

OSSI PELTOKANGAS
HEIKKI LUOMALA
ANTTI NURMIKOLU

Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen



Ossi Peltokangas, Heikki Luomala, Antti Nurmikolu

Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen mittaaminen

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013

Liikennevirasto

Helsinki 2013

Kannen kuva: Ossi Peltokangas

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-244-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Ossi Peltokangas, Heikki Luomala, Antti Nurmikolu: Radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys ja sen mittaaminen. Liikennevirasto, rakennuttamisosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. 190 sivua ja 4 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-244-0.

Avainsanat: pystysuuntainen radan kokonaisjäykkyys, ratamoduuli, pistemäiset mittaussuunnitelmat, jatkuvat mittaussuunnitelmat

Tiivistelmä

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kirjallisuuslähteiden avulla selvittää millä suureilla radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä voidaan kuvata, miten kyseiset suuret määritetään, miten radan kokonaisjäykkyys muodostuu radan rakenneosien jäykkyyksien yhteisvaikutuksesta ja mitä kokonaisjäykkyys indikoi koko ratarakenteen tai sen yksittäisten osien toiminnasta ja kunnosta. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin maailmalla radan jäykkyyden mittaamiseen käytettyjä mittaussuunnitelmia. Jäykkyyden mittaussuunnitelmat voidaan jakaa pistemäisiin ja jatkuviin menetelmiin. Näistä pistemäiset menetelmät soveltuvat korkeintaan muutamien kymmenien peräkkäisten ratapölkkyjen mittausten rataosuuksien mittaamiseen, kun taas jatkuvilla menetelmillä mittauksia voidaan tehdä koko rataverkon laajuudessa.

Radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä voidaan kuvata radan jäykkyydellä (*track stiffness*) tai ratamoduulilla (*track modulus*). Radan jäykkyys määritetään kiskoa kuormittavan voiman ja kiskon taipuman suhteena, jolloin myös kiskon taiputusjäykkyys tulee huomioiduksi. Ratamoduuli määritetään Winklerin alustan kiskon taipumaa vastustavana voimana radan pituus-suuntaista millimetriä kohden, kun kisko taipuu yhden millimetrin. Ratamoduuli ottaa huomioon ainoastaan kiskon alapuoliset radan rakenneosat. Ehdottomasti merkittävin kokonaisjäykkyyteen vaikuttava yksittäinen tekijä on pohjamaa ja sen ominaisuudet. Kohtalaisen merkittävä vaikutus on joustavilla elementeillä, kuten välilevyllä ja mahdollisella pohjaimella sekä karkearakeisten maamateriaalien rakennekerrospaksuuksilla. Näistä radan komponenteista välilevyt ja pohjaimet vaikuttavat potentiaalisimmilta jäykkyyden modifioinnin näkökulmasta. Myös ratapölkkyjen tukeutumistilalla on huomattava merkitys laskennalliseen jäykkyyteen. Maailmalla radan jäykkyystieto on tunnustettu potentiaaliseksi radan kunnan indikaattoriksi sekä keinoksi ongelmakohteiden paikallistamiseen ja kunnossapitotoimenpiteiden tehon todentamiseen.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella maailmalta löydettiin toistakymmentä erilaista pistemäistä jäykkyyden mittaussuunnitelmaa. Tässä tutkimuksessa mitattiin pistemäisesti 15–20 peräkkäisen ratapölkyn palautuvia painumia kiihtyvyyden- ja siirtymäantureilla yhteensä 13 kohteessa eri puolilla rataverkkoa sekä syksyllä 2011 että talvella 2012. Mittaus tehtiin tyypillisesti ratapölkyn päästä ja kuormituksena toimi radalla aikataulujen mukaan liikkunut kalusto. Lisäksi testattiin videokamerakuvausta radan taipumien mittaamiseksi. Syksyn mittauksissa palautuvat painumat vaihtelivat välillä 0,3...6,6 mm ja talvella välillä 0,1...1,1 mm. Suurimmat palautuvat painumat mitattiin turvepehmeikkökohteissa ja pienimmät kallioleikkauskohteissa. Talvella ratarakenteen routaannuttua palautuvat painumat olivat siis merkittävästi syksyn painumia pienempiä. Mittaustuloksille määritettiin myös niitä vastaavat jäykkyyssarvot kahdella eri laskentamenetelmällä.

Jatkuvia jäykkyyden mittalaitteita ei ole maailmanlaajuisestikaan olemassa kovin montaa, eikä mikään niistä suoraan sovellu Suomen rataverkolla käytettäväksi erilaisen raidelevyyden takia. Jatkuvista mittaussuunnitelmista tehdyn kirjallisuustutkimuksen pohjalta rakennettiin pienimittakaavainen prototyyppi, jolla tehtiin onnistuneita koemittauksia laboratorio-olosuhteissa. Prototyyppistä ollaan rakentamassa täyden mittakaavan mittalaitetta.

Ossi Peltokangas, Heikki Luomala, Antti Nurmikolu: Banans totala vertikala styvhet och mätning av denna. Trafikverket, byggherreverksamhet. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 6/2013. 190 sidor och 4 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-244-0.

Sammanfattning

Målet med denna undersökning var att med hjälp av litteraturkällor utreda med vilka storheter banans totala vertikala styvhet kan beskrivas, hur dessa storheter definieras, hur banans totala styvhet uppkommer till följd av samverkan mellan konstruktionsdelarnas styvhet och vad den totala styvheten indikerar om funktionen och skicket i hela bankonstruktionen eller dess enskilda komponenter. Dessutom studerades mätmetoder som tillämpats på olika håll i världen för att mäta styvheten i banor. Metoderna för att mäta styvhet kan indelas i stillastående och kontinuerliga metoder. Av dessa lämpar sig de stillastående metoderna för mätning av banavsnitt på högst några tiotals efter varandra liggande syllar, medan mätningar med kontinuerliga metoder kan göras i hela bannätets omfattning.

Banans totala vertikala styvhet kan beskrivas genom banans styvhet (*track stiffness*) eller banmodul (*track modulus*). Banans styvhet definieras som förhållandet mellan den kraft som belastar rälsen och rälsens böjning, varvid även rälsens böjningsstyvhet tas i beaktande. Banmodul definieras som den kraft som motstår rälsens böjning på Winkler-underlag per längsgående millimeter i banan, då rälsen böjs en millimeter. Banmodulen beaktar endast strukturella komponenter under rälsen. Den absolut mest betydande enskilda faktorn som påverkar den totala styvheten är undergrunden och dess egenskaper. En måttligt betydande effekt har elastiska element, som dämpare och eventuella sliper-mattor, samt tjockleken i konstruktionslagren grovkorniga jordmaterial. Av dessa bankomponenter verkar dämpare och sliper-mattor vara de mest potentiella ur styvhetsmodifieringssynpunkt. Även syllarnas stöd har en betydande effekt på den kalkylmässiga styvheten. I världen har uppgifter om banans styvhet identifierats som en potentiell indikator för banans skick samt som en metod för att lokalisera problem och för att verifiera underhållsåtgärdernas effekt.

Utifrån litteraturundersökningen hittades över tio tillämpningar för stillastående mätning av styvhet. I denna undersökning mättes återhämtbara sättningar i 15–20 syllar med stillastående metod i sammanlagt 13 objekt på olika håll i bannätet på både hösten 2011 och vintern 2012. Mätningen gjordes typiskt från syllens ände och materielen som rördes på banan enligt tidtabell fungerade som belastning. Utöver detta testades inspelning med videokamera för att mäta böjningar i banan. Vid höstens mätningar varierade de återhämtbara sättningarna mellan 0,3 och 6,6 mm och på vintern mellan 0,1 och 1,1 mm. De största återhämtbara sättningarna mättes på ställen med svag undergrund med torv och de minsta sättningarna vid bergskärningar. På vintern, efter bankonstruktionens tjälning, var de återhämtbara sättningarna således avsevärt mindre än sättningarna på hösten. För mätresultaten fastställdes även motsvarande styvhetsvärden genom två olika beräkningsmetoder.

Det finns inte särskilt många mätanordningar för kontinuerlig styvhetsmätning i världen, och ingen av dem lämpar sig direkt för användning i Finlands bannät på grund av olika spårvidder. Utifrån litteraturundersökningen om kontinuerliga mätmetoder byggdes en småskalig prototyp med vilken lyckade provmätningar genomfördes i laboratorieförhållanden. En fullskalig mätanordning håller på att byggas utifrån prototypen.

Ossi Peltokangas, Heikki Luomala, Antti Nurmikolu: Vertical track stiffness and measurement techniques. Finnish Transport Agency, Construction Management. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 6/2013. 190 pages and 4 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-244-0.

Summary

The aim of this study was to perform a literature review on parameters that represent the vertical stiffness of a railway track and how those parameters can be determined. This study also considers the effect of single track component stiffnesses on the total track stiffness and the applicability of track stiffness as an indicator of track condition. In addition, this study includes a literature survey on both standstill and rolling measurement techniques used worldwide.

Vertical track stiffness can be defined in two ways: *track stiffness* and *track modulus*. Track stiffness is the ratio between applied load and rail deflection, whereas track modulus is defined as the applied force per unit length of rail per unit deflection. The difference between these is that track stiffness includes the effect of the rail bending stiffness. Track modulus represents only the remainder of the superstructure, without rail, and the substructure. Subgrade properties are the most important factors influencing track stiffness. Elastic track components, like rail pads and under sleeper pads, and the thickness of granular materials also have some effect on track stiffness. Under sleeper voids, if present, are also significant. Several researchers worldwide have claimed that track stiffness is an important parameter in the complex train-track interaction and that it can link track condition problems and their causes.

According to the literature survey, there are over a dozen different types of standstill measurement applications. In this study, the recoverable vertical displacements of 15 to 20 consecutive sleepers were measured with accelerometers and potentiometers at 13 test sites both in autumn 2011 and in winter 2012. The test sites were located throughout the Finnish railway network. Typically, the measurements were performed at the ends of the sleepers, and rolling stock was used to produce the loading. In addition, video camera recording was evaluated as an alternative approach for measuring track deflections. In autumn 2011 recoverable vertical displacements of sleeper ends between 0,3...6,6 mm were measured at the test sites. In winter, the frost had a remarkable effect on the railway embankment stiffness, as displacements decreased to between 0,1...1,1 mm. Track stiffness values based on measured displacements were also calculated with two different calculation methods.

There are only a few rolling measurement devices worldwide and because of the different gauge none of them can directly be used on Finnish railway network. Based on the findings in the literature survey, a small-scale prototype was constructed and successfully tested in laboratory conditions. The prototype will be developed towards full-scale dimensions and measurements on actual railway track.

Esipuhe

Tämä radan pystysuuntaista jäykkyyttä ja sen mittaamista käsittelevä tutkimus on tehty Liikenneviraston toimeksiannosta Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä osana Tutkimusohjelmaa Elinkaaritehokas RAta (TERA).

Tämän raportin ovat laatineet dipl.ins. Ossi Peltokangas ja dipl.ins. Heikki Luomala ja työtä on ohjannut tekn. tri Antti Nurmikolu Tampereen teknillisestä yliopistosta. Työn ohjaajina tilaajan puolelta toimivat Erkki Mäkelä Liikennevirastosta ja Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä.

Helsingissä helmikuussa 2013

Liikennevirasto
Rakennuttamisosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	10
2	RADAN KOKONAISJÄYKKYYDEN JA RAKENNEOSIEN VUOROVAIKUTUS	12
2.1	Radan jäykkyys käsitteenä.....	12
2.1.1	Ratamoduuli u ja radan kokonaisjäykkyys K	12
2.1.2	Staatinen ja dynaaminen jäykkyys	14
2.2	Radan rakenneosat kokonaisjäykkyyden muodostajina	15
2.2.1	Radan rakenneosat	15
2.2.2	Kisko	16
2.2.3	Kiskon kiinnitysosat	17
2.2.4	Ratapölkky	21
2.2.5	Ratapölkyn alapuolinen tyhjätila	22
2.2.6	Pohjain	23
2.2.7	Tukikerros.....	26
2.2.8	Tukikerroksen alusmatto	27
2.2.9	Väli- ja eristyskerros	29
2.2.10	Routalevy	32
2.2.11	Pohjamaa	35
2.2.12	Yhteenvedo radan rakenneosien vaikutuksesta radan jäykkyyteen	38
2.3	Radan epälineaarinen kuormituskäyttäytyminen	39
2.4	Kokonaisjäykkyys radan toiminnan indikaattorina.....	41
2.4.1	Radan kokonaisjäykkyyden suuruus.....	41
2.4.2	Radan pituussuunnassa vaihteleva kokonaisjäykkyys.....	48
2.4.3	Melu ja värinä	50
2.4.4	Yhteenvedo kokonaisjäykkyydestä radan toiminnassa	50
3	RADAN KOKONAISJÄYKKYYDEN HYÖDYNTÄMINEN JA MÄÄRITTÄMINEN	52
3.1	Radan jäykkyydiedon hyödyntäminen rasiustarkasteluissa.....	52
3.1.1	Palkki kimmoisalla alustalla.....	52
3.1.2	Useamman akselikuorman yhteisvaikutus.....	55
3.1.3	Kiskon ja ratapölkyn välinen voima.....	56
3.1.4	Fiktiivinen pölkky ja tehokas pinta-ala	57
3.1.5	Ratapölkyn ja tukikerroksen välinen jännitys.....	59
3.1.6	Raidealustaluku.....	59
3.1.7	Radan tietokonemallintamiseen perustuvat laskelmat.....	60
3.2	Radan jäykkyyden määritysmenetelmät	60
3.2.1	Taipumamuotoon perustuva testi	60
3.2.2	Yksittäisen pisteen tai akselin kuormitustesti.....	62
3.2.3	Moniakselikuormitustesti.....	63
3.2.4	Jäykkyyden määritysmenetelmien vertailu	64
4	RADAN JÄYKKYYDEN PISTEMÄISET MITTAUSMENETELMÄT	67
4.1	Pudotuspainolaite	67
4.2	Mittausvaunut	72
4.3	Lasersovellukset	76
4.3.1	Lasersäteen sijainnin mittaamiseen perustuvat menetelmät.....	76
4.3.2	Lasersäteen heijastumiseen perustuvat menetelmät.....	79
4.4	Geofonit.....	83
4.5	Kiihtyvyyssanturit	88

4.6	Siirtymäanturit	91
4.7	Kamerasovellukset	94
4.8	Iskuvasaratesti	97
4.9	Yhteenveto pistemäisistä mittausmenetelmistä	98
5	JATKUVAT MITTAUSMENETELMÄT	99
5.1	Radantarkastusvaunut.....	99
5.1.1	Korkeuspoikkeaman mittaaminen radantarkastuksessa	99
5.1.2	Radantarkastustulosten hyödyntäminen jäykkyystarkasteluissa	102
5.2	Oskilloivaan massaan perustuvat menetelmät	103
5.2.1	RSMV	103
5.2.2	Portancemetre.....	105
5.3	Geometrian mittaamiseen perustuvat menetelmät	106
5.3.1	Track Loading Vehicle (TLV)	106
5.3.2	CARS	107
5.3.3	UNL	108
5.3.4	SKMT	109
5.3.5	SBB	110
5.3.6	Kiihtyvyyssantureihin perustuva mittaus	110
5.3.7	HSD	111
5.4	Prototyypit	112
6	KOEMITTAUSKOhteET JA MITTAUSJÄRJESTELYT	117
6.1	Koemittauskohteet ja mittausajankohdat.....	117
6.2	Koemittauksiin valitut mittausmenetelmät.....	118
6.2.1	Kiihtyvyyssanturit	118
6.2.2	Siirtymäanturit.....	121
6.2.3	Videokamerakuvaus.....	122
6.3	Mäntsälä–Sipilä.....	123
6.4	Kesälahti – Puhos	125
6.5	Varkaus – Heinävesi	127
6.6	Airaksela–Kurkimäki	129
6.7	Kangas–Oulainen.....	131
6.8	Liminka–Kempele	133
6.9	Kivesjärvi–Paltamo	135
6.10	Viiiala–Mattila.....	136
6.11	Suoniemi–Karkku.....	139
6.12	Vihanti–Tuomioja	140
6.13	Hirvineva–Liminka	143
6.14	Koemittauskohteiden ja -järjestelyiden yhteenveto	146
7	KOEMITTAUSTULOKSET	147
7.1	Mäntsälä–Sipilä.....	147
7.2	Kesälahti–Puhos	149
7.3	Varkaus–Heinävesi	150
7.4	Airaksela–Kurkimäki	152
7.5	Kangas–Oulainen.....	153
7.6	Liminka–Kempele	154
7.7	Kivesjärvi–Paltamo	156
7.8	Viiiala–Mattila.....	157
7.9	Suoniemi–Karkku.....	159
7.10	Vihanti–Tuomioja	160

7.11	Hirvineva–Liminka.....	163
7.12	Koemittaustulosten yhteenveto.....	165
7.13	Videokamerakuvaus radan taipumatarkasteluissa	166
8	JÄYKKYYDEN LASKEMINEN KOEMITTAUSTULOKSISTA	167
8.1	Kuormitusten suuruus koemittauksissa.....	167
8.2	Laskentamenetelmät	168
	8.2.1 Yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys.....	168
	8.2.2 Ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuva ratamoduuli	169
8.3	Jäykkyys- ja ratamoduulitulokset.....	170
	8.3.1 Yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet.....	170
	8.3.2 Ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit ..	171
8.4	Tulosten analysointi	173
9	PÄÄTELMÄT	179
9.1	Radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys	179
9.2	Koemittausmenetelmät ja -tulokset	180
9.3	Jatkotutkimus.....	181

LIITTEET

Liite 1	Koemittauskohteissa 1-4 ja 6-9 tehtyjen maatutkaluotausten raken- netulkinnat 11/2011 (Roadscanners Oy). 4 sivua.
Liite 2	Koemittauskohteiden ominaisuuksien yhteenvetotaulukko. 1 sivu.
Liite 3	Yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyysprofiilit koemittaus- kohteittain. 6 sivua.
Liite 4	Eri kalustotyyppien aiheuttamat ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat ja painumia vastaavat yksittäisestä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet sekä keskimääräisen yksittäisistä ratapölkkyistä mi- tatun radan jäykkyyden ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvan ratamoduulin välinen korrelaatio talven 2012 mittaustu- lostien perusteella kohteissa 1-9. 1 sivu.

1 Johdanto

Radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys muodostuu radan yksittäisten rakenneosien jäykkyyksistä. Alhaisen kokonaisjäykkyyden omaavalla radalla liikkuva kalusto aiheuttaa radassa huomattavan suuren taipuman, jonka myötä kasvavat taivutusrasitukset voivat ilmetä esimerkiksi korostuneena kiskon väsymisenä tai voimakkaana raideseppelin jauhaantumisenä. Toisaalta hyvin jäykällä radalla kaluston aiheuttamat kuormitukset saattavat välittyä vain muutaman kuormituskohdan lähellä sijaitsevan ratapölkyn kautta, mikä johtaa kyseisten ratapölkkyjen kohdilla suuriin jännitustasoihin tukikerroksessa ja ratapölkkyssä kiskon tukipinnalla. Kokonaisjäykkyyden äkillinen vaihtelu radan pituussuunnassa voi johtaa radan geometrian heikkenemiseen sekä suuriin dynaamisiin pystysuuntaisiin kuormituksiin.

Maailmalla radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä on varsinkin viimeisten vuosikymmenten aikana tutkittu kohtuullisen paljon, sillä kokonaisjäykkyys on nähty potentiaalisena parametrina radan kunnan ja rakenneosien rasitusten arvioimisessa sekä kunnossapidon toimenpiteitä ohjaavana työkaluna. Jotta olemassa olevan rataverkoston jäykkyyttä voitaisiin arvioida, pitäisi radan kokonaisjäykkyyttä pystyä mittaamaan ja maailmalla onkin kehitetty sekä lukuisia pistemäisiä että joitain radalla kaluston mukana liikkuvia jatkuvasti mittaavia sovelluksia.

Suomessa radan kokonaisjäykkyyttä ei nykyisellään juuri ole otettu huomioon radan suunnittelussa, mutta pitkällä aikavälillä tavoitteena olisi mitoittaa rata roudan ohella myös kuormituskestävyyden suhteen. Tällä hetkellä kokonaisjäykkyyden mittaamenetelmiä ei ole Suomessa yleisesti käytössä eikä jäykkyyttä käytännössä mitata lainkaan. Kuitenkin esimerkiksi radan kokonaisjäykkyyden muutoskohtiin, kuten sillan päätyihin sekä keväisin kantavuusongelmista kärsiviin kohteisiin liittyvien jäykkystarkastelujen vaikeus on ollut usein esillä sopivan mittaamenetelmän puuttessa. Yleisemmällä tasolla kyseinen ongelma tulee vastaan Euroopan laajuisen tavanomaisen rautatiejärjestelmän infrastruktuuriosaa koskevan yhteentoimivuuden tekni- sen eritelmän [1] mukaisessa YTE-ratatyypin arvioinnissa, jossa radan jäykkyys ja sen määrittely on jätetty avoimeksi ja siten kansallisesti käsiteltäväksi kokonaisuudeksi.

Suomessa ensimmäinen askel radan kokonaisjäykkyyden huomioimisessa radan suunnittelussa on otettu TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön ratapenkereen leveyteen ja luiskakaltevuuteen liittyvän tutkimuksen myötä, minkä tuloksena pengerveveys suositellaan määritettäväksi radan jäykkyyden perusteella.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on aiheeseen liittyvän teorian lisäksi selvittää kirjallisuuslähteiden ja koemittausten perusteella, mitä vaihtoehtoja radan kokonaisjäykkyyden pistemäiseen ja jatkuvaan mittaamiseen on olemassa ja mitkä menetelmistä soveltuvat parhaiten käytettäväksi Suomessa. Tutkimuksessa selvitetään, miten jäykkyys olemassa olevissa eri mittaussovelluksissa määritetään ja mitä suuretta tulisi mitata. Lisäksi tarkastellaan myös alun perin muihin tarkoituksiin kehitettyjen mittaamenetelmien sovellettavuutta radan jäykkyyden mittaamiseen. Lupaavimmiksi nähdyllä pistemäisillä mittaamenetelmillä tehdään koemittauksia ominaisuuksiltaan erilaisissa koemittauskohteissa rataverkon eri osissa.

Tässä tutkimuksessa keskitytään jäykkyystudkimukseen rataverkon linjaosuuksilla eli tyypillisten jäykkyyden epäjatkuvuuskohtien, kuten vaihteiden ja siltojen, sekä harvinaisempien ratarakenneratkaisuiden, kuten kiintoraiteen, jäykkyydestarkastelut jäte-

tään tässä tutkimuksessa enintään maininnan tasolle. Lisäksi, vaikka joissain olosuhteissa radan sivuttais- tai pituussuuntainen jäykkyys saattaa muodostua ongelmaksi, tämän tutkimuksen puitteissa pitäydytään pystysuuntaisen jäykkyyden tutkimuksessa.

Tutkimuksen kirjallisuusselvitysosuuden luvussa 2 esitellään ensin radan pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät peruskäsitteet, minkä jälkeen paneudutaan radan rakennesien ja kokonaisjäykkyyden vuorovaikutukseen. Erityisesti tarkastelussa pyritään tunnistamaan radan pystysuuntaisen kokonaisjäykkyyden muodostumisen kannalta merkittävimmät rakennesosat sekä arvioimaan radan jäykkyystiedon käytettävyyttä radan toiminnan indikaattorina. Luvussa 3 käsitellään BOEF-mallin kautta jäykkyystiedon hyödyntämistä radan rasitustarkasteluissa sekä esitellään radan jäykkyyssuureiden laskennallista määrittämistä. Luvussa 4 esitellään kattavasti maailmalla jäykkyyden mittaamiseen käytettyjä pistemäisiä mittaussovelluksia sekä arvioidaan niiden käytettävyyttä Suomessa. Luvussa 5 esitellään maailmalla käytettyjä jatkuvia jäykkyyden mittauslaitteita sekä niiden perusteella tehtyjen havaintojen pohjalta TTY:llä kehitetty jatkuvan mittalaitteen pienimittakaavainen prototyyppi.

Kokeellisen osuuden aluksi luvussa 6 esitellään koemittauksiin valitut pistemäiset mittausten menetelmät ja koemittauskohteiden ominaisuudet sekä koemittausjärjestelyt yksityiskohtaisesti kohde kerrallaan. Koemittauksen tavoitteena on selvittää vallitseva jäykkyytaso Suomen rataverkon ominaisuuksiltaan erilaisissa osissa. Lisäksi teemmällä mittauksia sekä sulan maan aikana että talvella voidaan arvioida ratarakenteen routaantumisen vaikutuksia radan pystysuuntaiseen kokonaisjäykkyyteen. Luku 7 koostuu koemittauksien esittelystä kohteittain. Luvussa 8 määritetään koemittauksien perusteella laskennalliset jäykkyyssarvot. Määritettyjä jäykkyyssarvoja sekä koemittauskohteiden ominaisuuksia vertailemalla pyritään selvittämään millaista tietoa radan kunnosta tai ominaisuuksista jäykkyyksmittauksilla on mahdollista saavuttaa.

2 Radan kokonaisjäykkyyden ja rakenneosien vuorovaikutus

Tämän luvun aluksi esitellään radan kokonaisjäykkyyteen liittyviä käsitteitä, jotta lukijan on helpompi ymmärtää myöhemmin luvussa esiteltyjä asioita. Radan jäykkyyden määrittämistä laskennallisesti käsitellään tarkemmin luvussa 3. Jäykkyyksikäsitteiden jälkeen esitellään radan rakenneosat, joiden merkitystä radan pystysuuntaisen kokonaisjäykkyyden muodostumisessa tarkastellaan rakenneosa kerrallaan. Käsitteilyssä pyritään erityisesti tunnistamaan jäykkyyden kannalta kriittisimmät rakenneosat. Luvun loppupuolella esitellään radan kuormituskäyttäytymisen ominaispiirteitä sekä tarkastellaan kokonaisjäykkyyden merkitystä radan toiminnassa ja radan rakenneosien kunnon sekä kulumisen indikaattorina.

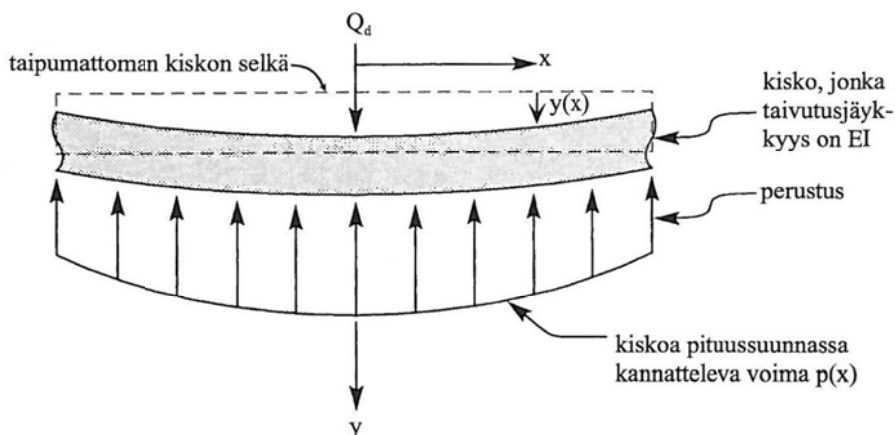
2.1 Radan jäykkyys käsitteenä

Kuten jo johdannossa mainittiin, tämän tutkimuksen puitteissa pitäydytään radan pystysuuntaisen jäykkyyden käsittelyssä eli radan sivuttais- ja pituussuuntaisen jäykkyyden käsittely on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle.

2.1.1 Ratamoduuli u ja radan kokonaisjäykkyys K

Radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä käsittelevässä kirjallisuudessa esiintyy usein termi *track modulus*, josta tässä tutkimuksessa käytetään suomenkielistä nimitystä ratamoduuli ja ratamoduulista symbolia u . Ratamoduuli voidaan määrittää Winklerin alustan kiskon liikettä vastustavaksi voimaksi radan pituussuuntaista millimetriä kohden, kun kisko taipuu yhden millimetrin [2].

Winklerin alustaa käytetään klassisessa BOEF-mallissa (*Beam On Elastic Foundation*), joka perustuu jatkuvan Euler-Bernoullin palkin mallintamiseen Winklerin alustalla. Hieman yksinkertaistettuna malli perustuu kiskon kuvaamiseen Euler-Bernoullin palkkina ja kiskon alapuolisen rakenteen kuvaamiseen äärettömän pitkänä jonona kimmoisia, toisiinsa kytkemättömiä jousia. BOEF-mallia käsitellään tarkemmin luvussa 3.1. Kuvassa 2.1 on esitetty periaatekuva BOEF-mallista. Kuvassa termi Q_d kuvaa junan pyörän aiheuttamaa pystysuuntaista kuormitusta.



Kuva 2.1. BOEF-malli. [2]

Winklerin alustaa kuvaava yhtälö voidaan johtaa yhtälön 2.1 muotoon. [3]

$$u = -\frac{p(x)}{y(x)} \quad (2.1)$$

missä

u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
$p(x)$	on kiskoa kannatteleva viivakuorma kohdassa x [N/mm]
x	on kiskon suuntainen pituuskoordinaatti [mm]
$y(x)$	on kiskon pystysuuntainen taipuma kohdassa x [mm]

Miinusmerkki yhtälöön 2.1 tulee siitä, että $p(x)$ on vastakkaisuuntainen kuin y -akseli, joka on tässä tapauksessa positiivinen alaspäin.

Junan pyöräkuorman ja sen alaisen kiskon pystysuuntaisen siirtymän eli taipuman suhdetta nimitetään radan pystysuuntaiseksi jäykkyydeksi (*track stiffness, global vertical track stiffness*), josta käytetään tässä raportissa symbolia K . Jäykkyys voidaan ilmaista yhtälönä: [2]

$$K = \frac{Q}{y_{\max}} \quad (2.2)$$

missä

K	on radan (pystysuuntainen) jäykkyys [N/mm]
Q	on pyöräkuorma [N]
y_{\max}	on kiskon maksimitaipuma suoraan pyörän alla [mm]

Yhtälön 2.2 avulla voidaan ratkaista maksimitaipuma, joka syntyy kohdassa $x = 0$. Maksimitaipuma saadaan sijoittamalla $x = 0$ kiskon taipuman yhtälöön 3.3, joka voidaan edelleen johtaa yhtälön 2.3 muotoon: [4]

$$y_{\max} = \frac{Q\beta}{2u} \quad (2.3)$$

missä

y_{\max} ja Q	ovat kuten yhtälössä 2.2
u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
β	$= \left(\frac{u}{4EI} \right)^{\frac{1}{4}}$

Termin β nimittäjässä oleva EI kuvaa kiskon taivutusjäykkyyttä siten, että E on kisko-teräksen kimmomoduuli ja I on kiskon jäyhyysmomentti. Sijoittamalla yhtälö 2.2 ja β yhtälöön 2.3, saadaan yhteys ratamoduulin u ja radan jäykkyyden K välille: [4]

$$u = \frac{(K)^{\frac{4}{3}}}{(64EI)^{\frac{1}{3}}} = \sqrt[3]{\frac{K^4}{64EI}} \quad (2.4)$$

tai toisinpäin esitettynä

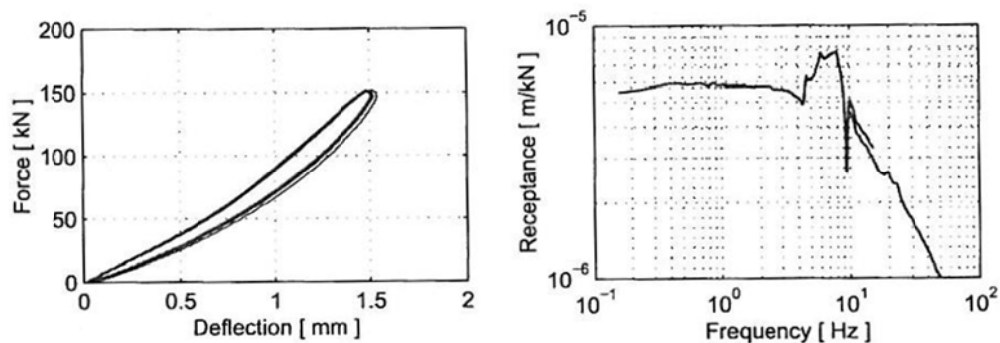
$$K = \sqrt[4]{64EI \cdot u^3} \quad (2.5)$$

Perusero ratamoduulin ja radan jäykkyyden välillä on se, että kokonaisjäykkyys K sisältää myös kiskon taivutusjäykkyyden EI , kun ratamoduuli u edustaa ainoastaan kiskon alapuolista päällysrakennetta (kiskon kiinnitysjärjestelmä, ratapölkkyt ja tukikerros), alusrakennetta ja pohjamaata. [4] Toisin sanoen ratamoduulia tarkasteltaessa kiskoprofiilien erojen vaikutus häviää, mutta ratamoduulin suora laskeminen yhtälöstä 2.1 ei ole mahdollista, mikäli ei tunneta termiä $p(x)$ kyseisellä kohdalla.

2.1.2 Staattinen ja dynaaminen jäykkyys

Radalla liikkuvan kaluston rataa aiheuttamat kuormitukset voidaan jakaa staattisiin ja dynaamisiin kuormituksiin. Junan ollessa paikallaan on pyöristä rataa kolhdistuva kuormitus staattinen ja suorassa suhteessa junan painoon. Junan ollessa liikkeessä voidaan kuormitus jakaa kvasistaattiseen ja dynaamiseen osaan. Dynaamisia kuormituksia aiheuttavat liikkeen, pyörä-kisko-kontaktipinnan ja radan geometrian epätasaisuudet, jotka voivat olla joko lyhyitä tai pitkiä aiheuttaen junaan ja rataa matala- tai korkeataajuisia kuormituksia junan nopeudesta riippuen. Dynaaminen kuormituslisäys saattaa olla hetkellisesti jopa yli kolminkertainen staattiseen kuormitukseen nähden. [5]

Kuvan 2.2 vasemmanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty Banverketin Ruotsissa tekemien mittausten perusteella saatu kiskon kuormitus-taipuma-kuvaaja 150 kN maksimikuormituksella. Kuormitusta on kasvatettu kyseisessä mittauksessa hitaasti, jolloin saavutetaan lähes staattinen kuormitus. Kuvaajasta nähdään, että taipuma ei kasva lineaarisesti kuormituksen kasvaessa. Kuvaajasta havaitaan myös, että kuormituksen poistuessa taipuma ei palaa lähtötilaansa samaa polkua pitkin. Tämän hystereesilukua voidaan katsoa ilmentävän systeemin vaimennustekijää. [6]



Kuva 2.2. Vasemmalla pystysuuntainen kiskon kuormitus-taipuma-kuvaaja kvasistaattisessa kuormituksessa ja oikealla radan dynaamisen jäykkyyden käänteisluvun (reseptanssin) suuruus savisella pohjamaalla taajuuden funktiona. [6]

Dynaamisen jäykkyyden analysoinnin helpottamiseksi jäykkyyden on oletettava kehittyvän lineaarisesti, mikä pitääkin likimäärin paikkansa tarkasteltaessa pienempiä osuuksia kuvaajasta. Tarkasteltaessa radan jäykkyyttä erisuuruisilla dynaamisilla kuormitustaajuuksilla, käytetään radan dynaamisen jäykkyyden sijaan tyypillisesti mieluummin sen käänteislukua, josta käytetään termiä radan reseptanssi α (*track receptance*). Radan reseptanssi on kuormitustaajuudesta riippuva suure. Termiä käytetään dynaamisen jäykkyyden sijasta siksi, että ensisijaisen tarkastelun kohteena on

useimmiten voimaohjattu systeemi ja näin resonanssi-ilmiö voidaan tulkita suuriksi taipumiksi. Reseptanssi α voidaan esittää yhtälönä 2.6. [6]

$$\alpha(f) = \frac{y(f)}{Q(f)} \quad (2.6)$$

missä

$y(f)$ on radan taipuma taajuuden funktiona [mm]
 $Q(f)$ on rataan kohdistuva kuormitus taajuuden funktiona [N]

Kuvassa 2.2 oikeanpuoleisessa kuvaajassa on esitetty reseptanssi-taajuus-kuvaaja mittauksesta, jossa savisella pohjamaalla olevaa rataa kuormitettiin 90 kN staattisella kuormalla ja samanaikaisesti 10 kN dynaamisella kuormalla. Tässä tapauksessa kuvaajasta on löydettävissä resonanssi taajuusvälillä 5–8 Hz ja antiresonanssi taajuudella 9 Hz. Kuvaajasta nähdään myös radan olevan jäykempi korkeampia taajuuksia vastaan ainakin 50 Hz saakka, mikä Berggrenin [6] mukaan on tavanomaista lähes kaikille radoille.

Pohdittaessa staattisen ja dynaamisen jäykkyyden eroja jäykkyyksmittauksien kannalta, voidaan todeta staattisen jäykkyyden mittaamisen olevan huomattavan yksinkertaista verrattuna dynaamisen jäykkyyden mittaamiseen. Toisaalta radalla liikennöivän kaluston rataan kohdistaman kuormituksen ollessa useimmiten sekä kvasistaattista että dynaamista, voidaan pohtia, saavutetaanko ainoastaan staattisen tai yksittäisen taajuuden omaavan kuormituksen alaisella mittauksella riittävän hyvin radan todellista toimintaa kuvaavia tuloksia. Vastaavasti voidaan pohtia, saavutetaanko huomattavasti monimutkaisemmalla laajemman taajuusvälin kattavalla dynaamisella mittauksella merkittäviä etuja verrattuna staattiseen mittaukseen.

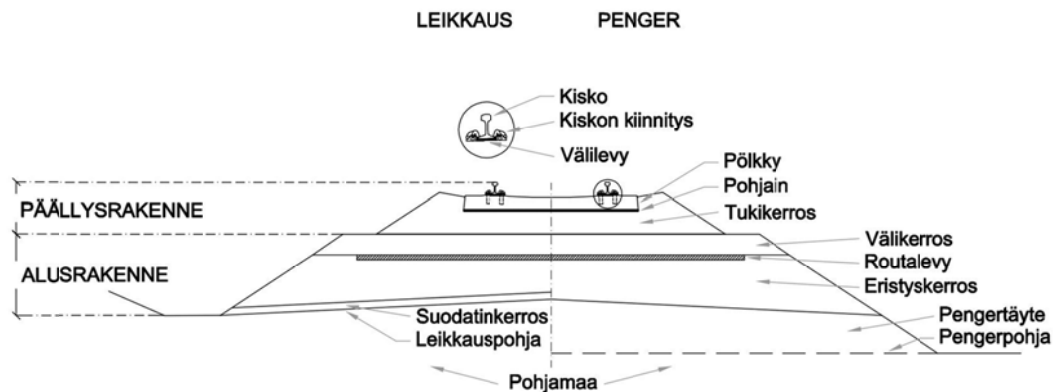
Vaikka radan jäykkyyden ja kuormitustaajuuden välillä vallitsee hyvin mielenkiintoinen suhde, ei dynaamista jäykkyyttä tarkastella tämän tutkimuksen puitteissa tämän syvällisemmin.

2.2 Radan rakenneosat kokonaisjäykkyyden muodostajina

Radan kokonaisjäykkyys muodostuu radan kaikkien rakenneosien ja pohjamaan ominaisuuksien summana tiettyjen osien vaikuttaessa jäykkyyteen enemmän ja toisten roolin ollessa vähemmän merkittävä. Jotta radan kokonaisjäykkyyttä voitaisiin modifioida tai säädellä, on ymmärrettävä radan yksittäisten rakenneosien rooli radan kokonaisjäykkyyden muodostumisessa.

2.2.1 Radan rakenneosat

Perinteinen tukikerroksellinen ratarakenne voidaan jakaa päällysrakenteeseen ja alusrakenteeseen. Päällysrakenteeseen kuuluvat tukikerroksen lisäksi kiskot, kiinnitysosat välilevyineen, ratapölkkyt sekä mahdolliset pohjaimet. Alusrakenne koostuu väli- ja eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta ja routalevystä. Ratarakenteen rakenneosia on havainnollistettu kuvassa 2.3. [7]

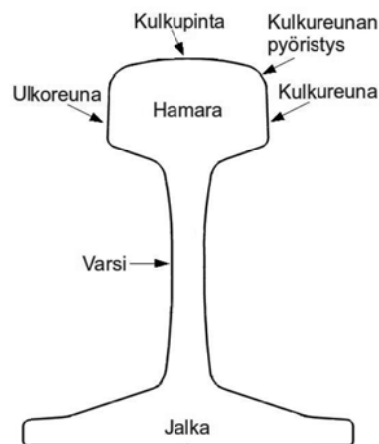


Kuva 2.3. Radan rakenneosien nimityksiä.

Kuvassa 2.3 ei ole selkeyden vuoksi esitetty joitain harvoin Suomen ratarakentamisessa käytettyjä ratkaisuja kuten tukikerroksen alusmattoa. Tosin esimerkiksi kuvassa esitetty pohjainkin on Suomessa vain harvoin käytetty erikoisratkaisu. Radan rakenneosat ja niiden jäykkyyden kannalta merkittävimmät ominaisuudet on esitelty tarkemmin luvuissa 2.2.2–2.2.11.

2.2.2 Kisko

Kisko (*rail*) on jatkuva, tietyn poikkileikkausprofiilin omaava teräsrakenne, jonka ensisijainen tehtävä on ohjata radalla liikkuvaa kalustoa tasaisesti eteenpäin. Kiskon osat ovat hamara (*head*), varsi (*web*) ja jalka (*foot*) kuvan 2.4 mukaisesti. Kiskon on oltava riittävän jäykkä pystyäkseen välittämään liikennettä taipumatta kohtuuttomasti rata-pölkkyjen välillä. Kiskoja liitetään toisiinsa pääasiassa hitsatulla jatkoksella. Jatkokset ovat tyypillisesti kiskojen ongelmallisinta kohta niin rakentamisen, toiminnan kuin kunnossapidon kannalta. [8]



Kuva 2.4. Kiskon osien nimityksiä. [9]

Kiskon jäykkyys riippuu kiskoteräksen kimmomoduulista E sekä kiskon poikkileikkausmitoista, jotka vaikuttavat jähyysmomentin I suuruuteen. Näiden parametrien tuloa EI kutsutaan kiskon taivutusjäykkyydeksi. [3]

Kiskoteräksen kimmomoduulin eli Youngin moduulin arvo on tyypillisesti $207 \cdot 10^3$ MPa [9]. Jäyhyysmomenttien arvot ovat Suomessa nykyisin eniten käytetyille 54 E1 kiskolle ja 60 E1 kiskolle $2346 \cdot 10^4$ mm⁴ ja $3055 \cdot 10^4$ mm⁴ [7]. Kisko on yksittäisistä radan osista ehdottomasti jäykin.

2.2.3 Kiskon kiinnitysosat

Kiskon kiinnityksessä (*rail fastener*) ratapölkkyyn on useita vaihtoehtoja, jotka voidaan karkeasti jakaa puuratapölkkyyn kiinnittämiseen ja betoniratapölkkyyn kiinnittämiseen. Kiinnityksen tarkoituksena on tukea kisko ratapölkkyä vasten sekä vastustaa pyörä- ja lämpövoimista johtuvaa kiskon pysty-, vaaka- ja pituussuuntaista liikettä sekä kiskon kaatumista. [8] Toisaalta kiskon kiinnitys saattaa tietyissä tilanteissa mahdollistaa kuvan 2.27 yhteydessä tarkemmin esitellyn ratapölkyn nousun ja iskeytymisen tukikerrokseen kiskon taivutusmomentista johtuvan nostavan voiman seurauksena.

Kiinnitys puuratapölkkyyn vaatii useimmiten kiskon alle kuvan 2.5 mukaisen erillisen aluslevyn, jonka tarkoituksena on asettaa kisko oikeaan kallistukseen ratapölkyn päällä sekä jakaa kuormat laajemmalle osalle ratapölkkyä pitäen näin tukipaineen kohtuullisena. Selig & Watersin [8] mukaan puuratapölkkyjen kohdalla ei käytetä erillisiä joustavia välilevyjä (*rail pad*), sillä puu on jo sinällään melko kimmainen materiaali. Suomessa välilevyjä kuitenkin käytetään puuratapölkkyille joidenkin kiinnitysjärjestelmien kanssa esimerkiksi lisäämään kiskon ja aluslevyn välistä kitkaa [7].



Kuva 2.5. Esimerkkikuva Suomessa käytössä olevasta Hey Back -kiinnityksestä puuratapölkkyyn.

Betoniratapölkkyjen kohdalla ei useimmiten tarvita erillisiä aluslevyjä, mutta joustavien välilevyjen käyttö kuvan 2.6 mukaisesti kiskon jalan alla on tarpeen seuraavien ominaisuuksien saavuttamiseksi: [8]

- Kimmoisuus kiskon jalan ja ratapölkyn rajapinnassa
- Kaluston pyöristä syntyvän värähtelyn vaimentaminen
- Kiskon jalan ja ratapölkyn välisen kontaktipinnan kulumisen vähentäminen
- Riittävä sähköneristys

Kiskon ja betoniratapölkyn väliin asennettavan välilevyn materiaalina voivat olla esimerkiksi luonnonkumi, korkkikumi eli korkin ja kumin yhdistelmä, polyeteeni, etyyli-vinyyliaasettaatti (EVA) tai elastomeerit [10], [11]. Levyt voivat olla pinnoiltaan sileitä tai esimerkiksi nast- tai urakuvioituja [10].

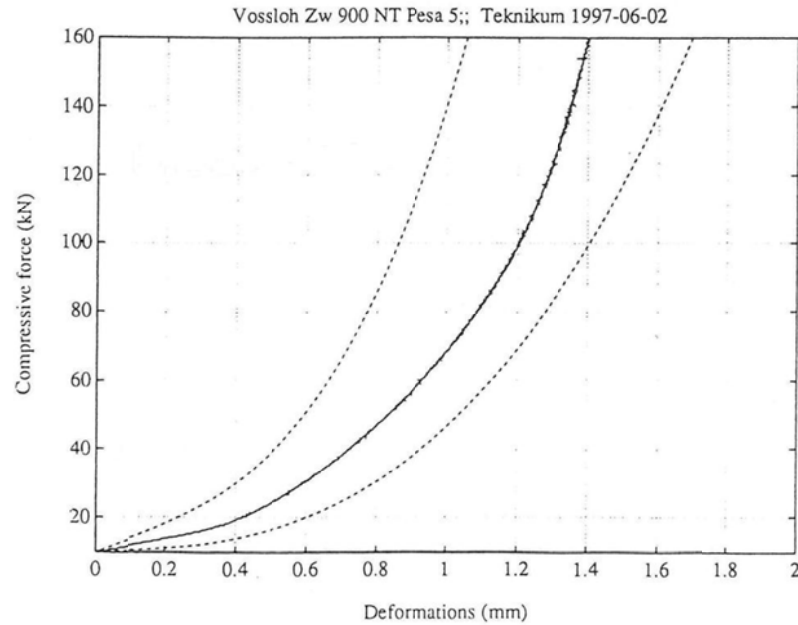


Kuva 2.6. Esimerkkikuva Suomessa käytössä olevasta Vossloh Skl 14 -kiinnityksestä betoniratapölkkyyn.

Välilevyn jäykkyyttä voidaan käsitellä sekä staattisena että dynaamisena jäykkyytenä. Staattisen jäykkyyden kohdalla tarkastellaan välilevyn jäykkyyttä pysyvän tai hitaasti kehittyvän kuormituksen alaisena. Käytännössä tämän kuormituksen aiheuttaa radalla liikennöivä kalusto sekä kiskoista ja kiinnityksistä välittyvät voimat. Staattisia kuormia voidaan pitää ikään kuin esikuormana tarkasteltaessa dynaamista jäykkyyttä. Dynaamisella jäykkyydellä tarkoitetaan välilevyn jäykkyyttä nopeiden kuormitus-tapahtumien aikana. [12]

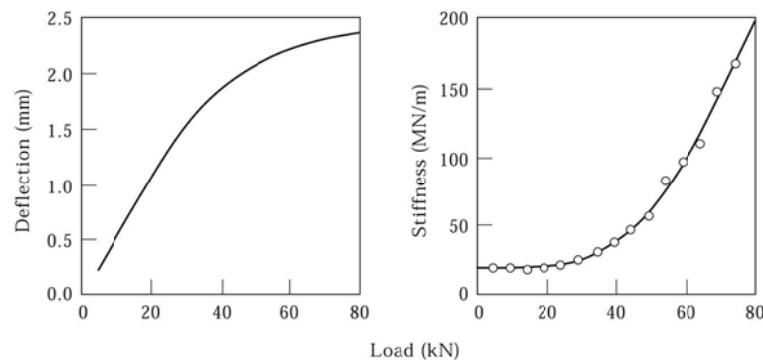
Välilevyjen *staattisen* jäykkyyden on havaittu olevan kuormitustasoriippuvaista siten, että kuormitusten kasvaessa myös staattinen jäykkyys kasvaa. Jäykkyyden kasvu vaihtelee materiaaleittain ollen esimerkiksi luonnonkumilla huomattavaa ja polyeteenillä vähäisempää. [12], [13]

Kuvassa 2.7 on esitetty Vosslohin Zw 900 NT -välilevylle tehdyn kuormitustestin tulokset (yhtenäinen viiva). Kyseinen välilevytyyppi tyypillisesti sisältyy Suomessa yleisesti käytössä olevaan Vosslohin Skl 14 -kiinnitysjärjestelmään [7]. Kuormitustesti on tehty DB:n kuormitusmenettelyn TL9183235 mukaisesti ja esikuormituksena on käytetty 10 kN. [14]



Kuva 2.7. Staattisen kuormitustestin kuormitus-kokoonpuristuma -kuvaaja (yhtenäinen viiva) Vosslohin Zw 900 NT -välilevyille. [14]

Kuvassa 2.8 on esitetty Pandrolin nimellispaksuudeltaan 10 mm nastapinnoitetulle luonnonkumivälilevyille tehtyjen mittausten perusteella määritetty kokoonpuristuman ja staattisen jäykkyyden kehittyminen kuormituksen kasvaessa. Oikeanpuoleisesta kuvaajasta voidaan havaita välilevyn jäykkyyden pysyvän kuormitusvälillä 0–30 kN lähes vakiona, mutta kasvavan sen jälkeen nopeasti kuormituksen kasvaessa. Välilevyjen jäykkyyden yksikkönä käytetään useimmiten joko kN/mm tai MN/m johtuen siitä, että välilevyt tyypillisesti mallinnetaan jousina ja jäykkyydellä kuvataan näiden jousien jousivakioita.



Kuva 2.8. Staattinen kuormitus-kokoonpuristuma- (vas.) ja kuormitus-jäykkyys -kuvaaja (oik.) Pandrolin nastapinnoitetulle luonnonkumivälilevyille (nimellispaksuus 10 mm). [12]

Pandrolin nimellispaksuudeltaan 10 mm nastapinnoitetulle luonnonkumivälilevyille tehdyissä mittauksissa *dynaamisen* jäykkyyden on havaittu olevan riippuvainen sekä staattisesta esikuormasta että dynaamisen kuormituksen taajuudesta. Dynaamisen jäykkyyden havaittiin kasvavan sekä esikuorman kasvaessa että taajuuden kasvaessa dynaamisen jäykkyyden ollessa noin 3–4 kertaa staattisen jäykkyyden suuruinen.

Taulukossa 2.1 on esitetty mittauksissa saatuja dynaamisen jäykkyyden arvoja erisuuruisten esikuormien ja kuormitustaajuuksien yhdistelmillä. [12]

Taulukko 2.1. Staattinen ja dynaaminen jäykkyys Pandrolin nastapinnoitetulle luonnonkumivälilevylle (nimellispaksuus 10 mm). Muokattu lähteestä [12]

Esikuorma [kN]	20	30	40	60	80
Staattinen jäykkyys [MN/m]	19	25	37	95	200
Dynaaminen jäykkyys, taajuus 50 Hz [MN/m]	61	82	130	300	650
Dynaaminen jäykkyys, taajuus 200 Hz [MN/m]	69	92	140	330	690
Dynaaminen jäykkyys, taajuus 500 Hz [MN/m]	81	110	170	390	780
Dynaamisen ja staattisen jäykkyyden suhde, taajuus 50 Hz	3,2	3,3	3,5	3,2	3,3
Dynaamisen ja staattisen jäykkyyden suhde, taajuus 200 Hz	3,6	3,7	3,8	3,5	3,6
Dynaamisen ja staattisen jäykkyyden suhde, taajuus 500 Hz	4,3	4,4	4,6	4,1	3,9

Esikuorman ja dynaamisen kuormituksen taajuuden lisäksi muita välilevyn jäykkyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi lämpötila ja välilevyn ikä. Lämpötilan lasku tyypillisesti kasvattaa välilevyn jäykkyyttä. Kumulatiivisen kuormituskertamäärän kasvaessa välilevyn elinkaaren aikana sen jäykkyys alenee jonkin verran. [10], [15]

Tyypillisesti kiskon jalan ja betoniratapölkyn välissä käytetään suhteellisen jäykkiä välilevyjä, vaikka ne eivät ole esimerkiksi meluvaimennusominaisuuksiltaan optimaalisia. Tällä pyritään tehokkaasti vähentämään ratapölkkyihin kohdistuvia suuria rasituksia ja pidentämään näin ratapölkkyjen käyttöikää. [10]

Pehmeän ja jäykän välilevyn välille ei kirjallisuudessa ole juuri annettu selviä raja-arvoja jäykkyyksien vaihteluvälin, 100–2000 MN/m, ollessa melko laaja [16]. Suomen Standardisoimisliiton betonisten ratapölkkyjen kiinnitysjärjestelmiä koskevassa osassa, jossa välilevyn dynaaminen jäykkyys määritetään 4 Hz:n taajuudella kuormitusväliltä 20–95 kN, annetaan alla esitetty jäykkyyksiluokitus. Samalla kuitenkin huomautetaan luokituksen palvelevan vain testauskäyttöä, eikä sitä tule käyttää ohjeellisenä luokituksena radan suunnittelussa. [17]

- Pehmeä: < 100 MN/m
- Normaali: 100 – 200 MN/m
- Jäykkä: > 200 MN/m

Riippumatta välilevyn näennäisestä pehmeystä tai jäykkyydestä, on sen jäykkyydellä merkittävä rooli radan kokonaisjäykkyyden muodostumisessa ja sen laskennassa. Kuten kuvasta 2.8 voidaan havaita, saattaa kuormituksen aiheuttama välilevyn kokoonpuristuminen olla jopa millimetrien luokkaa. Mikäli halutaan ymmärtää radan kokonaisjäykkyyden muodostumista radan eri rakenneosien summana, on ehdottomasti pyrittävä ymmärtämään myös kiskon jalan ja betoniratapölkyn välisen välilevyn monimutkaista kuormitus-muodonmuutos-käyttäytymistä. Etenkin radan kokonaisjäykkyyden modifioinnin kannalta välilevyt vaikuttavat potentiaaliselta tulevaisuuden tutkimuskohteelta, sillä niiden jäykkyykskaala on laaja ja verrattuna alempiin radan rakenneosiin ne ovat kohtuullisen helposti vaihdettavissa/asennettavissa ratapölkkyihin.

Selig & Li [4] ovat tutkineet kiskon kiinnityksen jäykkyyden vaikutusta radan kokonaisjäykkyyteen GEOTRACK-mallinnusten avulla. Kiinnityksen jäykkyyden voidaan olettaa betoniratapölkkyllisellä radalla riippuvan hyvin pitkälti välilevyn jäykkyydestä.

Muutettaessa välilevy hyvin pehmeästä (26 MN/m) hyvin jäykkään (350 MN/m), radan jäykkyys kasvoi jopa 70 %. Myös tämä tulos kertoo osaltaan välilevyn potentiaalista radan jäykkyyden modifioinnissa. Samalla tulee kuitenkin muistaa, ettei liian pehmeän tai jäykän välilevyn käyttäminen ole välttämättä kaikilta osin suositeltavaa, vaikka sillä saavutettaisiinkin haluttu radan kokonaisjäykkyys.

2.2.4 Ratapölkky

Ratapölkyn (*sleeper, tie*) merkittävimmät tehtävät ja vaatimukset ovat: [7]

- Kuormien jakaminen tukikerrokseen eli kuormitettavan pinta-alan laajentaminen
- Raidelevyden säilyttäminen yhdessä kiskon kiinnityksen kanssa
- Kiskon liikkeiden rajoittaminen yhdessä tukikerroksen kanssa
- Mekaanisten rasitusten kestäminen lyhyellä ja pitkällä aikavälillä
- Riittävän sähköisen eristyksen tuottaminen kiskoja ja tukikerroksen välillä.

Ratapölkkyt ovat materiaaliltaan tyypillisesti joko puisia tai betonisia, mutta myös teräksisiä ratapölkkyjä on kehitetty. Betoniratapölkkytyyppejä ovat esimerkiksi yksiosainen (*monoblock*) ja kaksiosainen (*twin-block*) betoniratapölkky, leveä ratapölkky sekä kehäpölkky (*frame sleeper*). Betonisen ratapölkyn etuina ovat suuri omapaino sekä pitkä käyttöikä ja rajoituksina alttius kiskon korrugaation syntymiselle ja lovi-
pyörien synnyttämien iskujen aiheuttamille vaurioille. [10] Kuvassa 2.9 on esitetty etummaisina kaksi Parman BP89-betoniratapölkkyä ja taaempaan kaksi Lujabetonin B97-betoniratapölkkyä.



Kuva 2.9. Etummaisena kaksi BP89- ja taaempaan kaksi B97-betoniratapölkkyä.

Suomessa betoniratapölkkyjä käytetään 60 E1-kiskoilla pää- ja sivuraiteilla sekä mahdollisuuksien mukaan myös 54 E1-kiskoilla raiteilla erikoistapauksia lukuun ottamatta. Valtaosa käytössä olevista betoniratapölkkyistä on yksiosaisia ja esijännitettyjä. Jatkuvakiskoraidetta rakennettaessa ratapölkkyvälin on Suomessa oltava välillä 590...630 mm nimellismitan ollessa 610 mm. [7] Suomeen uusina hankittavien esijännitettyjen betoniratapölkkyjen pituuden tulee olla 2600 mm, suurimman leveyden 300 mm (sallittu vaihteluväli -5...+20 mm) ja suurimman korkeuden 220 ± 3 mm kiskon keskilinjalla [18].

Betoninen ratapölkky on sinällään melko jäykkä. Puisilla ratapölkkyillä radan jäykkyys on pienempi johtuen puun joustavuudesta. Selig & Li [4] ovat tekemiensä GEOTRACK-mallinnusten perusteella maininneet puuratapölkkyllisen radan jäykkyyden olevan 16 % pienempi kuin vastaavan betoniratapölkkyllisen radan, mikäli huomioidaan myös kummallekin ratapölkky materiaalille tyypillisten kiinnitysten vaikutus jäykkyyteen. Mikäli todellisuudesta poiketen käytetään kummankin ratapölkky materiaalin kiinnityksille samaa jäykkyyttä, on betoniratapölkkyllisen radan jäykkyys enää noin 5 % suurempi kuin vastaavan puuratapölkkyllisen radan. [16]

Ratapölkkyvälin pienentäminen kasvattaa radan kokonaisjäykkyyttä riippumatta siitä onko kyse puu- vai betoniratapölkkyistä. Ratapölkkyvälin vaihtelun merkitys on kuitenkin Seligin & Lin [4] mukaan suhteellisen vähäinen. Muuttamalla ratapölkkyväliä 0,76 metristä 0,46 metriin, havaittiin radan kokonaisjäykkyyden kasvavan noin 10 %. Tämän perusteella radan jäykkyyden kasvattaminen ratapölkkyväliä pienentämällä ei ole ainakaan pelkästään tästä näkökulmasta taloudellisesti kannattavaa kasvavien ratapölkkykustannusten ollessa huomattavia suhteessa saatavaan hyötyyn.

2.2.5 Ratapölkyn alapuolinen tyhjätila

Radan suunnittelussa on tyypillisesti oletettu, että ratapölkky ja tukikerros ovat jatkuvassa kontaktissa keskenään. Toistuvien junakuormien vaikutuksesta ratapölkyn alle, erityisesti ratapölkyn päiden alueelle, saattaa kiviaineksen hienonemisen ja palautumattomien muodonmuutosten johdosta syntyä tyhjätila (*sleeper void, under sleeper void*). Samanaikaisesti ratapölkky on keskiosastaan kontaktissa tukikerrokseen. Tämän seurauksena ratapölkky joutuu huomattavan taivutusrasituksen alaiseksi ratapölkyn päiden painumien kasvaessa, jolloin jopa halkeaman muodostuminen on mahdollista. Lisäksi tyhjätilasta seuraa ratapölkyn toistuva iskeytyminen tukikerrokseen, mikä edelleen lisää tukikerroksen kiviaineksen hienonemista sekä kiskon taivutusrasituksia. [19]

Yllämainitun tilanteen jatkuessa ja kuormituskertamäärän kasvaessa, tai esimerkiksi ratapölkyn epätasaisten pysyvien muodonmuutosten vuoksi, ratapölkyn alapuolinen tyhjätila saattaa edetä tilanteeseen, jossa ratapölkky ei ole lainkaan kontaktissa tukikerrokseen ja jää roikkumaan kiskojen varaan. Tällainen tukeutumaton ratapölkky (*unsupported/hanging sleeper*) ei anna kiskoille odotetun mukaista tukea vaan aiheuttaa jäykkyysoikeaman radan pituussuunnassa ja kuormituslisän ympärillä oleviin ratapölkkyihin. Suurin kuormitus kohdistuu tukeutumattoman ratapölkyn jälkeiseen ratapölkkyyn, sillä tukeutumattoman ratapölkyn kohdalla junan pyörä on kiihtyvässä liikkeessä alaspäin. Junan pyörän lähestyessä seuraavaa ratapölkkyä, kiihtyvyys muuttua nopeasti suuntaa ja aiheuttaa kuormituslisän tähän ratapölkkyyn. Kyseisessä tilanteessa tukeutumattoman ratapölkyn jälkeiseen ratapölkkyyn kiskon lepopinnalle kohdistuvat jännitykset kasvavat jopa 70 % verrattuna perustilanteeseen ja ratapölkyn siirtymä kasvaa jopa 40 %. Radalla liikkuvan kaluston nopeuden kasvaminen kasvattaa myös syntyviä kuormituslisä. [20], [21]

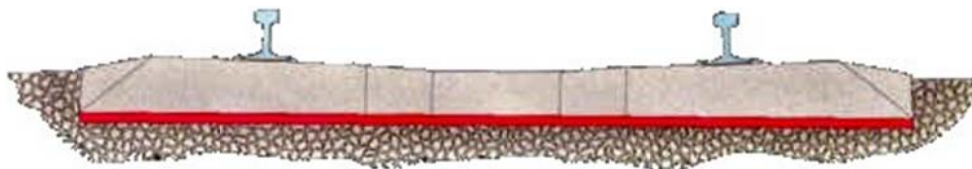
Ruotsissa Banverketin vuonna 1999 tekemissä mittauksissa havaittiin, että pölkyn alapuoliset tyhjätilat ovat verrattain yleisiä. Tyhjätilat olivat pääasiassa pieniä, alle 0,2 mm suuruisia ja niiden suuruus vaihteli saman ratapölkyn päiden välillä. Mittauksissa havaittiin kuitenkin myös suurempia, noin 0,4 mm suuruisia tyhjätiloja, jotka edelleen alle vuoden päästä tehdyssä toisessa mittauksessa olivat kasvaneet jopa 1 mm suuruiseksi. [20]

Ratapölkyn alapuolinen tyhjätila ja tukeutumattomat ratapölkkyt alentavat radan kokonaisjäykkyyttä paikallisesti merkittävästi. Tällöin kyseisen tukeutumattoman ratapölkyn kohdalla taipumamittaustulokset eivät luotettavasti edusta tukikerroksen, sen alapuolisten rakennekerrosten ja pohjamaan jäykkyyttä. Tämän tukeutumisongelman vuoksi on syytä mitata aina useampien eri ratapölkkyjen siirtymiä samanaikaisesti samalta rataosuudelta. Mikäli taipumamittauksissa havaitaan esimerkiksi kertaluokkaa rataosuuden keskimääräistä taipumaa suurempia yksittäisiä arvoja, on syytä epäillä kyseisiä suuria arvoja edustavien ratapölkkyjen tuennan olevan ainakin osin puutteellinen. Näin ollen ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan tunnistaminen eri ratapölkkyistä saatavia taipumamittaustuloksia vertailemalla saattaa olla mahdollista.

Ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan huomioiminen jäykkyyden laskemisessa vaatii tiedon siitä, mikä osa taipumasta syntyy tyhjätilan takia ja mikä koko ratarakenteen taipumisen takia. Tämän jakauman luotettava määrittäminen vaatii taipumamittauksessa käytetyn kuormituksen säätelymahdollisuutta, mutta myös karkealla vertailulla rataosuuden keskimääräiseen taipumaan saadaan suuntaa-antavia tuloksia.

2.2.6 Pohjain

Pohjain (*under sleeper pad (USP)*, *sleeper soffit pad*) on ratapölkyn alapintaan asennettava joustava levy, jonka materiaalina voi olla esimerkiksi polyuretaani, luonnonkumi tai etyyli-vinyylisetaatti (EVA). Pohjain voidaan kiinnittää joko valmiin ratapölkyn pintaan esimerkiksi suihkuttamalla, maalaamalla tai liimaamalla tai jo ratapölkyn valmistuksen yhteydessä lukuisin eri tavoin. Pohjain on tyypillisesti 10 – 20 mm paksuinen ja siinä on usein kaksi kerrosta, joista ulomman on tarkoitus suojata pohjainta tukikerroksen kiviaineksen hankaavalta kulutukselta. [22], [23] Kuvassa 2.10 on esitetty periaatekuva pohjaimesta.



Kuva 2.10. Periaatekuva pohjaimen (esitetty punaisella) käytöstä. [24]

Maailmalla pohjainten käyttöä on perusteltu ainakin seuraavilla tavoitteilla: [22]

- Jäykkyyserojen tasoittaminen esimerkiksi siltojen kohdilla
- Tukikerroksen ohentaminen ainakin paikallisesti
- Kiskon ja ratapölkyn jännitysten pienentäminen
- Tärinän ja runkomelun vähentäminen
- Korrugaation vähentäminen pienisäteisissä kaarteissa
- Kunnossapitotarpeen vähentäminen

Keski-Euroopassa, varsinkin Saksassa ja Itävallassa, on melko runsaasti kokemusta pohjainten käytöstä eri tarkoituksiin. Suomessa pohjaimia on käytetty ainakin kolmessa kohteessa ja lisäksi niiden käyttöä on tutkittu ainakin kehäradan kiintoraideselvityksen yhteydessä vuonna 2008 [25].

