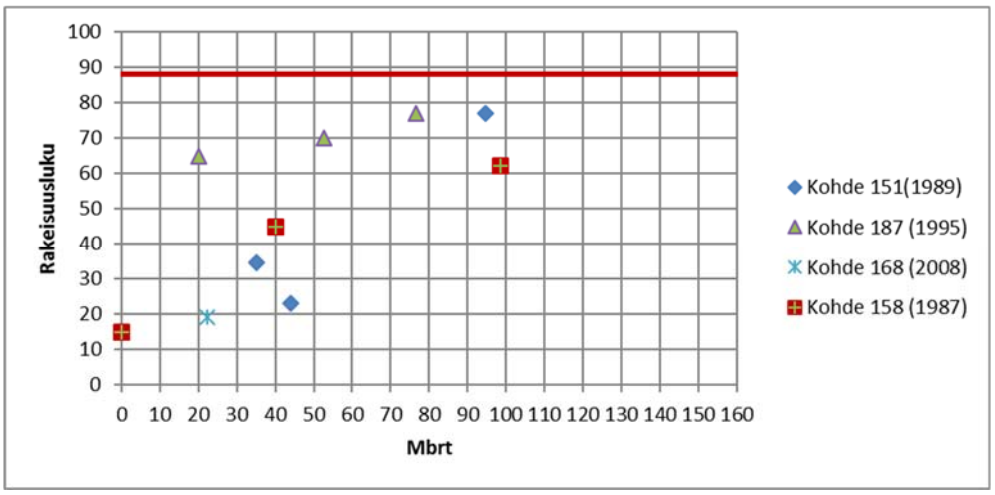
Raemuodoltaan vanhimmat sepelit ovat pyöristyneitä, mikä näkyy muotoarvossa SI < 10 ja voidaan havaita myös taulukossa 6 esitetyistä kuvista. Uusien sepeleiden osalta muotoarvot olivat suurehkoja ja ne ylittivät kohteissa 168 ja 190 uuden sepelin vaatimusarvon SI_{20}.

Taulukko 6. Raidesepelinäytteiden yksinkertaistettu petrografia.

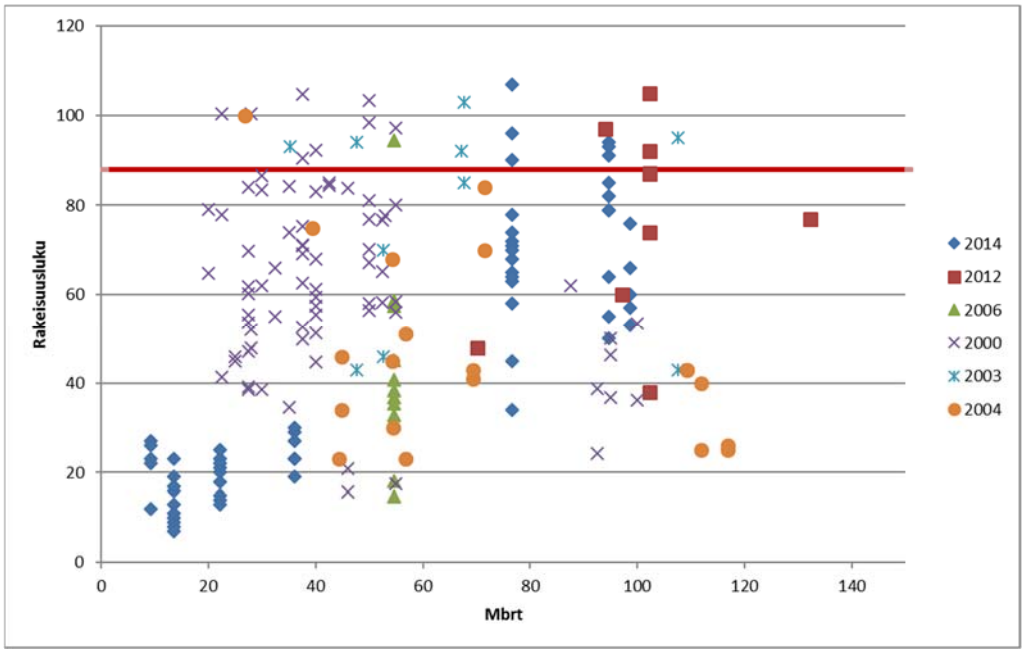
Kohde	Koostumus	Kuva lajitteesta 40/50 mm
113	Pääosin vulkaniittia, muutamia yksittäisiä graniittisia rakeita, muutamassa yksittäisessä vulkaniittirakeessa on havaittavissa muuttumista	
151	Graniittisia rakeita 36 %, Gneissejä 37 %, Tonaliittia 12 %, Vulkaniittia 15 %, muutamia ruosteisia ja muuttuneita rakeita	
158+260	Vulkaniittia 95 %, graniittisia rakeita 5 %	
158+500	Migmatiittia ja kiillegneissiä 55 %, graniittisia rakeita 17 %, amfiboliittia 19 % ja vulkaniittia 9 %	
168	Vulkaniittia 48%, Migmatiittia/graniittigneissiä 13 %, tonaliittia 5 %, Kiillegneissiä 34 %	
187	Graniitti/graniittigneissiä 27 %, Tonaliittia 21 %, amfiboliittia 28 %, Kiillegneissiä/-liusketta 24 %	
189+350	Graniittisia rakeita 13 %, Vulkaniittia 64 %, Kiillegneissiä/-liusketta 23 %	
189+900	Graniittisia rakeita 32 %, Vulkaniittia 39 %, Kiillegneissiä/-liusketta 29 %	

Kuva 36. Yksityiskohtia kohteiden 168 ja 151 sepelistä kuvattuna lokakuussa 2015. (Pirjo Kuula 2015)

Raidesepelin rakeisuuslukututkimuksia on tehty vuosien kuluessa muutamissa TTY:llä toteutetuissa tutkimushankkeissa (Nurmikolu 2000, 2005) sen lisäksi VR Track Oy:n arkistoista löytyi rantaradalla tehtyjä rakeisuuslukututkimuksia vuosilta 2000, 2003, 2004, 2006 ja 2012. Tehtyjen rakeisuuslukututkimusten tarkoitus on ollut esimerkiksi vuosina 2003–2004 rantaradan tarveselvitys eli näytteenottoa on voitu kohdistaa esimerkiksi erityisesti heikentyneisiin kohtiin. Aikaisemmin tehtyjen rakeisuusluku-tutkimusten ja tämän hankkeen tulosten perusteella voitiin kuitenkin verrata samalta kilometriltä otettujen näytteiden rakeisuuslukuja, kun oletettavasti kyseessä on ollut sama sepeli (kuva 37). Kuvasta 37 voidaan havaita rakeisuusluvun melko lineaarinen kehitys. Vuonna 1995 asennettu sepeli näyttää hienontuvan aluksi erittäin nopeasti. Luokan R3 sepelin käyttöiän tulisi olla 250 Mbrt.

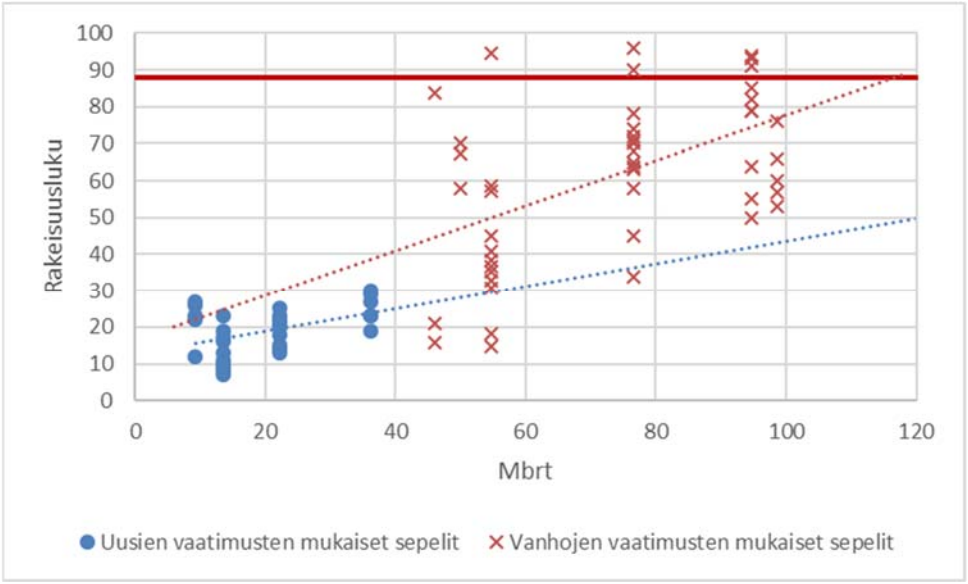


Kuva 37. Samoista kohteista eri ajanhetkinä otettujen rakeisuuslukunäytteiden tuloksia suhteessa rataosuudelle näytteenottohetkellä kertyneeseen liikennekuormitukseen.



Kuva 38. *Kaikki rantaradalta saadut rakeisuuslukutulokset suhteutettuna näytteenottohetkellä sepeliin kohdistuneeseen kokonaiskuormitukseen.*

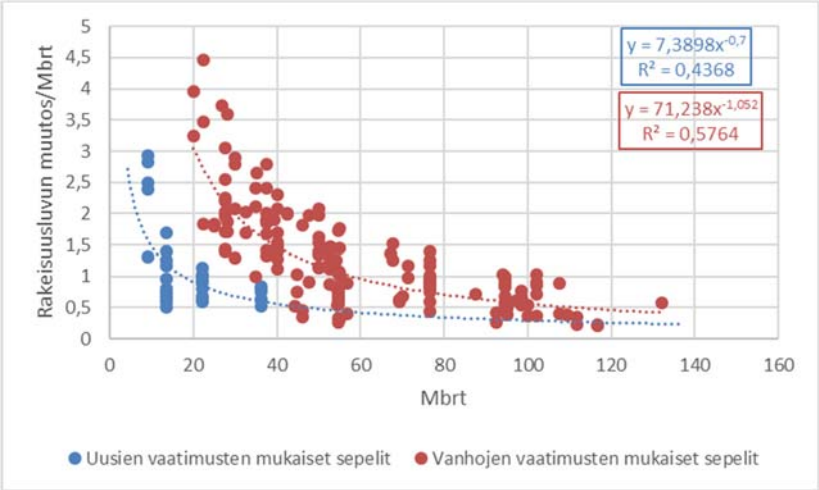
Kuvan 38 aineistosta on valikoitu tarkempaan vertailuun kohteet, joissa yhdeltä kilometriltä on otettu useita näytteitä ja pohjaolosuhteet ovat lähes vakiot. Kuvan 39 aineistona on käytetty vuonna 2014 otettuja näytteitä täydennettynä vastaavanlaisella yhdeltä kilometriltä (140+200-141+400) otettujen näytteiden sarjalla vuodelta 2006. Trendiviivat ovat lineaarisella regressiolla määritettyjä ennusteita. Kuvasta 39 voidaan havaita lineaaristen trendiviivojen avulla tehtyjen ennusteiden avulla vanhojen ja uusien vaatimusten mukaisten sepelien rakeisuusluvun kehittyvän lineaarisesti. Uudempien vaatimusten mukaisen sepelin rakeisuusluku näyttää kasvavan selvästi hitaammin, kun pohjaolosuhteet ovat vakiot ja samalta kilometriltä on otettu useita näytteitä.



Kuva 39. *Uusien ja vanhojen vaatimusten mukaisten sepelien rakeisuusluvun kehittyminen kuormituksen suhteen, kun pohjaolosuhteet ovat vakiot ja yhdeltä kilometriltä on otettu useita näytteitä.*

Jos tarkastellaan rakeisuusluvun muutosnopeutta kuormituksen suhteen havaitaan, että rakeisuusluku kasvaa aluksi nopeasti sepelin asennuksen jälkeen (kuva 40), mutta hidastuu kuormituksen lisääntyessä. Kuvan 40 aineistona on käytetty kaikkia rantaradalta otettuja näytteitä, joten se ei ole suoraan vertailukelpoinen kuvan 39 kanssa. Rakeisuuslukunäytteiden ottoa ei yleensä kohdenneta uudempiin sepeleihin, joten saattaa olla, että kuvan 40 elinkaarensa alussa nopeasti hienontuvat sepelit on tutkittu esimerkiksi ongelmakohteista. Jos vastaava rakeisuusluvun muutosnopeutta kuvaava kaavio piirrettäisiin kuvan 39 aineistosta vanhempien sepelien muutosnopeuden eksponentiaalista kehitystä ei ole havaittavissa, koska vertailukelpoisia tuloksia on saatavissa vain 50 Mbrt vanhemmista sepeleistä.

Vanhojen sepelivaatimuksen mukaisista sepeleistä ei ole saatavissa rakeisuuslukutuloksia, joissa kertynyt kuormitus olisi alle 20 Mbrt. Vaikka sepelin hienontumisnopeus näyttää aluksi olevan eksponentiaalista näyttäisi pitkän aikavälin hienontuminen olevan kuitenkin lineaarista. Kuvasta 40 voidaan havaita, että mitä kauemmin sepeli on ollut rakenteessa sitä hitaammin sen rakeisuusluku muuttuu. Tuloksista voidaan myös havaita muutosnopeuden melko suuri vaihtelu, esimerkiksi kertyneen kokonaiskuormituksen ollessa 50–60 Mbrt välillä muutosnopeus voi olla alle 0,5 tai lähes 2 rakeislukuyksikköä miljoonaa bruttotonnia kohden.

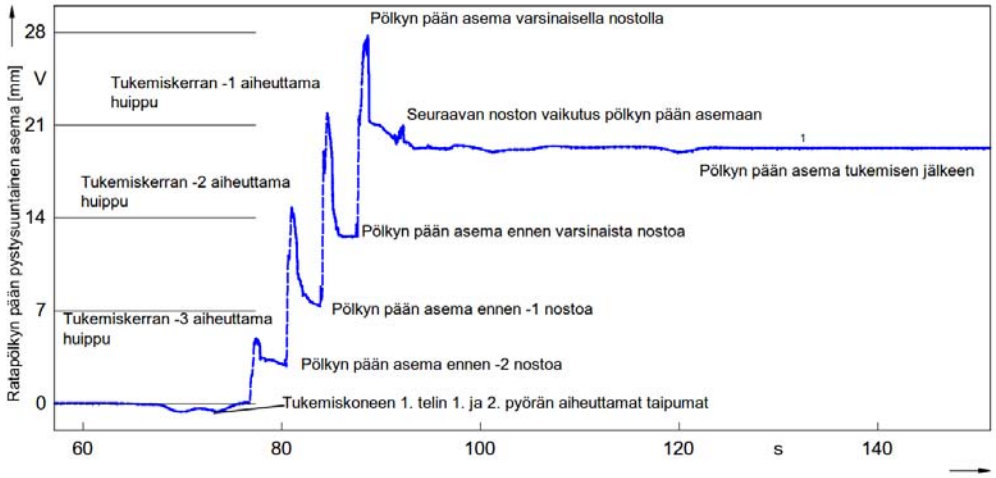


Kuva 40. *Rantaradan sepelien rakeisuusluvun muuttuminen suhteessa sepeliin kohdistuneeseen kokonaiskuormitukseen. Katkoviivalla on esitetty yhtälön mukainen trendiviiva ja sen ennuste. Aineistona on käytetty kaikkia rantaradasta saatavilla olleita tuloksia.*

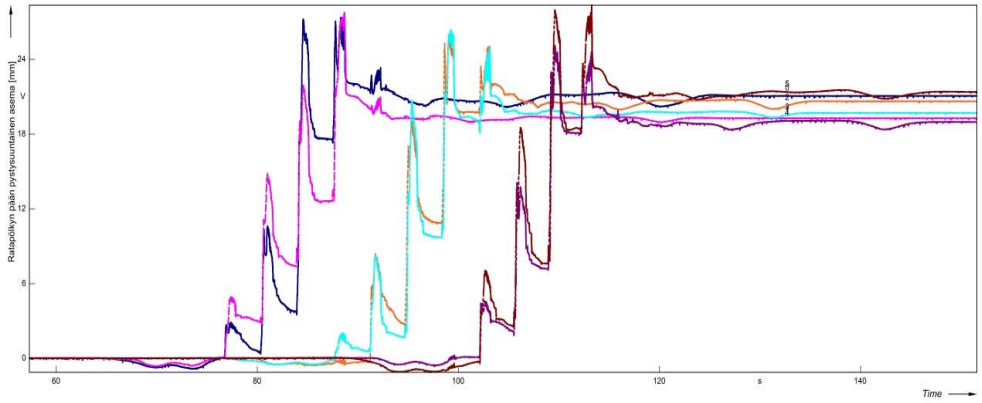
6.2 Pystygeometrian kehittyminen

6.2.1 Mittaukset tuentahetkellä

Tuentahetkellä instrumentoiduista pölkyistä mitattiin pystysuuntaista siirtymää. Mittausten tulokset on esitetty kuvissa 42–44 ja taulukoissa 7–10 kohteittain. Kuvaan 41 on koottu eri käyrien tulkintaa helpottava esimerkki pölkyn liikkeiden osalta. Taulukoissa esitetyt tukemiskertojen aiheuttamat pölkyn pään aseman muutokset on laskettu erotuksena nollatasoon, joka on ennen etutelin aiheuttamaa taipumaa havaittu taso. Taulukoiden alimmalla rivillä on esitetty myös tukemisen tavoitenoston suuruus. Ennen varsinaista tukemisnostoa pölkyn pään asema muuttuu edellisten pölkkyjen tukemisnostoista johtuen.



Kuva 41. *Kuvissa 42–45 esitettyjen käyrien tulkintaohje. Pölkyn pään asemassa tukemisen aikana tapahtuvat muutokset.*

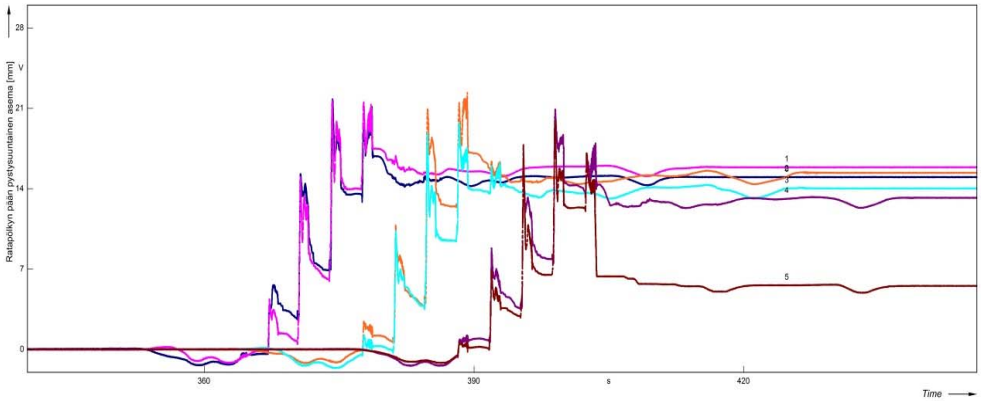


Kuva 42. *Kohteen 113 tuennan aikana havaitut instrumentoitujen pölkkyjen pään siirtymät. Käyrien pölkkykohtainen numerointi on taulukon 7 mukainen.*

Kuvassa 42 esitetyn kohteen 113 pölkkyjen pään asema oli tuennan jälkeen keskimäärin 20 mm ylempänä kuin ennen tuentaa.

Taulukko 7. *Kohteen 113 tuennan aikaiset mittaukset taulukkomuodossa.*

	Kohde 113					
	1	2	3	4	5	6
	113+188 VAS	113+188 OIK	113+194 VAS	113+194 OIK	113+200 VAS	113+200 OIK
Tukemiskoneen 1. telin 1. pyörän aiheuttama taipuma	-0,75	-0,63	-0,51	-0,51	-0,49	-1,09
Tukemiskoneen 1. telin 2. pyörän aiheuttama taipuma	-0,85	-0,61	-0,56	-0,49	-0,55	-1,07
Tukemiskerran -3 aiheuttama huippu	2,87	4,83	-0,22	1,97	4,54	7,03
Pölkyn pään asema tukemiskerran -3 jälkeen juuri ennen -2 nostoa	0,45	2,81	-0,31	0,56	2,08	2,51
Tukemiskerran -2 aiheuttama huippu	10,42	14,66	8,28	8,20	14,08	18,53
Pölkyn pään asema tukemiskerran -2 jälkeen juuri ennen -1 nostoa	3,48	7,39	2,60	1,70	7,20	7,52
Tukemiskerran -1 aiheuttama huippu	27,21	21,90	18,91	20,55	25,12	27,97
Pölkyn pään asema tukemiskerran -1 jälkeen juuri ennen nostoa	17,40	12,62	10,74	9,70	18,04	18,38
Pölkyn pään asema korkeimmillaan varsinaisella nostolla	27,15	27,43	25,64	26,13	24,58	28,36
Noston +1 vaikutus pölkyn korkeusasemaan	1,53	0,84	4,83	5,79	EI VAIKUTUSTA	EI VAIKUTUSTA
Pölkyn pään lopullinen korkeusasema tukemisen jälkeen	21,06	19,26	20,63	19,70	18,98	21,38
Tavoitenosto instrumentoidun pölkyn kohdalla	25	25	25	25	25	25



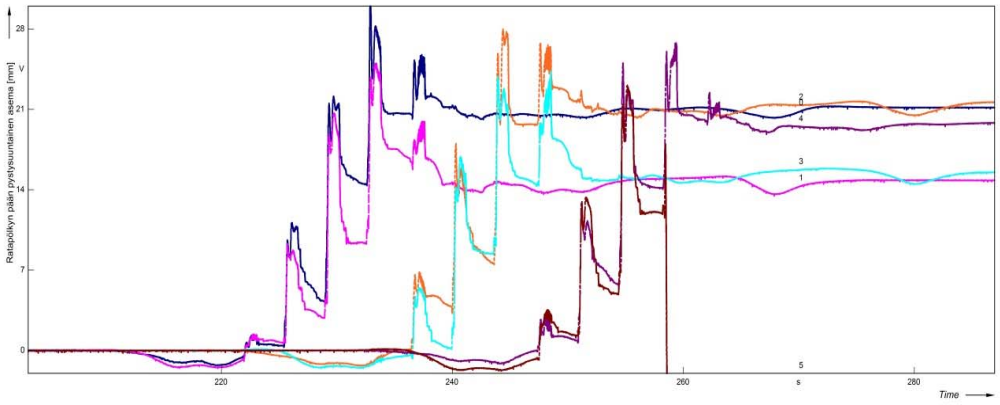
Kuva 43. Kohteen 151 tuennan aikaiset mittaukset. Käyrien pölkkykohtainen numerointi on taulukon 8 mukainen.

Kuvassa 43 esiettyn kohteen 151 yhden pölkyn 151+632 vas mittauksessa tapahtui todennäköisesti virhe, koska on epätodennäköistä, että yhden pölkyn toinen pää olisi jäänyt 10 mm alemmaksi. Kohteen pölkkyjen pään asema oli keskimäärin 15 mm ylempänä tuennan jälkeen.

Taulukko 8. Kohteen 151 tuennan aikaiset mittaukset taulukkomuodossa.

	Kohde 151					
	2	1	4	3	6	5
	151+620 VAS	151+620 OIK	151+626 VAS	151+626 OIK	151+632 VAS	151+632 OIK
Tukemiskoneen 1. telin 1. pyörän aiheuttama taipuma	-1,01	-1,38	-1,42	-1,22	-1,08	-1,46
Tukemiskoneen 1. telin 2. pyörän aiheuttama taipuma	-1,17	-1,37	-1,63	-1,17	-1,18	-1,46
Tukemiskerran -3 aiheuttama huippu	4,41	5,60	1,28	2,47	0,64	1,23
Pölkyn pään asema tukemiskerran -3 jälkeen juuri ennen -2 nostoa	0,48	2,58	-0,04	0,61	-0,03	0,75
Tukemiskerran -2 aiheuttama huippu	15,06	15,26	10,33	10,83	6,92	8,82
Pölkyn pään asema tukemiskerran -2 jälkeen juuri ennen -1 nostoa	5,95	6,81	3,83	3,66	2,77	3,49
Tukemiskerran -1 aiheuttama huippu	21,78	21,78	18,87	20,94	17,84	16,84
Pölkyn pään asema tukemiskerran -1 jälkeen juuri ennen nostoa	13,95	13,41	9,41	12,46	6,49	7,84
Pölkyn pään asema korkeimmillaan varsinaisella nostolla	21,57	21,12	19,71	22,36	20,03	20,91
Noston +1 vaikutus pölkyn korkeusasemaan	EI VAIKUTUSTA	EI VAIKUTUSTA	2,52	1,26	4,77	4,07
Pölkyn pään lopullinen korkeusasema tukemisen jälkeen	15,89	14,99	14,04	15,37	5,54	13,18
Tavoitenosto instrumentoidun pölkyn kohdalla	20	20	20	20	20	20

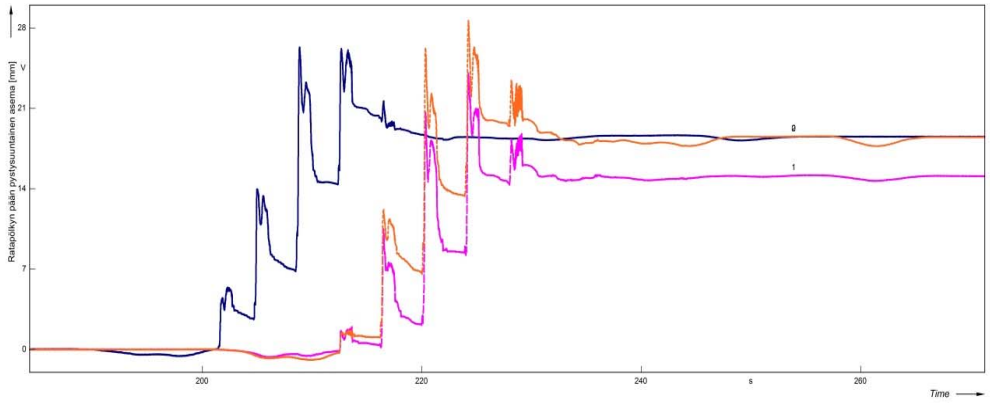
Kuvassa 44 esitetyn kohteen 168 pölkkyjen päiden aseman välinen erotus johtuu siitä, että kohde on kaarteessa. Pölkyn 168+244 oikea pään mittausanturi putosi vastinlevyltä tuennan lopussa. Kohteen pölkkyjen pään asema oli vasemmalla puolella noin 20 mm ylempänä kuin ennen tuentaa, kun taas oikea puoli jäi keskimäärin 15 mm ylemmäksi kuin ennen tuentaa.



Kuva 44. Kohteen 168 tuennan aikaiset mittaukset. Käyrien pölkkykohtainen numerointi on taulukon 9 mukainen.

Taulukko 9. Kohteen 168 tuennan aikaiset mittaukset taulukkomuodossa

	Kohde 168					
	1	2	3	4	5	6
	168+232 VAS	168+232 OIK	168+238 VAS	168+238 OIK	168+244 VAS	168+244 OIK
Tukemiskoneen 1. telin 1. pyörän aiheuttama taipuma	-1,12	-1,52	-1,23	-1,50	-1,04	-1,72
Tukemiskoneen 1. telin 2. pyörän aiheuttama taipuma	-1,31	-1,54	-1,38	-1,54	-1,26	-1,73
Tukemiskerran -3 aiheuttama huippu	1,36	1,42	6,81	5,48	2,77	3,61
Pölkyn pään asema tukemiskerran -3 jälkeen juuri ennen -2 nostoa	0,26	0,64	3,22	0,13	0,66	1,08
Tukemiskerran -2 aiheuttama huippu	11,14	9,31	18,01	16,90	12,95	13,35
Pölkyn pään asema tukemiskerran -2 jälkeen juuri ennen -1 nostoa	4,03	2,82	7,47	8,37	5,35	4,87
Tukemiskerran -1 aiheuttama huippu	22,15	20,73	28,01	23,86	25,04	23,12
Pölkyn pään asema tukemiskerran -1 jälkeen juuri ennen nostoa	14,35	9,28	19,58	14,32	14,15	12,00
Pölkyn pään asema korkeimmillaan varsinaisella nostolla	30,34	25,05	26,80	24,34	26,77	NA
Noston +1 vaikutus pölkyn korkeusasemaan	5,20	3,51	7,13	9,86	2,72	NA
Pölkyn pään lopullinen korkeusasema tukemisen jälkeen	21,15	14,84	21,59	15,52	19,84	NA
Tavoitenosto instrumentoidun pölkyn kohdalla	23	23	24,5	24,5	24	24



Kuva 44. Kohteen 187 tuennan aikaiset mittaukset. Käyrien pölkkykohtainen numerointi on taulukon 10 mukainen.

Kuvassa 45 esitetyn kohteen 187 pölkkyjen pään asema jäi keskimäärin 18 mm ylemmäksi kuin ennen tuentaa. Taulukosta 10 voidaan havaita, että viimeisestä instrumentoidusta pölkystä ei saatu tukemisen aikana mittausdataa.

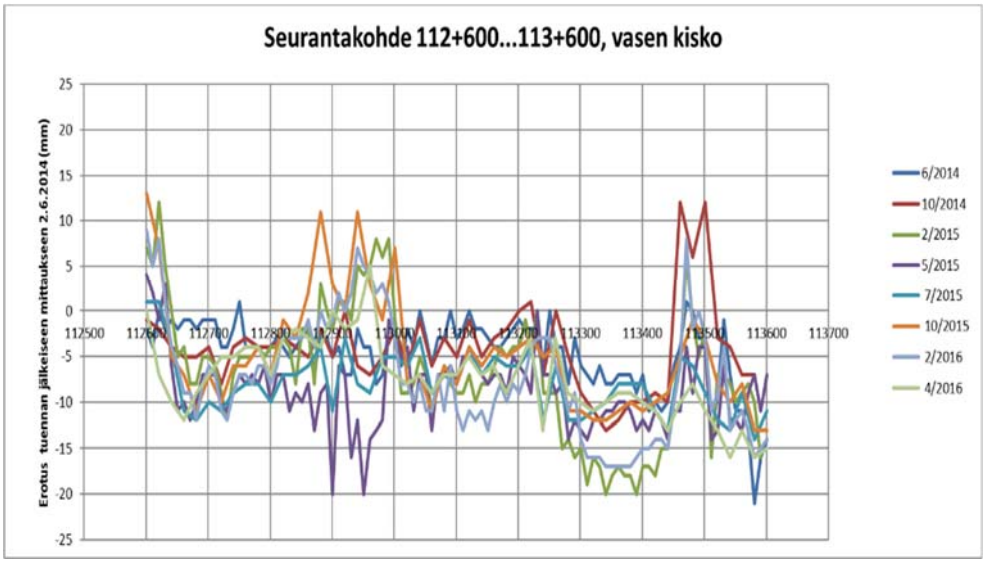
Taulukko 10. Kohteen 187 tuennan aikaiset mittaukset taulukkomuodossa.

	Kohde 187					
	2	1	4	3	6	5
	187+400 VAS	187+400 OIK	187+406 VAS	187+406 OIK	187+412 VAS	187+412 OIK
Tukemiskoneen 1. telin 1. pyörän aiheuttama taipuma	-0,50	NA	-0,77	-0,70	NA	NA
Tukemiskoneen 1. telin 2. pyörän aiheuttama taipuma	-0,60	NA	-0,92	-0,60	NA	NA
Tukemiskerran -3 aiheuttama huippu	5,41	NA	1,71	1,97	NA	NA
Pölkyn pään asema tukemiskerran -3 jälkeen juuri ennen -2 nostoa	2,59	NA	1,00	0,15	NA	NA
Tukemiskerran -2 aiheuttama huippu	13,97	NA	12,18	10,52	NA	NA
Pölkyn pään asema tukemiskerran -2 jälkeen juuri ennen -1 nostoa	6,78	NA	6,52	2,10	NA	NA
Tukemiskerran -1 aiheuttama huippu	26,32	NA	26,33	20,68	NA	NA
Pölkyn pään asema tukemiskerran -1 jälkeen juuri ennen nostoa	14,34	NA	13,27	8,19	NA	NA
Pölkyn pään asema korkeimmillaan varsinaisella nostolla	26,20	NA	28,70	24,08	NA	NA
Noston +1 vaikutus pölkyn korkeusasemaan	1,81	NA	4,09	4,47	NA	NA
Pölkyn pään lopullinen korkeusasema tukemisen jälkeen	18,52	NA	18,50	15,08	NA	NA
Tavoitenosto instrumentoidun pölkyn kohdalla	20	NA	20	20	NA	NA

Tukemisen aikana tehtyjen mittausten perusteella voitiin kaikissa kohteissa havaita, että ennen varsinaista kolmeen pölkkyyn kohdentuvaa nostoa pölkyt liikkuvat ylöspäin ja näin ollen myös sepelissä voi tapahtua uudelleen järjestäytymistä. Pölkyt ovat olleet keskimäärin 10 mm alkuperäistä asemaa ylempänä ennen varsinaista nostoa. Näin ollen lopullinen noston suuruus syntyy vaiheittain. Lisäksi seuraavien pölkkyjen nosto näkyy myös pienenä palautuvana muutoksena kaikissa kohteissa. Mittaukset myös osoittivat, että saman pölkyn vasemman ja oikean puolen korkeusasema eroaa suoralla tuennan jälkeen vain muutamia millimetrejä. Useimmiten suunnitellusta 25 mm nostosta pölkyn pään asema jää noin 5 mm alemmaksi eli tasolle +20 mm alkuperäiseen asemaan verrattuna.

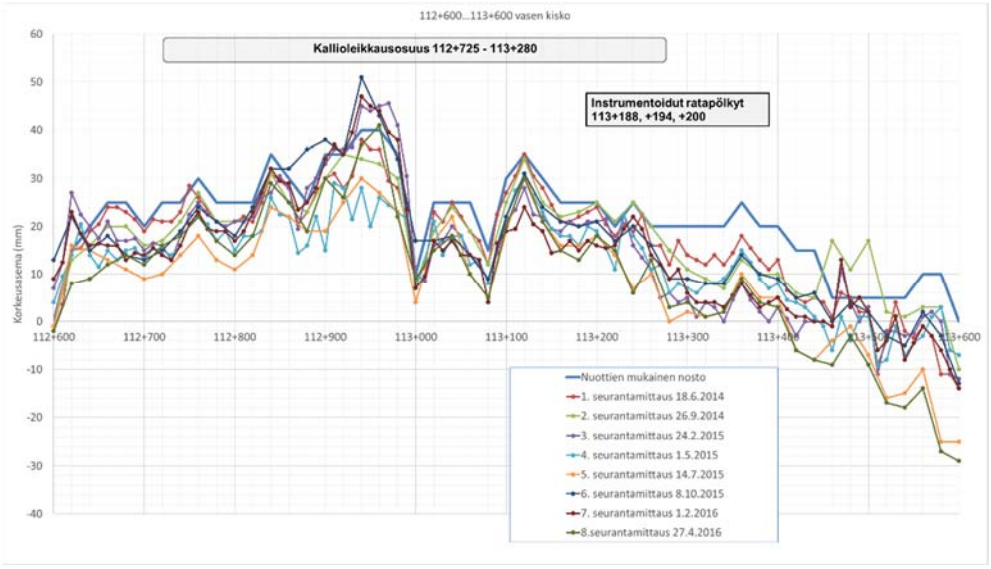
6.2.2 Takymetrimittaukset

Takymetrimittausten tuloksia on havainnollistettu esimerkinomaisesti kuvissa 45, 46 ja 47, joissa on esitetty kohteen 113 koko seuranta-ajalta koostetut mittaustulokset. Kuvassa 45 on esitetty absoluuttiset korkeusaseman muutokset suhteessa tuennan jälkeiseen mittaukseen kesäkuussa 2014. Kuvassa 46 tulokset on laskettu pysty-geometrian muutoksena suhteessa suunniteltuun nostoon, joka perustuu ennen tuentaa tehtyyn takymetrimittaukseen. Kuvassa 47 on esitetty takymetritulokset suhteessa tavoitegeometriaan. Kun tuloksia suhteutetaan teoreettiseen tavoite-geometriaan on otettava huomioon, että tukemisen noston suuruudella on omat rajoituksensa, eli välttämättä geometria ei korjaannu lähellekään tavoitegeometriaa. Tavoitegeometria on ilmoitettu korkeusviivan tasolle, joten tulosten vertailussa on jouduttu korjaamaan lukuarvoja kiskon korkeuden verran, koska mittaukset on tehty kiskon päältä. Kaartessa mittaustulokset eroavat aina tavoitegeometriasta kallistuksen verran, koska vain toinen kisko on johtokiskona. Kaikkien kohteiden yksityiskohtaiset takymetrimittausten tulokset on esitetty liitteessä 2.