Keväällä 2009 Getznerin Sylomer SLS 1010G -pohjainten vaikutuksia tutkittiin Vantaankosken radalla Kilterinmäen läheisyydessä toteutetulla 55 metrin pituisella koeosuudella. Tutkimus tehtiin ensisijaisesti pohjainten runkomelueristysominaisuuksien todentamiseksi, joten pohjainten vaikutuksia radan jäykkyyteen ei ole tarkasteltu. Runkomelun osalta pohjainten voitiin todeta vaimentaneen lähijunaliikenteen (Sm1, Sm2 ja Sm4) aiheuttamaa runkomelua 2–7 dB hieman kalustotyyppistä riippuen. [26]

Vantaankosken radan lisäksi pohjaimia on käytetty myös Kauhavan liikennepaikan tulovaihteen vaihdepölkkyissä. Vuonna 2011 Tampereen henkilöratapihan allittavan Rongankadun alikäytävän yhteydessä on käytetty pohjaimia tukikerroksen ohentamiseksi alikäytävän kohdalla ainakin itäisimpien raiteiden alueella. Samassa kohteessa läntisimmällä raiteella eli autojunien lastausraiteella käytettiin hieman pohjainten tavoin toimivaa joustomassaa siltakannen ja ratapölkkyjen päiden välissä.

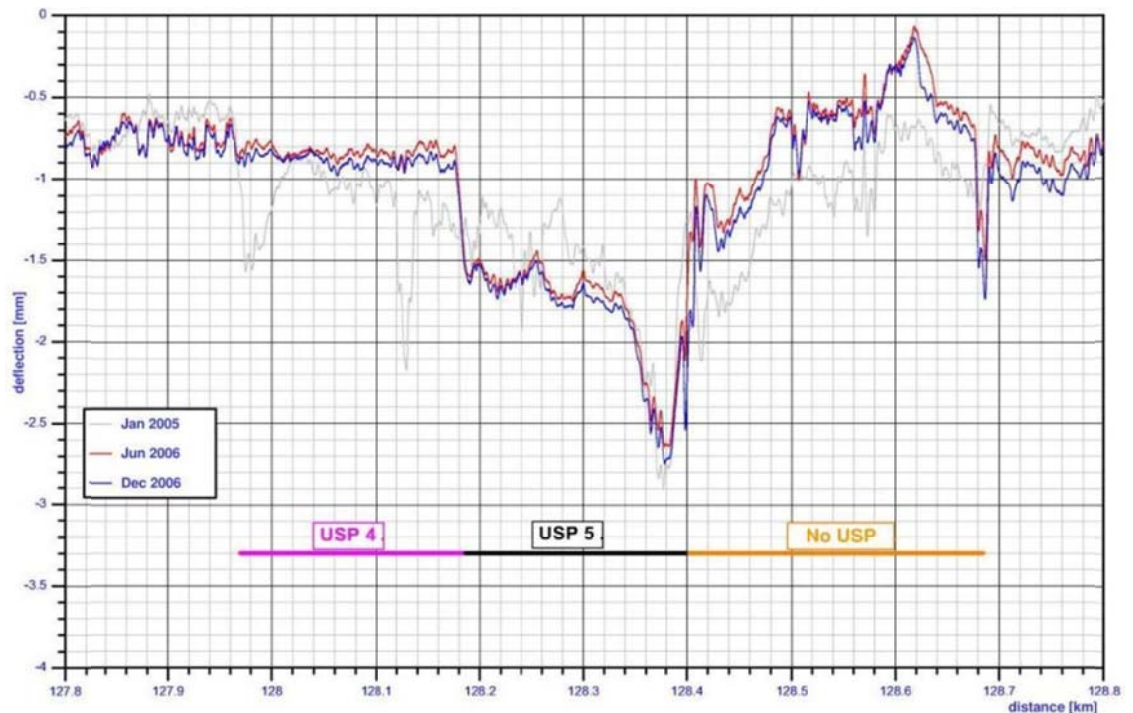
Pohjainten jäykkyyden kuvaamiseen käytetään alustalukua (*bedding modulus*), joka yksinkertaistettuna kuvaa sitä kuinka suuren paineen yhden millimetrin painuma saa aikaan. Tyypillisesti käytetään yksikköä N/mm^3 , vaikka oikeampi muoto on $\text{N}/\text{mm}/\text{mm}^2$. [27]

Pohjainten jäykkyyden mittaamiseen ei ole nykyisellään olemassa kansainvälistä standardia, mutta ainakin Saksassa on kehitetty pienimittakaavainen, Deutsche Bahnin teknisten toimitusehtojen BN 918 145-1 mukaan toteutettava väsytysojearjestely. Lisäksi Ranskassa täyden mittakaavan koelaitteistoa (VIBROGIR) on sovellettu pohjaintutkimuksissa. UIC:n tutkimusprojektissa kolmen eri pohjaimen jäykkyys on määritetty sekä uutena että miljoonien kuormitus syklien jälkeen molemmilla koejärjestelyillä ja vertailtu koejärjestelyiden antamia tuloksia. Välilevyn tapaan (vrt. luku 2.2.3) jäykkyyttä on tarkasteltu sekä staattisena että dynaamisena. Mittauksilla saadut jäykköysarvot uusille pohjaimille olivat näiden kahden menetelmän välillä samansuuntaisia. VIBROGIR:n havaittiin kuitenkin kuluttavan pohjainta enemmän kuormituksen aikana, joten menetelmät eivät ole täysin vertailukelpoisia. [22]

Kuten välilevyjen kohdalla, pohjaintenkaan jäykköysluokittelulle ei löydetty kirjallisuudesta absoluuttisia raja-arvoja, mutta suuntaa-antava luokitus on seuraava: [28]

- Pehmeä: $\leq 0,15 \text{ N}/\text{mm}^3$
- Normaal: $0,15 - 0,25 \text{ N}/\text{mm}^3$
- Jäykkä: $\geq 0,25 \text{ N}/\text{mm}^3$

UIC:n tutkimusprojektin yhteydessä vuosina 2005 – 2006 toteutetussa koeosueessa käytettiin viittä erilaista pohjaintyyppiä. Kuvassa 2.11 on esitetty kahden eri pohjaintyyppillä varustetun rataosuuden (USP4 ja USP5) sekä pohjaimettoman vertailuosuuden osalta harmaalla viivalla kiskon taipumat ennen pohjainten asennusta ja rataosuuden parantamista, punaisella viivalla kiskon taipumat pohjainten asennuksen jälkeen ja sinisellä viivalla taipumat noin puolen vuoden kuluttua pohjainten asennuksesta. Mittauksessa käytettiin SBB:n mittausvaunua ja rataa kuormitettiin 20 tonnin akselikuormalla. Pohjaintyyppi USP5 oli melko pehmeä, mistä johtuu taipumien jyrkkä kasvu siirryttäessä pohjaintyyppin USP4 alueelta tyyppin USP5 alueelle. [22]



Kuva 2.11. UIC:n pohjainkoekohteen kiskon taipumamittaustulokset pohjaintyypeillä USP4 ja USP5 varustetuilta rataosuuksilta sekä vertailuosuudelta. [22]

Keskiarvoina 10 metrin osuuksittain tarkasteltuna vertailuosuuden kiskon taipuma oli noin 0,70 mm ja pohjaintyyppien USP1–USP4 alueilla taipumat olivat keskimäärin noin 0,80...0,85 mm. Pehmeämmän pohjaintyyppien USP5 alueella taipuma oli keskimäärin 1,70 mm. Pohjaintyyppien USP1–USP4 alueilla kiskon taipumat olivat pääsääntöisesti pienempiä kuin ennen pohjainten asennusta, mikä todennäköisesti johtuu vuoden 2005 mittausten jälkeen rataosuudelle tehdystä perusparannuksesta. Täten on vaikeaa varmuudella arvioida pohjainten osuutta taipumien muutoksessa. Sen sijaan tarkastelemalla kuvan 2.11 käyriä, voidaan pohjainten käytön todeta jonkin verran säännöllistäneen radan taipumakäyttäytymistä. [22]

Pohjainten on mallinnusten ja mittausten perusteella havaittu alentavan sekä tukikerrokseen että alusrakenteeseen kohdistuvaa kuormitusta, vaimentavan tärinää ja runkomelua sekä tasoittavan radan taipumakäyttäytymistä. Toisaalta pohjaimen käyttö johtaa suurempiin taipumiin ja kiihtyvyyksiin kiskossa ja ratapölkkyssä sekä junasta suoraan ilmaan säteilevän melun vähäiseen kasvamiseen. [22]

Radan kokonaisjäykkyyden modifioinnin kannalta pohjaimet vaikuttavat potentiaaliselta tulevaisuuden tutkimuskohteelta. Pohjaimet on helppo asentaa uusiin ratapölkkyihin ja myös jälkiasennus olemassa oleville radoille saattaa olla mahdollista kohtuullisen helposti. Jäykkyyden modifioinnin lisäksi pohjainten osalta mielenkiintoista on niiden, mahdollisesti huomattavastikin, tukikerroksen kulumista vähentävä vaikutus.

2.2.7 Tukikerros

Tukikerroksen (*ballast layer*) tehtävänä on: [7]

- pitää raide geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa
- jakaa ratapölkkyistä välittyvät kuormat alusrakenteelle
- muodostaa raiteelle tasainen ja kantava alusta

Tyypillisesti Suomessa tukikerrosmateriaalina käytetään rakeisuudeltaan 31,5...63 mm raidesepeliä. Tukikerroksen paksuus vaihtelee raide- ja ratapölkkytyypin mukaan välillä 350...550 mm ollen jatkuvakiskoissa betoniratapölkkyraiteissa tyypillisesti 550 mm mitattuna kiskon alapinnasta. [7], [29]

Tukikerroksen jäykkyydelle ei Suomessa ole vaatimuksia ja sitä ei näin ollen mitata. Tukikerros mitoitetaan sallitun nopeuden, kiskonpituuden, tukikerrosmateriaalin ja ratapölkkytyypin perusteella. Tukikerrosmateriaalille asetetaan vaatimuksia esimerkiksi rakeisuusjakauman, muotoarvon ja lujuuden kautta. [7], [29] Kuvassa 2.12 on esitetty esimerkki Oikoradan liikennepaikkavälin Mäntsälä–Sipilä tukikerroksesta. Tukikerroksen raidesepelin erottaa kuvassa hyvin välikerrosmateriaalista sen tummemman värin perusteella.



Kuva 2.12. Esimerkkikuva tukikerroksesta Oikoradalla liikennepaikkavälillä Mäntsälä–Sipilä.

Selig & Li [4] ovat tutkineet tukikerroksen vaikutusta radan kokonaisjäykkyyteen tukikerroksen muodonmuutosmoduulin osalta. Mallinnuksessa tukikerroksen paksuutena ratapölkyn alapinnasta lukien käytettiin 0,30 metriä ja tiheytenä 1760 kg/m³. Käytetyn tukikerrosmateriaalin rakeisuusjakauma ei ilmene tutkimuksesta. Vaihtamalla tukikerroksen jäykkyyttä kuvaava muodonmuutosmoduuli arvosta 138 MPa arvoon 551 MPa, saatiin aikaan noin 20 % kasvu radan kokonaisjäykkyydessä.

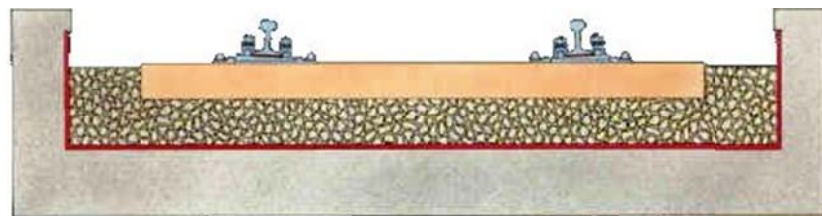
Radan jäykkyyden kannalta tukikerrosta voidaan pitää kohtuullisen merkittävänä rakenneosana. Uusilla radoilla määräysten mukaiseen raidesepelitukikerrokseen kauttaaltaan tukeutuvien ratapölkkyjen kohdalla jäykkyysoongelmia ei pitäisi ilmetä, mutta esimerkiksi tukeutumistilanteen epätäydellisyys tai raidesepelin hienoneminen edesauttavat jo aiemmin mainitun ratapölkyn alaisen tyhjätilan muodostumista. Olemassa olevilla radoilla edellä mainituista syistä johtuvat jäykkyyden äkkinäiset

muutokset saattavat olla paikoin hyvinkin yleisiä. On huomioitava, että vaikka tukikerroksen hienonemisen kautta muodostuva ratapölkyn alapuolinen tyhjätila tyypillisesti kasvattaa radan kokonaistaipumaa ja näin ollen alentaa laskennallista kokonaisjäykkyyttä, niin tukikerroksen jäykkyys ei välttämättä hienonemisen alkuvaihetta lukuun ottamatta kovin oleellisesti muutu. Nurmikolu & Kolisoja [30] havaitsivat eri rakeisuuslukuihin hienonnetuilla raidesepelillä tekemissään kolmiaksoaalikokeissa, että resilient-moduuli (ks. luku 2.2.9) pienenee aluksi nopeasti rakeisuusluvun kasvaessa, mutta rakeisuusluvun edelleen kasvaessa resilient-moduulin alentuminen hidastuu.

Kuten jo aiemmin kävi ilmi, ratapölkyn alapuolinen tyhjätila aiheuttaa ratapölkyn iskeytymisen tukikerrokseen, mikä ratapölkyn ylityskertamäärän kasvaessa kiihdyttää raidesepelin hienonemista ja tyhjätilan kasvua. Tämä ilmiö on esimerkiksi tukikerroksen routivuuden ja raiteen geometrian pysyvyyden kannalta erittäin epätoivottava.

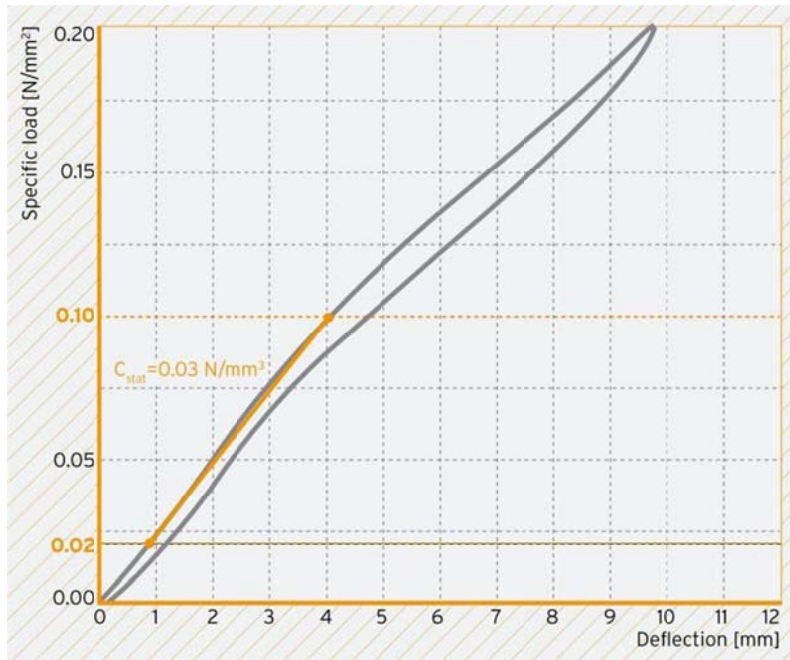
2.2.8 Tukikerroksen alusmatto

Tukikerroksen alusmaton tai sepelinalusmaton (*ballast mat*) pääasiallisia käyttökohteita ovat kiintoraiteet ja sillat. Kiintoraiteiden kohdalla alusmattojen käytöllä tavoitellaan useimmiten runkomelueristystä asutetuilla alueilla ja siltojen kohdalla edellisen lisäksi radan jäykkyyden alentamista. Alusmattojen materiaalina voivat olla esimerkiksi luonnonkumi, polyuretaani tai polyeteeni, joiden lisäksi myös mineraalivillapohjaisia materiaaleja on käytetty runkomelueristyksissä. Alusmaton paksuus on tyypillisesti noin 15...40 mm lukuun ottamatta mineraalivillapohjaisia alusmattoja, jotka voivat olla lähes 100 mm paksuisia. Kuvassa 2.13 on havainnollistettu punaisella värillä alusmaton sijaintia ratarakenteessa. [10], [31], [32]



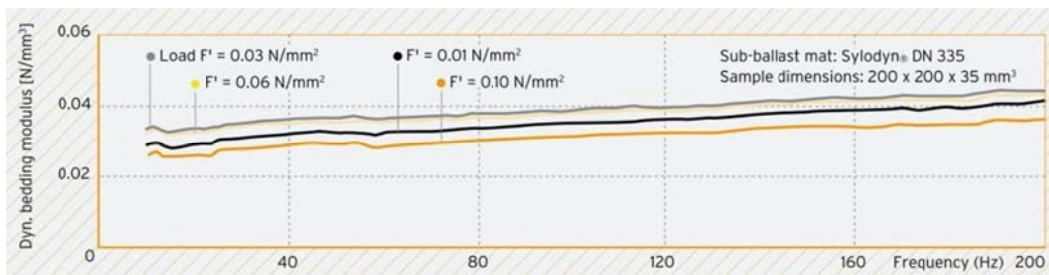
Kuva 2.13. Periaatekuva tukikerroksen alusmaton käytöstä. [33]

Alusmaton jäykkyys ilmoitetaan pohjainten tapaan alustaluvun avulla yksikössä N/mm^3 . Kuvassa 2.14 on esitetty 35 mm paksuisen Getznerin Sylodyn DN 335 alusmaton kuormitus-kokoonpuristuma-kuvaaja. Alusmaton staattinen ominaisjäykkyys on $0,03 \text{ N}/\text{mm}^3$, joka on määritetty kuormitusväliltä $0,02\text{--}0,10 \text{ N}/\text{mm}^2$. Kuvaajasta voidaan havaita alusmaton kuormitus-kokoonpuristumiskäyttäytymisen olevan ainakin kuormituksessa käytetyllä jännitysalueella lähes lineaarista. [32]



Kuva 2.14. Getznerin Sylodyn DN 335 alusmaton kuormitus-kokoonpuristuma -kuvaaja. [32]

Runkomelueristyksen kannalta staattista jäykkyyttä tärkeämpiä ovat alusmaton ominaisuudet dynaamisen kuormituksen alaisena. Kuvassa 2.15 on esitetty samaisen Sylodyn DN 335 alusmaton dynaamisen jäykkyyden riippuvuus kuormituksesta ja taajuudesta. Kuvasta nähdään, että dynaaminen jäykkyys kasvaa jonkin verran taajuuden kasvaessa. Lisäksi voidaan havaita, että staattisen ja dynaamisen jäykkyyden välillä ei ainakaan matalammilla taajuuksilla ole huomattavaa eroa. [32]



Kuva 2.15. Getznerin Sylodyn DN 335 alusmaton dynaamisen jäykkyyden riippuvuus kuormituksesta ja taajuudesta. [32]

Alusmattotyyppi valitaan käyttökohteen mukaan. Yksinkertaistettuna pienillä nopeuksilla voidaan käyttää paksumpia ja staattiselta ominaisjäykkyydeltään pehmeämpiä alusmattuja, kun taas suurilla nopeuksilla liikennöitäessä alusmatot ovat ohuempia, alle 20 mm paksuisia ja jäykempiä. Pehmeälle ja jäykälle alusmatolle ei kirjallisuudesta löydetty selkeitä raja-arvoja. Voidaan kuitenkin todeta, että alusmattojen jäykkyyden vaihteluväli on suunnilleen 0,01...0,15 N/mm³. Kirjallisuusselvityksen perusteella näyttäisi siltä, että Deutsche Bahnin ohje DB-TL 918 071 on standardinomaisessa asemassa alusmattojen jäykkyyden mittaamisessa. [32]

Sepelinalusmatot eivät soveltune kovin laajaan käyttöön hankalahkon vaihdettavuutensa vuoksi. Lisäksi jäykkyysnäkökulmasta alusmatot tyypillisesti alentavat radan jäykkyyttä, mikä ei aina ole toivottava vaikutus. Tämän vuoksi alusmatot soveltuvat nimenomaan erikoisratkaisuiksi runkomelueristykseen ja silloille, mutta laajempi käyttö rataverkolla tuskin on tarkoituksenmukaista tai kannattavaa.

2.2.9 Väli- ja eristyskerros

Välikerroksen tehtävänä on muodostaa tukikerrokselle tasainen ja kantava alusta sekä estää tukikerroksen ja alempien rakennekerrosten materiaaleja sekoittumasta toisiinsa. [34]

Eristyskerroksen tehtävänä on: [34]

- estää tai vähentää eristyskerroksen alla olevan pohjamaan routimista
- muodostaa välikerrokselle tasainen ja kantava alusta
- siirtää ja jakaa ylemmiltä rakennekerroksilta tulevat kuormat pohjamaalle
- pysäyttää kapillaarinen vedennousu ja toimia suodatinkerroksena, ellei sellaista rakenneta erikseen

Suomessa väli- ja eristyskerros (*subballast layers*) voidaan rakentaa routimattomasta hiekasta, sorasta tai kalliomurskeesta. Sora- ja hiekkavarojen vähentymisen ja maainesten ottorajoitusten takia väli- ja eristyskerrosten kohdalla ollaan siirtymässä yhä enenevässä määrin käyttämään kalliomursketta [19]. Mikäli eristyskerroksessa käytetään kalliomursketta, on välikerros rakennettava samasta murskeesta samanaikaisesti kuvan 2.16 mukaisesti. Välikerroksen paksuus on tyypillisesti 300 mm ja se rakennetaan yhtenä kerroksena. Eristyskerroksen paksuus voi vaihdella muutamasta sadasta millimetristä noin kahteen metriin kohteesta riippuen. [34], [35]



Kuva 2.16. Kalliomurskeesta rakennettu yhdistetty väli- ja eristyskerros tiivistettynä Seinäjoki – Ruha -kaksoisraidetyömaalla.

Maamateriaaleista rakennettujen kerrosten kokonaisjäykkyyttä kuvataan usein käsitteellä kantavuus, joka voidaan määrittää kentällä esimerkiksi levykuormituskokeella tai pudotuspainolaitteella. Kentällä mitattujen kantavuusarvojen suuruuteen vaikuttavat myös itse mitattavasta materiaalista riippumattomat tekijät, kuten kerrospaksuus ja mitattavan kerroksen alapuolisten kerrosten jäykkyys. Kentällä mitatun jäyk-

kyiden parametrina käytetään muodonmuutosmoduulia E . Muodonmuutosmoduulin laskeminen perustuu Boussinesq'n esittämään yhtälön 2.7 mukaiseen ympyrämuotoisen kuormitetun levyn keskipisteen painuman laskentamalliin, josta on edelleen muodostettu yhtälö levykuormituskokeen muodonmuutosmoduulin laskemiseksi. [36]

$$E = r(1 - \nu^2) \cdot \frac{P \cdot a}{s} = k \cdot \frac{P \cdot a}{s} \quad (2.7)$$

missä

E	on kimmomoduuli / muodonmuutosmoduuli [MPa]
r	on kerroin, joka jäykällä levyllä on $\pi/2$ ja taipuisalla levyllä 2
ν	on Poissonin luku
P	on kosketuspaine [kN/m ²]
a	on kuormituslevyn säde [m]
s	on kuormituslevyn painuma [mm]

Kertoimen k arvo riippuu kuormituslevyn jäykkyydestä ja Poisson-luvusta. Tyypillisesti käytännön mittauksissa kertoimelle käytetään likimääräistä arvoa 1,5. [36]

Maamateriaalin palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä kuvataan usein yhtälön 2.8 mukaisella resilient-moduulilla. Resilient-moduulia kutsutaan myös jäykkyyssmoduuliksi [36]. [37]

$$M_r = k_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2} \quad (2.8)$$

missä

M_r	on	jäykkyyssmoduuli [kPa]
θ	on	pääjännitysten summa [kPa]
θ_0	on	vertailujännitys [kPa]
k_1 ja k_2 ovat materiaaliiparametreja		

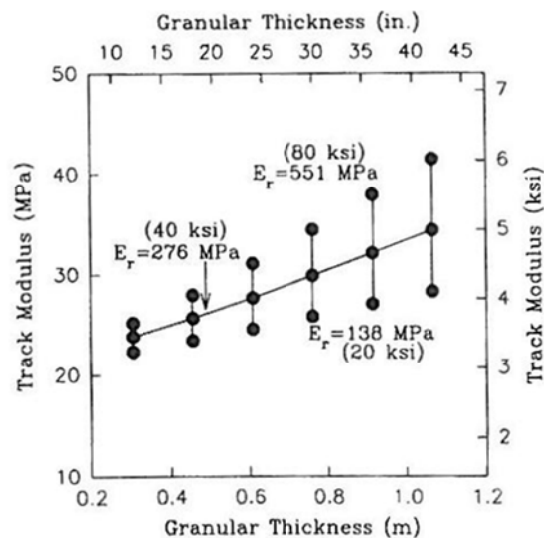
Jäykkyyteen vaikuttavat jännitystilä, maamateriaalin tiiviysaste ja raekokojakauma sekä rakeiden pinnankarkeus. Lisäksi ympäristötekijöillä, kuten vedellä ja roudalla, voi olla huomattavia vaikutuksia jäykkyyteen. Näistä merkittävin vaikutus on sulan maan aikana jännitystilalla ja talvella routaantumisella. [36], [37]

Suomessa kalliomurskeesta rakennettujen väli- ja eristyskerroksien kantavuusvaatimukset on annettu levykuormituskokeen toisen kuormituskerran muodonmuutosmoduulille E_2 . Välikerroksella muodonmuutosmoduulin E_2 tulee olla keskimäärin vähintään 180 MPa ja eristyskerroksella keskimäärin vähintään 160 MPa. Muodonmuutosmoduulit on määritettävä 30...70 % jännitysväliltä InfraRYL 2010 liitteen K7 mukaisesti. Luonnonmateriaaleista rakennetuille eristyskerroksille ei ole annettu kantavuusvaatimuksia, vaan niiden kelpoisuus todetaan parannetun Proctor-kokeen ja kentällä tehtävän tiivysmittauksen perusteella määritettävän tiiviysasteen kautta. Luonnonmateriaaleista tehtyjen välikerrosten kelpoisuus voidaan osoittaa joko kalliomurskerakenteen tavoin kantavuuden kautta samoin vaatimuksin tai tiiviysasteeseen perustuen. Vertailun vuoksi esimerkiksi Saksassa eristyskerroksen kantavuusvaati-

mus uusilla pääradoilla on vähintään 120 MPa eli hieman alhaisempi kuin Suomessa [36]. [35], [38], [39]

Selig & Li [4] ovat tutkineet välikerroksen jäykkyyden vaikutusta radan kokonaisjäykkyyteen välikerroksen muodonmuutosmoduulin perusteella. Mallinnuksessa välikerroksen paksuutena käytettiin 0,15 m ja tiheytenä 1920 kg/m³. Käytetyn välikerros materiaalin rakeisuusjakauma ei ilmene tutkimuksesta. Vaihtamalla välikerroksen jäykkyyttä kuvaava muodonmuutosmoduuli arvosta 69 MPa arvoon 276 MPa, saatiin aikaan vajaan 10 % kasvu radan kokonaisjäykkyydessä. Tästä tutkimustuloksesta ei voi vetää suoria johtopäätöksiä Suomen rataverkkoon liittyen, sillä Suomessa välikerroksen paksuus on tyypillisesti kaksinkertainen Seligin & Lin [4] tutkimuksessa käytettyyn paksuuteen verrattuna ja lisäksi Suomen radoilla alusrakenteessa välikerroksen alla on tyypillisesti eristyskerros, joka voi olla hyvinkin paksu.

Selig & Li [4] tutkivat samassa yhteydessä myös tukikerroksen ja välikerroksen eli käytännössä karkearakeisten rakennekerrosten yhteenlasketun paksuuden vaikutusta radan jäykkyyteen. Mallinnuksessa oletettiin tukikerroksen ja välikerroksen muodonmuutosmoduulien olevan yhtä suuria. Tutkimuksessa vertailtiin kerrospaksuudeltaan 0,30–1,07 m paksuisia kerroksia. Kuvassa 2.17 on esitetty kerrospaksuuden ja materiaalin muodonmuutosmoduulin vaikutus radan kokonaisjäykkyyttä kuvaavaan ratamoduuliin. Kuvassa esitettyjen pisteryhmien ylimmät pisteet on saatu käyttämällä muodonmuutosmoduulina 551 MPa, keskimmäiset pisteet muodonmuutosmoduulilla 276 MPa ja alimmat pisteet muodonmuutosmoduulilla 138 MPa. Kuvasta 2.17 voidaan havaita, että kerrospaksuuden kasvattaminen yleisesti ottaen kasvattaa radan kokonaisjäykkyyttä. Alemmilla muodonmuutosmoduulien arvoilla kokonaisjäykkyyden riippuvuus kerrospaksuudesta on vähäisempää kuin korkeilla muodonmuutosmoduuleilla. Toisin sanoen radan kokonaisjäykkyyden vaihtelu muodonmuutosmoduulin vaihtelun takia on ohuilla kerroksilla huomattavasti paksuja rakennekerroksia vähäisempää. Kyseinen kerrospaksuuden, rakennekerrosten muodonmuutosmoduulien ja kokonaisjäykkyyden yhteys on tiedostettu jo pitkään, esimerkiksi Suomessa tierakenteen kuormituskestävyyksimitoituksessa käytettävä Odemarkin kaava hyödyntää kerrospaksuutta ja muodonmuutosmoduulia laskentaparametreina [40].



Kuva 2.17. Karkearakeisen maamateriaalin kerrospaksuuden ja muodonmuutosmoduulin vaikutus radan kokonaisjäykkyyttä kuvaavaan ratamoduuliin. [4]

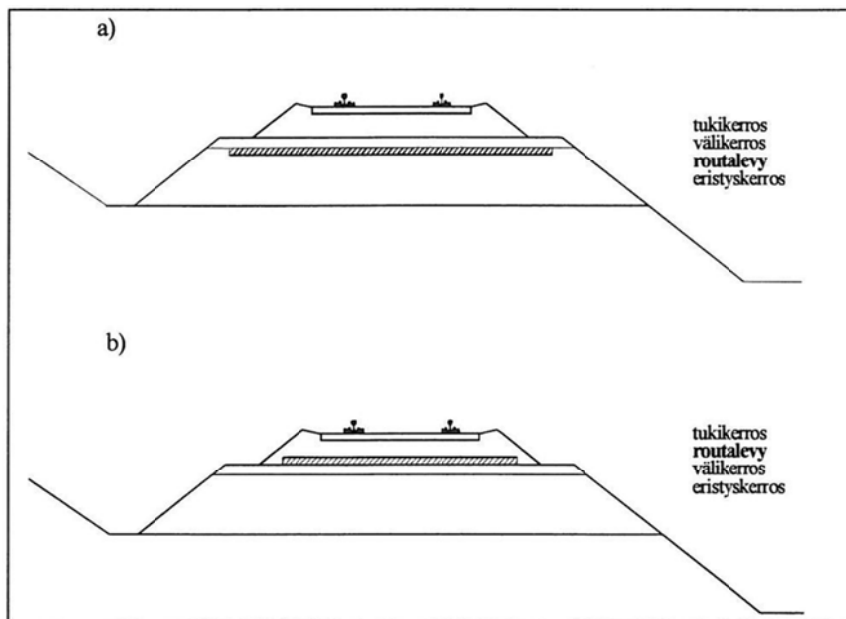
Suomessa uudehkoilla radoilla routamitoituksen mukainen suuri rakennekerrospaksuus on edesauttanut myös riittävän kuormituskestävyyden saavuttamisessa, mikä ilmenee todennäköisesti myös hyvänä kokonaisjäykkyytenä kyseisillä rataosilla. Sen sijaan olemassa olevilla radoilla voi rakennekerrosten ominaisuuksissa olla puutteita kuormituskestävyyden näkökulmasta, mikä saattaa olla mahdollista havaita myös riittämättömänä kokonaisjäykkyytenä.

Radan kokonaisjäykkyyden modifioinnin kannalta alusrakennekerrokset eivät ole kovin potentiaalinen muuttuja. Huolellisella tiivistämisellä pystytään välttämään löyhässä rakenteessa syntyvät pysyvät muodonmuutokset, mutta jäykkyyden kasvattaminen tiivistämisen kautta ei ole mahdollista kuin tiettyyn rajaan asti. Ennenkin modifiointikeinoina kyseeseen voisivat tulla kerrospaksuuden säätteleminen, alusrakennekerros materiaalin vaihtaminen sekä erilaiset injektioinnit tai stabiloinnit, jotka ovat kuitenkin olemassa olevien ratojen kohdalla melko työläitä toteuttaa.

2.2.10 Routalevy

Routalevyjä käytetään ratarakenteessa estämään tai hidastamaan roudan etenemistä radan rakennekerroksissa siten, että rakennekerrosten alapuolinen pohjamaa tai penger ei routaannu. Routalevyjä tarvitaan, kun radan rakennekerrosten yhteispaksuus ei ole riittävä estämään roudan tunkeutumista routivaan materiaaliin. Routalevyjen vaikutus perustuu niiden huomattavan alhaiseen lämmönjohtavuuteen. Levyjen materiaalina Suomessa käytetään nykyään suulakepuristettua polystyreeniä eli XPS:ää (*eXtruded PolyStyrene*). [34], [41]

XPS-levyeristyksen paksuus voi olla 40, 60, 80, 100 tai 120 mm ja se määräytyy routamitoituksen mukaan. Routalevyjen asentaminen uusille radoille vaatii aina Liikenneviraston luvan. Uusien ratojen kohdalla routalevyä voidaan pitää erikoistapauksena eli niitä asennetaan melko vähän. Olemassa olevilla radoilla ensisijaisena vaihtoehtona on korvata routivat rakennekerros materiaalit routimattomilla eli routalevyn käyttö on vasta toissijainen vaihtoehto. Routalevy voidaan asentaa kuvan 2.18 mukaisesti kahdella tavalla: välikerroksen alapuolelle (a) tai välikerroksen päälle tukikerroksen alapuolelle (b). Ensisijainen tapa on asentaa routalevy välikerroksen alapuolelle, jolloin se on suojassa särmikkäiltä raideseperirakeilta. Pääosa levyistä asennetaan kuitenkin tukikerroksen puhdistuksen yhteydessä, jolloin asentaminen tapahtuu välikerroksen yläpuolelle. [34], [41]



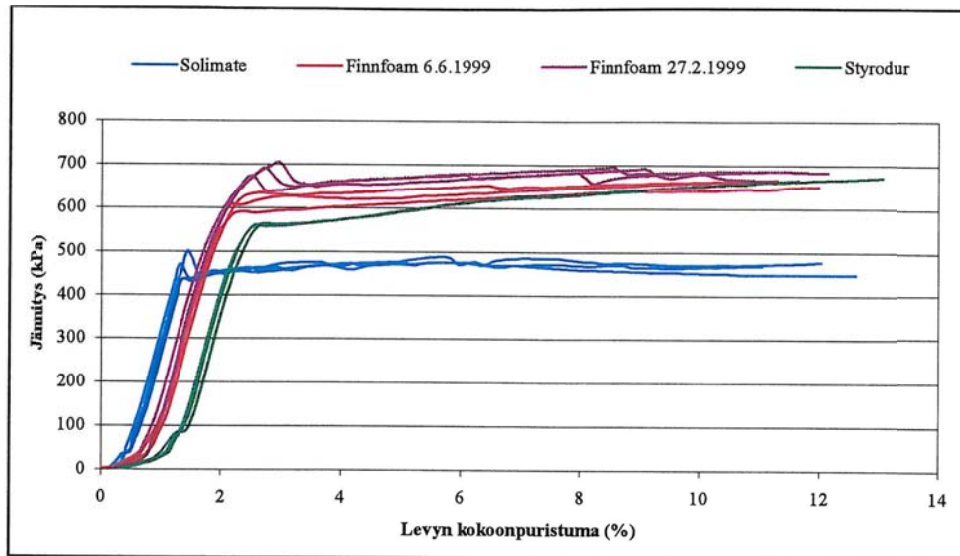
Kuva 2.18. Routalevyjen asennustavat: a) välikerroksen alapuolelle ja b) välikerroksen päälle. [41]

Routalevyihin kohdistuu sekä yläpuolisten rakenteiden painosta aiheutuvaa staattista kuormitusta että junaliikenteestä aiheutuvaa syklistä kuormitusta. Jäykkyyden kannalta routalevyjen mielenkiintoinen ominaisuus on puristuslujuus, koska se vaikuttaa levyn kokoonpuristumiseen junaliikenteen aiheuttamien kuormitusten alaisena. Puristuslujuuden lisäksi routalevyn kestävyyttä ratarakenteessa voidaan arvioida syklisen rasituksen kestävyuden perusteella. Ruotsissa tehdyn mallinnuksen perusteella 250–300 kN akselipainoilla routalevyyn kohdistuu noin 60...100 kPa kuormituksia. Mallinnuksessa oletettiin routalevyn sijaitsevan 0,3 metrin syvyydellä ratapölkyn alapinnasta kiskotyypiltään UIC 60 betoniratapölkkyraiteessa. Lisäksi mallinnuksessa oletettiin jännitysten jakautuvan tukikerroksessa suhteella 2:1, mikä saattaa olla oletuksena ylioptimistinen, sillä todellisuudessa jännitys jakaantuu ainakin osittain sepelirakeiden välisiä ketjuja pitkin. Tällöin kuormitustaso levyn pinnalla on ketjun kohdalla paikallisesti oletettua tasaista kuormitusta suurempi. [41]

XPS-routalevyjen teknisten toimitusehtojen [42] mukaan levyn puristuslujuus tai selvän murtokohdan puuttuessa 10 % kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys määritetään standardin SFS-EN 826 mukaisesti. Koetuloksen tulee olla vähintään 500 kPa. Syklisen rasituksen kestävyys määritetään menetelmän SP-method 2687 mukaisesti. Siinä käytettävä maksimikuorma on 200 kPa ja minimikuorma 10 kPa. Rasituskokeessa kahden miljoonan kuormitusyökin aikana levyyn muodostuvan kokoonpuristuman tulee olla pienempi kuin 5,0 %. Molemmat kokeet tehdään levyille, joita on varastoitu vähintään 45 vuorokautta valmistuksesta lukien.

Kuvassa 2.19 on esitetty Nurmikolon & Kolisojan [41] vuonna 2000 käyttämättömille XPS-levyille tekemien purituskokeiden tuloksia. Näytelevyt olivat kooltaan 130 x 130 mm ja näytteitä kuormitettiin tasaisella 2,0 mm/min nopeudella. Muilta osin koejärjestely vastasi standardia SFS-EN 826. Kuvasta nähdään lähes kaikkien näytelevyjen täyttäneen silloisen puristuslujuuden vaatimuksen 450 kPa. Solimate-levyjen puristuslujuuden alhaisuus verrattuna kahteen muuhun levytyyppiin johtuu ainakin osittain siitä, että se oli kuormitettaessa ainoastaan noin kuukauden ikäinen muiden ol-

tua vähintään kuuden kuukauden ikäisiä. Puristuslujuuden kasvaminen varastoitaessa johtuu levyjen valmistuksessa ponneaineena käytetyn hiilidioksidin poistumisesta levyn solukosta. Tämä levyn ”kypsyminen” on nopeampaa ohuilla levyillä.



Kuva 2.19. Eri XPS-routalevytyypeille ominaisia jännitys-kokoonpuristumakäyriä puristuskokeessa. [41]

XPS-levyn puristuslujuusvaatimuksen täyttäviä routalevyjä ja jopa 700 kPa puristuslujuuden omaavia levyjä on nykyään saatavilla useilta eri valmistajilta. Valmistajien tuotekatalogeissa ratarakenteessa routalevynä käytettäviksi soveltuvien eristelevyjen kimmomoduulit ovat tyypillisesti noin 20...40 MPa valmistajasta ja levytyypistä riippuen [43], [44]. Kuvassa 2.19 esitettyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrien lineaaristen osuuksien kulmakerrointen perusteella määritetyt kimmomoduulit olivat kaikilla levytyypeillä suunnilleen 50 MPa.

Puristuslujuuden lisäksi Nurmikolu & Kolisoja [41] testasivat saman tutkimuksen yhteydessä myös edellä esiteltyjen levytyyppien syklisen rasituksen kestävyyttä eli väsymiskestävyyttä. Levyjen kokoonpuristuma 200 kPa kuormitustasolla ja kahdella miljoonalla kuormitusyhdellä oli levytyypistä riippuen noin 1–2 % eli kaikki levyt täyttivät rasituskokeen 5 % vaatimuksen. Puristuslujuuden ja väsymiskokeessa muodostuvan kokoonpuristuman välillä havaittiin suuntaa antava korrelaatio.

Vaikka EPS- eli muottipaisutettujen polystyreeniroutalevyjen käyttö ei enää nykyään ole sallittua ratarakentamisessa niiden huonon kosteudenvastustuskyvyn takia, niin ehdittiin EPS-levyjä asentaa 1970-luvulla noin 200 ratakilometrille. Lisäksi EPS-levyjä käytetään edelleen esimerkiksi tierakentamisessa. Huonon kosteudenvastustuskyvyn vuoksi EPS-levyjen lämmönjohtavuuden on todettu ajan myötä kasvavan rakenteessa huomattavasti alkuperäisestä. [41]

Nurmikolu & Kolisoja [45], [46] ovat vuosina 2001 ja 2003 tehneet laboratorioskokeita ratarakenteesta otetuille, 25 – 50 mm paksuisille EPS-routalevynäytteille. Kuivatuille näytteille tehtyjen puristuskokeiden koejärjestelyt olivat samat kuin edellä esiteltyjen XPS-levyjen puristuskokeiden kohdalla. Tehtyjen puristuskokeiden jännitys-kokoonpuristumakäyrien lineaaristen osuuksien kulmakerrointen perusteella määritetyt kimmomoduulit olivat pääosin välillä 2...5 MPa. Standardin SFS-EN 826 mukaiset

10 % kokoonpuristumaa vastaavat puristusjännitykset olivat enintään noin puolet nykyisestä 500 kPa puristuslujuusvaatimuksesta.

Jäykkyysnäkökulmasta routalevyjen toinen mielenkiintoinen ominaisuus on niiden vaikutus ratarakenteen dynaamiseen käyttäytymiseen nopean junaliikenteen alla. Tarkasteltaessa XPS-levyn kokoonpuristumaa ratarakenteessa esimerkiksi aikaisemmin mainitun 100 kPa kuormituksella ja XPS-levyä vastaavalla kimmomoduulilla 50 MPa, voidaan todeta levyn kokoonpuristuman olevan 40...120 mm levypaksuuksilla välillä 0,08...0,24 mm. On kuitenkin huomioitava, että varsinkin välikerroksen yläpuolelle asennetussa routalevyssä kuormitus ei jakaudu tasaisesti levyn koko pinnalle, vaan ainakin osittain raidesepeleirakeiden välisiä ketjuja pitkin. Suuremman kuormitustason lisäksi tämä aiheuttaa raidesepeleirakeiden painautumista routalevyihin. [41]

Lisäksi on huomioitava, että kuvan 2.19 käyrien alkupäiden mukaan esimerkiksi jo 50 kPa kuormituksella XPS-levyjen kokoonpuristumat ovat suuruusluokaltaan noin 0,5...1,0 %, kun huomioidaan myös pienellä kuormituksella tapahtuva suhteellisen suuri kokoonpuristuma. Routalevyn yläpuolella oleva ratarakenne toimii käytännössä esikuormituksena, mutta varsinkaan välikerroksen yläpuolelle asennettujen levyjen kohdalla esikuormitusvaikutus ei ole kovin suuri.

Nurmikolu & Kolisoja [45] arvioivat normaalisyvyydelle asennettuun EPS-routalevyyn vaikuttavan 100 kPa kuormituksen aiheuttavan jäykkyydestä riippuen suuruusluokaltaan jopa 2–5 % kimmoisen kokoonpuristuman. Näin ollen esimerkiksi 100 mm EPS-routalevy voi periaatteessa aiheuttaa raiteessa suuruudeltaan 2–5 mm palautuvan painuman, joka on huomattavasti suurempi kuin vastaavan kuormituksen samanpakuiselle XPS-routalevylle aiheuttama kimmainen kokoonpuristuma.

2.2.11 Pohjamaa

Pohjamaalla (*subgrade, subsoil*) tarkoitetaan ratapenkereen alla olevaa luonnontilais- tai eri tavoin lujitettua maata. Pohjamaa voi koostua useista eri maalajeista alueesta riippuen. Pohjamaan koostumus ja ominaisuudet selvitetään tyypillisesti kairauksin ja niiden yhteydessä otetuille näytteille tehtävin laboratoriotutkimuksin. [34]

Radalla liikkuvan kaluston kuormitusvaikutus ulottuu useimmiten pohjamaan saakka. Lisäksi pohjamaan päälle rakennetut radan rakennekerrokset aiheuttavat pysyvän kuormituksen pohjamaalle. Selig & Waters [8] nostavat pohjamaan tärkeimmäksi alusrakenteen raiteelle antamaan tukeen vaikuttavaksi tekijäksi. Pohjamaan ominaisuuksilla on erittäin suuri merkitys radan taipumiin junakuormien alla sekä koko ratapenkereen stabiliteettiin, painumiin ja painumaeroihin.

Perinteisesti pohjamaata on arvioitu ratarakentamisen yhteydessä sen stabiliteetin ja painumapotentiaalin kautta. Stabiliteetiltaan heikkojen ratapenkereiden vahvistamiseen ja liian suurien painumien ehkäisyyn on olemassa useita eri menetelmiä. Menetelmien käyttömahdollisuudet vaihtelevat paljon esimerkiksi olemassa olevan ja uuden radan välillä. Olemassa oleville ratapenkereille tyypillisin stabiliteetin parantamiskäytännöt ovat vastapenkereet, mutta myös massanvaihtoja ja erilaisia stabilointeja käytetään. Uuden ratapenkereen kohdalla on edellisten lisäksi paremmat mahdollisuudet hyödyntää esimerkiksi esikuormituspenkereitä tai rakentaa paalulaatta ratapenkereen alle. Vahvistusmenetelmistä esimerkiksi massanvaihdot ja paalulaatta kasvattavat merkittävästi pohjamaan tai radan perustuksen jäykkyyttä. Parhaiten ku-

hunkin kohteeseen soveltuvan menetelmän valinta edellyttää kattavia pohjatutkimus- ja laboratoriokoetietoja sekä ennakkosuunnittelua ja -laskelmia. [47]

Suomessa erilaiset pohjaolosuhteet luokitellaan tyypillisesti maalajiin perustuen. Paikoin luokittelun tarkennuksina käytetään esimerkiksi kosteusolosuhteita tai hienoainespitoisuutta. Taulukossa 2.2 on esitetty pääpiirteittäin InfraRYL 2010 liitteessä T1 käytetty luokittelu. Pohjamaan kantavuuden, joka voidaan käsittää myös jäykkyydeksi, vaihteluväli on siis laaja. Luonnossa tämänkaltainen, yli kymmenkertainen vaihtelu eli pohjamaan muuttuminen esimerkiksi turpeesta kallioksi on mahdollista radan pituussuunnassa lyhyenkin matkan sisällä. [39]

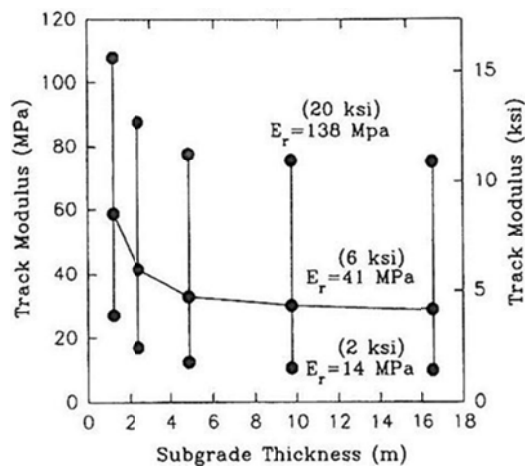
Taulukko 2.2. Pohjamaan kantavuusluokitus InfraRYL 2010 mukaan. Muokattu lähteestä [39]

Maalaji	Tarkennus	Luokka	Kantavuus [MPa]
Kallio	kallio louhe murske	A	300
Kivet		A	300
Sora		B	150...280
Soramoreeni	routimaton	C	70...150
	routiva	E	15...35
Hiekka	routimaton karkea	C	70...150
	routimaton keskik.	D	35...70
	routimaton hieno	D	35...70
	routiva keskik.	E	15...35
	routiva hieno	E	15...35
Hiekkamoreeni	routimaton	D	35...70
	routiva	E	15...35
Siltti		F	5...15
Silttimoreeni			
Savi	kuivakuori ($h \geq 1$ m)	E	15...35
	sitkeä ($S_u \geq 25$ kN/m ²)	F	5...15
	pehmeä ($S_u < 25$ kN/m ²)	G	5
Lieju		G	5
Turve			

Selig & Li [4] ovat tutkineet sekä pohjamaan muodonmuutosmoduulin että pohjamaakerroksen paksuuden vaikutusta radan jäykkyyteen. Pohjamaan muodonmuutosmoduulilla havaittiin olevan erittäin merkittävä vaikutus radan jäykkyyteen. Vaihdettaessa pohjamaan jäykkyyttä kuvaava muodonmuutosmoduuli arvosta 14 MPa arvoon 138 MPa, radan jäykkyyttä kuvaava ratamoduuli kasvoi noin kahdeksankertaiseksi. Pohjamaan tiheytenä käytettiin 1920 kg/m³ ja Poissonin lukuna 0,35. Mallinuksessa pohjamaakerros oletettiin paksuudeltaan äärettömäksi, mikä osaltaan, yhdessä melko ohuiden tukikerroksen ja välikerroksen kanssa, kasvattaa pohjamaan muodonmuutosmoduulin merkitystä.

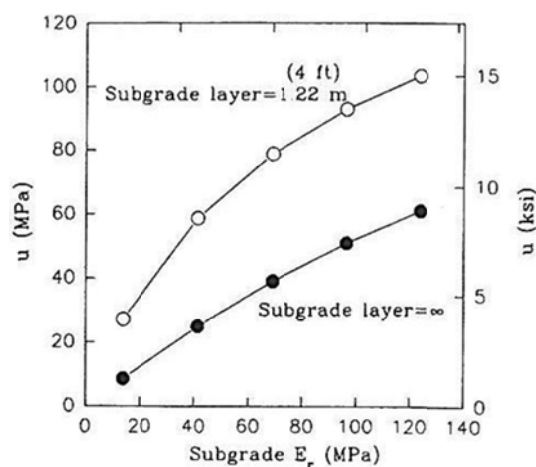
Samaisen tutkimuksen yhteydessä tarkasteltiin myös pohjamaakerroksen paksuuden vaikutusta radan jäykkyyteen. Tarkastelussa pohjamaakerroksen paksuutta vaihdeltiin 1,22 metristä äärettömään. Kuvassa 2.20 on esitetty pohjamaan kerrospaksuuden ja muodonmuutosmoduulin vaikutus radan jäykkyyttä kuvaavaan ratamoduuliin. Kuvassa esitettyjen pisteryhmien ylimmät pisteet on saatu käyttämällä pohjamaan muodonmuutosmoduulina 138 MPa, keskimmäiset pisteet muodonmuutosmoduulilla 41 MPa ja alimmat pisteet muodonmuutosmoduulilla 14 MPa. Kuvasta voidaan havaita, että pohjamaakerroksen paksuuden kasvattaminen pienentää radan kokonaisjäyk-

kyyttä. Kokonaisjäykkyyden pieneneminen ei kuitenkaan ole lineaarista, vaan on ohuilla, suunnilleen 0...5 m paksuisilla pohjamaakerroksilla nopeampaa ja hidastuu pohjamaan kerrospaksuuden edelleen kasvaessa. Kuten jo aiemmin kävi ilmi, pohjamaan muodonmuutosmoduulilla on kerrospaksuuden lisäksi erittäin merkittävä vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen. Vertailtaessa ratamoduulin arvoja esimerkiksi 1,22 m ja 16,5 m paksuisten pohjamaakerrosten kohdilla, havaitaan, että radan kokonaisjäykkyyden suhteellinen muutos on suuren muodonmuutosmoduulin omaavilla pohjamailla vähäisempi. Muodonmuutosmoduulin 138 MPa omaava pohjamaa pienentää ratamoduulia noin 30 % kerrospaksuuden kasvaessa 1,22 metristä 16,5 metriin, kun taas muodonmuutosmoduulin 14 MPa omaavan pohjamaan kohdalla vastaava muutos on noin 60–70 %.



Kuva 2.20. Pohjamaakerroksen kerrospaksuuden ja muodonmuutosmoduulin vaikutus radan kokonaisjäykkyyttä kuvaavaan ratamoduuliin. [4]

Kuvassa 2.21 on havainnollistettu hieman eri näkökulmasta erilaisten pohjaolosuhteiden vaikutusta ratamoduuliin u . Kuvassa on esitetty valkoisilla pisteillä pohjamaan kerrospaksuudella 1,22 m saadut arvot ja mustilla pisteillä äärettömän paksulla pohjamaakerroksella saadut arvot.

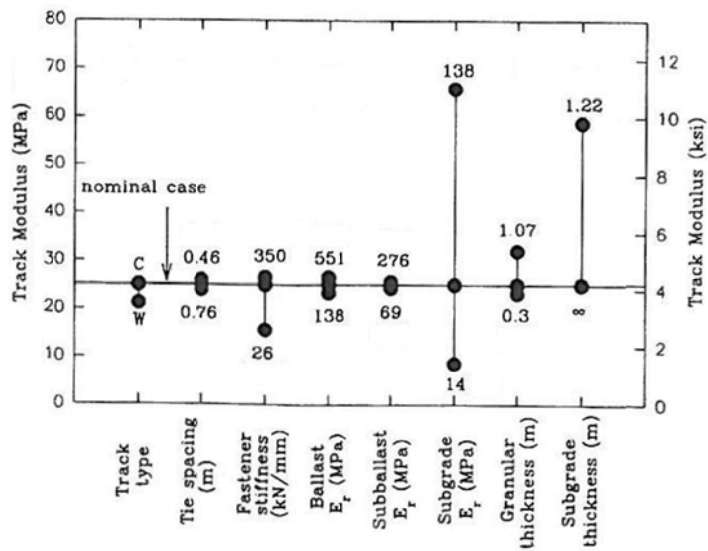


Kuva 2.21. Pohjamaan muodonmuutosmoduulin vaikutus radan kokonaisjäykkyyttä kuvaavaan ratamoduuliin u pohjamaakerroksen paksuudella 1,22 m ja äärettömän paksulla pohjamaakerroksella. [4]

Kuvasta 2.21 voidaan havaita, että sama ratamoduulin arvo voidaan saavuttaa useilla erilaisilla pohjamaan kerrospaksuuden ja muodonmuutosmoduulin yhdistelmällä. Lisäksi on huomionarvoista, että ohuella pohjamaakerroksella muodonmuutosmoduulin vaikutus ratamoduuliin on paksuja pohjamaakerroksia merkittävämpi. Äärettömän paksulla pohjamaakerroksella muodonmuutosmoduulin vaikutus on lähes lineaarinen.

2.2.12 Yhteenveto radan rakenneosien vaikutuksesta radan jäykkyyteen

Luvuissa 2.2.2–2.2.11 esiteltiin radan pystysuuntaisen jäykkyyden kannalta merkittävimpiä radan rakenneosia ja niiden jäykkyysominaisuuksia. Tehdyn kirjallisuustutkimuksen perusteella radan kokonaisjäykkyyden kannalta merkittävimmät radan rakenneosat tai niihin liittyvät tekijät ovat joustavat elementit, kuten välilevy ja pohjain, karkearakeisten rakennekerrosmateriaalien kerrospaksuudet sekä pohjamaan muodonmuutosmoduuli ja kerrospaksuus. Selig & Li [4] toteavat pohjamaan ominaisuuksilla olevan yllä mainituista tekijöistä ehdottomasti suurin vaikutus, mikä käy hyvin ilmi myös kuvasta 2.22. Kuvassa on esitelty kootusti Seligin ja Lin mallinnuksessa käyttämien rakenneosien jäykkyysominaisuudet ja niiden vaihtelun vaikutus ratamoduuliin. Kuvassa esitettyä perustapausta (*nominal case*) sekä ylä- ja alarajoja kuvaavat parametrit on esitetty taulukossa 2.3.



Kuva 2.22. Yhteenveto radan rakenneosien jäykkyyden vaikutuksesta ratamoduuliin. [4]

Taulukko 2.3. Mallinnuksessa käytetyt parametrit. [4]

Variable	Lower bound	Nominal	Upper bound
Track type	Wood	Concrete	--
Tie spacing - m (in.)	0.46 (18)	0.61 (24)	0.76 (30)
Fastener stiffness - kN/mm (kips/in.)	26 (150)	175 (1,000)	350 (2,000)
Ballast E_T - MPa (ksi)	138 (20)	276 (40)	551 (80)
Subballast E_T - MPa (ksi)	69 (10)	138 (20)	276 (40)
Subgrade E_T - MPa (ksi)	14 (2)	41 (6)	138 (20)
Ballast thickness - m (in.)	0.15 (6.0)	0.30 (12.0)	0.61 (24.0)
Subballast thickness - m (in.)	0.15 (6.0)	0.15 (6.0)	0.46 (18.0)
Subgrade thickness - m (ft)	1.22 (4.0)	infinity	--

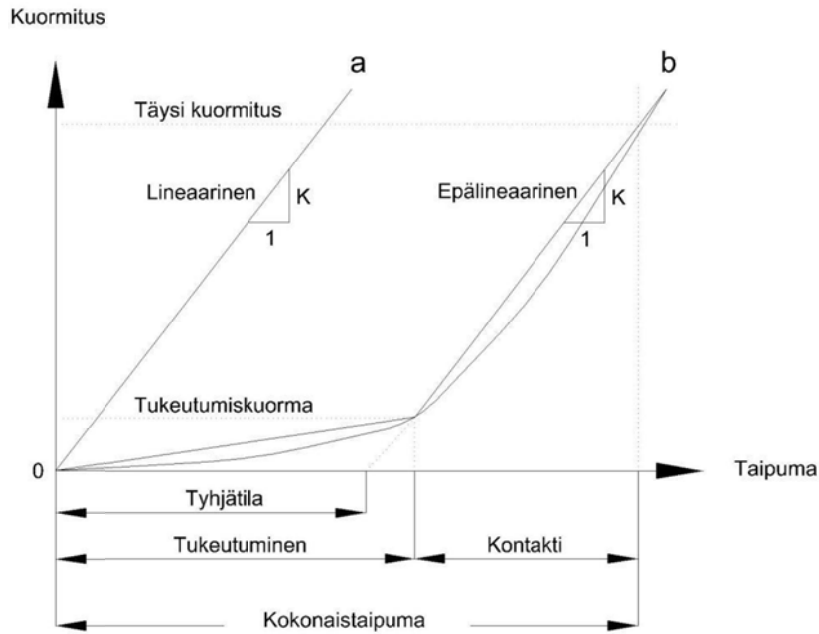
Note: Dash (--) indicates "not applicable".

Kuvaa 2.22 tarkasteltaessa on kuitenkin huomattava, ettei edellä mainitussa tutkimuksessa käytetty ratarakenne vastaa täysin perinteistä suomalaista ratarakennetta varsinkaan rakennekerrosten paksuuden osalta. Näin ollen eri rakenneosien suhteellinen vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen ei välttämättä absoluuttisesti vastaa tilannetta suomalaisten ratarakenteiden kohdalla, mutta vaikutusten voitaneen olettaa olevan hyvin samansuuntaisia ja -suuruisia.

2.3 Radan epälineaarinen kuormitus-käyttäytyminen

Pyrittäessä arvioimaan radan toimintaa mitatun kokonaisjäykkyyden perusteella, on ensin ymmärrettävä, mistä kokonaisjäykkyyden muodostava radan kokonaistaipuma kuormitettaessa muodostuu. Tällä radan kuormitus-taipuma-käyttäytymisellä on merkittävä vaikutus myös siihen, mitä suureita tulisi pyrkiä mittaamaan ja millaisia ominaisuuksia jäykkyyden mittausten menetelmältä vaaditaan.

Sussmannin et al. [48] mukaan ideaalitapauksessa, eli radan ollessa erinomaisessa kunnossa, radan kuormitus-taipuma-käyttäytyminen on kuvan 2.23 käyrän a mukaisesti lineaarista tai radan rakenneosien epälineaarista kuormituskäyttäytymisestä johtuen lievästi epälineaarista. Käytännössä tällainen tilanne voi toteutua lähinnä hiljattain rakennetuilla tai tuetuilla radoilla, joilla ratapölkyt tukeutuvat optimaalisesti tukikerrokseen. Mittausnäkökulmasta käyrän a tapauksessa riittää kokonaistaipuman mittaaminen täydellä, esimerkiksi todellista liikennettä vastaavalla, kuormituksella. Ratapölkyn alaisesta tyhjätilasta ja radan rakenneosien kuormituskäyttäytymisen epälineaarisuudesta johtuen kuvan 2.23 käyrän b mukainen kuormitus-taipuma-käyttäytyminen kuvaa paremmin todellisuutta. Tällöin mitattu kokonaistaipuma täydellä kuormituksella kuvaa ainoastaan kyseisillä huippuarvoilla syntyvää tilannetta, eikä kerro mitään taipuman suhteellisesta kasvusta kuormituksen lisääntyessä.



Kuva 2.23. Radan tyypillinen kuormitus-taipuma-käyttäytyminen. Muokattu lähteestä [48]

Tarkasteltaessa kuvan 2.23 käyrän b alkuosaa nähdään, että oletetusta ratapölkkyjen alaisesta tyhjätilasta johtuen taipuma kasvaa verrattain nopeasti alhaisellakin kuormitustasolla. Kuormituksen edelleen kasvaessa saavutetaan tilanne, jossa taipuma on ylittänyt tyhjätilan suuruuden ja ratapölkky on kauttaaltaan kontaktissa tukikerrokseen. Tätä tilannetta vastaavaa kuormitusta kutsutaan tukeutumiskuormaksi. Rata-pölkyn ollessa kontaktissa tukikerrokseen, on radan kuormitus-taipuma-käyttäytyminen lähes lineaarista. Tätä kuvaa käyrän a ja käyrän b loppuosan sama kulmakerroin. Sussmannin et al. [48] mukaan tyhjätila myötävaikuttaa erittäin merkittävästi radan taipumakäyttäytymisen epälinearisuuteen ja se voidaan määrittää käyrän b lineaarisen loppuosan jatkeen ja taipuma-akselin leikkauskohdan avulla. Tällä tavoin määriteltynä tyhjätila kuvaa taipumaosuutta, jolla ei teoriassa ole lainkaan kuormituksen vastustuskykyä.

Kokonaisjäykkyyden mittaamisen näkökulmasta käyrän a tapauksessa riittäisi siis vain kokonaistaipuman mittaaminen täydellä kuormituksella olettaen samalla taipuman kasvavan lineaarisesti kuormituksen kasvaessa. Ongelmalliseksi asian tekee se, että kuormituskäyttäytymisen lineaarisuus tulisi todeta jotenkin, jotta kyseinen oletus voitaisiin tehdä. Käyrän b tapauksessa kokonaistaipuman mittaaminen täydellä kuormituksella ei taas oletettavasti anna todellista kuvaa radan taipuman kehitymisestä kuormituksen kasvaessa. Yllä mainitun perusteella kokonaisjäykkyyden mittausmenetelmän tulisi siis molemmissa tapauksissa mahdollistaa kuormitustason säätely siten, että voidaan joko todentaa kuormituskäyttäytymisen lineaarisuus tai selvittää epälineaarisen kuormitus-taipuma-käyrän muoto.

Toinen mielenkiintoinen radan kuormituskäyttäytymiseen liittyvä kysymys on se, mitä kuormitusta tai kuormitusväliä käyttäen radan kokonaisjäykkyys tulisi määrittää. Jos esimerkiksi käyrän b tapauksessa kokonaisjäykkyys määritetään nollakuormituksen ja täyden kuormituksen väliltä, voidaan saatavan kokonaisjäykkyyden tuki todeta edustavan kyseisen rataosuuden kokonaistaipumaa, mutta on hankalaa arvioida missä osassa ratarakennetta merkittävimmät taipumat syntyvät. Erään ajatusmallin mukaan

radan taipuma voidaan mitata kahdelta kuormitusväliltä. Ensimmäisellä kuormitusvälillä taipuma mitataan nollakuormituksen ja kevyen kuormituksen välillä. Näin toimimalla saadaan ensisijaisesti selville mahdollisen ratapölkyn alaisen tyhjätilan suuruus eli käytännössä tieto tuentatilanteesta. Toisella kuormitusvälillä radan taipuma määritetään kevyen ja täyden kuormituksen välillä. Tällä kuormitusvälillä syntyvä taipuma kuvaa ensisijaisesti rakennekerrosten ja pohjamaan jäykkyyttä. Näin ollen jakamalla kuormitus kahteen kuormitusväliin, voidaan ainakin jollain tarkkuudella arvioida päällysrakenteessa ja alusrakenteessa sekä pohjamaassa syntyviä taipumia erikseen, mikä taas saattaa mahdollistaa esimerkiksi heikompien rakenneosien likimääräisen paikallistamisen rakenteessa. Yllä esiteltyä kuormitusväliasiaa käsitellään myös luvussa 3.2, missä annetaan myös joitain esimerkkejä kuormitusvälien lukuarvoista.

2.4 Kokonaisjäykkyys radan toiminnan indikaattorina

Edellisissä luvuissa esiteltiin radan rakenneosien jäykkyysominaisuuksia ja todettiin radan kokonaisjäykkyyden muodostuvan radan kaikkien rakenneosien jäykkyyksien yhteisvaikutuksesta toisten osien vaikutuksen ollessa merkittävämpi ja toisten vähäisempi. Käytännössä radasta mitattu jäykkyys kuvaa siis kaikkien rakenneosien yhdessä muodostamaa kokonaisjäykkyyttä. Erityisesti radan elinkaaren näkökulmasta on mielenkiintoista, voidaanko mitatun kokonaisjäykkyyden perusteella päätellä jotain yksittäisen radan rakenneosan kunnosta tai sen kokemista rasituksista. Lähtökohtaisesti yksittäisen rakenneosan kokemien rasitusten tarkasteleminen radan kokonaisjäykkyyden avulla on erittäin haasteellista rakenneosien yhteistoiminnan monitukaisten syy-seuraussuhteiden takia. Radan kokonaisjäykkyyden perusteella saattaa kuitenkin olla mahdollista saada vähintään yleispiirteinen kuva radan kuormituksesta joihinkin radan rakenneosiin kohdistuvista rasituksista.

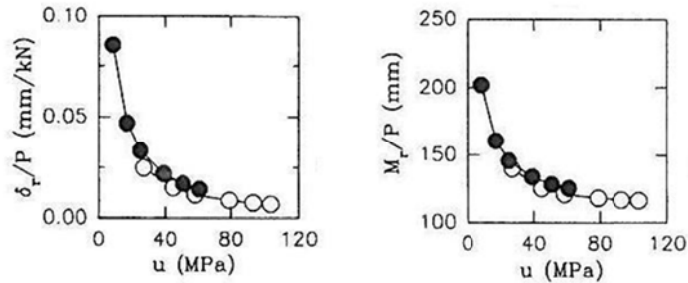
Luvuissa 2.4.1 – 2.4.3 pyritään avaamaan radan kokonaisjäykkyyden roolia radan toiminnan indikaattorina. Radan rakenneosien lukuisten vuorovaikutussuhteiden monitukaaisuudesta johtuen esittely nähtiin parhaaksi tehdä näkökulmasta, jossa oletetaan radan kokonaisjäykkyyden jo olevan mitatun ja tietyn suuruuden tai luonteen omaava. Raportin tässä vaiheessa ei varsinaisesti oteta kantaa siihen, mikä on lukuarvoltaan suuri tai alhainen kokonaisjäykkyys. Käsittelyssä edetään ratarakenteen pystysuunnassa kiskoista alkaen aina pohjamaahan saakka ja pyritään samalla havainnollistamaan mitä oletettu radan kokonaisjäykkyys voisi indikoida kuhunkin rakenneosaan kohdistuvista rasituksista. Selkeyden vuoksi tekstissä on myös tiivistysti esitelty joitain radan rakenneosille ominaisia vaurioitumis-/kulumismekanismia. Lopuksi tarkastellaan radan kokonaisjäykkyyden suhdetta radalla liikennöinnin ympäristövaikutuksiin, kuten meluun ja värinään.

2.4.1 Radan kokonaisjäykkyyden suuruus

Kisko

Suuren kokonaisjäykkyyden omaavalla radalla kuormituksen aiheuttama taipuma tai kokoonpuristuma kaikissa radan rakenneosissa on huomattavan vähäistä. Näin ollen myös kiskon taipuma jää pieneksi. Selig & Li [4] ovat tutkineet ratamoduulin suhdetta kiskon taivutusrasitukseen. Kuvassa 2.24 on vasemmanpuoleisessa kuvaajassa esitetty

radan kokonaisjäykkyyden funktiona GEOTRACK -mallinnuksella saatu kuormituksen suhteen suhteellistettu kiskon taipuma ja oikeanpuoleisessa kuvaajassa taivutusmomentti.



Kuva 2.24. Ratamoduulin u suhde kiskon taipumaan (vas.) ja taivutusmomenttiin (oik.) kuormituksen suhteen. Muokattu lähteestä [4]

Kuvasta 2.24 nähdään, että suuren kokonaisjäykkyyden omaavalla radalla kiskon taivutusrasitukset ovat pieniä. Huomattavaa on myös, että suurilla ratamoduulin arvoilla ratamoduulin muutoksen merkitys kiskon taivutusrasitukseen on vähäisempi.

Vaikka jäykällä radalla kiskon taivutusrasitukset jäävät pieniksi, Berggrenin [6] mukaan kiskon ja pyörän väliset kontaktivoimat voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. Myös Chaar & Berg [49] ovat mallinnusten perusteella todenneet rataa kohdistuvien pysty- ja vaakasuuntaisten voimien olevan jäykällä radalla suurempia sekä lisäksi vahvasti tiettyihin taajuuksiin keskittyneitä. Yleisesti ottaen jäykällä radalla pitkän korugaation (*long pitch corrugation*) ja vierintäväsytymisen (*rolling contact fatigue, RCF*) kaltaisten kiskon pintavikojen todennäköisyys on suurempi johtuen jäykän radan riittämättömistä jousto-/vaimennusominaisuuksista dynaamisia kuormituksia ja iskuvoimia vastaan [50].

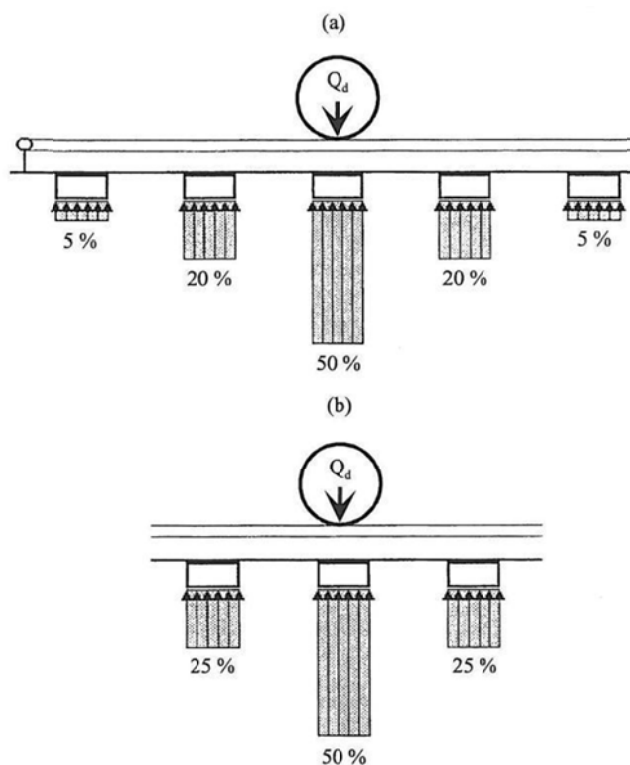
Korugaatio ilmenee kiskon kulkupinnassa suhteellisen jaksottaisena aaltoiluna, joka voidaan jakaa lyhyeen ja pitkään korugaatioon kyseisen aaltoilun aallonpituuden mukaan. Kiskoon muodostunut korugaatio lisää rataa kohdistuvia dynaamisia kuormituksia ja melua. Korugaatio voidaan poistaa kiskonhionnan avulla, mutta elinkaartiloudellisesti on kannattavampaa pyrkiä poistamaan korugaatiota aiheuttavat tekijät. Vierintäväsytymisen käsittää joukon vikoja, jotka ovat seurausta kaluston pyöri- en aiheuttamasta kiskon materiaalin toistuvasta ylikuormituksesta. Toistuva ylikuormitus johtaa materiaalin muokkautumiseen ja lopulta säröjen syntymiseen. Säröt voivat muodostua kiskon eri osiin ja pahimmillaan johtaa kiskon murtumiseen. Vierintäväsytymisen on lisääntynyt yleisesti viime vuosikymmeninä ja syinä tähän pidetään muun muassa kasvaneita akselipainoja ja nopeuksia. Kiskovioista ja niiden muodostumisesta on kerrottu tarkemmin esimerkiksi Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä -sarjan julkaisussa 01/2011 ”Ratakiskon elinkaari”. [9]

Kuvan 2.24 perusteella alhainen radan kokonaisjäykkyys ennakoii suurehkoja taivutusrasituksia kiskossa. Jatkuvat huomattavan suuret taipumat ovat haitallisia kiskolle. Toisaalta taas alhaisen kokonaisjäykkyyden omaavalla radalla ainakin tiettyjen kiskovikojen todennäköisyys pienenee, sillä radan jousto-/vaimennusominaisuudet dynaamisia kuormituksia ja iskuvoimia vastaan ovat paremmat. [4], [50]

Ratapölkky ja tukikerros

Radan kokonaisjäykkyys vaikuttaa merkittävästi kuormituksen jakautumiseen peräkkäisten ratapölkkyjen kesken radan pituussuunnassa. Hyvin jäykällä radalla kuormitus välittyy vain lähellä kuormituspistettä olevien ratapölkkyjen kautta, jolloin yksittäiseen ratapölkkyyn ja tukikerrokseen kohdistuvat voimat kasvavat suuriksi [6]. Betoniratapölkkyissä liikennekuormituksen aiheuttamat halkeamat sijaitsevat todennäköisesti joko ratapölkyn alapinnassa kiskon lepopinnan kohdalla tai yläpinnassa ratapölkyn keskellä. Kiskon kohdalla ratapölkyn alapinnassa esiintyvät halkeamat ovat yleisiä ja johtuvat useimmiten suurista ratapölkkyyn kohdistuneista iskuvoimista. Nämä halkeamat eivät välittömästi estä ratapölkkyä täyttämästä sen ensisijaista tehtävää, mutta voivat silti lyhentää ratapölkyn käyttöikää. [51]

Hyvin yleisesti käytettyjä yleistyksiä kuormituksen jakautumisesta ratapölkkyjen kesken ovat esittäneet Raymond [52] ja Riessberger [53]. Raymond [52] on esittänyt yksinkertaistuksen, jonka mukaan välittömästi pyöräkuorman alla oleva ratapölkky välittää kokonaiskuormasta 50 % ja viereiset ratapölkkyt 25 % kumpikin kuvan 2.25 b-kohdan mukaisesti. Riessbergerin [53] mukaan pyöräkuorma jakautuu kuorman alla olevalle ja sen viereisille ratapölkkyille suhteessa 5 % - 20 % - 50 % - 20 % - 5 % kuvan 2.25 a-kohdan mukaisesti. Maksimikuormituksen kannalta tilanne on siis molemmilla malleilla sama. [2]



Kuva 2.25. Pyöräkuorman jakautuminen (a) Riessbergerin ja (b) Raymondin esittämällä likimääräisillä menetelmillä. [2]

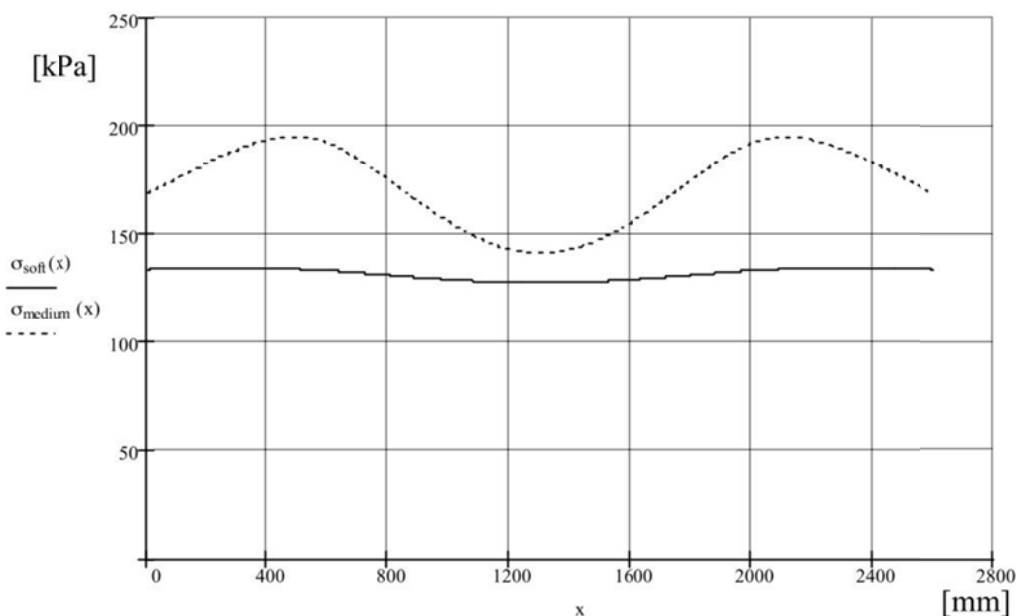
Skoglundin [3] mukaan kuormituksen jakautuminen pyöräkuorman alla olevan ja sen viereisten ratapölkkyjen kesken riippuu ratamoduulista taulukon 2.4 mukaisesti. Tulokset on saatu käyttämällä BOEF -mallinnustarkastelussa laskentapyöräkuormaa 154 kN ratapölkyn nro 0 päällä ja ratapölkkyväliä 600 mm.

Taulukko 2.4. BOEF -mallinnustarkastelun mukainen kuormituksen jakautuminen ratapölkkyjen kesken ratamoduulista riippuen. Muokattu lähteestä [19]

Radan jäykkyys	Ratamoduuli [N/mm ²]	Välittyvän kuormituksen osuus ratapölkkyllä no.						
		3	2	1	0	1	2	3
Joustava	30	3 %	11 %	22 %	29 %	22 %	11 %	3 %
Keskimääräinen	90	-	7 %	24 %	38 %	24 %	7 %	-
Jäykkä	150	-	4 %	24 %	43 %	24 %	4 %	-

Taulukosta 2.4 huomataan, että jäykkä ratarakenne johtaa suurempiin maksimikuormiin suoraan kuormituksen alla olevan ratapölkyn kohdalla. Vastaavasti taulukosta 2.4 on havaittavissa, että alhaisen kokonaisjäykkyyden omaavalla radalla pyöräkuorma jakautuu radan pituussuunnassa useammalle ratapölkylle ja suoraan pyöräkuorman alapuolella olevan ratapölkyn kohdalla maksimikuormitus on pienempi. Tämä oletus ei kuitenkaan toteudu silloin, kun kiskon taivutusjäykkyys on hyvin pieni.

Skoglund [3] on mallintanut myös ratapölkystä tukikerrokseen välittyvän kuormituksen jakautumista yksittäisen ratapölkyn pituussuunnassa ratamoduulin arvoilla 30 N/mm² (soft) ja 90 N/mm² (medium). Kuvasta 2.26 nähdään, että joustavassa ratarakenteessa ratapölkystä välittyvä kuormitus jakautuu tasaisemmin kuin jäykemmässä ratarakenteessa, jossa kuormitus keskittyy kiskoja alla olevalle ratapölkyn osalle. Mallinnuksessa on käytetty laskentapyöräkuormaa 154 kN ja kuormituksen on oletettu jakautuvan ratapölkkyjen kesken taulukon 2.4 mukaisesti.



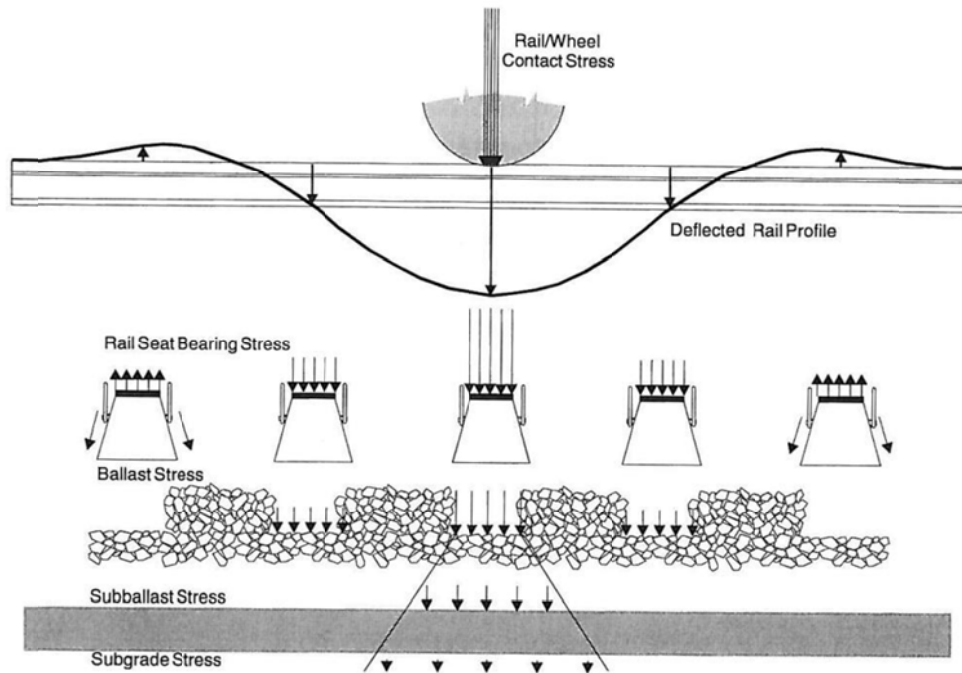
Kuva 2.26. Betoniratapölkystä välittyvän kuormituksen jakautuminen ratapölkyn pituussuunnassa radan jäykkyydestä riippuen. [3]

Kuvan 2.26 havaintoihin liittyen, raidesepelin hienonemisen kannalta ei ole samantekevää, kohdistuuko tukikerrokseen kiskon alapuolella joustavamman ratapölkyn mukainen kuormitus vai lähes puolitoistakertainen jäykemmän ratapölkyn mukainen kuormitus, sillä raidesepelin hienonemisen kannalta olennaista on keskimääräisen jännityksen sijaan maksimikuormituksen suuruus. [19]

Lähtökohtaisesti ratapölkyn oletetaan kantavan päistään, jolloin myös tukikerrokseen kohdistuvat kuormitukset keskittyvät ratapölkyn päiden alueelle. Tämän voidaan olettaa toteutuvan rataosuudella, jolta on mitattu hyvin suuri kokonaisjäykkyys, sillä ratapölkyn päiden alapuolinen tyhjätila kasvattaa huomattavasti radan kokonaistaipumaa ja näin ollen alentaa radan kokonaisjäykkyyttä. Suuren mitatun kokonaisjäykkyyden voidaan siis nähdä ratapölkkyjen tukeutumisen osalta ilmaisevan vähintään kohtuullista tukeutumistilannetta. Vaikka ratapölkkyt tukeutuisivat tukikerrokseen mitaushetkellä lähes optimaalisesti, näin ei välttämättä ole jatkossa, sillä mikäli tukikerros tai ratarakenteen alemmat osat eivät kestä keskittynyttä kuormitusta, syntyy tälle alueelle toistokuormituksessa pysyviä muodonmuutoksia muun muassa tukikerroksen raideseppelin hienonemisen myötä. Näiden muodonmuutosten myötä ratapölkyn päiden tuenta heikkenee ja siirtyy enenevässä määrin ratapölkyn keskelle. Ratapölkyn päiden alueelle saattaa pysyvien muodonmuutosten seurauksena muodostua tyhjätila, jonka merkitystä radan kokonaisjäykkyyden muodostumisessa käsiteltiin aiemmin luvuissa 2.2.5 ja 2.3. [54]

Alhainen kokonaisjäykkyys saattaa indikoida ratapölkkyjen heikosta tukeutumistilanteesta, jolloin ratapölkkyt iskeytyvät tukikerroksen yläpintaan jokaisen akselin ylityksen kohdalla. Toisaalta tukeutumistilanteen ollessa hyvä, alhainen radan kokonaisjäykkyys indikoi mitä todennäköisimmin suurta pohjamaan taipumaa ja näin ollen suurta taipumaa myös tukikerroksessa. Tukikerroksen suuri taipuma lisää raideseppelin rakeiden välistä hieroutumista toisiaan vasten. Kumpikin yllämainittu ilmiö on raideseppelin hienonemisen kannalta epäedullinen.

Yllä esitellyn kuormituksen epäsuotuisan jakautumisen lisäksi raideseppelin hienonemiselle mahdollisesti hyvinkin määräävä ilmiö saattaa olla kiskon taivutusmomentista aiheutuva raiteen nousu tietyllä etäisyydellä pyörän ja kiskon kontaktikohdasta. Tämä ilmiö, jota on havainnollistettu kuvassa 2.27, on todennettu useissa kenttämittauksissa ja mallinuksissa. Taivutusmomentin seurauksena ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen kontakti häviää hetkellisesti, mikäli nostava voima ylittää raiteen kokonaispainon ja ratapölkyn sivuihin tukikerroksesta kohdistuvat pystysuuntaiset voimat. [19]



Kuva 2.27. Periaatekuva kiskon taivutusmomentin tietyllä etäisyydellä kuormituskohdasta aiheuttamasta raidetta nostavasta voimasta. [8]

Kuvan 2.27 kaltaisessa tilanteessa toistuvat akselinyllitykset aiheuttavat ratapölkyn toistuvaa iskeytymistä tukikerrokseen, mikä luonnollisesti lisää raidesepelin hienonemisen todennäköisyyttä sekä muiden radan osien kulumista. Kuten jo aiemmin tässä luvussa kävi ilmi, jäykällä radalla kiskon taipuma ja sitä myöten myös taivutusmomentti jäävät pienemmiksi. Tällöin myös raidetta nostavan voiman suuruus on jäykällä radalla joustavaa rataa pienempi. Näin ollen suuren kokonaisjäykkyyden omaavalla rataosuudella raidesepelin hienonemisen kannalta määrääväksi ilmiöksi voitaneen nostaa kuormituksen epäsuotuisa jakaantuminen ja sen haitalliset vaikutukset sekä riittämätön jousto dynaamisia kuormituksia vastaan. Alhaisen kokonaisjäykkyyden alueella kiskon taipuma on suurempi ja näin ollen myös raidetta nostava taivutusmomentti kasvaa, jolloin ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen välisen kontaktin häviäminen hetkellisesti on todennäköisempää kuin jäykällä radalla.

Yleisesti ottaen ratapölkkyjen kokemien rasitusten ja tukikerroksen hienonemisen kannalta ei ole samantekevää, missä ratarakenteen osissa jäykkyys tai vastaavasti suuret taipumat syntyvät. Periaatteessa äärimmäisen jäykkä kisko jakaa kuormituksia tehokkaammin, jolloin myös ratapölkyn ja tukikerroksen kokemat rasitukset jäävät pienemmiksi suoraan kuormituskohdan alapuolella. Käytännössä on kuitenkin huomioitava pohjamaan ominaisuuksien kokonaisjäykkyyden kannalta määräävä rooli eli voitaneen olettaa, että hyvin heikon pohjamaan vaikutusta ei voida kumota kiskon taivutusjäykkyyttä kasvattamalla. Jo aiemmin todettiin esimerkiksi heikon pohjamaan aiheuttaman suuren ratarakenteen kokonaistaipuman indikoivan suurta taipumaa koko tukikerroksessa ja kasvavaa raidesepelirakeiden hieroutumista toisiaan vasten. Jäykän pohjamaan alueella, esimerkiksi kalliroleikkauksessa, koko tukikerroksen taipuma jää pieneksi, jolloin edellä mainittua raidesepelirakeiden hieroutumista toisiaan vasten ei pääse ainakaan samassa mittakaavassa tapahtumaan. Tällöin tukikerroksen kokemat rasitukset ovat riippuvaisia yläpuolisten päällysrakenteosien ominaisuuksista; esimerkiksi jäykkä kisko jakaa kuormituksia joustavaa kiskoa tehokkaammin

useamman ratapölkyn kautta välittyväksi ja pienentää siten tukikerrokseen kohdistuvaa maksimikuormitusta.

Alusrakennekerrokset ja pohjamaa

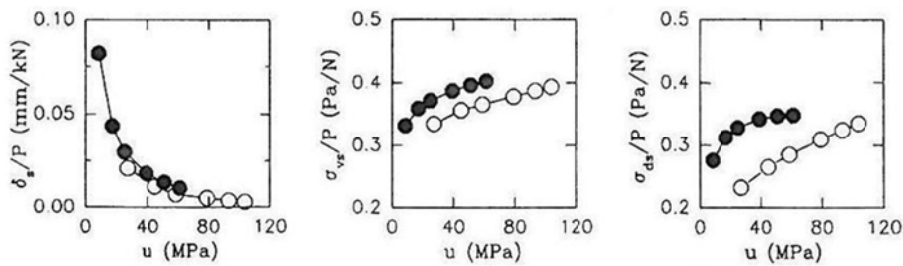
Kuten jo aiemmin mainittiin, alhainen kokonaisjäykkyys indikoi suuresta taipumasta koko ratapenkereessä, millä saattaa olla tietyissä tapauksissa merkittävä vaikutus radan geometrian heikkenemiseen. Radan geometrian heikkenemisellä (*track geometry deterioration*) tarkoitetaan tyypillisesti raiteessa ilmenevien epätasaisuuksien syntyä. Pysyvät epätasaisuudet johtuvat useimmiten jonkun rakennekerroksen tai pohjamaan pysyvistä muodonmuutoksista. Yksinkertaistettuna syklisen kuormituksen aiheuttamasta, pääosin palautuvasta taipumasta pieni osa jää pysyväksi. Pysyvät muodonmuutokset kumuloituvat kuormituskertamäärän kasvaessa. Pysyväksi muodonmuutokseksi jäävän osan ollessa riippuvainen alkuperäisen taipuman suuruudesta, indikoi alhainen kokonaisjäykkyys näin myös suuremmista pysyvistä muodonmuutoksista rakennekerroksissa ja pohjamaassa mikä ilmenee muun muassa ratapenkeren levenemisenä. Rakennekerrosmateriaaleilla, pohjamaan maalajilla ja muilla ominaisuuksilla sekä vallitsevalla jännitys- ja tiivistilalla on merkitystä pysyväksi jäävän osan suuruuteen. Toisaalta myös routiminen saattaa roudan sulamisesta johtuvan heikentyneen kuormituskestävyyden kautta aiheuttaa rakenteessa pysyviä muodonmuutoksia ja epätasaisuutta raiteessa.

Rakennekerrosten kohdalla tiivistilan voidaan jo valmiiksi olettaa olevan melko suuri, jolloin myös syntyvät pysyvät muodonmuutokset ovat yleensä huomattavasti pohjamaassa syntyviä muodonmuutoksia pienempiä. Tämä ei kuitenkaan välttämättä toteudu kaikkien, varsinkaan olemassa olevien tai routivien ratarakenteiden kohdalla. Muodonmuutoksia tarkasteltaessa on huomioitava, että radan kokonaisjäykkyys ei juuri indikoi ratapenkeren painon vaikutuksesta varsinkin heikossa pohjamaassa pidemmän ajan kuluessa syntyviä painumia. Tosin, kuten aiemmin on käynyt ilmi, pohjamaan laadulla on merkittävä vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen. Näin ollen heikolla pohjamaalla olevan radan, joka on siis alttiimpi painumille, kokonaisjäykkyys on todennäköisesti alhaisempi kuin vähemmän painumaherkillä pohjamailla sijaitsevan radan. Berggren [6] on huomauttanut, että vaikka kahden erilaisen pohjamaakerroksen jäykkyys voi olla sama, voi mahdollisuus pysyvien muodonmuutosten syntymiseen olla hyvinkin erilainen. Kuitenkin hyvin pehmeillä pohjamailla, kuten savella tai turpeella, on vahva korrelaatio kyseisen kerroksen jäykkyyden ja pysyvien muodonmuutosten välillä.

Sussmannin et al. [48] mukaan alhainen radan kokonaisjäykkyys indikoi mitä todennäköisimmin heikosta pohjamaasta, sillä pohjamaan ominaisuudet ovat kokonaisjäykkyyden muodostumisen kannalta merkityksellisimmät. Toisaalta pohjamaan ominaisuuksilla, kuten myös alusrakennekerrosten ominaisuuksilla, on merkittävä vaikutus kyseisten kerrosten kykyyn vastustaa muodonmuutoksia.

Selig & Li [4] ovat tutkineet radan kokonaisjäykkyyden ja pohjamaan suhdetta GEOTRACK-mallilla, jossa betoniratapölkkyisen radan kokonaisjäykkyyttä on varioitu muuttamalla mallinnetun pohjamaakerroksen paksuutta 1,22 metristä äärettömään ja muodonmuutosmoduulia välillä 14 – 124 MPa. Kuvassa 2.28 on esitetty mallinnuksella saatu pohjamaan yläpinnan taipuma, pystysuuntainen maksimijännitys pohjamaan pinnalla ja suurin pääjännitysero pohjamaan pinnalla kuormituksen suhteen. Kuvassa mustat pisteet kuvaavat arvoja äärettömän paksulla pohjamaakerroksella ja valkoiset pisteet arvoja pohjamaakerroksen paksuudella 1,22 m. Tarkasteltaessa kuvaajia on

muistettava, että ratamoduulin u suuruus on huomattavassa määrin seurausta pohjamaan ominaisuuksista.



Kuva 2.28. Radan kokonaisjäykkyyttä kuvaavan ratamoduulin u suhde pohjamaan pinnan taipumaan (vas.), pystysuuntaiseen maksimijännitykseen pohjamaan pinnalla (kesk.) ja suurimpaan pääjännityseroon pohjamaan pinnalla (oik.) kuormituksen suhteen. Muokattu lähteestä [4]

Kuvan 2.28 vasemmanpuoleisen kuvaajan perusteella suuren kokonaisjäykkyyden voidaan nähdä indikoivan pienempiä taipumia pohjamaassa. Tarkasteltaessa pohjamaan maksimipystyjännitystä ja suurinta pääjännityseroa näyttäisi siltä, että suuri kokonaisjäykkyys indikoi suurempia jännityksiä pohjamaassa. Pohjamaan ja siten radan toiminta ei kuitenkaan riipu pelkästään jännityksistä, vaan myös pohjamaan lujuudesta ja jäykkyydestä. Ratamoduuli on osaltaan myös pohjamaan lujuuden funktio ja siten suuri ratamoduuli indikoi jäykempää pohjamaata, jolla tyypillisesti on myös suurempi lujuus. Selig & Li [4] toteavat pohjamaan lujuuden kasvavan nopeasti ratamoduulin kasvaessa, joten vaikka jäykkä rata tuottaa suurempia jännityksiä pohjamaan, on jäykällä pohjamaalla paremmat edellytykset vastustaa kyseisiä jännityksiä. Yleisesti jäykän pohjamaan kohdalla on oletettavissa, että lujuuden kasvu on nopeampaa kuin jännitysten kasvu. Suuren ratamoduulin ja pohjamaan jännitysten suhde riippuu myös osin siitä, missä osissa ratarakennetta suuren ratamoduulin edustama suuri jäykkyys muodostuu. Mikäli pohjamaan päällä on esimerkiksi hyvin jäykät ja paksut alusrakennekerrokset, tasaavat ne pohjamaakerrokseen kohdistuvia jännityksiä.

2.4.2 Radan pituussuunnassa vaihteleva kokonaisjäykkyys

Radan kokonaisjäykkyys voi vaihdella huomattavasti radan pituussuunnassa lyhyenkin rataosuuden matkalla. Tällainen tilanne toteutuu usein esimerkiksi siltojen, tasoristeysten, vaihteiden ja kiskonjatkosten ympäristössä. Näissä tapauksissa jäykkyysero syntyy tyypillisesti välttämättömien ratateknisten ratkaisuiden ja valintojen takia. Samankaltainen jäykkyysero voi ilmetä myös muuten täysin yhteneväisen ratarakenteen alueella saavuttaessa esimerkiksi pehmeiköltä kallioleikkaukseen. Lisäksi tukeutumattomat ratapölkkyt aiheuttavat hyvin äkkinäisen jäykkyysmuutoksen radan pituussuunnassa. [55]

Paikallinen jäykkyysero lisää iskumaisia dynaamisia kuormituksia kyseisessä kohdassa. Tämä nopeuttaa varsinkin päällysrakenteen osien heikkenemistä. Lisäksi jäykkyysero saattaa aiheuttaa junalle värähtelyherätteen, jolloin paikallisen jäykkyyseron vaikutukset ulottuvat myös etäämmälle jäykkyyden epäjatkuvuuskohdasta. Burrow'n et al. [55] mukaan suuret äkilliset jäykkyyserot indikoivat moninkertaisesti nopeampaa raidegeometrian heikkenemistä verrattuna tasaisen kokonaisjäykkyyden omaavaan rataosuuteen.

Paikallisen jäykkyyseron kohdalla raideseppelin hienonemista voi tapahtua hyvinkin tukeutuneen ratapölkyn alapuolella, mikäli tukikerroksen kiviaines ei kestä jatkuvia dynaamisia lisäkuormituksia. Kuormituskertamäärän kasvaessa ja hienonemisen edessä, hienontunut raideseppeli valuu tukikerroksen huokostilaan ja ratapölkyn alle alkaa muodostua tyhjätila. Tyhjätilan vaikutuksesta ratapölkky pääsee vapaammin iskeytymään tukikerroksen pintaan ja kiihdyttää näin edelleen raideseppelin hienonemista. Erityisen kriittiseksi iskeytymisilmiö nousee tilanteessa, jossa ratarakenteen kuivatus on puutteellinen eikä rakenteeseen tuleva vesi pääse poistumaan. Tällainen tilanne saattaa syntyä raideseppelin hienonemisen johdosta hienoaineksen tukkiessa sepelirakeiden välit. Tällöin ratapölkyn yli kulkeva pyöräkuorman aiheuttama kuormitus kohdistuu ensimmäisenä tyhjätilassa olevaan veteen, jossa kehittyy ylipainetta etenkin, jos tukikerroksen vedenläpäisevyys on heikentynyt. Huokosveden ylipaine pyrkii tasoittumaan, jolloin toistuvat akselinylitykset mahdollisesti aikaansaavat veden ja sen mukana kulkevan hienorakeisen aineksen muodostaman hiovan massan toistuvan, pumppauksenomaisen liikkeen rakennemateriaalin huokostilassa, mikä on Nurmikolun [19] mukaan kiviaineksen hienonemiseen määräävästi vaikuttava seikka. Kuvassa 2.29 on pitkälle kehittynyt raideseppelin hienonemistilanne rataosalla Lielahdi-Kokemäki syksyllä 2011, missä hienoaines on merkittävästi alentanut tukikerroksen vedenläpäisevyyttä.



Kuva 2.29. Havainnekuva pitkälle edenneestä raideseppelin hienonemisesta ratapölkkyjen pumppautumisen ja hiovan hienoainesmassan yhteisvaikutuksesta.

Kuvasta 2.29 voidaan selkeästi havaita, miten kostea hienoainesmassa on tiivistynyt ratapölkkyjen päiden ympärille estäen näin veden poistumisen sivusuunnassa. Todennäköisesti veden poistuminen myös alaspäin on estynyt ainakin osittain, mihin myös kameraa lähinnä sijainneen ratapölkyn ympärillä oleva vedellä kyllästynyt hienoainesmassa viittaisi. Kyseisen kohteen vieressä sijaitsee tasoristeys, mikä viittaisi ilmiön mahdollisesti alkaneen kehittyä radan jäykkyyserojen aiheuttamien dynaamisten kuormitusten seurauksena. Kuormitusta voimisti lisäksi osaltaan se, että kyseisten ratapölkkyjen kohdalla raide kallistui voimakkaasti kuvassa näkyvälle puolelle. Seurattaessa kuvassa esitettyjen ratapölkkyjen liikettä silmämääräisesti kaluston ak-

seleiden ylitysten aikana, havaittiin suuria siirtymiä. Samalla rataosalla havaittiin samankaltainen tilanne myös toisessa kohteessa yhden yksittäisen ratapölkyn kohdalla. Kyseisen ratapölkyn viereisessä havaittiin kiskossa jatkoshitsi, mikä oli todennäköisesti ajan kuluessa ja dynaamisten kuormituslisien myötä johtanut raidesepelin hienonemiseen ja vedenläpäisevyyden heikkenemiseen.

2.4.3 Melu ja värinä

Junaliikenteen aiheuttama melu voidaan jaotella sen syntyvän mukaan kahteen päätyyppiin: suoraan junasta säteilevään meluun ja maahan välittyvän värinän vaikutuksesta rakennuksissa syntyvään meluun eli runkomeluun. Junasta säteilevän melun taajuus vaihtelee tyypillisesti välillä 100 – 5000 Hz ja runkomelun taajuus välillä 4–80 Hz [56].

Ilmaan säteilevän melun määrä riippuu merkittävästi pyörä-kisko-kontaktin laadusta siten, että pyörien ja kiskon epätasaisuudet lisäävät melun määrää. Aiemmin todettiin suuren kokonaisjäykkyyden lisäävän tiettyjen kiskovikojen todennäköisyyttä. Näin ollen suuri kokonaisjäykkyys saattaa indikoida myös melun lisääntymistä lisääntyneiden iskukuormien ja siten lisääntyneiden kiskovikojen kautta, mutta on huomioitava, että myös kaluston pyörien ominaisuuksilla on tyypillisesti yhtä suuri merkitys melun muodostumisessa. Ilmaan säteilevän melun määrään voidaan tehokkaasti vaikuttaa säätelemällä välilevyn jäykkyyttä, mikä vaikuttaa osaltaan myös radan kokonaisjäykkyyteen. Asian syvällisempi tarkastelu jätetään tämän tutkimuksen ulkopuolelle. [56]

Radan rakennekerrosten jäykkyysvaihteluilla on pieni merkitys säteilevän melun kannalta. Yleisesti jäykät rakennekerrokset ovat taipuvaisia kasvattamaan matalataajuisia melua. On huomioitava, että jopa kymmenkertaisilla rakennekerrosten jäykkyysvaihteluilla jäävät niiden vaikutukset melutasossa alle kahteen desibeliin. [16]

Juna aiheuttaa kulkiessaan värinää ympäröivässä maassa ja kallioperässä johtuen sekä eri tekijöiden tuottamista dynaamisista voimalisistä että kvasistaattisista voimista, joita perättäiset akselikuormat aiheuttavat. Thompsonin & Jonesin [57] mukaan tavallisimmilla kaluston ja nopeuksien yhdistelmillä dynaamisten voimien aiheuttamalla värähtelyllä on näistä merkittävämpi rooli. Täten tyypilliset dynaamisten voimien aiheuttajat, kuten esimerkiksi radan kokonaisjäykkyyden vaihtelu radan pituussuunnassa, ratapölkkyjen alaiset tyhjätilat ja geometrian epätasaisuudet, lisäävät radan ympäristöön välittyvää värähtelyä. Runkomeluun vaikuttavat kuitenkin värähtelyn ominaisuuksien lisäksi esimerkiksi maaperän ominaisuudet ja tarkasteltavan kohteen etäisyys radasta, joten suoraa johtopäätöksiä runkomelun ja radan kokonaisjäykkyyden yhteydestä on hankala tehdä. Tyypillisesti värähtely leviää laajimmalle alueelle jäykkyydeltään alhaisissa pohjamaissa. [16], [56]

2.4.4 Yhteenveto kokonaisjäykkyydestä radan toiminnassa

Edellisissä kappaleissa esiteltiin radan kokonaisjäykkyyttä radan toiminnan indikaattorina. Taulukossa 2.5 on kertauksenomaisesti esitelty edellisissä kappaleissa käsitellyt asiat tiiviimmässä muodossa.

Taulukko 2.5. Yhteenveto radan kokonaisjäykkyyden roolista radan toiminnan indikaattorina.

	Suuri kokonaisjäykkyys	Alhainen kokonaisjäykkyys	Radan pituussuunnassa vaihteleva kokonaisjäykkyys
Kiskon pinta	Pintavikojen todennäköisyys kasvaa johtuen riittämättömistä jousto-ominaisuuksista.	Ei merkittäviä vaikutuksia.	Pintavikojen todennäköisyys saattaa kasvaa varsinkin pistemäisten epäjatkuvuuskohtien läheisyydessä.
Kisko	Taivutusrasitukset kiskossa jäävät pieniksi.	Kiskon taivutusrasitukset kasvavat suuren kokonaistaipuman myötä.	Kiskon taivutusrasitukset saattavat paikoin kasvaa suuriksi.
Ratapölkky	Yksittäiseen ratapölkkyyn kohdistuvat voimat kasvavat suuriksi. Lisäksi ratapölkkyyn voi kohdistua suuria iskuvoimia riittämättömän jouston seurauksena.	Kuormitus jakautuu tasaisemmin peräkkäisten ratapölkkyjen kesken. Tosin tyhjätilojen kohdilla voi esiintyä suuria iskuvoimia.	Ratapölkkyihin saattaa pistemäisissä jäykkyyden epäjatkuvuuskohtissa kohdistua suuria iskuvoimia.
Ratapölkyn alaiset tyhjätilat	Indikoi vähintään kohtuullisesta ratapölkkyjen tukeutumistilasta. Tyhjätilojen kehittyminen kuormituskertojen kumuloituessa on mahdollista.	Tyhjätilojen esiintyminen on mahdollista.	Tyhjätilojen esiintyminen on mahdollista.
Tukikerros	Tukikerrokseen kohdistuvat voimat suuria kuormituksen epäsuotuisan jakaantumisen vuoksi.	Tukikerroksen hienonemisen todennäköisyys kasvaa tukikerroksen suuren taipuman myötä.	Tukikerrokseen saattaa kohdistua suuria dynaamisia kuormituksia.
Alusrakennekerrokset	Alusrakennekerrosten taipumat jäävät vähäisiksi.	Ratapenkereen levenemisen ja pysyvien muodonmuutosten todennäköisyys kasvaa suuren taipuman myötä.	Saattaa indikoida alusrakennekerrosten ominaisuuksien vaihtelusta radan pituussuunnassa.
Pohjamaa	Indikoi pientä pohjamaan pinnan taipumaa ja vähintään kohtuullisen jäykkää pohjamaata.	Indikoi mitä todennäköisimmin heikosta pohjamaasta ja suuresta pohjamaan pinnan taipumasta.	Saattaa indikoida pohjamaaolosuhteiden vaihtelusta radan pituussuunnassa.
Liikennöinnin ympäristövaikutukset	Saattaa indikoida lisääntyvästä melusta kiskon pintavikojen lisääntyessä.	Saattaa edistää tärinän leviämistä heikkojen pohjamaiden alueilla.	Tärinä saattaa epäjatkuvuuskohtien läheisyydessä lisääntyä dynaamisten kuormitusten kasvaessa.

Taulukon 2.5 yhteenvedon perusteella voidaan todeta sekä hyvin suuren että hyvin alhaisen radan kokonaisjäykkyyden olevan tiettyjen radan rakenneosien kokemien rasitusten kannalta haitallisia. Näin ollen on perusteltua yrittää määrittää radan kokonaisjäykkyydelle optimiarvo tai -vaihteluväli, joka saa aikaan kompromissin radan rakenneosille haitallisten vaikutusten välillä.

3 Radan kokonaisjäykkyyden hyödyntäminen ja määrittäminen

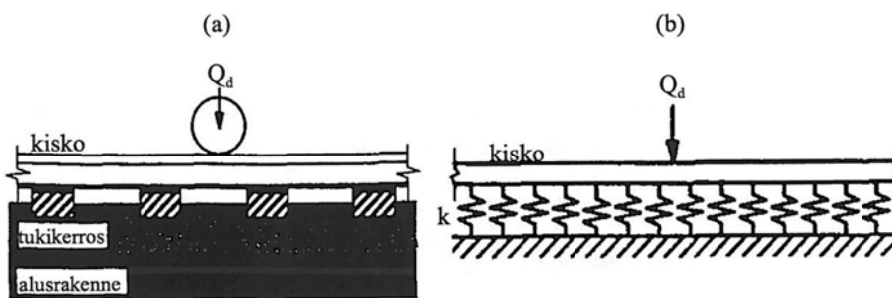
Luvussa 2.1 esiteltiin ratamoduulin ja radan jäykkyyden käsitteet. Lisäksi tarkasteltiin staattisen ja dynaamisen jäykkyyden eroja. Tässä luvussa tarkastellaan ensin radan jäykkyydestiedon hyödyntämistä rasiustarkasteluissa BOEF-mallin avulla ja luvun lopuksi käsitellään radan kokonaisjäykkyyden määrittämenetelmiä.

3.1 Radan jäykkyydestiedon hyödyntäminen rasiustarkasteluissa

3.1.1 Palkki kimmoisalla alustalla

Kimmoisalla alustalla olevaa palkkia eli BOEF-mallia käsiteltiin pintapuolisesti jo luvussa 2.1. Tätä mallia voidaan pitää klassisena menetelmänä ratkaista junakuormasta aiheutuva kiskon taipuma, momentti ja leikkausvoima. Menetelmällä voidaan ratkaista epäsuorasti myös kiskon ja pölkyn välinen voima (*rail seat load*) sekä pölkyn ja tukikerroksen välinen keskimääräinen pystysuuntainen jännitys. Pölkyn ja tukikerroksen välisen rajapinnan alapuolisten jännitysten tarkastelemiseen BOEF-malli ei sovellu. [3]

BOEF-malli perustuu molempien kiskojen mallintamiseen kuvan 3.1b kaltaisena jatkuvana Euler-Bernoullin palkkina kimmoisella Winklerin alustalla. Winklerin alustaa voidaan pitää äärettömän pitkänä jonona kimmoisia ja toisiinsa kytkemättömiä jousia. Kuvissa 3.1 (a) ja (b) esiintyvä Q_d kuvaa suunnittelussa käytettävää vertikaalista pyöräkuormaa ja k kuvaa yhden jousen jousivakiota. [3]



Kuva 3.1. (a) Periaatekuva todellisesta radasta ja (b) kiskoa kuvaava Euler-Bernoullin palkki Winklerin alustalla. [2]

Winklerin alustan kiskoa pituussuunnassa kannatteleva voima $p(x)$, joka esiteltiin jo aiemmin kuvassa 2.1, voidaan määrittää yhtälöllä: [3]

$$p(x) = -u \cdot y(x) \quad (3.1)$$

missä

$p(x)$	on kiskoa puristava viivakuorma kohdassa x [N/mm]
x	on kiskon suuntainen pituuskoordinaatti [mm]
u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
$y(x)$	on kiskon pystysuuntainen taipuma kohdassa x [mm]

Yhtälössä 3.1 oleva miinusmerkki johtuu siitä, että $p(x)$ on kuvassa 2.1 vastakkaisuuntainen kuin y -akseli, joka on tässä tapauksessa alaspäin positiivinen. [3]

Ottamalla tasapainoyhtälö kiskon taivuttamiseen tarvittavan voiman ja Winklerin alustan taivuttamista vastustavan voiman välillä, saadaan differentiaaliyhtälö 3.2: [3]

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + uy = 0 \quad (3.2)$$

missä

E	on kiskomateriaalin kimmomoduuli [MPa]
I	on kiskon jäyhyysmomentti [mm ⁴]
u ja y	ovat kuten yhtälössä 3.1

Differentiaaliyhtälön 3.2 ratkaisu toteutuu seuraavilla reunaehdoilla: [2]

1. y lähestyy nollaa, kun x lähestyy ääretöntä
2. y'' eli taipuma lähestyy nollaa, kun x lähestyy \pm ääretöntä
3. kun $x = 0$, $y' = 0$
4. kun $x = 0$, y''' saa arvon $0,5 \cdot Q_d$

Yhtälön 3.2 ratkaisuksi taipumalle saadaan yhtälö 3.3: [3]

$$y(x) = \frac{Q_d}{2uL} \cdot e^{-\frac{|x|}{L}} \left(\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{L}\right) \right) \quad (3.3)$$

missä

$y(x)$	on kiskon pystysuuntainen taipuma kohdassa x [mm]
Q_d	on pystysuuntainen pyöräkuorma [N]
u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
e	on Neperin luku $\approx 2,718$ [-]
x	on pituuskoordinaatti, origo kuormituspaikassa [mm]
L	on karakteristinen pituus tai peruspituus (<i>characteristic length, base length</i>), joka voidaan määrittää yhtälöllä 3.4 [3]

$$L = \left(\frac{4EI}{u} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.4)$$

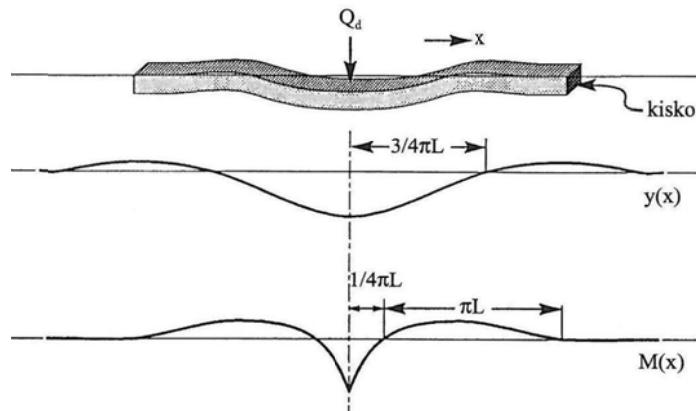
missä

E ja I ovat kuten yhtälössä 3.2
 L ja u ovat kuten yhtälössä 3.3

Yhtälön 3.3 itseisarvomerkkien syynä on se, että fysikaalisesti taipuman tulee olla symmetrinen suhteessa akseliin, jonka kautta kuorma välittyy. Vaihtoehtona taipumaan perustuvalla lähestymistavalla on käyttää kiskon taivutusmomenttia ensisijaisena muuttujana differentiaaliyhtälössä 3.2. Kiskon taivutusmomentti M saadaan taipuman toisesta derivaatasta x :n suhteen kertomalla se kiskon miinusmerkkisellä taivutusjäykkyydellä EI seuraavasti: [3]

$$M(x) = \frac{Q_d \cdot L}{4} \cdot e^{-\frac{|x|}{L}} \cdot \left(\cos\left(\frac{x}{L}\right) - \sin\left(\frac{|x|}{L}\right) \right) \quad (3.5)$$

Yhtälössä 3.5 esiintyvät merkinnät ovat samoja kuin yhtälöissä 3.3 ja 3.4. Kuvassa 3.2 on esitetty kiskon taipumamuoto ja taivutusmomentin muoto kiskon pituussuunnassa. [2]



Kuva 3.2. Kisko kuormituksen alla (yllä), kiskon taipumaviiva (keskellä) ja taivutusmomentti (alla). Muokattu lähteestä [2]

Edellä esiteltyjen yhtälöiden 3.3 ja 3.5 kohdalla on huomioitava, että ne eivät toteudu sidekiskoajatusten kohdilla. Kiskonjatkokset eivät kuulu tämän tutkimuksen pääkotiin, joten niitä koskevien yhtälöiden esittely jätetään tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Mainittakoon kuitenkin, että BOEF-teorialla voidaan tarkastella kiskonjatkoa asettamalla nivel x -akselin nollakohtaan. Tällöin nivelessä taivutusmomentti on nolla, mitä voidaan käyttää uutena reunaehtona ja johtaa yhtälö taipumalle. [58]

Radan jäykkyyden näkökulmasta mielenkiintoinen tekijä on karakteristinen pituus L , joka sisältää kiskon taivutusjäykkyyden lisäksi ratamoduulin. Karakteristiseen pituuteen on ikään kuin tiivistetty radan jäykkyysominaisuudet [58]. On kuitenkin huomiotava, että taipuman yhtälössä 3.3 ratamoduuli u esiintyy sekä nimittäjässä että karakteristisessä pituudessa. Yhdelle karakteristiselle pituudelle L ei ole olemassa selkeää

fysikaalista vastinetta, mutta käytännössä karakteristinen pituus kuvaa taipuvan kisko-osuuden pituutta.

Tarkasteltaessa yhtälön 3.4 mukaisen karakteristisen pituuden termejä, voitaneen todeta kiskoteräksen kimmomoduulin E olevan lähes vakio. Kiskon jäyhyysmomentti I vaihtelee kiskoprofiilin mukaan ja esimerkiksi UIC54-kiskon pystysuuntainen jäyhyysmomentti on noin 80 % UIC60-kiskon vastaavasta eli kiskoprofiililla on merkittävä vaikutus karakteristiseen pituuteen [10]. Merkittävin tekijä karakteristisen pituuden muodostumisessa on kuitenkin ratamoduuli, jonka suuruusvaihtelu voi olla jopa kymmenkertaista.

3.1.2 Useamman akselikuorman yhteisvaikutus

BOEF-mallin ollessa lineaarinen, voidaan siihen soveltaa superpositioperiaatetta useamman akseli- tai pyöräkuorman tapauksessa. Esimerkiksi eri etäisyydellä olevien pyöräkuormien yhteisvaikutuksesta syntyvän taipuman yhteenlaskettu suuruus kohdassa $x = 0$ saadaan yhtälöllä 3.3 laskettujen taipumien summana yhtälön 3.6 mukaisesti. [2]

$$y_{\text{yhteenlaskettu},x=0} = y(x_1) + y(x_2) + \dots + y(x_i) \quad (3.6)$$

missä

$$y_{\text{yhteenlaskettu},x=0} \text{ on yhteenlaskettu taipuma kohdassa } x = 0 \text{ [mm]}$$

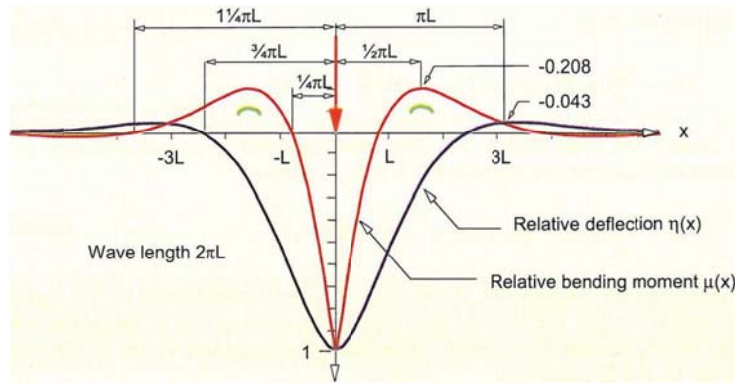
$$x_i \text{ on pyöräkuorman etäisyys } x\text{-akselin nollakohdasta [mm]}$$

Myös useamman akselikuorman aiheuttaman taivutusmomentin yhteenlaskettu suuruus voidaan ratkaista samaan tapaan kuin taipumien kohdalla. BOEF-mallin lineaarisuudesta johtuen useamman akselin tapaus ei lisää mallin monimutkaisuutta verrattuna yhden akselin tapaukseen, paitsi yhtälön 3.6 vaatiman yhteenlaskun osalta. [3]

Useiden eri etäisyyksillä olevien akseli- tai pyöräkuormien yhteisvaikutus yhtälössä 3.3 esitettyyn taipumaan voidaan esittää myös influenssiviivan avulla. Influenssiviivan muoto syntyy yhtälön 3.3 vakiokertoimettomasta osasta $\eta(x)$, joka on esitetty yhtälössä 3.7. Merkinnät ovat samoja kuin yhtälössä 3.3. [2]

$$\eta(x) = e^{-\frac{|x|}{L}} \left[\cos\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{L}\right) \right] \quad (3.7)$$

Kuvassa 3.3 on esitetty kiskon taipuman ja taivutusmomentin influenssiviivat. [10]



Kuva 3.3. Kiskon taipuman (tummalla) ja taivutusmomentin (punaisella) influenssiiviat. [10]

Tietyillä akselivälien ja radan ominaisuuksien yhdistelmillä on olemassa mahdollisuus, että taipuman maksimiarvot verrattuna yhden akselin tilanteeseen pienenevät. Tällainen tilanne syntyy esimerkiksi akselivälin ollessa $\pi \cdot L$. [3]

3.1.3 Kiskon ja ratapölkyn välinen voima

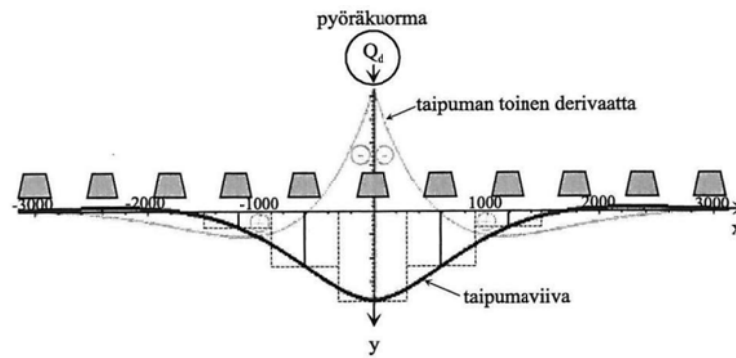
Radan jäykkyystiedon avulla voidaan myös arvioida kiskon alapinnan ja pölkyn yläpinnan välisessä kontaktissa syntyviä voimia. Kiskon ja ratapölkyn välinen voima (*rail seat load*) on merkittävä muuttuja siinä mielessä, että se vaikuttaa edelleen rakennekerroksissa ja pohjamaassa syntyviin jännityksiin. Tämä voima voidaan yksinkertaisimmillaan ratkaista yhtälön 3.8 mukaisesti. [3]

$$S_n = p_n \cdot c = u \cdot y_n \cdot c \quad (3.8)$$

missä

S_n	on kiskon ja pölkyn välinen voima pölkyn n kohdalla [N]
p_n	on viivakuorma ratapölkyn nro n kohdalla [N/mm]
c	on pölkkyväli [mm]
u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
y_n	on n:n ratapölkyn painuma [mm]

Yhtälö 3.8 olettaa kunkin ratapölkyn painuman tasaiseksi pölkkyvälien puoliväliin asti. Kuitenkin yhtälön 3.3 mukaisen kuvassa 3.4 esitetyn taipumaviivan muoto osoittaa, että ratapölkkyjen painumat eivät tarkalleen edusta ympäröivää kisko-osuutta, vaan ainoastaan juuri ratapölkyn kohdalla aiheutuvaa taipumaa. Taipuman toisen derivaatan saadessa negatiivisia arvoja, yhtälö 3.8 yliarvioi kiskon ja pölkyn välistä voimaa. Vastaavasti taipuman toisen derivaatan saadessa positiivisia arvoja yhtälö 3.8 aliarvioi kiskon ja pölkyn välisiä voimia. Kuvasta 3.4 nähdään, kuinka pyöräkuorman alla kiskon ja ratapölkyn välinen voima yliarvioituu, sillä ratapölkyn alle piirrettyjen nelikulmioiden yhteenlaskettu pinta-ala on suurempi kuin nelikulmioiden, joiden alimmat kulmat leikkautuvat taipumaviivasta pois. Samaan tapaan nähdään, että esimerkiksi pyöräkuorman alla olevasta ratapölkystä kahden pölkkyvälin päässä olevien ratapölkkyjen ja kiskon välinen voima aliarvioituu. [2]



Kuva 3.4. Pölkyn painuma ja sen jakautuminen yhtälössä 3.8. [2]

Yhtälöllä 3.8 lasketut kiskon ja pölkyn väliset voimat eroavat suhteellisesti paljon todellisista BOEF-mallin arvoista niiden pölkkyjen kohdalla, joiden laskettu taipuma on lähellä nollaa. Tästä johtuen kiskon ja ratapölkkyjen välisten voimien summa tyypillisesti ylittää pyöräkuorman, mikä ei ole voimatasapainoyhtälön mukaista. Mikäli kiskon ja ratapölkyn välisen voiman laskemisessa halutaan säilyttää voimatasapaino, niin voima tulisi laskea yhtälön 3.9 mukaisesti. [2]

$$S_n = u \cdot y_{\max} \int_{x_n - 0,5c}^{x_n + 0,5c} e^{-\frac{|x|}{L}} \cos\left(\left(\frac{x}{L}\right) + \sin\left(\frac{|x|}{L}\right)\right) dx \quad (3.9)$$

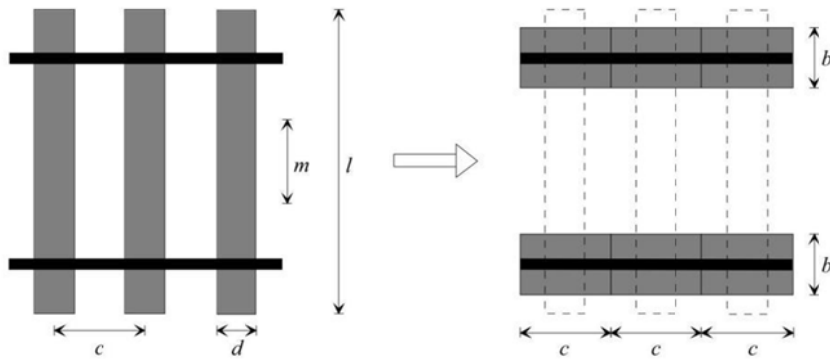
missä

S_n	on kiskon ja pölkyn välinen voima pölkyn n kohdalla [N]
u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
y_{\max}	on ratapölkyn maksimipainuma [mm]
x	on kiskon suuntainen pituuskoordinaatti [mm]
c	on pölkkyväli [mm]
e	on Neperin luku $\approx 2,718$ [-]
L	on yhtälön 3.4 mukainen karakteristinen pituus [mm]

Useimmissa tapauksissa yhtälöiden 3.8 ja 3.9 antamien tulosten erot ovat hyväksyttävissä rajoissa. Lisäksi yhtälön 3.8 antamat suurimmat kiskon ja ratapölkyn väliset voimat ovat hieman suurempia kuin voimatasapainon toteuttavan yhtälön ja ovat siten niin sanotusti varmalla puolella. [3]

3.1.4 Fiktiivinen pölkky ja tehokas pinta-ala

BOEF-mallissa kiskoä tukeva perustus oletetaan jatkuvaksi. Todellisuudessa kiskon alla olevat ratapölkkyt ovat toisistaan irrallisia. Perinteisesti epäjatkuvat todelliset ratapölkkyt on muunnettu kahdeksi fiktiiviseksi jatkuvaksi pölkkyksi kuvan 3.5 osoittamalla tavalla. Muunnoksen perustana on ajatus, että pyöräkuormaa tukeva pinta-ala kisko-osuutta kohden on sama sekä todellisilla että fiktiivisillä pölkkyillä. Tätä kutsutaan tehokkaaksi pinta-alaperiaatteeksi. [2]



Kuva 3.5. Todellisten ratapölkkyjen (vas.) muuntaminen fiktiiviseksi kiskon pituus-suuntaiseksi pölkkyksi (oik.). [3]

Kuvassa 3.5 vasemmalla puolella olevien todellisten ratapölkkyjen alapinnassa vaikuttava jännitys oletetaan jakautuneeksi tehokkaalle pinta-alalle A_{eff} , joka saadaan vähentämällä ratapölkyn pohjan todellisesta kokonaispinta-alasta A_{tod} ratapölkyn keskellä oleva jännityksettömäksi oletettu alue A_0 yhtälön 3.10 mukaisesti. [2]

$$A_{eff} = A_{tod} - A_0 = d \cdot l - d \cdot m = d(l - m) \quad (3.10)$$

missä

A_{eff}	on ratapölkyn alapinnan tehokas pinta-ala [mm ²]
A_{tod}	on ratapölkyn alapinnan todellinen pinta-ala [mm ²]
A_0	on ratapölkyn alapinnan jännityksettömäksi oletettu alue [mm ²]
d	on todellisen ratapölkyn leveys [mm]
l	on ratapölkyn pituus [mm]
m	on ratapölkyn keskellä olevan kantamattoman alueen pituus [mm]

Skoglundin [3] mukaan ratapölkyn keskellä olevan kantamattoman alueen pituudeksi voidaan olettaa 500 mm, mutta oletukselle ei ole annettu perusteita. Fiktiivisen pölkyn leveys saadaan todellisen ratapölkyn tehokkaan pinta-alan puolikkaan ja pölkkyvälin avulla yhtälön 3.11 mukaisesti.

$$b = \frac{d(l - m)}{2c} \quad (3.11)$$

missä

b	on fiktiivisen pölkyn leveys [mm]
c	on pölkkyväli [mm]
d , l ja m	ovat kuten yhtälössä 3.10.

3.1.5 Ratapölkyn ja tukikerroksen välinen jännitys

Ratapölkyn ja tukikerroksen välinen jännitys voidaan ratkaista jakamalla kiskon ja ratapölkyn välinen voima fiktiivisen pölkyn pinta-alalla yhtälön 3.12 tapaan, jossa ratapölkyn ja tukikerroksen välinen jännitys oletetaan tasaisesti jakautuneeksi. [2]

$$\sigma_n = \frac{S_n}{bc} = \frac{2S_n}{d(l-m)} \quad (3.12)$$

missä

σ_n on pölkyn nro n alapinnan ja tukikerroksen välinen jännitys [N/mm²]

S_n on kiskon ja ratapölkyn välinen voima pölkyn nro n kohdalla [N]

b, c, d, l ja m ovat kuten yhtälöissä 3.10 ja 3.11.

Yhtälöä 3.12 tarkasteltaessa havaitaan, että sen sisältämä S_n sisältää ratamoduulin eli radan kokonaisjäykkyyden avulla voidaan arvioida kuormituksen jakautumista radan pituussuunnassa. Koska radan jäykkyydestä ei ole aina ollut saatavilla, on kuormituksen jakautumisesta kehitetty luvussa 2.4 esitellyt Raymondin [52] ja Riessbergerin [53] yksinkertaistukset.

3.1.6 Raidealustaluku

Raidealustaluku (*foundation coefficient*) voidaan Skoglundin [3] mukaan esittää ratamoduulin ja fiktiivisen pölkyn leveyden suhteena yhtälön 3.13 mukaisesti.

$$C = \frac{u}{b} \quad (3.13)$$

missä

C on raidealustaluku [N/mm³]

u on ratamoduuli [N/mm/mm]

b on fiktiivisen pölkyn leveys [mm]

Raidealustaluvulle on myös muita määritelmiä, kuten esimerkiksi Riessbergerin [53] raidealustaluvun (*bearing coefficient*) määritelmä ratapölkyn alapinnan ja tukikerroksen välisen tasaisen jännityksen ja ratapölkyn pystysuuntaisen siirtymän suhteena yhtälön 3.14 esittämällä tavalla.

$$C = \frac{\sigma_n}{y_n} \quad (3.14)$$

missä

C on raidealustaluku [N/mm³]

σ_n on n:n pölkyn ja tukikerroksen välinen tasainen jännitys [N/mm²]

y_n on n:n ratapölkyn pystysuuntainen siirtymä [mm]

Skoglundin [3] ja Riessbergerin [53] raidealustalukujen määritelmät eroavat hieman toisistaan. Skoglundin määritelmässä siirtymän tarkastelukohta on heti kiskon alapinnassa, kun taas Riessbergerillä ratapölkyssä. Tämä johtaa siihen, että Skoglundin määritelmä huomioi myös alus- tai välilevyjen kokoonpuristumisen, toisin kuin Riessbergerin määritelmä. [2]

Skoglundin raidealustaluvun yhtälö 3.13 voidaan esittää myös yhtälön 3.15 muodossa.

$$u = b \cdot C \quad (3.15)$$

missä

u , b ja C ovat kuten yhtälössä 3.13.

Yhtälön 3.15 perusteella ratamoduuli jakautuu Skoglundin [3] mukaan kahteen erilaisiin tekijöitä huomioon ottavaan termiin. Fiktiivisen palkin leveys b huomioi ratapölkyn muodon, pölkkyvälin ja ratapölkyn keskellä olevan jännityksettömän alueen. Raidealustaluku taas huomioi alus- ja välilevyjen, ratapölkyn, rakennekerrosten ja pohjamaan resilient- eli jännitys-muodonmuutos -ominaisuudet.

3.1.7 Radan tietokonemallintamiseen perustuvat laskelmat

Radan toiminnan mallintamisen nopeuttamiseksi on kehitetty useita erilaisia tietokoneella käytettäviä ratamalleja. Mallit voivat perustua BOEF-teorian mukaisiin yhtälöihin tai täysin numeerisiin laskentamenetelmiin, kuten elementtimenetelmään. Erilaisia ratamalleja ovat muun muassa Illinoisin yliopiston kehittämä FEM-malli ILLITRACK, kolmidimensionaalinen kerrosrakennemalli GEOTRACK ja pääosin edellisen kaltainen KENTRACK. [8]

Tämän tutkimuksen puitteissa ei käsitellä tämän syvällisemmin radan kuormituskäytännön mallintamista tietokoneavusteisesti. Mainittakoon kuitenkin, että TTY:n Rakennustekniikan laitoksen Elinkaaritehokas RAta (TERA) -Tutkimusohjelman puitteissa kehitetään parhaillaan elementtimenetelmään perustuvaa radan kuormituskestävyyden tarkasteluun tarkoitettua ratamallia.