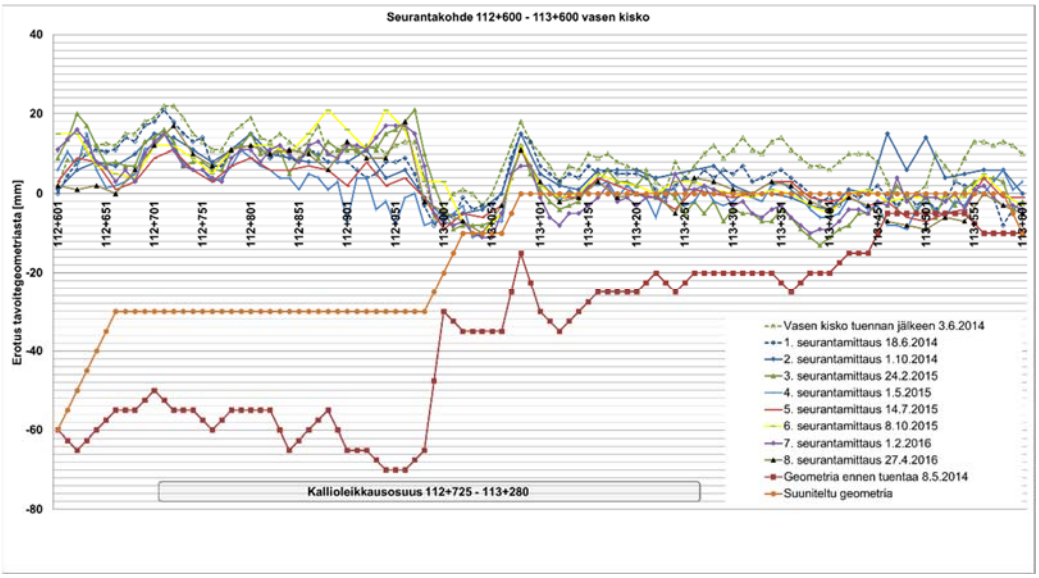
Kuva 45. Kohteen 113 vasemman kiskon takymetrimittausten tulokset esitettynä erotuksena tuennan jälkeiseen mittaukseen.

Kuvasta 45 voidaan havaita, että mittaustuloksissa esiintyy epäsäännöllisyyttä. Pölkyt liikkuisivat mittausten mukaan kymmeniä millejä alas- ja ylöspäin, mistä ei kuitenkaan esimerkiksi radantarkastusmittauksissa ole havaintoja. Kun verrataan kuvan 45 tuloksia kuvassa 56 esitettyihin radantarkastusmittausten tuloksiin voidaan todeta, että ainoastaan kohdassa 112+800 näkyvä korkeuspoikkeama on samalla kohdalla kuin takymetrimittauksissa näkyvä merkittävin poikkeama-alue. Tuloksista voidaan myös havaita, että talviaikana tehdyissä mittauksissa oli yleensä aina suuria poikkeamia. Kuvan 45 mukaisella tavalla esitettynä takymetrimittauksista ei juurikaan voi tehdä johtopäätöksiä. Tästä johtuen päädyttiin esittämään takymetrimittausten tuloksia kuvien 46 ja 47 mukaisesti.



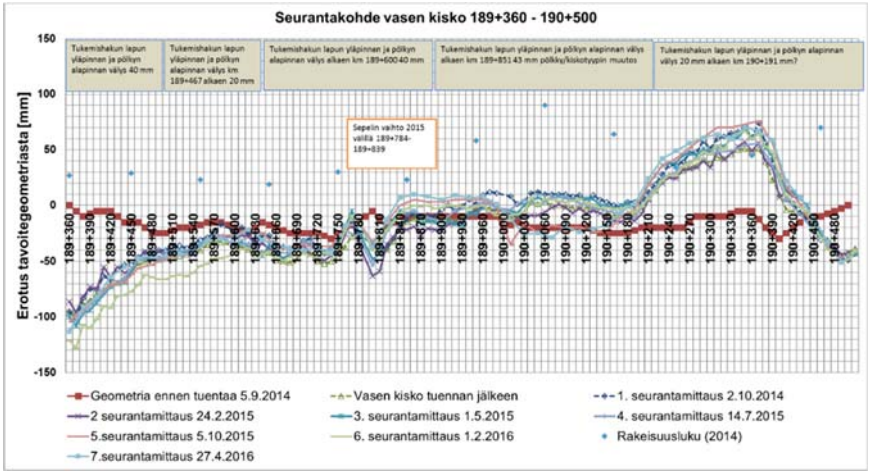
Kuva 46. *Kohteen 113 vasemman kiskon takymetritulosten erotus tukemista varten suunnitellusta nostosta. Suunniteltu nosto perustuu ennen tuentaa takymetrilla mitattuun geometriaan.*

Kuvasta 46 voidaan havaita, että pääosin takymetrimittausten tulokset osoittavat pölkkyjen painuneen alaspäin tukemisnostosta (sininen yhtenäinen viiva), mutta myös ylöspäin suuntautuvia ja todennäköisesti epätarkkuuteen liittyviä siirtymiä on havaittavissa. Tulosten hajonta näyttää olevan pienempi kohteen alkuosassa.



Kuva 47. *Kohteen 113 vasemman kiskon takymetrimittauksista laskettu erotus tavoitegeometriasta.*

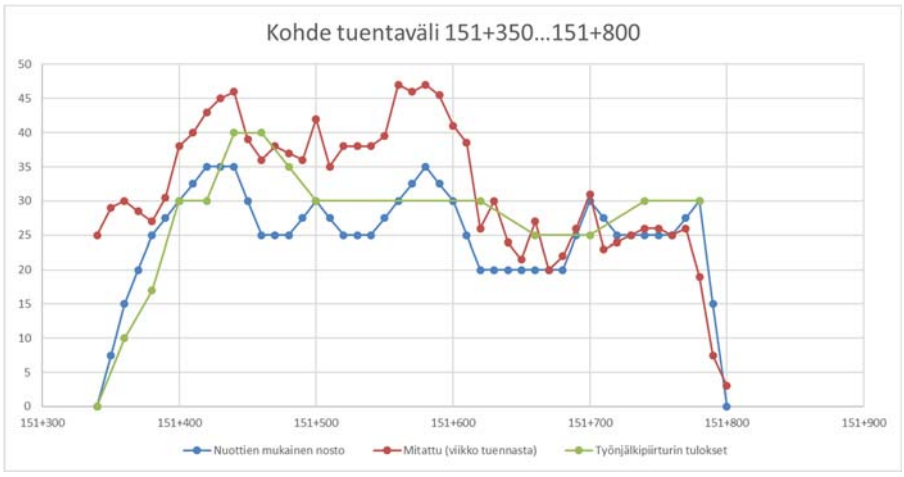
Kuvassa 47 takymetrimittausten tulokset on esitettynä erotuksena tavoitegeometriasta. Kuvassa tavoitegeometria ja suunniteltu geometria on esitetty absoluuttisina arvoina, kun taas takymetritulokset on esitetty erotuksena tavoitteesta. Koska edellä esitettyjen kuvien havainnollisuus kärsiin pienentämisestä, kaikki mittaustulokset on esitetty suurempina kuvina liitteessä 2.



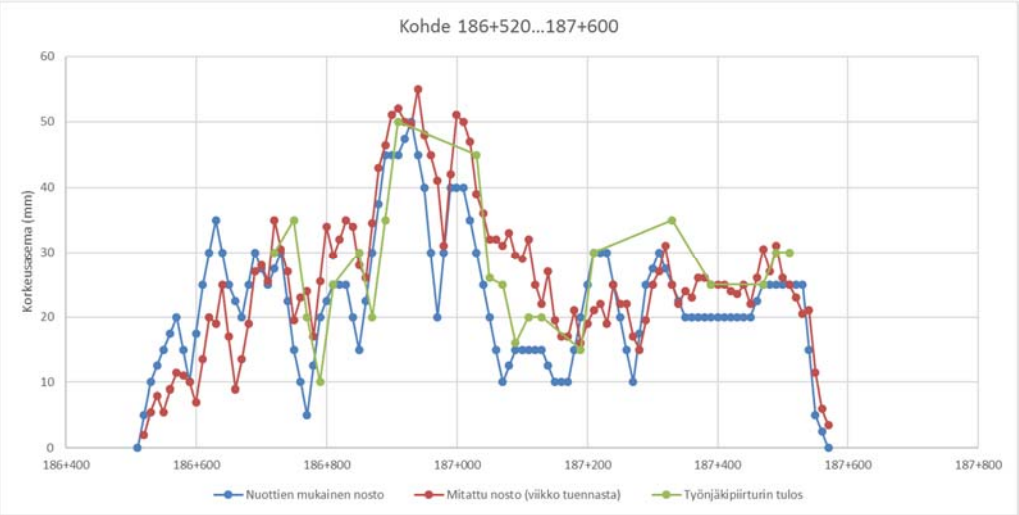
Kuva 48. Kohteen 190 vasemman kiskon takymetrimittausten tulokset.

Kohteessa 190 kokeiltiin tuennan ulottamista syvemmälle kuvassa 48 esitetyllä tavalla. Tuennan ulottaminen syvemmälle ei näytä vaikuttavan takymetrimittausten mukaan pystygeometrian kehittymiseen. Kisko- ja pölkkytyypin vaihtumiskohdassa km 189+800 on havaittavissa poikkeama mikä näkyy myös radantarkastustuloksissa. Saattaa olla, että tätä tutkimusta varten tehty tuenta on aiheuttanut pienen geometria-virheen, mikä näkyy myös luvun 6.2.4 kuvassa 60.

Yhteenvetona takymetrimittauksista voidaan todeta niiden tarkkuuden vaihtelevan esimerkiksi vuodenajan mukaan toisin sanoen talviaikana tehdyissä mittauksissa on enemmän hajontaa ja epäjohdonmukaisuuksia. Myös kiintopisteiden etäisyyden kasvaessa hajonta kasvaa. Takymetrimittausten perusteella ei näin ollen voida tehdä kovinkaan paljon johtopäätöksiä siitä, miten rakenne tukemisen jälkeen käyttäytyy. Mittausten tarkkuutta havainnollistavat myös kuvat 49 ja 50, joissa on esitetty suunnitelman mukainen tukemisnosto, työnjälkipiirustuksista mitattu nosto ja viikko tuennan jälkeen mitattu korkeusaseman muutos. Tuennan aikaisten mittausten mukaan voidaan todeta, että takymetrilla mitattu muutos ei kaikilta osin voi pitää paikkaansa, koska mittaustulos kuvaisi pölkyn liikettä jopa kymmeniä millejä ylöspäin tuennan jälkeen. Tulosten perusteella herää myös kysymys, onko takymetrimittausten käyttö tukemisen suunnittelussa riittävän tarkka menettely.



Kuva 49. Kohteen 151 suunniteltu nosto, työnjälkipiirturin käyrästä mitattu nosto ja takymetrimittausten perusteella laskettu ennen tuentaa ja tuennan jälkeen mitatun korkeusaseman erotus.



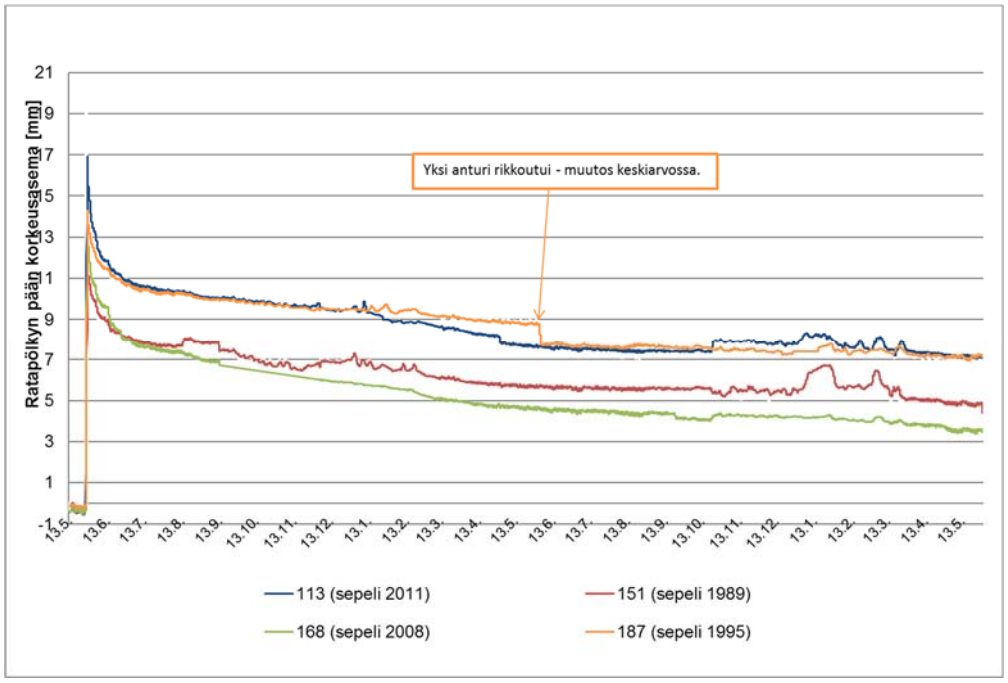
Kuva 50. *Kohteen 186 suunniteltu nosto, työnjälkipiirturin käyrästä mitattu nosto ja takymetrimittausten mukaan laskettu ennen tuentaa ja tuennan jälkeen mitatun korkeusaseman erotus.*

Taulukko 11. *Yhteenvetotaulukko takymetrimittausten tuloksista (mittausten tulokset on esitetty kaavioina liitteessä 2)*

Kohde	Tärkeimmät huomiot
112	Mittausten perusteella pölkkyjen asema muuttuu suhteessa tukemisen nostoon seuranta-aikana noin 10–15 mm. Kohteen alkuosan tuloksissa hajonta on kohtuullista km 113+200 saakka, mutta sen jälkeen hajonta kasvaa.
151	Mittausten perusteella pölkkyjen asema muuttuu suhteessa tukemisen nostoon seuranta-aikana enimmillään yli 20 mm. Erityisesti talven 2016 mittauksissa näkyy merkittäviä poikkeamia – ilmiö voi olla myös todellinen routimisesta johtuva.
168	Mittausten perusteella pölkkyjen asema muuttuu suhteessa tukemisen nostoon seuranta-aikana enimmillään lähes 30 mm. Pienimmillään tulosten hajonta on kuitenkin 10 mm luokkaa.
187	Mittausten perusteella pölkkyjen asema muuttuu suhteessa tukemisen nostoon seuranta-aikana noin 10–50 mm. Yksittäisten tulosten välinen ero erittäin suuri, erityisesti talviajan mittauksissa havaitaan merkittäviä poikkeamia (yli 50 mm).
190	Mittausten perusteella pölkkyjen asema muuttuu suhteessa tukemisen nostoon seuranta-aikana noin 10–50 mm. Kohteen alkuosassa tulosten hajonta on pienempi. Yksittäisten tulosten välinen ero erittäin suuri. Erityisesti talviajan mittauksissa havaitaan merkittäviä poikkeamia. Tukemishakkujen upottaminen syvempään ei vaikuttanut tuloksiin.

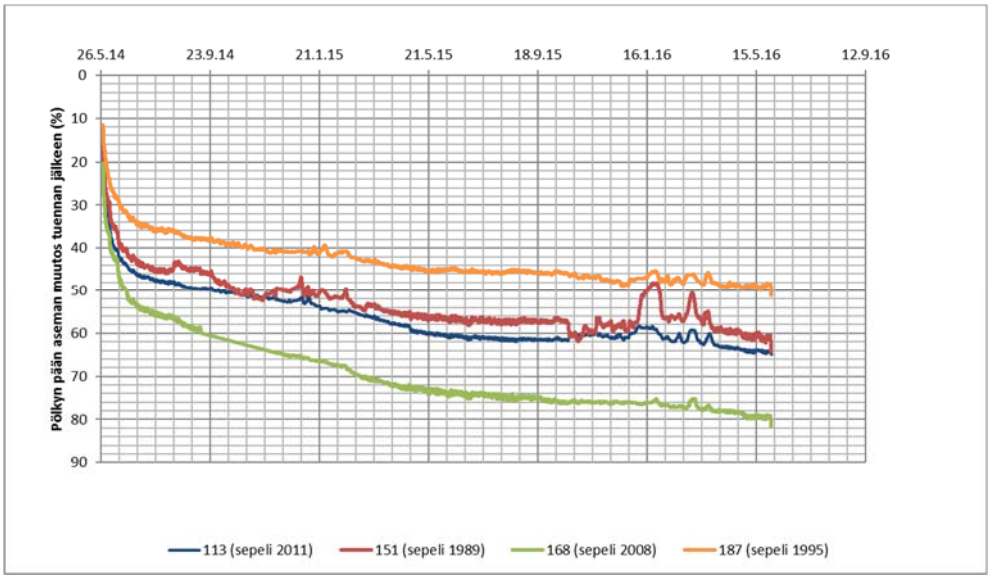
6.2.3 Siirtymäanturimittaukset

Siirtymäanturimittauksia on tarkasteltu sekä absoluuttisina pölkyn pään aseman muutoksina (kuva 51) että prosentuaalisena muutoksena (kuva 52). Kuvissa esitetyt käyrät ovat 10 mittaustuloksen liukuvia keskiarvoja. Kuvista voidaan havaita myös joulu-tammikuun pakkasjaksojen vaikutus korkeusasemaan. Lisäksi on tarkasteltu pölkkyjen korkeusaseman muutosta hieman tarkemmin heti tuennan jälkeen (kuva 53).

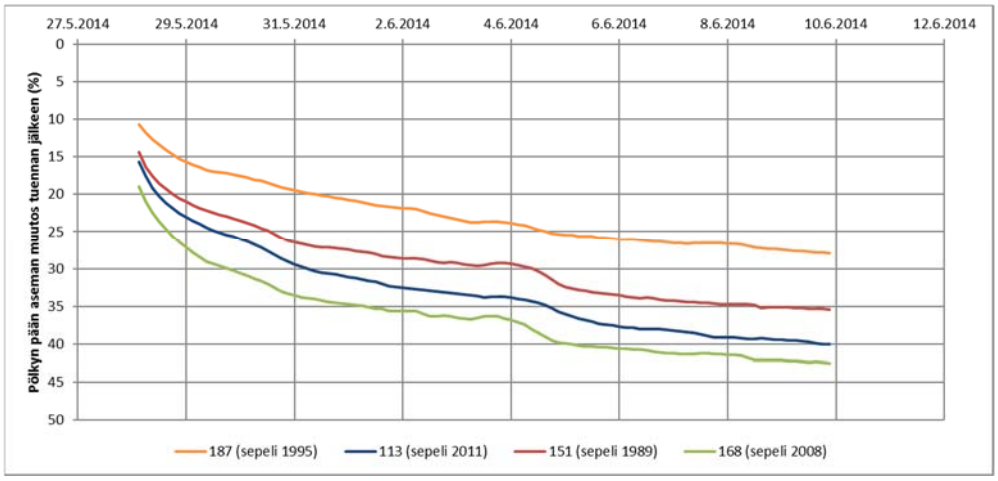


Kuva 51. *Pölkyn pään aseman muutokset tuennan jälkeen koko seuranta-aikana. Tulokset ovat kymmenen mittauksen liukuvia keskiarvoja kuuden yksittäisen pölkyn mittausdatasta.*

Kahden vuoden seuranta-aikana uusimmat sepelit painuivat noston suuruuteen suhteutettuna prosentuaalisesti yli 60 % tuennan jälkeen, kun taas vanhemmat sepelit painuivat 50–60 %. Seurannan tulokset kuitenkin osoittavat sekä uusien että vanhojen sepelien painumistrendin olevan samansuuntainen. Kuvista 51 ja 52 voidaan havaita erityisesti kohteessa 151 talviaikana tapahtuvaa lievää rakenteen jäätymisestä johtuvaa pölkkyjen aseman nousua ylöspäin, mikä voidaan tulkita myös routimiseksi. Kohteen 168 rakenteet olivat kaikkein paksuimmat, mikä voi osaltaan selittään suurempaa painumaa.



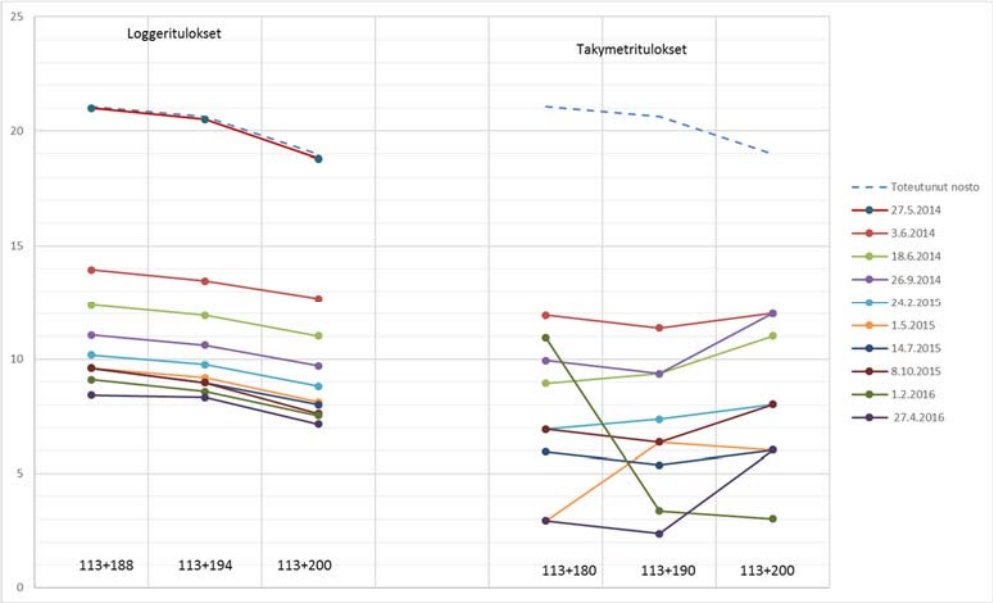
Kuva 52 *Pölkyn pää aseman kumulatiivinen muutos koko seuranta-aikana. Käyrät ovat kymmenen mittauksen liukuvien keskiarvojen trendiviivoja.*



Kuva 53. *Kahden ensimmäisen viikon aikana tapahtunut pölkyn pää aseman kumulatiivinen prosentuaalinen muutos. Käyrät ovat kahdeksan mittauksen liukuvan keskiarvon trendiviivoja.*

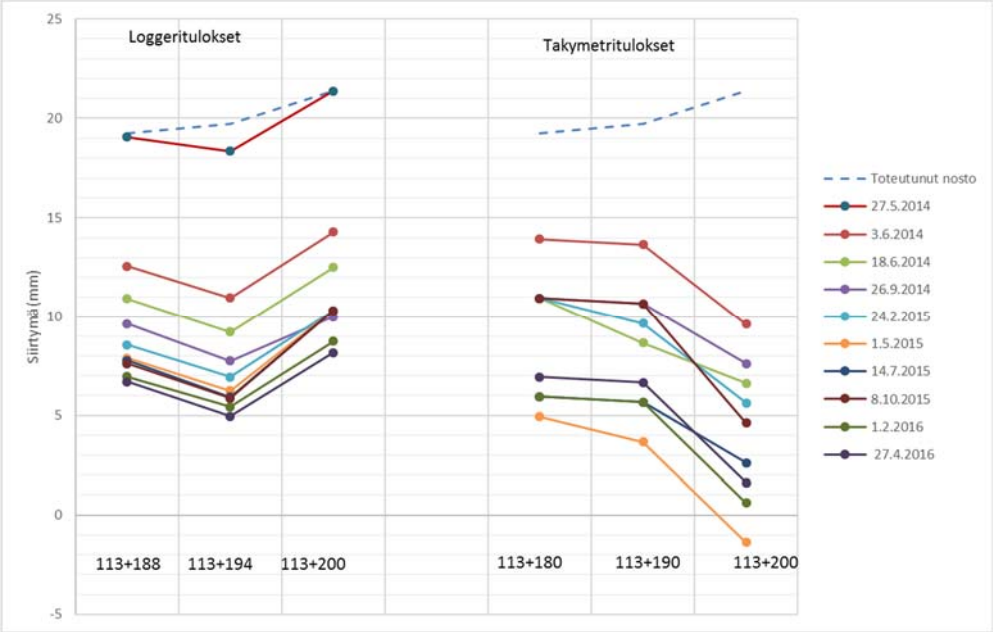
Nostosta häviää jo muutaman ensimmäisen päivän aikana noin 20–30 % ja kahden viikon kuluttua nostosta on hävinnyt jo 27–44 %. Tuloksista voidaan havaita, että uudempien sepelien pölkyn pään asema muuttuu hieman nopeammin kuin vanhoilla sepeleillä. Kun tarkastellaan pölkyn pään aseman muuttumista hieman pidemmissä jaksoissa, voidaan todeta, että painuminen vakiintuu ensimmäisen kolmen kuukauden jälkeen keskimäärin tasolle 0,25 mm/kuukausi eli keskimääräinen painuma on 2,8 mm vuodessa. Muutosnopeus on lähes samanlainen sekä uusilla että vanhoilla sepeleillä, uusimpien sepelien kohteissa 113 ja 168 tuentanosto oli kuitenkin hieman suurempi, mikä voi osaltaan vaikuttaa hieman suurempaan muutosnopeuteen heti tuennan jälkeen.

Takymetrimittausten ja siirtymäanturitulosten vertailusta on esitetty esimerkkejä kuvissa 54 ja 55. Vertailua varten takymetrimittausten nollataso on asetettu noin viikko tukemisen jälkeen tehtyyn mittaukseen. Siirtymäanturitulokset ovat absoluuttisia korkeustason muutoksia heti tuennan jälkeen. Tavoitetaso on tuennan aikana havaittu noston taso. Takymetrituloksissa on jonkin verran hajontaa eli mittausten mukaan korkeusasema ei alene lineaarisesti kuten siirtymäanturitulokset osoittavat. Kun tarkastellaan kuvassa 54 samalla aikavälillä tapahtunutta muutosta, havaitaan siirtymäanturitulosten osoittavan noin 6 mm muutosta, kun takymetrillä mitattu muutos on 9 mm. Kokonaismuutoksia verrattaessa on otettava huomioon, että välittömästi tukemisen jälkeistä painumaa ei saada takymetrimittauksilla kiinni. Takymetrimittausta ei myöskään voida kohdentaa alle 10 m radan suuntaiseen tarkkuuteen eli mittaukset eivät kohdennu samaan pölkkyyn.



Kuva 54. *Kohteen 113 vasemman kiskon siirtymäanturi- ja takymetrimittausten vertailu. Koska takymetrimittaukset on tehty noin viikko tukemisen jälkeen, takymetritulosten lähtötasoksi on laskennallisesti muutettu loggeritulosten taso 27.5.2014.*

Kuvassa on 55 esitetty kohteen 113 instrumentoitujen pölkkyjen oikean puoleisesta päästä mitattujen siirtymien vertailu. Kuvasta voidaan havaita, että loggerimittausten perusteella pölkkyjen aseman muuttuessa noin 6–8 mm (2.6.2016 ja 27.4.2016 välinen kokonaisaika) takymetrituloksien mukaan pölkyt painuvat vastaavalla aikavälillä 9–11 mm.

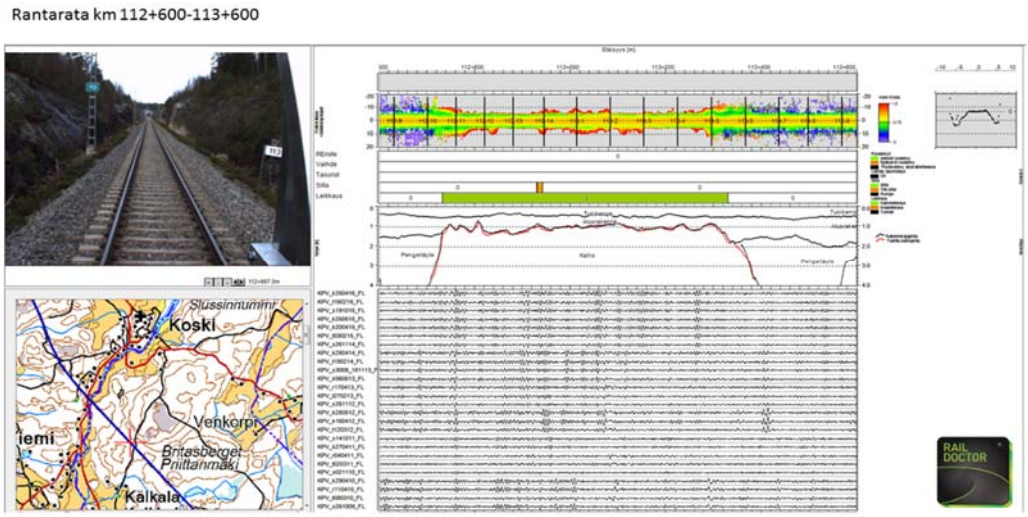


Kuva 55. *Kohteen 113 oikean kiskon siirtymäanturi- ja takymetrimittausten vertailu. Koska takymetrimittaukset on tehty noin viikko tukemisen jälkeen, takymetritulosten lähtötasoksi on laskennallisesti muutettu loggeritulosten taso 27.5.2014.*

6.2.4 Radantarkastusmittausten tulokset

Radantarkastustietojen tuloksista tarkastellaan korkeuspoikkeamaa. Arvioinnissa on käytetty VR Track:n tuottamia pdf-muotoisia raportteja. Lisäksi tarkastelun apuna on käytetty Roadscanners Oy:n tuottamaa kuvien 56–59 mukaisia aineistoja vuosilta 2009-2016. Kuvat 56-59 on esitetty suurempina liitteessä 3.

Tarkasteltaessa kohteen 113 korkeuspoikkeamatietoja havaitaan, sepelin vaihdon/ seulonnan vuonna 2010 pienentäneen korkeuspoikkeamien keskihajontaa. Poikkeuksena voidaan kuitenkin havaita vuonna 2012 kohdissa 113+400, 113+040 ja 112+960 esiintyviä suurempia hajontoja. Seurantaosuuden alkuosassa suunnilleen ratakilometrille 113+100 asti on yleisesti esiintynyt jonkin verran korkeuspoikkeamia sekä ennen että jälkeen sepelin vaihdon. Osuuden loppuosalla 113+100 – 113+600 korkeuspoikkeamat ovat olleet varsin vähäisiä ja kehittyneet huomattavasti osuuden alkuosan korkeuspoikkeamia hitaammin. Sepelin vaihdon jälkeen kohteella on tehty tuenta vain tätä tutkimusta varten.



Kuva 56. Roadscanners Oy:n tuottama yhteenveto kohteen 113 radantarkastusmittauksista ja rakenteesta. Nuolilla on osoitettu sepelin uusinta 2010 ja tuenta 2014.

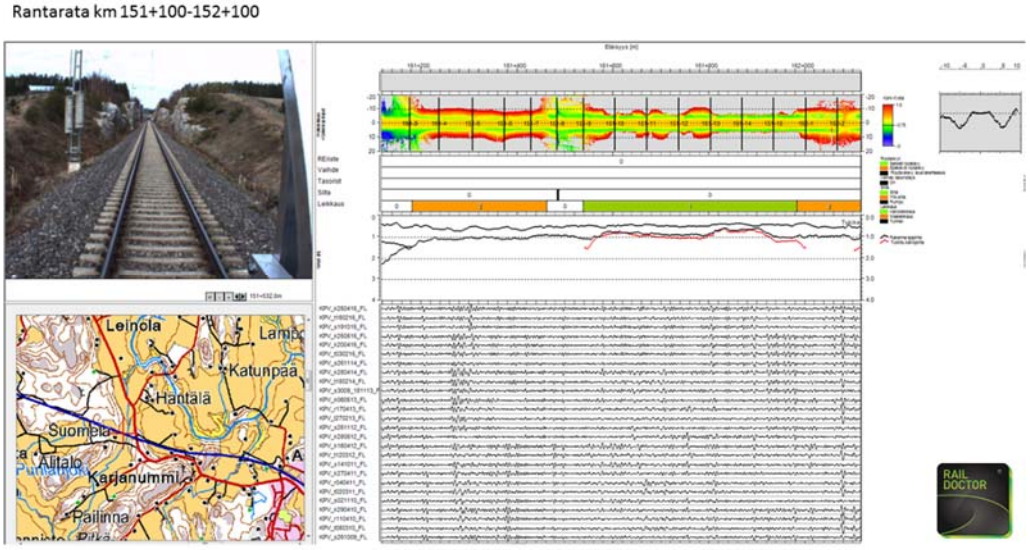
Kuvasta 56 voidaan havaita keväällä 2014 tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyn tuennan vaikutus korkeuspoikkeaman pienentymiseen kohdissa km 112+740 ja km 112+900 sekä km 113+040. Poikkeamat kasvavat kuitenkin melko nopeasti ennen tuentaa havaitulle tasolle. Kohdassa km 112+740…800 siirrytään pengertäytteeltä kalliolle ja poikkeama palaa kahdessa vuodessa samalle tasolle kuin ennen tuentaa. Radantarkastustuloksissa on havaittu edellä mainitussa epäjatkuvuuskohdassa C- tai D-luokan korkeuspoikkeamia. Kalliopinnan epätasaisuus eli rakennekerrosten paksuuden vaihtelu näyttää myös sijoittuvan suurimman keskihajonnan alueelle.

Kohdetta 151 on tuettu usein (taulukko 12), vuoden 2011 jälkeen joka vuosi kaksi kertaa. Tuennan vaikutukset pystygeometriaan ovat olleet välillä 151+100… 151+300 melko lyhytaikaisia eli virhe on havaittu uudestaan noin vuoden kuluttua tuennasta. Myös kohteen toisessa päässä kilometriltä 152 eteenpäin on esiintynyt merkittäviä korkeuspoikkeamia, joita on korjattu tukemalla.

Kohteen rakeisuuslukujen keskiarvo on 77, kohteessa oli kuitenkin kolme näytettä, joiden rakeisuusluku oli > 90. Näytteenottohetkellä kohteen kokonaiskuormitus on ollut 95 Mbrt, mikä tarkoittaisi nykyisellä liikennemäärällä vielä yli 30 vuotta jäljellä olevaa sepelin käyttöikää (R3-luokka 250 Mbrt). Tuennan aiheuttamasta lisäkuormituksesta on kirjallisuudessa esitetty erilaisia arvoja, jotka enimmillään ovat jopa 20 Mbrt/tukemiskerta. Suomalaisella kiviaineksella tuennan aiheuttama lisäkuorma on todennäköisesti pienempi. Kun lasketaan kohteen 151 jäljellä oleva sepelin käyttöikä kuvan 40 perusteella käyttämällä lukuarvoa 0,5 rakeisuuslukuyksikköä/Mbrt. Rantaradalla muutosnopeus olisi näin ollen 2 rakeisuuslukuyksikköä/vuosi eli kohteessa 151 sepelin keskimääräinen käyttöika tulisi täyteen 5–6 vuoden kuluttua vuodesta 2014 laskien.