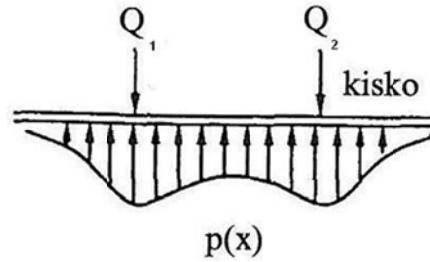
3.2 Radan jäykkyyden määrittäminen menetelmät

Tyypillisesti radan jäykkyyden tai ratamoduulin määrittäminen perustuu kiskon taipumaan staattisen kuormituksen alla. Tässä raportissa *määrittäminen menetelmällä* tarkoitetaan menetelmää, jolla mitattu taipuma voidaan laskennallisesti muuttaa jäykkyydeksi. *Mittausmenetelmällä* tarkoitetaan menetelmää, jolla saadaan selville taipuman suuruus jonkin määrittäminen menetelmän käyttöä varten. Käytännössä taipuman selvittäminen vaatii in situ -mittauksia, joissa käytettäviä mittausmenetelmiä esitellään luvussa 4. Yleisimmät ratamoduulin määrittäminen menetelmät ovat: [2], [4]

- Taipumamuotoon perustuva testi (*deflection basin/deflection-area test*)
- Yksittäisen pisteen tai akselin kuormitustesti (*single load point test*)
- Moniakselikuormitustesti (*multiple axle vehicle load test*)

3.2.1 Taipumamuotoon perustuva testi

Taipumamuotoon perustuva testi perustuu kiskoon vaikuttavien pystysuuntaisten voimien tasapainotilaan kuvan 3.6 mukaisesti. [2]



Kuva 3.6. Kiskoon vaikuttavat pystysuuntaiset voimat. [4]

Kuvan 3.6 mukainen pystysuuntaisten voimien tasapainotila voidaan ilmaista yhtälöllä 3.16, josta seuraa yhtälö 3.17 olettaessa ratamoduulin olevan vakio. Vaikka ratamoduulin suuruus vaihtelee huomattavasti radan pituussuunnassa, niin lyhyillä, alle kymmenen ratapölkkyä kattavilla mittausosuuksilla oletus on kohtuullisen perusteltu. Merkinnot ovat yhtälöiden 3.1 ja 3.2 mukaisia. [4]

$$\sum Q = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} u y(x) dx \quad (3.16)$$

$$\sum Q = u \int_{-\infty}^{\infty} y(x) dx \quad \text{tai} \quad \sum Q = u A_y \quad (3.17)$$

missä

A_y on alue, joka jää alkuperäisen ja taipuneen kiskon väliin

Mikäli jokaisen ratapölkyn pystysuuntainen painuma on mitattu, voidaan ratamoduuli ratkaista yhtälöllä 3.18, kun edellä mainittu alue A_y lasketaan ratapölkkyvälin c ja ratapölkkyjen painumien y_i summattuna tulona. [4] Tämä pätee yleensä kuitenkin ainoastaan puuratapölkkyraiteella, sillä betoniratapölkkyraiteella kiskon ja ratapölkyn välisen välilevyn vaikutus kadotetaan yhtälöä 3.18 käytettäessä.

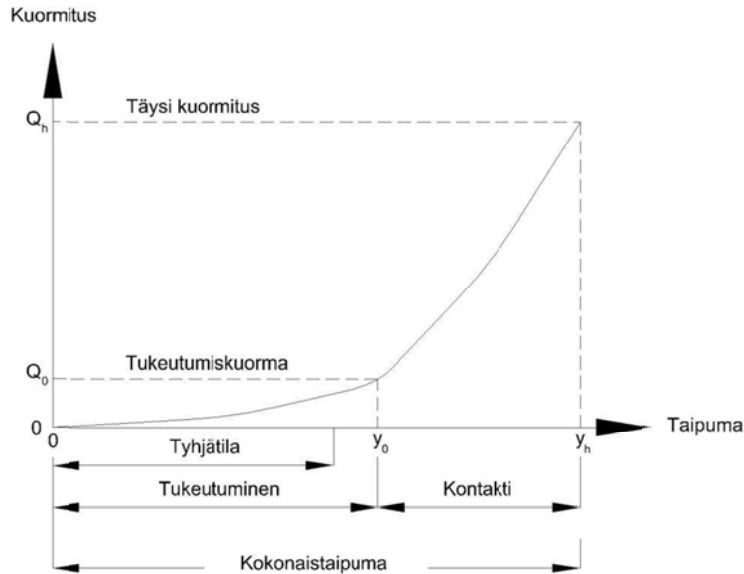
$$u = \frac{\sum_{j=1}^n Q}{c \sum_{i=1}^m y_i} \quad (3.18)$$

missä

n on kiskoa kuormittavien pyörien lukumäärä

m on kuormituksen alla painuvien ratapölkkyjen lukumäärä

Jos radan kuormitus-taipuma-käyttäytyminen olisi lineaarista kuvan 2.23 käyrän a tapaan, ratamoduuli olisi riippumaton kuormituksesta Q . Kuten jo luvussa 2.3 todettiin, tyypillisesti kuormituksen ja taipuman suhde on epälineaarinen, jolloin ratamoduulin arvo riippuu kuormitustasosta kuvan 2.23 käyrän b mukaisesti. [4]



Kuva 3.7. Havainnekuva ratamoduulin määrittämisessä käytettävistä kuormitusväleistä. Muokattu lähteestä [4]

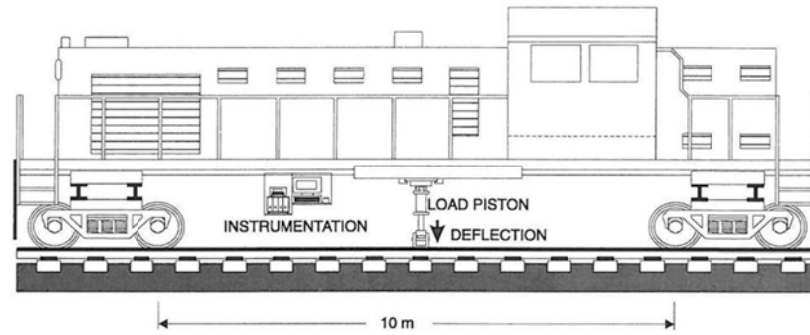
Ratapölkyn alainen tyhjättila voidaan huomioida ratamoduulin määrittämisessä valitsemalla taipumaväliksi kuvassa 3.7 esitetty väli $y_h - y_0$ välin $y_0 - 0$ sijaan siten, että taipumaa y_0 vastaava kuormitus Q_0 on vähintään ratapölkyn asettumiskuorman suuruinen. Tällöin yhtälö 3.18 saa yhtälön 3.19 mukaisen muodon. [2], [4]

$$u = \frac{\sum_{j=1}^n (Q_h - Q_0)_j}{c \sum_{i=n}^m (y_h - y_0)_n} \quad (3.19)$$

Taipumamuotoon perustuva testi vaatii taipumamittaukset koko taipumasuppilon pituudelta ja on siten melko työläs. Lisäksi, kuten luvussa 3.1.3 havaittiin, menetelmän tarkkuus ei välttämättä parane otettaessa kauempana kuormituskohdasta olevat pölköt mukaan tarkasteluun, mutta tämä saattaa olla välttämätöntä pystysuuntaisen tasapainoehdon täyttymiseksi. Menetelmän etuna on soveltuvuus sekä yksittäis- että moniakselikuormitukseen ja se, että menetelmä huomioi yhtä pistettä laajemman osuuden radasta. [3], [8] Taipumamuotoon perustuvan testin yhteydessä ei tarvita tietoa kuormituksen jakaantumisesta radan pituussuunnassa, sillä menetelmä huomioi koko taipumasuppilon alueen, mikä vastaa koko kuormituksen vaikutusalueita.

3.2.2 Yksittäisen pisteen tai akselin kuormitustesti

Yksittäisen akselin tai pisteen kuormitustesti vaatii ainoastaan yhden taipumamittauksen suoraan yksittäisen akselikuormituksen tai kuormituspisteen alla. Selig & Waters [8] nostavat sen parhaaksi jäykkyyden määrittämismenetelmäksi ja esittävät kuvan 3.8 kaltaista kuormituslaitteistoa testin tekemiseen.



Kuva 3.8. Yhden pisteen kuormitustestilaitteisto radan taipuman mittaamiseen. [8]

Yksittäisen pisteen tai akselin kuormitustestissä radan jäykkyys voidaan laskea suoraan yhtälön 2.2 avulla ja ratamoduuli yhtälön 2.4 avulla. Radan kuormitus-taipumakäyttäytymisen epälineaarisuuden huomioimiseksi jäykkyyden laskemisessa voidaan käyttää yhtälöä 3.20. Merkinnät vastaavat kuvan 3.7 ja yhtälön 3.19 merkintöjä. [3], [4]

$$K = \frac{Q_h - Q_0}{y_{\max h} - y_{\max 0}} \quad (3.20)$$

Huolellisesti toteutettuna yhden pisteen kuormitustesti antaa luotettavia tuloksia. Skoglundin [3] mukaan taipuman mittaaminen useampiakselisen telin jonkun akselin alta saattaa heikentää menetelmän tarkkuutta johtuen telin muiden akseleiden vaikutuksesta mittaustulokseen. Zarembski & Choros [59] suosittelivat käyttämään määrityksessä kuormitustasoa, joka on lähellä todellisesta liikenteestä aiheutuvaa kuormitusta. Esimerkiksi EUROBALT II -projektissa yhtälön 3.20 mukaisena kuormitusvälinä käytettiin akselikuormia 20 – 140 kN [6] ja kuvan 3.8 laitteistolla tehdyissä TCI:n mittauksissa käytettiin 44,5 – 178 kN kuormitusväliä [60].

3.2.3 Moniakselikuormitustesti

Moniakselikuormitustesti, mikä tarkoittaa usein käytännössä kahta tai kolmea akselia, voidaan nähdä jatkeena yhden akselin kuormitustestille. Alun perin menetelmän esittelivät Zarembski & Choros [59], johon Cai et al. [61] on esittänyt yhtälön 3.21 mukaisen iteratiivisen ratkaisun. Yhtälö on voimassa vain, kun Q_i on vakio eli rataa kuormittavat eri etäisyydellä olevat akselit ovat samanpainoisia [2].

$$\left| u - \frac{1}{2y_{\max} L} \sum_{i=1}^n Q_i \eta_i \right| \leq \varepsilon \quad (3.21)$$

missä

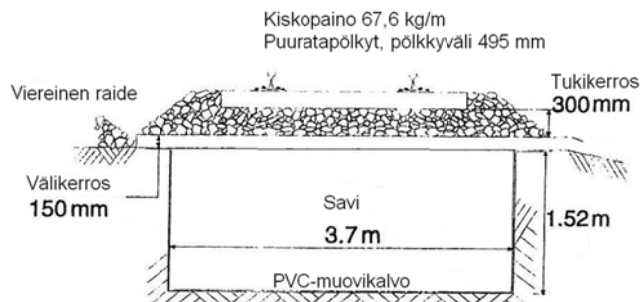
u	on ratamoduuli [N/mm/mm]
y_{\max}	on kiskon maksimitaipuma kuorman Q vaikutuksesta [mm]
L	on karakteristinen pituus yhtälön 3.4 mukaisesti [mm]
Q_i	on i:nnes pyöräkuorma [N]
η_i	on influenssiviivan arvo yhtälön 3.7 mukaisesti [-]
ε	on sallittu virhe [N/mm/mm]

Toinen vaihtoehto yhtälölle 3.21 on verrata yhtälöllä 3.3 laskettua kiskon taipumaa mitattuun taipumaan. Tämän jälkeen taipumat saatetaan yhtä suuriksi iteroimalla taipuman yhtälöä 3.3 ratamoduulin u suhteen. [3]

Moniakselikuormitustestiä käyttämällä päästään eroon virheestä, jonka telin muut akselit mahdollisesti aiheuttavat yksittäisen akselin kuormitustestissä, mutta samalla jäykkyyden määrittäminen monimutkaistuu huomattavasti.

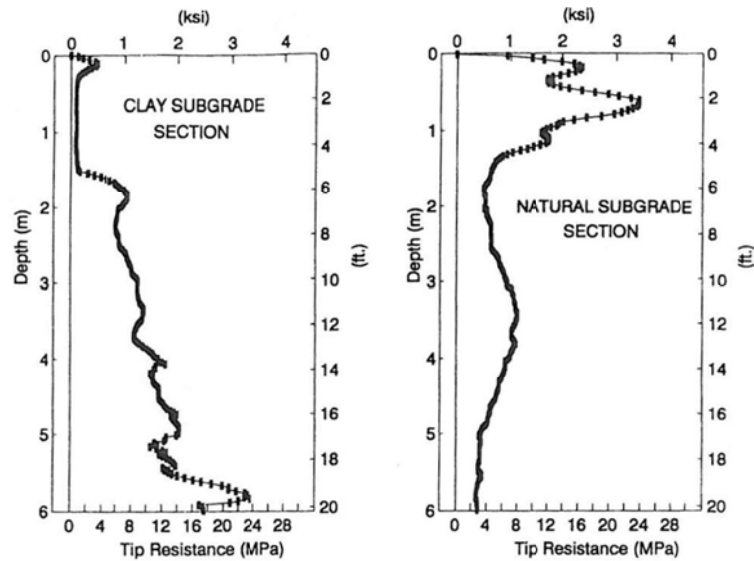
3.2.4 Jäykkyyden määrittämenetelmien vertailu

Read et al. [60] ovat vertailleet taipumamuotoon perustuvalla testillä ja yksittäisen pisteen kuormitustestillä saatavia ratamoduulin arvoja. Tutkimuksessa radan kuormittamiseen käytettiin kuvan 3.8 mukaista kuormituslaitteistoa ja mittauksia tehtiin sekä joustavaa pohjamaata että jäykempää pohjamaata edustavilla rataosuuksilla TTCI:n testiradalla Pueblossa Yhdysvalloissa. Joustavan pohjamaan saavuttamiseksi tietylle rataosuudelle tehtiin kuvan 3.9 mukainen massanvaihto, jossa luonnollinen pohjamaa vaihdettiin saveksi. Savi tiivistettiin 30–35 % vesipitoisuudessa ≥ 90 % kuivatilavuuspainoon ASTM D698-testin mukaisesta maksimikuivatilavuuspainosta ja se ympäröitiin muovikalvolla kuivumisen estämiseksi.



Kuva 3.9. Havainnekuva joustavamman pohjamaan saavuttamiseksi tehdystä savimassanvaihdosta sekä ratarakenteen osista ja kerrospaksuuksista. Muokattu lähteestä [60]

Savimassanvaihdolla saavutetun joustavamman pohjamaan ja testiradan luonnollisen pohjamaan välinen suhteellinen lujuusero on havaittavissa kuvan 3.10 CPT-profiileista (*Cone Penetration Test*). Kuvassa syvyys on mitattu välikerroksen pinnalta alaspäin. Luonnollisen pohjamaan muista ominaisuuksista ei ole tarkempaa tietoa.



Kuva 3.10. Savimassanvaihdolla varustetun pohjamaan (vas.) ja luonnollisen pohjamaan (oik.) CPT-profililit. [60]

Ratamoduulin määrittämistä varten Read et al. [60] mittasivat kiskon taipumia suoraan kuormituksen alla olleen ratapölkyn kohdalla sekä taipumamuodon selvittämiseksi myös viiden peräkkäisen ratapölkyn kohdalla kuormituksen alaisesta ratapölkystä molempiin suuntiin. Tutkimuksessa ratamoduuli määritettiin erikseen kahdelta kuormitusväliltä ja kuvassa 3.7 esitettyä tukeutumiskuormaa (*seating*) vastaavana kuormitusvälinä tutkimuksessa käytettiin väliä 0–44,5 kN ja kontaktia (*contact*) vastaavana välinä 44,5–178 kN. Taipumamuotoon perustuvassa testissä Read et al. [33] olettivat ratamoduulin vakioksi ja käyttivät sen määrittämiseen yhtälöä 3.17. Yksittäisen pisteen kuormitustestissä tutkimuksessa laskettiin ensin jäykkyys yhtälön 3.20 mukaisesti, minkä jälkeen jäykkyys muunnettiin ratamoduuliksi yhtälön 2.4 avulla. Mittaustulosten perusteella lasketut ratamoduulit on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukkoa 3.1 tarkasteltaessa vaikuttaisi siltä, että ratamoduulin suuruus voi vaihdella huomattavasti riippuen käytetystä määrittämenetelmästä. Taulukosta nähdään, että taipumamuotoon perustuvalla testillä on saatu kontaktikuormitusväliltä systemaattisesti pienemmät ratamoduulit kuin yksittäisen pisteen kuormitustestillä. Readin et al. [60] mukaan tämä johtuu siitä, että yksittäisen pisteen kuormitustestin mukainen yhtälö 2.4 olettaa kiskon taipumamuodon sen taivutusjäykkyyden EI mukaiseksi ja ratapölkkyjen tukeutumistilanteen tasaiseksi koko kuormituksen vaikutusalueella. Taipumamuotoon perustuvassa testissä yllä mainittuja oletuksia ei tehdä, vaan kiskon taipumamuoto mitataan kunkin ratapölkyn kohdalla erikseen.

Taulukko 3.1. Yksittäisen pisteen kuormitustestin ja taipumamuotoon perustuvan testin avulla kahdelta kuormitusväliltä lasketut ratamoduulit. Muokattu lähteestä [60]

Clay Subgrade				
Tie No.	Yksittäisen pisteen kuormitustesti (MPa)		Taipumamuotoon perustuva testi (MPa)	
	Seating	Contact	Seating	Contact
135	6.4	31.4	8.1	25.6
216	8.8	20.2	6.5	13.1
297	5.1	20.1	6.2	15.6
378	3.6	37.5	5.8	26.5
459	6.8	38.0	4.9	23.9
507	3.7	115.6	3.7	59.5
Average	5.7	43.8	5.9	27.4
Natural Subgrade				
188	13.4	65.8	14.3	37.4
269	27.1	72.5	23.3	57.4
350	12.9	77.5	10.3	33.7
431	7.8	121.3	8.2	61.3
Average	15.3	84.3	14.0	47.5

Read et al. [60] toteavat, että yksittäisen kuormituspisteen avulla määritetty radan jäykkyys tai ratamoduuli tarjoaa yksinkertaisen suuren arvioida radalla liikkuvan kaluston kokema kuormitettua rataprofiilia ja radan käyttäytymistä kuormituksen alaisena. He kuitenkin jatkavat, että taipumamuotoon perustuva testi antaa mahdollisesti yhden kuormituspisteen testiä paremman kuvan radan tukeutumisesta ja tarkemman arvon ratamoduulille. Tästä johtuen eri määrittämenetelmien perusteella lasketut ratamoduulit tulisi jotenkin erottaa toisistaan.

4 Radan jäykkyyden pistemäiset mittaamenetelmät

Tässä luvussa esitellään kirjallisuudesta löydetyt radan jäykkyyden pistemäiset mittaamenetelmät, joiden ominaisuuksia sekä soveltumista käytettäväksi Suomessa arvioidaan valittujen kriteereiden perusteella. Jatkuvia mittaamenetelmiä käsitellään luvussa 5.

Kirjallisuudesta löydettiin myös joitain sovelluksia, kuten esimerkiksi CPT-testi [16] ja Panda [62], joiden toiminta perustuu rakenteen kykyyn vastustaa siihen tunkeutuvaa ”kärkeä”. Vaikka nämä mittaussovellukset sinällään antavat käyttökelpoista tietoa kunkin rakennekerroksen ominaisuuksista, eivät ne suoranaisesti mittaa radan jäykkyyttä ja ovat usein työläitä toteuttaa. Tämän vuoksi tämänkaltaiset rakennetta rikkovat sovellukset jätetään tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Pistemäisiä mittaamenetelmiä voidaan jaotella useiden periaatteiden, esimerkiksi kannettavuuden mukaan. Menetelmät voidaan myös jakaa melko yksiselitteisesti tarvittavan kuormituksen itse tuottaviin menetelmiin tai erilaisiin radalla liikkuvaa kalustoa kuormituksena hyödyntäviin radan instrumentointeihin. Jotta radalla liikkuvaa kalustoa voidaan hyödyntää mittauksissa, olisi tiedettävä kuormituksen suuruus. Suuruus saadaan selville mittaamalla kaluston akselipainot [63] tai arvioimalla ne kalustotyypin perusteella. Akselipainojen mittaamista on käsitelty esimerkiksi Liikenneviraston selvityksessä 22/2010 ”Ratapenkereiden monitorointi”.

4.1 Pudotuspainolaite

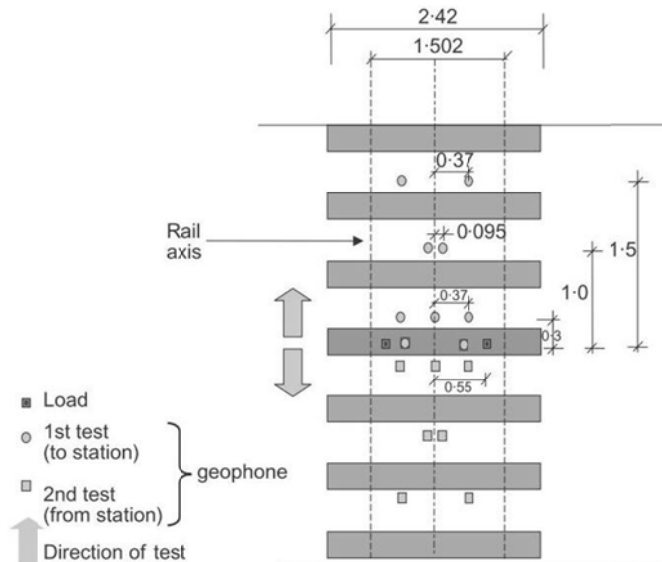
Pudotuspainolaite (*Falling Weight Deflectometer, FWD*) on varsinkin tiepuolella yleisesti käytetty kantavuuden mittaamenetelmä. Pudotuspainolaitteessa on vapaasti putoava paino, jota pudotetaan tietyltä korkeudelta ja pudotuksen aiheuttamaa rakenteen pinnan palautuvaa painumaa eli taipumaa mitataan geofoneilla (ks. luku 4.4) tai kiihtyvyyssantureilla (ks. luku 4.5) sekä suoraan kuormituksen alta että useilta etäisyksiltä kuormituskohdan vierestä. Mittausten avulla saadaan määritettyä niin sanottu taipumasuppilo, jonka avulla voidaan takaisinlaskea myös eri kerrosten jäykkyydet. Tarkempi kuvaus pudotuspainolaitteesta suomeksi on esitetty esimerkiksi Liikenneviraston selvityksessä 10/2011 ”Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus”. [36]

Isossa-Britanniassa on käytetty pudotuspainolaitetta radan jäykkyyden mittaamiseen modifioimalla peräkärnyssä olevaa laitetta siten, että se pystyy liikkumaan kiskoja pitkin kuvan 4.1 tapaan. Herefordshiressä tehdyissä koemittauksissa 125 kN kuorman aiheuttava paino pudotettiin kiskoista irrotetun pölkyn päälle kumipäällysteisen, voima-anturilla varustetun aluslevyn ja 1,1 m pitkän palkin välityksellä. Palkin tukipisteet sijaitsivat lähellä kiskojen kiinnityskohtia jakaen kuormitusta enemmän ratapölkkyjen päille keskikohdan sijaan. Kuormitusimpulssin kesto mittauksissa oli noin 40 ms. Tämän systeemin ajatellaan tuottavan radalla suurella nopeudella liikkuvan yksittäisen akselin kaltaisen kuormituksen [6]. Vaikka pudotuspainolaitteen kuormitustapahduma on luonteeltaan dynaaminen, käytetään mitatusta jäykkyydestä useissa lähteissä käsitettä kvasistaattinen ratapölkyn alapuolinen jäykkyys (*quasi-static sleeper stiffness*) [64]. [65]



Kuva 4.1. Yleiskuva mittauksissa käytetystä modifioidusta pudotuspainolaitteesta. [66]

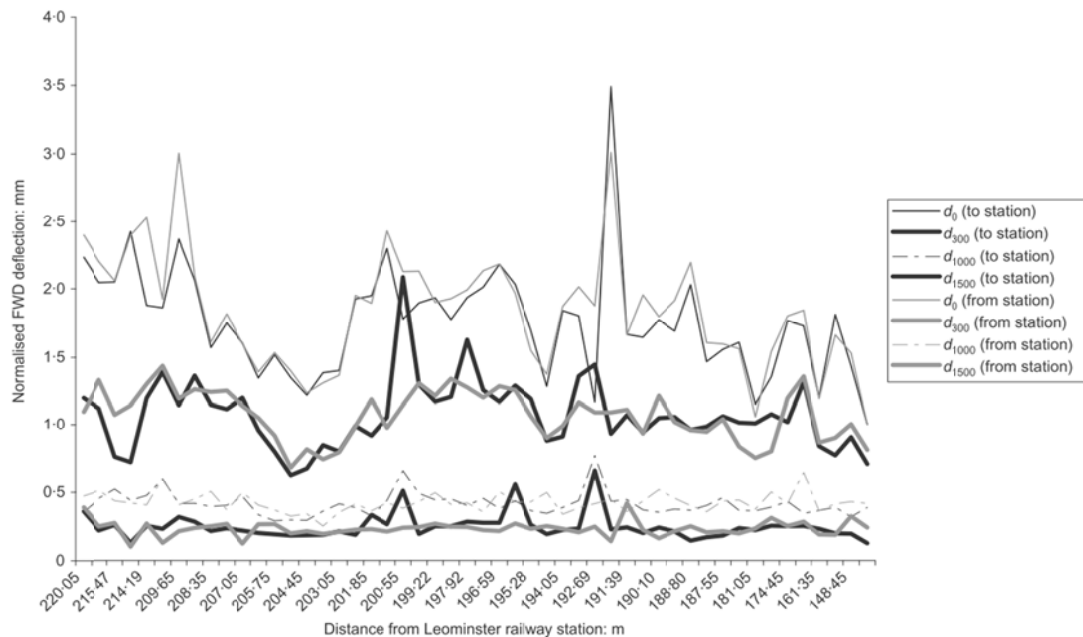
Painon pudottamisen aiheuttaman taipumasuppilon mittaamiseen käytetyt geofonit sijoitettiin kuormituskohdan lisäksi 300 mm, 1000 mm ja 1500 mm päähän kuormituskohdasta kuvassa 4.2 esitetyllä tavalla. Kuvan mitat ovat metrejä ja mittaukset tehtiin kahdessa osassa kuormitetun ratapölkyn molemmin puolin. [65]



Kuva 4.2. Pudotuspainolaitemittausten mittausjärjestelyt ja geofonien sijoittelu pudotuskohdan suhteen. [65]

Mittausosuudella ratarakenne koostui 0,7 m paksuisesta tukikerroksesta, josta alin 0,5 m oli huonolaatuista. Tukikerroksen alapuolella oleva pohjamaa koostui ensin 2,25 m paksuisesta, jäykkyydeltään vaihtelevasta savikerroksesta ja sen alapuolella 7,85 m paksuisesta hiekkaisesta/soraisesta kerroksesta. Kuvassa 4.3 on esitetty mittauksin saadut normalisoidut taipumat. Kuvasta voidaan havaita taipumien olevan kuormituskohdan alla noin 1,5...2,0 mm ja 1000 mm päässä olevan geofonin kohdalla

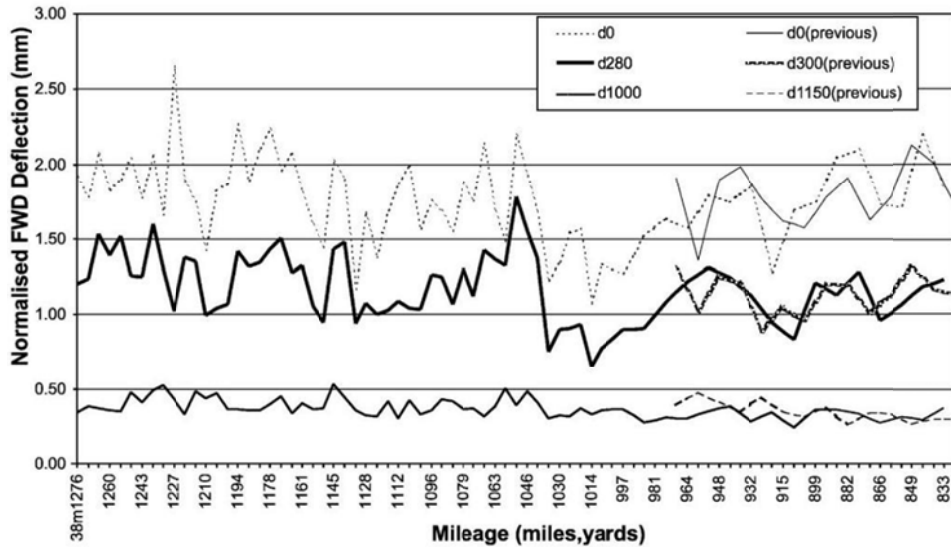
noin 0,4...0,5 mm. [65] Valitettavasti artikkelissa ei ole esitetty taipuma-arvoja vastaavia jäykkyyksiä, sillä mittaukset tehtiin enemmänkin taipumadatan saamiseksi ratamallin luomista varten kuin varsinaisen jäykkyyden mittaamiseksi.



Kuva 4.3. Pudotuspainolaitemittauksin saadut taipumaprofiilit. [65]

Erään toisen tutkimusprojektin yhteydessä tehtiin myös pudotuspainolaitemittauksia 405 metrin pituisella rataosuudella kahdella vierekkäisellä raiteella samalla seudulla kuin edellä esitellyt mittaukset. Tällä osuudella tukikerros oli 0,6 m paksuinen, josta alin 0,3 m oli pohjamaan saviseen silttiin sekoitunutta. Pohjavedenpinta sijaitsi tukikerroksessa noin 0,5 m syvyydellä. Tukikerroksen alapuolella oli 0,4 m paksuinen kerros savista silttiä, jonka alapuolella 2,4 m paksuinen kerros jäykkyydeltään vaihtelevaa savea. Savikerroksen alapuolella maaperä oli hiekkaa/soraa 8,6 m syvyyteen saakka, mihin maaperätiedot loppuvat. [64]

Mittauksin saatu taipumaprofiili on esitetty kuvassa 4.4. Kuvan oikeassa reunassa olevat aikaisemmat profiilit on mitattu 6 kuukautta ennen koko rataosuuden kattavia mittauksia. Näissä mittauksissa käytetyt geofonien etäisyydet kuormituspisteestä on ilmoitettu kirjaimen d jälkeen millimetreinä. [64]



Kuva 4.4. Pudotuspainolaitemittauksin saatu taipumaprofiili. [64]

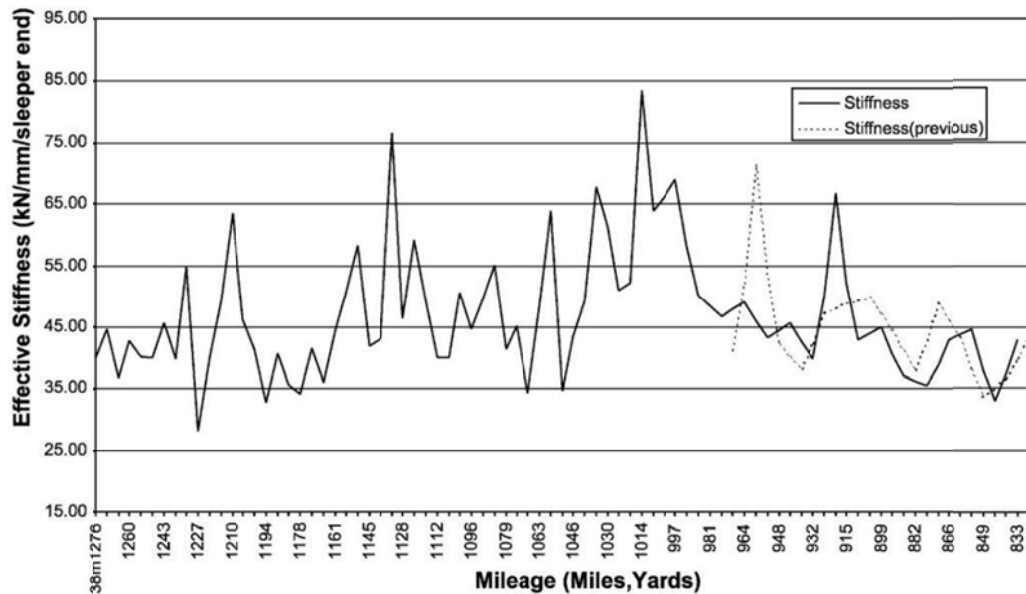
Kuormituksen ja taipumatietojen perusteella voidaan laskea radan eri osien jäykkyys. Esimerkiksi tukikerroksen sekä sen alapuolisen kerroksen jäykkyys lasketaan usein kuormituksen sekä kuormituslevyn kohdalla olevan ja 1000 mm päässä olevan geofonin mittaamien taipumien avulla yhtälön 4.1 mukaisesti. Osoittajassa oleva 62,5 kN tulee pudotuspainon aiheuttaman kuorman 125 kN puolikkaasta, sillä jäykkyys ilmoitetaan yhdelle ratapölkyn päälle. [6]

$$K = \frac{62,5}{(d_0 - d_{1000})} \quad (4.1)$$

missä

- K = jäykkyys [kN/mm/pölkyn pää]
 d_0 = taipuma kuormituslevyn kohdalla [mm]
 d_{1000} = taipuma 1000 mm päässä kuormituslevystä [mm]

Kuvassa 4.5 on esitetty kuvan 4.4 taipumatietojen perusteella lasketut jäykkyydet. Artikkelista ei yksiselitteisesti käy ilmi kuinka jäykkyydet on laskettu, mutta ainakin tarkastuslaskelmien perusteella vaikuttaisi siltä, että jäykkyyksien määrittämiseen on käytetty yhtälöä 4.1 ja juuri siinä esitettyjen geofonien kohdilla syntyneitä taipumia. Hieman epäselväksi jää, mitä osaa ratarakenteesta kyseiset jäykkyydet kuvaavat, sillä Berggrenin [6] mukaan d_{1000} avulla voidaan kuvata tukikerroksen sekä väli- ja eristyskerroksen jäykkyyttä kun taas Burrow'n et al. [65] mukaan d_{1000} kuvaa pohjamaan taipumia. Ristiriita selittynee eri maille tyypillisten ratarakenteiden eroilla. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa tukikerros sijaitsee usein suoraan pohjamaan päällä, kun taas Ruotsissa samalla syvyydellä sijaitsee alusrakenteen väli- ja eristyskerrokset. [64]



Kuva 4.5. Kuormitus- ja taipumatietojen perusteella lasketut jäykkyydet. [64]

Pudotuspainolaitteesta on kehitetty myös kevyempiä, kannettavia sovelluksia (*Light Falling Weight Deflectometer, LFW*D), joiden pudotuspainon massa on tyypillisesti 10 - 20 kg, pudotuskorkeus alle metrin ja kuormituslevyn halkaisija 100...300 mm. Kevyessä pudotuspainolaitteessa ei ole erillisiä geofoneja, vaan taipumaa mitataan ainoastaan pudotuskohdasta. Kevyehkön kuormituksen takia kannettavan laitteen kuormitusvaikutus ei ulotu kovin syväälle eli laite ei sovellu sellaisenaan radan kokonaisjäykkyyden mittaamiseen. Kevyttä pudotuspainolaitetta on kuitenkin käytetty rataympäristössä esimerkiksi ratapölkyn alaisten tyhjätilojen havaitsemiseen, mihin sen havaittiin olevan varsin käyttökelpoinen menetelmä [67]. [36]

Arvioitaessa pudotuspainolaitteen soveltuvuutta radan jäykkyyden mittaamiseen, menetelmän etuja ovat laaja käyttökokemus tieympäristöstä, laitteiden helppohko saatavuus sekä ainakin likimäärin radalla liikkuva kalustoa vastaava kuormitustaso. Lisäksi varsinainen mittaustapahtuma on nopea, osa tuloksista saadaan heti käyttöön ja mittauksia voitaneen tehdä myös Suomen oloissa ympäri vuoden.

Pudotuspainolaitteen käytöllä radan jäykkyyden mittaamiseen saattaa olla useita rajoituksia tai epävarmuuksia. Ensinnäkin laite itsessään on melko suuri eli sitä ei voida kantaa mittauspaijalle, vaan laitteen täytyy pystyä liikkumaan kiskoja pitkin joko omalla moottorilla tai työnnettynä/vedettynä. Samalla laite varaa radan eli radalla ei voida liikennöidä normaalisti mittausten aikana ja lisäksi työvälin tulee olla melko pitkä, sillä laitetta ei voida käsivoimin nostaa pois kiskoilta mittausten välillä sen koon takia.

Vaikka varsinainen mittaustapahtuma on nopea, voi valmisteleisiin toimiin kulua paljonkin aikaa ja kerrallaan voidaan kuormittaa/mitata ainoastaan yksi ratapölkky. Ainakin aiemmin esitellyissä mittauksissa kuormitettava ratapölkky oli irrotettu kiskoista ilmeisesti kiskonkiinnityksen kuormitusta vastustavien voimien poistamiseksi. Tähän kuuluu jonkin verran aikaa ja lisäksi kiskojen takaisinkiinnittämisessä mittauksen jälkeen on oltava huolellinen. Toinen mittauksia hidastava tekijä saattaa aiheutua tukikerroksen pinnasta. Tukikerroksen pinta on tyypillisesti hyvin epätasainen, joten kaikki geofonit eivät välttämättä asetu tasaisesti mitattavalle pinnalle ja tuloksiin

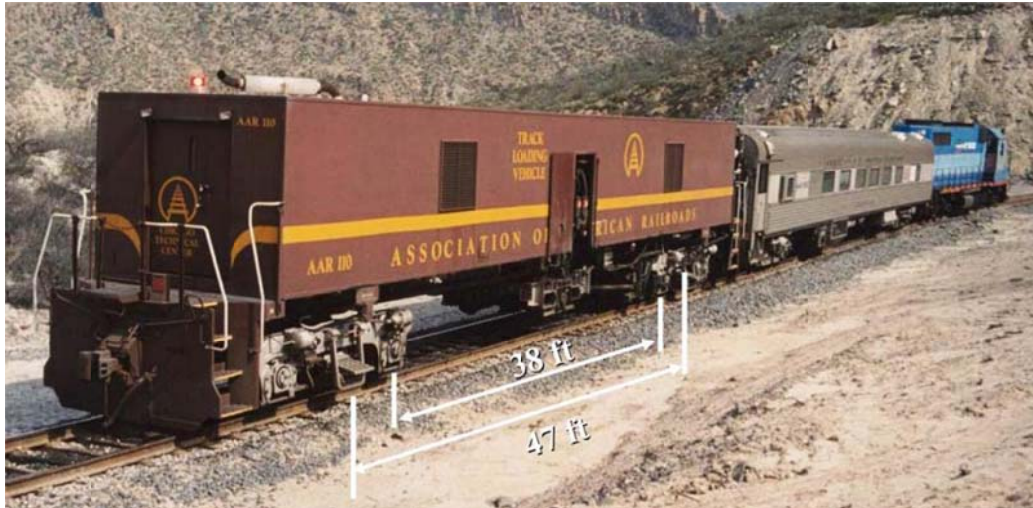
saattaa syntyä virhettä. Virheiden todennäköisyyttä voidaan vähentää tekemällä mitaus mahdollisimman huolellisesti tai asettamalla myös uloimmat geofonit kiskoista irrotettujen ratapölkkyjen päälle. Kuormitetun ratapölkyn päältä mitatun maksimitaipuman arvon voitaneen olettaa olevan luotettava. Kuormituksen säätely pudotuspainolaitteella on mahdollista esimerkiksi pudotuskorkeutta muuntelemalla, mutta tämä vaatii aina ylimääräisen pudotuksen.

Menetelmällä saatavia tuloksia ja niiden käsittelyä arvioitaessa, voidaan todeta, että kuormitetun ratapölkyn päältä mitatun maksimitaipuman avulla voidaan laskea radan jäykkyys yhtälöstä 2.2 yksittäisen pisteen kuormitustestin mukaisesti sillä erotuksella, että pudotuspainolaitteen tapauksessa taipuma kuvaa ratapölkyn painumaa kiskon taipuman sijaan. Lisäksi eri etäisyyksille sijoitettujen geofonien avulla saadaan selville taipumaprofiilin muoto ja voidaan arvioida myös eri rakennekerrosten jäykkyyksiä. Taipumaprofiilin avulla saattaa olla mahdollista käyttää jäykkyyden määrittämissä menetelmänä luvussa 3.2.1 esiteltyä taipumamuotoon perustuvaa testiä. On epävarmaa, voidaanko mittaustuloksesta erottaa ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan vaikutus taipuman suuruuteen kuormituspisteessä, mutta tyhjätilan suuruuden arvioiminen taipumaprofiilista saattaisi olla mahdollista. Pudotuspainolaitemittauksissa tieto ratapölkyn yläpuolisten radan osien, kuten kiskon ja välilevyn, vaikutuksesta radan kokonaisjäykkyyteen jää edellä esitellyllä tavalla toteutettavissa mittauksissa saavuttamatta.

4.2 Mittausvaunut

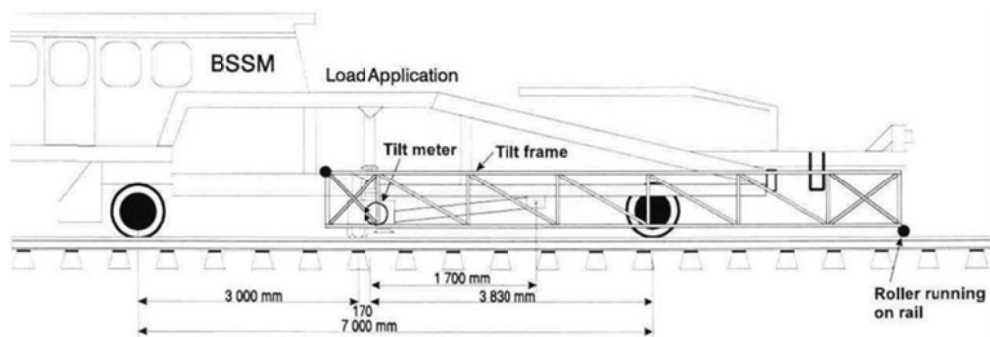
Jäykkyyden mittaamiseen käytetyt mittausvaunut (*Track Loading Vehicle, TLV*) hyödyntävät omaa painoaan radan kuormittamiseen. Tyypillisesti kuormituksen kohdistaminen tapahtuu hydraulisten tunkkien avulla ja kuormitus kohdistetaan kiskojen päälle. Kuormitus voidaan kohdistaa myös ratapölkkyyn, joka on irrotettu kiskoista. Kuormituksen suuruus ja sen säätelymahdollisuudet vaihtelevat vaunukohtaisesti. [6]

Maa-ilmalaajuudesta ei ole olemassa kovin montaa mittausvaunua. Yhdysvalloissa on ainakin Transportation Technology Centerin (TTCI) kehittämä mittausvaunu sekä jo 1980-luvulla AAR:n (*Association of American Railroads*) tutkimusprojektin yhteydessä alun perin raidelevyden pisyvyyden tutkimiseen kehitetty DECAROTOR, jota on ajan kuluessa modifioitu paremmin erilaisiin tutkimustarkoituksiin sopivaksi. Alkuaikoina DECAROTOR:n pystysuuntainen maksimikuorma oli 9000 kg eli melko vähäinen. Kuormitusmahdollisuuksien kehittymisestä ajan kuluessa ei ole DECAROTOR:n osalta tarkempaa tietoa. DECAROTOR:n mittauksessa kuormitus kohdistetaan telikeskiöväliiltään noin 12 metrisen mittausvaunun keskellä sijaitseviin kuormituspyöriin hydraulitunkkien välityksellä ja mittauslaitteisto sijaitsee seuraavassa vaunussa. Nykyaikaisempi, TTCI:n käytössä oleva, kuvassa 4.6 esitetty mittausvaunu pystyy kuormittamaan kiskoa 4 – 267 kN staattisella kuormituksella. [6], [68]



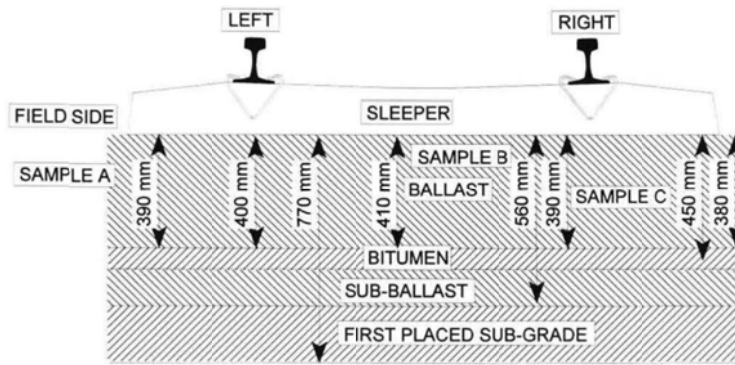
Kuva 4.6. TCI:n mittausvaunu. [69]

Etelä-Afrikassa on kehitetty BSSM:ksi kutsuttu mittausvaunu. BSSM pystyy kuormittamaan kiskoja kahden itsenäisen hydraulitunkin avulla. Kuormituksen aiheuttama ratapölkyn pystysuuntainen painuma mitataan kuormituslaitteistosta erilliseen palkkiin kiinnitettyjen kallistusanturien avulla kuvan 4.7 mukaisesti. Laitteiston maksimikuormitustaso ei käynyt lähdeaineistosta ilmi, mutta se pystyy ainakin 128 kN kuormitukseen kiskoja kohden kummallekin kiskolle samanaikaisesti. [70]



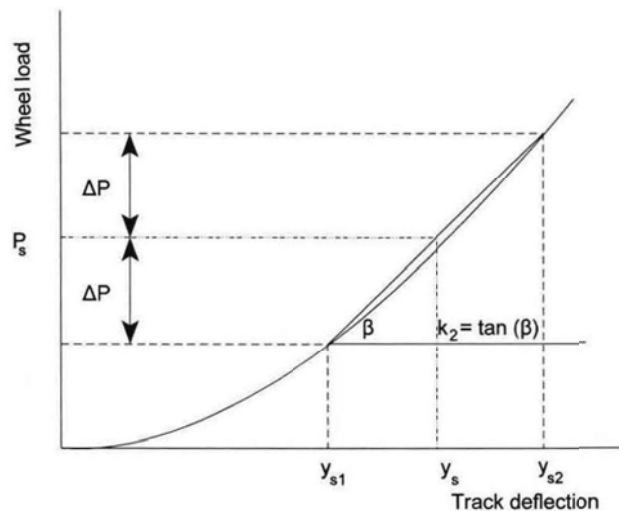
Kuva 4.7. Periaatekuva BSSM-mittausvaunusta ja sen toiminnasta. [70]

Fröhlingin [70] väitöksessään esittelemissä mittauksissa BSSM:lle käytettiin kuormitus-portaita 0, 29, 49, 78 ja 128 kN molemmille kiskoille erikseen. Mittauksia tehtiin jokaisen ratapölkyn kohdalla 150 ratapölkyn pituisella osuudella pölkkyvälin ollessa 650 mm ja raideleveyden ollessa 1140 mm. Kuvassa 4.8 on esitetty radan rakenne mittausosuuden keskivaiheilla ratapölkyn nro 77 kohdalla. Mittausosuus sijaitsi koko pituudeltaan leikkauksessa.



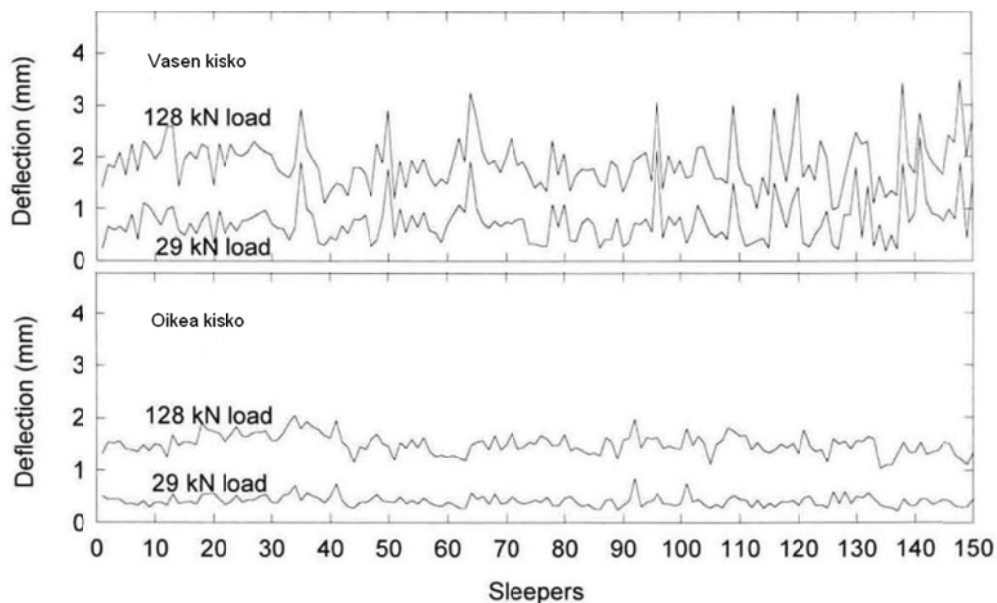
Kuva 4.8. Ratarakenne mittausosuudella ratapölkyn nro 77 kohdalla. [70]

Väitöksessä ei suoranaisesti esitetty mittausten perusteella laskettuja jäykkyyssarvoja, sillä tuloksia käytettiin ensisijaisesti ratamallin luomiseen. Jäykkyys esitettiin kuitenkin laskettavaksi kuvassa 4.9 esitellyllä tavalla. Kuvasta havaitaan, että jäykkyys ehdotetaan laskettavaksi staattisesta pyöräkuormasta P_s dynaamisten kuormituslisien ΔP avulla interpoloitujen painumien y_{s2} ja y_{s1} perusteella. Dynaaminen kuormituslisä saadaan kertomalla staattinen pyöräkuorma P_s jollain kertoimella. Fröhlingin mukaan hyvä oletusarvo kyseiselle kertoimelle on 0,3. [70]



Kuva 4.9. Radan jäykkyyden laskemiseen käytettäviksi ehdotettujen parametrien havainnollistaminen kuormitus-taipuma-kuvaajassa. [70]

Kuvassa 4.10 on esitetty BSSM-mittauksin saadut kuormitus-taipuma-profiilit kummallekin kiskolle erikseen. On huomioitava, että kuvassa esitetyt taipumat on mitattu ratapölkkyistä. Mittausosuudella kiskon ja betoniratapölkkyjen välissä oli polyeteenivälilevy, jonka vaikutus taipumaan jäi näin ollen mittauksissa saavuttamatta. Kuvasta voidaan nähdä, että 128 kN pyöräkuormilla taipumat ovat suunnilleen 1...3 mm suuruisia ja 29 kN pyöräkuormilla pääsääntöisesti alle 1 mm suuruisia. Oikean kiskon puoleiset pienemmät taipumat ja tasaisempi taipumakäyttäytyminen selittynevät sillä, että mitatun raiteen oikealla puolella sijaitti toinen raide, jonka rakenteet tukivat voimakkaammin oikeanpuoleista kiskoa. [70]



Kuva 4.10. BSSM-mittauksin saadut kuormitus-taipuma-profililit kiskoittain. Muokattu lähteestä [70]

Muita jäykkyyden mittausvaunuja ovat muun muassa Esveldin tukikerroksen tukemiskalustosta kehittämä vaunu sekä Ruotsin Banverketin TLV. Banverketin TLV painaa 49 tonnia, pystyy kuormittamaan kumpaakin kiskoa staattisesti aina 150 kN asti ja aiheuttamaan dynaamisia kuormituksia 200 Hz taajuudelle saakka. Lisäksi myös raitteen sivusuuntaisen jäykkyyden mittaaminen on mahdollista. [6]

Mittausvaunujen merkittävimpiä etuja ovat laajat kuormituksen säätelymahdollisuudet ja se, että useimmilla vaunuilla pystytään mittaamaan kiskojen taipumaa rata-pölkkyjen painumien sijaan. Jälkimmäisen ansiosta mittaustulokseen sisältyy suoraan myös kiskon taivutusjäykkyyden ja välilevyn vaikutus. Kuormituksen säätely mahdollistaa esimerkiksi ratapölkyn alaisen tyhjätilan huomioimisen mittauksissa. Lisäksi oikeanlaisilla tunkeilla pystytään luomaan myös dynaamisia kuormituksia ja vaihtelemaan niiden taajuutta. Mittausvaunuja käytettäessä luonnollinen valinta jäykkyyden määrittämis-/ laskentamenetelmäksi on yhden pisteen tai akselin kuormitustesti, joka esiteltiin luvussa 3.2.2. Taipumamuotoon perustuvan testin käyttämisen mahdollistaminen vaatisi koko taipumamuodon mittaamista, mikä ei ainakaan suoraan ole mahdollista useimmissa mittausvaunuissa.

Muita mittausvaunun käytön etuja ovat turvallisuus ja yhden mittauksen vaatiman työmäärän vähäisyys. Radan ollessa mittaukseen varattuna ei ole törmäysten vaaraa ja henkilövahinkojen riski on pieni, sillä mittaustapahtumaan ei liity kaivamista tai muuta varsinaista radalla työskentelyä. Lisäksi mittaaminen on työvoimatarpeen kannalta melko kevyttä, sillä mittaamiseen vaadittava kalusto kulkee vaunun mukana eikä raskaita asennus- tai esivalmistelutöitä yleensä tarvita.

Merkittävimpana rajoitteena mittausvaunun käytössä on sen ratakapasiteetin tarve. Liikenteen sallimiseksi mittausten välillä vaunu tulee ajaa erilliselle raitteelle ja useinkaan tähän ei ole mahdollisuuksia kohtuullisen matkan päässä eli käytännössä radalla ei voida liikennöidä mittausten aikana. Vaunu vaatii myös vetävän kalustoyksikön kuljettajineen liikkuaan.

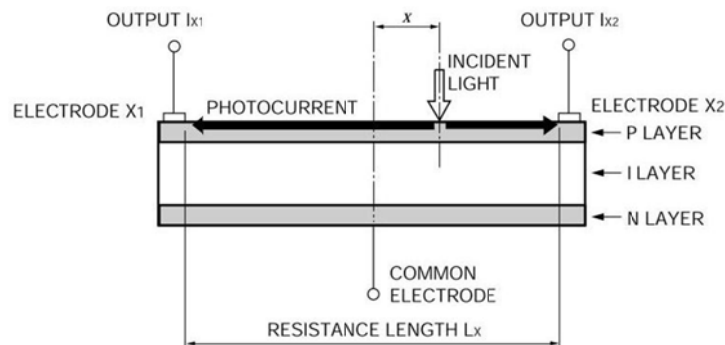
4.3 Lasersovellukset

Teollisuudessa sekä esimerkiksi kiskojen kunnan valvonnassa on jo pitkään käytetty hyväksi lasermittaamista etäisyyksien, siirtymien ja kulmien mittaamiseen. Myöhemmin 2000-luvulla lasersovelluksia on hyödynnetty myös radan kuormituksen alaisten pystysuuntaisten siirtymien mittaamiseen. Lasersovelluksista on olemassa useita erilaisia mittaamenetelmiä, jotka voidaan jakaa karkeasti kahteen ryhmään niiden mittauseriaaarten mukaan. Ensimmäisen ryhmän menetelmät perustuvat lasersäteen sijainnin seuraamiseen jollain pinnalla ja toisen ryhmän menetelmät lasersäteen kulkeman matkan mittaamiseen.

4.3.1 Lasersäteen sijainnin mittaamiseen perustuvat menetelmät

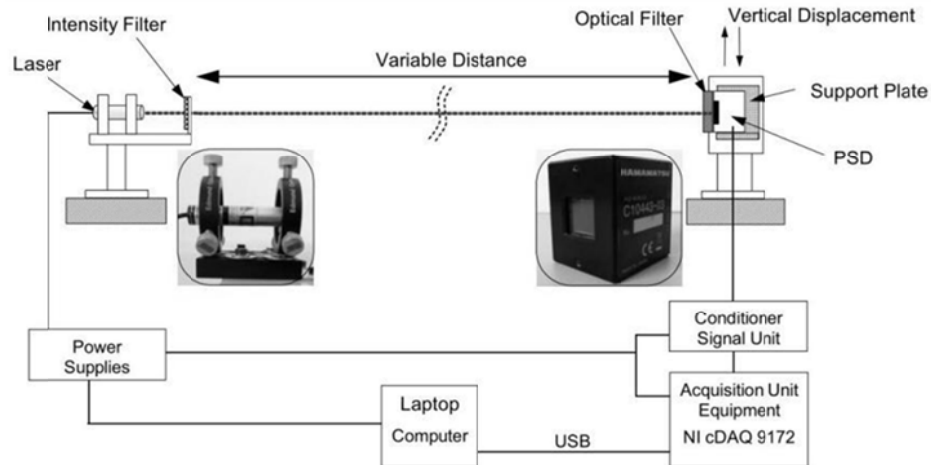
PSD

Lasersäteen sijainnin mittaamiseen perustuva mittaus tapahtuu kohdistamalla lasersädelähde vastaanottimeen, joka on kiinnitetty mitattavaan kohteeseen, esimerkiksi kiskoon. Mittaushetkellä laserlähde pysyy paikallaan ja säde liikkuu vastaanottimen pinnalla mittaushetken liikkuessa. Vastaanotin voi olla esimerkiksi paikkaherkkä ilmaisimen (*Position Sensitive Detector/Device, PSD*), joka pystyy tunnistamaan siihen kohdistetun valonsäteen keskipisteen paikan perustuen valosähkövirran jakautumiseen [71]. Kuvassa 4.11 on havainnollistettu PSD:n rakennetta, jota kutsutaan myös PIN-rakenteeksi ilmaisimissa olevien P-, I- ja N-kerrosten perusteella. [62], [72]



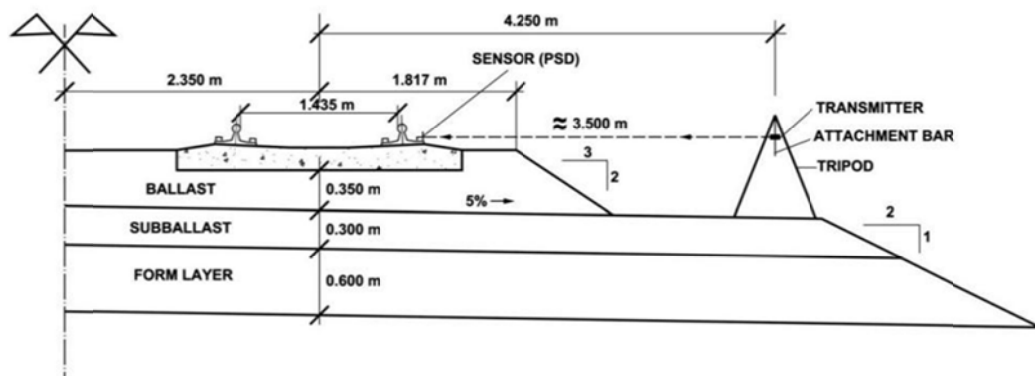
Kuva 4.11. Paikkaherkän ilmaisimen eli PSD:n rakenne. [73]

Laserialähteen ja PSD-ilmaisimen lisäksi mittaukseen tarvitaan kuvassa 4.12 esitellyllä tavalla virtalähteet, tiedonkeruuyksikkö, mahdolliset suodattimet sekä esimerkiksi kannettava tietokone ja sopiva ohjelmisto mittaustietojen tarkastelemista varten. Pinto et al. [72] käyttivät mittauksissaan Portugalissa laserlähdettä, joka toimi 635 nm aallonpituudella ja sen optinen teho oli 6 mW. Ilmaisimena käytettiin kaksi-dimensionaalista 12x12 mm² PSD:tä. Kaksi-dimensionaalisuus tarkoittaa ilmaisimen kykyä tunnistaa kahden kohtisuoran samassa tasossa olevan akselin suuntaisia liikkeitä. Kooltaan 12 x 12 mm² ilmaisimen on ainakin Hamamatsun [73] katalogin mukaan suurin saatavilla oleva, mutta se on riittävä mittaamaan tavanomaisia radan taipumia. Radan jäykkyyttä mitattaessa tarvitsee mitata ainoastaan pystysuuntaista liikettä, joten myös yksi-dimensionaalinen PSD sopisi jäykkyyden mittaamiseen.



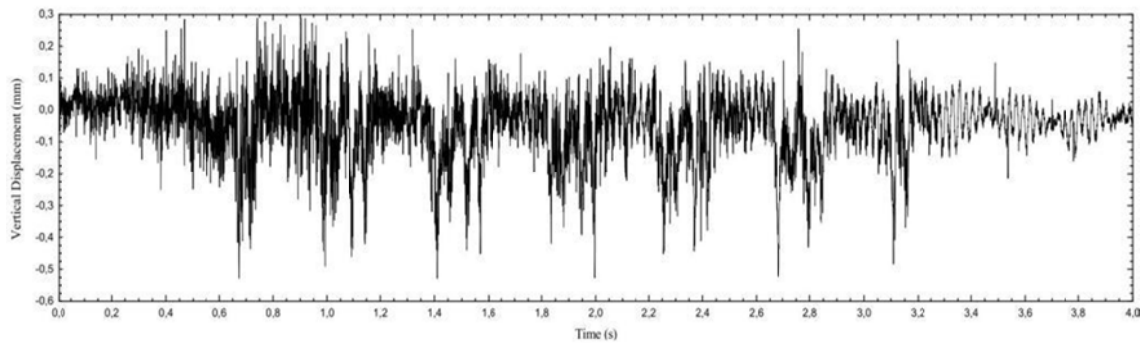
Kuva 4.12. Periaatekuva PSD-mittaussovelluksesta ja tiedonkeruusyhteisyydestä. [72]

Laserlähteen ja PSD:n välisen etäisyyden kasvu heikentää mittaustarkkuutta. Lisäksi laserlähde vaatii alustakseen tukevan ja liikumattoman paikan, minkä löytäminen rataympäristössä voi usein olla hankalaa. Portugalissa Pinton et al. [72] tekemien mittausten yhteydessä mittaussysteemin tarkkuutta pitkillä mittausetäisyyksillä testattiin laboratorio-olosuhteissa. Käytetyt mittausetäisyydet vaihtelivat välillä 2 – 12 m. Laboratoriomittauksissa todettiin, että käytössä olleella laitteistolla ja edellä mainituilla mittausetäisyyksillä mittaussysteemi on luotettava mitattaessa alle 5 mm siirtymiä. Tätä suuremmilla siirtymillä erot eri mittausetäisyyksien välillä kasvoivat jo merkittäviksi. Portugalissa sekä Espanjassa INNTRACK-projektin yhteydessä tehdyssä tutkimuksessa [62] laserin ja ilmaisimen etäisyytenä varsinaisten mittausten aikana käytettiin noin 3,0 - 3,5 metriä. Portugalissa laser kiinnitettiin läheisen sillan kaidarakenteeseen ja Espanjassa laserin alustana käytettiin kolmijalkaa kuvan 4.13 mukaisesti. Samassa yhteydessä Espanjassa tutkittiin kolmijalan siirtymiä mittauksen aikana asentamalla 2 Hz geofoni kolmijalkaan junan ohikulun ajaksi. Mittauksessa jalustan maksiminopeudeksi saatiin 1 mm/s ja integroimalla havaittiin, että siirtymien maksimiarvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin lasersysteemin tarkkuus eli $\pm 0,01$ mm, joten tärinä ei kyseisissä olosuhteissa haitannut mittausta. [62]



Kuva 4.13. INNTRACK-projektin yhteydessä tehtyjen lasermittausten mittaussysteemi. [62]

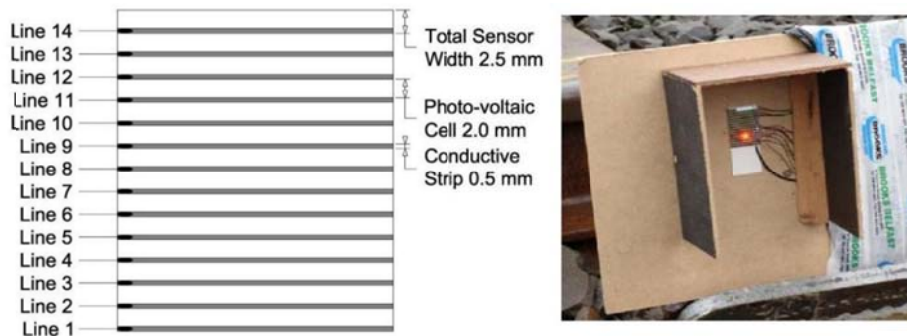
Kuvassa 4.14 on esitetty Portugalin mittauksissa saatu siirtymä-aika-kuvaaja. Kuorimituksena mittauksessa toimi Alfa Pendular -juna, jonka maksimiakselipaino on 14,4 tonnia. Kuvaajasta pystytään pienellä tarkastelulla havaitsemaan kaikki junan 24 akselia. Tässä mittauksessa PSD sijaitsti alikäytävän kohdalla, tarkemmin sanottuna heti alikulun betonirakenteen jälkeen, millä saattaa olla vaikutusta siirtymien suuruuteen ja epätasaisuuteen. Alikäytävän betonirakenteen kohdalta mitatut siirtymät olivat taiseempia ja jonkin verran pienempiä. [72]



Kuva 4.14. Siirtymä-aika-kuvaaja Alfa Pendular -junan ohituksesta nopeudella 220 km/h. [62]

Valoanturi

Hendry et al. [74] ovat Pohjois-Irlannissa turvepehmeikölle rakennetulla radalla mitanneet paikoin lähes 20 mm siirtymiä laserlähteen ja ilmaisimen etäisyyden oltua 20 metriä. Mittauksessa käytettiin hieman PSD:tä muistuttavaa ilmaisinta sillä erotuksella, että käytetyssä anturissa oli jono valoantureita (*photo-sensor array*) allekkain kuvan 4.15 mukaisesti. Korkeudeltaan 2,5 mm valoanturi koostui 2,0 mm korkuisesta jännitevalokennosta ja 0,5 mm korkuisesta johtavasta suikaleesta.

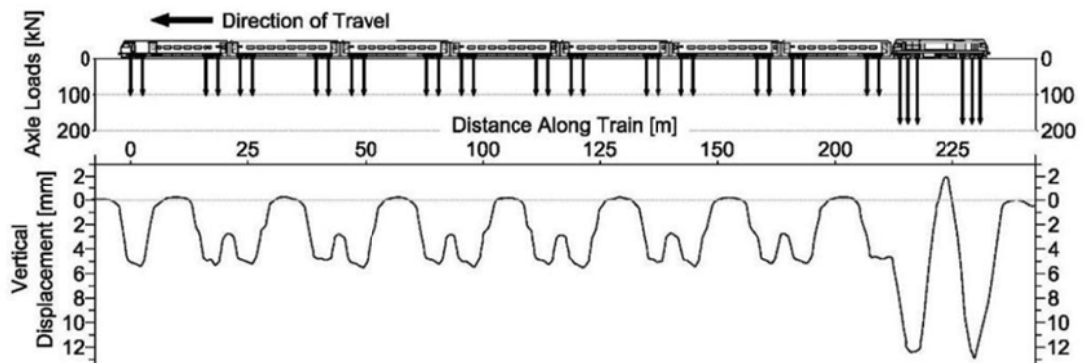


Kuva 4.15. Vasemmalla havainnekuva valoanturirakenteesta ja oikealla kuva systeemistä mittauksen aikana. Muokattu lähteestä [74]

Valoanturimenetelmä perustuu anturien kykyyn muuntaa sen pinnalle tulevan valon määrä/voimakkuus verrannollisesti jännitteeksi. Kun lasersäde tai osa siitä osui anturiin, anturin antama jännite kasvoi 10 – 100 % riippuen taustavalon määrästä. Nämä jännitemuutokset tallennettiin ajan suhteen. Jännitteet muutettiin siirtymiksi yksinkertaisella taulukkolaskentaohjelmalla, jossa jokaisen anturin keskikohdalle annettiin y-koordinaatti alimman anturin keskikohdan ollessa nollassa. Lasersäde tarkennettiin levyyn siten, että säde oli pienempi kuin kolmen anturin leveys ja suurempi kuin yhden anturin leveys. Jokaiselle aika-arvolle tunnistettiin anturi, johon laser vaikutti

eniten. Tämän jälkeen taustavalon vaikutus eliminoitiin laserin eniten vaikuttaman anturin ja sen viereisten antureiden jännitteistä. [74]

Kuvassa 4.16 on esitetty Pohjois-Irlannin mittauksissa saatu siirtymä-aika-kuvaaja kuormittavan junan akselipainojen ja pituuden suhteen. Kuvasta on selkeästi havaittavissa yksittäisten telien aiheuttamat siirtymät ja akselipainojen erojen vaikutus siirtymien suuruuteen. Lisäksi etenkin veturin aiheuttamat siirtymät ovat verrattain hyvin suuria, mikä johtuu todennäköisesti radan sijainnista turvepehmeiköllä. [74]



Kuva 4.16. Valoanturimittauksella saatu siirtymä-aika-kuvaaja akselipainojen ja junan sijainnin suhteen. [74]

Vertailtaessa PSD-menetelmällä ja valoanturimenetelmällä saatuja siirtymä-aika-kuvaajia, havaitaan jälkimmäisen kuvaajan olevan huomattavasti helppolukuisempi. Tämä saattaa johtua osin siitä, että PSD:lle käytetty mittaustaajuus oli 2000 Hz ja valoantureille 20 Hz, jolloin PSD-mittauksessa saatavien yksittäisten mittausten määrä nousee suureksi [72], [74]. Suodattamalla tai sovittamalla PSD-dataa jotenkin, saattaisiin saada aikaan helppolukuisempi kuvaaja. Lisäksi on huomioitava, että valoanturimittauksessa mitattavat siirtymät olivat kymmenkertaisia verrattuna PSD-mittauksen siirtymiin.

Kummassakaan tutkimuksessa ei siirtymätuloksia hyödynnetty radan jäykkyuden laskemiseen, mutta ainakin periaatteessa jäykkyuden laskeminen on mahdollista esimerkiksi yksittäisen pisteen kuormitustestiä tai taipumamuotoon perustuvaa testiä käyttäen. Käytettäessä radalla liikkuvaa kalustoa kuormituksena, taipumamuotoon perustuvan testin käyttäminen on ainakin periaatteessa mahdollista, vaikka radan taipumaa mitattaisiin vain yksittäisestä pisteestä. Tämä johtuu siitä, että seuraamalla yksittäisen pisteen taipumaa junan ylityksen aikana, saadaan tuloksena samankaltainen taipumasuppilo ajan suhteen kuin mittaamalla taipumasuppilon muoto pistemäisen paikallaan pysyvän kuormituksen koko vaikutusalueelta. Tosin tällöin kuormituksen luonne ja suuruus eivät täysin vastaa toisiaan.

4.3.2 Lasersäteen heijastumiseen perustuvat menetelmät

Sekä PSD- että valoanturisovelluksissa taipumia mitattiin ainoastaan yhdestä pisteestä kerrallaan. Brasiliassa konsulttitoimisto Cibermetrica on kehittänyt yhdessä Cambinasin yliopiston kanssa LDD-sovelluksen (*Laser Dynamic Deflectometer*), jolla voidaan mitata useamman pisteen siirtymää samanaikaisesti. LDD perustuu lasersäteen ja sen heijastumisen mittaamiseen järjestelyllä, joka koostuu kuvan 4.17 mukai-

sesti lasereita kannattelevasta metallikehikosta ja kolmesta laserlähteestä vastaanottiminen sekä kolmesta heijastimesta. Lisäksi järjestelmä vaatii toimiakseen virtalähteen, datankeruuprocessorin sekä tietokoneen ohjelmistoineen. Laserin mittaustarkkuudeksi mainitaan tarkempi kuin 0,01 mm. [75]



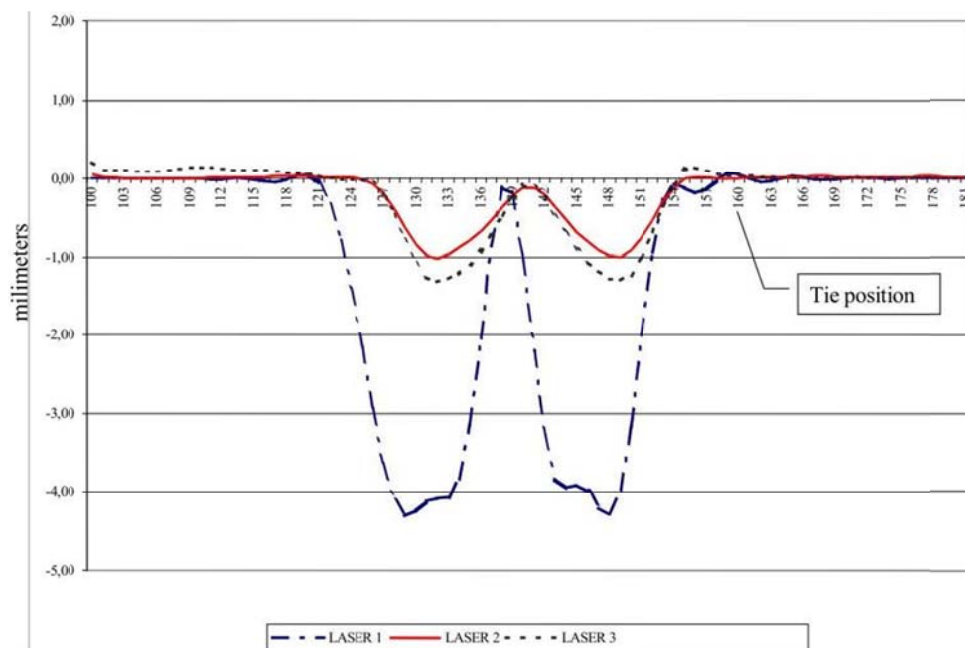
Kuva 4.17. Yleiskuva LDD:stä mittauskäytössä. [75]

Mittausjärjestely on melko yksinkertainen. Kehikko, jonka tukipisteet ovat tarpeeksi kaukana radasta välttyäkseen kuormitus-/tärinävaikutukselta, asetellaan siten, että yhdistetyt laserlähde-vastaanottimet voidaan asentaa ratapölkyn pään yläpuolelle. Ratapölkyn päähän asennetaan heijastin kuvan 4.18 osoittamalla tavalla. Lisäksi kyseisessä tutkimuksessa mitattiin myös tukikerroksen taipumia välittömästi ratapölkyn pään alla, minkä vuoksi kuvassa 4.18 näkyy kaksi heijastinta. Tutkimuksessa mitaustaajuutena käytettiin 2000 Hz, kuormituksena akselipainoltaan sekä 20 että 30 tonnin vetureita ja kuormittavien junien suurimpana nopeutena 50 km/h. [75]



Kuva 4.18. Laserlähteet kehikossa sekä heijastimet asennettuna ratapölkyn päähän ja tukikerroksen pinnalle. [75]

Tutkimuksessa mitattiin useassa eri kohteessa 24 metrin mittaisia rataosuuksia, jotka sisälsivät 28 ratapölkkyä. Kuvassa 4.19 on esitetty nopeudella 18 km/h edenneen akselipainoltaan 20 tonnin veturin vaikutuksesta syntyneet taipumat ratapölkkyjen sijainnin suhteen tiettyinä ajanhetkenä. Laser 1 kuvaa ratapölkyn pään siirtymää ja laserit 2 ja 3 tukikerroksen pinnan taipumia. Kuvasta on selvästi havaittavissa telien akseliparien aiheuttamat taipumat, jotka ovat ratapölkyn päässä suuruudeltaan noin 4 mm. [75]



Kuva 4.19. LDD:llä mitatut taipumat ratapölkkyjen sijainnin suhteen 20 tonnin akselipainolla nopeudella 18 km/h eräällä ajanhetkellä. [75]

Raportissa ei laskettu varsinaista radan jäykkyyttä, mutta mittaustulosten avulla voitaisiin käyttää yksittäisen kuormituspisteen testiin perustuvaa määritysmenetelmää tai taipumamuotoon perustuvaa testiä jäykkyyden laskemiseen. Edellä esitellyllä tavalla toteutettuna mittauksista ei saada tietoa kiskon ja välilevyn vaikutuksesta taipumiin. Hieman soveltaen myös taipumien mittaaminen kiskosta saattaisi olla mahdollista. Koska ratapölkyn pään siirtymien lisäksi mitattiin myös tukikerroksen pinnan taipumat, olisi näitä tuloksia vertailemalla mahdollista arvioida myös ratapölkyn alapuolisen tyhjätilan olemassaoloa ja suuruutta [75].

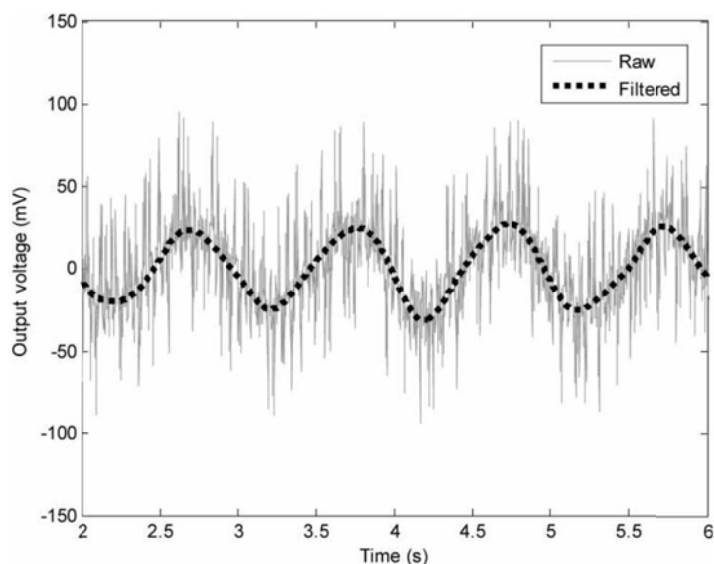
Tässä luvussa esiteltyjen lasersovellusten etuja radan jäykkyyden mittaamisessa ovat ainakin laitteiston kannettavuus, suhteellisen yksinkertainen kokoaminen mittauspai- kalla, ainakin hyvissä olosuhteissa ja ihanteellisessa maastossa, sekä radalla liikennöinnin mahdollisuus mittausten aikana. Mittauspaikat voivat joskus sijaita kilometrienkin päässä lähimmästä autolla saavutettavissa olevasta pisteestä, jonka jälkeen kaikki mittauksessa tarvittava kalusto pitää kantaa tai vetää mittauspai- kalle. Tällöin laitteiston keveys ja mittauksessa tarvittavan kaluston pieni määrä nousevat arvoon- sa. Optimaalisessa tilanteessa laserlähteen pystyttäminen riittävälle etäisyydelle ja ilmaisimen kiinnittäminen ratapölkkyyn tai kiskoon ei ole kovin haastavaa. Vaikeuksia saattavat tuottaa esimerkiksi korkeat jyrkkäluiskaiset penkereet, jolloin laserlähteen, varsinkin LDD:n kaltaisen sovelluksen, sijoittaminen vaakasuoraan ja tukevalle alus- talle on lähes mahdotonta. Tämän vuoksi mittauspai- kan poikkileikkausgeometria tulee tuntee mittauksia suunniteltaessa. Oman haasteensa mittaukseen saattavat muo- dostaa myös vesi- ja lumisateet, mikäli mittaaminen kyseisissä olosuhteissa on edes mahdollista. Ilmaisimen asentaminen ratapölkkyyn tai kiskoon vaatii suhteellisen vä- hän työskentelemistä radan välittömässä läheisyydessä. Lisäksi asentaminen voidaan suorittaa useassa vaiheessa lyhyidenkin työvälien aikana tai turvamiehen valvomana, joten tiheäkään liikennöinti radalla ei estä mittausten käyttöä. Varsinaista mittaustapahtumaa ja sen luonnetta pohdittaessa on nähtävä etuna todellisen radalla liikkuvan kaluston käyttö kuormituksena. Näin saadaan tietoa radan taipumista sen normaalissa käyttötilassa.

Toisaalta lasersovellusten kohdalla voidaan pohtia myös, voidaanko taipumia mitata luotettavasti suurilla nopeuksilla liikkuvien junien ohitusten aikana, sillä ilmavirtauk- set ja varsinkin pehmeiden pohjamaiden alueilla tärinä saattavat aiheuttaa virhettä mittaukseen. Esimerkiksi LDD-mittauksissa kuormittavan veturin nopeus oli hyvin alhainen (18 km/h) todennäköisesti juuri tästä johtuen. Eräs ratkaisu voisi olla yrittää eliminoida tärinän vaikutus mittaamalla myös kehikon/tukipisteen siirtymiä esimer- kiksi kiihtyvyyssanturilla, mutta tämä toisi mittaukseen jälleen yhden epävarmuusteki- jän lisää. Toinen mahdollisuus on viedä laserlähde/kehikon tukipisteet tarpeeksi etäälle raiteesta, mutta tällöin mittaustarkkuus saattaa heiketä merkittävästi.

Mittausteknisenä rajoituksena voidaan nähdä kuormituksen säätelymahdollisuuden puuttuminen, jolloin esimerkiksi ratapölkyn alaista tyhjätilaa tai sen olemassaoloa ei pystytä mittaamaan. Tosin mittaamalla LDD-sovelluksen tapaan sekä ratapölkyn että tukikerroksen siirtymiä, voidaan mahdolliset tyhjätilat ottaa huomioon jäykkyyden laskennassa. Toisaalta myös tehtäessä mittauksia useamman eripainoisen junan ohi- tuksen aikana saadaan jonkinlaista tietoa taipumista eri kuormituksilla.

4.4 Geofonit

Geofoni (*geophone*) on usein käytetty nimitys elektromagneettiselle seismometrille. Geofonin toiminta perustuu nopeuden mittaamiseen kestopagneetin kentässä liikkuvan käämin avulla. Mittauksen ulostulona saadaan sähköinen signaali, tyypillisesti nopeuteen verrannollinen jännite, jonka avulla voidaan laskennallisesti selvittää siirtymä/taipuma. Tyypillisesti geofonien mittausdata ei ole sellaisenaan käyttökelpoista taipumien havainnoimiseen, vaan siitä joudutaan suodattamaan pois esimerkiksi melun aiheuttamat korkeataajuiset häiriöt. Kuvassa 4.20 on havainnollistettu raakadatan ja suodatetun datan ero. Geofonien käytössä on myös muutamia mittausdatasta tai sen keräämisestä ja käsittelemisestä johtuvia virhelähteitä. Esimerkiksi datavirran alussa ja lopussa esiintyy tyypillisesti hetkellisiä virheitä johtuen pääasiassa suodatuksesta, sillä suodatin toimii tietyn datapisteen molemmilla puolilla. Tästä johtuen datan alku- ja loppupisteissä suodatus ei anna oikeita arvoja. Suodatuksen lisäksi myös itse mittausjärjestelmä aiheuttaa matalataajuisia virhettä dataan. Tätä ilmiötä kutsutaan dekonvoluutioksi. Dekonvoluution vaikutus voidaan poistaa lisäämällä mittausjärjestelyyn ylipäästösuoatatin, joka vaimentaa asteittain tietyn taajuuden alapuolella olevia signaaleja. [76], [77]

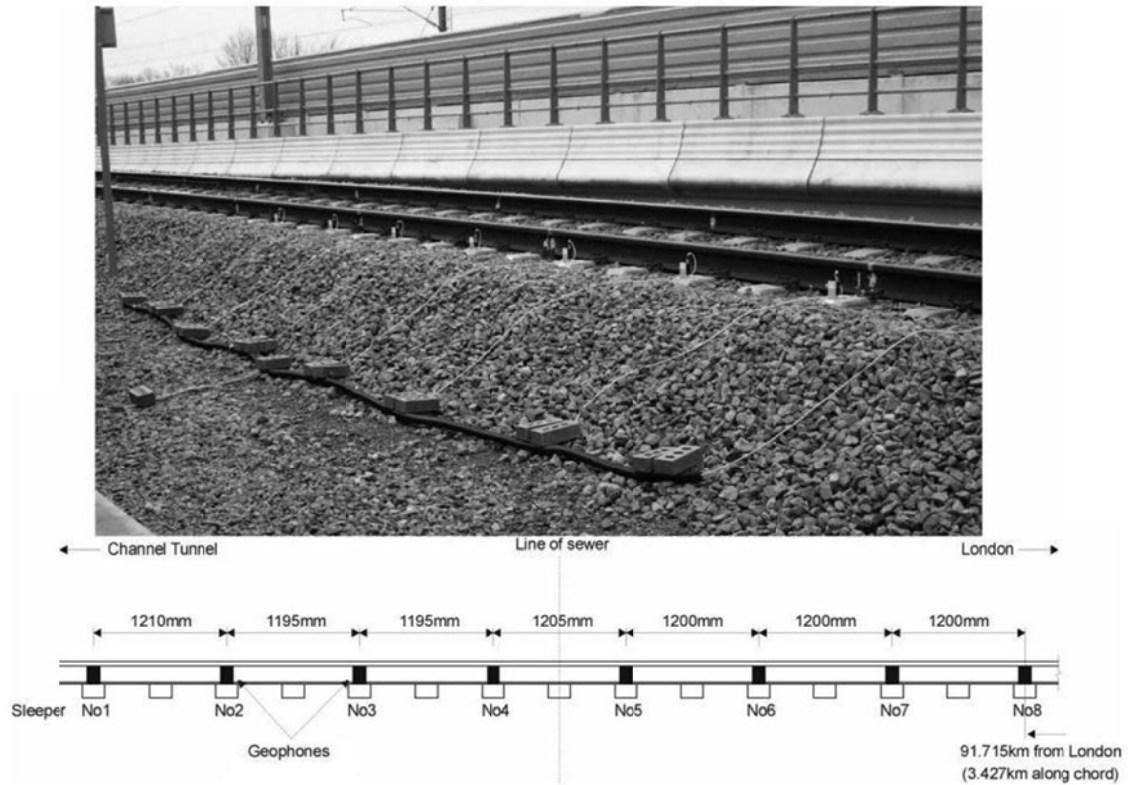


Kuva 4.20. Havainnekuva geofonimittauksella saatavan raakadatan (yhtenäinen harmaa viiva) ja suodatetun datan (tumma katkoviiva) erosta. [77]

Yllä mainituista rajoituksista johtuen geofoneilla ei voida mitata kovin hitaasti tapahtuvia ilmiöitä. Normaaileilla junien liikennöintinopeuksilla tämä ei tuottane ongelmia, mutta asia on huomioitava mittauksia suunniteltaessa. Bowness et al. [77] esittivät omien mittauskokemustensa pohjalta, että kun junan nopeuden ja akselivälin yhdistelmä tuottaa alle 0,5 Hz kuormitustaajuuden, eivät mittaustulokset ole välttämättä enää luotettavia tai ainakaan helppolukuisia. Esimerkiksi 13 metrin telivälillä junan nopeuden olisi oltava yli 25 km/h, jotta kuormitustaajuusvaatimus täyttyy. Tyypillisesti radoilla liikkuvien junien nopeudet ovat tätä huomattavasti korkeampia.

Geofonien käyttöä radan taipumien mittaamiseen on tutkittu ainakin Isossa-Britanniassa [77] käyttäen ominaistajuudeltaan 1 Hz geofonia sekä INNOTRACK-projektin [62] yhteydessä käyttäen ominaistajuutta 2 Hz. Isossa-Britanniassa mitta-

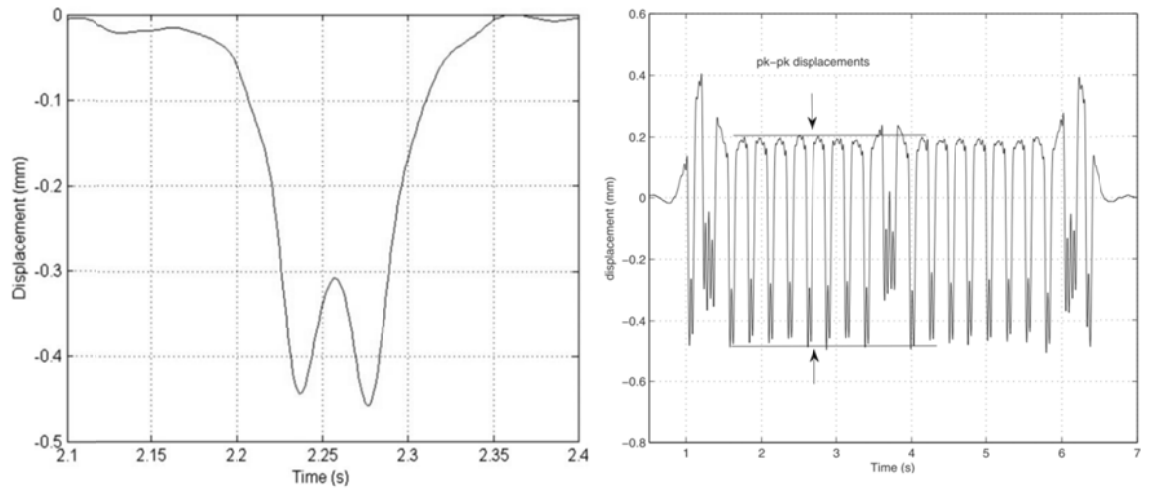
usjärjestely toteutettiin siten, että kahdeksan ratapölkyn päihin kiinnitettiin geofonit liiman ja kulmaraudan avulla. Instrumentoitujen ratapölkkyjen väliin jätettiin yhdet instrumentoimattomat ratapölkkyt kuhunkin väliin, jolloin kahdeksalla geofonilla kalettiin noin 8,4 metrin pituinen rataosuus kuvan 4.21 mukaisesti. [78]



Kuva 4.21. Yleiskuva geofonien sijoittelusta Isossa-Britanniassa tehdyissä mittauksissa. [77]

Ennen varsinaisia kenttämittauksia mittausmenetelmän toimivuutta testattiin laboratorio-olosuhteissa mittaamalla 1 Hz taajuudella toistuvaa hallittua 0,5 mm siirtymäamplitudia sekä geofonilla että siirtymäanturilla. Data kerättiin dataloggerilla 500 Hz taajuudella. Geofonilla saatujen mittaustulosten luotettavuuden todettiin olevan melko hyvä maksimivirheen oltua 0,07 mm. Tätä suuremmilla kuormitustaajuuksilla tarkkuus paranee. [77]

Ison-Britannian mittauksissa käytettiin kuormana radalla 260 km/h nopeudella liikuvaa kalustoa. Kuvassa 4.22 on vasemmalla esitetty yksittäisen telin aiheuttama yksittäisen ratapölkyn pään siirtymä, joka on saatu integroimalla mitattu ratapölkyn nopeus telin ohituksen aikana. Kuvassa 4.22 oikealla on esitetty koko junan yhdelle ratapölkylle aiheuttamat siirtymät. Siirtymien heilahdukset sekä alussa että lopussa johtuvat datan suodatuksesta eivätkä siten edusta todellisia siirtymiä. [78]



Kuva 4.22. Yksittäisen telin yksittäiselle ratapölkylle aiheuttama siirtymä (vas.) ja koko junan ylityksen yksittäiselle ratapölkylle aiheuttama siirtymä ajan suhteen (oik.). Muokattu lähteestä [78]

Tutkimuksen yhteydessä mittaustuloksia käytettiin ratamoduulin laskemiseen kahdella eri menetelmällä. Tarkasteltaessa kuvan 4.22 vasemmanpuoleista kuvaajaa havaitaan sen olevan samankaltainen taipumamuotoon perustuvan testin yhteydessä esitetyn kuvan 3.6 kanssa. Tästä johtuen Priestin & Powrien [78] mukaan on perusteltua laskea dynaaminen ratamoduuli yksittäisen telin tai teliryhmän yksittäiselle ratapölkylle tiettyä ajanjaksona aiheuttamasta siirtymästä vastavuoroisuusperiaatetta hyödyntäen yhtälön 4.2 mukaisesti. Yhtälön 4.2 voidaan havaita olevan yhteneväinen yhtälön 3.18 eli taipumamuotoon perustuvan määrittämenetelmän kanssa.

$$\sum_{j=1}^N P_j = u \cdot S \sum_{i=1}^M \delta_i \quad (4.2)$$

missä

P_j	on ratapölkkyihin samanaikaisesti vaikuttavat kuormat $P_1 \dots P_N$ [N]
u	on ratamoduuli [MN/m/m]
S	on ratapölkkyväli [m]
N	on vaikuttavien kuormien (akselien) määrä
M	on kuorman P vaikutuksesta siirtyvien pölkkyjen määrä
δ_i	on pölkyn i siirtymä [m]

Yhtälön 4.2 käyttö vaatii taipumamittauksia useiden ratapölkkyjen pituiselta osuudelta. Vaihtoehtoisesti ratamoduuli voidaan määrittää radalla kulkevan kaluston etummaisesta akselin ja sitä seuraavien akselien aiheuttamasta taipumasta yhtälön 4.3 tapaan. [78]

$$\delta_0 = \frac{P}{2uL} \left[1 + \sum_{i=1}^n r_i e^{\frac{-x_i}{L}} \left(\cos \frac{x_i}{L} + \sin \frac{x_i}{L} \right) \right] \quad (4.3)$$

missä

δ_0	on etummaisen pyöräkuorman alta mitattu taipuma [m]
P	on etummaisen pyöräkuorman aiheuttama kuormitus [N]
u	on ratamoduuli [MN/m/m]
x_i	on i:nnen pyöräkuorman P_i etäisyys [m]
r_i	on i:nnen pyöräkuorman P_i suhde etummaisen pyöräkuorman aiheuttamaan kuormitukseen eli P_i / P
e	on Neperin luku $\approx 2,718$ [-]

Muuttuja L on yhtälön 3.4 mukainen. Ratkaistaessa yhtälöä 4.3 on otettava huomioon, että myös L sisältää ratamoduulin. Ratamoduuli u voidaan ratkaista yhtälöstä 4.3 iteroimalla. Tarkasteltaessa yhtälöä 4.3 havaitaan sen samankaltaisuus kiskon taipuman yhtälön 3.3 kanssa. [78]

Johdonmukaisuuden ja tulosten vertailtavuuden vuoksi Priest & Powrie [78] käyttivät ratamoduulin laskennassa saman junan viidennen ja kuudennen vaunun välisen kaksiakselisen telin aiheuttamia siirtymiä. Yhtälön 4.2 mukaista DBT-menetelmää (*Displacement Basin Test*) varten ratapölkkyjen kokonaissiirtymä kuvassa 4.22 b) esitetyissä samansuuruisissa siirtymäkäyrissä saatiin summaamalla siirtymät erillisissä aikaportaissa, joiden pituuden määrittäi datan keräystaajuus eli tässä tapauksessa 1 kHz. Tällöin aikaportaan pituudeksi muodostui 0,001 s. Tässä tapauksessa muuttujan S arvona ei käytetty ratapölkkyväliä, vaan junan yhdessä 0,001 sekunnin aikaportaassa kulkemaa matkaa. Kuorma P on junan staattinen akselikuorma, joka kyseessä olevalle telille oli 15,36 tonnia.

Yhtälön 4.3 modifioidulle BOEF-menetelmälle (*modified BOEF method*) siirtymä δ_0 saatiin kaksiakselisen telin ensimmäiselle akselille mitatusta maksimisiirtymästä. Toisen akselin etäisyys x_i oli 3,0 m. Seuraavien telien akselikuormien katsottiin olevan niin etäällä, että ne olivat merkityksettömiä. Ratapölkyn nro 3 tuloksia ei voitu määrittää, koska siihen asennettu geofoni oli viallinen. Kiskolle laskelmissa käytetty kimmomoduuli E oli $210 \cdot 10^9$ N/m² ja neliömomentti I oli $30,55 \cdot 10^{-6}$ m⁴. Taulukossa 4.1 on esitetty molemmille menetelmille määritetyt siirtymät ja niillä lasketut ratamoduulit. [78]

Taulukko 4.1. BOEF- (yhtälö 4.3) ja DBT-menetelmille (yhtälö 4.2) määritetyt siirtymät ja niillä lasketut ratamoduulit. Muokattu lähteestä [78]

Sleeper number	Maximum displacement δ_{max}	BOEF track modulus u (MN/m/m)	Total displacement $\Sigma\delta$ (mm)	DBT track modulus u (MN/m/m)
1	0.693	134	47.94	86.7
2	0.399	288	30.89	136
3	—	—	—	—
4	0.792	111	58.75	70.8
5	0.480	223	34.07	122
6	0.506	207	34.34	121
7	0.526	197	38.11	109
8	0.448	245	33.36	125

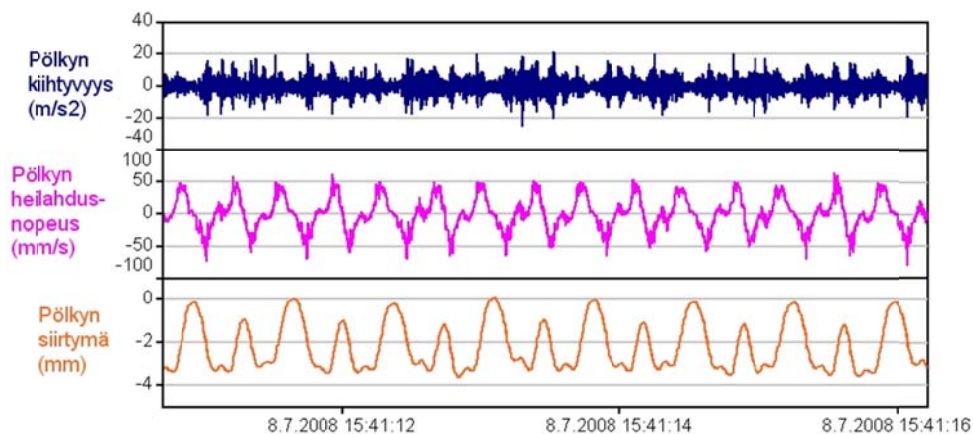
Taulukosta 4.1 on nähtävissä, että yhtälöllä 4.3 lasketut ratamoduulit vaihtelevat välillä 111 – 288 MN/m/m ja yhtälöllä 4.2 lasketut ratamoduulit välillä 70,8 – 136 MN/m/m, eli BOEF-menetelmä antaa huomattavasti suuremmat ratamoduulin arvot. Tämä saattaa Priestin & Powrien [78] mukaan johtua maan viskoelastisesta luonteesta, joka kasvattaa erillisissä aikaportaisissa summattua siirtymää, sillä siirtymien palautuminen akseleiden välillä on vähäisempää kuin puhtaasti elastiselle systeemille oletetaan. Tämän vuoksi ratamoduulin laskemisessa suositellaan käytettäväksi yhtälön 4.3 mukaista BOEF-menetelmää. Kuten jo aiemmin tässä tutkimuksessa on esitelty, ratamoduuli voi vaihdella huomattavasti lyhyenkin rataosuuden sisällä. Tämä käy hyvin ilmi vertailtaessa esimerkiksi taulukon 4.1 ratapölkkyjä 4 ja 5 edustavien ratamoduulien suuruuksia.

Priestin & Powrien [78] tekemissä mittauksissa havaittiin myös, että kuormituksenä käytetyn kaluston nopeudella on merkittävä vaikutus siirtymiin ja näin ollen myös laskennallisiin ratamoduulin arvoihin. Laskelmien perusteella voitiin todeta, että 100 – 130 km/h nopeudella mitatut siirtymät antavat noin 20 % suuremmat ratamoduulin arvot kuin 260 km/h nopeudella mitatut. Toisin sanoen hiljaisemmilla nopeuksilla ratapölkkyjen siirtymät olivat pienempiä. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että tukeutumattomien tai vain osittain tukeutuneiden ratapölkkyjen tunnistaminen saattaisi olla mahdollista tarkastelemalla ratapölkyn siirtymiä eri nopeuksilla. Mikäli siirtymien suhteellinen kasvu nopeuden suhteen on melko vähäistä ja siirtymät ylipäättään suuria, on syytä epäillä kyseisen ratapölkyn olevan tukeutumaton.

Radan taipumien mittaamisessa geofoneilla on useita merkittäviä etuja. Geofonien käyttö ei vaadi liikkumattoman tukipisteen tai vertailupisteen löytämistä rataympäristöstä. Tämä mahdollistaa geofonien käytön oikeastaan kaikenlaisilla radoilla ja kaikissa olosuhteissa, joissa geofonit voidaan kiinnittää kiskoon tai ratapölkkyihin. Toinen etu on radalla liikkuvan kaluston hyödyntäminen kuormituksenä, jolloin kuormitukset vastaavat radan todellisuudessa kokemia kuormituksia. Toisaalta kuormituksen säätelymahdollisuudet ovat rajoitetut ja mikäli kuormituksen suuruus halutaan selvittää tarkasti, on se mitattava erikseen. Vaikka geofonien käyttö jo edellä mainituilla suunnilleen alle 25 km/h nopeuksilla ei ole mahdollista, ei tämä tuota merkittäviä ongelmia junien nopeuksien ollessa yleensä selvästi tätä suurempia. Lisäksi geofoneilla voidaan mitata useampien ratapölkkyjen siirtymiä samanaikaisesti. Geofonien mittausdataa on käsiteltävä ennen kuin varsinainen taipuma-/siirtymätieto on käytettävissä, mikä lisää jonkin verran geofonimittauksen vaatimaa työmäärää.

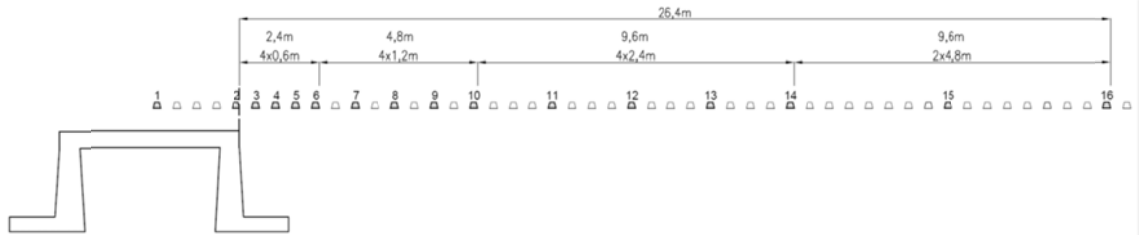
4.5 Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssanturilla (*accelerometer*) voidaan nimensä mukaisesti mitata siirtymiä kiihtyvyyteen perustuen. Kiihtyvyys muunnetaan geofonidatan tapaan laskennallisesti siirtymäksi integroimalla kiihtyvyyssignaali ajan suhteen kahdesti. Integrointi kiihtyvyydestä siirtymäksi on havainnollistettu kuvassa 4.23. Kiihtyvyyssantureiden käyttöön liittyy muutamia rajoituksia. Kiihtyvyyssanturit soveltuvat geofonien tavoin vain dynaamisten eli kohtuullisen nopeasti tapahtuvien ilmiöiden mittaamiseen eikä menetelmällä ole mahdollista mitata pysyviä muodonmuutoksia. Mittauksen aikana siirtymän nolla, eli ratapölkyn tai kiskon paikka, ei pysy koko junan ylityksen ajan paikallaan. Junan yhden telin aiheuttama maksimisiirtymä voidaan kuitenkin tulkitä mittaustiedosta hyvin luotettavasti noin 0,1 mm tarkkuudella. Kiihtyvyyssantureiden käyttäminen hyvin pehmeillä pohjamailla ei välttämättä ole mahdollista tieympäristöstä saatujen kokemusten perusteella, sillä liikenteestä johtuva tärinä heikentää mittaustarkkuutta. [79]



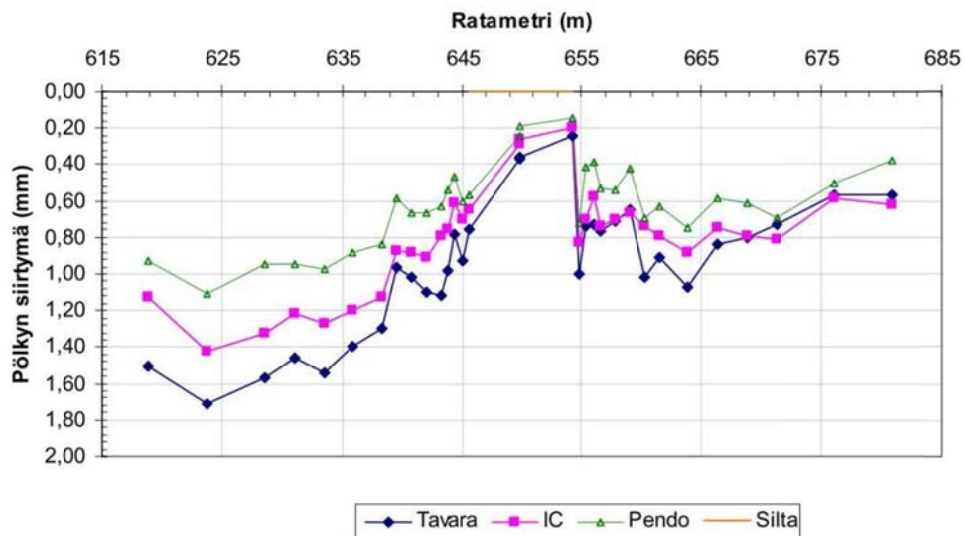
Kuva 4.23. Esimerkki kiihtyvyyssignaalin integroinnista siirtymäksi. [79]

Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö on mitannut rata-pölkkyjen siirtymiä kiihtyvyyssantureiden avulla siltojen päätypenkereillä. Mittaussysteemiin kuului varsinaisten antureiden lisäksi dataloggeri, kannettava tietokone, antureiden kiinnittämiseen vaadittavat tarvikkeet sekä virtalähteenä käytetty aggregaatti. Mittauksissa käytettiin ohjelmistoa, jonka avulla antureilta tulevat signaalit digitoidiin dataloggerissa ja tallennettiin tietokoneen kovalevylle taajuudella 2000 Hz. Mittauksia tehtiin useissa eri kohteissa siten, että 16 kiihtyvyyssanturia sijoitettiin rata-pölkkyihin noin 50 mm päähän ratapölkyn päästä kuvan 4.24 osoittamalla jaottelulla radan pituussuunnassa. Toisessa samankaltaisessa TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön tutkimuksessa on käytetty myös 32 anturia, jolloin siirtymät voitiin mitata samanaikaisesti sillan molemmin puolin [80]. Kuormituksena mittauksissa käytettiin radalla aikataulujen mukaan liikennöivää kalustoa, joka koostui tavarajunista, Inter-City-junista ja Pendolinoista. [79]



Kuva 4.24. Siirtymäantureiden sijainnit ratapölkkyjen päissä radan pituussuunnassa. [79]

Kiihtyvyyssantureiden mittaustulosten tulkinta vaatii jonkin verran ammattitaitoa, erityisesti pienten siirtymien tulkitseminen on työlästä. Kuvassa 4.25 on esitetty esimerkkinä mittauksilla saaduista tuloksista erään alikulkusillan molemmista päistä mitatut siirtymät junien vetureiden kolmannen akselin kohdalta. Silta sijaitsee kuvassa ratametrivälillä 645 – 655. Veturin kolmas akseli valittiin siitä syystä, että veturin paino tiedetään tarkasti, paino pysyy suunnilleen vakiona eikä seuraavan vaunun ensimmäinen teli vielä vaikuta pölkyn liikkeeseen. Tavara- ja InterCity-junat käyttivät akselipainoltaan noin 21 tonnin Sr2-veturia ja Pendolinon akselipaino on noin 13,25 tonnia. Siirtymiä olisi voitu tulkita myös veturin ensimmäisen akselin kohdalta, mutta niiden tulkinta on usein hankalaa, kuten jo geofonien kohdalla kävi ilmi. [79]



Kuva 4.25. Esimerkkikuva kiihtyvyyssanturimittauksilla saaduista siirtymätuloksista erään alikulkusillan molemmiin puolin. [79]

Kuten jo aiemmin on havaittu, myös kuvan 4.25 mittaustulosten perusteella voidaan todeta ratapölkkyjen siirtymien ja sitä myötä myös jäykkyyden voivan vaihdella huomattavasti lyhyenkin rataosuuden sisällä. Toki tässä tapauksessa alikulkusillalla on vielä vaihtelua vahvistava vaikutus. Ennakoidusti kevyempi Pendolino aiheutti tässä kohteessa pienimmät siirtymät, mutta kaikissa mittauskohteissa eroa ei välttämättä ollut tai se ei ollut yhtä selkeästi havaittavissa. Suunnilleen samanpainoisten tavaraja InterCity-junien vetureiden aiheuttamien siirtymien ero johtuu lähinnä ajonopeuserosta liittyen mittauspaikan sijaintiin kaarteessa sisäkaarteiden puolella, mikä lisää hitaasti kulkevan tavarajunan kuormitusvaikutusta sisäkaarteiden puoleiselle kiskolle. [79]

Kiihtyvyyssantureita on käytetty siirtymien mittaamiseen TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön tekemien mittausten lisäksi muuallakin. Esimerkiksi SUPERTRACK-projektin [81] yhteydessä kiihtyvyyssantureilla mitattiin samanaikaisesti sekä kiskon että ratapölkyn pään siirtymiä kuvan 4.26 mukaisella anturisijoittelulla.



Kuva 4.26. SUPERTRACK-projektin yhteydessä kiskon jalkaan ja ratapölkyn päähän asennetut kiihtyvyyssanturit. [81]

Kirjallisuudesta ei löytynyt viitteitä kiihtyvyyssantureilla mitattujen siirtymien käytöstä radan jäykkyyden laskemisessa. Jäykkyys voidaan kuitenkin laskea samaan tapaan kuin geofonien kohdalla eli esimerkiksi taipumamuotoon perustuvaa menetelmää käyttäen. Radalla aikataulujen mukaan liikkuvien junien käyttö kuormituksena ei tyyppillisesti mahdollista kuormituksen säätelyä. Näin esimerkiksi ratapölkyn asettumiskuorman ja sitä kautta ratapölkyn alaisen tyhjätilan määrittäminen on hankalaa. Lisäksi jäykkyyden laskeminen esimerkiksi yhtälössä 3.20 esitellyiltä kuormitusväleiltä ei ole mahdollista Pendolinonkin kuormituksen ollessa tähän tarkoitukseen suhteellisen suuri. Toisaalta mikäli junassa on kevyempiä vaunuja ja niiden paino tunnetaan, voi kuormitusvälien käyttö olla mahdollista.

Kiihtyvyyssantureiden käytön merkittävimpiä etuja ovat geofonien tapaan liikkumattomien tukipisteiden tarpeettomuus, todellisen radalla liikkuvan kaluston hyödyntäminen kuormituksena ja mahdollisuus instrumentoida useita, jopa kymmeniä ratapölkkyjä samanaikaisesti. Näiden lisäksi laitteisto on suhteellisen kompakti ja helposti liikuteltavissa.

Suurimpana kiihtyvyyssantureiden käyttöä rajoittavana tekijänä voidaan oletettavasti pitää tärinän vaikutusta mittaustuloksiin hyvin pehmeillä pohjamailla sijaitsevilla radoilla. Kovan pohjamaan alueella sijaitsevien ratojen siirtymämittauksissa ei ole havaittu merkittäviä tärinäongelmia. Toinen, ei niinkään rajoittava, mutta erityishuomiota vaativa tekijä on kiihtyvyyssanturin mittausalue. TTY:n Maa- ja pohjarakenteiden yksikön aiemmin tekemissä mittaauksissa havaittiin, että ± 3 G:n mittausalue ei ole kaikissa kohteissa riittävä. Tämän vuoksi raportissa suositellaan käytettäväksi vähintään ± 10 G:n antureita. Mittausaluetta ei voida kuitenkaan kasvattaa rajatto-

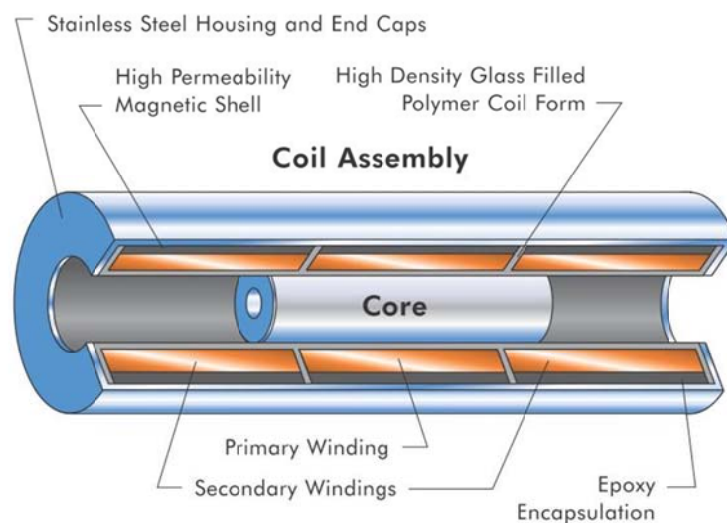
masti, sillä tarpeettoman suuri mittausalue heikentää mittausdatan laatua siirtymämittauksen näkökulmasta. [80]

Vertailtaessa geofoneja ja kiihtyvyyssantureita, voidaan todeta geofonien käytön olevan teoriassa yksinkertaisempaa niiden mittausdatan vaatiessa ainoastaan yhden integrointikerran. Kiihtyvyyssanturit ovat kuitenkin anturiteknisestä näkökulmasta geofoneja parempia antureita.

4.6 Siirtymäanturit

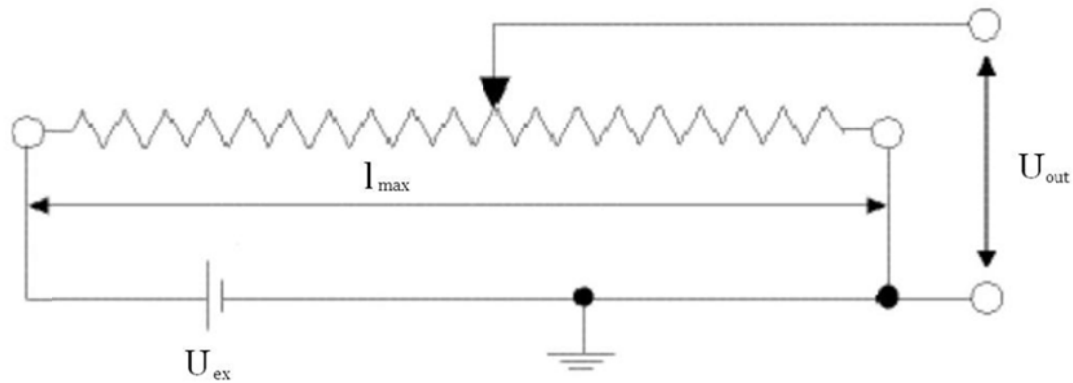
Teollisuudessa ja tekniikan aloilla on jo pitkään käytetty siirtymäantureita, joilla on tyypillisesti mitattu siirtymiä millimetrien osista alkaen aina muutamiin metreihin saakka. Siirtymäantureista on kehitetty useita erilaisia sovelluksia kulloisiinkin mitaustarpeisiin. Yleisesti ottaen siirtymäanturit voidaan jakaa kahteen pääryhmään: sähköisiin ja optisiin antureihin. [82]

Kenties käytetyin siirtymäanturityyppi sen kestävyuden ja jopa nanometriluokan mitaustarkkuuden ansiosta on differentiaalimuuntaja (*Linear Variable Differential Transformer, LVDT*). Differentiaalimuuntajasta on olemassa useita rakenneratkaisuja, mutta pääpiirteissään anturi koostuu kuvan 4.27 mukaisesti primääri- ja kahteen osaan jaetusta sekundäärikäämistä, jonka osat on käämitty vastakkaisuuntaisesti. Käämien sisällä liikkuu esimerkiksi ferromagneettinen sydän. [82]



Kuva 4.27. Periaatekuva differentiaalimuuntajan rakenteesta. [83]

Toinen yleisesti käytetty siirtymäanturityyppi on resistiivinen siirtymäanturi, jota kutsutaan myös lineaaripotentiometriksi. Potentiometri perustuu kuvan 4.28 mukaisesti resistiiviseen lankaan, jonka pituus ja vastaavasti resistanssi muuttuu anturin kärjen/karan liikkeen mukana. Potentiometrimitaus tapahtuu syöttämällä anturille esimerkiksi 5 V tasajännite. Tällöin ulos saadaan tasajännite väliltä 0...5 V, joka ilmaisee anturin karan sijaintia/siirtymää. [82]



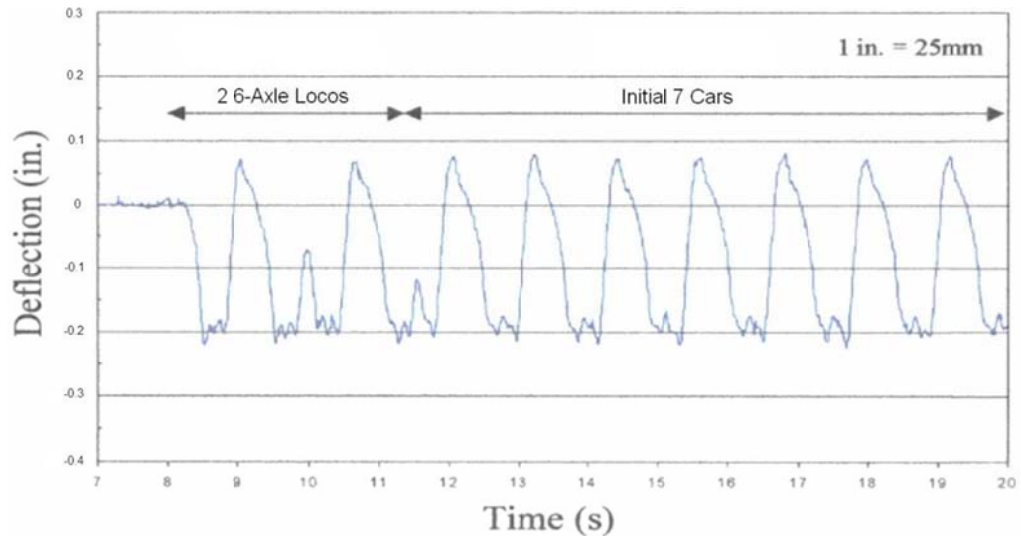
Kuva 4.28. Periaatekuva lineaaripotentiometrin rakenteesta. [82]

Anderson & Rose [84] ovat mitanneet kiskon taipumia LVDT-tyypin siirtymäanturilla. Mittauksissa siirtymäanturi kiinnitettiin kiskoon ja kiskon taipumaa mitattiin suhteessa tiiviiseen pohjamaahan tukeutuvaan referenssitankoon kuvan 4.29 mukaisesti.



Kuva 4.29. Siirtymäanturimittauksessa käytetyn referenssitangon pää ja siirtymäanturi (vas.) sekä anturin kiinnitys kiskon jalkaan (oik.). Muokattu lähteestä [84]

Anderson & Rose [84] tekivät kuvassa 4.29 esitellyllä järjestelyllä mittauksia sekä puuratapölkky- että betoniratapölkkyraiteilla, joilla tukikerroksen ja pohjamaan väliin oli rakennettu eripaksuisia asfalttikerroksia. Kuvassa 4.30 on esitetty taipumamittauksitulokset puuratapölkkyraiteelta, jonka alapuolelle oli rakennettu 200 mm paksuinen asfalttikerros.



Kuva 4.30. Junan ohituksen aikana mitatut kiskon taipumat puuratapölkkyraiteella, jossa tukikerroksen ja pohjamaan välissä 200 mm paksuinen asfalttikerros. Muokattu lähteestä [84]

Kuvasta 4.30 nähdään, että kiskon palautuvan taipuma-amplitudin suuruus on noin 7 mm. Betonipölkkyraiteelta mitatut taipumat olivat huomattavasti pienempiä. Tutkimusraportissa Anderson & Rose [84] ovat myös laskeneet ratamoduuleja ja saaneet puuratapölkkyraiteisen radan ratamoduuliksi keskimäärin 17 MPa ja betoniratapölkkyraiteisen radan ratamoduuliksi keskimäärin 52 MPa, mutta raportista ei käy ilmi mitä määrittämis menetelmää laskennassa on käytetty.

Luvussa 4.5 mainitun SUPERTRACK-projektin [81] yhteydessä käytettiin potentiometrejä kiskon taipuman sekä radan rakenneosien suhteellisten siirtymien mittaamiseen. Kiskon taipumamittauksissa vertailupisteinä käytettiin raiteen viereen lyötyä tankoa. Tangon sivusuuntaisesta etäisyydestä raiteeseen tai lyöntisyvyydestä ei ole tarkempaa tietoa. Suhteellisia siirtymiä mitattiin muun muassa kiskon jalan ja ratapölkyn pään välillä sekä ratapölkyn pään ja pengertäytekerroksen välillä. Raportissa ei tarkemmin esitelty potentiometrimittauksien tuloksia tai niiden perusteella laskettuja ratamoduuleja.

Suomessa potentiometrejä on käyttänyt rataympäristössä ainakin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitos. Luomalan [63] esittelemissä mittauksissa potentiometriä käytettiin ratapölkyn routanousun seuraamiseen siten, että potentiometri kiinnitettiin ratapölkyn päähän ja siirtymää mitattiin suhteessa ratapölkyn pään viereen asennettuun referenssitankoon. Referenssitanko on pituudeltaan 3 m, joista kaksi ylintä metriä on erotettu ympäröivistä maakerroksista ja viimeinen metri koostuu paksusta harjaterästangosta. Harjaterästangolla oletetaan saavutettavan riittävä kiinnittyminen/tartunta pohjamaahan. Vaikka kyseisessä tutkimuksessa potentiometriä käytettiin routanousun mittaamiseen ja mittauksia tehtiin siten melko harvoin, on samankaltaisten mittausjärjestelyjen avulla mahdollista mitata myös esimerkiksi ratapölkyn siirtymiä junan ohituksen aikana käyttämällä huomattavasti suurempaa mittaustaaajuutta. Routaseurantamittauksien yhteydessä havaittiin lisäksi, että siirtymäanturit eivät aina ole täysin toimintavarmoja Suomen vaativissa talviolosuhteissa.

Siirtymäantureiden käytön merkittävimpiä etuja ovat laitteiston hyvä saatavuus, laaja käyttökokemus, kannettavuus ja todellisen radalla liikkuvan kaluston käyttäminen kuormituksena. Varsinaisten siirtymäantureiden asentaminen voidaan tyypillisesti tehdä turvamiesmenettelyä käyttäen, mikäli muut olosuhteet sallivat turvamiesmenettelyn. Lisäksi siirtymäantureilla saatavat mittaustulokset vaativat vähän jatkokesittelyä ja ovat tyypillisesti hyvin selkeitä ja helppolukuisia, jolloin kaikkien luvussa 3.2 esiteltyjen määrittämenetelmien käyttäminen on ainakin periaatteessa mahdollista.

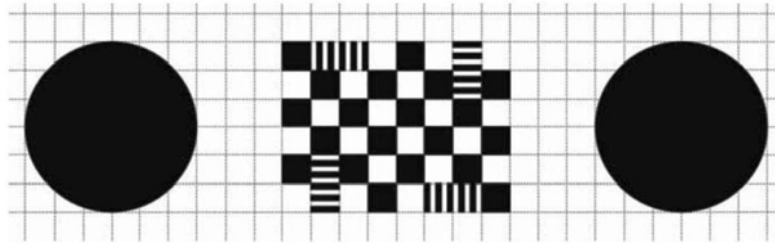
Siirtymäantureiden käytön ehdottomasti merkittävin rajoitus on liikkumattoman tukirakenteen tarve. Tällaisia junan ohituksen aikana paikallaan pysyviä pisteitä on rataympäristössä luonnostaan hyvin harvassa, joten tyypillisesti siirtymäanturimittausten yhteydessä tukipisteet joudutaan rakentamaan erikseen esimerkiksi tiiviiseen pohjamaahan saakka asennettävien referenssitankojen avulla. Referenssitankojen asentaminen aukean tilan ulottuman (ATU) sisäpuolelle vaatii liikenteenohjauksen luvan ja raidevarauksen.

Periaatteessa jopa kymmenien peräkkäisten siirtymäanturien käyttö on mahdollista samanaikaisesti, mutta käytännössä kiinteiden tukipisteiden määrä ja tukikehikon jäykkyysvaatimukset asettavat rajoituksia anturien määrälle. Talviolosuhteet tai hyvin kosteat olosuhteet saattavat rajoittaa siirtymäantureiden käyttöä, mutta lyhytkestoisissa mittauksissa nämä eivät luultavasti muodostu merkittäväksi ongelmaksi.

4.7 Kameran sovellukset

Maailmalla kiskon ja muiden radan osien taipumia ja siirtymiä on mitattu myös erilaisin kamerasovelluksin. Erityisen lupaavaksi menetelmäksi on havaittu PIV-menetelmä (*Particle Image Velocimetry*). PIV on toimintaperiaatteeltaan nopeuden mittausmenetelmä, joka alun perin kehitettiin nestemekanikan parissa. 2000-luvun alussa PIV-menetelmää on käytetty maaperän muodonmuutosten mittaamiseen laboratorioissa ja kenttäolosuhteissa. Southamptonin yliopistossa Isossa-Britanniassa on kehitetty videokameran sovellus, joka hyödyntää PIV-tekniikkaa kiskon siirtymien mittaamisessa [77]. Tämän sovelluksen innoittamana myös Etelä-Afrikassa on käytetty videokameraa ja PIV-tekniikkaa kiskon ja muiden radan osien siirtymien mittaamiseen [85]. [86]

Southamptonin yliopiston mittaussjärjestely koostui yksinkertaistettuna tavallisesta videokamerasta, jonka eteen asennettiin kaukoputki. Kaukoputken käyttö mahdollisti kamerasovelluksen tarpeeksi kauas radasta siten, että liikennetärinä ei vaikuttanut mittaustuloksiin. Videokameran CCD-ilmaisimen (*Charge-Coupled Device*) resoluutio oli 640 x 480 pikseliä, joka vastaa pikselikokoa 5,6 µm. Data kerättiin AVI-muodossa nopeudella 30 ruutua sekunnissa resoluutiolla 320 x 240 pikseliä. Suljinnopeutena käytettiin 0,002 s ja asetukset säädettiin mahdollisimman optimaalisiksi hyvän kuvanlaadun saavuttamiseksi. Kaukoputken aukon koko oli 90 mm ja polttoväli 1250 mm antaen kuvan mittakaavaksi 165 kulmasekuntia/mm. Jokaisella 5,6 µm pikselillä on siten 0,924 kulmasekunnin kuva-alue, mikä vastaa 0,045 mm pikseliä kohden 10 m etäisyydellä kuvauskohteesta. Kuvauskohteena toimi ratapölkkyyn kiinnitetty kohdelevy, joka on esitetty kuvassa 4.31. Kohdelevyn ruutujen koko oli 1 x 1 mm. [77]



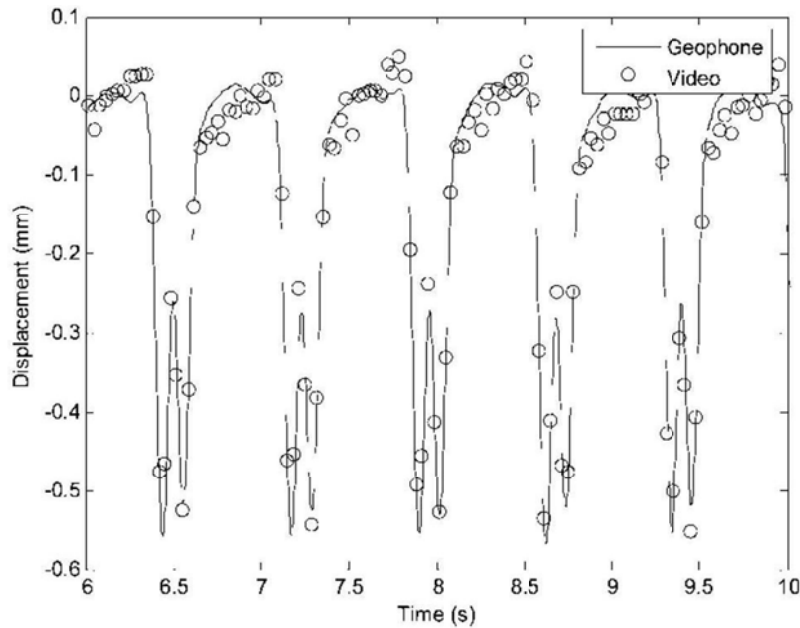
Kuva 4.31. Southamptonin yliopiston PIV-sovelluksessa käytetty ratapölkkyyn kiinnitetty kohdelevy. [77]

Kuvauksella saadun AVI-datan käsittely tehtiin jakamalla data bittikarttakuvasarjoihin, joissa jokainen bittikartta vastasi yksittäistä kuvattua ruutua. Käytetty PIV-tekniikka käsitteli jokaista ruutua matriisina, jonka elementit määrittelevät bittikartan pikseleiden värin. Datan analysointi tapahtui ottamalla osa kohdelevyä ensimmäisestä bittikartasta koeosaksi ja etsimällä sitä seuraavasta bittikartasta tietokoneavusteisesti. Tuloksena saatava korrelaatiotaso ilmaisee samanlaisuuden astetta koeosan ja etsintäosan välillä. Näin saatiin selville koeosan siirtymävektori pikseleinä ilmaistuna. Siirtymävektorin muuntaminen pikseleistä millimetreiksi tehtiin määrittämällä bittikarttakuvan mittakaava kuvan 4.31 kohdelevyn reunoissa olevien ympyröiden avulla, joiden keskipisteet olivat tarkalleen 20 mm päässä toisistaan. Määrittämällä mittakaava tällä tavoin kompensoitiin automaattisesti kulma, jolla kamerasytemi osoitti kohdelevyyn. Kuitenkin parhaan tarkkuuden saavuttamiseksi kohdelevyä tulisi kuvata niin kohtisuorasta suunnasta kuin mahdollista. [77]

Eteläafrikkalaisessa sovelluksessa käytettiin tarkempaa videokameraa ilman kaukoputkea kuvausetaisyyden ollessa pienempi kuin edellä esitellyssä Southamptonin sovelluksessa. Kameran kuvausnopeus oli kuitenkin vain 25 ruutua sekunnissa. Kohdelevynä käytettiin levyä, jossa oli 20 x 20 mm musta neliö ja sen reunoilla 20 mm paksu valkoinen kaista. Mittaussysteemin resoluutio oli noin 0,001 mm ja tarkkuus laboratoriossa noin 0,010 mm ja kenttäolosuhteissa noin 0,050 mm. Potentiaalisiksi virhetehtäviksi mainittiin muutokset valaistusolosuhteissa ja kohdelevy suositeltiin sijoitettavaksi mahdollisuuksien mukaan varjoon. Myös erilaisia varjostimia on kehitetty ja lisäksi tehty hyvin onnistuneita mittauksia yöaikaan kohdevalon avulla. Artikkelissa mainitaan lisäksi, että kuormituksenä käytettävästä kalustosta välittyvän värinän vaikutuksia mittaukseen voitiin jonkin verran ehkäistä tekemällä parannuksia kameran jalustana toimineeseen kolmijalkaan. [85]

Southamptonin mittausten yhteydessä mittausjärjestelyä testattiin myös laboratorioolosuhteissa siirtymävälillä 0...1 mm ja taajuusvälillä 1...5 Hz 15 metrin etäisyydeltä. Testeissä havaittiin, että jo 5 Hz kuormitustaajuudella videokamerasovellus ei pystynyt havaitsemaan siirtymäamplitudin huippuja tarkasti. Tämä johtui kuvausnopeuden (30 ruutua sekunnissa) alhaisuudesta. Kuormitustaajuuksilla 1...4 Hz videokameramittauksien ero vertailumenetelmän käytetyn siirtymäanturimittauksen tuloksiin oli aina alle 0,1 mm. Kuvassa 4.32 on esitetty aiemmin kuvassa 4.21 esitellyn mittausjärjestelyn ratapölkyn nro 1 kohdalta sekä geofonilla että videokamerasovelluksella mitatut siirtymät. Videokameramittauksessa kamera oli sijoitettu vain 6 metrin päähän radasta, mutta siitä huolimatta geofoni- ja videotulokset korreloivat hyvin keskenään ja jopa yksittäiset akselit ovat jotenkin tunnistettavissa. Ainakaan kyseisen kohteen pohjaolosuhteilla värinä ei siis merkittävästi haitannut mittauksia. Kuvasta on myös hyvin havaittavissa videokameran alhaisen kuvausnopeuden aiheuttamat rajoitukset, sillä huomattavia aukkoja datapisteiden välillä alkaa syntyä. Kuormituksenä

käytetyn junan nopeus oli 95 km/h, jolloin käytetyllä kuvausnopeudella saadaan kuva-
varuuta jokaista junan kulkemaa 880 mm kohden. Vastaava luku geofonille 500 Hz
keruutaajuudella on 53 mm. [77]



Kuva 4.32. Ratapölkyn pään siirtymä mitattuna geofonilla (viiva) ja videosovelluk-
sella saadut datapisteet (ympyrät). [77]

Radan jäykkyyden laskemista ei näiden PIV-tekniikkaan perustuvien mittausten yhteydessä esitelty. Jäykkyyden laskeminen on ainakin periaatteessa mahdollista niin taipumamuotoon perustuvalla menetelmällä kuin yksittäis- tai moniakselikuormituksen perustuvilla menetelmillä optimaalisimman menetelmän vaihdellissa hieman kuormittavan junan ja mittaustulosten ominaisuuksien mukaan. Videosovelluksilla ei ole mahdollista seurata kuin yhden tai enintään muutamien ratapölkkyjen siirtymiä kerrallaan, joten taipumamuotoon perustuvaa testiä varten tehtävien useiden peräkkäisten tai lähes peräkkäisten ratapölkkyjen siirtymämittauksiin kuluu jonkin verran aikaa. Lisäksi kuormittavan akselin tulisi olla sama tai ainakin samanpainoinen kaikissa mittauksissa, mikä hankaloittaa aikataulujen mukaan kulkevien junien hyödyn-
tämistä kuormituksena.