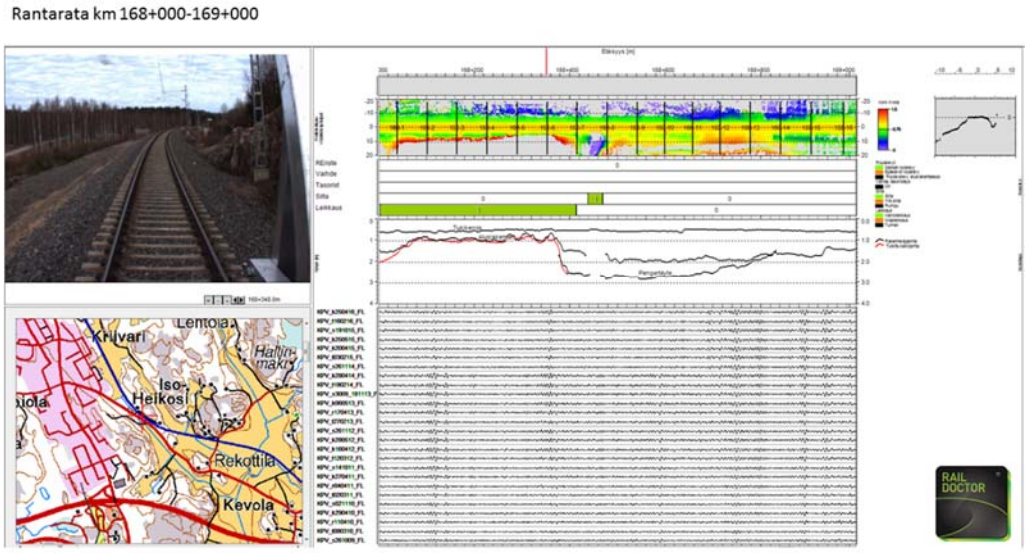
Taulukko 12. Kohteen 151 kunnossapitotiedot (nähtävästi tuettu myös vuonna 2015, mutta tähän ei vielä ole varmistettua tietoa)

Seurantakohde	**Alue**	**Toimenpide ja ajankohta**
151+200…152+000	Koko kohde	Tuettu tutkimustarkoituksessa kevät 2014
	151+240…151+400 ja 152+020…152+120	Tuettu syksy 2013
	150+900…151+200	Tuettu kevät 2013
	151+260…151+320; 151+460…151+640 ja 152+000…152+140	Tuettu kevät 2012
	151+720…151+920	Tuettu syksy 2012
	150+900…151+400	Tuettu kevät 2011
	150+160…151+800	Tuettu syksy 2008
	151+960…152+100	Tuettu kevät 2008
	151+100…151+520	Tuettu syksy 2007
	151+000…151+400	Tuettu kevät 2007



Kuva 57. Roadscanners Oy:n tuottama yhteenveto kohteen 151 radantarkastusmittauksista ja rakenteesta.

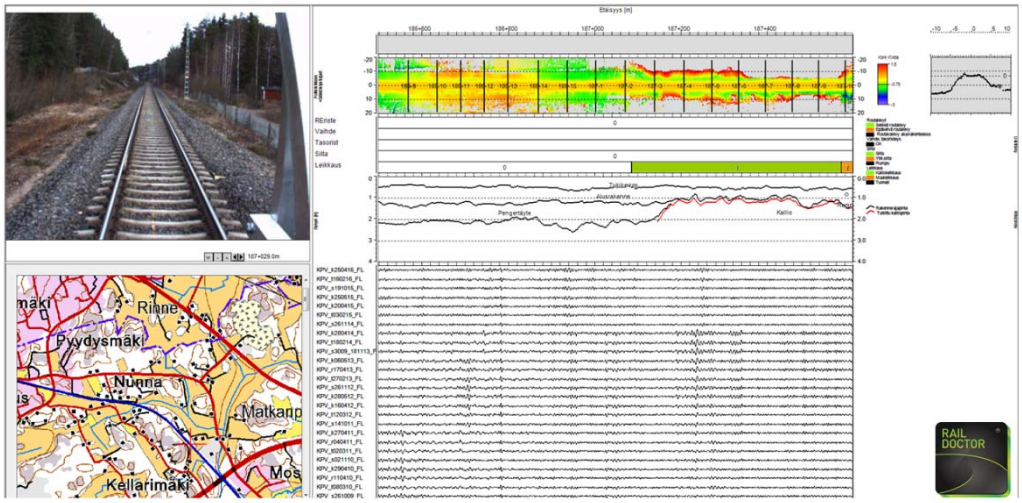
Kohteessa 168 ei ole esiintynyt merkittäviä tukemistarvetta lisääviä korkeuspoikkeamia. Käyrätulosteesta voidaan kuitenkin havaita pientä poikkeamaa kallioleikkauksen vaihtuessa pengerrakenteeksi välillä 168+300..+400 sekä penkereen paksuuden muuttuessa välillä 168+700…+800. Myös tässä tutkimushankkeessa toteutettu tuenta näyttää muuttaneen väliaikaisesti tilannetta syksyn 2014 mittausajon tulosten perusteella. Tilanne on kuitenkin palautunut lähes entiselleen jo kevään 2015 mittauksissa.



Kuva 58. Roadscanners Oy:n tuottama yhteenveto kohteen 168 radantarkastusmittauksista ja rakenteesta.

Kohteen 187 radantarkastusmittaukset osoittavat geometrian olevan melko hyvässä kunnossa (kuva 59). Kohdassa 187+200 näyttää esiintyvän suurempaa korkeuspoikkeamaa, mutta tilanne on korjaantunut tämän hankkeen tuennan yhteydessä. Poikkeaman esiintymiskohdassa näyttää olevan epätasaisesta kallionpinnasta johtuva epäjatkuvuuskohta ja näin ollen hieman ohuemmat rakennekerrokset. Kohteen sepeli on vuodelta 1995, joten siihen on kohdistunut näytteenottohetkellä noin 75 Mbrt kuormitus. Kohdetta on tuettu viimeisen kymmenen vuoden aikana parin vuoden välein (taulukko 13). Kohteen rakeisuuslukujen keskiarvo oli 77 ja kohteessa havaittiin kaksi rakeisuusluvun 88 ylittävää tulosta. Kuvan 40 mukaan tämän ikäisen sepelin rakeisuusluku kehittyisi noin 0,5/Mbrt eli nykyisellä liikennemäärällä noin kaksi yksikköä vuodessa. Joten laskennallisesti kohteen keskiarvon pitäisi olla yli 88 vuonna 2019, jolloin sepeli olisi vain noin 25 vuotta vanhaa. Kiviaineksen hienontuminen voi johtua sepelin alkuperäisestä laadusta (vuonna 1995), mutta myös tuenta on voinut vaikuttaa nopeutuneeseen hienontumiseen.

Rantarata km 186+500-187+600

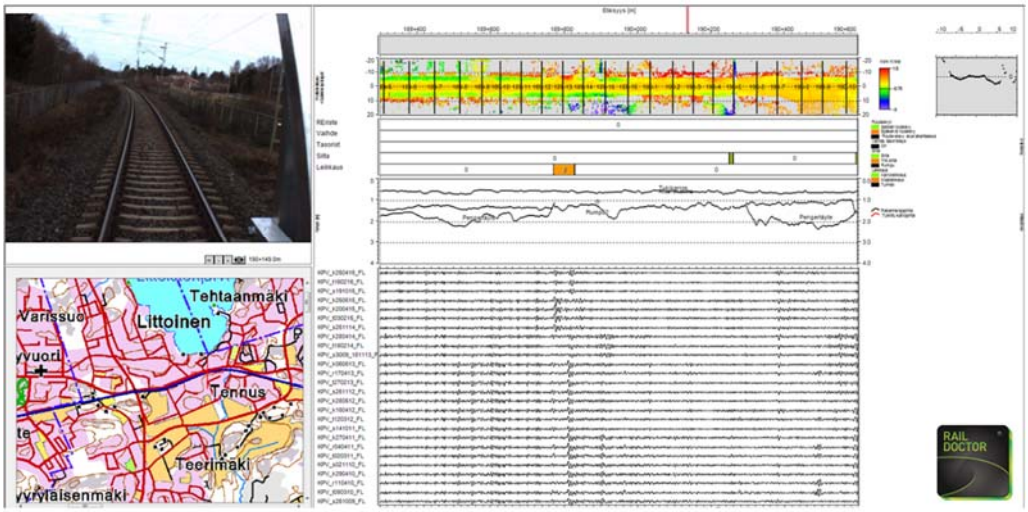


Kuva 59. Roadscanners Oy:n tuottama yhteenveto kohteen 187 radantarkastus-mittauksista ja rakenteesta.

Taulukko 13. Kohteen 187 tuentatiedot.

Seurantakohde	**Alue**	**Toimenpide ja ajankohta**
186+520…187+600	koko kohde	tuettu tutkimustarkoituksessa kevät 2014
	186+640…186+740	tuettu kevät 2013
	186+160…186+600	kevät 2010
	186+090…186+400	kevät 2008
	186+600…186+900	syksy 2008

Rantarata km 189+300-190+600



Kuva 60. Roadscanners Oy:n tuottama yhteenveto kohteen 190 radantarkastus-mittauksista ja rakenteesta.

Kohdetta 190 on myös tuettu vuoden 2005 jälkeen usein (taulukko 14). Tuenta on kohdentunut vanhemman sepelin alueelle (alkaen 189+800 Turkuun päin). Kohteen rakeisuuslukujen keskiarvo on 43, mutta tuloksista löytyy myös yksi raja-arvon ylittävä tulos, joka sijoittuu vanhemman vuonna 1995 asennetun sepelin alueelle. Vanhemman sepelin rakeisuuslukujen keskiarvo on 60.

Kohteen 190 vanhemman sepelin (1995) alueelle syntyvä toistuva tuentatarve vuosina 2009–2013 ei näytä johtuva pystygeometriavirheestä (Kuva 61) vaan mahdollisesti muista radantarkastuksessa havaituista poikkeamista. Kohdassa 189+784…836 vuonna 2014 tehdyn sepelinvaihdon perusteita ei ole tiedossa, mutta kuvasta 61 voidaan havaita korkeuspoikkeaman hajonnan kasvaneen vaihtokohdassa tässä tutkimushankkeessa tehdyn tuennan jälkeen. Viimeisin sepelinvaihtoalue sijoittuu myös hyvin lähelle kohtaa, jossa kisko-ja pölkkytyyppi vaihtuvat.

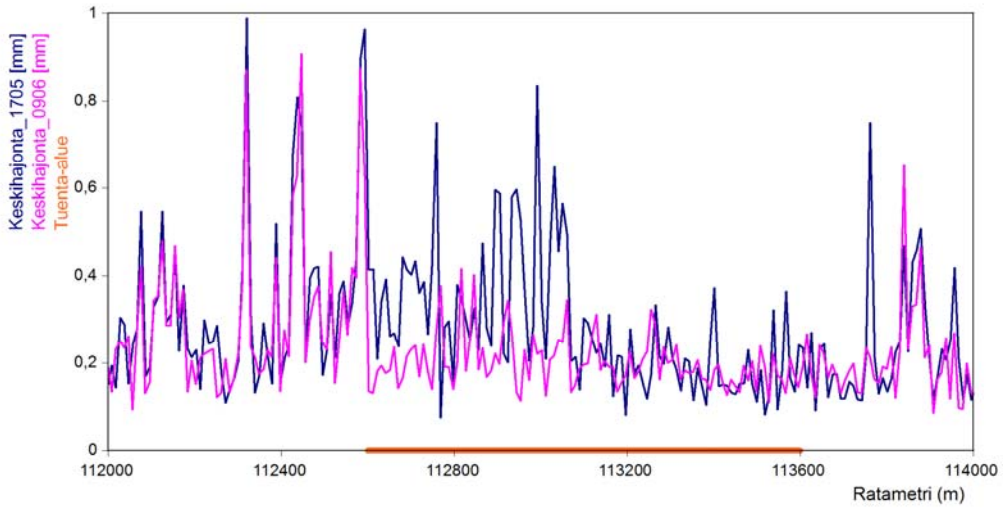
Taulukko 14. Kohteen 190 kunnossapitotiedot.

Seurantakohde	**Alue**	**Toimenpide ja ajankohta**
189+300…190+600	koko kohde	tuettu tutkimustarkoituksessa kevät 2014 tukikerros vaihdettu 2015
	189+784…839	
	189+500…190+200	
	190+200…190+400;190+540…190+720	tuettu syksy 2013
	190+480…191+030	tuettu kevät 2012
	190+180…191+200	tuettu syksy 2012
	189+780…190+500	tuettu kevät 2011
	190+200…190+400	tuettu kevät 2010
	188+000…189+900	tuettu syksy 2009 seulottu 2005

Yhteenvetona säännöllisistä radantarkastusmittauksista voidaan todeta, että kallio-leikkausten alueella esiintyvät korkeuspoikkeamat liittyvät usein kallionpinnan epätasaisuuksiin tai siirtymärakenteisiin, kun siirrytään kallioleikkauksen alueelle. Valitettavasti kohteiden koko tuentahistoria ei ole saatavissa tai saaduissa aineistoissa oli hieman toisistaan poikkeavia tietoja esimerkiksi sepelin vaihtamisajankohdan suhteen. Koekohteiden tietojen perusteella näyttää siltä, että tukeminen ei poista kaikissa kohteissa korkeuspoikkeamaa, vaan samat virheet tulevat esiin melko pian tukemisen jälkeen. Tämän projektin toteutuksessa tehty tuenta näyttää aikaansaaneen jopa uuden geometriavirheen kohteessa 190.

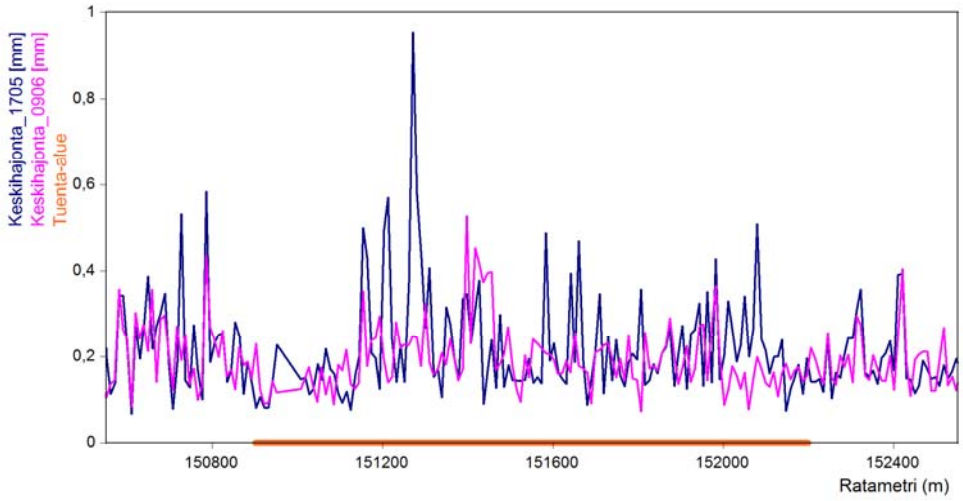
6.3 Jäykkyysmittaukset

Neljän kohteen jäykkyysmittaukset tehtiin ennen tuentaa 17.5.2014 ja tuennan jälkeen 9.6.2014. Seuraavin kuviin on koottu jouston 10 metrin keskihajonta seuranta-kohteittain. Sininen käyrä on ennen tuentaa tehdystä mittauksesta ja vaaleanpunainen on tuennan jälkeen tehdystä mittauksesta. Punaisella viivalla on osoitettu kallio-leikkauksen ja ylimääräisen tuennan sijainti.



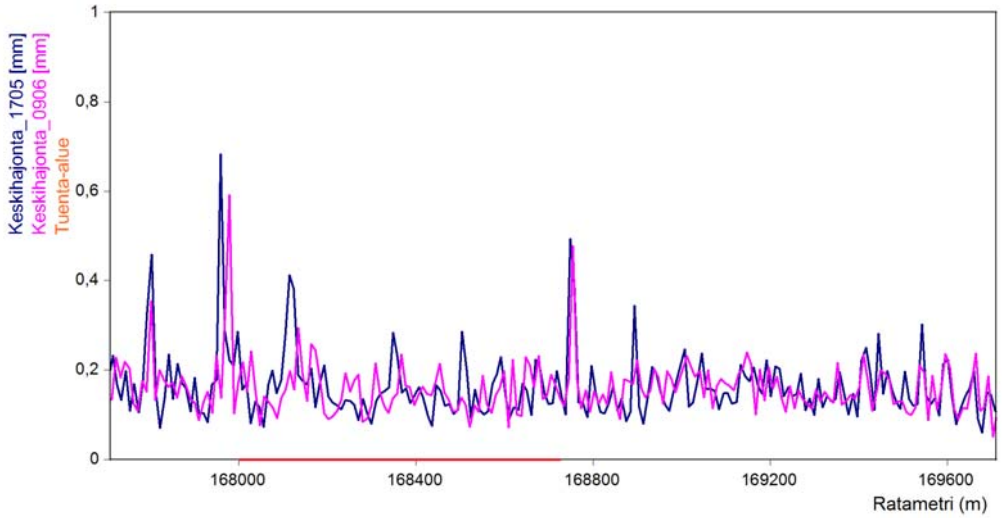
Kuva 61. Kohteen 113 jäykkyysmittauksen keskihajonta.

Kohteen 113 tuloksista voidaan havaita keskihajonnan ja sen vaihtelun pienentyminen tuennan jälkeen kallioleikkauksen alueella. Juuri ennen kallioleikkausta sijaitsevan tukemattomalla alueella havaitut keskihajonnat pysyvät ennallaan. Tulosten perusteella näyttäisi siltä, että keskeltä siirtymärakennetta aloitettu tuenta jopa voi kasvattaa jäykkyyseroja. Kuvasta 56 voidaan havaita 112+700…800 selkeä korkeus-poikkeama-alue, myös 112+900…113+100 alueella on havaittavissa vastaavanlaisia korkeuspoikkeamia, jotka korjaantuvat väliaikaisesti tukemisella.



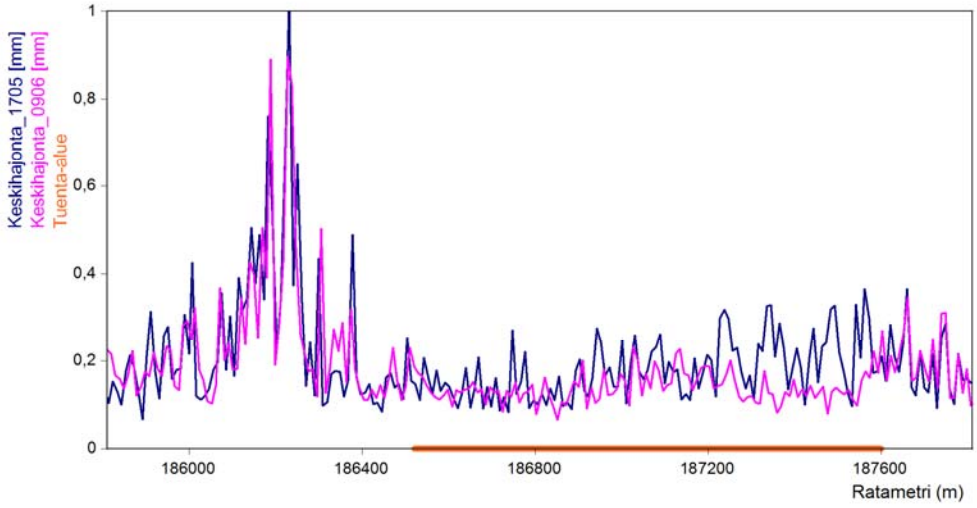
Kuva 62. Kohteen 151 jäykkyysmittauksen keskihajonta.

Kohteen 151 keskihajonnassa on havaittavissa vastaava hajonnan pienentyminen tuennan vaikutuksesta (kuva 62). Välillä 151+200…300 on havaittavissa kuvan 57 mukaan merkittäviä korkeuspoikkeamia, jotka korjaantuvat väliaikaisesti tukemisen jälkeen. Vastaavalla alueella näkyy myös selkeä tukemisen aiheuttama jäykkyyden keskihajonnan pienentyminen. Kohteessa 168 jäykkyyden keskihajonnassa tapahtuu hyvin pieniä muutoksia (kuva 63).



Kuva 63. Kohteen 168 jäykkyysmittauksen keskihajonta.

Kohteessa 187 voidaan myös havaita tukemisen aiheuttama keskihajonnan pienentyminen erityisesti välillä 187+200…600 (kuva 64). Kuvasta 59 voidaan havaita kohdasta 187+200 alkaen myös korkeuspoikkeamia, jotka korjaantuvat lähes pysyvästi tukemalla.



Kuva 64. Kohteen 187 jäykkyysmittauksen keskihajonta.

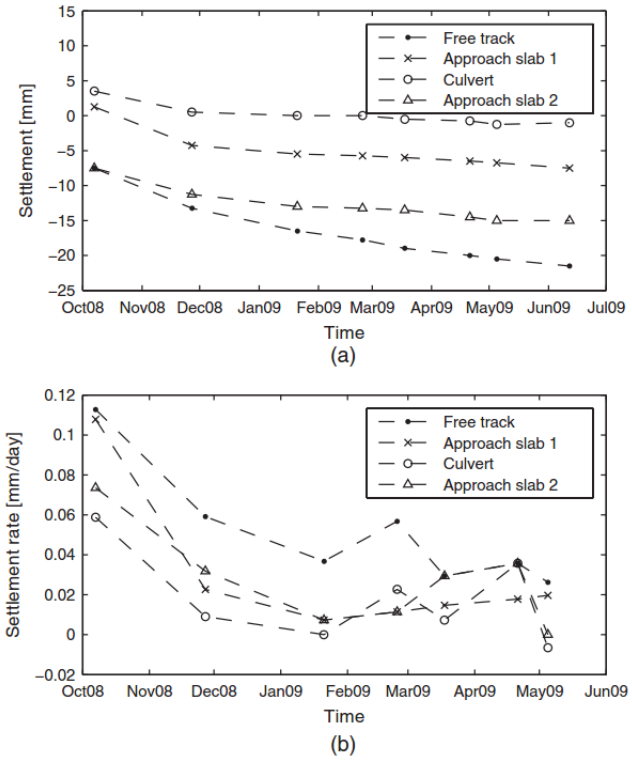
Jos verrataan uusimpien sepeleiden kohteita 113 ja 168 vanhempiin 151 ja 187, ei tukemisen aiheuttamassa jäykkyyden muutoksessa näytä olevan selkeää eroa. Jäykkyyden keskihajonnan pienentyminen näyttää useissa kohdissa liittyvän korkeuspoikkeamissa tapahtuviin muutoksiin. Kohteesta 190 ei ole tehty jäykkyysmittauksia, koska tuenta siirtyi syksyyn 2014.

6.4 Yhteenveto seurantamittauksista

Ennen vuotta 1995 asennettujen raidesepelin laatu vaihtelee paljon ja niiden laatuvaatimukset ovat nyikyisiä vaatimuksia oleellisesti löyhemmät. Tutkimuskohteiden vanhoista sepeleistä mitatut lujuudet olivat kuitenkin kohtuullisia, koska kiviaineksen heikommat osuudet ovat jo kuluneet pois rakeiden pyöristyessä, sepelin pyöristyneisyys näkyy myös pienissä muotoarvotuloksissa.

Tuennan aiheuttama kuormituslisä on kirjallisuuden mukaan jopa 20 Mbrt, mikä vaikuttaa suomaisille nykysepeleille melko suurelta arvolta. Jos tukemisen aiheuttama kuormituslisä olisi 20 Mbrt, laskennallisesti kohteen 151 sepelin käyttöikä on päätöksessään nimenomaan tukemisen aiheuttaman lisäkuormituksen perusteella, vaikka sepeli ollut rakenteessa vasta 25 vuotta. Toisaalta Nurmikolun (2005) mukaan tukemisella on merkittävä vaikutus rakeiden hienontumiseen. Nurmikolun (2005) laboratoriokokeissa tukeminen (11 kertaa) kasvatti kahden miljoonan kuormitusyklin aikana sepelin rakeisuusluvun seitsemänkertaiseksi verrattuna tukemattomaan kuormituskokeeseen, jossa hienontuminen oli erittäin vähäistä. Kuormitussyklien määrä vastasi noin 100 MBrt kuormitusta, mistä saadaan tukemisen laskennalliseksi kuormitusvaikutukseksi rakeisuuslukuun noin 4 yksikköä/Mbrt. Laskelman arvioinnissa pitää ottaa kuitenkin huomioon se, että tukematon sepeli säilyi lähes muuttumattomana 100 Mbrt kuormituksessa, mikä ei vastanne käytännön olosuhteita (0,02 rakeisuuslukuyksikköä/Mbrt). Tässä tutkimuksessa historiatiedoista kerätyn aineiston perusteella keskimääräiseksi kuormitusvaikutukseksi saatiin 0,5–2 rakeisuuslukuyksikköä/Mbrt.

Tuennan vaikutusta sepeli hienontumiseen ei tutkimuskohteissa kohteilla voitu määrittää, koska seuranta-aika oli niin lyhyt. Kohteita 151 ja 190 on tuettu eniten ja niiden sepelit ovat vanhimpia, sepelin alkuperäisestä laadusta ei ole kuitenkaan tietoa, joten on aika hankala määrittää onko hienontuminen johtunut tukemisesta vai huonosta sepelistä. Tutkimuskohteisiin asennetut uudet sepelit ovat erittäin kestäviä vulkaniitteja, joiden käyttöiän pitäisi olla vähintään 350 Mbrt. Tutkimustulosten tulkintaa vaikeutti sepelitietojen puutteellisuuden lisäksi tuentatietojen hajanaisuus ja puutteet.



Kuva 65. Coelhon (2011) tutkimuksessa havaitut absoluuttiset pystysuorat muodonmuutokset ja painumisnopeus.

Takymetrimittaukset eivät näytä soveltuvan huonon tarkkuutensa vuoksi seurantatutkimuksiin, erityisesti talviolosuhteissa mittausten epätarkkuus kasvaa huomattavasti. Tutkimuksen aikana heräsi kysymys riittääkö takymetrimittausten tarkkuus myöskään tuennan nuotituksen suunnitteluun. Siirtymäanturimittaukset soveltuvat hyvin pystysuuntaisten muodonmuutosten tarkkailuun, ainoana heikkoutena on se, että esimerkiksi johdon irtoaminen havaitaan vasta, kun käydään hakemassa mittausdataa. Myös erilaiset liikenteen aiheuttamat vauriot lähinnä mittauskaivojen kansirakenteille ovat mahdollisia.

Tulosten perusteella havaittiin geometrian muuttuvan heti tuennan jälkeen melko nopeasti ja hidastuvan sitten tiettyyn vakionopeuteen. Vastaavia tuloksia on saatu kuvan 65 mukaisessa Coelhon (2011) tutkimuksessa Hollannissa eli painumisnopeus oli ensin suuri tukemisen jälkeen, mutta se hidastuu melko nopeasti. Tuennan muuttama geometria palautuu nopeasti entiselleen riippumatta siitä onko sepeli uudempaa vai vanhempaa. Uusi sepeli palautuu jopa nopeammin kuin vanha. Tutkimustulokset eivät osoittaneet tukemissyvyyden vaikuttaneen geometrian muutosnopeutuneen.

Geometriavirheiden korjaaminen tuennalla tai sepelin vaihdolla ei ole välttämättä aina oikea ratkaisu, syy voi olla myös muissa rakenneosissa. Jatkuvan geometriavirheen ja sen johdosta realisoituvan tuentatarpeen tarkempi juurisyyanalyysi olisi tarpeen sellaisissa kohteissa, joissa geometriavirheitä esiintyy jatkuvasti.

7 Tukikerroksen pysyvyyden parantamis-menetelmät

7.1 Geolujitteet

Geolujitteet ovat polymeeristä valmistettuja synteettisiä tuotteita, joita käytetään parantamaan maamateriaalien mekaanisia ominaisuuksia. Geolujitteiden raaka-aineina voidaan käyttää polyamideja (PA), polyeteeniä (PE), polypropeenia (PP) ja polyesteriä (PET). Taulukossa 14 on esitetty tyypillisiä materiaaliominaisuuksia.

Taulukko 14. Geolujitteiden materiaaliominaisuuksia. Muokattu lähteestä (Liikennevirasto 2012).

Kuitu	Tiheys (g/cm^3)	Murtolujuus (N/tex)	Murtovenymä (%)	Kosteus (%)	Pehmenemispiste (°C)	Sulamispiste (°C)
PET	1,36–1,41	0,3–0,9	8–55	0,5	220–240	250–260
PA 6.6	1,14	0,3–0,9	15–60	4	230	260–265
PA 6	1,13	0,3–0,9	15–70	4	170	215–225
PA 11	1,05	0,4–0,7	15–40	1,5	170	190
PE	0,95	0,3–1,5	10–45	0	115–125	130–140
PP	0,91	0,2–0,8	15–50	0	125–145	160–175

Geolujitteiden tehtävänä on lujittaa rakenne ottamalla vastaan maarakenteeseen kohdistuvia veto– ja leikkausjännityksiä, joita maarakenne ei kestä hyvin. Maan ja lujitteen välille on synnyttävä tartunta joko kitkan tai lukkiutumisen avulla, jotta geolujite toimisi halutulla tavalla. (Liikennevirasto 2012)

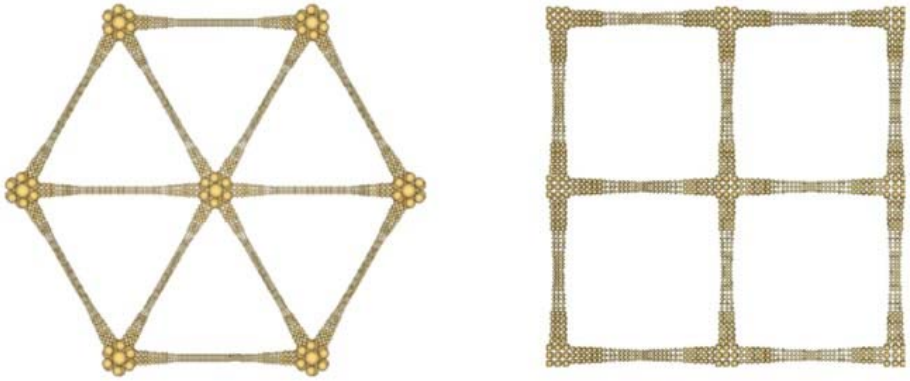
Radan sepelitukikerroksen toiminnan parantamiseksi voidaan käyttää pääasiassa geoverkkoja, mutta myös geotekstiilien, geokomposiittien sekä geokennojen käyttöä lujitteina on tutkittu. Geolujitteet ovat kustannustehokkaita ja ne on todettu toimiviksi ratkaisuiksi raidegeometrian parantamiseksi useiden laboratorio- ja kenttäkokeiden sekä pitkäaikaisen käyttökokemuksen perusteella. (Indraratna, Nimbalkar & Rujikiatkamjorn 2012)

7.1.1 Geoverkko

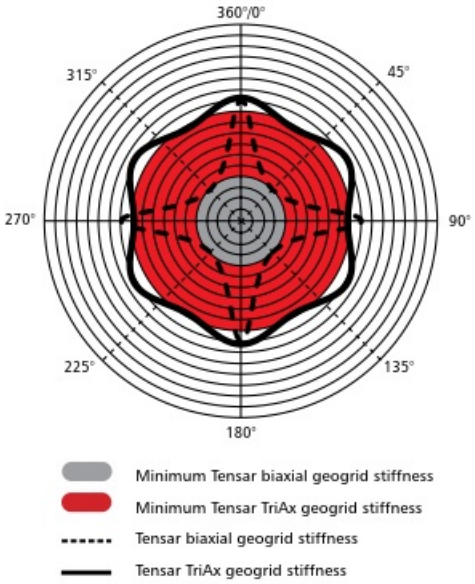
Geoverkko on kuvan 67 mukainen kaksiulotteinen polymeerinen geolujite, joka koostuu symmetrisestä verkkorakenteesta. Geoverkko voidaan valmistaa hitsaamalla vetorasitusta kestävät elementit kiinni toisiinsa tai liittää langoista muodostuvat kimput toisiinsa risteyskohdista. Geoverkko voidaan valmistaa myös venyttämällä yhtenäistä polymeerilevyä, johon on tehty reikiä säännöllisin välimatkoin. (Liikennevirasto 2012) Suomeen geoverkkoja maahantuovan Lektar Oy:n mukaan geoverkkojen käyttöikä on 120 vuotta.

Kuva 66. Kolmiaksiaalinen geoverkko. (Tensar 2015)

Geoverkko voi olla rakenteeltaan kaksiaksiaalinen tai kolmiaksiaalinen. Kuvassa 67 on esitetty kolmiaksiaalisen sekä kaksiaksiaalisen geoverkon rakenne. Kolmiaksiaaliset geoverkot ovat nykyään käytetympiä, koska niillä oletetaan saavutettavan huomattavasti parempi jäykistävä vaikutus kuin kaksiaksiaalisilla geoverkoilla (kuva 68). (Tensar 2015)



Kuva 67. Vasemmalla kolmiaksiaalinen ja oikealla kaksiaksiaalinen geoverkko. Kuva on muokattu lähteestä (Chen, McDowell & Thom 2012).



Kuva 68. Kolmiaksiaalisen geoverkon jäykkyysominaisuudet verrattuna kaksiaksiaaliseen verkkoon (katkoviiva). (Tensar 2015)

Geoverkko lujittaa sepelikerrosta muodostamalla mekaanisen lukituksen verkon ja kiviaineksen välille. Kun geoverkon yläpuolella oleva kiviaines tiivistetään, kivirakeet työntyvät osittain verkon läpi kuvan 69 mukaisesti. Rakeet lukkiutuvat paikoilleen ja tukevat niiden yläpuolella olevia rakeita.