Videosovellusten etuna radan taipumien mittaamisessa ja jäykkyyden määrittämisessä on tarvittavan mittauskaluston pieni koko ja vähäinen määrä sekä mahdollisuus hyödyntää radalla liikkuvia junia kuormituksena. Laitteisto on myös kustannuksiltaan halpa, sillä tavallisen digitaalisen videokameran saa jo muutamalla sadalla eurolla. Lisäksi laitteita on runsaasti ja helposti saatavilla. Työmäärä kenttämittauksissa on vähäinen, sillä laitteisto ei vaadi erillistä kalibrointia.

Suurimpana rajoituksena videosovellusten käytölle on ehdottomasti joidenkäin kameroiden melko alhainen kuvaustaajuus, mikä rajoittaa kuormituksena toimivan junan suurinta mahdollista nopeutta. Ainakin Southamptonin mittauksissa [77] havaittu 5 Hz raja kuormitustaajuudelle on tyypillisessä rataympäristössä liian alhainen. Tätä rajoitusta voidaan kiertää käyttämällä suurnopeusvideokameroita, mutta samalla laitteiston hinta kasvaa suurnopeuskameroiden maksaessa jopa useita tuhansia euroja. Toinen mahdollinen rajoittava tekijä on kuormituksena toimivien junien aiheuttama

tärinä. Alhaisilla nopeuksilla junien aiheuttama tärinä on luultavasti vähäisempää, joten nopeuksien laskeminen voisi poistaa tärinäongelman. Kuten jo aiemmin mainittiin, nopeuksien laskeminen ei aikataulujen vuoksi ole välttämättä mahdollista. Toinen keino ehkäistä tärinää on viedä videokamera tarpeeksi etäälle radasta. Tällöin rajoitukseksi saattaa nousta videokuvan tarkkuus kuvausmatkan kasvaessa. Tarkkuuden heikentymistä voidaan ainakin tiettyyn rajaan asti ehkäistä laadukkaammalla kameravalinnalla, mutta kustannuksien voi odottaa vastaavasti nousevan kameran laadun parantuessa. Lisäksi joissain ympäristöissä esimerkiksi puusto tai korkeat penkereet eivät välttämättä mahdollista kameran viemistä kauemmaksi.

Edellä esitellyistä tutkimuksista ei käynyt tarkasti ilmi mittaustulosten jatkokäsittelyn vaatima työmäärä. Videokuvausmateriaalia voidaan tarkastella karkeasti myös perinteisillä mediaohjelmistoilla, mutta taipumatulosten tarkka ulossaaminen videokuvausta vaatii erillisen ohjelmiston, mikä kasvattaa menetelmän vaatimaa työmäärää ja kustannuksia.

4.8 Iskuvasaratesti

Iskuvasaratesti (*hammer excitation test, impact hammer*) on kannettava mittausmenetelmä, jossa voima-anturilla instrumentoidulla vasaralla isketään mitattavaa kohdetta, esimerkiksi kiskoja. Samalla esimerkiksi kiskoon tai ratapölkkyyn kiinnitetyt kiihtyvyyssanturit rekisteröivät iskun aiheuttaman värähtelyn. Iskuvasaroita on erikokoisia aina kuvassa 4.33 esitetystä pienemmästä vasarasta suurempiin lekoihin asti. Vasaroilla pystytään saavuttamaan alimmillaan 30...50 Hz ja korkeimmillaan 1500...3000 Hz taajuuksia vaihtelemalla vasaran lyöntipään materiaalia esimerkiksi kumista metalliin. [6], [10]



Kuva 4.33. Esimerkkejä iskuvasaratestistä ja kiihtyvyyssantureiden sijoittelusta erilaisilla radoilla. [10]

Iskuvasaratestin tulostenkäsittelyssä mitatut signaalit muunnetaan Fast Fourier-muunnoksella taajuusvastefunktioiksi olettaen samalla radan käyttäytymisen olevan lineaarista. Taajuusvastefunktioiden käytön etuna on se, etteivät ne ole herkkiä impulssikuorman suuruudelle tai kestolle. [10]

Koska iskuvasaratestissä alimmatkin rekisteröitävät taajuudet ovat melko korkeita, soveltuu testi parhaiten esimerkiksi meluun, tärinään tai pyörä-kisko-kontaktivoimiin liittyvien ongelmien mittaamiseen. Varsinkin pienempien vasaroiden kuormitusvaiku-

tuksen ollessa lisäksi vähäinen, ei iskuvasaratestiä voida pitää varteenotettavana menetelmänä radan kokonaisjäykkyyden mittaamiseen. [6]

4.9 Yhteenveto pistemäisistä mittausmenetelmistä

Taulukkoon 4.2 on koottu tässä luvussa esiteltyjen pistemäisten mittausmenetelmien etuja ja rajoituksia sekä arvioitu menetelmien ominaisuuksia eri kriteereiden perusteella. Koska luvussa 4.8 esitelty iskuvasaratesti ei vaikuttanut potentiaaliselta menetelmältä radan taipuman mittaamiseen, jätettiin se tämän yhteenvedon ulkopuolelle.

Taulukko 4.2. Yhteenveto pistemäisten mittausmenetelmien eduista ja rajoituksista.

	Pudotus-painolaite	Mittaus-vaunut	Laser-sovellukset	Geofonit	Kiihtyvyy-anturit	Siirtymä-anturit	Kamera-sovellukset
Mahdollisuus mitata kiskon taipumaa	-	++	++	+	+	++	++
Mahdollisuus mitata ratapölkyn siirtymää	++	+	++	++	++	++	++
Voidaan mitata useita pisteitä samanaikaisesti	-	--	--	++	++	+	-
Kuormituksen suuruus selviää mittauksen yhteydessä	++	++	--	--	--	--	--
Kuormituksen säätelymahdollisuudet	+	++	--	--	--	--	--
Käytetty kuormitus vastaa todellista liikennekuormitusta	+	++	++	++	++	++	++
Laitteiston soveltuvuus erimuotoisiin poikkileikkauksiin	++	++	-	+	+	+	-
Laitteiston soveltuvuus erilaisiin pohjaolosuhteisiin	++	++	++	+	+	+	+
Laitteiston soveltuvuus erilaisiin sääolosuhteisiin	++	++	-	++	++	+	-
Laitteiston soveltuvuus tärinäkohteisiin			-	++	++	+	-
Mittaus tai valmistelut vaativat raidevarauksen	--	--	++	+	+	-	++
Laitteiston kannettavuus/siirrettävyys ja tarvittava kalustomäärä	--	-	++	++	++	+	++
Mittauspaikalla vaadittava työmäärä	-	++	++	+	+	-	++
Tulosten jälkikäsitteilyyn vaadittava työmäärä	+	+	+	-	-	+	--
Jäykkyyden eri määritysmenetelmien käyttömahdollisuudet	+	-	++	++	++	++	++
Laitteiston saatavuus	+	--	+	+	+	++	++

++ Ei rajoituksia, erittäin hyvä, mahdollista aina
 + Rajoitteita harvoin tietyissä olosuhteissa, hyvä, yleensä mahdollista
 - Rajoitteita kohtuullisen paljon, tyydyttävä/välttävä, harvoin mahdollista
 -- Lähes aina rajoituksia, huono, ei mahdollista ilman erityistoimia

Yleisesti ottaen kaikilla tässä luvussa esitellyillä pistemäisillä mittausmenetelmillä on sekä etuja että rajoituksia niiden käyttöön liittyen, joten menetelmien yksiselitteinen arvottaminen tai vertailu on hankalaa. Koemittauksissa käytettäviksi valitut pistemäiset mittausmenetelmät esitellään luvussa 6.2.

5 Jatkuvat mittausmenetelmät

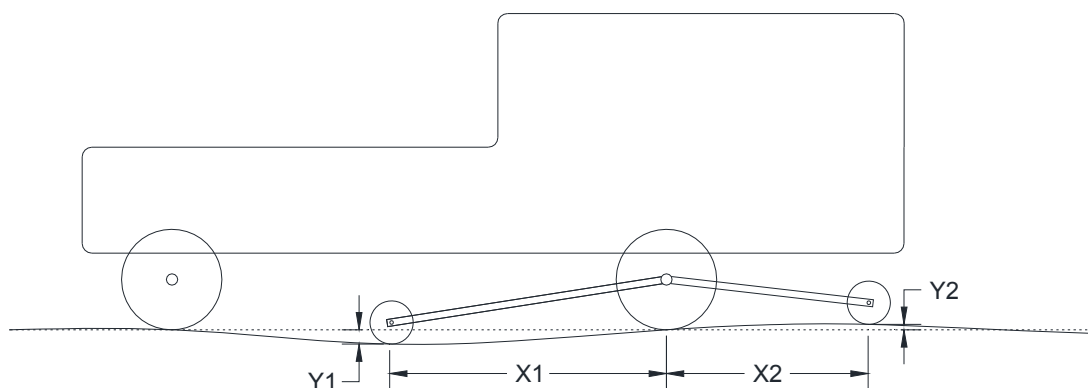
Maailmalla on kehitetty joitain sovelluksia radan jäykkyyden jatkuvaan mittaamiseen. Pistemäisten mittausmenetelmien palvellessa enemmänkin yksityiskohtaista ongelma-kohteiden tutkimista, jatkuvat mittausmenetelmät vastaavat paremmin kokonaisen rataosien laajuiseen jäykkyyden mittaustarpeeseen.

Tässä luvussa käsitellään ensin korkeuspoikkeaman mittaamisen periaatteita radantarkastuksessa ja niiden hyödyntämismahdollisuuksia jäykkyydystarkasteluissa. Lisäksi esitellään maailmalla radan jäykkyyden jatkuvatoimiseen mittaamiseen kehitettyjä mittalaitteita sekä niiden etuja ja rajoituksia. Luvun loppuksi esitellään TTY:llä kehitetty jatkuvan mittausmenetelmän prototyypä.

5.1 Radantarkastusvaunut

5.1.1 Korkeuspoikkeaman mittaaminen radantarkastuksessa

Radantarkastuksessa käytetään korkeuspoikkeamien mittaamisessa mittakantamittausta, joka voidaan tehdä joko mittapyörien tai lasereiden avulla. Toinen käytössä oleva menetelmä korkeuspoikkeamien mittaamiseen on inertiamittaus, joka perustuu liikettä mittaaviin kiihtyvyy- tai kulmanopeusantureihin. Korkeuspoikkeaman mittaus on radantarkastusmittauksista lähinnä radan jäykkyyden mittaamista, sillä se mittaa vaunun kuormituksesta aiheutuvan korkeuspoikkeaman ja radan epätasaisuudesta aiheutuvan korkeusvaihtelun summan. Mittaukset ovat suhteellisia eli mittaus tehdään suhteessa kiskon keskimääräiseen korkeusasemaan nähden. Mittakantamittaus tehdään kolmen pisteen avulla siten, että esimerkiksi mittausvaunun akseli on yksi tarkastelupiste ja tämän molemmilla puolilla sijaitsevat kaksi mittapyörää toimivat kahtena muuna tarkastelupisteenä. Ruotsalaisessa IMV100 radantarkastusvaunussa radan korkeuspoikkeaman, nuolikorkeuspoikkeaman, raidelevyden ja kierouden mittaus perustuu edellä kuvatulla tavalla vaunun akseliin ja kahteen mittausakseliin kuvan 5.1 mukaisesti.



Kuva 5.1. Periaatekuva ruotsalaisen IMV100 radantarkastusvaunun korkeuspoikkeaman mittausjärjestelystä.

Mittauksessa käytettävien mittauspisteiden välimatka on ruotsalaisessa mittavaunussa 5,5 metriä etummaisesta mittapyörän sijainnista 3 metrin etäisyydellä ja takimmaisesta 2,5 metrin etäisyydellä vaunun akselista. Useissa kirjallisuuslähteissä mainitaan 10 metrin mittakanta. Mittaustulos on yksi signaali, joka kertoo ajan tai paikan suhteen miten kiskon korkeusasema vaihtelee suhteessa keskimääräiseen kiskon korkeusasemaan.

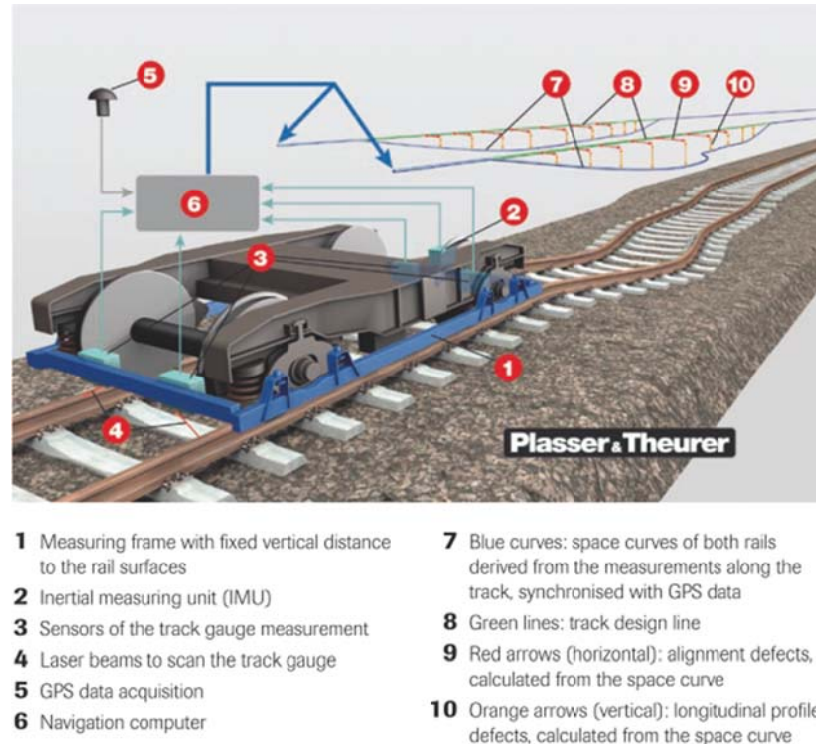
Suomessa käytössä olevassa Plasser & Theurerin EM 120 radantarkastusvaunussa (EMMA) mittaus tehdään mittaustelien avulla. Vaunun omat telit toimivat kahtena tarkastelupisteenä ja erillinen mittausteli yhtenä. Suomessa korkeuspoikkeamien tarkastelussa käytetään 5 metrin laskennallista mittakantaa. EMMA:ssa (kuva 5.2) telikeskiöiden välinen etäisyys 12 metriä on selvästi enemmän kuin 5 metriä, mutta vastaavasti vähemmän kuin nuolikorkeuspoikkeamien määrittämisessä käytettävä mittakanta 20 metriä.



Kuva 5.2. Suomessa käytössä oleva radantarkastusvaunu Ttr1 51 (EMMA). [87]

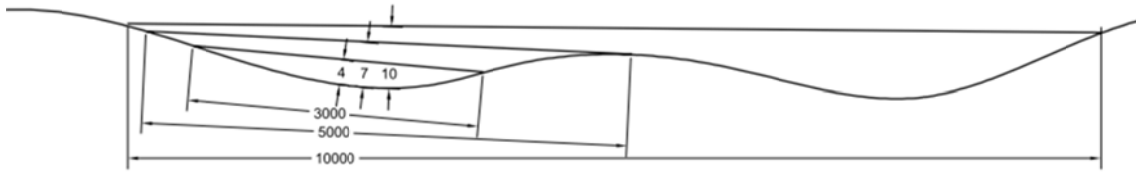
Mittakantamittauksia voidaan tehdä myös lasereilla vastaavasti kuten pyöräkerroilla. Lisäksi epätasaisuutta voidaan mitata inertian avulla, jossa vaunun akselin tai telin suhteellista asemaa mitataan kiihtyvyyssanturien ja/tai gyroskooppien avulla. Inertiamittaus perustuu kappaleen hitauteen eli sen taipumukseen vastustaa nopeuden muutosta ja kiihtyvyyssanturit ja gyroskoopit mahdollistavat tämän ilmiön havaitsemisen. Oikeastaan ainoa merkittävä ero menetelmien välillä on se, että mittakantamittauksessa mittaus tehdään fyysisesti kolmesta pisteestä, kun taas inertiamittaus tehdään vain yhdestä pisteestä. Inertiamittauksen mittaustuloksena saadaan suoraan radan geometria, kun taas mittakantamittauksessa tietyt pyörien etäisyyksien perusteella määräytyvät aallonpituudet joko korostuvat tai tulevat arvioituksi todellisuutta pienemmiksi. Tästä syystä mittakantamittauksen mittaustulos muutetaan vastaamaan radan geometriaa muuntofunktioiden avulla (Transfer Functions).

Perinteinen inertiamittaus tarvitsee toimiakseen tietyn ajonopeuden. Anturitekniikan kehittyttyä on saatavilla lähes nollataajuuksia mittaavia kiihtyvyyssantureita, mutta silti mittaustulos on hyvin pienillä ajonopeuksilla epätarkka. Plasser & Theurer [88] lupaa mittauksen toimivan kuitenkin millä tahansa ajonopeudella aina 300 km/h saakka. Teoriassa inertiamittaus toimiiikin sitä paremmin mitä lujempaa ajetaan.



Kuva 5.3. Inertiamittauksen toimintaperiaate. [88]

Mittakantamittauksessa käytettävä mittakanta vaikuttaa olennaisesti mittaustulokseen. Kuvassa 5.4 esitetyssä esimerkissä on käytössä kolme erilaista mittakantaa: 3, 5 ja 10 metriä. Aaltoviiva kuvaa kiskon keskimääräistä korkeusasemaa, joka määritetään mittaustuloksista mittakannan mittaisen liukuvan keskiarvon avulla. Kuvasta havaitaan, että epätasaisuuden ollessa pitkäaaltoinen, lyhyt mittakanta huomaa siitä vain osan, kun taas pidempi mittakanta havaitsee suuremman epätasaisuuden. Vastaavasti korkeuspoikkeaman ollessa hyvin pienipiirteinen, esimerkiksi lävistynyt kisko jatko, saattaa pidempi mittakanta hukata korkeuspoikkeamavirheen, joka näkyisi selvästi lyhyellä mittakannalla. Inertiamittauksessa pisimmän käytettävissä olevan mittakannan määrittävät anturitekniikka, ajonopeus ja laskennassa käytettävät suodattimet. Inertiamittauksella pystytään määrittämään kuitenkin epätasaisuuksia selvästi pidempään mittakantaan perustuen kuin mittapyörillä. Joissakin mittaussuunnissa ovatkin käytössä molemmat mittaustekniikat. Uusissa Plasser & Theurerin valmistamissa radantarkastusvaunuissa on kuitenkin käytössä ainoastaan inertiamittaukseen perustuvia mittausjärjestelmiä, sillä kosketukseton mittaus mahdollistaa suuremmat ajonopeudet [88].



Kuva 5.4. Mittakannan vaikutus mittaustulokseen mittakantamittauksessa.

Yksi olennainen pyörillä tapahtuvan mittakantamittaukseen vaikuttava asia on käytettävien pyöräväljen keskinäinen etäisyys. Riippumatta käytettävästä pyöräväljestä, mittaus korostaa tiettyjä aallonpituuksia ja aliarvioi toisia. Symmetrinen pyöräväljen on kaikkein heikoin, sillä se käytännössä kadottaa pyöräväljen mittaisen aallonpituuden. Lisäksi mittakantamittauksen laskennassa käytetään apuna trigonometrisia funktioita, jotka saavat nollokohdan aina tietyn aallonpituuden kerrannaisilla. Tästä syystä laskennassa käytetään erityisiä muuntofunktioita, joilla pyritään minimoimaan mittauksesta aiheutuvat virheet. Tästä huolimatta mittakantamittaus ei havaitse yhtä hyvin kaikkia aallonpituuksia, erityisesti erittäin lyhytaaltoiset geometriavirheet, kuten korugaatio, eivät välttämättä tulostu toivotulla tavalla. Käytettäessä epäsymmetristä pyöräväljiä eri aallonpituudet havaitaan hieman paremmin. Radan tarkastuksessa tulisi standardin 13848-1 [89] mukaan käyttää epäsymmetristä pyöräväljiä.

5.1.2 Radantarkastustulosten hyödyntäminen jäykkyystarkasteluissa

Radantarkastuksen mittaustulosraportit eivät sellaisenaan sovellu radan jäykkyyden arvioimiseen. Mittaustulos sisältää tiedon radan jäykkyydenmuutoksista, mutta tieto on sekoittuneena radan epätasaisuuksiin. Ruotsissa Eric Berggren on kehittänyt patentoitua menetelmää, jossa mittaussvaunun mittaama radan epätasaisuus jaetaan osiin siten, että saadaan erilleen vaunun kuormasta aiheutuva radan taipuma ja kuormittamattoman radan epätasaisuus. Berggreniltä saadun tiedon perusteella jäykkyyden laskemiseksi tarvitaan kaksi eri mittaussmenetelmää samalta akselilta, jotka ovat ruotsalaisessa vaunussa mittapyöriin perustuva menetelmä ja inertiamittaus. Laskentamenetelmän yksityiskohdat eivät ole tarkalleen selvillä, mutta yksinkertaistettuna tarkastelu etenee siten, että mittapyöriin perustuvan mittauksen avulla päätellään miten paljon vaunun raskas akseli on ”kuopassa” suhteessa mittapyöriin ja tämä erotetaan radan epätasaisuudesta inertiamittauksen perusteella.

Menetelmän käyttäminen edellyttää tietoa kuormituksesta, joka voidaan joko mitata tai laskea radan epätasaisuuteen tai kiihtyvyydenmittaukseen perustuen. Lisäksi menetelmän käyttöön liittyy epävarmuus kuorman aiheuttaman kiskon taipuman karakteristisesta pituudesta, joka vaihtelee jonkin verran erilaisilla alustan jäykkyyksillä. Berggrenin menetelmän selkeä etu olisi se, että jäykkyydenmittaus tehtäisiin aina samalla, kun tehdään radantarkastusta.

Radantarkastussvaunun mittaustulosten hyödyntämisessä voisi olla myös muita mahdollisuuksia, kuten eri vuodenaikoina tehtyjen mittausten vertailu. Esimerkiksi syksyllä tehdyn mittauksen ja talvella routaantuneella ratarakenteella tehdyn mittauksen vertailu saattaisi tuoda esille kohtia, joissa jäykkyys vaihtelee sulan maan aikana paljon. Toisaalta ratarakenteen routaantuessa epätasaiset routanousut saattavat sekoittaa tarkastelun. Talvimittauksia ei voi verrata keväällä tehtyihin mittauksiin, sillä radan sulaminen voi muuttaa olennaisesti tuentatilannetta eivätkä mittaustulokset ole enää jäykkyyden näkökulmasta vertailukelpoisia. Mittaustulosten vertailu kertoo kuitenkin

kin ainoastaan jäykkyyden vaihtelusta eli jäykkyyden absoluuttista tasoa sillä ei saada selville.

5.2 Oskilloivaan massaan perustuvat menetelmät

5.2.1 RSMV

Ruotsalainen RSMV (*Rolling Stiffness Measurement Vehicle*) on varta vasten radan jäykkyyden mittaamiseen kehitetty laite. Mittauslaite koostuu kaksiakselisesta vaunusta, jonka toisen akselin päälle on rakennettu dynaaminen kuormituslaitteisto kuvan 5.5 mukaisesti. Kuormitusakselin staattinen akselipaino on 180 kN, jonka lisäksi kuormitusta voidaan vaihdella 60 kN dynaamisesti hydrauliiikan avulla. Dynaaminen kuormitustaajuus on maksimissaan 50 Hz, mutta käytännön mittauksissa pitäydytään yleensä alle 10 Hz taajuuksissa, jotka vastaavat hienorakeisten pohjamaiden resonanssitaajuuksia. [90]



Kuva 5.5 RSMV:n rakenne. Vasemmalla kuormitettavan akselin yläpuolelle asennetut vastapainot ja oikealla lähikuva hydraulitunkilla varustetusta sekä kiihtyvyyssanturilla ja voima-anturilla instrumentoidusta akselistä. [90]

RSMV:llä tuotettu dynaaminen kuormitus jäljittelee sinimuotoa, joka saadaan aikaan kuormittamalla tunkilla akselia vastapainon suhteen. Vastapaino sijaitsee vaunun sisällä ja sen on mahdollista liikkua pystysuunnassa. Kuormitustapahtuma perustuu vastapainon hitauteen, jolloin nopea kuormitus ei ehdi vielä juurikaan siirtää vastapainoa, mutta tunkin voiman lisäys aiheuttaa akselipainon lisäyksen. Vastaavasti tunkin tuottaman voiman nopeasti pienentyessä, vastapaino ei ehdi putoamaan yhtä nopeasti ja akselipaino pienenee. Kuormituksen suuruus mitataan voima-anturilla ja kuormituksen aiheuttama siirtymä mitataan kiihtyvyyssanturilla (kuva 5.5). Voimasiirtymä yhteyden perusteella voidaan laskea radan jäykkyys. Vaikka mittausvaunun rakenne on periaatteessa hyvin yksinkertainen, liittyy etenkin hydrauliiikan tuottaman kuormituksen ohjaukseen useita muuttujia. Suurin tekninen haaste onkin Berggrenin mukaan ollut rakentaa kuorman tuottamiseen oikeanlainen ohjausjärjestelmä, joka

säätää kuormitusta mitatun voiman perusteella. Säätöparametrit eivät voi olla vakioita, sillä voimantuotto muuttuu alustan jäykkyyden muuttuessa. [90]

Mittausteknisesti RSMV tuottaa juuri oikeanlaista mittaustulosta radan jäykkyydestä. Toisin kuin kaikissa geometrian mittaukseen perustuvissa mittausten menetelmissä, radan epätasaisuudet eivät vaikuta mittaustulokseen. Laite ei kuitenkaan mahdollista kovin pienten kuormitusten käyttöä, jolloin tuentatilanteen vaikutuksen erottaminen tuloksista on hankalaa. Mittaustulos kuormitusväliltä 120–240 kN edustaa tilannetta, jossa kaikki radan komponentit ovat täydessä kontaktissa toisiinsa. Joissakin tapauksissa, kuten tukikerroksen vaihtotarpeen arvioinnissa, voisi olla tarpeen selvittää radan jäykkyys myös hyvin matalalla kuormitustasolla, mikä mahdollistaisi ratapölkkyjen heikon tukeutumistilanteen havaitsemisen mittaustuloksista.

RSMV:n suurin mahdollinen ajonopeus mitattaessa on lähteestä riippuen 10–40 km/h. Ajonopeuden määrää lopulta haluttu tarkastelutarkkuus ja tarkasteltava ratarakenne. Jos halutaan selvittää pohjamaan ominaisuuksia, täytyy kuormitustaaajuuden olla alle 10 Hz [90]. Radan ylempien rakenneosien tarkastelussa voidaan käyttää korkeampia-kin taajuuksia noin 30 Hz saakka. Yksittäinen mittaustulos koostuu aina useasta kuormituspulssista. Berggrenin mukaan olisi hyvä käyttää 30 pulssin keskiarvoa, mutta tätä liukuvaa keskiarvoa voidaan toki muuttaa. Alla kuvatut laskennalliset esimerkit osoittavat, että suurin mahdollinen ajonopeus ei ole kovin suuri.

*Esimerkki 1: Oletetaan, että halutaan neljä mittaustulosta metrille. Halutaan mitata pohjamaan jäykkyyttä savikolla. Käytetään kuormitustaaajuutta 10 Hz ja 30 pulssin keskiarvostusta. Halutaan, että mittaustulos edustaa juuri kyseistä neljännesmetriä. Tarvi-
taan 120 pulssia metrille, ajonopeudeksi tulee 1/12 m/s eli 0,3 km/h.*

Esimerkki 2: Oletetaan, että halutaan yksi mittaustulos metriä kohden ja keskiarvostus tehdään liukuvana 30 pulssin yli siten, että yksi pulssi edustaa yhtä ratametria. Tällöin ajonopeudeksi muodostuu 10 m/s eli 36 km/h. Mittaustulos edustaa 30 metrin keskiarvoa, vaikkakin mittaustulos voidaan tulostaa jokaiselle ratametrille.

Esimerkki 1 antaa erittäin hyvän kuvan ratarakenteesta, mutta hitautensa takia se soveltuu käytettäväksi vain erikoiskohteisiin. Esimerkki 2 taas edustaa lähestulkoon teoreettista maksimia ja käytännössä RSMV:llä voidaan tehdä mittauksia näiden ääripäiden välillä.

RSMV:n mittaustapahtuma on dynaaminen, jolloin rakenteiden resonanssitaajuudet vaikuttavat mittaustulokseen. Savipitoisten maalajien resonanssitaajuus on tyypillisesti alle 10 Hz (vrt. kuva 2.2) ja radan rakennekerros materiaalien tätä selvästi korkeampia, tyypillisesti 20–40 Hz. Eri näkökulmista katsoen on mahdollista käyttää juuri jonkin rakenneosan resonanssitaajuutta tai sitten pyrkiä välttämään niitä. Etukäteen ei voi kuitenkaan tietää milloin mittaustapahtuu jonkin rakenneosan resonanssitaajuudella. Yhden mittaustapahtuman aikana taajuuksia ei ole järkevää muuttaa ja toisella eri mittaustapahtumalla tehty ajo saattaa tuottaa hieman erilaisen tuloksen riippuen siitä aiheuttiko mittaustapahtuma jonkin rakenneosan resonointia. Suoraviivaisinta olisi käyttää niin korkeaa mittaustapahtumaa, että oltaisiin resonanssitaajuuksien yläpuolella. Tämä johtaisi käytännössä noin 50 Hz kuormitustapahtumaan, joka on puolestaan kuormituksena liian nopea, jotta kuormitusvaikutus tunkeutuisi kovin syvälle rakenteeseen. Yhteenvedon voimaksi voidaan todeta, että vaikka RSMV:n mittaustapahtuma on mittausteknisesti varsin yksinkertainen ja suoraan radan jäykkyyttä mittaava, joudutaan mittaustulosten analysoinnissa arvuuttelemaan sitä, kuvaako mittaustulos rata-

rakenteen käyttäytymistä jonkin rakenneosan resonanssissa vai ei ja millainen tulos olisi saatu vähän erilaisella mittaustaajuudella.

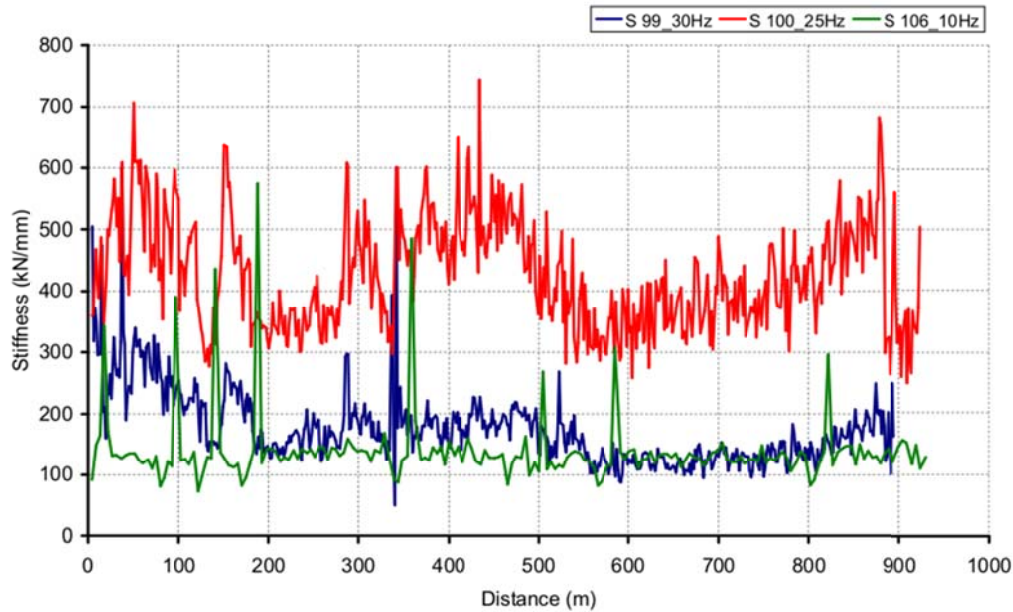
5.2.2 Portancemetre

Portancemetre on ranskalainen versio dynaamisesta radan jäykkyyden mittauslaitteesta (kuva 5.6). Mittausperiaate on täsmälleen sama kuin ruotsalaisessa RSMV:ssä, mutta voiman tuottamisen periaatteessa on hieman eroavaisuuksia. Portancemetre on erillinen laite, jota vedetään veturilla. Kuormituksen tuottava ja mittauksen tekevä osa on erillinen kalustoyksikkö ja sen käyttämiseen tarvitaan toinen kalustoyksikkö, joka sisältää muun muassa kuormitukseen tarvittavan hydrauliiikan ja elektroniikan. Mittaustieto kerätään kannettavalle tietokoneelle veturissa. Laitteistossa on neljää asiaa mittaavat anturit: kiihtyvyyssanturit sekä jousittamattomassa että jousitetussa massassa, vaihe/taajuusanturi kuormituksen synkronointia varten ja matkaa mittaava pulssianturi. Lisäksi laitteistoon kuuluu kamera, joka kuvaa radan pintaa sekä GPS-paikannusjärjestelmä [91]. Voiman mittauksesta lähde ei mainitse mitään, mutta antaa kaavan, jolla voima määritetään kiihtyvyyksien perusteella.



Kuva 5.6. Portancemetre. [91]

Dynaaminen kuormitus tuotetaan epäkeskisen massan avulla vastaavasti kuin täryjyrissä. Kuormituksen ohjaus saattaa olla hieman yksinkertaisempi kuin RSMV:ssä, sillä muuttujina ovat vain taajuus ja vaihe. Laitteen jousitettu massa on 2955 kg ja jousittamaton massa on muutettavissa. Raportoiduissa testeissä on käytetty jousittamattomia massoja 1800 kg ja 2940 kg sekä näiden lisäksi muuttuvaa kuormaa, jonka suuruudesta on annettu epäkeskinen momentti ja taajuus. Epäkeskinen momentti on ollut testeissä 1.391, 0.835 tai 0.556 kgm ja taajuus 10, 20, 25, 30 tai 35 Hz. Kokonaiskuormituksen laskentakaavalla ei näiden tietojen perusteella pysty suoraan arvioimaan toteutunutta kuormitusväliä, sillä kaava sisältää jousittamattoman ja jousitetun massan kiihtyvyydet. Esimerkin mukaan toteutunut kuorma olisi pyöräkohtaisesti noin 50 kN staattista kuormaa ja ± 20 kN muuttuvaa kuormaa. Testeissä on käytetty ajonopeutena 6 km/h ja radan kokonaisjäykkyys on laskettu 30 peräkkäisen kuormituspulssin keskiarvona. Esimerkki mittaustuloksista on esitetty kuvassa 5.7.



Kuva 5.7. Esimerkki Portancemetrellä eri taajuuksilla toteutetuista mittauksista samalla rataosuudella. [91]

Kuvan 5.7 mittaustulosten mukaan kuormitustaajuudella olisi merkittävä vaikutus radan jäykkyyteen. Etenkin 25 Hz kuormitustaajuudella toteutettu mittaus on tuottanut muihin taajuuksiin verrattuna selvästi suuremman kokonaisjäykkyyden. Hosseingholian et al. [91] arvelivat, että tämä taajuus olisi hyvin lähellä radan resonanssitaajuutta, mutta oletus ei vaikuta uskottavalta, sillä yleisesti otaksutaan radan jäykkyyden pienenevän resonanssissa. Toisaalta radan jäykkyyden pitäisi kasvaa kuormitustaajuuden kasvaessa ja siten olisi mahdollista, että 30 Hz taajuus olisikin lähellä radan resonanssitaajuutta. Joka tapauksessa suurella kuormitustaajuudella toteutettavissa mittauksissa resonanssitaajuudet ja ylipäätään marakenteiden taajuuksiin tulevat mukaan yhtälöön ja ne vaikeuttavat mittaustulosten tulkintaa.

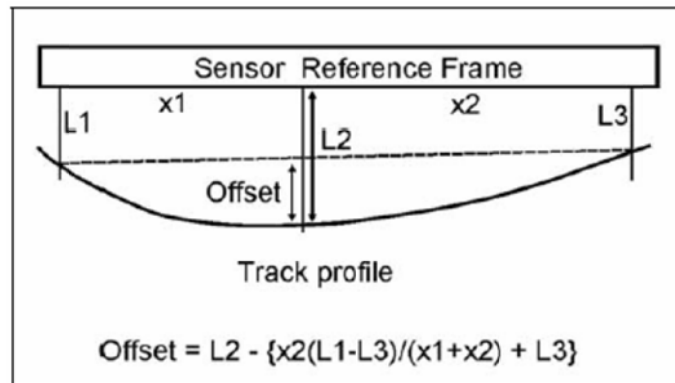
5.3 Geometrian mittaamiseen perustuvat menetelmät

5.3.1 Track Loading Vehicle (TLV)

Yhdysvaltalainen Transportation Technology Center Inc. (TTCI) on käyttänyt 1980-luvulta alkaen rataa hallitusti kuormittavia vaunuja. Ensimmäinen versio oli AAR:n kanssa yhteistyössä kehitetty DECAROTOR (ks. luku 4.2), joka oli saanut nimensä pyöriensä lukumäärän mukaan. Pidemmälle kehitelty versio edellisestä on myös luvussa 4.2 esitelty Track Loading Vehicle (TLV), joka pystyy kuormittamaan rataa sekä paikallaan että hitaassa, maksimissaan 16 km/h, liikkeessä. Kuormitusperiaate on hieman samankaltainen kuin RSMV:ssä ja Portancemetressä. Neliakselisen vaunun keskellä on kuvan 4.6 mukaisesti viides pyöräkerta, jota voidaan kuormittaa hydraulisesti sekä pysty- että vaakasuunnassa. Kuormitus voi vaihdella 4–267 kN välillä. Jäykkyyden mittaus perustuu kahteen peräkkäiseen ajoon erilaisilla pystysuuntaisilla kuormituksilla. Testeissä on käytetty kevyttä 44 kN akselipainoa ja raskasta 178 kN akselipainoa. Näiden kahden mittauksen erotuksena saadaan laskettua kuorman lisäyksestä aiheutuva radan taipuma. Radan muotoa mitataan laserantureiden avulla perustuen mittakantamittaukseen. Mittauksia tehdään myös tyhjällä vaunulla, jonka

mittausteli on varustettu 9 kN kuormituksen tuottavilla paineilmasylintereillä. Erittäin kevyen akselin tuottama mittaustulos edustaa radan geometriavirheitä. [6]

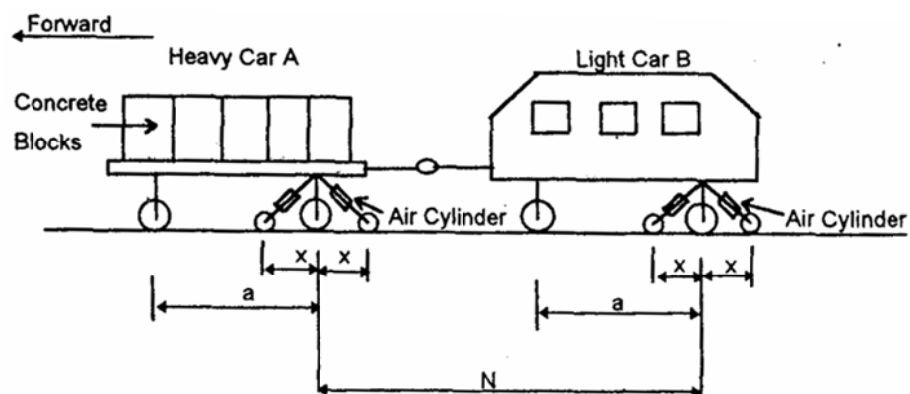
Kuvassa 5.8 on esitetty lasereihin perustuvan mittakantamittauksen periaate. Radan pystysuuntainen geometria määritetään kolmen laserin avulla vastaavasti kuin ruotsalaisen radantarkastusvaunun IMV100 kohdalla.



Kuva 5.8. Radan geometrian mittaaminen lasereihin perustuvalla mittakantamittauksella. [92]

5.3.2 CARS

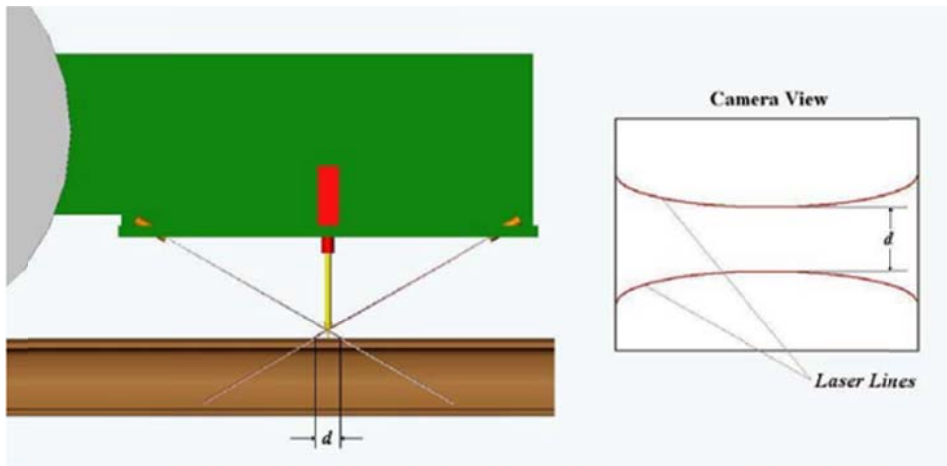
Kiinan rautatieakatemia (*The China Academy of Railway Sciences, CARS*) oli yksi ensimmäisistä jatkuvan radan jäykkyyden mittalaitteen kehittäjistä. Mittaus perustuu kahteen erilaisella akselipainolla varustettuun vaunuun, jotka molemmat mittaavat radan geometriaa mittakantamittauksella kuvan 5.9 mukaisesti. Kevyen vaunun akselipaino on 40 kN ja sen on katsottu olevan riittävä poistamaan heikosti tukeutuneiden ratapölkkyjen vaikutus mittaustuloksista. Kevyen vaunun tarkoitus on mitata radan ”kuormittamaton” geometria eli selvittää radassa olevat geometriamuutokset. Raskaan vaunun akselipainoa voidaan vaihdella 80–250 kN välillä. Radan jäykkyyttä ilmentää näiden kahden eripainoisen akselin mittaustulosten erotus samalla tavalla kuin TLV:ssä. Toistamalla mittaus erilaisilla akselipainoilla voidaan saada selville myös jäykkyyden epälineaarinen käyttäytyminen. Vaunun suurin sallittu ajonopeus on 60 km/h. [90], [93]



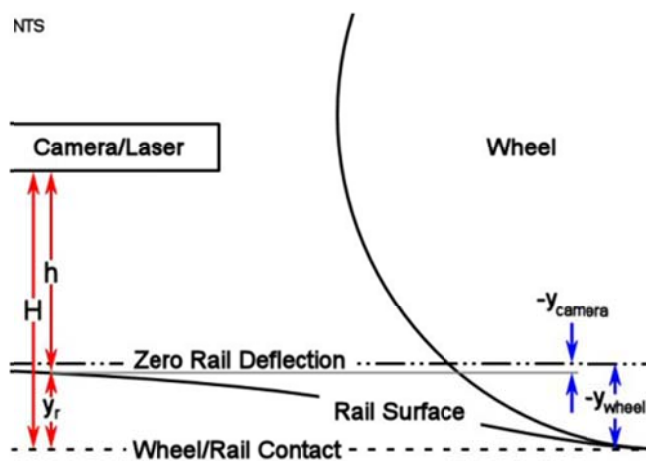
Kuva 5.9. Kiinalaisen CARS:n jäykkyyden mittauslaite. [93]

5.3.3 UNL

Nebraskan yliopisto (*University of Nebraska, Lincoln, UNL*) Yhdysvalloissa on kehittänyt mittausjärjestelyn, joka mittaa kiskon taipumaa viivalasereiden ja kameran avulla kuvan 5.10 mukaisesti. Mittaus tehdään suhteessa pyörän ja kiskon kosketuspisteeseen eli taipuman mittauksen referenssipiste on taipumasuppilon pohjalla (kuva 5.11), eikä taipumattomassa kohdassa rakennetta kuten yleensä. Jäykkyyden ollessa heikko, pyörä kulkee ikään kuin kuopassa ja kisko nousee lähemmäksi mittauspistettä pyörän vieressä. Viivalasereiden kiskoon piirtämien viivojen välimatka muuttuu taipuman suuruuden suhteessa ja kamera tallentaa viivojen paikat kuviksi. Viivojen lähinäisyys selvitetään kuvista kuvankäsittelyn avulla [94].



Kuva 5.10. Taipuman mittaaminen UNL-laitteen kameran ja viivalasereiden avulla. [94]



Kuva 5.11. Kiskon taipuma suhteessa mittauspisteeseen. [94]

Mittausmenetelmän selkeä heikkous on se, että taipumaa ei pystytä mittaamaan kokonaisuudessaan, vaan taipuma mitataan suhteellisen läheltä pyörää, missä taipuma ei ole vielä ehtinyt kokonaan palautua. Osittaisen taipuman mittaus johtaa mallintamiseen, jossa kiskon kokonaistaipuma lasketaan BOEF-mallin avulla. Mallintaminen aiheuttaa hieman virhettä, jonka suuruus riippuu radan jäykkyydestä ja taipumamuodon karakteristiksesta pituudesta. Mittauspistettä ei pystytä viemään riittävän kauaksi pyörästä, missä taipuma olisi nolla, sillä jyrkissä kaarteissa mittaus kohdistuu eri

kohtaan kiskoa kuin mistä pyörä kulkee. Norman et al. [94] ei ottanut kantaa siihen, miten radan epätasaisuudet vaikuttavat mittaustulokseen. Lähde kuitenkin toteaa, että kiskon muodon ei oleteta muuttuvan voimakkaasti lyhyellä matkalla ja että pyörän ja anturin kiinnityksen oletetaan olevan jäykkä.

Vastaava mittaus olisi kohtalaisen helppo toteuttaa etäisyyttä mittaavien lasereiden avulla. Ongelmaksi muodostuvat kuitenkin radan epätasaisuudet, jotka saattavat olla selvästi suurempia kuin varsinaisesti mitattava suure. Ongelma voitaisiin ainakin osittain poistaa tekemällä mittaus kevyen ja raskaan akselin vierestä. Radan jäykkyys laskettaisiin näiden kahden mittauksen erotuksena kuten monissa muissakin menetelmissä. Tällainen menettely edellyttäisi kahden vaunun instrumentointia tai vaihtoehtoisesti kevyen mittaavan akselin sijoittamista raskaan vaunun alle.

5.3.4 SKMT

Prahan teknillinen yliopisto ja KZV (*Komercni Zeleznicni Vyzkum*) ovat kehittäneet jatkuvan jäykkyyden mittauslaitteen nimeltä SKMT. Laitteen mittausperiaate perustuu mittakantamittaukseen, joka on toteutettu rakentamalla kaksi neliosaista kehikkoa viiden akselin varaan tukemiskoneen ympärille kuvan 5.12 mukaisesti. Mittauksessa vierekkäisten kehikoiden kallistuskulmia mitataan siirtymäantureilla, joiden tulokset voidaan edelleen muuntaa pystysuuntaiseksi taipumaksi. Kuormitus, jonka suuruus kiskoa kohden on 80 kN, kohdistetaan kiskoihin tukemiskoneen muunnellun nostomekanismin avulla. [95]



Kuva 5.12. Tsekkiläinen mittauslaite SKMT. [95]

SKMT-mittauksessa tehdään kaksi erillistä mittausta mitattavalla rataosuudella; toinen kuormitettuna ja toinen kuormittamattomana. Näiden kahden mittausajon tulosten erotuksen avulla voidaan laskea ratamoduuli BOEF-malliin perustuen. [95]

SKMT-mittauksista on pääteltävissä, että pystysuuntainen taipuma määritetään ilmeisesti 20,8 m mittakannalla. Tämä todennäköisesti vastaa kehikoiden ulommaisien akselien etäisyyttä. Raportissa ei ole mainintaa ajonopeudesta, jolla mittaukset on tehty.

5.3.5 SBB

Sveitsin rautateiden (*Schweizerische Bundesbahnen, SBB*) kehittämä versio jäykkyyden mittalaitteesta perustuu kahteen radan geometriaa mittaavaan vaunuun ja on toimintaperiaatteeltaan hyvin samankaltainen kuin TLV ja CARS. SBB:n versiossa geometriaa mitataan hyvin kevyillä vaunuilla ja rataa kuormittaa tavallinen tavaravaunu. Mittausjärjestelyyn kuuluu kuvan 5.13 mukaisesti vielä kolmaskin kevyt vaunu, joka ilmeisesti liittyy raskaan akselin taipuman mittaukseen. [96]



Kuva 5.13. Sveitsiläisen SBB:n radan jäykkyyden mittauslaite. [96]

Useasta erillisestä vaunusta huolimatta sveitsiläisten mittausjärjestely on kohtalaisen yksinkertainen ja se voidaan periaatteessa liittää minkä tahansa kalustoyksikön perään. Varsinaiset mittausjärjestelyt, kuten käytetyt anturit yms. seikat, eivät ilmene lähteestä [96].

5.3.6 Kiihtyvyydsantureihin perustuva mittaus

Sussmann [97] on tutkinut mahdollisuutta instrumentoida kevyt ja raskas akseli kiihtyvyydsantureilla ja mitata radan jäykkyyttä inertiamittaukseen perustuen. Perusajatuksena on samankaltainen mittaustapa kuin TLV:ssä ja CARS:ssa eli jäykkyys laskettaisiin kahden eripainoisen akselin tuottaman geometrian erotuksena. Menetelmä edellyttäisi ilmeisesti mittaustulosten muuttamista tiettyyn mittakantaan ja eri painoisten akselien tuottamien korkeuspoikkeamien vertailua. Menetelmä ei oikeastaan eroa mitenkään siitä, että tehtäisiin kaksi radantarkastusta eripainoisilla radantarkastusvaunuilla.

Kiihtyvyydsantureiden käytön ongelmana on se, että kaksinkertainen integrointi (ks. luku 4.5) edellyttää aina ylipäästösuodattimen käyttöä, minkä seurauksena signaalin nollataso menetetään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että menetelmä toimii vain tilanteissa, joissa jäykkyys vaihtelee jatkuvasti. Jos jäykkyys pysyy vakiona matkan suhteen, mittaustulosten erotus on nolla. Vakiojäykkyyden omaava rata tuottaa siis kaksi täsmälleen samanmuotoista geometriaa, raskaampi pyörä vain kulkee painautuneena syvempään ratarakenteeseen. Koska nollataso on ylipäästösuodattimen takia menetetty, absoluuttista jäykkyyttä ei saada selville. Siinä todennäköisessä tapauk-

nessa, että jäykkyys vaihtelee koko ajan matkan suhteen, menetelmän pitäisi teoriassa havaita jäykkyyden muutokset. Tässäkin tapauksessa jäykkyyden absoluuttinen taso jäänee selvittämättä.

5.3.7 HSD

Delftin teknillinen yliopisto on kehittänyt High Speed Deflectograph -nimisen (HSD) laitteen pinnan taipuman mittaamiseen. Mittaus perustuu laserdoppler-antureihin, jotka mittaavat taipumanopeutta absoluuttisen taipuman sijaan. Rautatiesovellusta ei ole tietävästi rakennettu, mutta tanskalainen Greenwood Engineering käyttää menetelmää tierakenteen taipuman mittaamiseen (kuva 5.14). [98], [99]



Kuva 5.14. HSD tekemässä taipumamittauksia tanskalaisella maantiellä. [99]

Kuorma-auton perävaunun pyörä aiheuttaa tien pintaan vastaavan kaltaisen taipumasuppilon kuin junan pyörä rataa. Kun ajoneuvo liikkuu maantienopeuksilla, pinnan nopeuden pystysuora komponentti kuvaa taipumanopeutta, joka kasvaa absoluuttisen taipuman ja ajonopeuden kasvaessa. Rasmussen et al. [98] ovat esittäneet esimerkkikuvauksia, joissa mitattu taipumanopeus on ollut tanskalaisella maantiellä tehdyissä testeissä noin 0,010–0,015 m/s ajonopeudella 70–80 km/h. Absoluuttinen taipuma pudotuspainolaitteella tehdyissä mittauksissa oli vastaavasti noin 0,3 mm. Antureiden mittaustarkkuuden kerrotaan paranevan ajonopeuden ja siten myös taipumanopeuden kasvaessa. Rautatiesovelluksissa absoluuttinen taipuma olisi usein moninkertainen, joten myös taipumanopeus olisi moninkertainen ja ajonopeuskin voisi olla selvästi suurempi. Siten taipumanopeuden mittaustarkkuus rautatiesovelluksessa saattaisi olla jopa selvästi maantiesovellusta parempi.

Mittausjärjestely vaatii vähintään yhden anturin, joka mittaa taipumanopeutta tietyssä kohdassa taipumasuppiloa ja toisen anturin joka mittaa tien epätasaisuudet taipumasuppilon ulkopuolelta. Lisäksi tarvitaan kiihtyvyydenturit ja gyroskoopit mittaamaan ajoneuvon liikkeitä, sillä mittaus tehdään jousitetun perävaunun suhteen ja perävaunun jousituksen aiheuttamat pystysuuntaiset liikkeet näkyvät myös taipuma-

nopeutena. Kumipyörillä toimiminen tuo menetelmään omat haasteensa, sillä myös pyörien jousto tuottaa vastaavaa nopeutta. Mittaus täytyy tehdä kohtisuorassa kulmassa mitattavaan pintaan nähden. Näin ei aina pystytä toimimaan, sillä anturin asento on mittauksessa vakio, mutta pinnanmuoto vaihtelee. Pienikin epätarkkuus kohtisuoruudessa lisää taipumanopeuden komponentin ajonopeudesta ja se lisää helposti menetelmän epätarkkuutta, sillä ajonopeus on usein 100-kertainen taipumanopeuden verrattuna.

Jos mittauksella halutaan selvittää absoluuttinen taipuma, antureita pitää olla useampi taipumasuppilon matkalla, jotta niiden perusteella voidaan integroida taipumanopeudet siirtymiksi. Maksimitaipumaa ei pystytä HSD:ssä mittaamaan suoraan pyörän kohdalta, sillä taipumanopeus kyseisessä pisteessä on nolla. Mittaus on herkin jyrkimmässä kohdassa taipumasuppiloa kulkusuunnassa hieman pyörän edessä tai takana.

Mittausjärjestelyssä on hyvin paljon yhtäläisyyksiä radan jäykkyyttä mittaavien mittalaitteiden toimintaperiaatteiden kanssa. Rautatiesovelluksessa mittausanturit voitaisiin kiinnittää jousittamattomaan massaan ja koska teräspyörien jousto on merkityksellisen, mittauksessa olisi monta häiriötekijää vähemmän verrattuna maantiesovellukseen.

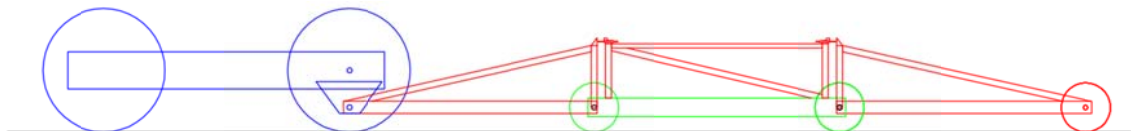
5.4 Prototyyppi

Edellä kuvattuja mittauslaitteita ei pystytä sellaisenaan hyödyntämään Suomen rataverkolla lähinnä erilaisen raidelevyeyden takia. Esimerkiksi ruotsalaisen mittalaitteen muutostyöt aiheuttaisivat runsaasti kustannuksia ja mittausten volyymin täytyisi olla huomattavan suuri kattamaan muutostöistä aiheutuneet kulut. Ainoaksi käytännön vaihtoehdoksi jäi lopulta oman melko yksinkertaisen, ja siten huokean, mittauslaitteen rakentaminen.

Edellä kuvattujen olemassa olevien jatkuvien mittauslaitteiden hyviä ja huonoja puolia tarkasteltiin huolellisesti. Oskilloivaan massaan perustuvan mittausmenetelmän selkeä etu olisi riippumattomuus raidegeometriasta. Yksinkertaisimmillaan mittauksia voitaisiin tehdä itsemittaavan täryjyrän avulla. Tämä vaihtoehto oli pitkään mielettävissä, sillä valmista jyrää voitaisiin käyttää kohtalaisen pienin muutoksin sellaisenaan. Täryjyrän toimintaperiaatetta ja soveltuvuutta maarakenteiden tiiviiden ja kantavuuden arviointiin ovat pohtineet muun muassa Kalliainen et al. [36]. Esimerkiksi asfaltoinneissa käytettävään kaksivalssiseen täryjyrään tarvitsisi vain rakentaa laipat valsseihin, jotta laite pysyisi kiskoilla ja mittauslaite olisi muilta osin valmis mittaus-työhön, sillä täryjyrässä on anturointi valmiina tiiviysmittausta varten ja samaa anturointia voitaisiin hyödyntää jäykkyyksmittauksessa. Täryjyrän käytön suurin heikkous on sen kohtalaisen pieni massa, sillä suurimmat täryjyrät painavat vain noin 13 tonnia ja akselipaino olisi siten alle 70 kN. Huomioitaessa myös mittauksen dynaaminen osuus, menetelmällä olisi oletettavasti mahdollista mitata radan jäykkyyttä suunnitellun kuormitusvälillä 20 – 120 kN, joka akselipainona olisi edelleen suhteellisen kevyt, mutta kuormituksen vaihteluvälinä jo kohtalaisen suuri. Täryjyrän käyttö sellaisenaan olisi oskilloivaan massaan perustuvista mittausjärjestelyistä käytännössä ainoa mahdollinen vaihtoehto, sillä esimerkiksi RSMV:tä vastaavan mittausjärjestelyn rakentaminen alusta loppuun katsottiin liian kalliiksi ja hankalaksi toteuttaa.

Mittausmenetelmiä arvioitaessa päädyttiin valitsemaan tarkempaan tarkasteluun geometriaa mittaavat menetelmät. Näistä selvästi yksinkertaisimmalta vaikutti SBB:n muutama kevyen vaunuun perustuva jäykkyyden mittausmenetelmä. Toisaalta myös radantarkastusvaunuissa käytetty tekniikka eli pyörien avulla tapahtuva mittakantamittaus vaikutti erittäin hyvin toimivalta menetelmältä. Näitä kahta menetelmää soveltaen päädyttiin prototyyppiin, jossa junan akselin aiheuttama radan taipuma mitataan mittakantamittauksen avulla ja radan kuormittamaton geometria vastaavalla tavalla taipumasuppilon ulkopuolelta kuvan 5.15 mukaisesti.

Kuvassa 5.15 siniset pyörät edustavat junan vaunun raskaita akseleita ja vihreät pyörät mittakantamittauksessa tarvittavia pyöriä, joiden suhteen raskaan akselin aiheuttama taipuma mitataan. Tämä mittaustulos pitää sisällään sekä kuormasta aiheutuvan radan taipuman että radan epätasaisuudet. Radan epätasaisuudet voidaan kuitenkin laskea pois mittaustuloksesta mittaamalla radan kuormittamaton geometria yhden lisäakselin avulla (punainen pyörä kuvassa 5.15). Itse mittaus perustuu kulmanmuutokseen vihreiden pyörien akseleiden suhteen, mutta varsinainen mittaus tapahtuu siirtymäantureilla. Radan taipuma saadaan selville siis melko yksinkertaisella tavalla kahden siirtymäanturin mittaustuloksen erotuksena. Ennen kuin varsinainen vähennyslasku voidaan tehdä, tarvitsee mittaustulokset sitoa paikkaan ja radan kuormittamattoman geometrian mittaustulokset tulee siirtää samassa paikassa tehdyksi kuormitetun geometrian mittaustulosten kanssa. Yksinkertaisimmin paikkaan sitominen voidaan toteuttaa pulssianturin avulla, joka laskee pyörässä olevan hammaskehän hampaita kuljetun matkan suhteen. Myös siirtymäanturien mittaustulokset voidaan tallentaa mitattujen pulssien eli matkan suhteen, jolloin kahden geometriamittauksen siirtäminen samaan vaiheeseen on helppo tehdä vakio pituisella vaihesiirrolla. Absoluuttisesti mittaustulos voidaan sitoa paikkaan GPS-paikannuksen avulla.



Kuva 5.15. Radan jäykkyyden jatkuvan mittalaitteen prototyyppi.

Prototyyppi näytti toimivalta paperilla tehdyissä tarkasteluissa. Aivan varmoja menetelmän toimivuudesta ei laskennallisten tarkastelujen valossa kuitenkaan oltu, sillä mittausmenetelmään liittyy useita vaikeasti ennakoitavia tekijöitä. Tällaisia ovat muun muassa mittausakselien sivusuuntainen vaeltelu kiskon pinnalla ja vaihesiirtoon tarvittava matkan mittaus ja erityisesti tähän liittyen pyörien osittaisuusto. Myös orsien värähtely saattaisi aiheuttaa ongelmia ainakin suurissa nopeuksissa. Toisaalta mittakantamittausta tehdään 120 km/h nopeuksiin saakka mitta-akselien avulla, joten todennäköisesti ongelmat olisivat ratkaistavissa. Idea vaikutti niin toteuttamiskelpoiselta, että siitä päädyttiin rakentamaan pienen mittakaavan prototyyppi idean toimivuuden testaamiseksi laboratorioissa.

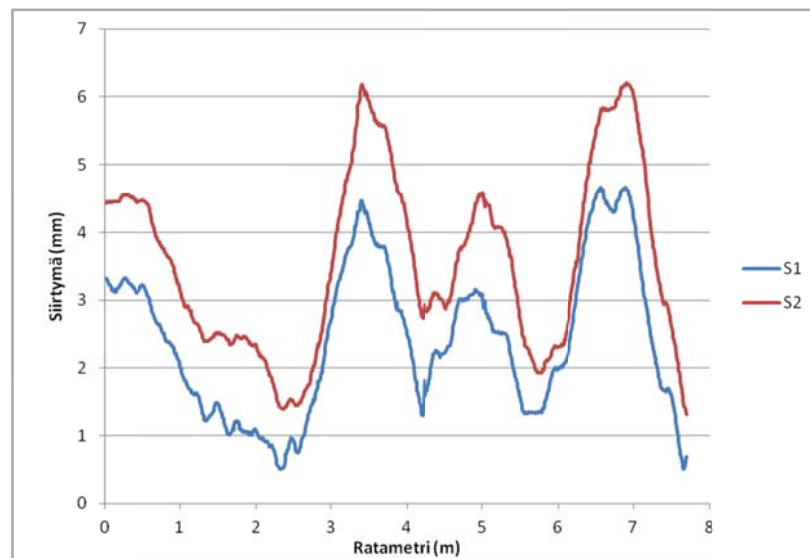
Laboratoriotestejä varten tarvittiin aluksi pienen mittakaavan rautatie, joka rakennettiin tikapuita muistuttavasta kaapelihyllystä. Rata rakennettiin jäykälle betonilattialle ja siksi kiskojen joustoa lisättiin vaahtomuovin, puukuitulevyn ja luonnonkumin avulla. Lattialle levitettiin ensin koko testiradan pituudelta vaahtomuovikaistale, jonka päälle levitettiin huokoinen puukuitulevykaistale osalle ja luonnonkumikaistale osalle matkaa testiratapituudesta. Näin saatiin aikaan rata, joka on riittävän joustava ku-

vaamaan todellista radan käyttäytymistä suurilla kuormilla ja toisaalta riittävän staabiili toistettavuuden kannalta. Tämän jälkeen rakennettiin kuvan 5.16 mukainen jäykkyyden mittalaitteen prototyyppi radan mittojen mukaan. Laitteen kiskopyörät hankittiin kaupasta ja muuten metallityöt tehtiin itse. Ensimmäinen versio tehtiin ainoastaan suoran radan mittaukseen, sillä mittalaitteen runko ei ollut sivusuunnassa joustava. Mittalaitteeseen kuuluivat (kuvassa 5.16 oikealta alkaen) ”junanvaunu”, jonka akselipainoja pystytettiin muokkaamaan painojen avulla. Seuraavaksi laitteessa oli ”mittavaunu”, joka mittaa radan geometria kuormitettuna ja viimeisenä akseli, joka mittaa radan kuormittamattoman geometrian mittavaunun suhteen. Alkuperäisessä ideassa kolme akselia vasemmalta alkaen olisivat hyvin kevyitä junanvaunun akseleihin verrattuna. Tässä pienen mittakaavan järjestelyssä kevyistä akseleista tuli tarpeettoman raskaita junanvaunuun verrattuna, mutta mittauksen toimintaperiaate kuitenkin havainnollistui. Mittauslaitteisto asennettiin mittavaunun kyytiin ja painojakauma tasattiin mahdollisimman hyvin siten, että jokaisella kevyellä akselilla oli saman verran painoa. Prototyypin pituus junanvaunuineen oli 3,2 metriä ja radan kokonaispituus 12 metriä. Koska mittalaite mittaa radan kuormitetun ja kuormittamattoman geometrian eri kohdista rataa, todellinen radan hyötypituus oli vajaat 8 metriä.



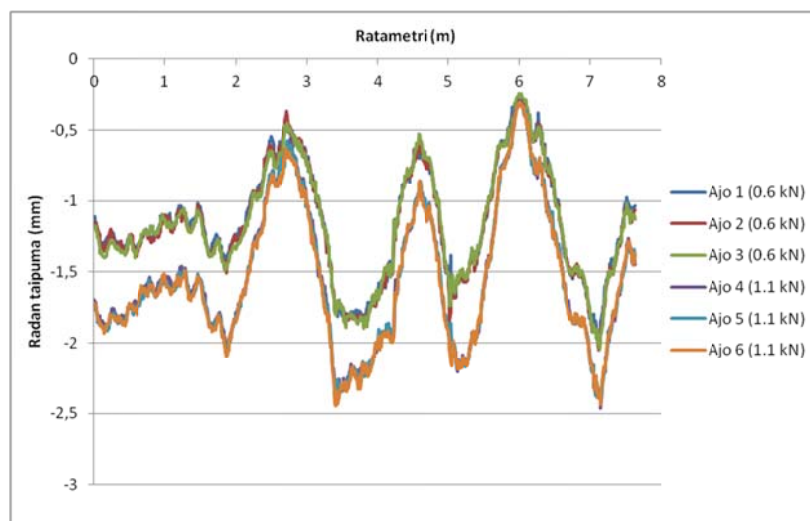
Kuva 5.16. Jatkuvatoimisen jäykkyyden mittalaitteen prototyyppi laboratoriotesteissä.