Kuva 69. Geoverkon lukitusmekanismi. (Tensar 2015)

Geoverkon lukitusmekanismin ansiosta oletetaan sepelirakeiden liikkumisen vähenevän. Rakeiden välisen hankautumisen vähetessä myös sepelin kuluu vähemmän ja hienoainesta syntyy vähemmän. Sepelin sivuttaissuuntainen leviäminen ja sepelitukikerroksen painumat voivat myös vähentyä. Geoverkon käyttö vaikuttaa näin ollen positiivisesti sekä tukikerroksen käyttöikään että kunnossapidettävyyteen. (Tensar 2015)

Geoverkko voidaan asentaa uuteen tai vanhaan rataan. Geoverkko asennetaan levittämällä verkko haluttuun kohtaan valmiin pohjan päälle. Vanhoihin ratoihin geoverkko asennetaan sepelin puhdistuksen tai radan perusparannuksen yhteydessä. Kun tavoitteena on parantaa tukikerroksen toimintaa, geoverkko asennetaan tukikerroksen alapintaan. Geoverkko voidaan asentaa myös ylemmäs tukikerroksessa, mutta koneellisen kunnossapidon helpottamiseksi se asennetaan yleensä tukikerroksen

alapintaan (Indraratna, Shahin & Salim 2007). Raiteen tukemistyön takia on huolehdittava, että tukemishakkujen ja verkon väliin jää riittävä suojaetäisyys, jotta verkko ei vaurioidu. Suojaetäisyyden olisi hyvä olla vähintään 100 mm. Geoverkko voidaan asentaa myös välikerroksen alapintaan. Tällöin geoverkko ei niinkään paranna tukikerroksen toimintaa vaan tasoittaa alusrakenteeseen kohdistuvia kuormituksia ja mahdollistaa välikerroksen kerrospaksuuden pienentämisen. (Tensar 2015)

Geoverkkojen tehokkuutta rakenteen lujittajina on tutkittu niin laboratorio- kuin kenttäkokeillakin. Esimerkiksi Indraratna et al. (2006) ja Hussaini, Indraratna & Vinod (2015) ovat tehneet laboratoriokokeita geoverkolla lujitetulle sepelitukikerrokselle. Tutkimuksissa on havaittu geoverkkojen vähentävän tehokkaasti sepelin painumia ja kulumista. Fischer ja Horvát (2011) sekä Anantanasakul et al. (2012) ovat tutkineet erilaisten geoverkkojen toimintaa kenttäkokeiden avulla ja saaneet samankaltaisia tuloksia kuin laboratoriokokeista. Laboratorio-olosuhteissa geoverkkojen käyttöä tukikerroksessa on tutkittu suurimittakaavaisilla kolmiaksiaalikokeilla. Tutkimuksessa käytettiin keinotekoisesti hienonnettua pyöristynyttä sepeliä ja hienontunutta sepeliä, jossa on paljon hienoainesta (9 %). Kaikkein hienontuneimman sepelin hienontumisindeksi FI oli 40 (Selig&Waters 1994). Kokeissa käytettiin sekä neliön että kolmionmuotoisilla aukoilla varustettuja geoverkkoja. Geoverkot sijoitettiin kolmiaksiaalinäytteiden keskikohtaan. Tulosten perusteella todettiin geovoerkkojen kasvattavan pääjännitysten eron maksimiarvoa. Suurimmat leikkauslujuudet saavutettiin neliönmuotoisella aukolla varustetulla verkolla. Raidesepelin hienontuminen ei heikentänyt leikkauslujuutta verrattaessa uudella sepelillä saatuihin tuloksiin vaan pyöristyneellä materiaalilla saatiin jopa suurempia leikkauslujuuden arvoja. Kolmiaksiaalikokeita mallinnettiin myös DEM-menetelmällä (BLOKS3D) ja todettiin mallinnuksen simuloivan kohtuullisesti tehtyjä kokeita. Kokeet tehtiin kuivalle materiaalille ja jatkossa tutkijoiden on tarkoitus testata samoja ominaisuuksia märillä materiaaleilla. (Qian et al. 2015)

Tutkimusten perusteella on esitetty, että lujittavan vaikutuksen tehokkuuteen geoverkon ominaisuuksista vaikuttavat pääasiassa aukkojen muoto ja koko, verkon jäykkyys, poikkileikkausprofiili sekä liitoskohtien lujuus. Esimerkiksi Chen, McDowell & Thom (2012) vertasivat tutkimuksessaan kaksiaksiaalisen ja kolmiaksiaalisen geoverkon toimintaa. Heidän mukaansa kolmiaksiaalinen verkko parantaa sepelirakeiden ja verkon välistä lukittumista ja vähentää painumia tehokkaammin kuin kaksiaksiaalinen verkko. Kwan (2006) esittää, että aukkojen koon pitäisi olla vähintään 1,6 kertaa kiviaineksen koko. Hänen mukaan geoverkon jäykkyydellä ei ole suurta vaikutusta verkon toimintaan, jos verkon ja kivirakeiden välinen lukkiutuminen ei toimi kunnolla. Kun lukitus on kunnossa, verkon jäykkyys parantaa lujitteen toimintaa. Myös paksummat rivat ja liitoskohtien suurempi lujuus parantaa lujittavaa vaikutusta. Brown, Kwan & Thom (2007) päätyivät tutkimuksissaan samankaltaisiin tuloksiin. He esittävät, että optimaalisin aukkokoko on 1,2–1,6 kertaa kiviaineksen raekoko. Heidän mukaansa geoverkon toiminta vaikuttaa parantuvan geoverkon jäykkyyden sekä liitoskohtien lujuuden kasvaessa. On kuitenkin huomattava, että tutkimusten tulokset eivät ole täysin yksiselitteisiä, sillä geoverkkojen ominaisuudet vaikuttavat niiden toimintatapaan. Eri tutkimuksista saadut erilaiset ja osin ristiriitaiset tulokset johtunevat siitä, että niissä on käytetty ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia verkkoja. Esimerkiksi (Anantanasakul et al. 2012) esittivät, että selkeästi pienemmät aukot (40 mm) toimisivat paremmin kuin esimerkiksi 65 mm aukot. (Kwan 2006); (Brown, Kwan & Thom 2007)

Kwanin (2006) mukaan geoverkon toimintaan vaikuttaa myös pohjamaa. Pehmeällä pohjamaalla geoverkko toimii tehokkaammin kuin jäykällä, mutta myös jäykemmällä pohjamaalla muodonmuutokset pienenevät verrattuna lujittamattomaan rakenteeseen. Kwanin tutkimusten tulosten perusteella geoverkolla ei ole juurikaan vaikutusta alusrakenteen jäykkyyteen. Geoverkko vähentää pysyviä muodonmuutoksia, mutta alusrakenteesta aiheutuviin palautuviin painumiin geoverkko ei vaikuta. Geoverkkoja ei näin ollen kannata käyttää esimerkiksi radan epäjatkuvuuskohdissa tasaamaan jäykkyyden vaihtelua. Geoverkkoja on kritisoitu myös siitä, että ne toimivat kaksiulotteisina lujitteina eivätkä estä kovin tehokkaasti sepelin värähtelystä johtuvaa sepelirakeiden liikkumista (Woodward et al. 2012). Geoverkkoja ei kannata käyttää rakenteissa, joissa sepeli on hienontunut, koska sepelin ja geoverkon välinen vuorovaikutus saattaa muuttua olennaisesti. Kun hienoaines tukkii sepelin tyhjätilat, sepelin ja geoverkon välinen mekaaninen lukkiutuminen saattaa heikentyä. (Ngo, Indraratna & Rujikiatkamjorn 2015)(Kwan 2006)

Suomessa geoverkkoa on asennettu muun muassa Lielahti-Kokemäki-rataosuudelle. Rataosuudella on ollut kunnossapito-ongelmia, joista on pyritty pääsemään eroon geoverkon avulla. Geoverkot asennettiin tukikerroksen alle tavoitteena tasata pohjamaasta johtuvia muodonmuutoksia ja vähentää kunnossapitotarvetta. Rataosuudelle asennettiin kolmea erilaista geoverkkoa. Päätuotteena oli kaksiaksiaalinen E'GRID 4040 -verkko. Kyseistä verkkoa asennettiin noin 2000 m. Lisäksi kokeiltiin E'GRID 3030 -verkkoa sekä Tensarin kolmiaksiaalista TX190-verkkoa. Näitä molempia asennettiin noin 50 m. Kokemukset geoverkoista ovat tähän mennessä olleet hyviä. (Hakala 2015)

7.1.2 Geokomposiitti

Geokomposiitti koostuu useista yhteen liitetyistä geosynteettisistä tuotteista. Geokomposiitilla tavoitellaan eri tuotteiden tarjoamia hyötyjä samanaikaisesti. Geokomposiitti voi koostua esimerkiksi kuvan 5 tapaan geoverkosta ja -tekstiilistä, jolloin geoverkolla pyritään lujittamaan maarakenne ja geotekstiilillä erottamaan sepeli alusrakenteesta. Geokomposiitin toiminnasta on saatu tutkimuksissa ristiriitaisia tuloksia. Eräiden tutkimusten mukaan geokomposiitti vaikuttaa toimivan tehokkaammin kuin geoverkko tai geotekstiili yksinään, kun taas toisten tutkimusten mukaan geokomposiitti vaikuttaisi jopa heikentävän radan toimintaa.

Geotekstiili on kuiduista tai langoista kutomalla, sitomalla, neulaamalla tai liimaamalla valmistettu polymeeritekstiili. Kutomalla vähintään kahdesta erisuuntaisesta lankaryhmästä valmistettua kangasta kutsutaan lujitekankaaksi. Lujitekangas on kaksiulotteinen geolujite, jonka lujittava vaikutus perustuu kankaan ja maa-aineksen välille syntyvään kitkaan. (Liikennevirasto 2012) Neulaamalla tai termisesti sitomalla valmistetut geotekstiilit ovat kuitukankaita. Kuitukankaat muodostuvat satunnaisesti järjestyneistä kuiduista. Niiden pääasiallisia käyttötarkoituksia on suodattaminen ja erottaminen. Kuitukankaita käytetään usein ratarakenteissa geokomposiiteissa yhdessä geoverkkojen kanssa, jolloin kuitukankaan tehtävänä on estää hienoaineksen nousemisen alusrakenteesta sepelin sekaan. (Liikennevirasto 2012)

Wollongongin yliopisto on tutkinut laboratoriokokeilla geotekstiilin, geoverkon sekä niiden yhdistelmän toimintaa. Kokeen tulokset osoittivat, että geokomposiitti vähensi tehokkaimmin painumia ja sepelin kulumista. Myös geotekstiili ja geoverkko vähensivät painumia, mutta eivät yhtä merkittävästi kuin geokomposiitti. (Indraratna et al. 2006) Myös kenttäkoe osoitti geokomposiitin vähentävän muodonmuutoksia

tehokkaasti. Kokeessa käytetty geokomposiitti koostui kaksiaksiaalisesta geoverkosta ja kuitukankaasta. Geokomposiitti vähensi huomattavasti sepelin pysty- ja vaakasuuntaisia muodonmuutoksia. Pystysuuntaiset muodonmuutokset vähenivät uudella sepelillä keskimäärin 33 % ja käytetyllä 9 %. Vaakasuuntaiset muodonmuutokset vähenivät uudella sepelillä keskimäärin 49 % ja käytetyllä 11 %. (Indraratna, Nimbalkar & Rujikiatkamjorn 2012)

(Brown, Kwan & Thom 2007) huomasivat laboratoriokokeissaan, että sijoittaessa kudotusta lujitekankaasta ja geoverkosta valmistetun geokomposiitin sepelitukikerroksen alapintaa ylemmäs, lukitusmekanismi vaikutti toimivan heikosti. Tulokset olivat huonompia kuin lujittamattomassa tilanteessa. Kun lujiteverkon tilalle vaihdettiin kuitukangas ja geokomposiitti ja yhdistelmä sijoitettiin sepelitukikerroksen alapintaan, tulokset paranivat hieman. Geokomposiitin tehokkuudesta ei kuitenkaan saatu yhtä selkeää näyttöä kuin pelkän geoverkon. Myös laboratoriokokeiden perusteella geoverkosta ja geotekstiilistä koostuva geokomposiitti vaikuttaisi ennemmin haittaavan kivirakeiden ja geoverkon välistä lukkiutumista kuin parantavan tukikerroksen toimintaa (Kwan 2006).

7.1.3 Geokenno

Geokenno on kolmiulotteinen geolujite. Geokenno koostuu kuvan 70 mukaisesti kennomaisesti muodostuneista ”selleistä”. Sellit koostuvat karkeapintaisista polyeteeniliuskoista, jotka on hitsattu yhteen. Sellit täytetään sepelillä ja tiivistetään. Täytetyt ja tiivistetyt sellit toimivat yhdessä viereisten sellien kanssa muodostaen stabiilin komposiittirakenteen. Geokenno parantaa sepelin ominaisuuksia vähentämällä sepelin sivuttaissuuntaista leviämistä ja leikkausmurtumaa. (Kennedy 2011)

Kuva 70. Geokennon rakenne. (Kennedy 2011)

(Kennedy 2011) tekemät laboratoriokokeet osoittivat vastoin aikaisempia oletta-muksia, että sepelin lujittaminen geokennon avulla heikentää tukikerroksen ominaisuuksia. Geokenno lisäsi sepelin painumaa 37 % ja vähensi jäykkyyttä 5-7 % verrattuna lujittamattomaan sepeliin. Tämän epäiltiin johtuvan siitä, että geokennoa käytettäessä sepelin tiivistäminen on vaikeaa. Geokenno voisi olla kuitenkin toimiva lujite, jos sen toimintaa tutkittaisiin tarkemmin ja kehitettäisiin esimerkiksi parempia tiivistysmenetelmiä.

7.1.4 Yhteenveto geolujitteista

Geolujitteita käytetään radan sepelitukikerroksen lujittamiseen. Pääasiassa lujittami-seen käytetään geoverkkoa, mutta myös geokomposiittien ja geokennojen käyttöä lujitteina on tutkittu.

Yleensä tukikerroksen alapintaan asennettava geoverkko muodostaa verkon ja sepelirakeiden välille mekaanisen lukituksen, jolloin rakeiden liikehdintä vähenee. Geoverkon muodostaman lukituksen tehokkuuteen vaikuttaa pääasiassa verkon jäykkyys, aukkojen muoto ja koko, poikkileikkausprofiili, liitoskohtien lujuus sekä pohjamaan jäykkyys. Mekaanisen lukituksen muodostuessa oikein geoverkko vähentää painumia ja kunnossapitotarvetta. Geoverkon avulla ei kuitenkaan pystytä tasaamaan alusrakenteen jäykkyyden vaihteluita.

Geokomposiitin ja geokennon toiminnasta ei ole yhtä selkeää näyttöä. Yleensä geoverkosta ja geotekstiilistä koostuvalla geokomposiitilla tavoitellaan molempien geosynteettien tarjoamia etuja samanaikaisesti. Tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että geotekstiili saattaa haitata sepelirakeiden lukkiutumista. Geokenno on kolmiulotteinen lujite, joka koostuu kennomaisesti muodostuneista selleistä. Sepeli olisi tarkoitus tiivistää selleihin, mutta tiivistäminen ei ole onnistunut tarpeeksi hyvin, jolloin sepelin toiminta on heikentynyt.

7.2 Polyuretaanikäsittely

XiTRACK on patentoitu kolmiulotteinen sepelin lujittamistekniikka, jossa sepelitukikerros käsitellään polyuretaanilla. Polyuretaanikäsittelyssä sepelin joukkoon valutetaan polyuretaania. Polyuretaani on nestemäinen polymeeri, jota muodostuu polyolin ja isosyaniitin reagoidessa keskenään (Kennedy et al. 2013). Polyuretaani sitoutuu ja muodostaa kuvan 71 mukaisen kolmiulotteisen lujitteen, jonka ansiosta sepeli ei enää käyttäydy irrallisen kiviaineksen tavoin vaan komposiittina. Sepelirakeet lukkiutuvat paikoilleen eivätkä hankaudu toisiaan vasten, jolloin sepelin kuluminen ja hienoneminen vähenevät merkittävästi. Sepelin käyttöikä pidentyy ja pölkkyjen alle muodostuvat tyhjätilat vähenevät. Tämä vähentää tai jopa poistaa kokonaan tukemis-tarpeen ja muut manuaaliset kunnossapitotoimet. (Balfour Beatty 2015)

Kuva 71. Sepelin joukkoon lisättyä polyuretaania. (Woodward et al. 2009a)

Ennen polyuretaanikäsittelyä rata tyypillisesti tiivistetään ja geometria korjataan oikeaan asemaan, sillä polyuretaanikäsittely lukitsee radan geometrian ja säilyttää sen sellaisenaan. Polyoli ja isosyaniitti sekoitetaan paikan päällä ja lisätään sepelin sekaan välittömästi sekoituksen jälkeen, sillä polymeeri sitoutuu nopeasti (Woodward, Kennedy & Medero 2009). Polyuretaani valutetaan sepelin pintaan, jolloin se valuu alaspäin sepelissä sepelirakeiden välisten aukkojen kautta. Polymeerin tunkeutumissyvyys määritetään säätämällä seoksen katalyytin määrää. Polyuretaani suositellaan lisättävän sepeliin 100–700 mm syvyyteen. Polyuretaani lisätään sepelin sekaan tyypillisesti joko ilmanpaineen avulla toimivalla pakkosyöttöpumpulla tai sähkökäyttöisellä keskipakopumpulla. (Woodward, Medero & Griffiths 2009)

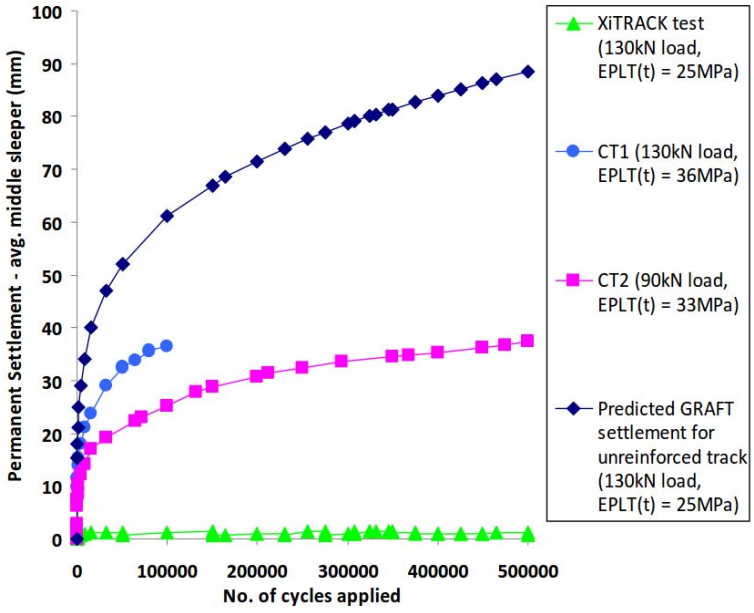
Polyuretaani sitoutuu tyypillisesti 10–15 sekunnissa. Sitoutuessaan se muodostaa joustavan ja kestävän lujitteen. Polyuretaani pitää sepelin siinä muodossa, jossa se oli silloin kun polyuretaani sitoutui. Lujuuden kehitysaika riippuu vallitsevasta lämpötilasta, mutta yleisesti ottaen 50 % polyuretaanin lujuudesta muodostuu ensimmäisten minuuttien aikana ja tunnin päästä jo noin 90 % lujuudesta on muodostunut. Onnistunut polyuretaanikäsittely edellyttää, että sepelirakeiden välissä on riittävästi tyhjää tilaa, jotta polyuretaani valuu alaspäin ja muodostaa sidoksia. Polyuretaani täyttää tyypillisesti noin yhden neljäsosan sepelin tyhjätiloista heikentämättä sepelikerroksen kuivatusominaisuuksia. Polyuretaanin teknisiin ominaisuuksiin, kuten jäykkyyteen, lujuuteen, vaimennusominaisuuksiin, viskositeettiin ja sitoutumisnopeuteen, voidaan vaikuttaa polyuretaanin koostumuksen avulla. Näin ollen tekniset ominaisuudet voidaan ennalta määrittää jokaiseen tilanteeseen sopiviksi ja vastaamaan radan vaatimuksia. Tämän johdosta polyuretaanikäsittely soveltuu monenlaisiin kohteisiin. (Woodward, Kennedy & Medero 2009)

Polyuretaania voidaan lisätä usealla eri tavalla riippuen siitä, mitä polyuretaanikäsittelyllä pääasiassa halutaan saavuttaa. Polyuretaania voidaan lisätä koko sepelitukikerrokseen tai ainoastaan joihinkin osiin sepelitukikerrosta. Polyuretaani voidaan

lisätä esimerkiksi vain sepelitukikerroksen reunoille, mikä kasvattaa radan sivuttaisvastusta huomattavasti. Pelkästään pölkkyjen väliin lisättynä polyuretaani taas parantaa radan pystysuuntaista pysyvyyttä. Polyuretaanilla käsitellyn sepelin päälle voidaan jättää käsittelemätön sepelikerros, jolloin radalla on mahdollista tehdä perinteisiä kunnossapitotoimenpiteitä. Jos koko sepelitukikerros käsitellään polyuretaanilla, perinteiset kunnossapitotoimenpiteet eivät ole mahdollisia. Tämä nähdään polyuretaanikäsittelyn haittapuolena, mutta Woodwardin mukaan polyuretaanikäsiteltyä rataa ei tarvitse koskaan kunnossapitää tukemalla. Woodwardin arvio vaikuttaa hieman liian optimistiselta, koska käyttökokemuksia ei vielä ole kertynyt koko rakenteen käyttöiältä. (Woodward, Medero & Griffiths 2009)

Polyuretaanin lisäys on helppoa ja käsittelyn voi tehdä niin uudelle kuin vanhallekin radalle. Vanhoilla rataosuuksilla on kuitenkin suositeltavaa, että raiteen geometria korjataan ennen käsittelyä. Polyuretaanikäsittely toimii vaikka sepeli olisikin vähän hienontunutta, kunhan sepelirakeiden välissä on riittävästi tyhjätiloja, jotta polyuretaani pääsee valumaan haluttuun syvyyteen ja muodostamaan sidoksia (Woodward, Kennedy & Medero 2009). On myös varmistettava, että sepelin seassa ei ole seisovaa vettä, joka saattaa haitata polyuretaanikäsittelyä (Kennedy et al. 2013). Polyuretaanikäsittely on kehittäjiensä näkemyksen mukaan turvallinen menetelmä, sillä polyuretaanin hajotessa esimeriksi pitkäaikaisen kulumisen takia, sepeli palautuu taas normaaliin tilaan, jossa se käyttäytyy irtonaisen kiviaineksen tavoin. (Woodward, Medero & Griffiths 2009)

Kennedy (2011) on tutkinut polyuretaanikäsittelyn vaikutusta sepelin muodonmuutoksiin radan kuormituskestävyyttä mittaavalla koejärjestelyllä (GRAFT-simulaattori). Kuormituskokeessa kuormitettiin polyuretaanilla käsiteltyä sekä normaalia käsittelemätöntä sepeliä. Kuvassa 73 on esitetty kokeen tulokset. Polyuretaanilla lujittaminen lisäsi radan jäykkyyttä ja vähensi merkittävästi pysyviä muodonmuutoksia. Jäykkyys kasvoi noin 55 % ja muodonmuutokset vähenivät 99 % verrattuna lujittamattomaan sepeliin (Kennedy 2011)



Kuva 72. Kuormituskestävyyden simuloinnin tulokset. (Kennedy 2011)

Polyuretaanikäsittelyä on käytetty hyvällä menestyksellä monissa kohteissa Iso-Britanniassa, Euroopassa ja Aasiassa yli 10 vuoden ajan. Menetelmää on mahdollista käyttää monissa erilaisissa tapauksissa. Menetelmä soveltuu erityisen hyvin radan epäjatkuvuuskohtiin, kuten vaihteisiin, tasoristeyksiin sekä siltojen ja kiintoraiteiden siirtymärakenteisiin, joissa radan pituussuuntainen jäykkyys vaihtelee nopeasti. Kun polyuretaanilla käsitellään sepeli juuri ennen epäjatkuvuuskohtaa, jäykkyyserot tasoittuvat ja sen seurauksena dynaamiset voimat pienenevät. (Woodward et al. 2012)

Ensimmäinen kohde, joka käsiteltiin polyuretaanilla, oli rataosuus West Coast Main Linella Bletcheyssa Iso-Britanniassa. Linja on yksi Iso-Britannian päälinjoista. Nopeudet ja akselipainot ovat suuria ja linjaa kuormitetaan vuosittain 30 miljoonalla bruttotonnilla. Kyseisellä rataosuudella oli vaihteesta ja risteyksistä johtuen paljon erilaisia komponentteja, jotka asettivat haasteita radan kunnossapidolle. Ennen polyuretaanikäsittelyä rata vaati kunnossapitoa 3–4 kuukauden välein. Radan pysty- ja vaakageometria huononivat nopeasti, minkä takia alueelle oli asetettava nopeus-rajoituksia. Polyuretaania lisättiin pölkkyjen ympärillä olevaan sepeliin, mutta pölkkyjen alla oleva sepeli jätettiin käsittelemättä. Polyuretaanikäsittely toimi kohteessa erinomaisesti. Polyuretaani poistettiin 10 vuoden käytön jälkeen rata-osuuden parannuksen yhteydessä. 10 vuoden käytön aikana rataosuus ei vaatinut lainkaan kunnossapitotoimenpiteitä eikä polyuretaani osoittanut merkkiäkään huononemisesta, vaikka sitä oli kuormitettu yhteensä arviolta 300 miljoonalla brutto-tonnilla. Polyuretaanin oletetaankin kestävän koko sepelin käyttöiän ajan. Karkean arvion mukaan polyuretaanikäsittelyn arvioitiin tässä kohteessa maksaneen itsensä takaisin vähentyneiden kunnossapitokustannuksien ansiosta noin puolessatoista vuodessa. (Kennedy et al. 2013)

Kuva 73. *Polyuretaanilla käsitelty risteysalue Isossa-Britanniassa.* (Kennedy et al 2013)

Polyuretaania on käytetty radoilla, joiden suurin sallittu nopeus on korkeintaan 200 km/h. Oletettavasti se soveltuisi käytettäväksi myös radoilla, joilla liikennöinti-nopeudet ovat vielä suurempia. (Woodward et al. 2012)

Polyuretaania on käytetty Kiinassa toteutetussa tutkimuksessa, jossa rakennettiin kenttäkoekohde epäjatkuvuuskohtaan, joissa siirrytään sepelitukikerroksesta sepelittömälle rakenteelle. Koekohteessa tutkittiin myös tukikiskojen käyttöä.

Pystysuoran kisko-pyörävoiman vaihtelun todettiin pienentyvän. Kun vaihtelu ilman polyuretaania oli 50…70 kN, niin polyuretaani vähensi vaihtelun välille 55–65 kN. Kun rakenteessa käytettiin tukikiskoja, pyörä-kiskovoiman vaihtelu oli erittäin pientä < 5 kN, keskimääräinen voiman arvo oli 58 kN. (Zhao et al. 2015)

7.3 Pohjain

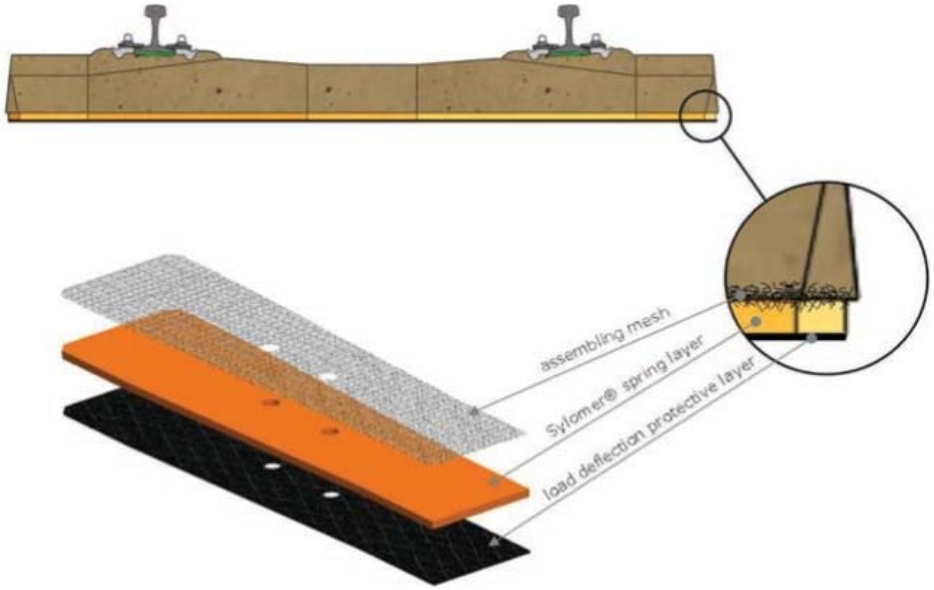
Pohjain (*under sleeper pad*) on kuvan 74 mukainen joustava noin 10–20 mm paksuinen kerros, joka asennetaan ratapölkyn alapintaan. Pohjaimia valmistetaan polyuretaanista, kumista tai etyylivinyyliasetaatista. Pohjaimia käytetään pääasiassa raiteen geometrian pysyvyyden parantamiseen, radan jäykkyyserojen tasoittamiseen siirtymäalueilla, tukikerroksen paksuuden madaltamiseen, kiskojen korrugaation vähentämiseen sekä tärinän vähentämisen. (UIC 2009)

Kuva 74. Pölkyn päihin asennetut pohjaimet. (Fimor 2012)

Pohjaimet ovat olleet käytössä 1980-luvun puolivälistä lähtien (Loy 2008). Viime vuosina niiden käyttö on yleistynyt junien kasvavien nopeuksien ja akselipainojen myötä. Pohjaimia on käytössä useassa maassa, esimerkiksi Ranskassa, Sveitsissä, Norjassa, Tanskassa, Alankomaissa, Espanjassa, Unkarissa, Saksassa, Itävallassa ja Japanissa (UIC 2009). Erityisesti Keski-Euroopassa käyttö on runsasta ja kokemukset ovat olleet positiivisia. Esimerkiksi Itävallassa pohjaimelliset betoniratapölkyt hyväksyttiin jo vuonna 2006 vakiokomponenteiksi pääradalle, sillä testiradoilta oli saatu lupaavia tuloksia (Marschnig, Veit 2011). Suomessa pohjaimia on käytetty muutamassa kohteessa. Vuonna 2009 pohjaimia asennettiin Vantaankosken radalle 55 m pituiselle koeosuudelle ja vuonna 2011 Tampereen henkilöratapihan alittavan Rongankadun alikäytävän yhteyteen (Peltokangas 2012). Lisäksi pohjaimia on käytetty vaihdepölkyissä Kauhavalla ja Vantaalla Kehäradalla.

Merkittävin pohjaimen tarjoama hyöty on sepelitukikerrokseen kohdistuvien rasitusten väheneminen, mikä vähentää sepelin kulumista ja painumia. Tämä johtaa parantuneeseen raidegeometrian pysyvyyteen ja vähentyneeseen kunnossapitotarpeeseen. Raiteen tukemisvälit pidentyvät eikä sepelin puhdistus- tai vaihtotöille ole tarvetta yhtä usein kuin pohjaimettomalla radalla. Madaltuneet kunnossapitokustannukset johtavat usein myös matalampiin elinkaarikustannuksiin. Erityisesti vilkkaasti liikennöidyillä ja raskaasti kuormitetuilla rataosuuksilla vähentyneet elinkaarikustannukset korostuvat. Pohjaimet vähentävät myös muihin raiteen komponentteihin kohdistuvia rasituksia ja pidentävät myös niiden käyttöikää. Pohjaimet vähentävät pitkäaaltoista kiskon korrugaatiota, tärinää, runkomelua sekä kaluston huonokuntoisista pyöristä aiheutuneita voimia. Joissain tapauksissa pohjainten avulla pystytään myös madaltamaan sepelitukikerroksen korkeutta. (UIC 2009, Auer et al. 2013)

Pohjaimen on oltava tiukasti kiinnittyneenä pölkkyyn joka kohdasta ja kestettävä koko pölkyn käyttöikä irtoamatta. Lisäksi pohjaimen on kestettävä kuljetus työmaalle sekä radalla suoritettavat kunnossapitotyöt. Tämän takia pohjaimet koostuvat nykyään usein kuvan 75 mukaisesti kolmesta kerroksesta. Sisin kerros on kiinnityskerros, joka kiinnittää pohjaimen tiukasti pölkkyyn. Keskimmäinen kerros on joustava ja uloin kerros on kulutuskerros, joka suojaa joustavaa kerrosta sepelirakeiden terävien reunojen kuluttavalta vaikutukselta. Esimerkiksi geotekstiilit ovat sopivia materiaaleja kulutuskerrokseen. (Loy 2008)



Kuva 75. Pohjain koostuu usein kolmesta kerroksesta. (Loy 2008)

Pohjainten valmistajat ovat kehittäneet erilaisia kiinnityskerroksia. Kiinnityskerros voi koostua esimerkiksi metalliverkosta tai geokalvosta. Kuvassa 76 on ranskalaisen pohjainvalmistaja Fimorin patentoima kiinnityskerros. Kiinnityskerroksellinen pohjain kiinnitetään kosteaan betoniin pölkkyjen valmistusvaiheessa. Myös pohjain ilman erillistä kiinnityskerrosta voidaan kiinnittää pölkkyyn jo valmistusvaiheessa. Tällöin pohjain tärytetään kosteaan betoniin. Vaihtoehtoisesti pohjain voidaan asentaa valmiiseen pölkkyyn ruiskuttamalla, maalaamalla tai liimaamalla (UIC 2009). Pohjaimet kiinnitetään pölkkyihin yleensä valmistusvaiheessa eli ne eivät hankaloita pölkkyjen asennusta. (Loy 2008)

Kuva 76. Fimorin patentoima kiinnityskerros. (Fimor 2013)

Pohjaimen jäykkyyttä kuvataan alustaluvun (*bedding modulus*) C avulla. Alustaluku kuvaa kuinka suuri paine [N/mm^2] aiheutuu 1 millimetrin painumasta. Alustaluvun yksikkönä käytetään [N/mm^3]. (Loy 2009)

Taulukossa 15 on esitetty, kuinka UIC on luokitellut pohjaimet staattisen jäykkyytensä mukaan erittäin pehmeään, pehmeään, normaaliin ja jäykkään. On kuitenkin otettava huomioon, että staattisen ja dynaamisen alustaluvun suhde vaihtelee käytetyn tuotteen mukaan. Näin ollen tämä luokitus ei vastaa täysin radan dynaamista käyttäytymistä. (Auer et al. 2013)

Taulukko 15. Pohjainten luokittelu staattisen jäykkyyden perusteella. (Perustuu lähteeseen (Auer et al. 2013)

Pohjain	**Jäykkyys**
Jäykkä	0.25 N/mm³ < C_{stat} ≤ 0.35 N/mm³
Normaali	0.15 N/mm³ < C_{stat} ≤ 0.25 N/mm³
Pehmeä	0.10 N/mm³ ≤ C_{stat} ≤ 0.15 N/mm³
Erittäin pehmeä	C_{stat} ≤ 0.10 N/mm³

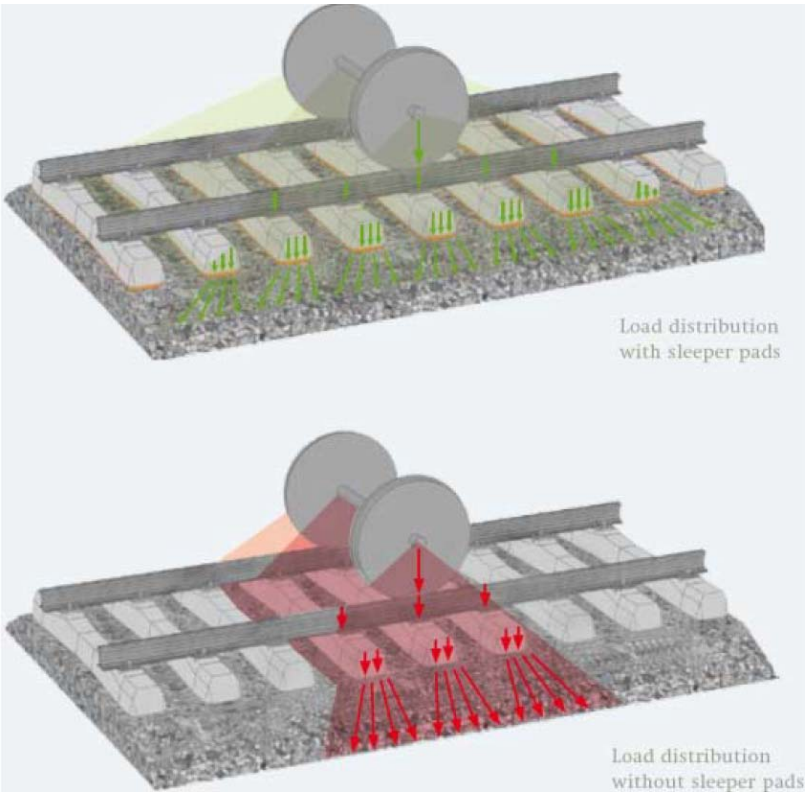
Pohjaimen jäykkyys kannattaa valita sen mukaan, mitä hyötyjä pohjaimella haluaa saavuttaa. Kuten taulukosta voi huomata, pehmeät pohjaimet soveltuvat parhaiten runkomelun ja tärinän vähentämiseen. Jäykemmät pohjaimet soveltuvat paremmin muihin käyttötarkoituksiin. (Auer et al. 2013)

Taulukko 16. Pohjainten käyttökohteet jäykkyyden perusteella. (Luomala et al. 2015)

Pohjaimella tavoiteltava hyöty	**Pohjaimen jäykkyys**		
	Pehmeä	**Normaali**	**Jäykkä**
Raiteen geometrian pysyvyyden parantaminen			
Radan jäykkyyserojen tasoittaminen			
Tukikerrospaksuuden ohentaminen			
Kiskojen pitkäaaltoisen korrugaation vähentäminen			
Runkomelun ja tärinän alentaminen			

Jäykkyyttä valittaessa täytyy ottaa huomioon välilevyn jäykkyys. Jäykän välilevyn ja pehmeän pohjaimen yhdistelmä saattaa aiheuttaa halkeamia pölkkyihin. Toisaalta pehmeä välilevy ja jäykkä pohjain sallivat korkeammat akselipainot. Hyviä yhdistelmiä ovat pehmeä pohjain ja pehmeä välilevy sekä jäykkä pohjain ja jäykkä välilevy. (Schneider, Bolmsvik & Nielsen 2011)

Pohjainten oikeanlainen käyttö hidastaa radan kunnon heikkenemistä tehokkaasti. Pohjaimet jakavat kaluston aiheuttamia kuormituksia useammalle ratapölkylle, kasvattavat ratapölkkyjen ja tukikerroksen kontaktipinta-alaa sekä vähentävät sepeliin kohdistuvia dynaamisia voimia ja värähtelyä. Kuva 77 havainnollistaa, kuinka pohjainten jousto-ominaisuuksien ansiosta raiteen taipumismatka pitenee. Tämän seurauksena kaluston aiheuttama kuorma jakautuu useammalle pölkylle ja näin ollen suuremmalle alueelle tukikerroksessa, jolloin tukikerrokseen kohdistuva kuormitus vähenee. (Getzner 2009)



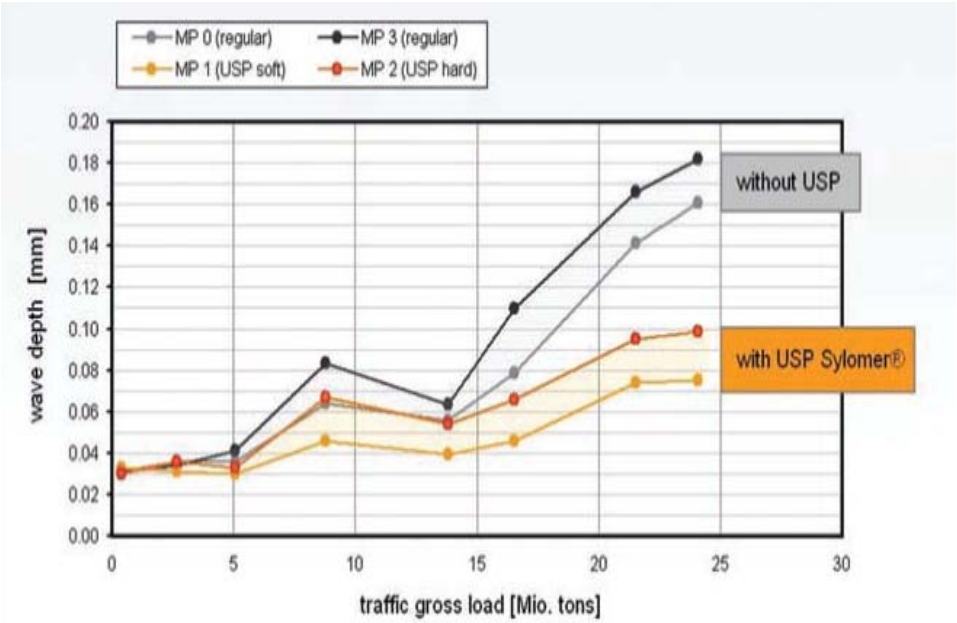
Kuva 77. *Pohjainten avulla raiteen taipumismatka pitenee ja kuormitus jakautuu useammalle ratapölkylle. Ylemmässä kuvassa pohjaimelliset pölkyt ja alemmassa pölkyt ilman pohjaimia.* (Getzner 2009)

Sepelirakeet painuvat joustavaan pohjaimeen paremmin kuin kovaan betonipölkkyyn, mikä kasvattaa pölkyn ja sepelin kontaktipinta-alaa. Pohjaimettoman ratapölkyn ja sepelin kontaktipinta-ala on vain noin 3–8 % pölkyn koko pinta-alasta, kun taas pohjaimellisella pölkyllä kontaktipinta-ala voi olla jopa 35 % pölkyn koko pinta-alasta. Kontaktipinta-alan suuruus riippuu pohjaimen jäykkyydestä: jäykillä pohjaimilla kontaktipinta-ala on pienempi kuin pehmeämmillä pohjaimilla. (Getzner 2009, Witt 2008) (Getzner 2009) Southamptonin yliopisto on tutkinut pohjaimen vaikutusta kontaktipinta-alaan. Tutkimuksessa oli käytössä pehmeä ja jäykkä pohjain sekä yksi- ja kaksiosainen pölkky. Pohjain kasvatti jokaisella pölkky-pohjain yhdistelmällä kontaktialaa moninkertaiseksi pohjaimettomaan pölkkyyn nähden. (Abadi et al. 2015).

Yksi pohjainten tärkeimmistä ominaisuuksista on pölkkyjen alla olevien tyhjätilojen väheneminen. UIC:n tekemän tutkimuksen (Auer et al. 2013) mukaan jopa seitsemän pölkkyä kymmenestä ei ole kunnolla tukeutunut sepeliin ja pölkkyjen alla on tyhjätiloja. Tyhjätilat aiheuttavat ongelmia ratarakenteeseen lisäämällä pölkkyjen värähtelyä, mikä aiheuttaa lisääntynyttä sepelin kulumista ja kiskojen korrugaatiota.

Dynaamiset voimat heikentävät radan geometriaa sekä edesauttavat kiskonkiinnitysten, pölkkyjen ja sepelin vaurioitumista. Pohjaimet vähentävät sepeliin kohdistuvia dynaamisia voimia luomalla pölkyn ja sepelin väliin joustavan kerroksen, joka toimii ikään kuin iskunvaimentimena. Joustava kerros vähentää värähtelyn siirtymistä sepeliin ja näin ollen sepeliin ja alusrakenteeseen kohdistuvia dynaamisia voimia. Samalla periaatteella pohjain vähentää myös runkomelua. (Auer et al. 2013)

Pohjaimet vähentävät myös kiskojen korrugaatiosta aiheutuvia dynaamisia voimia. Innsbruckin yliopiston tekemän tutkimuksen mukaan pohjainten käyttö vähensi huomattavasti korrugaatiota kaarteissa, kuten kuvasta 78 voidaan havaita. Korrugaation syvyys pohjaimia käytettäessä oli keskimäärin 0,075–0,1 mm 25 miljoonan bruttotonnin jälkeen, kun taas ilman pohjaimia se oli keskimäärin 0,15–0,18 mm. Pehmeä pohjain vähensi korrugaatiota hieman enemmän kuin jäykkä pohjain. Lisäksi pohjaimet lyhensivät korrugaation pituutta. Joissakin pienisäteisissä kaarteissa ei havaittu lainkaan korrugaatiota edes usean käyttövuoden jälkeen. (Loy 2008)



Kuva 78. *Kiskojen korrugaation syvyys millimetreinä suhteessa liikennemäärään pohjaimettomilla pölkyillä (harmaat viivat) sekä pohjaimellisella pölkyllä (oranssit viivat).* (Loy 2008)

Siirtymäalueet, joissa radan jäykkyys muuttuu lyhyellä matkalla, aiheuttavat dynaamisten voimien kasvua. Pohjaimilla pystytään kompensoimaan jäykkyyden vaihteluita niin, että rataan kohdistuvat dynaamiset voimat vähenevät. Tämä vähentää radan komponenttien kulumista ja kunnossapitotarvetta. (Witt 2008)

Suorilla rataosuuksilla on helppo valita tilanteeseen soveltuvat pohjaimet, mutta vaihteissa se ei ole yhtä yksinkertaista vaihtelevien kiskoprofiilien ja pölkkyjen sekä lisäkomponenttien, kuten tukikiskojen vuoksi. Esimerkiksi siirryttäessä tukikiskon pölkyltä raskaammalle vaihdepölkylle, jäykkyydessä tapahtuu suuri muutos. Huolellisella suunnittelulla ja erilaisten pohjainten käytöllä voidaan kuitenkin tasoittaa vaihdealueen jäykkyysvaihtelua ja tämän seurauksena vähentää päällysrakenteen komponenttien kuormituksia ja kulumista. (Loy 2009)

Kun siirrytään pohjaimellisista pölkyistä pohjaimettomiin pölkkyihin, kannattaa jäykkyyden muutos toteuttaa vaiheittain. Tämä on erityisen tärkeää siirryttäessä pehmeistä pohjaimista pelkkiin ratapölkkyihin. On suositeltavaa käyttää esimerkiksi 20–30 metrin matkalla jäykempiä pohjaimia ennen kuin pohjainten käytön lopettaa kokonaan. (Getzner 2009)

Pohjaimet soveltuvat myös runsaasti kuormitetuille radoille ja ovat kestävä ratkaisu. Kuvassa 79 on Getznerin Sylomer-pohjain. Kuvanottohetkellä se on ollut 4,5 vuotta käytössä Saksan yhdellä vilkkaimmin liikennöidyistä linjoista ja sitä on kuormitettu yhteensä 190 miljoonalla bruttotonnilla. Vaikka pölkyn päissä näkyy sepelirakeiden aiheuttamat painaumat, sepelirakeet eivät ole lävistäneet tai tuhonneet pohjainta. Sepelirakeiden aiheuttamat painumat kertovat siitä, että pohjain toimii kuten pitääkin. (Loy 2008)

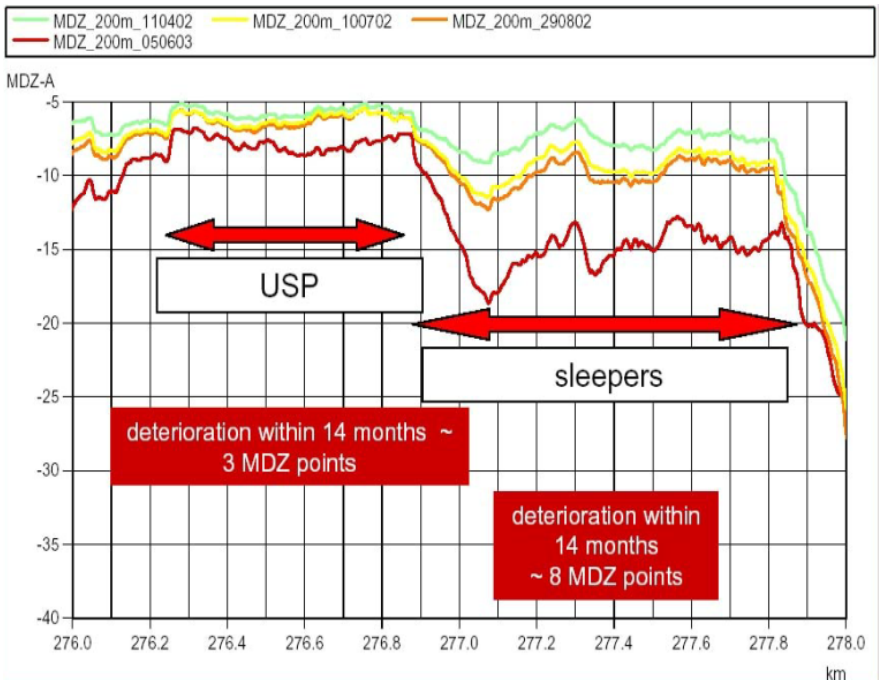
Kuva 79. Sylomer-pohjain 190 miljoonan bruttotonnin jälkeen. (Loy 2008)

Pohjaimen vaikutusta raiteen sivuttaisvastukseen on tutkittu niin kenttäkokeilla kuin laboratoriossakin, mutta tulokset ovat olleet vaihtelevia. Nykyisillä tiedoilla ei pystytä antamaan selkeää vastausta pohjaimen vaikutuksesta raiteen sivuttaisvastukseen. Näyttäisi kuitenkin siltä, että pohjaimellisen radan sivuttaisvastus on verrattavissa pohjaimettoman radan sivuttaisvastukseen. Ainakin keskijäykät ja jäykät pohjaimet soveltuvat käytettäväksi myös kaarteissa, mutta pehmeiden pohjainten vaikutusta sivuttaisvastukseen kaarteissa on tutkittava vielä tarkemmin. (Auer et al. 2013)

Pohjain ei aiheuta pölkylle suurempaa taivutusmomenttia, joten pohjainta voidaan käyttää nykyisissä pölkyissä. Voi kuitenkin olla, että pohjaimen kanssa käytettävän pölkyn optimaalisempi muotoilu saattaisi parantaa radan ominaisuuksia, joten myös tätä asiaa kannattaa tutkia tulevaisuudessa. (Auer et al. 2013)

Pohjaimet eivät edellytä uusia komponentteja tai muutoksia radan perinteiseen rakenteeseen. Tämän takia niitä lisätään usein myös vanhoihin ratoihin kunnossapidon yhteydessä, sillä lisäys ratarakenteeseen on helppoa eikä aiheuta suuria lisäkustannuksia. Pohjaimet ovat turvallinen vaihtoehto, sillä niistä ei aiheudu minkäänlaista haittaa radalle. Pohjaimellisella ratarakenteella on enemmän positiivisia ominaisuuksia kuin pohjaimettomalla. Pohjaimet ovat kustannustehokas vaihtoehto verrattuna esimerkiksi sepelinalusmattoihin, sillä pohjainten investointikustannukset ovat matalammat kuin sepelinalusmattojen. (Loy 2009)

Pohjainten elinkaarikustannuksia on analysoitu Itävallan rataverkolla suoritettujen mittausajojen perusteella. Tutkimuksessa verrattiin pohjaimellisten ja pohjaimettomien rataosuuksien laadun heikkenemistä MDZ-luvun avulla. MDZ-luku on Itävallassa käytössä oleva radan epätasaisuutta kuvaava ajettavuustekijä, joka ottaa huomioon vaaka- ja pystygeometriassa havaitut poikkeamat. Kuvassa 80 on esitetty Itävallassa tehtyjen mittausten tulokset. Tarkasteluväli on 14 kk, jonka aikana mittauksia tehtiin yhteensä 4 kertaa. Kuvasta voidaan huomata, että jo ensimmäisellä mittauskerralla pohjaimellisen rataosuuden laatu on parempi kuin pohjaimettoman rataosuuden laatu. Ajan kuluessa pohjaimellisen rataosuuden laatu heikkenee huomattavasti hitaammin kuin pohjaimettoman rataosuuden laatu. (Veit 2006)



Kuva 80. Radan kunto MDZ-luvun avulla pohjaimellisella (USP) sekä pohjaimettomalla (sleepers) rataosuudella. (Veit 2006)

Taulukossa 17 on esitetty, kuinka pohjaimet keskimäärin vaikuttavat raiteen tukemistyön aikaväliin Itävallan rataverkolla. Taulukossa on esitetty tukemisväli ennen pohjainten asennusta sekä tukemisväli pohjainten asennuksen jälkeen. Tutkimuksessa otettiin huomioon rataosuuksien päivittäiset kuormitukset bruttotonneina sekä kaarresäteet. Taulukosta huomataan, että tukemistarve kasvaa kuormituksen kasvaessa ja kaarresäteen pienentyessä. Tutkimus osoitti, että pohjaimet pidentävät raiteen tukemisväliä. Pohjainten asennuksen jälkeen tukemisväli kasvoi kaksin- tai jopa kolminkertaiseksi verrattuna pohjaimettomaan rataan. Pidentynyt tukemisväli aiheuttaa mittavat säästöt kunnossapitokustannuksissa ja pidentää radan käyttöikää. Veit (2006) on esittänyt, että radan käyttöikä nousee pohjainten avulla keskimäärin 6-13 vuotta riippuen radan kuormituksesta ja kaarresäteestä. (Veit 2006)

Pohjaimet ovat itävaltalaisten tutkimusten mukaan kustannustehokas ja taloudellisesti vakaa ratkaisu, vaikka niiden investointikustannukset saattavat tuntua korkeilta. Erityisesti raskaasti kuormitetuille rataosuuksille sekä pienisäteisiin kaarteisiin pohjaimet ovat erittäin kannattava ratkaisu. Pohjaimet aiheuttavat Veitin (2006) mukaan lisäkustannuksia noin 15–30 euroa/pölkky. (Veit 2006) Suomalainen pölkkyvalmistaja Parma Oy arvioi Kehäradan kiintoraideselvityksen yhteydessä pohjainten aiheuttavan lisäkustannuksia noin 40–50 euroa/pölkky (Ratahallintokeskus 2008a).

Taulukko 17. Tukemisvälin muutos ennen ja jälkeen pohjainten asennuksen. Perustuu lähteeseen (Veit 2006).

Kuormitus	Kaarresäde R > 600		Kaarresäde 600 > R > 400		Kaarresäde 400 > R > 250	
Bruttotonnia/päivä	Tukemisväli (vuosi)		Tukemisväli (vuosi)		Tukemisväli (vuosi)	
	Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen
18 000	8,0	18,0	6,0	13,5	5,0	11,0
33 000	6,0	13,5	5,0	11,0	4,0	9,0
35 000	6,0	13,5	5,0	11,0	4,0	9,0
55 000	3	6,5	3,0	6,5	2,5	5,5
70 000	2,5	5,5	2,0	4,5	1,0	2,5
75 000	2,5	5,5	2,0	4,5	1,0	2,5
80 000	2,5	5,5	2,0	4,5	1,0	2,5

Perinteisten valmistusmateriaalien lisäksi on tutkittu myös autonrenkaista valmistettuja pohjaimia. Elinkaarensa päässä olevien autonrenkaiden käyttö pohjaimina vähentää raaka-aineiden käyttöä ja samalla saadaan hyötykäyttöön materiaali, joka muutoin olisi vaikea hävittää. Pohjaimet valmistetaan erottelemalla renkaista kerroksia, jolloin renkaita ei tarvitse jauhaa. Tekniikka vähentää valmistuskustannuksia ja säilyttää paremmin materiaalin ominaisuudet. Käytettyjen renkaiden kulutuspinnoista tehtyjä pohjaimia testaamalla saatiin selville, että ne kestävät hyvin rataympäristössä ja niiden käyttö kasvatti pölkyn ja sepelin kontaktialaa. Autonrenkaista valmistetut pohjaimet vaativat kuitenkin vielä tarkempaa tutkimusta. (Sol-Sánchez, Moreno-Navarro & Rubio-Gámez 2014)

Portugalissa toteutetussa kenttäkokeessa asennettiin uudelle rataosalle pohjaimia alikulkusillan alueelle yhteensä 44 pölkkyyn ja verrattiin tilannetta perinteisillä pölkyillä rakennettuun samalla rataosalla sijaitsevaan vastaavaan alikulkusiltaan. Kohteiden etäisyys oli noin 20 km, ja pohjaolosuhteet olivat hyvin lähellä toisiaan. Kenttäkokeessa tutkittiin junaylityksen (220 km/h) aiheuttamia siirtymiä, kiskon leikkausmuodonmuutoksia ja kiskon ja pölkyn suhteellista liikettä sekä pölkkyjen pystysuuntaista kiihtyvyyttä. Tutkimuksessa käytettiin myös kevyttä pudotuspainolaitetta, jolla mitattiin kantavuutta pölkyn päältä. Tutkijoiden mukaan laitteella saatiin vertailukelpoista tietoa pölkkyjen tukeutumistilasta. Pudotuspainolaitteen

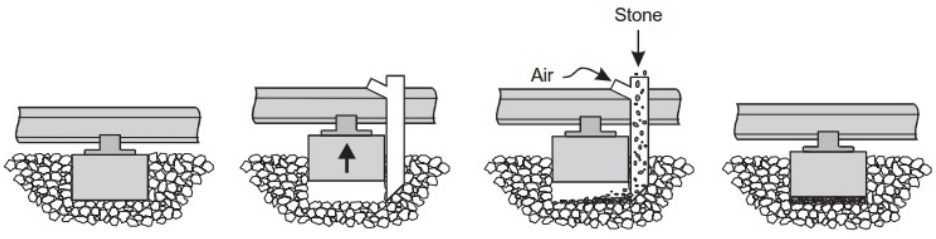
tulosten perusteella pohjaimellisten pölkkyjen jousto oli 4–4,5-kertaa suurempi kuin pohjaimettomien. Myös muut tulokset osoittivat pohjainten lisäävän joustoa ja pysty-suuntaisia muodonmuutoksia. Tulokset osoittavat pohjaimilla olevan merkittävä vaikutusta dynaamisen käyttäytymiseen ja niiden käytön vaativan erittäin huolellista suunnittelua. (Paixão et al. 2015)

Kuten edellä on todettu, elastisten elementtien käytöllä ratarakenteissa voidaan vaikuttaa pystysuuntaiseen jäykkyyteen, värähtelyihin ja meluun. Yleisimmin käytetyt elastiset materiaalit ovat kiskojen, pölkkyjen ja sepelin alle asennettavat elastiset elementit kuten pohjaimet ja kumimatot. Käyttöä on kokeiltu erilaisissa olosuhteissa ja tulokset ovat olleet sekä positiivisia että negatiivisia. Lisätutkimuksia tarvitaan ainakin elastisten elementtien vaikutuksesta eri rakenneosien käyttöikään. Elastisten materiaalien vaikutus vaakasuuntaiseen muodonmuutokseen on myös vähän tutkittu aihealue. Tukikerroksen ohentaminen sepelinalusmattoja käytettäessä on myös tutkimatta. (Sol-Sánchez, Moreno-Navarro & Rubio-Gámez 2015)

7.4 Stoneblowing

Stoneblowing on radan kunnossapitomenetelmä, jossa nostettujen ratapölkkyjen alle puhalletaan paineilman avulla sepeliä pienempää kiviainesta (kuva 82). Railtrack-yhtiö kehitti menetelmän 1990-luvulla Iso-Britanniassa yhteistyössä Yhdysvaltalaisen Harsco Rail -yhtiön kanssa. Stoneblowing on käytännössä koneistettu versio käsin tehtävästä shovel packing -menetelmästä, jota käytettiin laajalti raiteen kunnossa-pitoon ennen tukemiskoneiden yleistymistä. (Anderson, Key 2000). Ensimmäinen stoneblowing-kone otettiin testikäyttöön Iso-Britanniassa vuonna 1996 ja seuraavana vuonna niitä tilattiin lisää. Tämän jälkeen koneen kehitys on jatkunut. Kuvassa 83 on (Harsco Rail 2015) kehittämä uudempi stoneblowing-kone, jolla pystytään kunnossa-pitämään myös risteysalueet ja vaihteet. (McMichael, McNaughton 2002)

Tutkimuksissa on todettu että, 20 mm kalliomurske on sopivin materiaali. Koska 20 mm:iä pienempi raekoko tunkeutuu helposti sepelin sekaan ja pyöreärakeinen sora aiheuttaa rakenteessa stabiliteettiongelmia. (Anderson, Key 2000)

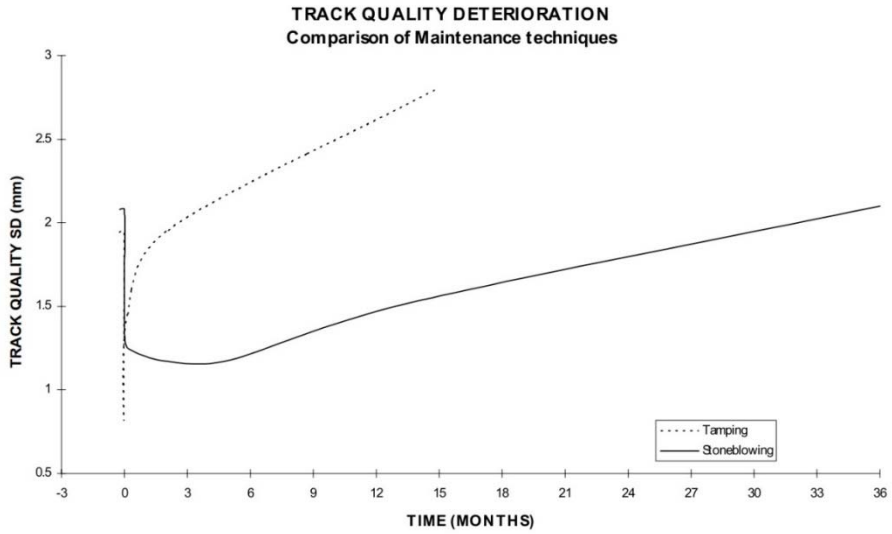


Kuva 81. *Stoneblowing-kunnossapitomenetelmän työvaiheet.* (Fair, Anderson 2003)

Kuva 82. Harsco Railin stoneblowing-kone. (Harsco Rail 2015)

Stoneblowing-kone ajaa rataosuuden kaksi kertaa. Ensimmäisen ajon aikana kone mittaa radan nykyisen geometrian ja toisen ajon aikana kone tekee kunnossapitotyön. Kone nostaa pölkkyjä ja puhaltaa paineilman avulla 20 mm kiviainesta pölkkyjen alle. Pienemmän kiviaineksen ansiosta kiviaineksen ja pölkkyjen välille muodostuu enemmän kontaktipisteitä, mikä vähentää kiviainekseen kohdistuneita rasituksia. Pölkyn alla tiivistyneeseen sepeliin ei kosketa ollenkaan, vaan sen päälle ainoastaan lisätään pienirakeisempaa kiviainesta. Menetelmällä käsitellyn tukikerroksen tukemista pyritään välttämään jatkossa, sillä se mitätöi stoneblowing-käsittelyn hyödyt. (Calla 2003) Tutkimuksissa on todettu myös, että yksi tukemiskerta hienontaa kiviainesta ja tuottaa noin 4 kg hienoainesta pölkkyä kohden, kun taas stoneblowing-menetelmä tuottaa vain 0,5 kg hienoainesta. (Claisse, Keedwell & Calla 2003).

Kuvassa on verrattu radan kuntoa kuvaavan SD-indeksin muutosta tukemisen ja stoneblowing-käsittelyn jälkeen. SD-indeksi on Isossa-Britanniassa käytössä oleva radan geometrista kuntoa kuvaava indeksi, jonka laskennassa raidegeometrian mittausdatasta suodatetaan pois pitkän aallonpituudet ja lasketaan sen jälkeen saadun profiilin keskihajonta SD. Kuten kuvasta 83 voi huomata, tukemisen jälkeen radan laatu heikkenee huomattavasti nopeammin kuin stoneblowing-käsittelyn jälkeen. (McMichael, McNaughton 2002)



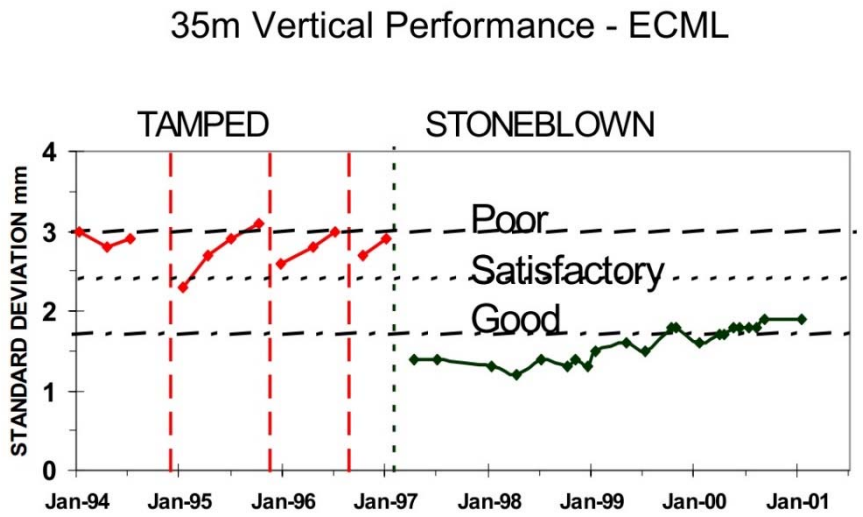
Kuva 83. *Radan laatua kuvaavan SD-luvun muutos eri kunnossapitotoimenpiteiden jälkeisinä kuukausina. Tukeminen on merkattu katkoviivalla ja stoneblowing ehjällä viivalla.* (McMichael, McNaughton 2002)

Vaikka stoneblowing-menetelmällä on saatu hyviä tuloksia, useat rautatiealan asiantuntijat suhtautuvat siihen kuitenkin skeptisesti. Yksi syy tähän on se, että heti stoneblowing-käsittelyn jälkeen radan geometria saattaa vaikuttaa huonommalta kuin ennen käsittelyä. Tämä johtuu siitä, että stoneblowing-käsittelyn aikana raidetta nostetaan ylimääräiset 45 mm, jotta pölkyn alle pystytään puhaltamaan kiveä. Puhalluksen jälkeen raide lasketaan kivien päälle, mutta raide ei välttämättä laskeudu koko 45 mm nostoa eikä asetu heti käsittelyn jälkeen tasaisesti uuden pohjan päälle. Rata vaatii 50 000 bruttotonnia kuormitusta ennen kuin se asettuu vaaditulle tasolle ja seuraavien 250 000 bruttotonnin aikana radan laatu jatkaa paranemistaan. (Calla 2003)

Toinen syy skeptiseen suhtautumiseen on stoneblowing-käsitellyn radan kuivatusominaisuudet. Pölkkyjen alle puhallettavan 20 mm kiven pelätään liikkuvan sepelin joukkoon ja tukkivan sepelirakeiden väliset aukot, mikä aiheuttaisi kuivatusongelmia. Tämä huolenaihe on kuitenkin osoitettu turhaksi, sillä kivirakeiden täytyisi olla huomattavasti pienempiä, jotta ne valuisivat sepelin joukkoon ja tukkisivat aukot. Kivet eivät kulkeudu sepelin joukkoon, jos sepelirakeiden väliset aukot ovat pienempiä kuin kivet. 50 mm sepelillä aukot ovat noin 9 mm. On mahdollista, että stoneblowing-käsittely voisi jopa parantaa radan kuivatusominaisuuksia. Nimittäin käsittelyn ansiosta huonosti tukeutuneiden pölkkyjen aiheuttama pumppautumisilmiö saattaa vähentyä, mikä parantaa kuivatusominaisuuksia. (Fair 2003)

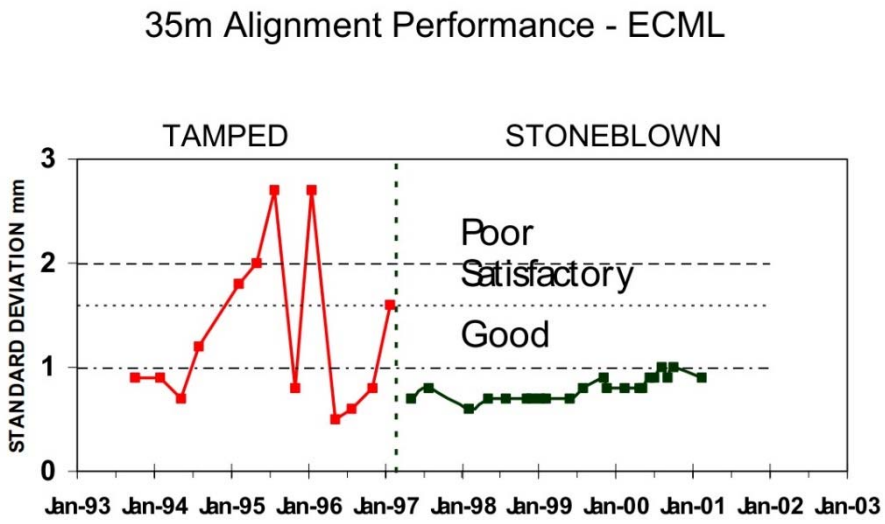
Stoneblowing-menetelmää ei ole käytetty raskaasti kuormitetuilla radoilla. On esitetty epäilyksiä, että raskaammat akselipainot saattavat aiheuttaa pölkkyjen alle puhalletun hienorakeisen kiviaineksen ennenaikaista heikkenemistä. Saatavissa oleva tieto näyttäisi kuitenkin osoittavan, että stoneblowing-käsittely soveltuisi myös raskaammin kuormitetuille radoille. 1990-luvun alkupuolella testattiin stoneblowing-käsittelyä raskaasti kuormitetuilla radoilla ja tulokset osoittivat, että stoneblowing-käsitellyn radan profiili säilyi hyvänä pidempään kuin tukemiskoneella käsitellyn radan. (McMichael, McNaughton 2002)

Stoneblowing-käsittelyllä on saatu hyviä tuloksia myös käytännössä. Esimerkiksi Iso-Britanniassa East Coast Main Line -suurnopeusradalla Lontoon ja Edinburghin välillä oli ollut huomattavia kunnossapito-ongelmia usean vuoden ajan. Ongelmia aiheutti muun muassa radalla sijaitseva tasoristeys. Vuoden mittaisesta tukemisvälistä huolimatta radan pystygeometria oli vain tyydyttävällä tasolla jo muutama päivä tukemisen jälkeen. Radan peruskorjauksen ajateltiin olevan ainut ratkaisu radan laatuongelmiin. Vuoden 1997 alkupuolella radalla kokeiltiin ensimmäistä kertaa stoneblowing-käsittelyä. Kuten kuvasta 84 voi huomata, stoneblowing paransi tilannetta huomattavasti. Välittömästi stoneblowing-käsittelyn jälkeen geometriaa kuvaava standard deviation (SD) -luku laski 3,0 mm:stä 1,6 mm:iin. Seuraavien kuukausien aikana SD-luku pieneni entisestään. Parhaimmillaan se oli jopa 1,2 mm. Seuraavina kuukausina geometria laatu huononi aikaisempaa hitaammin ja oli vielä kolmenkin vuoden jälkeen hyvällä tasolla (kuva 84). (McMichael, McNaughton 2002)



Kuva 84. *Pystygeometrian kehittyminen tukemisen ja stoneblowing-käsittelyn jälkeen.* (McMichael, McNaughton 2002)

Tasoristeyksen kohdalla oli ongelmia vaakageometrian suhteen. Radan vaakageometria oli suurimmaksi osaksi tyydyttävällä tai huonolla tasolla eikä ongelmaa saatu korjattua perinteisellä tukemisella raiteen nostorajoitteiden takia. Stoneblowing-koneen avulla myös vaakageometrian ongelmat saatiin korjattua. Kuten kuvasta huomataan, myös radan vaakasuuntainen laatu parantui huomattavasti stoneblowing-käsittelyllä. Radan vaakageometria säilyi hyvänä usean vuoden ajan käsittelyn jälkeen (kuva 85). (McMichael, McNaughton 2002)



Kuva 85. Vaakageometrian kehittyminen tukemisen ja stoneblowing käsittelyn jälkeen. (McMichael, McNaughton 2002)

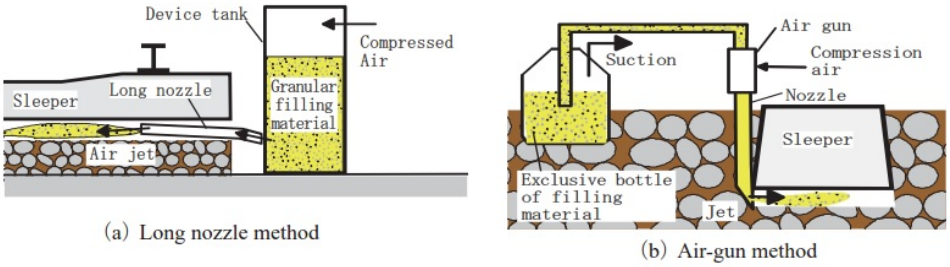
Tämä kyseinen rataosuus on hyvä esimerkki siitä, että stoneblowing-käsittelyllä voidaan saavuttaa erinomaisia tuloksia tilanteissa, joissa perinteisellä tukemisella ei saavuteta vaadittua laatua. Ilman stoneblowing-käsittelyä rataosuus olisi luultavasti peruskorjattu, mutta stoneblowing-käsittely siirsi peruskorjausta useilla vuosilla eteenpäin. Käyttöiän pidentymisen lisäksi stoneblowing-käsittely vähensi rataosuuden kunnossapitotarvetta. Stoneblowing-menetelmästä saadaan suurin hyöty irti rataosuuksilla, joilla joudutaan tekemään usein tukemistöitä ja kunnossapitokustannukset ovat korkeat. Kyseisen kohteen lisäksi stoneblowing-käsittelyä on käytetty myös monissa muissa kohteissa, joissa radan geometriaa ei ole pystytty pitämään edes tyydyttävällä tasolla perinteisellä tukemisella mutta kustannussyistä rataa ole peruskorjattu. (McMichael, McNaughton 2002)

Käytössä on myös käsikäyttöisiä stoneblowing-koneita, jotka toimivat samalla periaatteella kuin koneistetut stoneblowing-koneet. Kiviä puhalletaan pölkyn alla olevaan tyhjätilaan putken läpi paineilman avulla. Kiskoja ja pölkkyjä ei tarvitse nostaa. Käsikäyttöiset stoneblowing-koneet ovat käytännöllisiä pieniin korjauksiin varsinaisten kunnossapitotoimenpiteiden välillä, mutta niillä ei ole kannattavaa käsitellä koko rataa. (Calla 2003)

Stoneblowing-menetelmä ei ole levinnyt kovin laajalti Iso-Britannian ulkopuolelle eikä menetelmästä ole laajaa kokemusta (Abadi et al. 2015). Menetelmän käyttöönotto Iso-Britannian ulkopuolella on vaikeaa, sillä menetelmään soveltuvat koneet, tieto ja osaaminen puuttuvat.