Laboratoriossa tehtiin useita mittausajoja samalla akselikuormalla menetelmän toistettavuuden varmistamiseksi ja akselipainoja myös vaihdeltiin absoluuttisen taipuman muuttamiseksi. Kuvassa 5.17 on esitetty yhden ajon siirtymäanturien mittaustulokset vaihesiirron jälkeen muutettuna vastaamaan taipumaa millimetreissä. Kuvasta havaitaan, että radan geometria eli korkeusasema vaihtelee jopa 5 mm suhteellisen lyhyellä matkalla. Jo tämän kuvan perusteella on ilmeistä, että radan kuormittamattoman geometrian mittaaminen on ensiarvoisen tärkeää menetelmän toimivuuden kannalta. Kuvasta 5.17 havaitaan myös, että raskaan akselin korkeusasemaa kuvaava signaali S1 on alemmalla tasolla kuvaajassa koko matkan ajan, mutta ero kuormittamattoman akselin korkeusasemaa kuvaavan signaalin S2 suhteen vaihtelee. Radan taipuma onkin näiden kahden signaalin S2-S1 erotus.



Kuva 5.17. Prototyypin siirtymäantureiden mittaustulos. Anturit mittaavat kaksi radan pystysuuntaista geometriaa, joiden erotus on radan taipuma.

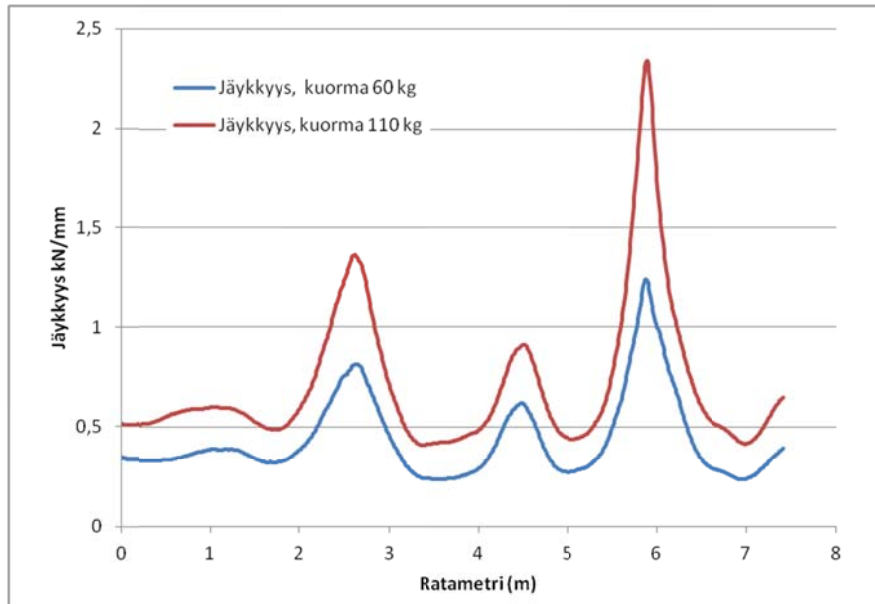
Mittausmenetelmän toistettavuus oli testeissä erinomainen, sillä kolmen peräkkäisen ajon keskihajonta samalla kuormituksella oli keskimäärin vain 0,024 mm. Kuvassa 5.18 on esitetty kahdella erilaisella kuormituksella toteutetut kolme ajoa, jotka tulostuvat radan taipumakuvaajiin lähes päällekkäin. Suurempi kuorma tuottaa rataa selvästi suuremman taipuman, mutta taipuma ei kasva täysin lineaarisesti. Suhteellisen hallituissa oloissa toteutetussa testissä radan jäykkyys vaihteli melko paljon radan taipuman ollessa pienimmillään 0,3 mm ja suurimmillaan noin 2,5 mm.



Kuva 5.18. Prototyypin testauksessa ajetetut kuusi mittausajoa kahdella erisuuruisella kuormituksella.

Kuvassa 5.18 mittausdata on tallennettu noin 8 mm välein matkan suhteen. Käytännön mittauksessa näytetaajuus voisi olla vastaavan kaltainen, jolloin se mahdollistaisi liukuvan keskiarvon käytön mittaustulosten tulostuksessa. Tulostuskuvaajissa riittäisi helposti tulostus esimerkiksi 0,25 metrin välein, mikä lisää mittauksen tarkkuutta entisestään.

Kuvassa 5.19 on esitetty testiradan jäykkyys kahdella erilaisella junakuormalla mitattuna ja neljännesmetrin liukuvalla keskiarvolla tulostettuna. Kuvasta nähdään selvästi kolme jäykempää kohtaa, jotka erottuvat keskimääräisestä testiradan jäykkyydestä. Nämä kolme kohtaa ovat testiradalla sijaitsevia lattian epätasaisuuksia, joihin kiskot tukeutuivat selvemmin.



Kuva 5.19. Testiradan jäykkyys kahdella erisuuruisella kuormituksella määritettynä.

Prototyyppi vaikutti toimivan laboratoriotesteissä ennakoidulla tavalla ja ehkäpä vielä hieman odotuksiakin paremmin. Ainoaksi haittapuoleksi havaittiin se, että radan jäykkyyden absoluuttisen tason määrittäminen vaatii jonkin muun menetelmän, jolla laite voidaan kalibroida. Testeissä kalibrointi tehtiin mittakelloilla, joilla mitattiin sekä raskaan pyörän aiheuttama taipuma että kaikkien muiden pyörien aiheuttama taipuma samassa pisteessä ja pääteltiin tämän perusteella mitä mittalaitteen tulisi saada mittaustulokseksi. Käytännön sovelluksessa mittavaunun ei oleteta kuormittavan rataa, joten ainoastaan raskaan akselin tuottama taipuma pitää mitata lähtötilanteessa joko vaaitsamalla tai rataa kiinnitetyllä anturoinnilla.

6 Koemittauskohteet ja mittausjärjestelyt

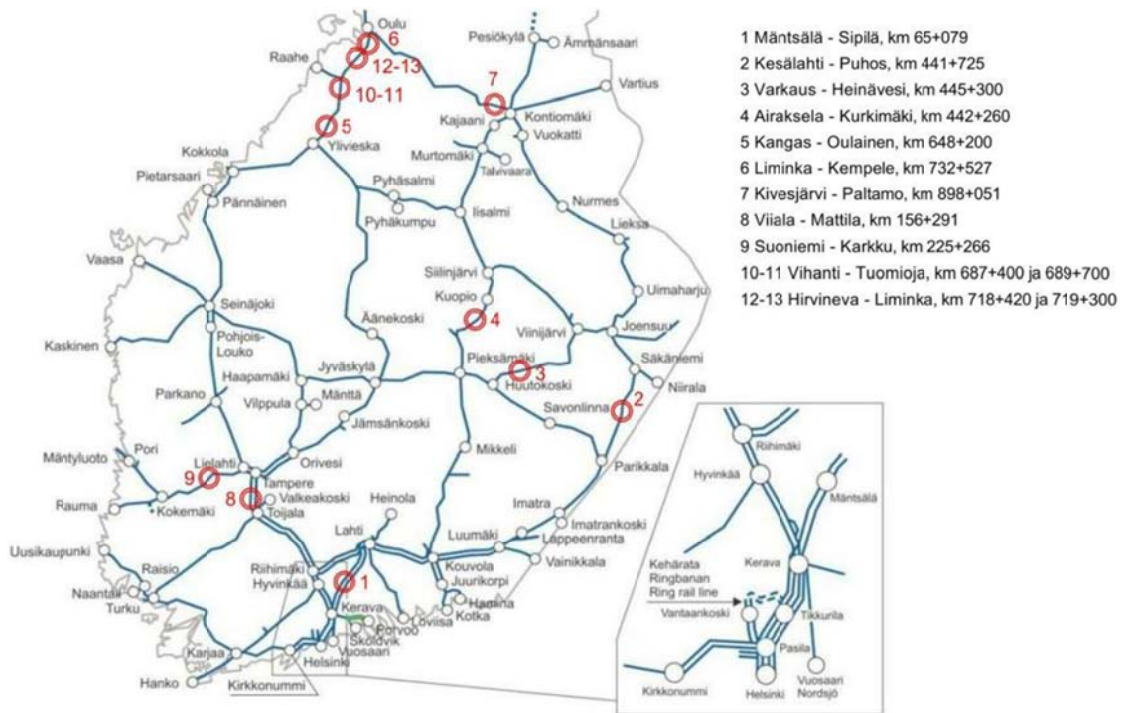
Tässä luvussa esitellään ensin pistemäisten mittausmenetelmien koemittauskohteiden suurpiirteinen sijainti rataverkolla ja perustelut juuri näiden kohteiden valinnalle. Lisäksi luvun alussa esitellään jatkotarkasteluun valitut pistemäiset mittausmenetelmät sekä perusteet niiden valinnalle. Kunkin mittausmenetelmän mittausjärjestelyt esitellään luvun alussa yleisesti pääpiirteissään ja yksityiskohtaisemmin, esimerkiksi tarkemman anturisijoittelun osalta, kunkin kohteen esittelyn kohdalla erikseen. Luvun loppuosuus koostuu kunkin koemittauskohteen ominaisuuksien ja kohteelle tunnusomaisten piirteiden tarkemmalla esittelyllä kohde kerrallaan esittelyn perustuessa esimerkiksi pohjatutkimustietoihin, maatumkadataan ja valokuviin sekä havaintoihin koemittausten aikana.

6.1 Koemittauskohteet ja mittausajankohdat

Koemittauksia tehtiin yhteensä kolmessatoista kuvan 6.1 osoittamassa kohteessa. Näistä kohteet 1–9 ovat TTY:n muihin tutkimusprojekteihin liittyviä routaseuranta-kohteita tai ratapölkkyjen venymämittauskohteita. Routaseuranta-kohteet valittiin koemittauskohteiksi, koska niissä oli jo valmiiksi asennettuna referenssitangot siirtymäantureita varten yhden ratapölkyn kummassakin päässä. Lisäksi kohteet sijaitsevat kohtuullisen kattavasti rataverkon eri osissa ja ominaisuuksiltaan erilaisilla rataosuuksilla, jolloin tulokset mahdollistavat erilaisten ratarakenteiden keskinäisen vertailun.

Ratapölkyn päiden viereen asennetut referenssitangot ovat pääsääntöisesti kolme metriä pitkiä. Mahdolliset poikkeukset referenssitankoihin liittyen on mainittu yksityiskohtaisemman kohde-esittelyn yhteydessä. Tankojen kaksi ylintä metriä on suojattu muovisella suojaputkella, joten ne eivät ole suorassa kontaktissa radan rakennekerroksiin. Alin metri, joka koostuu harjaterästangosta, ei ole suojaputkessa ja sen tarkoituksena on ankkuroida tanko ratapenkereeseen tai pohjamaahan routanousun seuraamista varten.

Kohteissa 10–13 tehtiin taipumamittauksia jatkotarkasteluun valituilla menetelmillä hieman erilaisin mittausjärjestelyin ennen kohteissa 1–9 tehtyjä koemittauksia, joten myös näiden mittauksien tulokset soveltuvat hyvin tarkasteltaviksi tämän tutkimuksen puitteissa.



Kuva 6.1. Mittauskohteiden sijainti Suomen rataverkolla. Muokattu lähteestä [100]

Koemittauksia haluttiin ajoittaa sekä sulan maan ajalle että talviaikaan radan jäykkyyden vuodenaikaisvaihtelun ja ratarakenteen routautumisen vaikutuksien tutkimiseksi. Ensimmäiset koemittaukset tehtiin kohteissa 1–9 syyskuussa 2011 ja toiset, niin sanotut talvimittaukset, helmikuussa 2012. Kohteissa 10–13 tehtiin mittauksia ainoastaan sulan maan aikana elokuussa 2011.

6.2 Koemittauksiin valitut mittausmenetelmät

Edellisessä luvussa esiteltiin maailmalla käytettyjä pistemäisiä mittausmenetelmiä. Näistä tämän tutkimuksen puitteissa tehtäviin koemittauksiin valikoituivat kiihtyvyyssanturit, siirtymäanturit ja videokamerakuvaus. Kiihtyvyyssanturit ja siirtymäanturit valittiin niiden aiemmissa, hieman samankaltaisissa mittauksissa osoittaman potentiaalinsa takia. Varsinkin kiihtyvyyssanturit ovat helposti asennettavissa ja siirrettävissä, minkä lisäksi niillä voidaan mitata jopa kymmenien ratapölkkyjen siirtymiä samanaikaisesti. Videokamerakuvausta haluttiin kokeilla radan taipuman mittaamiseen sen yksinkertaisuuden, nopeuden ja helppouden vuoksi. Luvuissa 5.2.1–5.2.3 on esitelty hieman tarkemmin kunkin mittausmenetelmän ominaisuuksia ja mittausjärjestelyitä yleisesti.

6.2.1 Kiihtyvyyssanturit

Tämän tutkimuksen puitteissa esitellyissä koemittauksissa käytettiin VTI Technologies Oy:n SCA610- ja SCA620-sarjan kiihtyvyyssantureita, joiden mittausalue oli joko 3 tai 12 G. Anturit kiinnitettiin niihin kiinteästi kiinnitettyjen magneettien avulla ratapölkkyihin kiinnitettyihin metallilevyihin. Kiihtyvyyssantureiden asennusjärjestely ratapölkyn päästä oli kaikissa kohteissa sama, noin 50 mm.

Kuvan 6.1 kohteiden 1–9 mittausjärjestelyissä käytettiin syyskuun 2011 mittauksissa pääsääntöisesti kahtakymmentä kiihtyvyyssanturia. Näistä seitsemäntoista asennettiin tyypillisesti peräkkäisten ratapölkkyjen päihin, yksi kiihtyvyyssanturi siirtymäantureilla varustetun ratapölkyn vastakkaiseen päähän ja loput kaksi kiihtyvyyssanturia asennettiin siirtymäanturien vertailupisteinä toimineiden referenssitankojen päihin. Kuvassa 6.2 on havainnollistettu kiihtyvyyssanturien sijoittelua kohteissa 1–9. Kyseinen kuva on kohteesta 7 Kivesjärvi–Paltamo.



Kuva 6.2. Esimerkkikuva kiihtyvyyssanturisijoittelusta kohteissa 1–9 syyskuussa 2011.

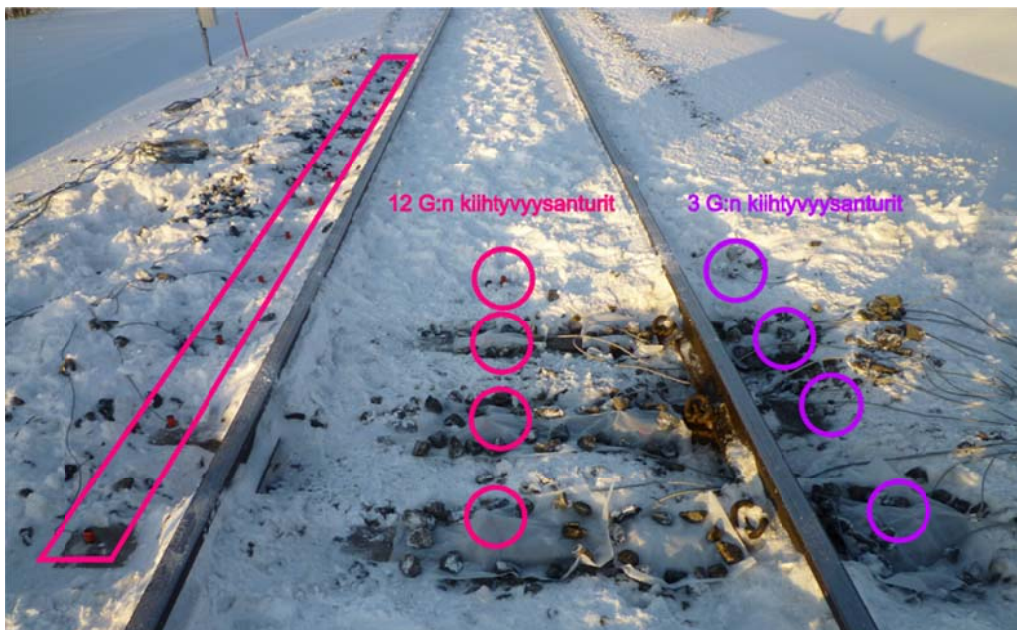
Kuvassa 6.2 nähdään etualalla instrumentoitu ratapölkky, jossa punaiset kiihtyvyyssanturit on asennettu molempiin päihin ja referenssitankojen päihin kiinnitettyihin vastinlevyihin. Loput kuusitoista kiihtyvyyssanturia on asennettu peräkkäisten ratapölkkyjen oikeanpuoleisiin päihin. Kohteissa 1–9 kaikilla käytetyillä kiihtyvyyssantureilla oli 12 G:n mittausalue.

Kuvan 6.1 kohteissa 10–13 elokuussa 2011 tehdyissä mittauksissa käytettiin yhteensä kahtatoista kiihtyvyyssanturia siten, että ne asennettiin peräkkäisten ratapölkkyjen päihin samalle puolelle raidetta kuvan 6.3 mukaisesti. Kyseinen kuva on kohteesta 11 Vihanti–Tuomioja ratakilometriltä 689+700. Kohteissa 10 ja 12 käytettiin mittausalueeltaan 3 G:n kiihtyvyyssantureita sekä kohteissa 11 ja 13 mittausalueeltaan 12 G:n kiihtyvyyssantureita.



Kuva 6.3. Esimerkkikuva kiihtyvyyssanturisijoittelusta kohteissa 10–13 elokuussa 2011.

Talvimittauksissa helmikuussa 2012 koemittauskohteissa 1–9 käytettiin 24 kiihtyvyyssanturia. Näistä 20 anturia oli mittausalueeltaan 12 G:n antureita ja neljä 3 G:n antureita. Kiihtyvyyssanturit sijoiteltiin kuvan 6.4 mukaisesti siten, että neljään peräkkäiseen ratapölkkyyn asennettiin kiihtyvyyssanturit molempiin päihin ja keskelle. Loput 12 anturia asennettiin peräkkäisten ratapölkkyjen päihin, samalle puolelle kuin syksyn 2011 mittauksissa.



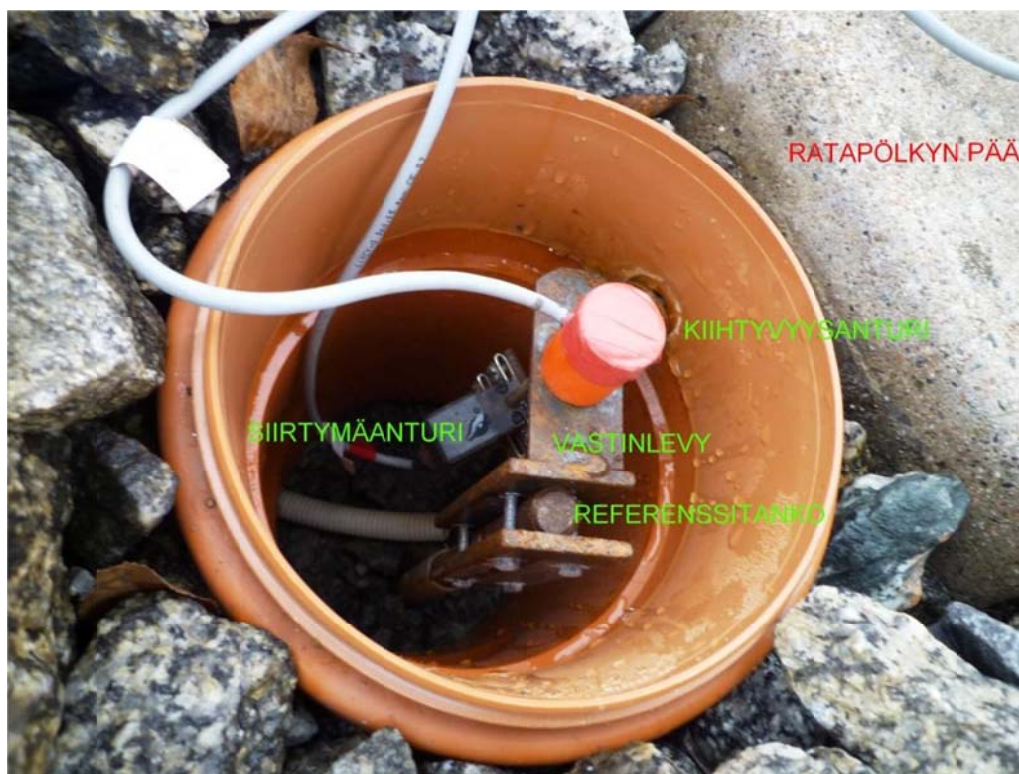
Kuva 6.4. Esimerkkikuva kiihtyvyyssanturisijoittelusta talvimittauksissa kohteissa 1–9.

Mahdolliset kohdekohtaiset muutokset mittausjärjestelyihin esitellään kunkin kohteen yksityiskohtaisemman esittelyn puitteissa.

6.2.2 Siirtymäanturit

Tämän tutkimuksen puitteissa tehdyissä mittauksissa käytettiin kohteittain joko kahta, kolmea tai neljää siirtymäanturia kerrallaan. Käytetyt siirtymäanturit olivat Novotechnikin valmistamia potentiometrityypin TRS 50-antureita, joiden mitta-alue on 50 mm. Myöhemmin tässä raportissa siirtymäanturilla tarkoitetaan nimenomaan yllämainittua anturityyppiä.

TTY:n routaseurantakohteissa tehtiin syyskuussa 2011 siirtymäanturimittauksia niissä kohteissa, joissa oli referenssitangot valmiiksi asennettuina yhden ratapölkyn kumpaankin päähän. Tällaisia kohteita olivat kuvan 6.1 kohteet 2–4 ja 6–9. Näissä routaseurantakohteissa tehdyissä mittauksissa käytettiin pääsääntöisesti kahta siirtymäanturia kerrallaan lukuun ottamatta kohdetta 8 Viiala–Mattila, jossa käytettiin kolmea siirtymäanturia. Siirtymäanturit kiinnitettiin yhden ratapölkyn kumpaankin päähän. Viiala–Mattila-liikennepaikkavälillä siirtymäanturi asennettiin myös kyseisen ratapölkyn keskelle. Näissä mittauksissa siirtymäantureiden vertailupisteenä käytettiin referenssitangon päähän kiinnitettyä vastinlevyä. Vastinlevyjen ja referenssitankojen mahdollisia siirtymiä seurattiin kiihtyvyyssantureilla. Kuvassa 6.5 on havainnollistettu siirtymäanturimittausjärjestelyä kohteiden 2–4 ja 6–9 osalta. Kuva on kohteesta 9 Suoniemi–Karkku. Talvimittauksien yhteydessä helmikuussa 2012 ei siirtymäantureiden käyttöä nähty enää tarpeelliseksi.



Kuva 6.5. Esimerkkikuva siirtymäanturimittausjärjestelystä koemittauskohteissa 2–4 ja 6–9 syyskuussa 2011.

Koemittauskohteissa 10–13 elokuussa 2011 tehdyissä mittauksissa käytettiin neljää siirtymäanturia, joilla kullakin mitattiin yhden ratapölkyn pään siirtymää. Mittausjärjestely toteutettiin siten, että neljä siirtymäanturia kiinnitettiin jäykkään palkkiin, joka kiinnitettiin tukevasti kahteen ratapölkkyjen väliin tiiviiseen pohjamaahan saakka kairattuun kairatankoon kuvan 6.6 mukaisesti.

Näissä mittauksissa käytetyt kairatangot oli varustettu painokairauksessa käytettävällä kierrekärjellä ankkuroitumisen vahvistamiseksi eikä näissä tiiviiseen pohjamooreeniin/pohjamaahan asti kairatuissa tangoissa käytetty suojaputkia.



Kuva 6.6. Esimerkkikuva siirtymäanturimittausjärjestelyistä koemittauskohteissa 10–13.

Mahdolliset kohdekohtaiset muutokset mittausjärjestelyihin esitellään tarkemmin kunkin kohteen yksityiskohtaisemman esittelyn puitteissa.

6.2.3 Videokamerakuvaus

Videokamerakuvausta kokeiltiin sulan maan ajan koemittausten yhteydessä kohteissa 1, 3, 5 ja 7–13. Muissa kohteissa kuvaaminen ei ollut mahdollista sateisen sään takia. Talvimittausten yhteydessä videokamerakuvausta ei enää käytetty. Kamerana käytettiin Casion Exilim EX-FH20 digitaalikameraa, jonka kuvausnopeudeksi valittiin 210 kuvaa sekunnissa. Normaalisissa videokamerakuvauksessa kuvausnopeus on tyypillisesti 30–50 kuvaa sekunnissa, joten käytetyn kuvausnopeuden kohdalla voitaneen puhua suurnopeusvideokuvasta.

Kameran vakautta junan ohituksen aikana pyrittiin parantamaan käyttämällä jalustana raskasta maanmittauskäyttöön tarkoitettua kolmijalkaa kuvan 6.7 mukaisesti. Jalustan vakautta pyrittiin osassa kohteita edelleen parantamaan ripustamalla jalustaan paino, jona toimi kivillä täytetty sanko.



Kuva 6.7. Yleiskuva videokamerakuvauksessa käytetystä laitteistosta.

Valtaosassa kohteista kuvauskohteena toimi kiskon varteen kiinnitetty rullamitan pala. Joissain kohteissa kuvattiin myös esimerkiksi sähkörataportaalien perustusta, millä pyrittiin todentamaan kameran paikallaan pysymistä junan ohituksen aikana. Kameran etäisyys kuvauskohteesta vaihteli huomattavasti kohteittain.

6.3 Mäntsälä–Sipilä

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Mäntsälä–Sipilä rataosalla Kerava–Hakosilta ratakilometrillä 65+079. Mittauksia tehtiin kohteen kaksoisraiteen eteläisellä raiteella aamupäivällä 12.9.2011 ja 28.2.2012. Kuvassa 6.8 on esitetty yleiskuva kohteesta kohti Sipilän liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää kohti Mäntsälää, eli lounaaseen, ja sijaitsee loivassa kaarteessa kuten kuvasta 6.8 on havaittavissa. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu syksyllä 2008.



Kuva 6.8. Yleiskuva kohteesta koilliseen Sipilän liikennepaikalle päin.

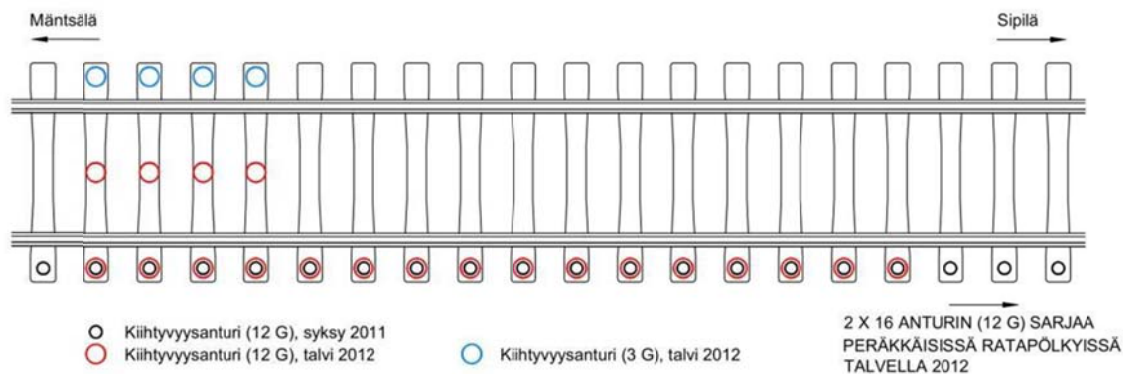
Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan D. Kiskotus on tyyppiä 60 E1 ja betoniratapölkkyt tyyppiä BP99-04. Kiskonkiinnityksenä käytetään Vosslohin Skl 14 -kiinnitystä, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7]. [101]

Mittausosuuden kohdalla kalliomurskeesta rakennetun yhdistetyn eristys- ja välikerroksen kerrospaksuus on vuoden 2003 suunnitelma-asiakirjojen perusteella noin 2000 mm ja tukikerrospaksuus 550 mm. Roadscannersin mittausosuudella vuonna 2011 tekemien maatulkausten (liite 1) perusteella tukikerrospaksuus saattaa olla jonkin verran suurempi, keskimäärin noin 600 mm. Näin ollen rakennekerrospaksuus on yhteensä noin 2550 mm.

Pohjamaa radan alusrakennekerrosten alapuolella poikkileikkaukseltaan leikkauksessa sijaitsevalla mittausosuudella koostuu vuoden 2003 suunnitelma-asiakirjojen perusteella noin 0,6 metrin paksuisesta pohjamaakerroksesta, jonka alapuolella on peruskallio. Maatulkauprofiilien perusteella alusrakennekerrosten alapuolella sijaitsee suunnitelma-asiakirjoista poiketen paalulaatta. Jäykkyystutkimuksen kannalta ei ole merkittävää, kumpi tulkinta on oikea. Mittausosuuden eteläpuolella ratakilometrivilillä 64+055...65+040 ratapenger on perustettu kaivamalla tehdyn massanvaihdon varaan ja tämän osuuden eteläpuolella paalulaatalle. Mittausosuuden pohjoispuolella suunnilleen ratakilometrivilillä 65+120...65+240 pohjamaan pintakerros on yli 3 metrin paksuudelta savea, joka edelleen paksunee pohjoiseen mentäessä. Kyseisen savikerroksen kokoonpuristumista on pyritty ennen rakentamista nopeuttamaan 0,5 metrin paksuisella ylipenkereellä. Peruskallion pinta viettää mittausosuudelta pois päin molempiin suuntiin radan pituussuunnassa kallionpinnan sijaitessa mittausosuudella suunnilleen tasolla +73,8.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia (mustat ympyrät) peräkkäisiin ratapölkkyihin ratakilometrivilille 65+075 – 65+088 ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia (punaiset ja siniset ympyrät) kolmena eri sarjana kuvan 6.9 osoittamalla tavalla ratakilometrivilille 65+075 – 65+105. Mittauksien tekeminen kolmessa eri sarjassa johtui rajallisesta anturimäärästä. Kuvassa 6.9 ratakilometrulukema kasvaa Sipilän liikennepaikkaa kohti. Siirtymäantureita ei tässä kohteessa käytetty, sillä koh-

teessa ei ollut valmiiksi asennettuja referenssitankoja niitä varten. Kiihtyvyyssantureiden lisäksi kohteessa kuvattiin videokameralla suunnilleen ratakilometrille 65+086 kiskon varteen kiinnitettyä rullamitan palaa. Kamera sijoitettiin viereiselle huoltotielle eli noin 15 m etäisyydelle kohteesta.



Kuva 6.9. Periaatekuva kohteen 1 Mäntsälä–Sipilä mittausjärjestelystä.

Tarkasteltaessa 11.8.2011, 12.10.2011 ja 18.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohdtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että ainakaan kyseisenä ajankohtana raiteessa ei ilmennyt raja-arvot ylittäviä virheitä.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 1,6 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.4 Kesälahti – Puhos

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Kesälahti–Puhos rataosalla Kouvola–Joensuu ratakilometrillä 441+725. Rataosa on sähköistetty. Mittauksia tehtiin kohteessa aamupäivällä 13.9.2011 ja iltopäivällä 9.2.2012. Kuvassa 6.10 on esitetty yleiskuva kohteesta etelään kohti Kesälahden liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää kohti Puhosta eli pohjoista ja sijaitsee kaartein alussa kuten kuvasta 6.10 on havaittavissa. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu loppuvuodesta 2010.



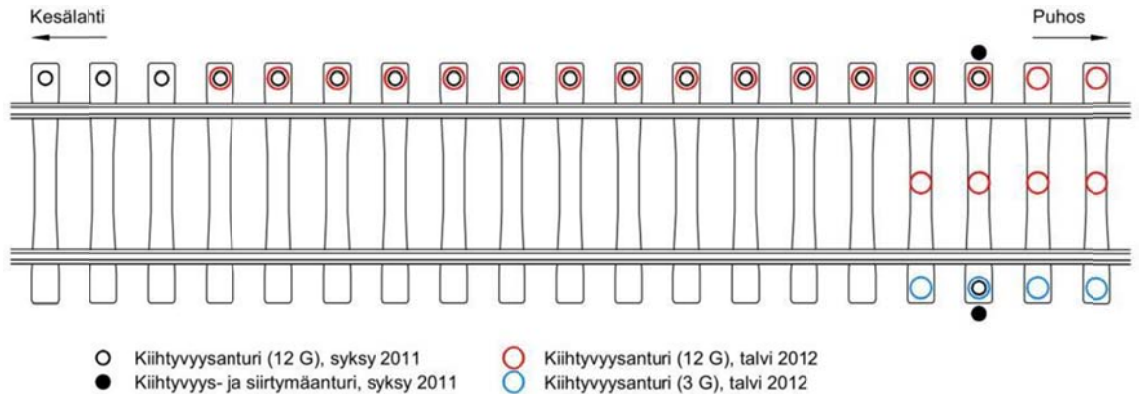
Kuva 6.10. Yleiskuva kohteesta etelään Kesälahden liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan C₂. Kiskotus on tyyppiä 54 E1 ja betonirata-pölkkyt tyyppiä B97-03. Kiskonkiinnityksenä on Vosslohin Skl 14 -kiinnitys, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7]. [101]

Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittausosuudella on 500–600 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 1000–1100 mm eli rakennekerrospaksuus yhteensä on noin 1500–1700 mm.

Radan väli- ja eristyskerros ovat vuonna 2011 tehdyn näytteenoton perusteella sorais-ta hiekkaa. Mittausosuudella rata sijaitsee lähes 5 m korkealla penkereellä. Ratakilo-metrillä 441+685 pengertäytettä on lähes 5 m paksuudelta ja kyseinen täyte on melko löyhää painokairausvastuksen ollessa keskimäärin alle 20 puolikierrosta/0,2 m. Pengertäytekerroksen alaosassa painokaira on tunkeutunut täytteeseen painamalla 100 kg kuormituksella noin 1 metrin. Vuonna 2011 tehdyn näytteenoton perusteella pengertäytemateriaali on silttistä hiekkamoreenia. Pengertäytteen alapuolisen poh-jamaan maalajia ei pystytty tulkitsemaan poikkileikkauksista, mutta pohjamaan painokairausvastus on ollut mittausalueen molemmin puolin noin 60 pk/0,2 m. Vuoden 2011 maatutkausten (liite 1) ja vuoden 1983 kairausten perusteella mittausosuuden pohjoispuolella pengertäytepaksuus pienenee nopeasti ollen ratakilometrillä 441+780 enää 600 mm. Kairaukset on lopetettu määräsivyyteen, joten kallion ylä-pinnan sijainnista mittausosuudella ei ole tietoa.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia sekä kaksi siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.11 osoittamalla tavalla ratakilometrivalille 441+715...441+726. Ratakilometrilukema kasvaa Puhokselle päin. Tässä kohteessa siirtymäanturien vertailupisteinä käytetyt referenssitangot eivät todennäköisesti tu-keutuneet tiiviiseen maakerrokseen. Kohteessa ei kuvattu videokameralla sateisen sään takia.



Kuva 6.11. Periaatekuva kohteen 2 Kesälahti–Puhos mittausjärjestelyistä.

Tarkasteltaessa 10.8.2011 ja 11.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että ainakaan kyseisenä ajankohtana raiteessa ei ilmennyt raja-arvot ylittäviä virheitä. Mittausosuudella ja sen lähistöllä on havaittu useana keväänä epätasaista routanousua, mikä on aiheuttanut virherajojen ylityksiä muun muassa kierouden ja korkeuspoikkeamien kohdalla.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 1,8 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.5 Varkaus – Heinävesi

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Varkaus–Heinävesi-rataosalla Pieksämäki–Joensuu-ratakilometrillä 445+300. Rataosa on sähköistämätön. Mittauksia tehtiin kohteessa iltpäivällä 13.9.2011 ja iltpäivällä 8.2.2012. Kuvassa 6.12 on esitetty yleiskuva kohteesta itään kohti Heinäveden liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää kohti Varkautta eli länttä ja sijaitsee suoralla. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu loppuvuodesta 2010.



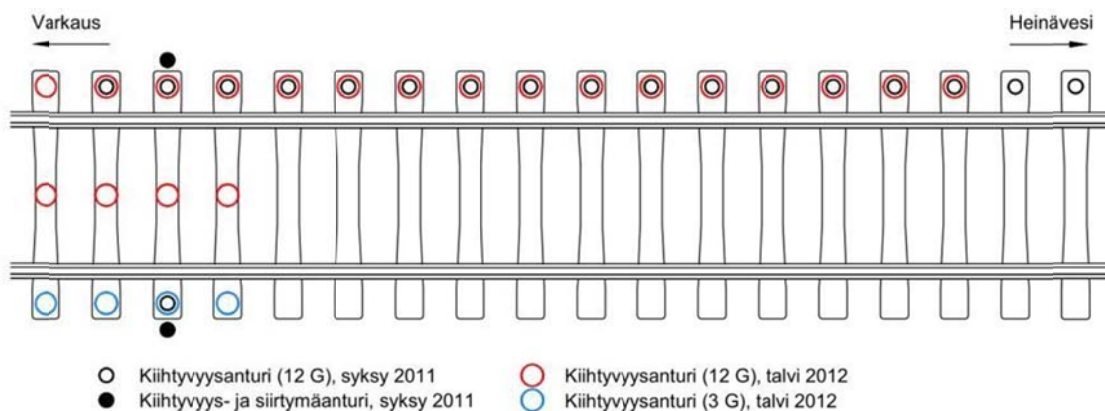
Kuva 6.12. Yleiskuva kohteesta itään Heinäveden liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan C₂. Kiskotus on tyyppiä 54 E1 ja betoniratapölkkyt tyyppiä B97-02. Kiskonkiinnityksenä on Vosslohin Skl 14 -kiinnitys, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7]. [101]

Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittaosuudella on 600 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 600 mm eli rakennekerrospaksuus on yhteensä 1200 mm.

Poikkileikkaukseltaan mittaosuus sijaitsee lähes leikkauksen ja penkereen muutoskohdassa, hiukan leikkauksen puolella. Mittaosuudelta Heinäveden liikennepaikkaa eli itää kohti mentäessä rata sijaitsee noin 100 metrin matkalla leikkauksessa, kuten kuvasta 6.12 on havaittavissa. Vuonna 2011 tehdyn maatutkauksen (liite 1) perusteella kallionpinta sijaitsee mittaosuudella alusrakennekerrosten alapuolella. Mittaosuuden länsipuolella eli Varkautta kohti mentäessä pohjamaa muuttuu vuosina 1939 ja 1974–1979 tehtyjen suunnitelma-asiakirjojen mukaan turpeeksi. Turvekerros on ollut paksuimmillaan, eli noin 6–7 metriä, ratakilometrillä 445+180, mistä turvekerros ohenee melko tasaisesti mittaosuudelle päin. Turvekerroksen alapuolella on tiivis pohjamoreenikerros. Turvekerroksen paksuuden voidaan katsoa edustavan kuitenkin ainoastaan ratapenkereen ulkopuolista aluetta, sillä radan rakennekerrokset ovat maaperätutkimusten mukaan vuosien saatossa painuneet turvekerrokseen siten, että esimerkiksi ratakilometrillä 445+200 rakennekerrokset ulottuvat lähes tiiviiseen pohjamoreeniin saakka. Radan alusrakennekerrokset ovat vuonna 2011 otetun näytteen perusteella materiaaliltaan soraista hiekkamoreenia. Kuitenkin esimerkiksi ratakilometrillä 445+260 ratapenkereen alla on ollut vielä vuosina 1974–1979 ohuimmillaanikin noin 2 metrin paksuinen turvekerros. Välillä 445+230...445+270 radan stabiliteettia onkin tuolloin pyritty parantamaan rakentamalla radan molemmille puolille 0,6 m paksuiset ja 8 m leveät vastapenkereet. Kairaukset ovat turveosuudella päättyneet tiiviin pohjamoreenin kiviin, joten kallion yläpinnan sijainnista ei tuolla osuudella ole varmuutta.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia sekä kaksi siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.13 osoittamalla tavalla ratakilometrivalille 445+300...445+310. Ratakilometrilukema kasvaa Heinävedelle päin. Tässä kohteessa siirtymäanturien vertailupisteinä käytettyjen referenssitankojen voitaneen olettaa tukeutuneen tiiviiseen pohjamaahan. Kohteessa kuvattiin videokameralla kiskon varteen kiinnitettyä rullamitan palaa sivuojan ulkoluisikan päältä.



Kuva 6.13. Periaatekuva kohteen 3 Varkaus–Heinävesi mittaajajärjestelystä.

Tarkasteltaessa 8.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että ainakaan kyseisenä ajankohtana raiteessa ei ilmennyt raja-arvot ylittäviä virheitä. Mittausosuudella ja sen lähistöllä on havaittu useana keväänä epätasaista routanousua, mikä on joinain vuosina aiheuttanut virhe-rajojen ylityksiä muun muassa kierouden ja korkeuspoikkeamien kohdalla.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 1,1 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinna mitattuna.

6.6 Airaksela–Kurkimäki

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Airaksela–Kurkimäki-rataosalla Pieksämäki–Kontiomäki-ratakilometrillä 442+260. Rataosa on sähköistetty. Mittauksia tehtiin kohteessa aamupäivällä 14.9.2011 ja aamupäivällä 8.2.2012. Kuvassa 6.14 on esitetty yleiskuva kohteesta pohjoiseen kohti Kurkimäen liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää kohti Kurkimäen liikennepaikkaa ja sijaitsee suoralla. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu loppuvuodesta 2010.



Kuva 6.14. Yleiskuva kohteesta pohjoiseen Kurkimäen liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan C₂. Kiskotus on tyyppiä 54 E1 ja betoniratapölkkyt tyyppiä B97-03. Kiskonkiinnityksenä on Vosslohin Skl 14 -kiinnitys, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7]. [101]

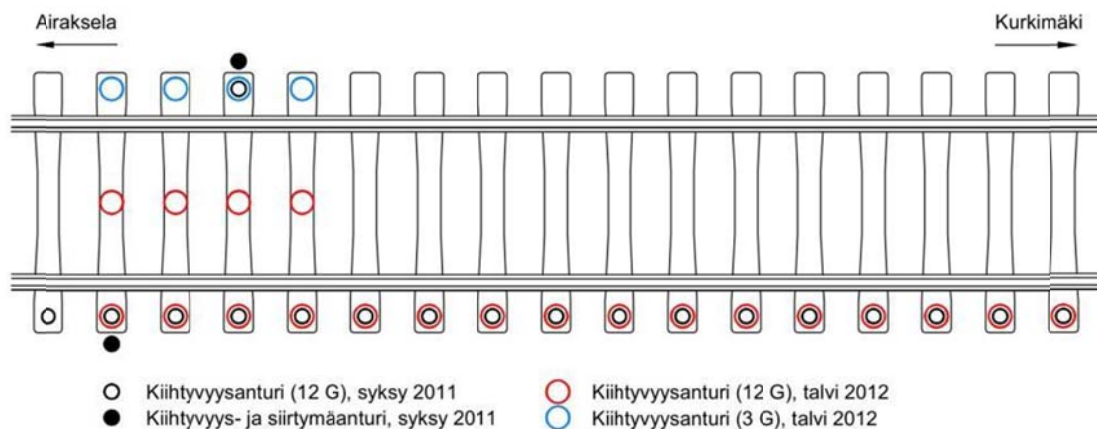
Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittausosuudella on 500 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 700 mm eli rakennekerrospaksuus on yhteensä 1200 mm. Näytteenoton yhteydessä havaittiin lisäksi tukikerroksen ja alusrakenteen välissä 50 mm paksuinen EPS-routalevy.

Poikkileikkaukseltaan mittausosuus sijaitsee penkereellä. Juuri mittausosuuden kohdalta ei ollut saatavissa pohjatutkimustietoja. Mittausosuuden välittömästä läheisyydestä vuonna 2011 otetun näytteen perusteella radan alusrakennekerrosmateriaali on

sorainen hiekka, minkä alapuolinen pohjamaa koostuu silttisestä hiekkamoreenista. Mittausosuuden eteläpuolella eli Airakselan liikennepaikkaa kohti mentäessä pohjamaa on vuonna 1981 tehtyjen maaperätutkimusten mukaan radan rakennekerrosten alapuolella pääosin tiivistä hiekkaa tai hiekkamoreenia ainakin ratakilometrille 441+874 asti. Tosin ratakilometrillä 442+131 on rakennekerrosten alapuolella havaittu myös 0,5 metrin paksuinen löyhä turvekerros. Pääosin kairaukset on tuolloin lopetettu määräsyyvyteen, mutta lähellä mittausosuutta ratakilometrillä 442+292 kairaus on päätynyt tiiviin pohjamaan kiveen tai kallioon suunnilleen tasolla +162.6 radan korkeusviivan sijaitessa suunnilleen tasolla +165.4, jolloin kallionpinta sijaitsee noin 1,3 metrin syvyydellä alusrakennekerrosten alapinnasta.

Mittausosuuden pohjoispuolella eli Kurkimäen liikennepaikkaa kohti mentäessä on edellä mainittujen maaperätutkimusten yhteydessä ratakilometrillä 442+333 havaittu rakennekerrosten alapuolella noin 0,5 metrin paksuinen löyhä turvekerros ja sen alapuolella yli kolmen metrin paksuinen löyhä silttikerros. Kairaus on päätetty määräsyyvyteen silttikerroksen alkaessa muuttua tiiviimmäksi, joten kalliopinnan tasosta ei tuolla kohdalla ole tietoa. Oy VR-Rata Ab:n vuonna 2005 tekemien suunnitelmasiakirjojen mukaan ratakilometrillä 442+380 rakennekerrosten alapuolisen turvekerroksen paksuus on paksuimmillaan yli 1,5 metriä. Turvekerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu ensin löyhäksi siltiksi ja sen alapuolella keskitiiviiksi tai tiiviiksi hiekkamoreeniksi. Kairaukset ovat päättyneet tiiviin pohjamoreenin kiviin tai kallioon keskimäärin 8,6 metrin syvyyteen tasolla +165.0 sijainneesta radan korkeusviivasta. Edellä esiteltyjen pohjatutkimustietojen perusteella voitaneen todeta mittausosuuden sijaitsevan kantavan pohjamaan ja pehmeikköalueen välisellä muutososuudella.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia sekä kaksi siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.15 osoittamalla tavalla ratakilometrivilille 442+259...442+269. Ratakilometrulukema kasvaa Kurkimäen liikennepaikalle päin. Tässä kohteessa siirtymäanturien vertailupisteinä käytettyjen referenssitankojen voidaan olettaa tukeutuneen tiiviiseen pohjamaan. Kohteessa ei käytetty videokamerakuvausta sateisen sään takia.



Kuva 6.15. Periaatekuva kohteen 4 Airaksela–Kurkimäki mittausjärjestelystä.

Kuten kuvasta 6.15 on havaittavissa, tässä kohteessa siirtymäanturit eivät poikkeuksellisesti sijainneet saman ratapölkyn päissä.

Tarkasteltaessa 28.9.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että raiteentarkastuksessa havaittiin suunnilleen ratakilometrillä 442+200...442+230 suurehkoja korkeuspoikkeamia. Korkeuspoikkeamat eivät kuitenkaan ylittäneet virherajoja. Mittausosuudella ja sen lähistöllä on havaittu useana keväänä epätasaista routanousua, mikä on joinain vuosina aiheuttanut virherajojen ylityksiä korkeuspoikkeamien kohdalla.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 0,85 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.7 Kangas–Oulainen

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Kangas–Oulainen-rataosalla Seinäjoki–Oulu-ratakilometrillä 648+200. Rataosa on sähköistetty. Mittauksia tehtiin kohteessa iltapäivällä 14.9.2011 ja 6.2.2012. Kuvassa 6.16 on esitetty yleiskuva kohteesta pohjoiseen kohti Oulaisen liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää kohti Kankaan liikennepaikkaa eli etelään ja sijaitsee suoralla.



Kuva 6.16. Yleiskuva kohteesta Oulaisen liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan D. Kiskotus on tyyppiä 60 E1 ja betoniratapölkkyt tyyppiä B97-03. Kiskonkiinnityksenä käytetään Vosslohin Skl 14 -kiinnitystä, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7]. [101]

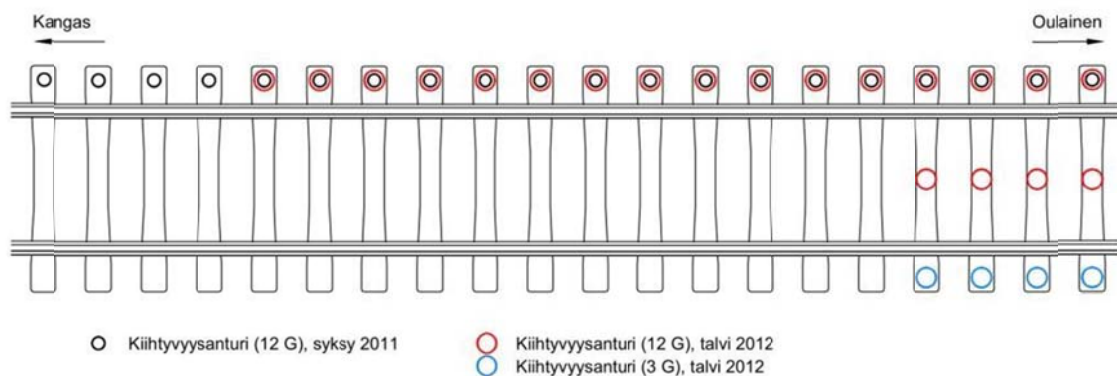
Kohteessa ei tehty maatutkausta, joten tukikerroksen ja alusrakennekerrosten paksuuksista ei ole tarkempaa tietoa. Lisäksi kohde ei kuulunut TTY:n routaseurantakohteisiin, joten roudan syvyydestä talvimittausten aikana ei ole tietoa.

Poikkileikkaukseltaan mittausosuus sijaitsee penkereellä, jonka korkeus ympäröivästä maanpinnasta on noin 2 metriä. Penkereen korkeus pienenee mittausosuuden pohjoispuolella Oulaisia kohti mentäessä. Mittausosuus ja sen ympäristö on pohjamaaltaan kohtuullisen kantavaa. Mittausosuuden eteläpuolella pohjamaa sisältää kuitenkin

kin kantavuudeltaan heikompiakin kerroksia. Vuonna 1980 ratajohtopylväitä varten tehdyissä maaperätutkimuksissa mittausosuuden eteläpuolella ratakilometrillä 648+173 radan rakennekerrosten alapuolella on havaittu 0,2 metrin paksuinen siltti-kerros, jonka alapuolella pohjamaa muuttuu hiekkamoreeniksi. Kyseiset kerrokset ovat kuitenkin olleet melko löyhiä kairausvastuksen oltua alle 20 puolikierrasta/0,2 m. Kairaus on päätetty määräsyvyyteen noin 1,7 metrin syvyydelle rakennekerrosten alapinnasta, joten kalliopinnan sijainnista ei ole tietoa. Vuonna 1979 penger-
tutkimuksen yhteydessä ratapenkereen itäpuolella mittausosuuden kohdalla tehtyjen kairauksen perusteella voidaan todeta pintamaan olevan humusta tai turvetta noin 0,5 metrin paksuudelta. Tämän kerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu pääosin silttiseksi hiekaksi tai silttiseksi hiekkamoreeniksi, jonka kairausvastus vaihtelee huomattavasti. Kyseisissä kerroksissa on paikoin havaittu ohuita vapaapainumaosuuksia. Tämän kantavuudeltaan vaihtelevan kerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu melko nopeasti tiiviiksi hiekkamoreeniksi. Kairaukset on lopetettu lyömällä tiiviin moreenikerroksen yläosaan suunnilleen 2 metrin syvyydelle rakennekerrosten alapinnasta.

Mittausosuuden pohjoispuolella ratakilometrillä 648+293 vuonna 1980 tehdyn kairauksen mukaan pohjamaa muuttuu radan rakennekerrosten alapuolella tiiviiksi hiekkamoreeniksi, johon kairaus on myös päätetty. Vuonna 1979 ratapenkereen itäpuolelle tehtyjen kairauksen mukaan ratakilometrillä 648+320...648+500 pohjamaa ei turpeista pintakerrosta lukuun ottamatta sisällä kantavuudeltaan heikkoja kerroksia lainkaan. Tällä osuudella kairaukset ovat päättyneet tiiviin pohjamoreenikerroksen kiviin noin 1,5 metrin syvyydelle ratapenkereen alapinnasta. Ratapenkereen läpi ratakilometrillä 648+353 tehdyn kairauksen perusteella löyhät pintamaakerrokset on aikanaan kaivettu pois ennen radan rakentamista, sillä niitä ei kyseisessä pisteessä havaittu.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia peräkkäisten ratapölkkyjen päihin kuvan 6.17 osoittamalla tavalla ratakilometrillä 648+196...648+208. Ratakilometrilukema kasvaa Oulaisen liikennepaikalle päin. Kohteessa ei ollut asennettuna referenssitankoja siirtymäantureita varten, koska kohde ei kuulu TTY:n routaseurantakohteisiin. Täten tässä kohteessa käytettiin pelkästään kiihtyvyyssantureita. Kohteessa lisäksi videokuvattiin syksyn mittauksen yhteydessä sekä kiskon varressa ollutta kohdetta että sähköratatolppaa junan ohitusten aikana.



Kuva 6.17. Periaatekuva kohteen 5 Kangas– Oulainen mittausjärjestelystä.

Tarkasteltaessa 12.8.2011 ja 21.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että ainakaan kyseisinä ajankohtina raiteessa ei ilmennyt raja-arvot ylittäviä virheitä. Mittausosuudella ja sen lähistöllä on havaittu virherajojen ylityksiin johtaneita korkeuspoikkeamia ainoastaan epäjatkuvuuskohtien, kuten tasoristeyksen ja sillan, välittömässä läheisyydessä.

6.8 Liminka–Kempele

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Liminka–Kempele-rataosalla Seinäjoki–Oulu-ratakilometrillä 732+527. Rataosa on sähköistetty. Mittauksia tehtiin kohteessa iltapäivällä 15.9.2011 ja aamupäivällä 7.2.2012. Kuvassa 6.18 on esitetty yleiskuva kohteesta etelään kohti Limingan liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus sijaitsee suoralla. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu syksyllä 2008.



Kuva 6.18. Yleiskuva kohteesta etelään Limingan liikennepaikalle päin.

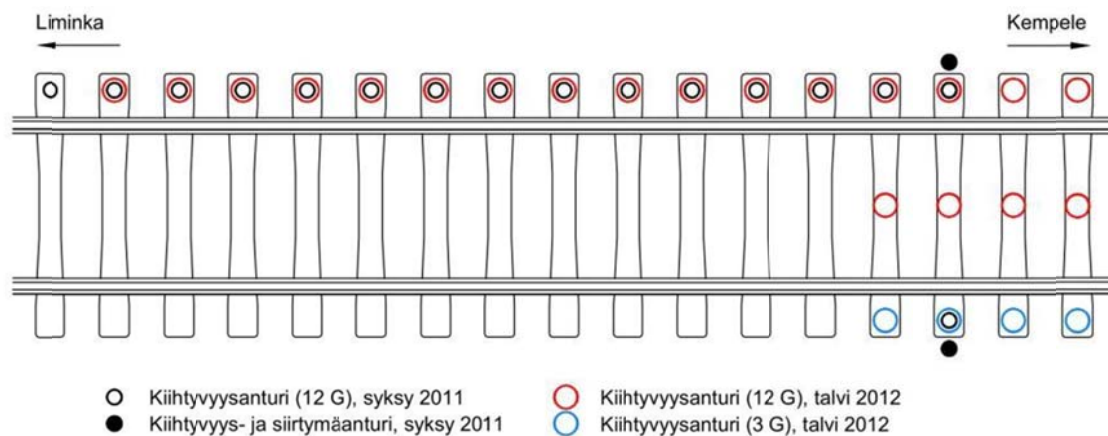
Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan D. Kiskotus on tyyppiä 60 E1 ja betoni-ratapolkyt tyyppiä BP99-01. Kiskonkiinnityksenä käytetään Vosslohin Skl 14 -kiinnitystä, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7]. [101]

Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittausosuudella on 900 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 500 mm eli rakennekerrospaksuus on yhteensä 1400 mm. Näytteenoton yhteydessä havaittiin lisäksi tukikerroksen ja alusrakenteen välissä 50 mm paksuinen EPS-routalevy.

Poikkileikkaukseltaan rata sijaitsee mittausosuudella ja sen ympäristössä korkealla penkereellä. Vuonna 2011 tehdyn näytteenoton perusteella alusrakennekerrokset ovat materiaaliltaan hiekkaa ja pengertäyte materiaaliltaan hiekkaista silttimoreenia. Penkereen korkeus ympäröivästä maanpinnasta esimerkiksi ratakilometrillä 732+496 on noin 3,8 metriä. Pohjamaa pengertäyteen alapuolella sekä mittausosuuden etelä- että pohjoispuolella on hyvin löyhää liejuista silttiä suunnilleen 3–4 metrin paksuudelta. Tähän löyhään kerrokseen painokaira on tunkeutunut painamalla 25–100 kg

kuormituksella. Hyvin löyhän kerroksen alapuolella liejuinen siltti on jonkin verran tiiviimpää. Tähän suunnilleen 3–4 metrin paksuiseen kerrokseen painokaira on tunkeutunut nopeudella <math><15</math> puolikierrasta/0,2 m. Liejuisen silttikerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu silttiseksi hiekaksi, johon painokaira on tunkeutunut nopeudella 20–30 pk/0,2 m. Kalliopinnan sijainnista ei ole täyttä varmuutta, mutta yksittäisen kairauspisteen perusteella tiivis pohjamaoreenin tai kallion yläpinta sijaitsee suunnilleen 15 metrin syvyydellä ratapenkerettä ympäröivästä maanpinnasta. Yhteenvetona voitaneen todeta mittausosuuden sijaitsevan pohjamaaolosuhteiltaan haastavalla pehmeikköalueella. Pohjamaan voitaneen kuitenkin olettaa lujittuneen jonkin verran penkereen alla vuosikymmenten kuluessa.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 18 kiihtyvyyssanturia sekä kaksi siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.19 osoittamalla tavalla ratakilometrivalille 732+518...732+527. Ratakilometrilukema kasvaa Kempelelle päin. Tässä kohteessa kokeiltiin syksyn mittauksissa myös kahden kiihtyvyyssanturin asentamista kiskon jalkaan, mutta mittautulosten analysointi oli hankalaa ja siirtymiä ei saatu luotettavasti selville. Tässä kohteessa siirtymäanturien vertailupisteinä käytetyt referenssitangot eivät todennäköisesti tukeutuneet tiiviiseen maakerrokseen. Kohteessa ei käytetty videokamerakuvausta korkean penkereen asettamien rajoitusten takia.



Kuva 6.19. Periaatekuva kohteen 6 Liminka–Kempele mittausjärjestelystä.

Tarkasteltaessa 12.8.2011 ja 21.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että ainakaan kyseisinä ajankohtina raiteessa ei ilmennyt raja-arvot ylittäviä virheitä. Mittausosuuden lähistöllä ratakilometrillä 732+496 sijaitsevan siltarummun kohdalla havaittiin jonkin verran kohonneita korkeuspoikkeamia. Poikkeamat eivät kuitenkaan ole ylittäneet virherajoja. Mittausosuuden lähistöllä on havaittu useana keväänä epätasaista routanousua, mikä on johtanut virherajojen ylityksiin useiden raiteentarkastusajossa tarkasteltavien suureiden kohdalla.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 1,3 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.9 Kivesjärvi–Paltamo

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Kivesjärvi–Paltamo-rataosalla Oulu–Kontiomäki-ratakilometrillä 898+051. Rataosa on sähköistetty. Mittauksia tehtiin kohteessa aamupäivällä 16.9.2011 ja iltapäivällä 7.2.2012. Kuvassa 6.20 on esitetty yleiskuva kohteesta länteen kohti Kivesjärven liikennepaikkaa. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää itään kohti Paltamon liikennepaikka ja sijaitsee suoralla. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu loppuvuodesta 2010.



Kuva 6.20. Yleiskuva kohteesta länteen Kivesjärven liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan C₁. Kiskotus on tyyppiä 54 E1 ja kohteessa on puiset ratapölkkyt. Kiskonkiinnityksenä käytetään Hey Back -kiinnitystä [7]. [101]

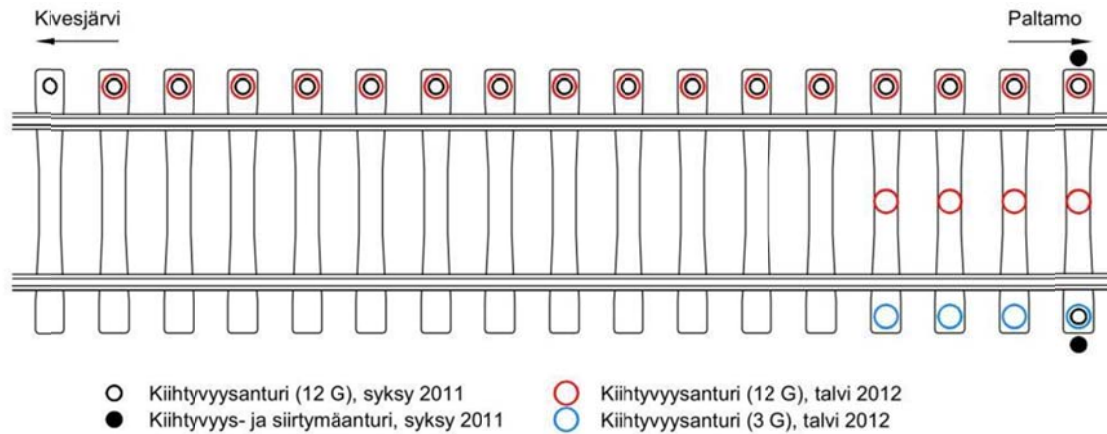
Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittausosuudella on 550 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 1450 mm eli rakennekerrospaksuus on yhteensä 2000 mm.

Poikkileikkaukseltaan rata sijaitsee mittausosuudella ja sen ympäristössä penkereellä. Radan alusrakennekerrokset ovat näytteenoton perusteella hiekkaa.

Kohteesta ei ollut saatavilla mitään pohjatutkimus- tai suunnitteluaineistoa. Geologian tutkimuskeskuksen maaperäkartta-aineiston perusteella pohjamaalaji mittausosuudella on savea. Tarkasteltaessa mittausosuuden ympäristöä, voidaan nähdä saveen säilyvän pohjamaalajina ainakin muutaman sadan metrin etäisyydelle mittausosuudesta radan pituussuunnassa. Pintamaalajit eivät käy kartasta ilmi. Vuonna 2011 tehdyn näytteenoton perusteella pohjamaa alusrakennekerrosten alapuolella on hiekamoreenia. On huomioitava, että maaperäkarttatarkastelu edustaa suuren mittakaavansa myötä melko suurpiirteistä tarkastelua ja sen perusteella ei voida tehdä yksityiskohtaisia johtopäätöksiä mittausosuuden pohjaolosuhteista. Täten näytteenoton perusteella tehtyä tulkintaa on pidettävä tässä luotettavampana.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia sekä kaksi siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.21 osoittamalla tavalla ratakilometriviälille

898+041...898+051. Ratakilometrilukema kasvaa Paltamoon päin. Siirtymäanturien vertailupisteinä käytettyjen referenssitankojen tukeutumisesta ei ole tietoa. Kohteessa kuvattiin videokameralla ratapenkereen vierestä radan pituussuunnassa noin 25 metrin päässä ollutta sähkörataportaalia.



Kuva 6.21. Periaatekuva kohteen 7 Kivesjärvi–Paltamo mittausjärjestelmästä.

Tarkasteltaessa 13.8.2011 ja 3.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että mittausosuuden lähistöllä on esiintynyt jopa virherajat ylittäviä korkeuspoikkeamia. Mittausosuuden lähistöllä, ratakilometrivälillä 898+000...899+000, on havaittu useana keväänä, erityisesti vuonna 2010, epätasaista routanousua, mikä on johtanut virherajojen ylityksiin useiden tarkasteltavien suureiden kohdalla.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 1,4 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.10 Viiala–Mattila

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Viiala–Mattila-rataosalla Riihimäki–Tampere-ratakilometrillä 156+291. Rataosa on sähköistetty. Mittauksia tehtiin kohteessa aamupäivällä 29.9.2011 ja iltapäivällä 29.2.2012 kohteen kaksoisraiteen länsiraiteella. Kuvassa 6.22 on esitetty yleiskuva kohteesta Viialan liikennepaikkaa eli etelää kohti. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää pohjoiseen kohti Mattilan liikennepaikka ja sijaitsee kaarteessa. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu syksyllä 2008.



Kuva 6.22. Yleiskuva kohteesta Viialan liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan D. Kiskotus on tyyppiä 60 E1 ja betoni-ratapolkyt tyyppiä BP89. Kiskon kiinnitysjärjestelmänä on Pandrolin e-clip -kiinnitys [7]. [101]

Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittausosuudella on 650 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 450 mm eli rakennekerrospaksuus on yhteensä 1100 mm. Näytteenoton yhteydessä havaittiin lisäksi alusrakenteen ja pohjamaan välissä 100 mm paksuinen XPS-routalevy. Näytteenoton perusteella radan alusrakennekerrokset ovat materiaaliltaan soraista hiekkamoreenia.

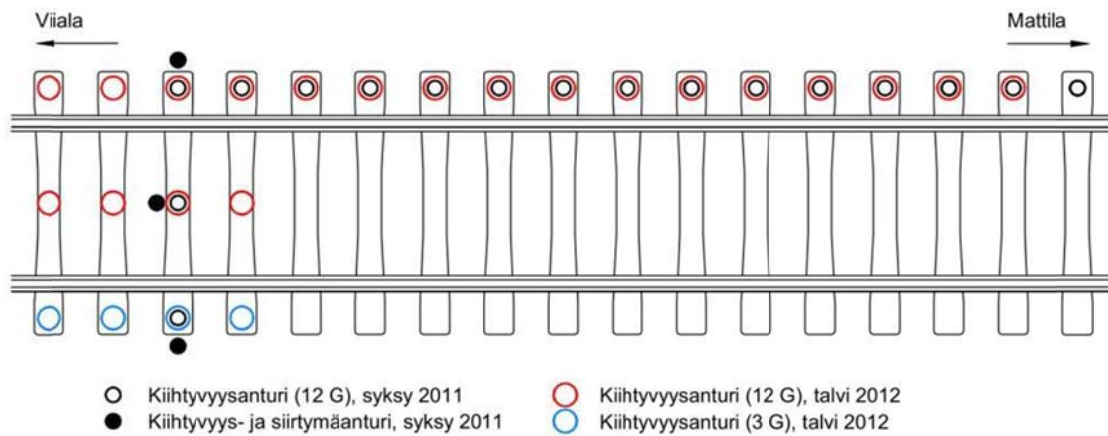
Poikkileikkaukseltaan rata sijaitsee mittausosuuden kohdalla lähes tasamaalla johtuen molemmiin puolin rataa kulkevista sorateistä. Vuonna 1991 suunnitteen nykyisen itäraiteen kohdalla ja sen itäpuolella tehtyjen pohjatutkimusten perusteella mittausosuus sijaitsee hyvin tiiviin pohjamaan alueen ja savipehmeikön muutosalueella. Mittausosuuden eteläpuolella ratakilometrillä 156+150...156+260 pohjaa on maaperätutkimusten mukaan pääosin hyvin tiivistä moreenia tai sora. Näytteenoton perusteella pohjaa alusrakennekerrosten alapuolella koostuu silttisestä hiekkamoreenista. Pohjamaan seassa on maaperätutkimuksissa havaittu myös suurempia kiviä ja lohkareita, jotka on ratakilometriltä 156+190 alkaen pohjoiseen päin mentäessä poistettu tasolle kv-0,8 m ulottuvan massanvaihdon avulla. Ratakilometriltä 156+150 etelään päin mentäessä alkaa savipehmeikköosuus, jonka alueella on käytetty pohjanvahvistusmenetelminä sekä esikuormituspengertä että paalulaattaa.