Japanissa on kehitetty myös eräs stoneblowing-menetelmän kaltainen menetelmä, jossa pölkkyjen alle muodostuneet tyhjätilat täytetään polymeerin ja rakeisen täytemateriaalin seoksella. Täytemateriaali koostuu kvartsihiekasta, natriumsilikaatista ja orgaanisesta haposta. Materiaalia on testattu laboratoriossa ja sen on todettu soveltuvan käytettäväksi erityisesti radan epäjatkuvuuskohdissa. Materiaali lisätään pölkyn alle ilmanpaineen avulla samaan tapaan kuin stoneblowing-menetelmässä. Kuva 86 havainnollistaa materiaalin lisäystapoja. Menetelmää on testattu myös

kenttäkokeella ja tulokset olivat lupaavia, koska koekohteiden geometria säilyi parempana kuin tukemalla kunnossapidettyjen osuuksien. Menetelmä vaatii kuitenkin vielä lisätutkimuksia ja kehittämistä., koska esimerkiksi materiaalin lisäysmenetelmät ovat hitaita ja epäkäytännöllisiä. (Nakamura T., Muramoto K. 2010)

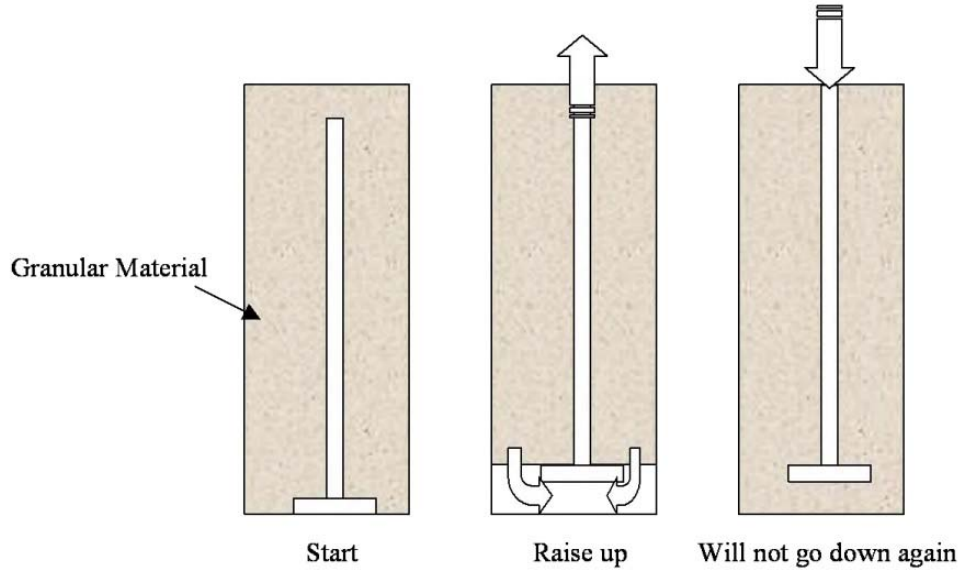


Kuva 86. *Täytemateriaali voidaan lisätä pölkkyjen alle ilmanpaineen avulla joko sivusta tai ylhäältä päin.* (Nakamura T., Muramoto K. 2010)

7.5 Kaksikerroksinen tukikerros

Kaksikerroksinen sepelitukikerros on rakenne, jossa pölkkyjä ympäröivä sepeli korvataan pienemmällä kiviaineksella. Tukikerroksen alaosassa on normaalin kokoista sepeliä (50 mm) ja sen päällä on kerros pienirakeisempaa kiviainesta. Pienemmän kiviaineksen kooksi on ehdotettu 20 mm. Pienemmän kiviaineksen tarkoitus on täyttää pölkkyjen alle syntyvät tyhjätilat ennen kuin ne kasvavat liian suuriksi ja aiheuttavat ongelmia ratarakenteeseen. Callan (2003) mukaan rakenne ei edellytä erityisiä kunnossapitotoimenpiteitä sen jälkeen, kun sepeli on asetettu paikoilleen, vaan se kunnossapitää itse itsensä. Kaksikerroksista sepelitukikerrosta on tutkittu vasta laboratoriokokeilla, joiden perusteella on saatu lupaavia tuloksia. Seuraavaksi menetelmää täytyisi testata kenttäkokeiden avulla. (Calla 2003)

Kaksikerroksisen tukikerroksen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 87 survimen avulla. Survimen ympärillä on hienorakeista kiviainesta. Kun survimen nostaa ylös, kivirakeet valuvat survimen alle muodostuneeseen tyhjätilaan eikä survinta saa enää painettua alas vaan se jää siihen asemaan, johon se nostettiin. Samalla periaatteella kivet valuvat ratapölkyn alle muodostuneeseen tyhjätilaan ja pölkky tukeutuu niihin. Pölkyn ympärillä oleva kiviaines valuu tyhjätilaan kivipartikkelien ollessa pienempiä kuin muodostunut tyhjätila. Menetelmä on saman tyyppinen kuin stoneblowing-menetelmä, mutta pienempää kiveä ei tarvitse erikseen puhaltaa pölkyn alle vaan se valuu sinne itsestään. (Calla 2003)



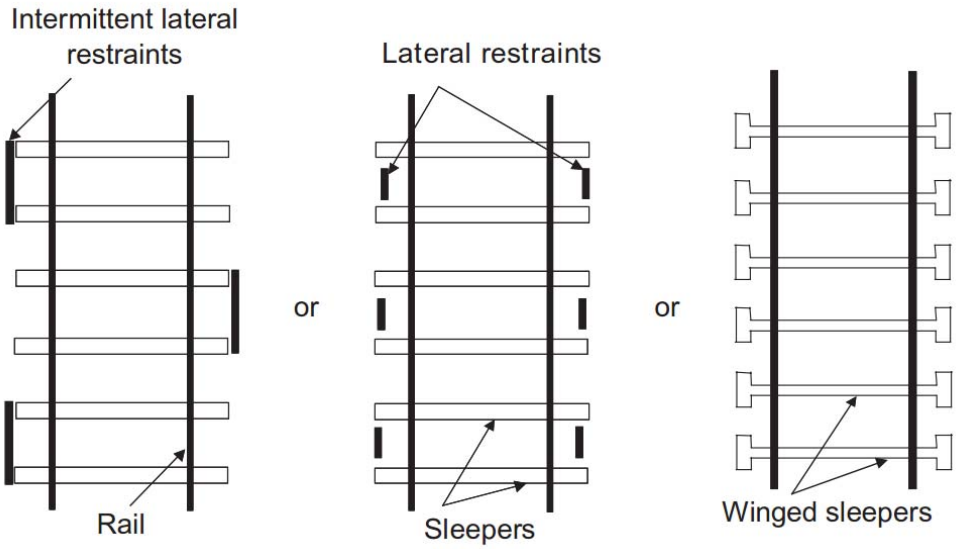
Kuva 87. Kaksikerroksisen sepelitukikerroksen toiminnan havainnollistaminen. (Calla 2003)

Calla (2003) on tehnyt kaksikerroksiselle sepelitukikerrokselle useita laboratoriokokeita ja kokeiden tulosten perusteella on havaittu, että kaksikerroksinen tukikerros vähentää tehokkaasti tyhjätiloja betoni- ja puupölkkyjen alla. Menetelmä vaatii vielä lisää tutkimusta. Laboratoriokokeet olivat lyhytaikaisia ja kokonaiskuormitukset olivat hyvin pieniä. Erityisesti rakenteen kuivatusominaisuuksia on tutkittava tarkemmin. (Calla 2003) Menetelmästä ei löytynyt enempää tietoa, joten tutkimuksessa ehdotettuja käytännön kokeita ei jostakin syystä päästy tekemään.

Kolmiaksiaalikokeessa tutkituissa kaksikerrosrakenteissa havaittiin suurempi leikkauslujuus ja jäykkyysmoduuli kuin yksikerroksisissa sepelirakenteissa. Kokeissa havaittiin kuitenkin suurempia muodonmuutoksia syklisen kuormituksen alkuvaiheessa. Muodonmuutokset tasoittuivat oletettavasti pienenpien kiviainesrakeiden täyttäessä sepelirakeiden välistä tilaa. Kokeissa havaittiin myös kiviainesrakeiden heikentymistä ja rikkoutumista. Kokeessa käytettiin graniittista raekooltaan 20 mm ja 50 mm kiviainesta (Anderson&Fair 2008)

7.6 Muut menetelmät

Sepelin sivuttaissuuntaisen liikkeen rajoittaminen voi parantaa geometrian pysyvyyttä. Sivuttaisliikettä voidaan estää muun muassa käyttämällä pystysuoria seinämiä, erimuotoisia pölkkyjä, tiheämmin asennettuja pölkkyjä ja lisäämällä sepelin määrää. Kuvassa 88 on havainnollistettu pystysuorien seinämien ja siivekkään muotoisten pölkkyjen käyttöä. (Indraratna, Shahin & Salim 2007)



Kuva 88. *Vasemmalla ja keskellä esitetty kahdella eri tavalla asennetut pystysuorat seinämät ja oikealla siivekkäät pölkyt.* (Indraratna, Shahin & Salim 2007)

Pystysuorat levyt voidaan asentaa kuvan mukaisesti kahdella eri tavalla joko vuorotellen pölkkyjen päihin tai pölkkyjen päiden väliin. Seinämät estävät sepelin leviämisen ja siihen liittyvän pölkyn liikkumiseen. Pystysuorat seinämät ovat tehokas ratkaisu sivuttaisvastuksen kasvattamiseen, mutta menetelmä on melko kallis ja voi haitata radan kunnossapitotoimenpiteitä kuten tukemista ja sepelinpuhdistusta. (Lackenby 2006)

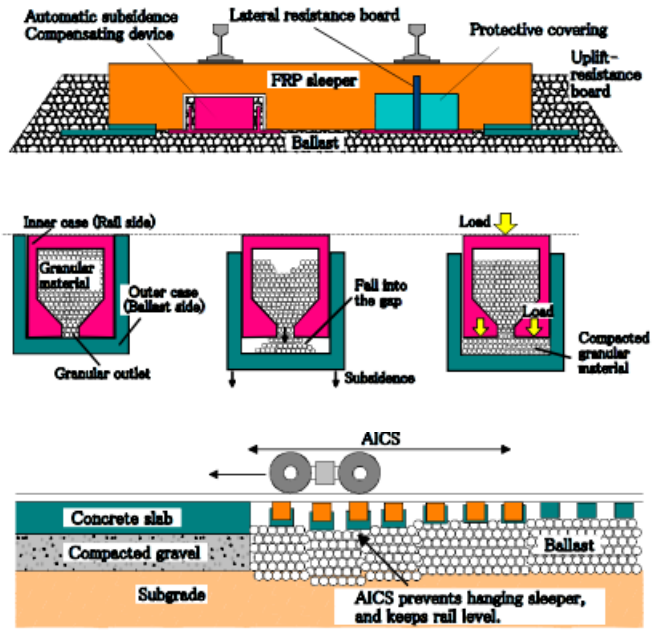
Myös ratapölkkyjen muotoilulla, asennustiheydellä sekä sepelin ja pölkkyjen välisellä kitkalla voidaan vaikuttaa radan sivuttaisvastukseen. Sivuttaisvastukseen vaikuttaa sepelin ja pölkkyjen välinen kitka, jota voidaan kasvattaa lisäämällä pölkkyjen välisen sepelin määrää sekä tiiviysastetta. Myös pölkkyjen sivuilla olevan sepelin määrän ja tiiviysasteen lisäys johtaa parempaa sivuttaisvastukseen. (Lackenby 2006)

Kuvassa 88 esitetyillä siivekkäillä pölkyillä tai kapenevilla pölkyillä voidaan kasvattaa sivuttaisvastusta ja estää sepelin sivuttaissuuntainen leviäminen. Normaalia pidemmillä ja painavammilla pölkyillä on myös huomattu olevan positiivinen vaikutus radan sivuttaisvastukseen. Muita keinoja sivuttaisvastuksen kasvattamiseen on pölkkyjen pohjien karhentaminen, jolloin pölkyn ja alla olevan sepelin välille syntyy suurempi kitka tai pölkkyjen ankkuroiminen ratarakenteeseen erityisesti kaarteissa. Myös pölkkyvälin lyhentäminen lisää sivuttaisvastusta. (Lackenby 2006)

Sepelin mekaanisen käyttäytymisen ja kestävyyden parantamiseksi on tutkittu kumirouheen lisäämistä sepelin joukkoon. Käytetyistä autonrenkaista valmistetun kumirouheen käyttöä sepelin seassa on tutkittu laboratorio-olosuhteissa kuormituskokeella 460*200*300 mm suuruisessa laatikossa. Laboratoriokokeissa käytetty kumirouhe oli pääasiassa kooltaan 8–16 mm. Kumirouhetta sekoitettiin sepeliin eri määriä: 5 %, 10 %, 20 % ja 30 %. Laboratoriokokeet osoittivat, että suuret määrät kumirouhetta vähensivät sepelirakeiden rikkoutumista ja pystysuuntaista jäykkyyttä, mutta kasvattivat painumia ja painumisnopeutta. Optimaalisin määrä kumirouhetta sepelin seassa oli 10 %. Kumirouheen todettiin pienentävän jäykkyyttä ja vähentävän sepelin

kulumista. Kumirouheen käyttö vaatii vielä tarkempia tutkimuksia muun muassa veden ja kunnossapitotoimenpiteiden vaikutuksista. (Sol-Sánchez et al. 2015)

Japanissa tehdyssä tutkimuksessa on tutkittu laboratorio-olosuhteissa automaattisesti asemaansa korjaavia ratapölkkyjen toimintaa (kuva 89). Sykliset kuormituskokeet on toteutettu täyden mittakaavan tukikerroksella, johon on rakennettu kuuden pölkyn mittainen raide. Jokaisessa pölkyssä on oma muista riippumaton korjauslaite, pölkyn aseman korjaaminen tapahtuu pölkyn sisällä olevan rakeisen materiaalin avulla (kuva 89). Testitulosten mukaan epätasaisuutta korjaavat pölkyt estivät roikkuvien pölkkyjen syntymisen ja pienensivät muodonmuutoksia. (Muramoto, Nakamura & Sakurai 2012)



Kuva 89. *Automaattisesti asemaansa korjaavan pölkyn toimintaperiaate* (Muramoto, Nakamura & Sakurai 2012)

7.7 Suomessa koerakentamiseen soveltuvat menetelmät

Edellisissä luvuissa kuvatuista menetelmistä osa on vielä laboratoriokokeilujen varassa, joten niiden kokeilu Suomessa on käytännössä haastavaa. Menetelmistä potentiaalisimmat on koottu seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 16. Tukikerroksen toiminnan parantamismenetelmät ja niiden koekäyttömahdollisuudet Suomessa.

Menetelmä	Käyttökokemukset	Soveltuvuus/ mahdollisuudet
Geolujitteet	Maailmalla hieman ristiriitaisia kokemuksia. Kokeiltu Suomessa – käyttökokemukset positiivisia tähän mennessä	Koekohteita voisi rakentaa lisää ja monitoroida
Pohjaimet	Useassa tutkimuksessa positiivisia kokemuksia. Kokeiluja menossa.	Radan epäjatkuvuuskohdat vaativat huolellisen suunnittelun
Polyuretaanikäsittely	Kokemuksia lähinnä tuotteen toimittajan toimesta	Potentiaalinen kokeiltava epäjatkuvuuskohdassa
Stoneblowing/kaksikerroksinen tukikerros	Positiivisia kokemuksia, mutta myös paljon epäilyjä toimivuudesta	Pistemäiset kokeilut +suurtehoimurin kehitystyö sepelin vaihdossa
Automaattisesti tuentatilaansa korjaava pölkky	Vasta laboratorioasteella, mutta voisi toimia esim. siltojen päädyissä.	Laboratoriomittakaavan kokeita, miten käyttäytyy talviolosuhteissa.
Pölkyn alle injektoitava täyteaine/asemaansa korjaava pölkky	Vasta laboratorioasteella, mutta voisi toimia esim. siltojen päädyissä.	Laboratoriomittakaavan kokeita, miten käyttäytyy talviolosuhteissa.

Kokeilukohteet tulee valita menetelmän mukaan. Esimerkiksi geolujitteiden käyttö jäykkyyden epäjatkuvuuskohdissa ei välttämättä toimi. Myöskään pohjaimien kokeilu ei välttämättä paranna tilannetta epäjatkuvuuskohdassa, ellei siirtymäaluetta suunnitella oikein. Tukikerroksen toiminnan parantamiskokeilu tulee kuitenkin kohdentaa sellaiseen kohteeseen, josta on saatavilla riittävä määrä aikaisempaa kunnossapitotietoa ja selkeästi kohde on ongelmallinen. Koekohde tulee kuitenkin sijoittaa siten, että sen mahdollinen toimimattomuus ei aiheuta ongelmia liikenteelle ja kunnossapidolle. Kokeilukohteiden seuranta on järjestettävä mahdollisimman pitkälle aikavälille, koska muutoksia tapahtuu pitkän kestoiän rakenteissa hitaasti.

8 Yhteenveto

Tukikerroksen toiminta ja sen parantaminen on kansainvälistenkin tutkimusten mukaan edelleen ajankohtainen ja tärkeä tutkimusaihe. Kirjallisuusselvityksen mukaan tutkimuksia on toteutettu sekä laboratorio-olosuhteissa että todellisia rakenteita monitoroiden. Tutkimukset osoittavat tukikerroksen kunnossapidon kuormittavan ja hienontavan sepeliä. Tukikerroksen kymmenien vuosien käyttöiän mittakaavassa erilaiset lyhytaikaiset tutkimukset eivät kuitenkaan mahdollista yksiselitteisten tai suoraviivaisten johtopäätösten tekoa. Johtopäätökset koskevat yleensä vain tiettyä koejärjestelyä, materiaalia tai rakenneratkaisua. Tätä tutkimusta vastaavia monitorointitutkimuksia on tehty melko vähän, mutta tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia. Esimerkiksi osa tuennan vaikutuksesta pystygeometriaan katoaa melko nopeasti tuennan jälkeen myös muiden tutkimuksien mukaan.

Tässä hankkeessa käytetyistä tutkimusmenetelmistä takymetrimittausten luotettavuus korkeuspoikkeamien mittauksissa osoittautui suurimmaksi haasteeksi. Menetelmän epätarkkuus johti tuloksiin, jotka eivät käytännössä voineet pitää paikkaansa, koska osa mittausten mukaisista geometriavirheistä olisi automaattisesti johtanut vakaviin liikenteellisiin ongelmiin. Takymetrimittaukset kuitenkin osoittivat lyhyellä matkalla suuruusluokaltaan samanlaisia siirtymiä kuin pölkkyihin asennetut siirtymäanturimittaukset. Molemmat mittausmenetelmät osoittivat, että noin 20 mm tukemisnostosta katoaa ensimmäisen kuukauden aikana noin puolet ja kahdessa vuodessa nostosta jäljellä enää yksi neljäsosa.

Kohteissa käytetyn raidesepelin alkuperä- ja laatutietoja ei vanhimpien sepelien osalta saatu luotettavasti selvitettyä. Voidaan kuitenkin olettaa, että ennen vuotta 1995 asennetut sepelit ovat olleet laadultaan nykyisiä sepeleitä heikompia. Historiatietojen ja rakeisuuslukututkimusten perusteella voitiin todeta, että nykyvaatimusten mukaisten sepelien hienontuminen tapahtuu hitaammin. Sepelin hienontumista kuvaavalle rakeisuusluvulle ja kuormitukselle voitiin historiatiedon perusteella esittää yhteys siten, että rakeisuusluku muuttuu keskimäärin 0,5–2 yksikköä miljoonaa bruttotonnia kohden. Nykyvaatimusten mukaisten raidesepelien hienontumisnopeus näytti olevan hitaampi kuin vanhojen vaatimusten mukaisilla sepeleillä. Tarkastelussa pitää luonnollisesti ottaa huomioon, että nykyisten vaatimusten mukaisten sepelit ovat olleet ratarakenteissa enintään 20 vuotta.

Kun pohjaolosuhteet ovat samanlaiset, sepelin iällä ei ole suurta vaikutusta siihen kuinka nopeasti geometria palaa samaan tilanteeseen kuin ennen tuentaa. Uudempi ja kulmikkaampi sepeli palautuu jopa nopeammin kuin vanhempi pyöristynyt sepeli, mikä seikka on todettu myös joissakin kirjallisuusselvityksessä löydetyissä tutkimuksissa. Tästä syystä voisi olla mielekästä pyöristää uutta sepeliä hallitusti ennen asentamista. Tukemisen jälkeen pölkyt painuvat rantaradan liikennemäärällä jo kahden ensimmäisen viikon aikana 25–45 % noston suuruudesta. Pölkkyjen aseman muutos tasoittui tukemisen jälkeisen kolmen kuukauden jälkeen tasolle 0,25 mm/kuukausi. Koko kahden vuoden seurannan aikana tukemisen nostosta hävisi 50–80 %.

Tukemisen vaikutus raidesepelin hienontumiseen tukemishistorian perusteella oli haastava selvitettävä. Tuennan aiheuttama kuormituslisä on kirjallisuuden mukaan jopa 20 Mbrt, mikä vaikuttaa suomaisille nykysepeleille melko suurelta arvolta. Suppeiden suomalaisten laboratoriotutkimusten perusteella tukemisen hienontava vaikutus voisi olla kaksinkertainen verrattuna täysin tukemattomaan tilanteeseen.

Tässä tukimuksessa lisäkuormitukselle ei pystyty laskemaan mitään yksittäistä bruttotonniperusteista vaikutusarvoa. Historiatietoon perustuvan rakeisuuslukumuutoksen 0,5 yksikköä/Mbrt perusteella esimerkiksi kohteen 151 vuonna 1989 asennetun sepelin käyttöikä on päätöksessään 5-6 vuoden kuluttua, vaikka sepeli oli ollut rakenteessa näytteenottohetkellä vasta 25 vuotta. Kohdetta 151 on tuettu paljon ja rakeisuuslukututkimukset osoittivat muutamassa pisteessä jo raja-arvon ylityksiä. Myös kohteessa 187 vuonna 1995 asennetussa sepelissä havaittiin lähes samanlainen tulos jäljellä olevasta käyttöiästä. Kohdetta 187 on tuettu kuitenkin huomattavasti vähemmän kuin kohdetta 151. Näin ollen hienontuminen ja käyttöiän ennuste voi johtua myös sepelin alkuperäisestä heikommasta laadusta. Uudempien sepelien hienontumisesta ei tässä lyhytaikaisessa seurannassa saatu vielä riittävästi tietoa, mutta trendi näytti olevan, että uusien vaatimusten mukaiset sepelit hienontuvat hitaammin.

Alustavien kuormitusmallinnusten tulosten perusteella voitiin todeta, että yhdistettynä heikosta tuennasta aiheutuva lähes kaksinkertainen dynaaminen kuormitusvaikutus ja noin kaksinkertainen kuormitusten jakautumisesta tuleva vaikutus, voi yksittäisen ratapölkyn alapuolella olevan sepelin kuormitustaso olla ääritapauksessa jopa yli kolminkertainen hyvään tuentatilanteeseen verrattuna. Tämä vaikuttaa oleellisesti myös sepelin hienontumiseen.

Tarkastelluista tukikerroksen toiminnan parantamismenetelmistä Suomessa on jo kokeiltu pohjaimia ja geolujitteitakin on kokeiltu ainakin yhdessä kohteessa. Jotta näistä kokeiluista saadaan objektiivisia tuloksia, vaaditaan useampivuotista seurantaa. Esimerkiksi geolujitteiden käyttöä olisi hyödyllistä kokeilla useammassa kohteessa. Uusista parantamismenetelmistä kokeilemisen arvoisia voisivat olla polyuretaanikäsittely, sepelirakeiden hallittu pyöristäminen ja automaattisesti tuentatilaansa korjaava pölkky.

Toistuvien korkeuspoikkeamien korjaaminen tukemalla ja sepelin vaihdolla ei aina näytä tuottavan parempia tuloksia vaan tilanne palautuu melko nopeasti, mikä usein tarkoittaa myös sitä, että korkeuspoikkeaman perussyy ei ole sepelissä tai tukikerroksessa. Tämän tutkimuksen yhteydessä tehty käytännössä tarpeeton tuenta näytti aiheuttavan yhdessä kohteessa uuden geometriavirheen. Tarkempi juurisyyanalyysi geometriavirheiden taustasta olisi suositeltavaa. Tässä tutkimuksessa kerätyn tiedon täydentäminen myös jatkossa sepelin laatutietojen ja tukemisen osalta olisi erittäin tärkeää, jotta voidaan edelleen tarkentaa tukemisen sepeliä hienontavan vaikutuksen määräarvioita ja ennustaa paremmin tukikerroksen käyttöikää.

Jotta tukikerroksen toimintaa voidaan edelleen kehittää, on edellä mainittujen kokeilujen ja suosituksen lisäksi erittäin tarpeellista kehittää ratatiedon dokumentaatioprosesseja, kuten tuenta- ja geometriarekisteri ja sepelin laatutietojen tallennus yhteen paikkaan koko rataverkon osalta.

Kirjallisuus

Abadi, T., Le Pen, L., Zervos, A. & Powrie, W. 2015, "Measuring the area and number of ballast particle contacts at sleeper/ballast and ballast/subgrade interfaces", *The International Journal of Railway Technology, .*

Alkki, J. 2015, "Takymetripaikannukseen perustuva radanmittausvaunu", *Rautatietekniikka,* vol. 4, pp. 21-25.

Alves Ribeiro, C., Paixão, A., Fortunato, E. & Calçada, R. 2015, "Under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: numerical modelling and experimental validation", *Structure and Infrastructure Engineering,* vol. 11, no. 11, pp. 1432-1449.

Anantanasakul, P., Indraratna, B., Nimbalkar, S. & Neville, T. 2012, "Field monitoring of performance of ballasted rail track with geosynthetic reinforcement", *New Zealand Conference on Geomechanics: Ground Engineering in a Changing World*Australia.

Anderson, W. & Key, A. 2000, "Model Testing of Two-Layer Railway Track Ballast", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* vol. 126, no. 4, pp. 317-323.

Audley, M. & Andrews, J.D. 2013, "The effects of tamping on railway track geometry degradation", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* vol. 227, no. 4, pp. 376-391.

Auer, A., Potvin, R., Godart, P. & Schmitt, L. 2013, "Under Sleeper Pads in Track - the UIC Project", *European Railway Review,* vol. 19, no. 2.

Aursudkij, B. 2007, *A laboratory study of railway ballast behaviour under traffic loading and tamping maintenance*, University of Nottingham.

Balfour Beatty 2015, *, Balfour Beatty plc*. Available: http://www.balfourbeatty.com [2015, 12/16].

Brown, S.F., Kwan, J. & Thom, N.H. 2007, "Identifying the key parameters that influence geogrid reinforcement of railway ballast", *Geotextiles and Geomembranes,* vol. 25, no. 6, pp. 326-335.

Calla, C. 2003, *Two layered ballast system for improved performance of railway track*, Coventry University.

Chen, C., McDowell, G.R. & Thom, N.H. 2012, "Discrete element modelling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions", *Geotextiles and Geomembranes,* vol. 35, pp. 76-86.

Claisse, P., Keedwell, M. & Calla, C. 2003, "Tests on a two-layered ballast system", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport,* vol. 156, no. 2, pp. 93-101.

Coelho, B., Hölscher, P., Priest, J., Powrie, W. & Barends, F. 2011, "An assessment of transition zone performance", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* vol. 225, no. 2, pp. 129-139.

Esveld, C. 2001, *Modern Railway Track,* 2nd edn, MRT-Productions, The Netherlands.

Fair, P. 2003, *The geotechnical behaviour of ballast materials for railway track maintenance*, The University of Sheffield.

Fair, P.I. & Anderson, W.F. 2003, "Railway track maintenance using the Stoneblower", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport,* vol. 156, no. 3, pp. 155-167.

Fimor 2013, *Polyurethane rubber pads (USPs) for railroad sleepers*, Fimor.

Fimor 2012, *Polyurethane for railway systems*, Fimor.

Fischer, S. & Horvát, F. 2011, "Superstructure stabilization of ballast bedded railway tracks with geogrids", *Hungarian Journal of Industrial Chemistry Veszprém,* vol. 39, no. 1, pp. 101-106.

Getzner 2009, *Sleeper pads for ballasted track*, Getzner.

Hakala, S. 2015, *Keskustelu sähköpostitse 27.11.2015*.

Harjula, H. 1990, *Raidesepelin laatuvaatimukset*, VR, Helsinki.

Harsco Rail 2015, *, Harsco Rail* [Homepage of Harsco Rail], [Online]. Available: http://www.harscorail.com/ [2015, 11/19].

Hussaini, S.K.K., Indraratna, B. & Vinod, J.S. 2015, "Performance assessment of geogrid-reinforced railroad ballast during cyclic loading", *Transportation Geotechnics,* vol. 2, pp. 99-107.

Indraratna, B., Salim, W. & Rujikiatkamjorn, C. 2011, *Advanced rail geotechnology-ballasted track,* Taylor&Francis Group,LLC.

Indraratna, B., Khabbaz, H., Salim, W. & Christie, D. 2006, "Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilisation", *Ground Improvement,* vol. 10, no. 3, pp. 91-101.

Indraratna, B., Nimbalkar, S. & Rujikiatkamjorn, C. 2012, "Stabilising railway embankments with geosynthetic grids and drains and a class A prediction of track behaviour", *International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change,* , pp. 21-40.

Indraratna, B., Shahin, M.A. & Salim, W. 2007, "Stabilisation of granular media and formation soil using geosynthetics with special reference to railway engineering", *Ground Improvement,* vol. 11, no. 1, pp. 27-43.

Jadidirendi, K., Zakeri, J.A. & Teng, H. 2015, "Field investigation for identifying the effects of dynamic track stabilizing operation on track geometrical indices", *ASME/ASCE/IEEE 2015 Joint Rail Conference, JRC 2015*American Society of Mechanical Engineers, , 23 March 2015 through 26 March 2015.

Jokiniemi, R. 2007, *Elinkaariselvitys 2007: 1201 Rataosan Kirkkonummi - Turku kuvaus*, Ratahallintokeskus.

Kennedy, J. 2011, *A Full-scale laboratory investigation into railway track substructure performance and ballast reinforcement*, Heriot-Watt University.

Kennedy, J., Woodward, P.K., Medero, G. & Banimahd, M. 2013, "Reducing railway track settlement using three-dimensional polyurethane polymer reinforcement of the ballast", *Construction and Building Materials,* vol. 44, pp. 615-625.

Koc, W. & Wilk, A. 2009, "Investigations of methods to measure longitudinal forces in continuous welded rail tracks using the tamping machine", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* vol. 223, no. 1, pp. 61-73.

Koc, W., Wilk, A., Chrostowski, P. & Grulkowski, S. 2011, "Tests on lateral resistance in railway tracks during the operation of a tamping machine", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* vol. 225, no. 3, pp. 325-340.

Kuula, P. 2015, *Tien ja radan sitomattomissa rakennekerroksissa käytettävien kiviainesten lujuuden ja hienontumisen tutkiminen. Kirjallisuusselvitys*, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 68/2015, Helsinki.

Kwan, J. 2006, *Geogrid reinforcement of railway ballast*, University of Nottingham.

Lackenby, J. 2006, *Triaxial behavior of ballast and the role of confining pressure under cyclic loading*, University of Wollongong.

Le Pen, L., Watson, G., Powrie, W., Yeo, G., Weston, P. & Roberts, C. 2014, "The behaviour of railway level crossings: Insights through field monitoring", *Transportation Geotechnics,* vol. 1, no. 4, pp. 201-213.

Lichtberger, B. 2007, "The lateral resistance of the track", *European railway review,* vol. Issues 3&4.

Liikennevirasto 2015, *Rautateiden verkkoselostus 2015*, Liikennevirasto, Helsinki.

Liikennevirasto 2012, *Geolujitetut maarakenteet, Tiegeotekniikan käsikirja*, Liikenneviraston oppaita 2/2012, Helsinki.

Liikennevirasto 2010, *Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 2, Radan geometria*, Liikennevirasto, Online publication, available at: www.liikennevirasto.fi.

Loponen, T., Salmenperä, P. & Nurmikolu, A. 2016, *Liikkuvan kaluston ja raiteen välinen vuorovaikutus ja sen dynaaminen mallinnus*, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 14/2016, Helsinki.

Loy, H. 2009, "Under Sleeper Pads in Turnouts", *European Rail Technology Review,* vol. 49, no. 2.

Loy, H. 2008, " Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs", *European railway review,* , no. 4.

Luomala, H. 2010, *Ratapenkereiden monitorointi*, Liikennevirasto tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010, Helsinki.

Luomala, H. & Nurmikolu, A. 2012, "Railway track stiffness measurements on the bridge transition zones", *Proceedings of the 2nd International Conference on Transportation Geotechnics*Sapporo, Japan, September 10-12, 2012.

Luomala, H., Peltokangas, O., Rantala, T. & Nurmikolu, A. 2015, *Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi*, Liikennevirasto tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015, Helsinki.

Marschnig, S. & Veit, P. 2011, "Making a case for under-sleeper pads", *International Railway Journal,* vol. 51, no. 1.

McMichael, P. & McNaughton, A. 2002, *The Stoneblower – delivering the promise: Development, testing and operation of a new track maintenance system*, Transportation Research Board Annual Meeting.

Muramoto, K., Nakamura, T. & Sakurai, T. 2012, "A study of the effect of track irregularity prevention methods for the transition zone between different track structures", *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute),* vol. 53, no. 4, pp. 211-215.

Nakamura T. & Muramoto K. 2010, "Repair method for ballasted track by composite filling material consisting of water glass and polymer", *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan),* vol. 51, no. 2, pp. 55-59.

Ngo, N.T., Indraratna, B. & Rujikiatkamjorn, C. 2015, "A study of the behaviour of fresh and coal fouled ballast reinforced by geogrid using the discrete element method", *International Symposium on Geomechanics from Micro to Macro, IS-Cambridge 2014*Taylor and Francis - Balkema, , 1 September 2014 through 3 September 2014, pp. 559.

Nummelin, M. 2008, *Rantarata,* Kustantaja Laaksonen, [Helsinki].

Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. 2010, *Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin*, Liikennevirasto, Helsinki.

Nurmikolu, A. 2005, *Degradation and frost susceptibility of crushed rock aggregates used in structural layers of railway track,* Tampere University of Technology, Tampere.

Nurmikolu, A. 2000, *Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään,* Diplomityö edn, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere.

Paderno, C. 2010, "Full-scale Laboratory Testing of Ballast Behavior Following Traffic Loading and Tamping", *Rail Engineering International,* vol. 39, no. 3.

Paixão, A., Alves Ribeiro, C., Pinto, N., Fortunato, E. & Calçada, R. 2015, "On the use of under sleeper pads in transition zones at railway underpasses: experimental field testing", *Structure and Infrastructure Engineering,* vol. 11, no. 2, pp. 112-128.

Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. 2015, *Raidegeometrian kunnossapito tukemalla ja tukemiskalusto Suomen rataverkolla*, Liikennevirasto, Helsinki.

Peltokangas, O. 2012, *Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen*, Tampereen teknillinen yliopisto.

Perales, R., Saussine, G., Miles, N. & Descantes, Y. 2011, "On the damaging effects of the ballast tamping operation", *Proceedings of 9th World Congress of Railway Research*, May 22-26 2011.

Pesonen, A. 2016, *Radan epätasaisuuksien vaikutus kaluston kokemiin värähtelyihin*, Tampereen teknillinen yliopisto.

Pylkkänen, K., Luomala, H., Guthrie, W.S. & Nurmikolu, A. 2012, "Real-time in-situ monitoring of frost depth, seasonal frost heave, and moisture in railway track structures", *Proceedings of the 15th International Conference on Cold Regions Engineering*Quebec, Canada, August 19-22, 2012.

Pylkkänen, K. & Nurmikolu, A. 2015, *Routa ja routiminen ratarakenteessa*, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2008a, *Kehäradan kiintoraideselvitys*, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 17/2008, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2008b, *Rantaradan Helsinki-Turku. Ratatekninen ja liikenteellinen selvitys*, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2006, *Helsinki–Turku-rautatieyhteys. Ratahallintokeskuksen strategioita ja selvityksiä 1/2006.*, Ratahallintokeskuksen strategioita ja selvityksiä 1/2006., Helsinki.

Ratahallintokeskus 2005a, *Raidesepelin hankinta- ja toimitusohje*, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2005b, *Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta*, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2005c, *Standardin SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset kansallinen soveltamisohje*, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2004, *Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO). Osa 13, Radan tarkastus. (rev. ed. 2006)*, Liikennevirasto.

Ratahallintokeskus 2002, *Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 15: Radan kunnossapito*, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 2001, *Raidesepelin tekniset toimitusehdot*, Ratahallintokeskus, Helsinki.

Ratahallintokeskus 1997, *Raidesepelin laadun tutkimusohje*, Helsinki.

Sañudo, R., Dell'Olio, L., Casado, J.A., Carrascal, I.A. & Diego, S. 2016, "Track transitions in railways: A review", *Construction and Building Materials,* vol. 112, pp. 140-157.

Saussine, G., Azéma, E., Gautier, P., Peyroux, R. & Radjai, F. 2008, "Numerical modeling of the tamping operation by Discrete Element Approach", *World Congress Rail Research*, pp. 1.

Schneider, P., Bolmsvik, R. & Nielsen, J.C.O. 2011, "In situ performance of a ballasted railway track with under sleeper pads", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* vol. 225, no. 3, pp. 299-309.

Selig, E.T. & Waters, J.M. 1994, *Track geotechnology and substructure management,* Thomas Telford.

SFS 2007, *SFS 7007 Raidesepelikiviaineksilta vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot*.

SFS 2003, *SFS-EN 13450+AC Raidesepelikiviainekset*.

Silvast, M., Nurmikolu, A., Wiljanen, B. & Levomaki, M. 2010, "An inspection of railway ballast quality using ground penetrating radar in Finland", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit,* vol. 224, no. 5, pp. 345-351.

Sol-Sánchez, M., Moreno-Navarro, F. & Rubio-Gámez, M.C. 2014, "Viability of using end-of-life tire pads as under sleeper pads in railway", *Construction and Building Materials,* vol. 64, pp. 150-156.

Sol-Sánchez, M., Thom, N.H., Moreno-Navarro, F., Rubio-Gámez, M.C. & Airey, G.D. 2015, "A study into the use of crumb rubber in railway ballast", *Construction and Building Materials,* vol. 75, pp. 19-24.

Tensar 2015, , *Tensar International Corporation* [Homepage of Tensar], [Online]. Available: http://www.tensarinternational.com/ [2015, 12/10].

Tunninen, N. 2015, "Tukemistyön suunnittelu ja toteutus - laadukkaan raidegeometrian ylläpito Suomen rataverkolla", *Rautatietekniikka,* vol. 4, pp. 16-18.

Tunninen, N. 2010, *Raiteen ja vaihteen tukemisen parhaat tukemistavat, Luonnos 01/2010*, Liikennevirasto, Rautatieosasto, Rataverkkoyksikkö, Helsinki.

Tutumluer, E., Huang, H., Hashash, Y. & Ghaboussi, J. 2006, "Aggregate shape effects on ballast tamping and railroad track lateral stability", *AREMA annual conference*, pp. 17.

UIC 2009, *Project - Under Sleeper Pads, Summarising report*, UIC.

Varandas, J.N., Hölscher, P. & Silva, M.A.G. 2011, "Dynamic behaviour of railway tracks on transitions zones", *Computers and Structures,* vol. 89, no. 13-14, pp. 1468-1479.

Vehkalahti, M. 2015, *Rantaradan tonnitiedot 2014-2015 (sähköposti 16.10.2015)*.

Veit, P. 2006, "Under Sleeper Pad – Economic Evaluation based on Life Cycle Costing", *USP Conference* Paris.

VR 1995, *Raidesepelin laatuvaatimukset*, VR.

VR Track Oy 2015, *Raportti pääratojen ja vaihteiden kunnosta 2015*, VR Track Oy, Helsinki.

Wang, H., Markine, V.L., Shevtsov, I.Y. & Dollevoet, R. 2015, "Analysis of the dynamic behaviour of a railway track in transition zones with differential settlement", *ASME/ASCE/IEEE 2015 Joint Rail Conference, JRC 2015*American Society of Mechanical Engineers, , 23 March 2015 through 26 March 2015.

Witt, S. 2008, *The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics*, Linköping University Institute of Technology.

Woodward, P., Kennedy, J. & Medero, G. 2009, "Three-dimensional track reinforcement using polymer geocomposites", .

Woodward, P.K., El Kacimi, A., Laghrouche, O., Medero, G. & Banimahd, M. 2012, "Application of polyurethane geocomposites to help maintain track geometry for high-speed ballasted railway tracks", *Journal of Zhejiang University: Science A,* vol. 13, no. 11, pp. 836-849.

Woodward, P.K., Medero, G. & Griffiths, D.V. 2009, "Reducing track faults using polymer geocomposite technology", *8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCR2A'09*, 29 June 2009 through 2 July 2009, pp. 1273.

Zakeri, J.A., Fattahi, M. & Ghanimoghadam, M.M. 2015, "Influence of unsupported and partially supported sleepers on dynamic responses of train–track interaction", *Journal of Mechanical Science and Technology,* vol. 29, no. 6, pp. 2289-2295.

Zetterberg, S. 2011, *Yhteisellä matkalla VR 150 vuotta,* Werner Söderström osakeyhtiö, Helsinki.

Zhao, C., Wang, P., Yi, Q. & Meng, D. 2015, "Application of polyurethane polymer and assistant rails to settling the abnormal vehicle-track dynamic effects in transition zone between ballastless and ballasted track", *Shock and Vibration,* vol. 2015.

Zhou, T., Hu, B., Sun, J. & Liu, Z. 2013, "Discrete element method simulation of railway ballast compactness during tamping process", *Open Electrical and Electronic Engineering Journal,* vol. 7, no. 1.

Zhu, J.Y., Thompson, D.J. & Jones, C.J.C. 2011, "On the effect of unsupported sleepers on the dynamic behaviour of a railway track", *Vehicle System Dynamics,* vol. 49, no. 9, pp. 1389-1408.

Raidesepelinäytteiden rakeisuuslukutulokset

Kohde 113	Puoli	Rakeisuusluku	P1+P8
112+660	VAS	13	1
112+770	VAS	9	1
112+850	VAS	10	1
112+920	OIK	8	1
112+990	OIK	19	2
113+060	VAS	16	2
113+129	OIK	11	2
113+197	OIK	7	1
113+265	VAS	17	2
113+502	OIK	23	3
Keskiarvo (Kaikki)		13	1
Keskiarvo (Kalliol.)		12	1
Keskiarvo (Ei Kalliol)		18	2

Kohde 151	Puoli	Rakeisuusluku	P1+P8
151+353	VAS	55	12
151+500	VAS	50	11
151+623	VAS	79	23
151+665	OIK	91	30
151+710	OIK	85	29
151+755	OIK	82	25
151+800	OIK	94	32
151+845	OIK	93	33
151+890	OIK	79	26
151+940	OIK	64	17
Keskiarvo (Kaikki)		77	24
Keskiarvo (Kalliol.)		83	27
Keskiarvo (Ei Kalliol)		53	11

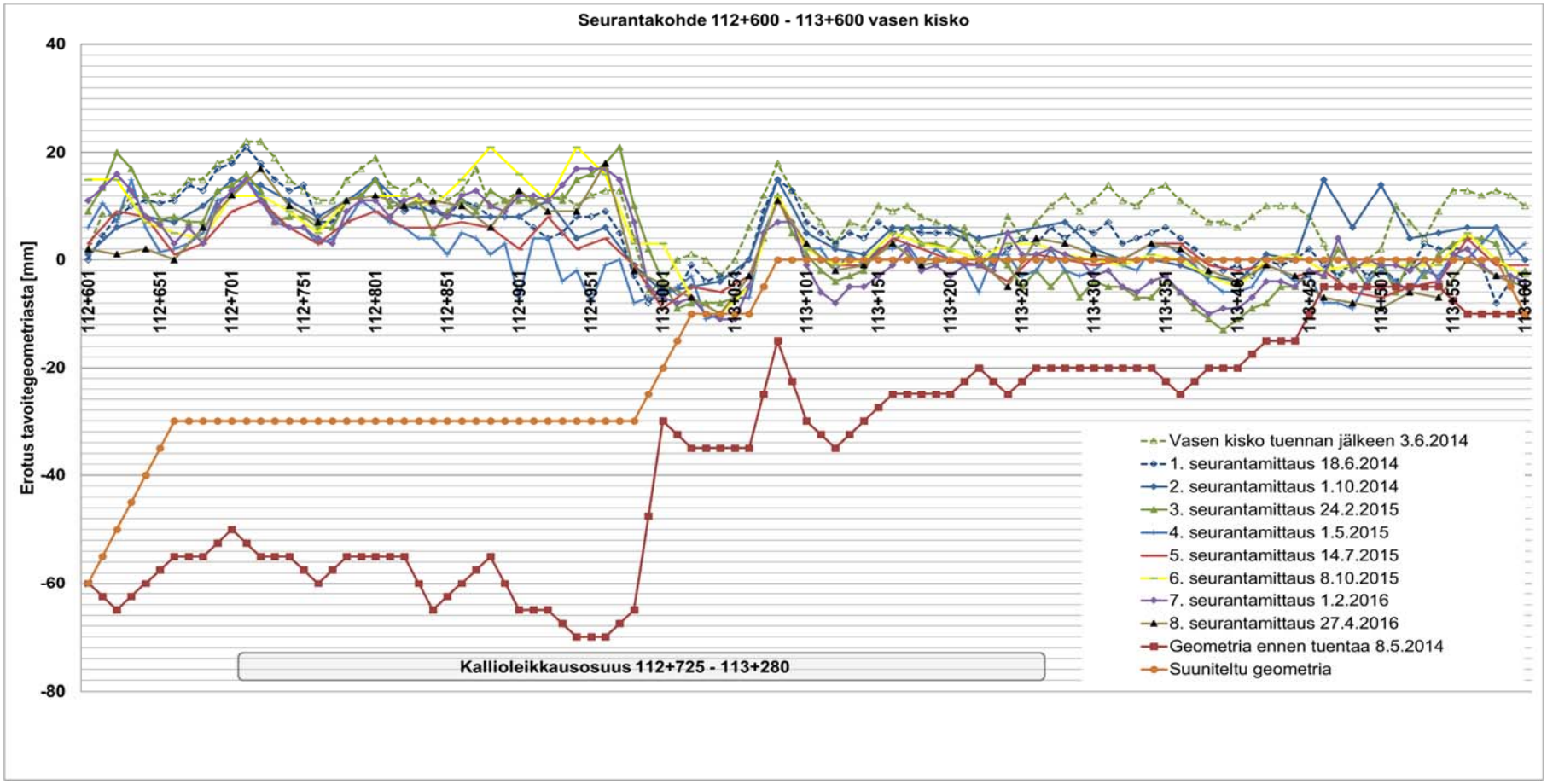
Kohde 158	Puoli	Rakeisuusluku	P1+P8
158+260	OIK	27	3
158+320	VAS	23	4
158+380	OIK	22	3
158+440	OIK	12	1
158+500	OIK	26	2
158+548	VAS	60	18
158+620	OIK	66	18
158+680	VAS	76	26
158+740	OIK	57	19
158+795	VAS	53	13
Keskiarvo (Kaikki)		42	11
Keskiarvo (Kalliol.)		22	3
Keskiarvo (Ei Kalliol)		62	19

Kohde 168	Puoli	Rakeisuusluku	P1+P8
168+070	OIK	23	2
168+110	OIK	18	2
168+150	OIK	25	2
168+190	OIK	15	1
168+237	OIK	20	1
168+270	OIK	14	1
168+310	OIK	21	2
168+350	OIK	11	1
168+470	OIK	13	1
168+600	OIK	22	1
Keskiarvo (Kaikki)		18	1
Keskiarvo (Kalliol.)		18	1
Keskiarvo (Ei Kalliol)		18	1

Kohde 187	Puoli	Rakeisuusluku	P1+P8
186+880	VAS	78	21
187+070	VAS	96	34
187+220	VAS	65	16
187+310	VAS	63	13
187+355	VAS	72	22
187+403	VAS	107	37
187+445	VAS	68	20
187+490	VAS	74	25
187+535	VAS	71	20
Keskiarvo (Kaikki)		77	23
Keskiarvo (Kalliol.)		74	22
Keskiarvo (Ei Kalliol)		87	27

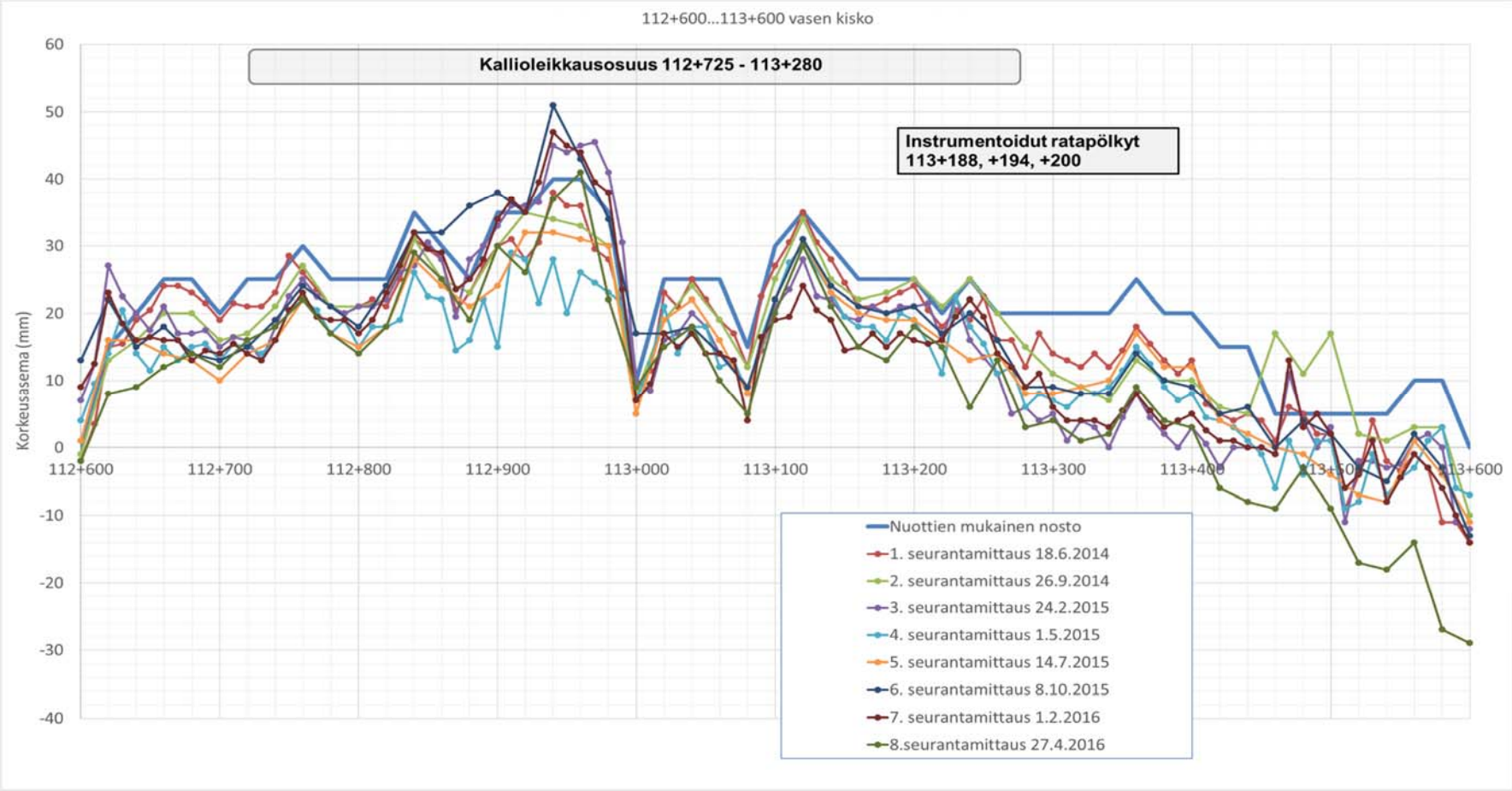
Kohde 190	Puoli	Rakeisuusluku	P1+P8
189+350	VAS	27	4
189+450	VAS	29	4
189+550	VAS	23	4
189+650	VAS	19	2
189+750	VAS	30	5
189+850	VAS	23	3
189+950	VAS	58	11
190+050	VAS	90	29
190+150	VAS	64	14
190+240	VAS	34	3
190+349	VAS	45	10
190+450	VAS	70	20
Keskiarvo (Kaikki)		43	9
Keskiarvo (Kalliol.)		25	4
Keskiarvo (Ei Kalliol)		60	15

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



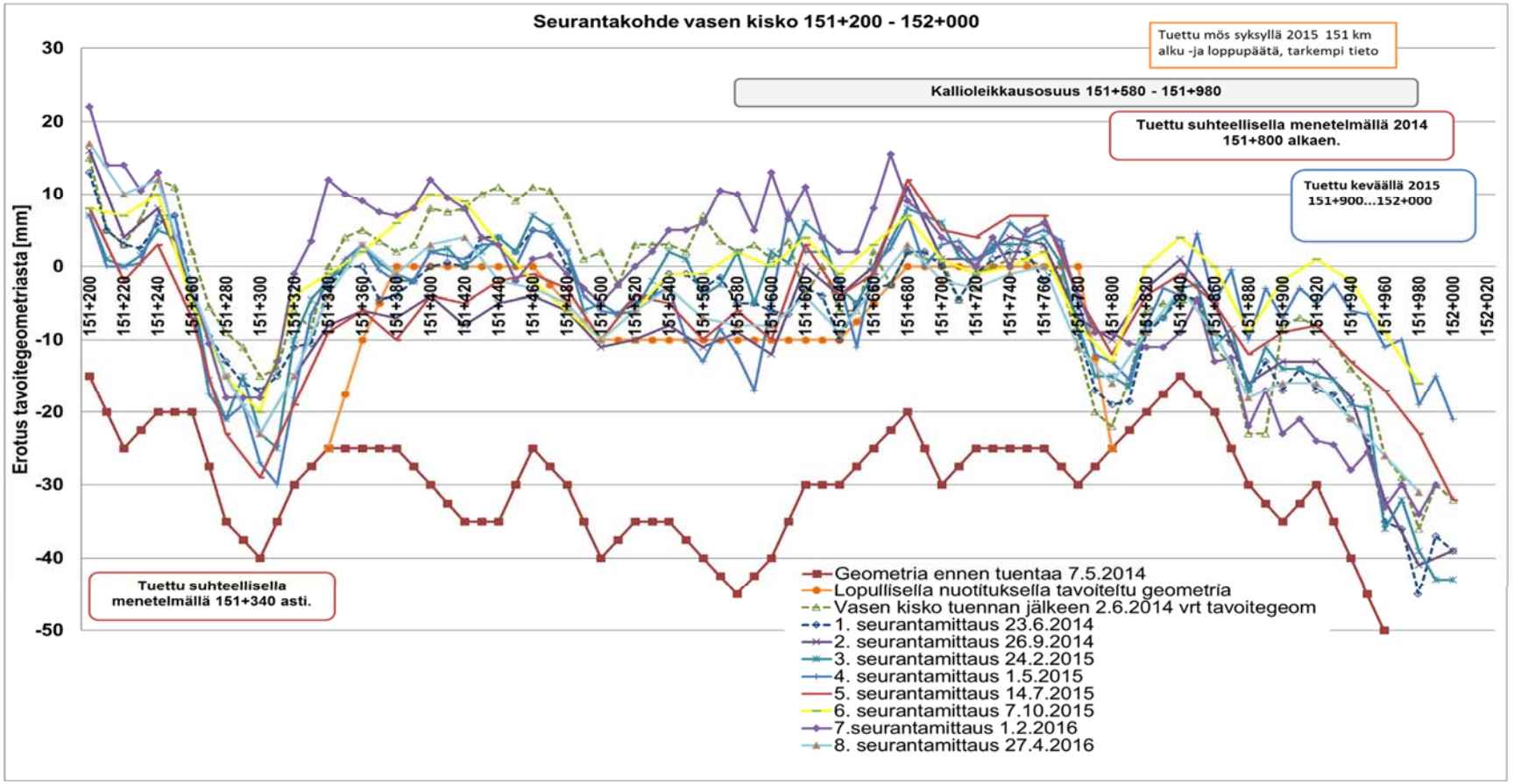
Seurantakohteen 113 takymetrimittauksten tulokset laskettuna erotuksena tavoitegeometriasta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



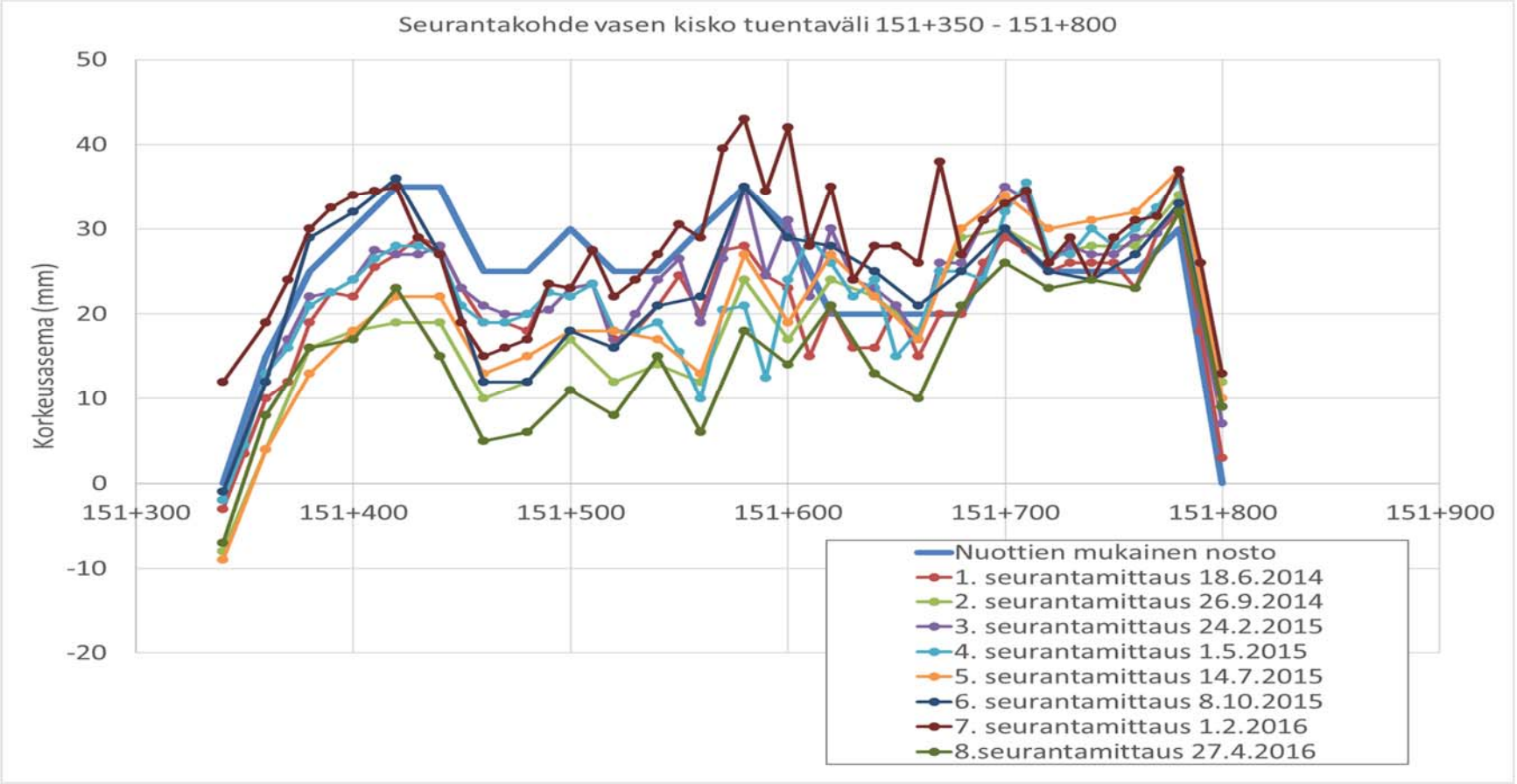
Seurantakohteen 113 takymetritulokset laskettuna erotuksena tukemista varten suunnitellusta nostosta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



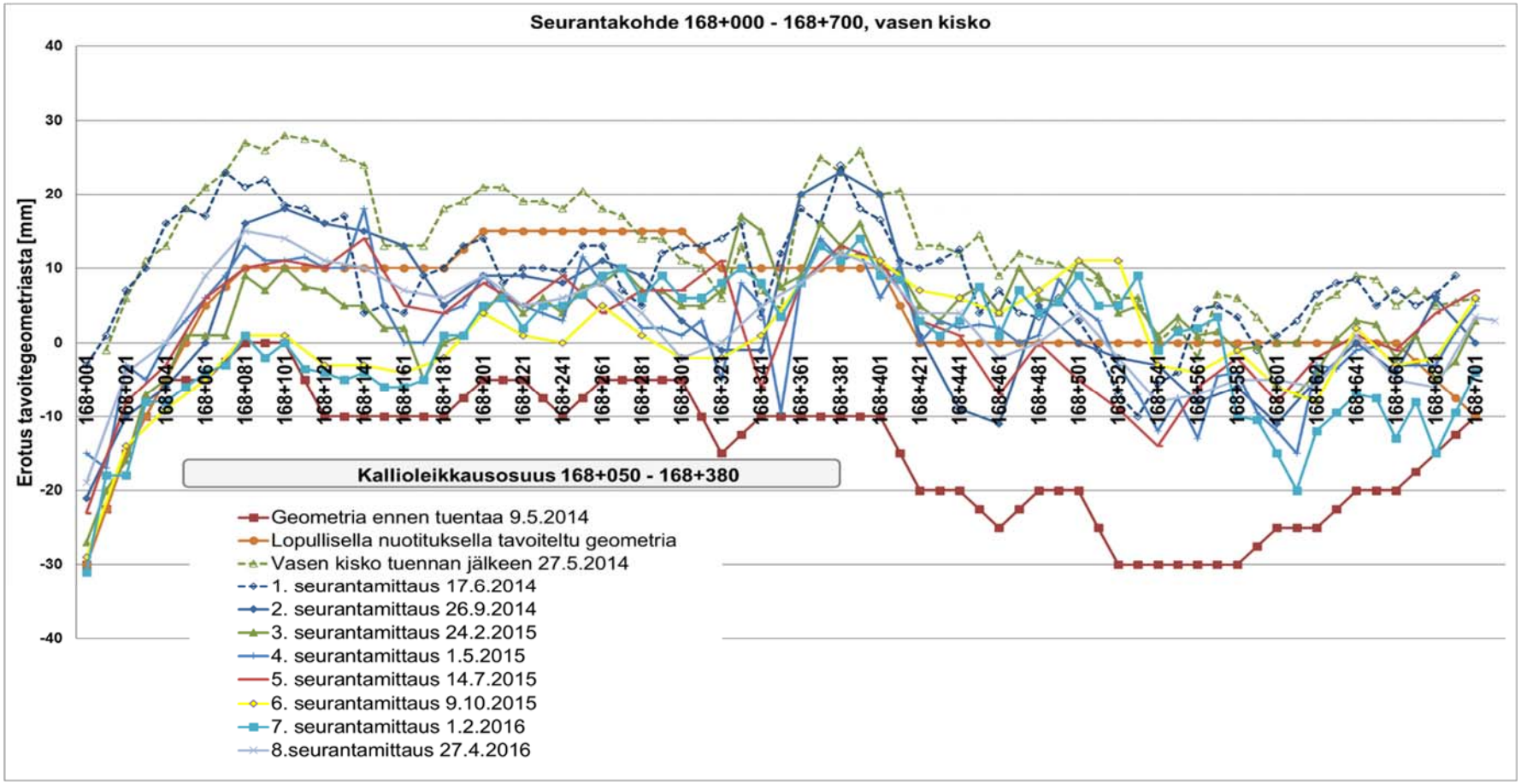
Seurantakohteen 151 takymetrimittauksten tulokset laskettuna erotuksena tavoitegeometriasta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



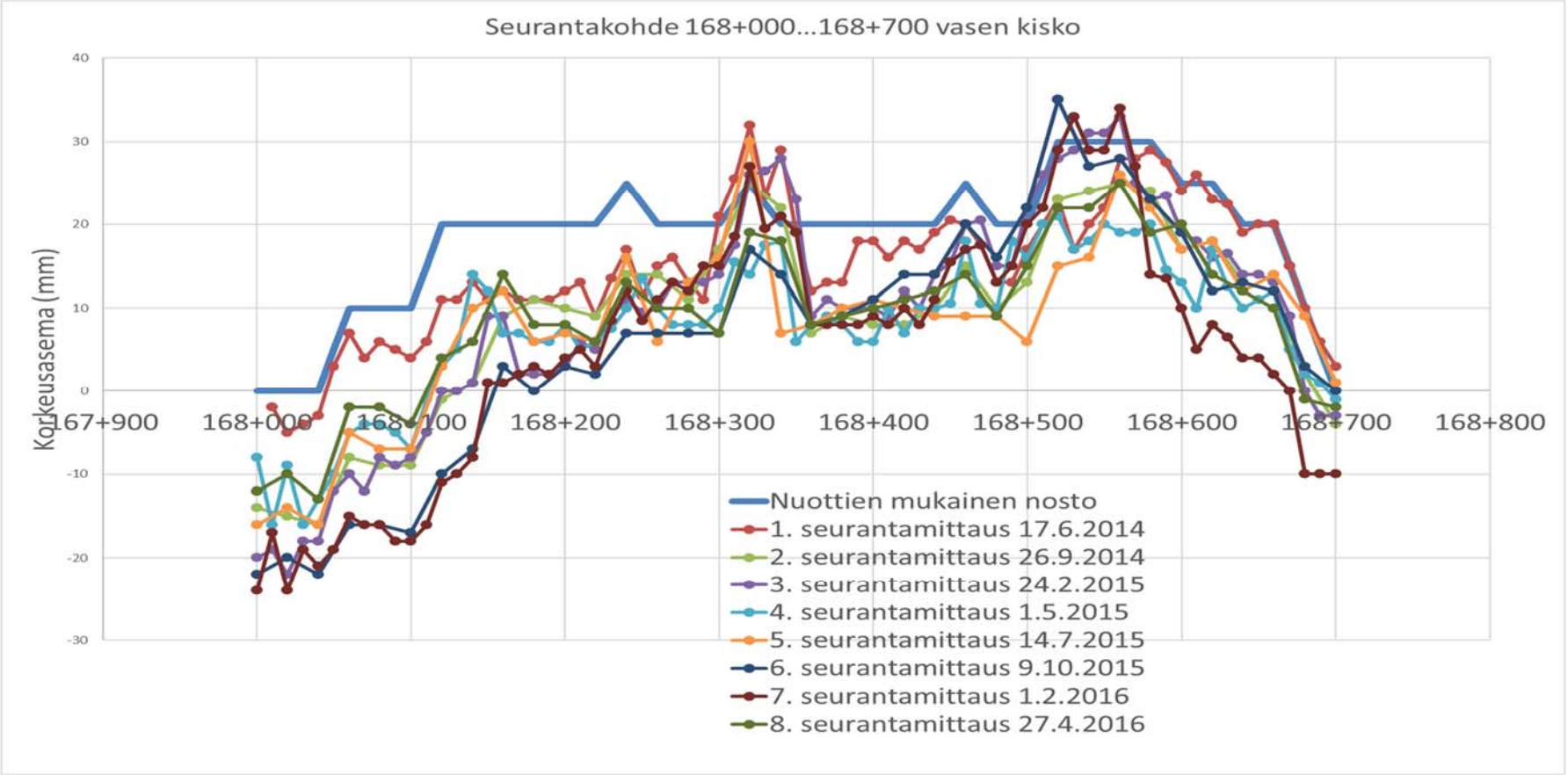
Seurantakohteen 151 takymetritulokset laskettuna erotuksena tukemista varten suunnitellusta nostosta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



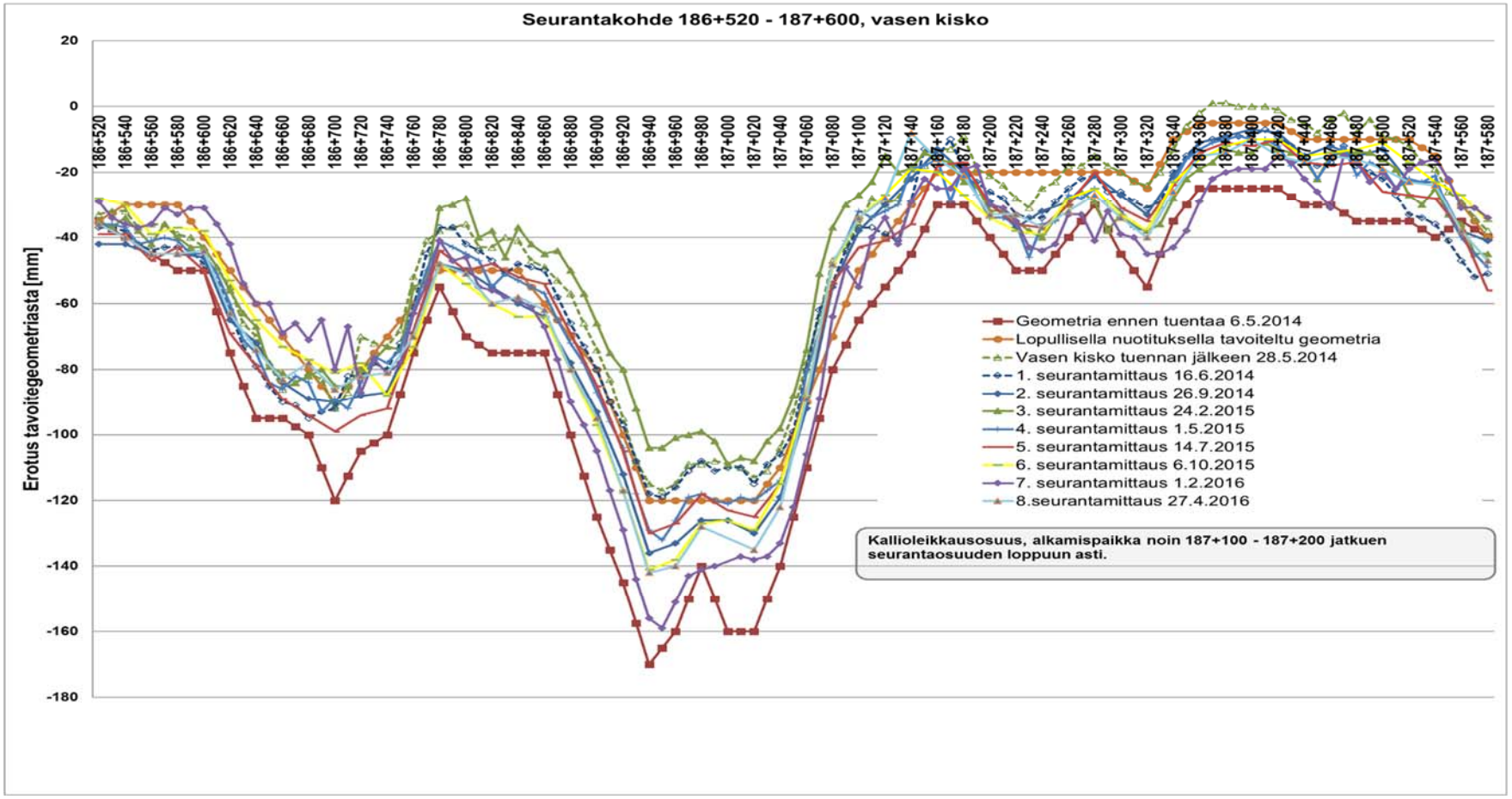
Seurantakohteen 168 takymetrimittauksten tulokset laskettuna erotuksena tavoitegeometriasta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



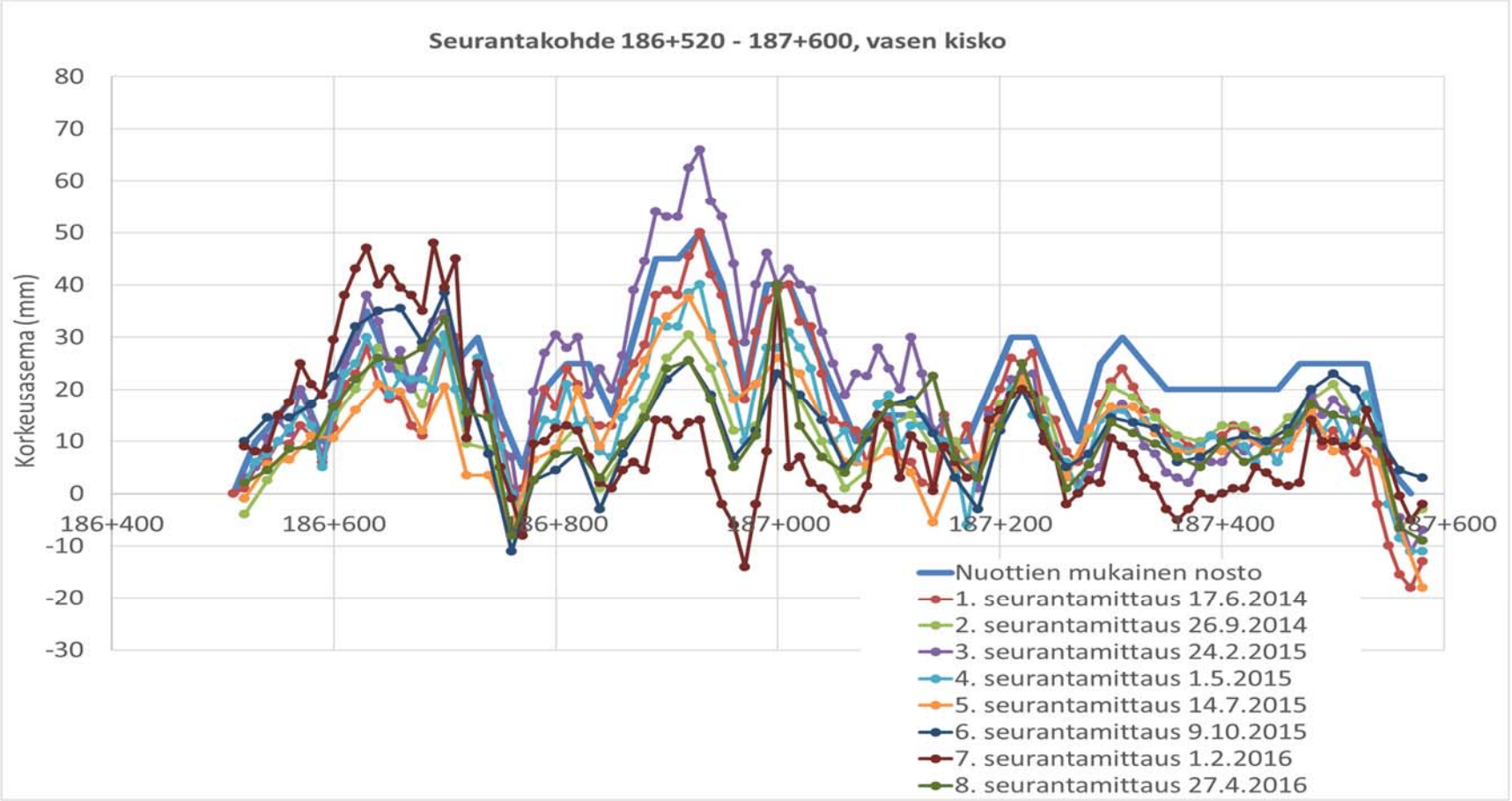
Seurantakohteen 168 takymetritulokset laskettuna erotuksena tukemista varten suunnitellusta nostosta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



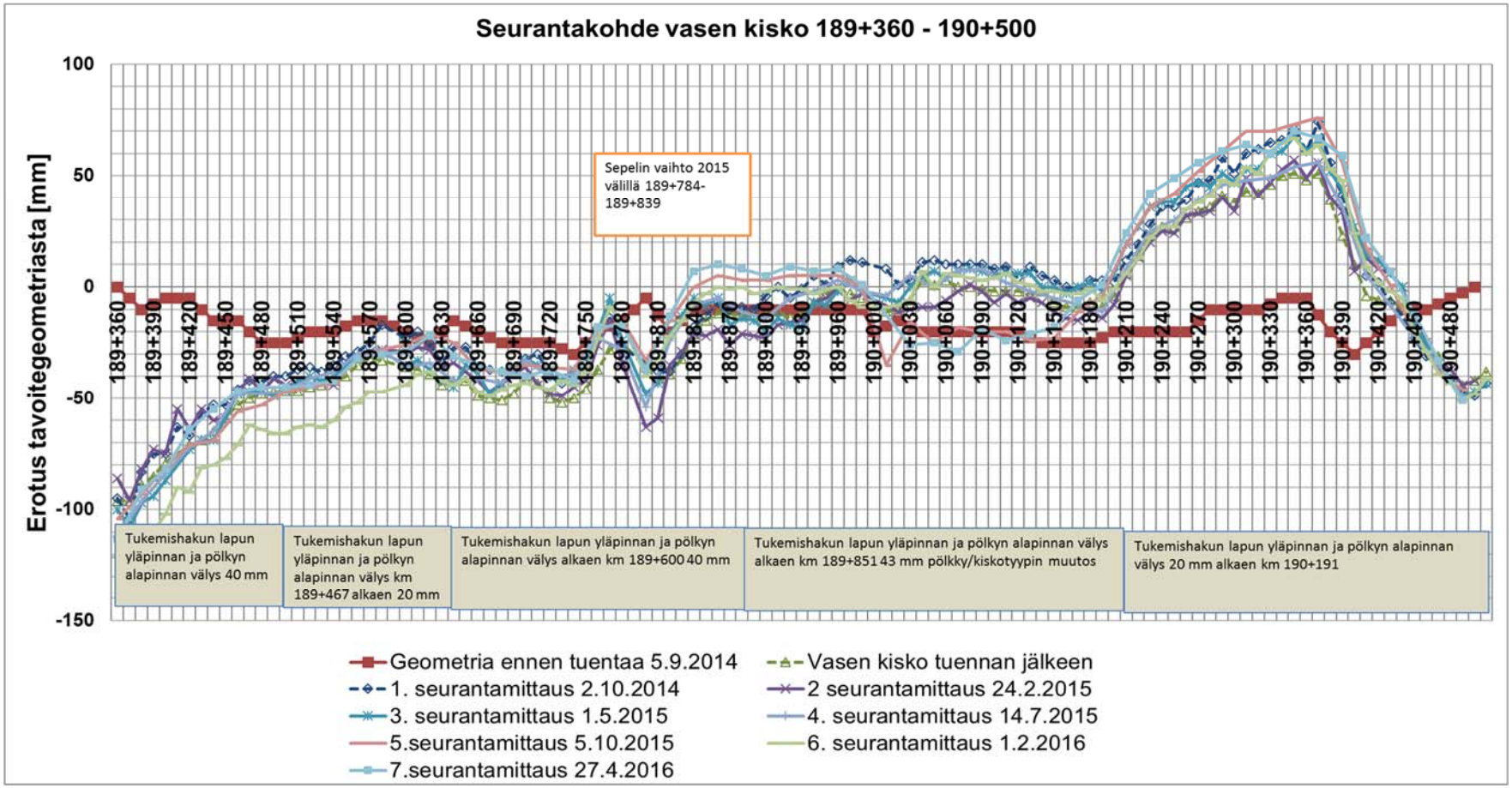
Seurantakohteen 187 takymetrimittauksten tulokset laskettuna erotuksena tavoitegeometriasta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



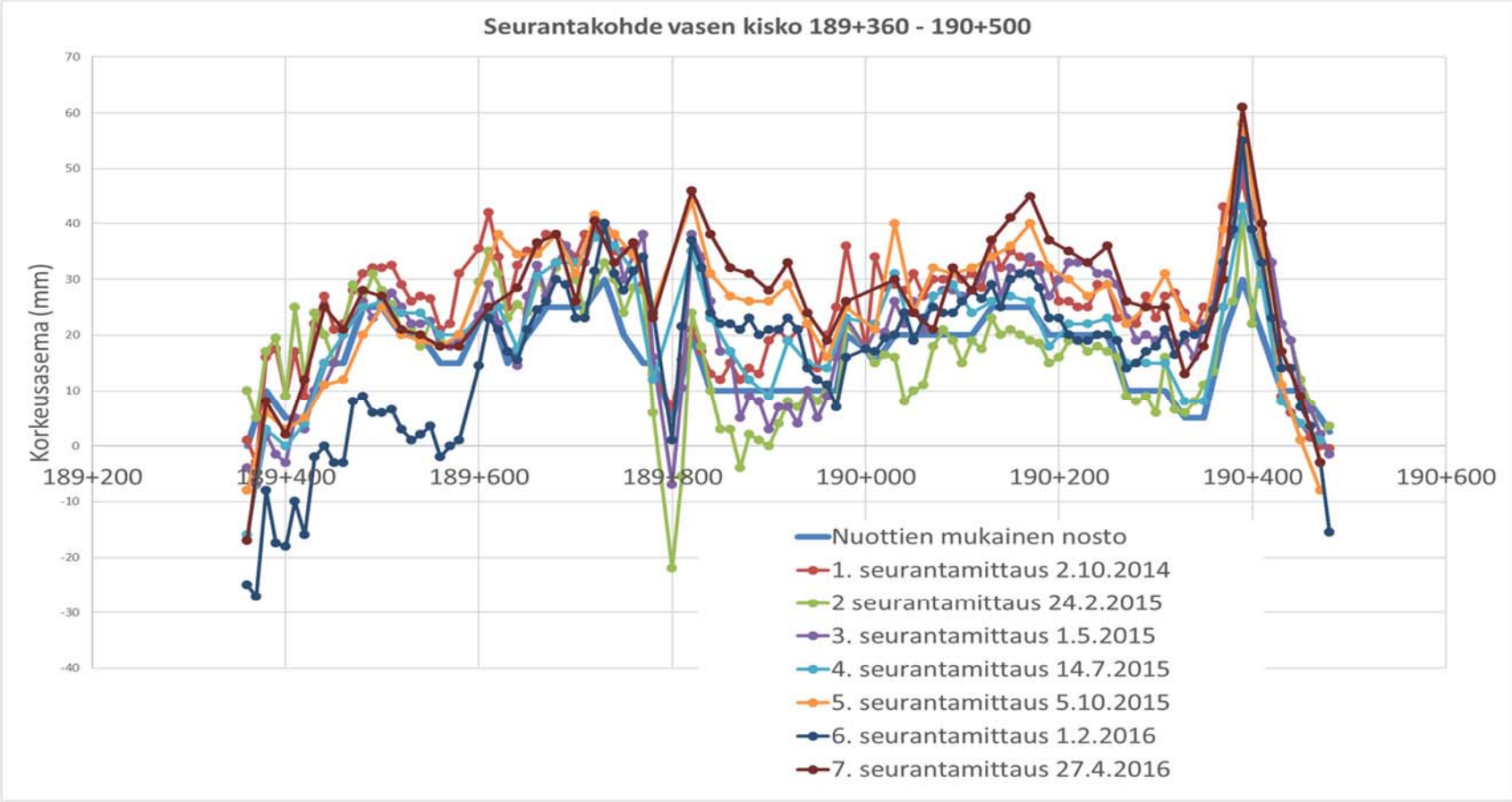
Seurantakohteen 187 takymetritulokset laskettuna erotuksena tukemista varten suunnitellusta nostosta.

Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



Seurantakohteen 190 takymetrimittauksten tulokset laskettuna erotuksena tavoitegeometriasta.

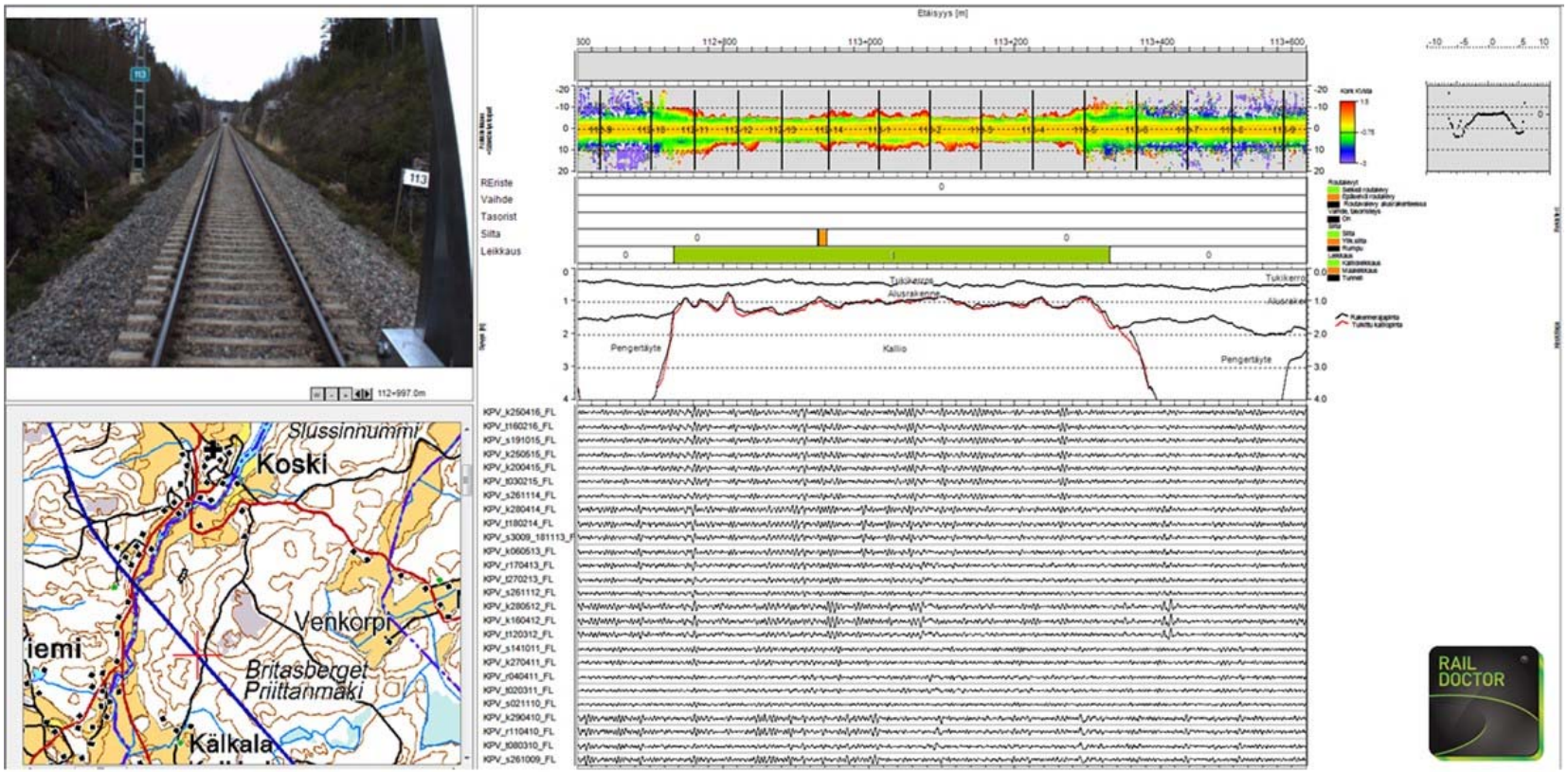
Jokaisen kohteen ensimmäisessä kaaviossa vasemman kiskon mittaustuloksia on verrattu tavoitegeometriaan ja toisessa saman kohteen kaaviossa on esitetty mittaustulokset suhteessa nuottien mukaiseen nostoon.



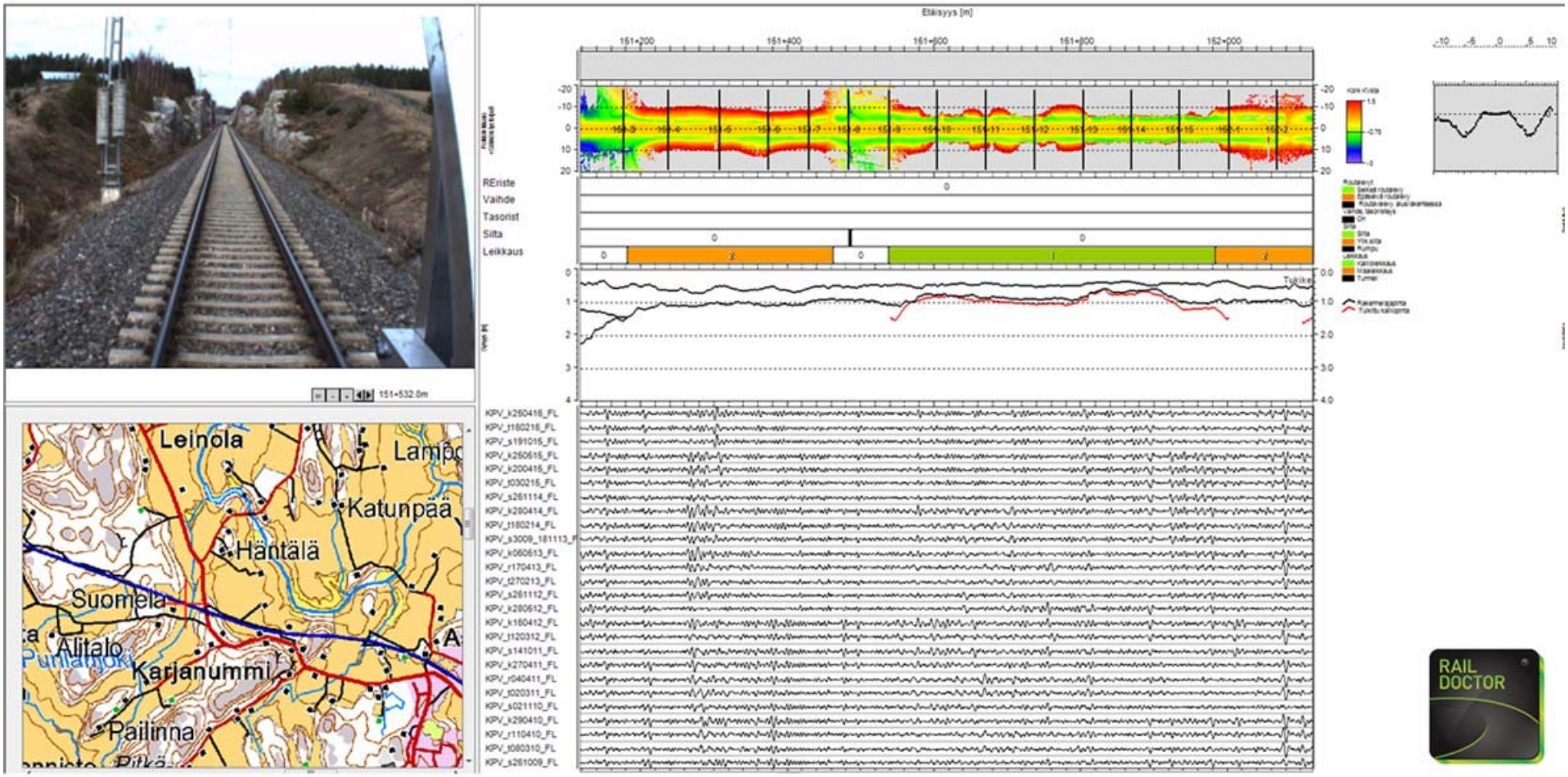
Seurantakohteen 190 takymetritulokset laskettuna erotuksena tukemista varten suunnitellusta nostosta.

Kuvien tiedot on koostanut Roadscanners Oy.

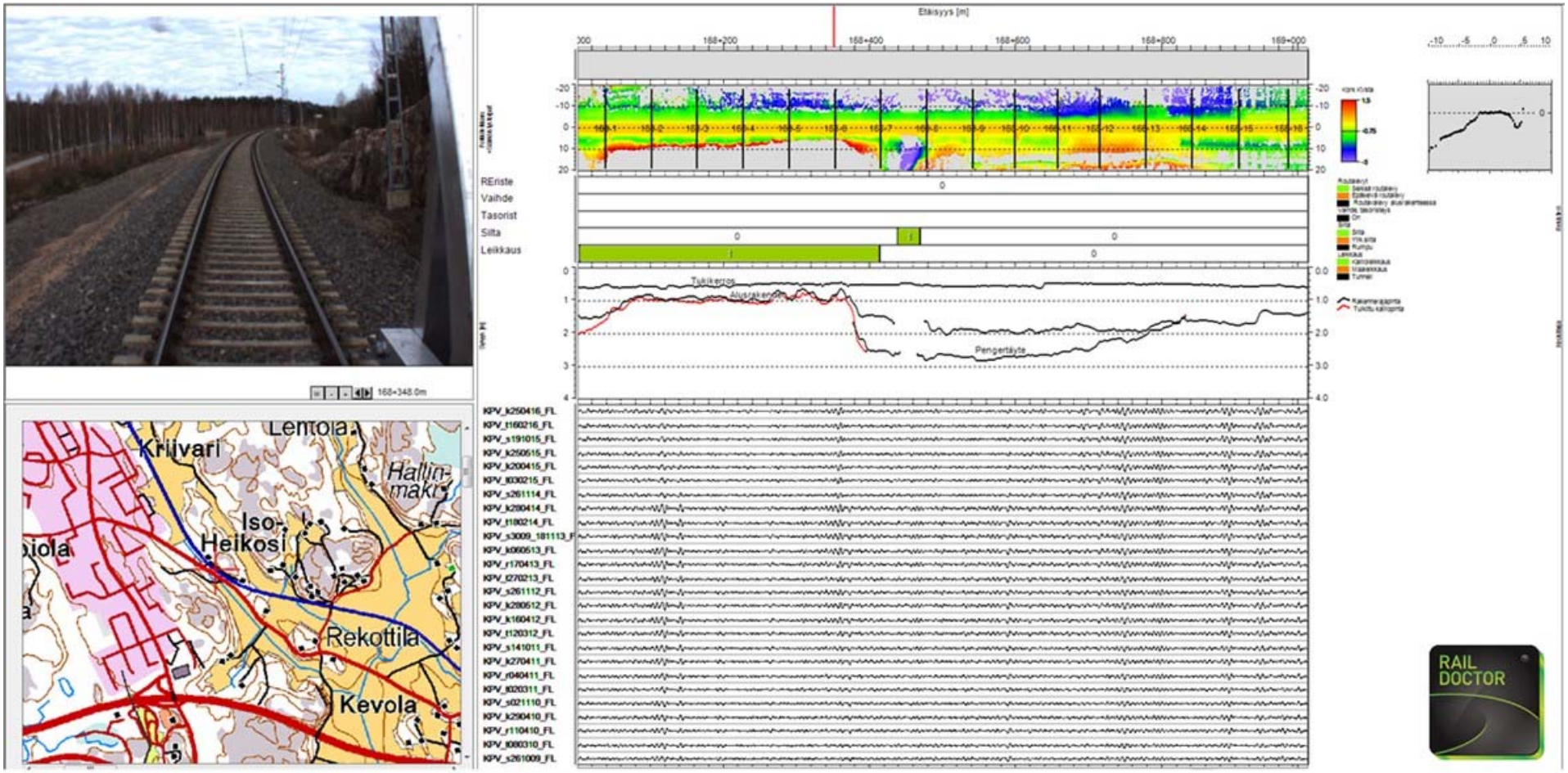
Rantarata km 112+600-113+600



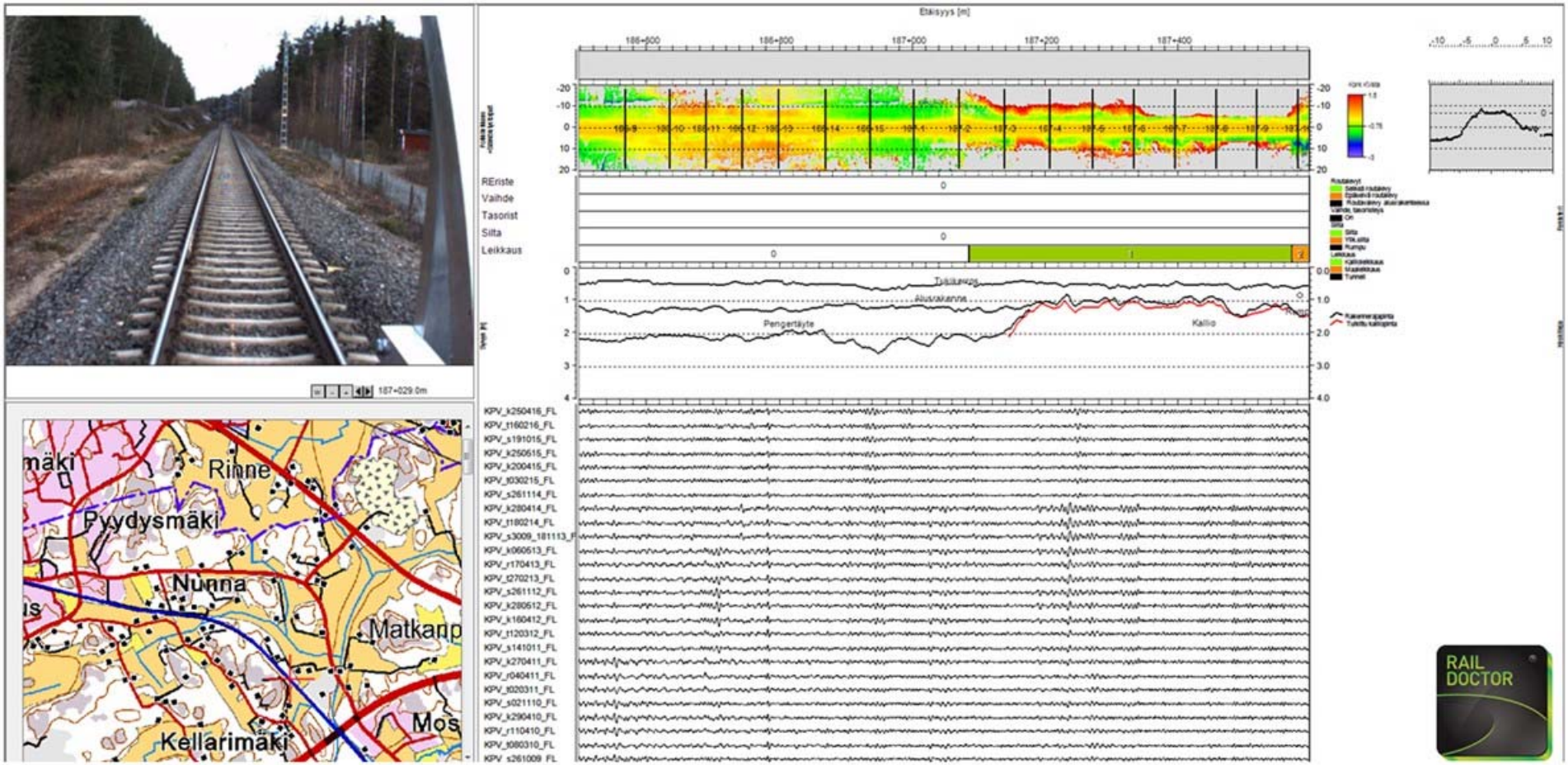
Rantarata km 151+100-152+100



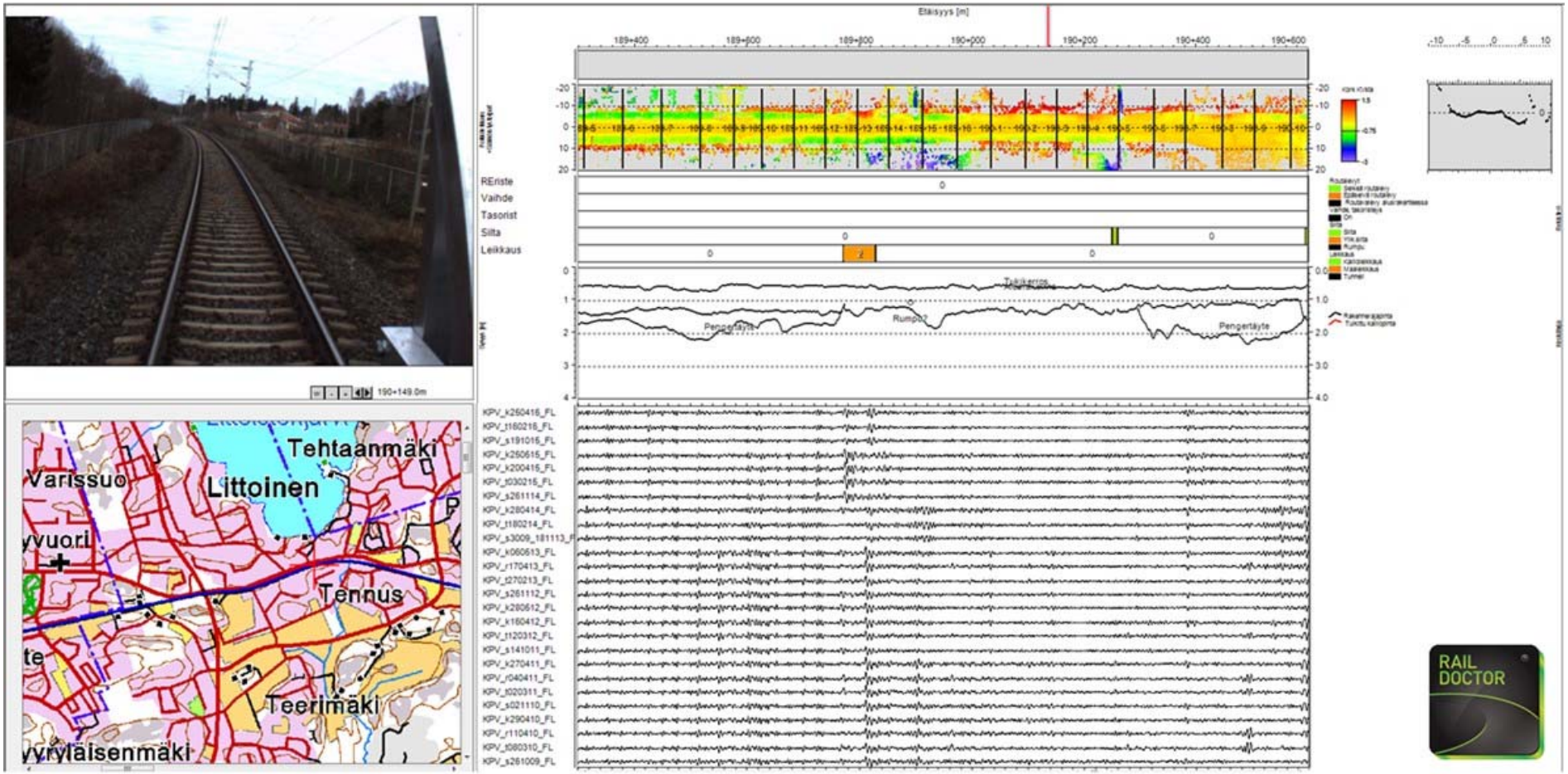
Rantarata km 168+000-169+000



Rantarata km 186+500-187+600



Rantarata km 189+300-190+600



ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-383-5
www.liikennevirasto.fi

Liikennevirasto