Pohjaolosuhteita läntisen raiteen eli mittausraiteen alueella voidaan arvioida vuonna 1972 ratajohtopylväiden suunnitelluilla paikoilla tehtyjen maaperätutkimusten perusteella. Rataa on oikaistu kyseisten tutkimusten jälkeen, mutta oikaisun sivusiirtymävaikutus mittausosuuden kohdalla on ollut hyvin vähäinen, enintään muutaman metrin luokkaa. Vuoden 1972 tutkimuksissa ratakilometrillä 156+255 on radan rakennekerrosten alapuolella havaittu noin 2,6 metrin paksuinen hienorakeisista maalajeista koostuva löyhähkö kerros. Tämän kerroksen alapuolella pohjaa muuttuu hyvin löyhäksi saveksi, jonka kerrospaksuus on noin 1,5 metriä. Tähän savikerrokseen paino-

kaira on tunkeutunut painamalla. Savikerroksen alapuolella kairaus on päättynyt tiiviin pohjamoreenin kiveen. Radan itäpuolella hienorakeisten maalajien kerrospaksuus on ollut yhteensä vain noin 0,6 metriä. Ratakilometrillä 156+320 pohjamaa on ollut radan molemmin puolin hyvin samankaltaista. Rakennekerrosten alapuolella on havaittu noin 2,4 metrin paksuinen löyhäkö savikerros. Painokaira on tunkeutunut tähän kerrokseen kiertämällä nopeudella 20–30 pk/0,2 m. Radan itäpuolella kairaus on päättynyt tiiviin pohjamaan kiveen savikerroksen alapuolella. Radan länsipuolella kairaus on päätetty määräsyvyyteen samalle tasolle itäpuolen kanssa, joten tiiviin pohjamaakerroksen yläpinnan tasosta ei radan länsipuolella ole tietoa.

Mittausosuuden pohjoispuolella radan rakennekerrospaksuus kasvaa. Suunnilleen ratakilometrivilillä 156+380...156+450 pohjamaa on löyhää savea, jonka kerrospaksuus on paksuimmillaan yli 5 metriä. Ratakilometriltä 156+500 alkaen pohjamaa muuttuu jälleen hyvin tiiviiksi.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 20 kiihtyvyyssanturia sekä kolme siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.23 osoittamalla tavalla länsiraiteeseen ratakilometrivilille 156+290...156+299. Ratakilometrilukema kasvaa Mattilan liikennepaikalle päin. Tässä kohteessa siirtymäanturien vertailupisteinä käytettyjen referenssitankojen päissä oli poikkeuksellisesti kairakärjet. Referenssitankojen voidaan olettaa tukeutuneen tiiviiseen pohjamaan. Kohteessa kuvattiin videokameralla ratapenkereen viereiseltä huoltotieltä kiskoa ja sähkörataportaalia noin 5 metrin etäisyydeltä.



Kuva 6.23. Periaatekuva kohteen 8 Viiala–Mattila mittausjärjestelystä.

Tarkasteltaessa 26.9.2011 eli lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että mittausosuuden lähistöllä ei ole esiintynyt raja-arvot ylittäviä virheitä tai korkeita tarkistussuureiden arvoja. Mittausosuuden välittömässä läheisyydessä on havaittu useana keväänä epätasaista routanousua, mikä on joinain vuosina johtanut virherajojen ylityksiin.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli routaantunut 0,8 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.11 Suoniemi–Karkku

Mittauskohde sijaitsee liikennepaikkavälillä Suoniemi–Karkku-rataosalla Lielähti–Kokemäki-ratakilometrillä 225+266. Rataosa on sähköistetty ja sille on suunnitteilla perusparannushanke, joka valmistunee vuonna 2015. Mittauksia tehtiin kohteessa iltapäivällä 29.9.2011 ja aamulla 29.2.2012. Kuvassa 6.24 on esitetty yleiskuva kohteesta Suoniemen liikennepaikka eli itää kohti. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää kohti Suoniemen liikennepaikka ja sijaitsee suunnilleen kaarteeseen ja suoran yhtymäkohdassa. Kohteen routaseurantalaitteisto on asennettu syksyllä 2008.

Kuvassa 6.24 on oikealla havaittavissa mittausosuuden välittömässä läheisyydessä sijainnut poistettu tasoristeys. Tasoristeyksen kohdalla sivuoja oli radan pohjoispuolella osittain tukossa ja eteläpuolelle asennetun rumpuputken toimivuudesta ei ole varmuutta. Lisäksi suunnilleen tasoristeyksen kohdalla raiteessa havaittiin hitsi, jonka kohdalta kisko oli kulunut poikkeavasti.



Kuva 6.24. Yleiskuva kohteesta itään Suoniemen liikennepaikalle päin.

Rataosuus kuuluu päällysrakenneluokkaan C₁. Kiskotus on tyyppiä 54 E1 ja betonirata-pölkkyt tyyppiä B75. Kiskon kiinnitysjärjestelmänä on Pandrol e -kiinnitys [7]. [101]

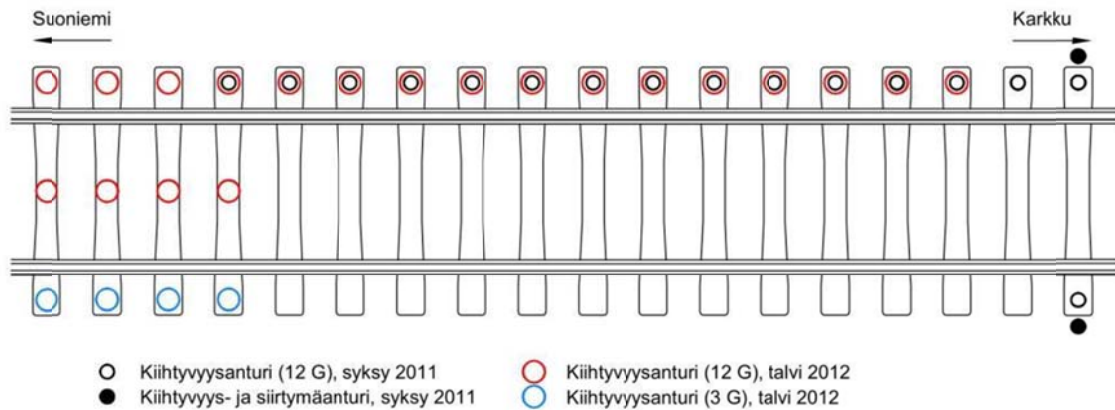
Loppuvuodesta 2011 routatutkimuksen yhteydessä tehdyn näytteenoton perusteella tukikerrospaksuus mittausosuudella on 700 mm ja alusrakennekerrospaksuus noin 450 mm eli rakennekerrospaksuus on yhteensä 1150 mm. Näytteenoton perusteella radan alusrakennekerrokset ovat materiaaliltaan soraista hiekkamoreenia ja rakennekerrosten alapuolinen pohjamaa savea.

Poikkileikkaukseltaan rata sijaitsee mittausosuudella penkereellä. Mittausosuuden eteläisen sivuojan toisella puolella on pelloille johtava tie. Pohjatutkimustietoja ei ollut saatavilla juuri mittausosuuden kohdalta, mutta ratakilometrivilillä 225+000...225+200 saatiin vuosien 1980–1981 pengertutkimuksen maaperätutkimusaineistoa. Sen mukaan radan pengertäytteenä on aikoinaan käytetty silttiä, joka painokairauksissa on osoittautunut löyhäksi. Kyseinen, noin 1,5–2 metrin paksuinen silttiäyte on painokairauksissa sisältänyt myös ohuita vapaapainumaosuuksia. Siltti-

kerroksen alapuolella pohjamaa tiivistyy nopeasti ja kairaukset ovat päättyneet tuon tiiviin pohjamaoreenin kiviin noin 1,5 metrin syvyydelle penkereen alapinnasta. Pohjamaoreenikerroksen yläpinta on sijainnut suunnilleen yhden metrin syvyydellä ympäröivästä maanpinnasta.

Mittausosuuden länsipuolen pohjaolosuhteista ei ole tarkempaa tietoa. Suurpiirteisen maaperäkarttatarkastelun perusteella länsipuoli vaikuttaisi olevan pohjamaaltaan samankaltaista ylempänä esitellyn itäpuolen kanssa. Maatutkauksen yhteydessä huhtikuussa 2011 otetut näytteet tukevat tätä näkemystä.

Kohteessa asennettiin syksyllä 2011 18 kiihtyvyyssanturia sekä kaksi siirtymäanturia ja talvella 2012 24 kiihtyvyyssanturia kuvan 6.25 osoittamalla tavalla ratakilometrivilille 225+256...225+266. Ratakilometrulukema kasvaa länteen Karkun liikennepaikalle päin. Siirtymäanturien vertailupisteinä käytettyjen referenssitankojen tukeutumistilasta ei ole tarkempaa tietoa. Kohteessa kuvattiin videokameralla ratapenkereen pohjoisen puoleiselta pellolta kiskoa ja ratakilometrillä 225+241 sijaitsevaa sähkörata-portaalia noin 10 metrin etäisyydeltä.



Kuva 6.25. Periaatekuva kohteen 9 Suoniemi - Karkku mittausjärjestelystä.

Tarkasteltaessa 18.10.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehdyn raiteentarkastusajon tuloksia, voidaan todeta, että mittausosuuden kohdalla esiintyi virherajat ylittäviä arvoja korkeuspoikkeamien kohdalla. Mittausosuuden välittömässä läheisyydessä on myös useana keväänä havaittu epätasaista routanousua.

Talvimittausten mittaushetkellä helmikuussa 2012 ratarakenne oli roudantunut 1,2 metrin syvyydelle saakka raiteen keskeltä ja ratapölkkyjen yläpinnasta mitattuna.

6.12 Vihanti–Tuomioja

Mittauskohteet sijaitsevat liikennepaikkavälillä Vihanti–Tuomioja-rataosalla Seinäjo–Oulu-ratakilometreillä 687+400 ja 689+700. Rataosa on sähköistetty ja sillä on parhaillaan käynnissä mittava tasonnostohanke. Rataosa kuuluu päällysrakenne- luokkaan D [101]. Mittauksia tehtiin kohteissa iltapäivällä 31.8.2011.

Kuvassa 6.26 on esitetty yleiskuva ratakilometrin 687+400 kohteesta Tuomiojan liikennepaikkaa eli pohjoista kohti. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää pohjoiseen eli Tuomiojan liikennepaikkaa kohti ja sijaitsee suoralla.



Kuva 6.26. Yleiskuva kohteesta 687+400 pohjoiseen Tuomiojan liikennepaikalle päin.

Kohteessa 687+400 kiskotus on tyyppiä 60 E1 [101] ja betoniratapölkkyt tyyppiä BP99-03. Kiskon kiinnitysjärjestelmänä on Vosslohin Skl 14 -kiinnitys, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7].

Poikkileikkaukseltaan kohde 687+400 sijaitsee matalalla penkereellä. Kohteeseen on aikoinaan rakennettu noin 1 metrin paksuiset vastapenkereet molemmin puolin raitetta. Pohjatutkimusaineiston ja referenssitankojen asennuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella rakennekerrospaksuus mittausosuudella on noin 1,5–2 metriä. Rakennekerrosten alapuolella pohjamaa muuttuu hyvin löyhäksi tai löyhäksi turpeeksi. Turvekerroksen paksuus on mittausosuuden lähistöllä pohjatutkimustietojen mukaan 2-3 metriä. Referenssitankojen asennuksen yhteydessä turvekerroksen paksuudeksi arvioitiin noin 2 metriä. Turvekerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu siltiksi tai hiekaksi, joka tiivistyy nopeasti niin, että painokaira tunkeutuu kerrokseen enää lyömällä. Tiiviin pohjamaoreenin yläpinta sijaitsee arviolta 5 metrin syvyydessä korkeusviivasta. Kohteessa referenssitangot löytiin lähes 6 metrin syvyyteen, joten niiden voidaan olettaa tukeutuneen tiiviiseen pohjamaahan. Kyseinen pohjamaakuvas edustaa ainoastaan ratakilometrivaliä 687+380...687+440. Tämän osuuden ulkopuolisesta alueesta ei ollut saatavilla pohjatutkimusaineistoa.

Kuvassa 6.27 on esitetty yleiskuva ratakilometrin 689+700 kohteesta Vihannin liikennepaikkaa eli etelää kohti. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää etelään eli Vihannin liikennepaikkaa kohti ja sijaitsee suoralla.



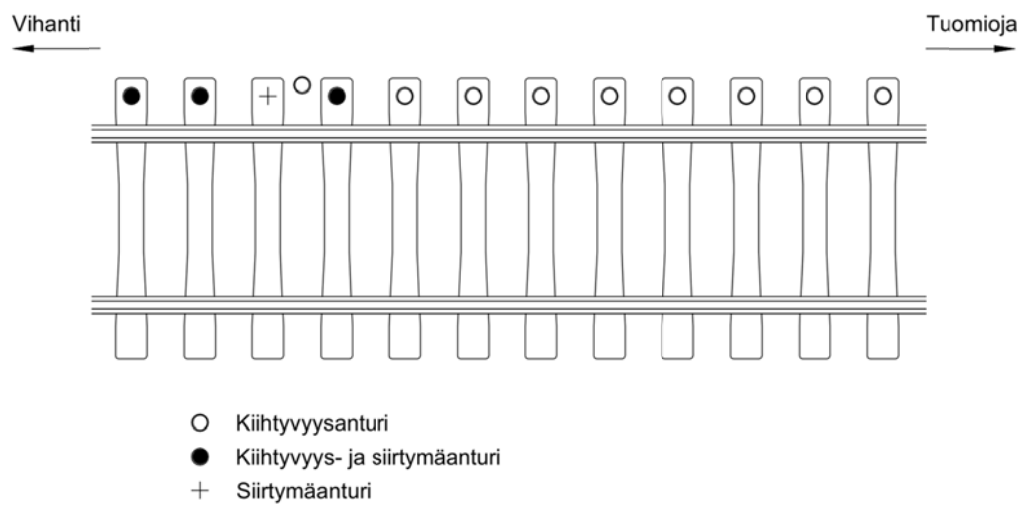
Kuva 6.27. Yleiskuva kohteesta 689+700 etelään Vihannin liikennepaikalle päin.

Kohteessa 689+700 kiskotus on tyyppiä 60 E1 [101] ja betoniratapölkkyt tyyppiä B97-01. Kiskon kiinnitysjärjestelmänä on Vosslohin Skl 14 -kiinnitys, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7].

Poikkileikkaukseltaan kohde 689+700 sijaitsee matalalla penkereellä. Kohteeseen on kohteen 687+400 tavoin rakennettu aikoinaan noin 1 metrin paksuiset ja 6 metriä leveät vastapenkereet molemmin puolin raidetta. Sivuojat sijaitsevat vastapenkereiden ulkopuolella, mutta kohteessa 687+400 ne eivät olleet kovin selkeästi havaittavissa. Pohjatutkimusaineiston ja referenssitankojen asennuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella rakennekerrospaksuus mittausosuudella on noin 1,5 metriä. Rakennekerrosten alapuolella pohjamaa muuttuu hyvin löyhäksi tai löyhäksi turpeeksi. Turvekerroksen paksuus on mittausosuuden lähistöllä pohjatutkimustietojen mukaan noin 1,5 m. Referenssitankojen asennuksen yhteydessä tehdyt havainnot tukevat tätä näkemystä. Turvekerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu hiekaksi tai moreeniksi, joka tiivistyy nopeasti niin, että painokaira tunkeutuu kerrokseen enää lyömällä. Tiiviin pohjamoreenin yläpinta sijaitsee arviolta 3 metrin syvyydessä korkeusviivasta. Kohteessa referenssitangot lyötiin lähes 4 metrin syvyyteen, joten niiden voidaan olettaa tukeutuneen tiiviiseen pohjamoreeniin. Kyseinen pohjamaakuvaus edustaa ainoastaan ratakilometriviäliä 689+680...689+740. Tämän osuuden ulkopuolisesta alueesta ei ollut saatavilla pohjatutkimusaineistoa.

Kohteissa 687+400 ja 689+700 asennettiin 12 kiihtyvyyssanturia sekä neljä siirtymäanturia kuvan 6.28 osoittamalla tavalla ratakilometriviäleille 687+400...687+407 ja 689+700...689+707. Ratakilometrilukema kasvaa Tuomiojan liikennepaikalle päin. Kohteessa 687+400 kiihtyvyyssanturiosuuden molemmissa päissä kaksi reunimmaista anturia olivat mittausalueeltaan 3 G ja loput kiihtyvyyssanturit keskellä alueeltaan 12 G. Kohteessa 689+700 kaikkien käytettyjen kiihtyvyyssantureiden mittausalue oli 12 G. Molemmissa kohteissa kolmannessa ratapölkkyssä etelästä päin, eli kuvasta vasemmalta luettuna, suunniteltu kiihtyvyyssanturi siirrettiin ratapölkyn oikealla puolella olleen referenssitangon päähän tangon mahdollisten siirtymien seuraamiseksi. Kohteessa 689+700 kuvattiin myös videokameralla ratapölkyn päähän ja siirtymä-

anturipalkkiin kiinnitettyjä rullamitan paloja vastapenkereen päältä noin 3 metrin etäisyydeltä.



Kuva 6.28. Periaatekuva kohteiden 10 ja 11 Vihanti–Tuomioja mittausjärjestelyistä.

Tarkasteltaessa 21.10.2011 ja 12.8.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että kummankaan kohteen mittausosuuksien kohdalla ei esiintynyt huomattavia epätasaisuuksia.

6.13 Hirvineva–Liminka

Mittauskohteet sijaitsevat liikennepaikkavälillä Hirvineva–Liminka-rataosalla Seinäjoki–Oulu-ratakilometreillä 718+420 ja 719+300. Mittauksia tehtiin kohteissa iltapäivällä 29.8.2011. Rataosa kuuluu päällysrakenneluokkaan D [101]. Kohteissa kiskotus on tyyppiä 60 E1 [101] ja betoniratapölkkyt tyyppiä BP99-00/01. Kiskon kiinnitysjärjestelmänä on Vosslohin Skl 14 -kiinnitys, jossa on välilevynä tyypillisesti Zw 900 NT [7].

Kuvassa 6.29 on esitetty yleiskuva ratakilometrin 718+420 kohteesta Hirvinevan liikennepaikkaa eli etelää kohti. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää etelään ja sijaitsee suoralla.



Kuva 6.29. Yleiskuva kohteesta 718+420 etelään Hirvinevan liikennepaikalle päin.

Poikkileikkaukseltaan kohde 718+420 sijaitsee ympäröivään maanpintaan verrattuna noin 2 metriä korkealla penkereellä. Kohteeseen on rakennettu aikoinaan vastapenkerreet molemmin puolin raidetta. Pohjatutkimusaineiston ja referenssitankojen asennuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella rakennekerrospaksuus mittausosuudella on noin 2 metriä. Rakennekerrosten alapuolella pohjamaa muuttuu hyvin löyhäksi tai löyhäksi turpeeksi. Turvekerroksen paksuus on mittausosuuden lähistöllä pohjatutkimustietojen mukaan noin 1,5 m. Turvekerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu silttiseksi hiekaksi tai hiekaksi. Referenssitankojen asennuksen yhteydessä turvekerroksen ja löyhän hiekkakerroksen yhteispaksuudeksi arvioitiin noin 4 metriä, mitä myös pohjatutkimushavainnot tukevat. Silttisen hiekkakerroksen alapuolella pohjamaa muuttuu soraksi tai moreeniksi ja tiivistyy nopeasti niin, että painokaira tunkeutuu kerrokseen enää lyömällä. Tiiviin pohjamoreenin yläpinta sijaitsee arviolta 7 metrin syvyydessä korkeusviivasta. Kohteessa referenssitangot lyötiin noin 7,5 ja 8 metrin syvyyksiin, joten niiden voidaan olettaa tukeutuneen tiiviiseen pohjamoreeniin. Kyseinen pohjamaakuvaus edustaa ainoastaan ratakilometrivaliä 718+400...718+500. Tämän osuuden ulkopuolisesta alueesta ei ollut saatavilla pohjatutkimusaineistoa.

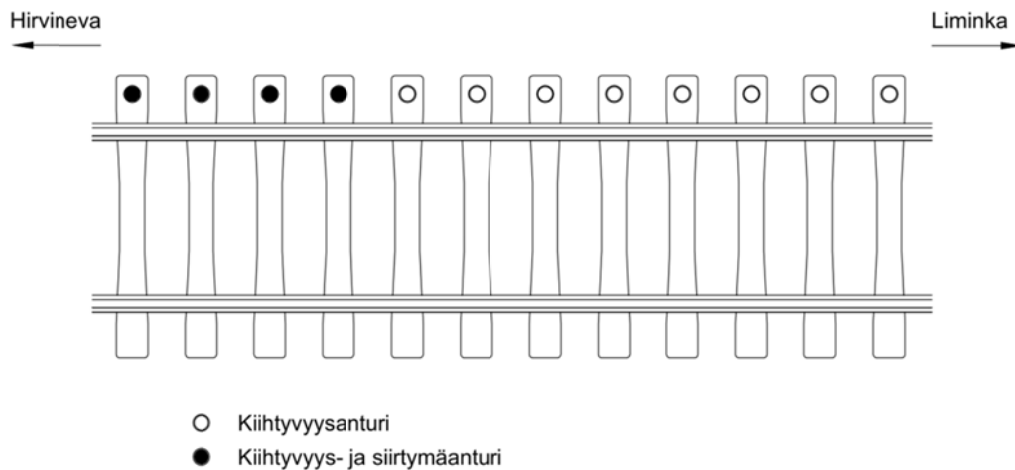
Kuvassa 6.30 on esitetty yleiskuva ratakilometrin 719+300 kohteesta Hirvinevan liikennepaikkaa eli etelää kohti. Raidegeometrialtaan mittausosuus viettää etelään ja sijaitsee suoralla.



Kuva 6.30. Yleiskuva kohteesta 719+300 etelään Hirvinevan liikennepaikalle päin.

Poikkileikkaukseltaan kohde 719+300 sijaitsee ympäröivään maanpintaan verrattuna noin 2 metriä korkealla penkereellä. Pohjatutkimusaineiston ja referenssitankojen asennuksen yhteydessä tehtyjen havaintojen perusteella rakennekerrospaksuudesta ei ole täyttä varmuutta kohteen pohjamaan ollessa kohtuullisen tiivistä hiekkaa tai hiekkamoreenia, jolloin rakennekerroksia oli hankalaa erottaa muista tiiviistä maakerroksista. Rakennekerrosten alapuolella pohjamaassa ei havaittu turvetta, mutta havaittiin myös hieman löyhempiä kerroksia ennen hyvin tiivistä pohjamoreenia. Kohteessa referenssitangot lyötiin noin 4 ja 5 metrin syvyyteen hyvin tiiviiseen kerrokseen, joten tiiviin pohjamoreenin yläpinnan voidaan olettaa sijaitsevan suunnilleen tuolla tasolla. Kallion yläpinnan sijainnista ei ole tietoa. Kyseinen pohjamaakuvaus edustaa ainoastaan ratakilometriviäliä 719+280...719+340. Tämän osuuden ulkopuolisesta alueesta ei ollut saatavilla pohjatutkimusaineistoa.

Kohteissa 718+420 ja 719+300 asennettiin 12 kiihtyvyyssanturia sekä neljä siirtymäanturia kuvan 6.31 osoittamalla tavalla ratakilometriviäleille 718+420...718+427 ja 719+300...719+307. Kaikki kohteessa 718+420 käytetyt kiihtyvyyssanturit olivat mitausalueeltaan 3 G ja kohteessa 719+300 käytetyt kiihtyvyyssanturit 12 G. Näissä kohteissa referenssitankojen liikkeitä ei seurattu kiihtyvyyssantureilla. Kohteessa 719+300 kuvattiin videokameralla ratapölkyn päähän, kiskon varteen ja siirtymäanturipalkkiin kiinnitettyjä rullamitan palasia noin 3 metrin etäisyydeltä.



Kuva 6.31. Periaatekuva kohteiden 12 ja 13 Hirvineva–Liminka mittausjärjestelyistä.

Tarkasteltaessa 21.10.2011 ja 12.8.2011 eli melko lähellä mittausajankohtaa tehtyjen raiteentarkastusajojen tuloksia, voidaan todeta, että kohteiden 718+420 ja 719+300 mittausosuuksien kohdilla ei esiintynyt epätasaisuuksia tai virheitä.

6.14 Koemittauskohteiden ja -järjestelyiden yhteenveto

Koemittauskohteiden ominaisuudet on esitelty tiivistetysti liitteen 2 taulukossa. Taulukosta nähdään, että pohjamaaolosuhteet vaihtelevat huomattavasti eri koemittauskohteiden välillä. Esimerkiksi kohteet 1 Mäntsälä–Sipilä ja 3 Varkaus–Heinävesi sijaitsevat hyvin kantavalla pohjamaalla tai kallioleikkauksessa. Myös kohteen 8 Viiala–Mattila pohjamaa voitaneen olettaa kohtuullisen kantavaksi, mutta tässä kohteessa on huomioitava 100 mm paksuisen XPS-routalevyn vaikutus. Näistä kohteiden 3 ja 8 rakennekerrospaksuudet ovat suunnilleen samat kohteen 1 rakennekerrospaksuuden ollessa edellisiin verrattuna yli kaksinkertainen. Huomionarvoista on kohteen 3 kiskotyypin 54 E1.

Pehmeikkökohteiksi voitaneen varmuudella katsoa kohde 6 Liminka–Kemppele, kohteet 10–11 Vihanti–Tuomioja sekä kohde 12 (718+420) liikennepaikkaväliltä Hirvineva–Liminka.

Erikseen on nostettava esiin kohde 7 Kivesjärvi–Paltamo, joka oli koemittauskohteista ainoa puuratapölkkyraiteellinen kohde. Lisäksi tuossa kohteessa rakennekerrospaksuus on kohtuullisen suuri, suunnilleen 2000 mm.

Samankaltaisuuksien havaitseminen muiden koemittauskohteiden välillä on melko hankalaa. Tosin rakennekerrospaksuus on kohteissa 2, 4, 5 ja 9 suunnilleen sama.

Yleisesti ottaen koemittauskohteiden ominaispiirteiden vertailua hankaloitti joidenkin koemittauskohteiden kohdalla saatavilla olleen aineiston vähäinen määrä tai ajantasaisuus. Lisäksi aineistoa ei aina ollut saatavilla juuri mittausosuudelta vaan sen ympäristöstä. Liitteen 2 taulukon ja luvun 5 avulla pystytään kuitenkin muodostamaan kohtalaisen hyvän yleiskuvan kustakin koemittauskohteesta.

7 Koemittaustulokset

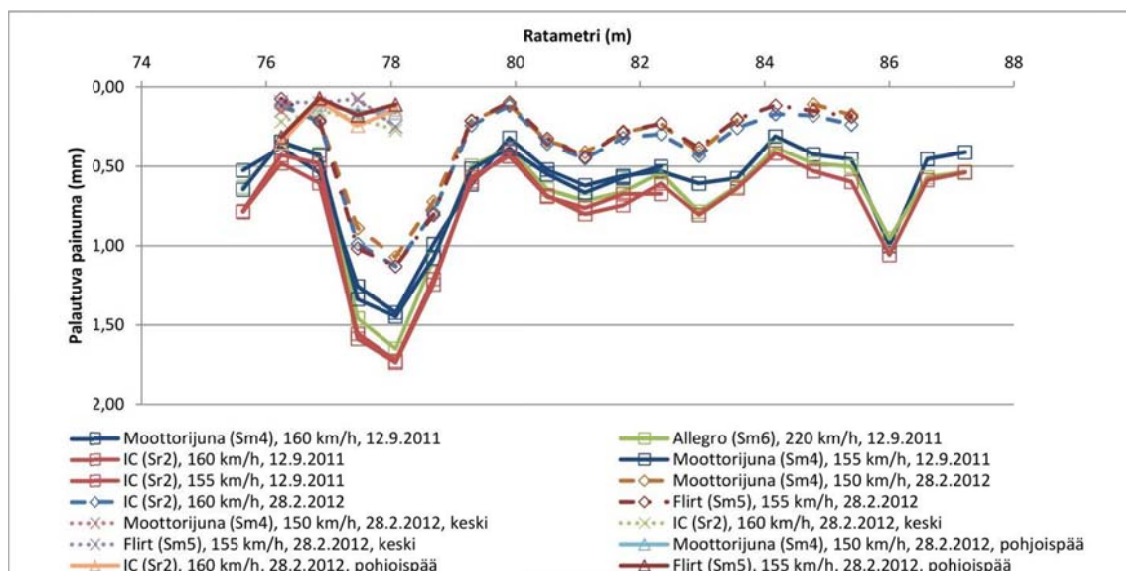
Tässä luvussa esitellään kohteittain koemittauksissa saadut tulokset ja huomioita niihin liittyen. Kokemuksia videokamerakuvauksesta rataympäristössä esitellään lyhyesti luvun lopussa. Jäykkyysarvojen ja ratamoduulien laskemista koemittaustulosten perusteella käsitellään luvussa 8.

Tässä luvussa esiteltyjä tuloskuvia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että kuvissa pystyakselin maksimiarvo vaihtelee kohteittain. Tuloksissa mainittujen kalustotyyppien keskimääräiset akselipainot on esitelty luvussa 8.1.

7.1 Mäntsälä–Sipilä

Kohde esiteltiin luvussa 6.3. Kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia syyskuussa 2011 viiden junan ylityksen aikana ja helmikuussa 2012 yhteensä kahdeksan junan ylityksen aikana. Kohteen kaksoisraiteen eteläisellä raiteella kaikki junat kulkivat kohti Sipilän liikennepaikkaa.

Kuvassa 7.1 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen eteläpäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana ratakilometrivilillä 65+075...65+087 sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutusymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty neljän ratapölkyn osalta myös niiden keskikohtien (pisteviiva, rastisymboli) ja pohjoispäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.

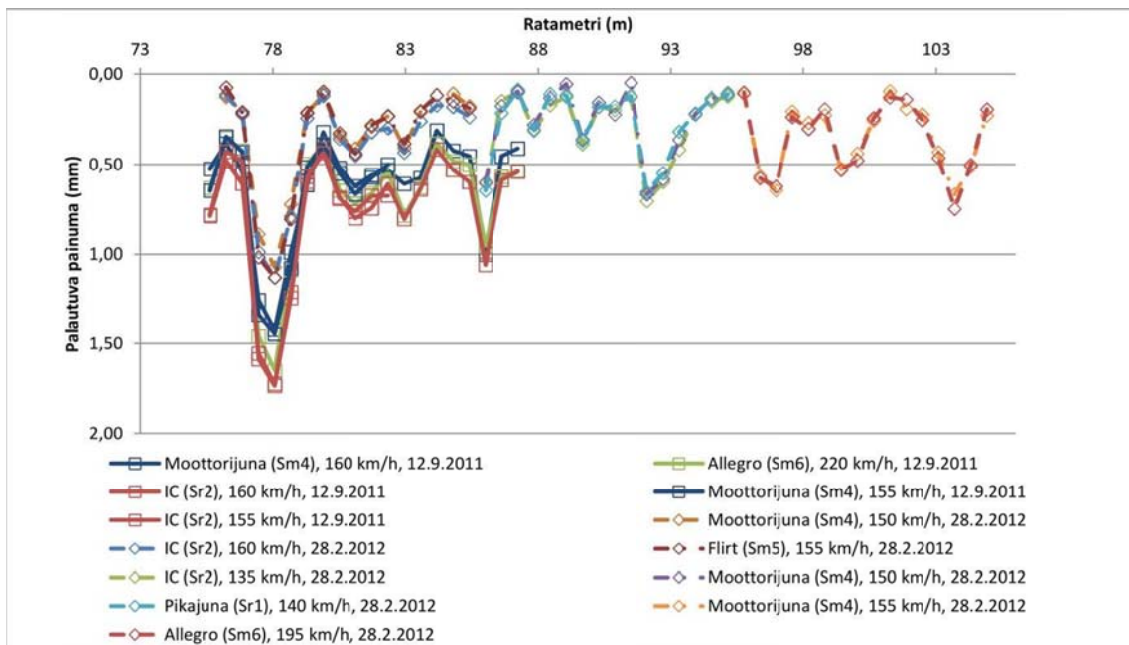


Kuva 7.1. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 1 Mäntsälä–Sipilä ratakilometrivilillä 65+075...65+087.

Kuvasta voidaan nähdä palautuvien painumien olleen sekä syksyllä että talvella hyvin samansuuruisia eri junien välillä InterCity-junien sähkövetureiden aiheuttaessa ras-
kaimpina jonkin verran suuremmat painumat.

Yleisesti ottaen painumat ovat suuruudeltaan melko tasaisia. Tämä ei kuitenkaan päde ratakilometrin 65+078 läheisyydessä sijaitsevien ratapölkkyjen kohdalla, joiden painuma oli jopa kolminkertainen verrattuna pienimpiin painumiin sekä syksyllä että talvella. Tämä painumien huippukohta on saattanut syntyä juuri samassa kohdassa sijaitsevan routaseurantalaitteiston asentamisen seurauksena. Huomionarvoista on, että samaisten ratapölkkyjen pohjoispäiden palautuvat painumat olivat talvimittauksissa huomattavasti pienempiä. Samankaltainen, mutta jonkin verran pienempi, huippukohta on havaittavissa ratakilometrillä 65+086. Tämä pienempi huippukohta poikkeaa edellisestä siinä mielessä, että kyseessä on vain yksittäinen poikkeavasti kuorituksen alaisena käyttäytyvä ratapölkky, kun taas suurempi painumien huippukohta ulottui kolmen peräkkäisen ratapölkkyalueelle.

Kuvassa 7.2 on esitetty ratapölkkyjen eteläpäiden palautuvat painumat 20 peräkkäiselle ratapölkkyille syksyn (yhtenäinen viiva) mittauksien osalta ja 48 peräkkäiselle ratapölkkyille talven (katkoviiva) mittausten osalta. Kuvasta 7.2 havaitaan, että edellä esitellyissä huippukohtissa esiintyy myös talvella poikkeavan suuria palautuvia painumia. Lisäksi havaitaan, että suuruudeltaan ratakilometrin 65+086 huippukohtaa vastaavia, ja useammankin peräkkäisen ratapölkkyä käsittäviä, huippukohtia esiintyy toistuvasti edempänä ratakilometrilukeman kasvusuunnassa.



Kuva 7.2. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kohteessa 1 Mäntsälä–Sipilä ratakilometrivilillä 65+075...65+105.

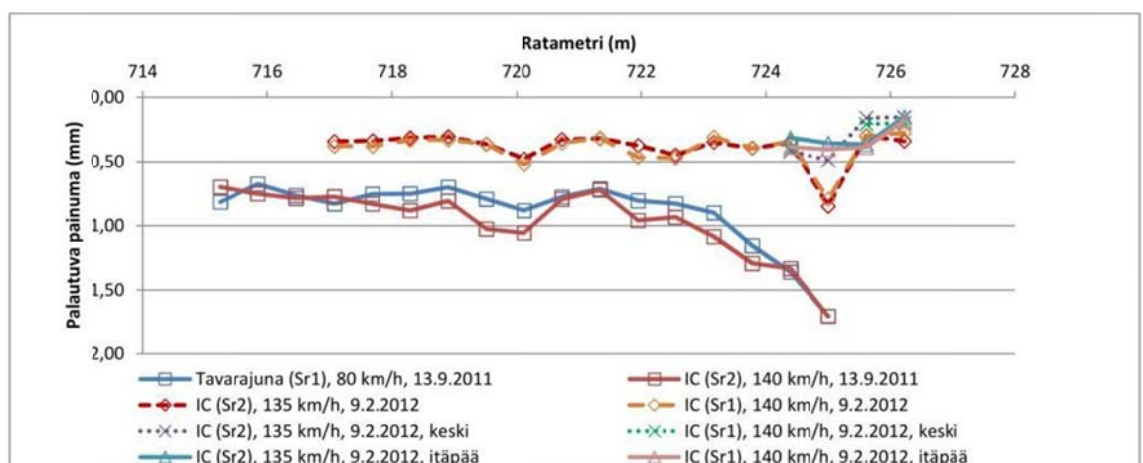
Kaikki kuvassa 7.2 esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen eteläpäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 0,70 mm ja talvella 0,34 mm. Täten syksyn painumat olivat keskimäärin 2,1-kertaisia verrattuna talven painumiin. Tarkasteltaessa Sr2-veturin alta samalta 16 peräkkäistä ratapölkkyä käsittävältä ratakilometrivililtä 65+076...65+085 mitattuja palautuvia painumia, voidaan todeta keskimääräisen palautuvan painuman olevan syksyllä 0,78 mm ja talvella 0,39 mm eli syksyn painumat olivat kaksinkertaisia talven vastaaviin verrattuna.

Yleisesti kuvien 7.1 ja 7.2 painumakuvaajia tarkasteltaessa huomio kiinnittyy useisiin painumien huippukohtiin mittausosuuden varrella. Erään ajatusmallin mukaan talven mittauksissa havaittu kahden peräkkäisen ratapölkyn paikoin jopa viisinkertainen painumaero toisiinsa nähden selittyy näiden ratapölkkyjen erilaatuisilla tukeutumistilanteilla. Tällöin esimerkiksi enemmän painuvan ratapölkyn alapuolinen tyhjätila selittäisi ainakin osan huomattavasta painumaerosta. Pienemmistä painumien huippukohtista saattaa kuormituskertamäärän kasvaessa ja mahdollisten ratapölkkyjen alapuolisten tyhjätilojen aiheuttamien iskukuormien vaikutuksesta kasvaa suuruudeltaan ratametrin +078 suurta huippukohtaa vastaavia.

7.2 Kesälahti–Puhos

Kohde esiteltiin luvussa 6.4. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia sekä syyskuussa 2011 että helmikuussa 2012 kahden junan ylityksen aikana.

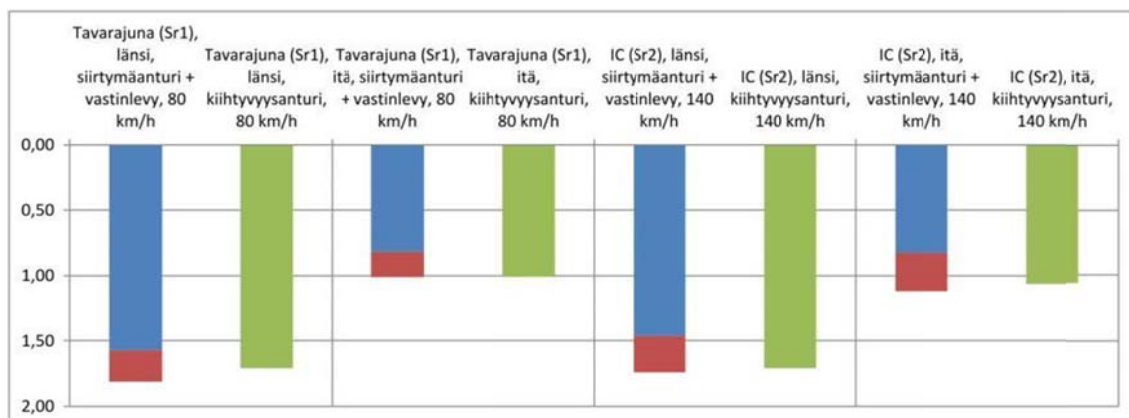
Kuvassa 7.3 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen länsipäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutuosymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty neljän, kuvassa oikeanpuolimaisen, ratapölkyn osalta myös niiden keskikohtien (pisteviiva, rastisymboli) ja itäpäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosisymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa. Kuvasta voidaan nähdä painumien olevan hyvin samansuuruisia eri junien välillä, mikä on seurausta sähkövetureiden lähes samansuuruisista akselipainoista. Syksyllä nopeammalla IC-junalla painumat olivat paikoin hieman suurempia kuin hitaammalla tavarajunalla. Yleisesti ottaen painumat mittausosuudella ovat sekä syksyllä että talvella hyvin tasaisia lukuun ottamatta ratakilometrillä 441+725 havaittavaa huippukohtaa. Tämä painumien huippukohta on saattanut edellisen kohteen tapaan syntyä juuri samassa kohdassa sijaitsevan routaseurantalaitteiston asentamisen seurauksena. Tässäkään kohteessa huippukohta ei ole havaittavissa kyseisen kohdan ratapölkkyjen itäpäiden painumista.



Kuva 7.3. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 2 Kesälahti–Puhos.

Kaikki kuvassa 7.3 esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen länsipäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 0,93 mm ja talvella 0,39 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 2,4-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin.

Kuvassa 7.4 on esitetty niin sanotun instrumentoidun eli referenssitangoilla varustetun ratapölkyn päiden siirtymät. Siirtymäantureilla mitattu painuma on havainnollistettu sinisellä värillä ja kiihtyvyyssantureilla mitattu referenssitangon siirtymä (ks. luku 5.2.2) punaisella värillä. Edellisten avulla yhteenlasketun painuman vieressä on esitetty vihreällä vastaavan ratapölkyn pään kiihtyvyyssanturilla mitattu palautuva painuma.



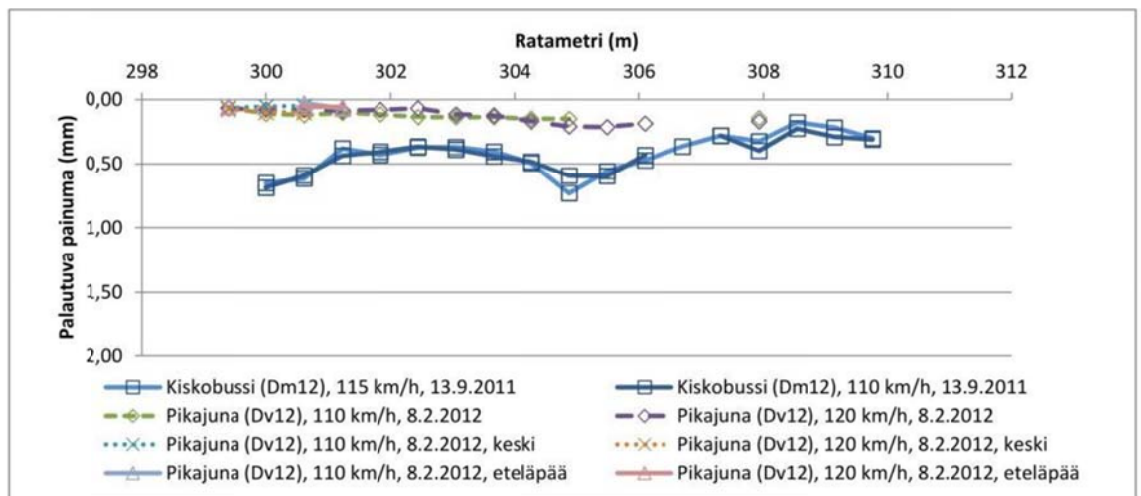
Kuva 7.4. Instrumentoidun ratapölkyn päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 2 Kesälahti–Puhos.

Kuvasta 7.4 nähdään, että siirtymäanturin ja vastinlevyn painumien yhteenlaskettu palautuva painuma vastaa erittäin hyvin kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Instrumentoidun ratapölkyn länsipään painumat ovat huomattavasti itäpään painumia suurempia. Tämä saattaa osittain selittyä myös sillä, että ratapölkyn länsipää sijaitsee sisäkaarteiden puolella, mutta todennäköisemmin routaseurantalaitteiston asennus on ollut suurempien painumien alkutekijä. Huomionarvoista on referenssitankojen suhteellisen suuret siirtymät, keskimäärin noin 0,25 mm, jotka todennäköisesti johtuvat 3 metrin pituisten määrämittaisten referenssitankojen käytöstä. Tangot eivät siis tässä kohteessa ulottuneet tiiviiseen pohjamaakerrokseen saakka.

7.3 Varkaus–Heinävesi

Kohde esiteltiin luvussa 6.5. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia sekä syyskuussa 2011 että helmikuussa 2012 kahden junan ylityksen aikana.

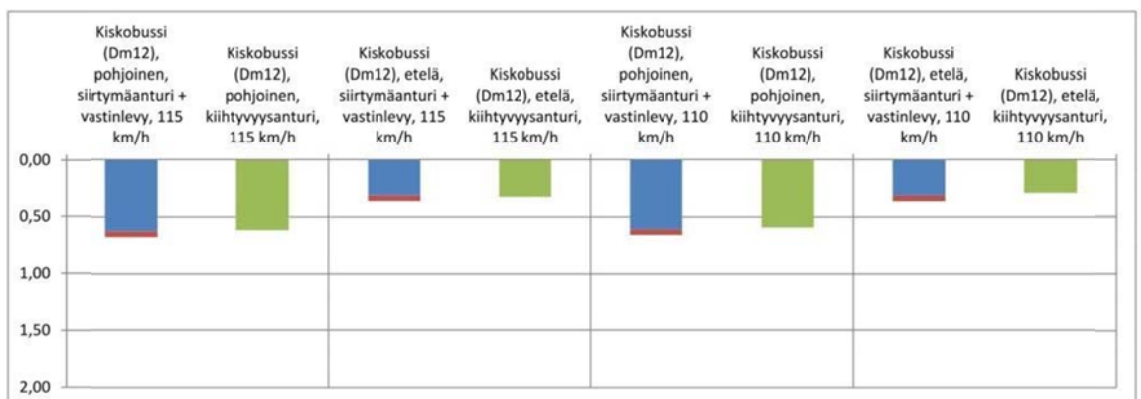
Kuvassa 7.5 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen pohjoispäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutusymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty neljän, kuvassa vasemmanpuolimaisen, ratapölkyn osalta myös niiden keskikohdan (pisteiviiva, rastisymboli) ja eteläpäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.



Kuva 7.5. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 3 Varkaus–Heinävesi.

Kaikki kuvassa 7.5 esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen pohjoispäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 0,43 mm ja talvella 0,13 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 3,3-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin. Tässä kohteessa palautuvat painumat olivat yleisesti ottaen hyvin pieniä, mikä hankaloitti jonkin verran tulosten tulkintaa. Tästä johtuen painumia kaikkien ratapölkkyjen kohdilla ei saatu luotettavasti tulkituksi.

Kuvassa 7.6 on esitetty siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitatut instrumentoidun ratapölkyn päiden siirtymät.



Kuva 7.6. Instrumentoidun ratapölkyn päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 3 Varkaus–Heinävesi.

Kuvasta 7.6 nähdään, että siirtymäanturin ja vastinlevyn painumien yhteenlaskettu palautuva painuma on hyvin lähellä kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Referenssitankojen oletettavasti tukeutuessa tässä kohteessa tiiviiseen pohjamaakerrokseen, ei niiden päihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla pystytty juuri havaitsemaan painumia junan ohituksen aikana. Tästä huolimatta tangot saattavat liikkua hyvin vähän junan ohituksen aikana liikkeen suuruuden ollessa kuitenkin mittaustulosten kannalta mer-

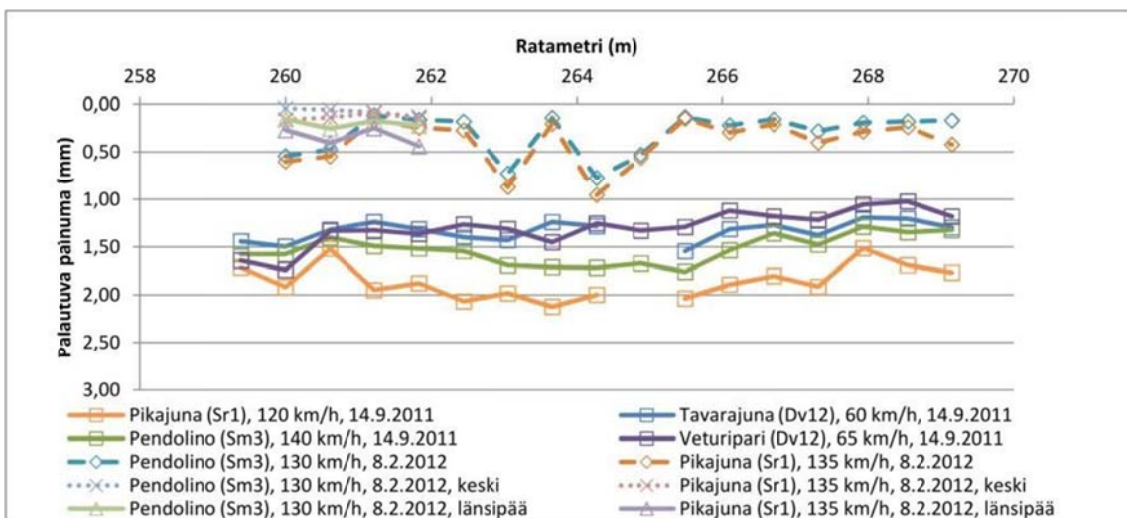
kityksetön. Instrumentoidun ratapölkyn pohjoispään painumat ovat eteläpäätä suurempia.

Hyvin pienet mitatut painumat selittynevät pääosin kohteen sijainnilla kallioleikkauksessa sekä osittain myös kuormituksena käytetystä suhteellisen kevyestä kalustosta. Pienien painumien voidaan nähdä kertovan radan varsin rajallisista jousto-ominaisuuksista dynaamisia kuormituksia vastaan varsinkin talvella. On kuitenkin huomioitava, että koemittauksissa painumat mitattiin ratapölkkyjen päistä, jolloin välilevyn tuoma jousto ja painumaosuus eivät tule huomioiduksi.

7.4 Airaksela–Kurkimäki

Kohde esiteltiin luvussa 6.6. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia syyskuussa 2011 neljän junan ylityksen ja helmikuussa 2012 kahden junan ylityksen aikana.

Kuvassa 7.7 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen itäpäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutusunni). Lisäksi kuvassa on esitetty ratametrivälillä +260...+262 neljän ratapölkyn osalta myös niiden keskikohtien (pisteviiva, rastisymboli) ja länsipäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosisymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.

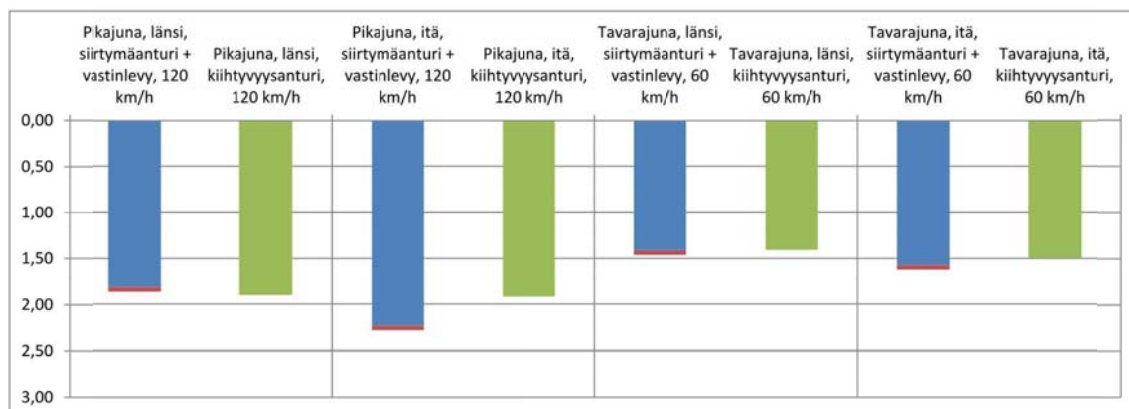


Kuva 7.7. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 4 Airaksela–Kurkimäki.

Kuvasta 7.7 havaitaan palautuvien painumien olleen syksyn mittauksissa hyvin tasaisia raskaimman Sr1-veturin aiheuttaessa suurimmat painumat. Myös talven mittauksissa palautuvat painumat olivat suhteellisen tasaisia lukuun ottamatta kahta huippukohtaa ratametrivälillä +263...+265. Huippukohtat eivät ole havaittavissa syksyn mittaustuloksissa. Kaikki kuvassa esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen itäpäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittaussosuudella olivat syksyllä 1,50 mm ja talvella 0,36 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 4,2-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin. Tässä kohteessa routaseu-

rantalaitteiston asennus ei ole aiheuttanut ainakaan huomattavaa huippukohtaa ratametrille +260.

Kuvassa 7.8 on esitetty siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitatut instrumentoitujen ratapölkkyjen päiden siirtymät. Kuvasta nähdään, että siirtymäanturin ja vastinlevyn painumien yhteenlaskettu palautuva painuma on pääosin hyvin lähellä kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Referenssitankojen päihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla ei juuri havaittu painumia junan ohituksen aikana. Tässä kohteessa referenssitangot eivät sijainneet saman ratapölkyn päissä, vaan kuvan 6.15 mukaisesti.



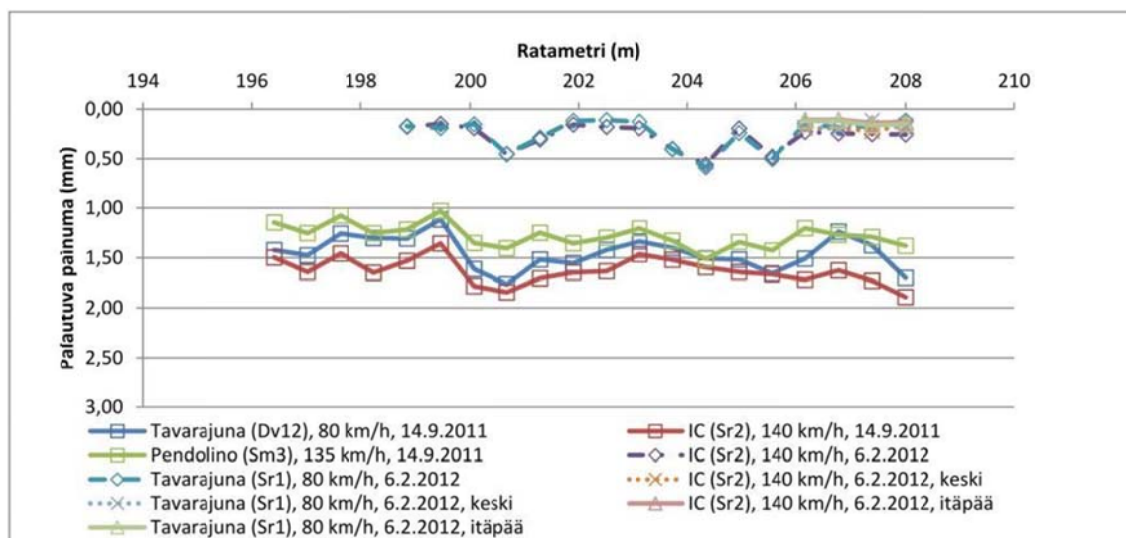
Kuva 7.8. Instrumentoidun ratapölkkyjen päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 4 Airaksela–Kurkimäki.

Tarkasteltaessa talvimittauksissa saatuja painuma, voidaan todeta, että tukikerroksen alapuolinen 50 mm paksuinen EPS-routalevy ei ainakaan tässä kohteessa aiheuttanut huomattavia painumia. Tämän kohteen ja kohteen 3 Varkaus–Heinävesi syksyn mittauksen painumia tarkastelemalla havaitaan hyvin pohjamaan vaikutus palautuvien painumien suuruuteen kohteiden päällysrakenteiden ja alusrakenteiden ollessa suhteellisen samankaltaisia yllä mainittua routalevyä lukuun ottamatta. Tosin ratapölkkyjen tukeutumistilanteesta ei ole kummassakaan kohteessa tarkempaa tietoa, mutta, lukuun ottamatta tämän kohteen ratametrivälin +263...+265 kahta huippukohtaa, talvimittauksen painumien perusteella tukeutumistilanne voitaneen olettaa molemmissa kohteissa vähintään kohtuulliseksi.

7.5 Kangas–Oulainen

Kohde esiteltiin luvussa 6.7. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia syyskuussa 2011 kolmen junan ylityksen ja helmikuussa 2012 kahden junan ylityksen aikana.

Kuvassa 7.9 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen länsipäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutuselementti). Lisäksi kuvassa on esitetty ratametrivälillä +206...+208 neljän ratapölkkyjen osalta myös niiden keskikohdan (pisteviiva, rastiselementti) ja länsipäiden (yhtenäinen viiva, kolmiösymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.



Kuva 7.9. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 5 Kangas–Oulainen.

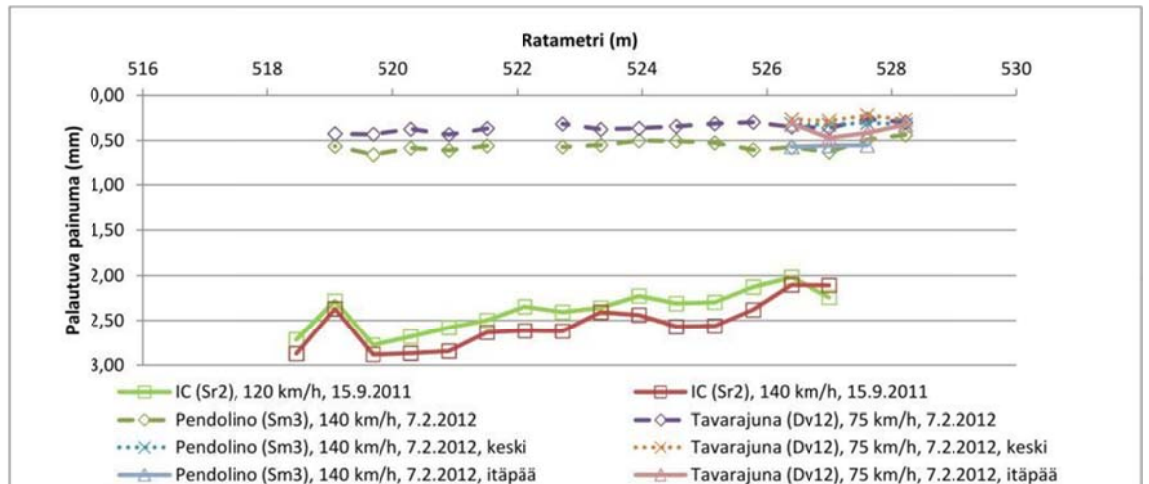
Kuvasta 7.9 havaitaan palautuvien painumien olleen sekä syksyn että talven mittauksissa suhteellisen tasaisia muutamia talvimittauksien pieniä huippukohtia lukuun ottamatta. Kaikki kuvassa esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen länsipäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittaussosuudella olivat syksyllä 1,55 mm ja talvella 0,26 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 6,0-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin. Neljän, ratametrivälillä +206...+208 sijaitsevan, ratapölkyn molempien päiden ja keskikohtien palautuvat painumat olivat suunnilleen samansuuruisia.

Tässä kohteessa huomionarvoista on ratapenkereen routaantumisen erittäin merkittävä vaikutus mitattuihin palautuviin painumiin. Lisäksi talvimittaustuloksissa havaittavat muutamat painumien huippukohdat saattavat indikoida kyseisten ratapölkkyjen heikentyneestä tukeutumistilanteesta.

7.6 Liminka–Kempele

Kohde esiteltiin luvussa 6.8. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia sekä syyskuussa 2011 että helmikuussa 2012 kahden junan ylityksen aikana.

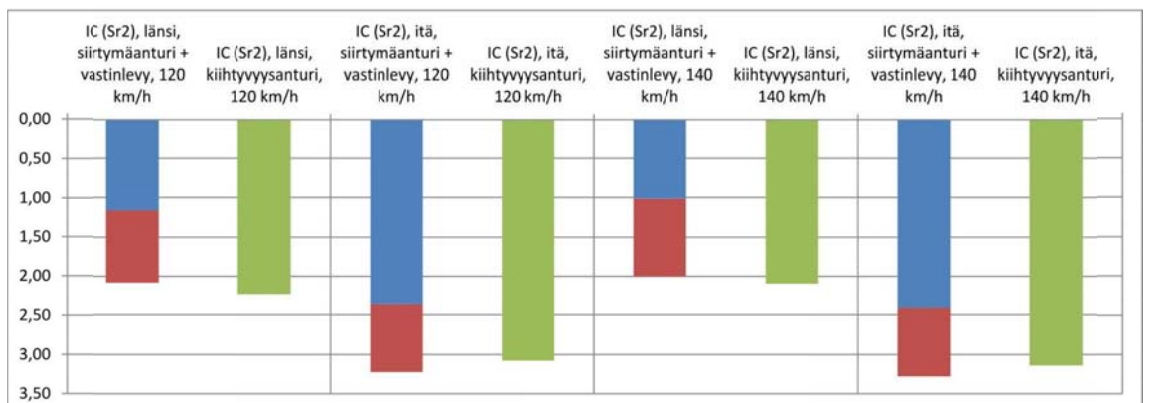
Kuvassa 7.10 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen länsipäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutusymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty ratametrivälillä +526...+529 neljän ratapölkyn osalta myös niiden keskikohdan (pisteviiva, rastisymboli) ja länsipäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosisymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.



Kuva 7.10. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 6 Liminka–Kempele.

Kuvasta 7.10 havaitaan palautuvien painumien olleen syksyn mittauksissa kohtuullisen tasaisia ja talven mittauksissa hyvin tasaisia radan pituussuunnassa. Syksyn mitaustuloksissa on huomionarvoista palautuvien painumien suuruus. Kaikki kuvassa esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen länsipäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 2,47 mm ja talvella 0,46 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 5,4-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin. Tässä kohteessa routaseurantalaitteiston asennus ei ole ainakaan talvimittausten perusteella aiheuttanut huippukohtia ratametrille +527, vaan neljän, ratametrivälillä +526...+529 sijaitsevan, ratapölkyn molempien päiden ja keskikohtien palautuvat painumat olivat suunnilleen samansuuruisia.

Kuvassa 7.11 on esitetty siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitatut instrumentoidun ratapölkyn päiden siirtymät. Kuvasta nähdään, että siirtymäanturin ja vastinlevyn painumien yhteenlaskettu palautuva painuma vastaa hyvin kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Huomionarvoista on referenssitankojen suurehkot siirtymät, jotka ovat keskimäärin noin 0,91 mm. Instrumentoidun ratapölkyn länsi- ja itäpään painumissa oli jonkin verran suuruuseroa.



Kuva 7.11. Instrumentoidun ratapölkyn päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 6 Liminka–Kempele.

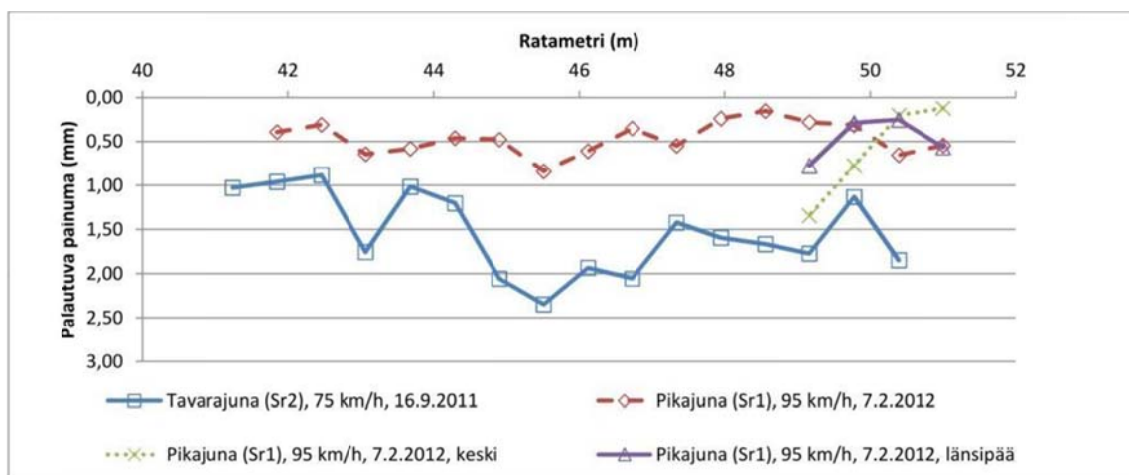
Kohteen 5 Kangas–Oulainen tavoin tässä kohteessa ratapenkereen routaantumisella oli erittäin merkittävä vaikutus mitattuihin palautuviin painumiin. Yleisesti ottaen syksyn mittauksissa palautuvat painumat olivat varsin suuria mittausosuuden sijaitessa pehmeiköllä.

7.7 Kivesjärvi–Paltamo

Kohde esiteltiin luvussa 6.9. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia syyskuussa 2011 kahden junan ja helmikuussa 2012 yhden junan ylityksen aikana.

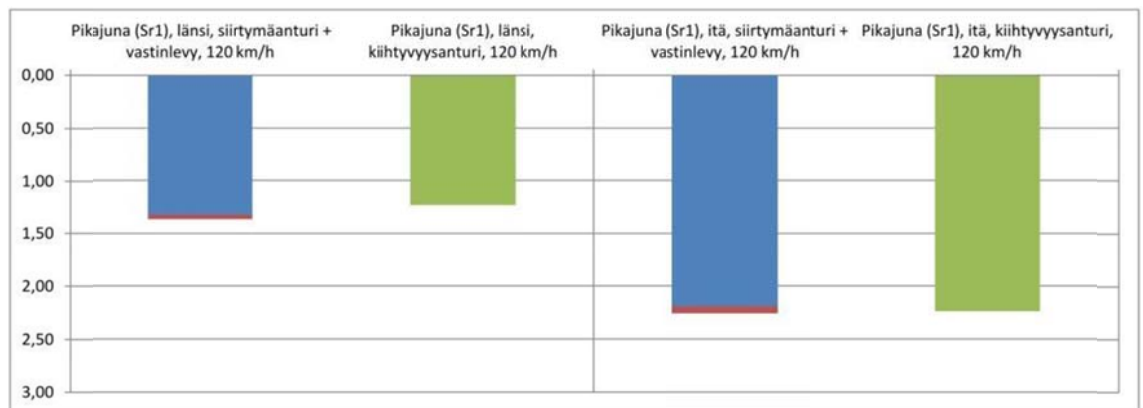
Kuvassa 7.12 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen itäpäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva, ruutusymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty ratametrivälillä +49...+51 neljän ratapölkyn osalta myös niiden keskikohtien (pisteviiva, rasisymboli) ja länsipäiden (yhtenäinen viiva, kolmiossymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.

Kuvasta 7.12 havaitaan palautuvien painumien olleen syksyn mittauksissa melko epätasaisia radan pituussuunnassa, minkä oletetaan johtuvan kohteen puuratapölkkyistä. Talvimittauksien perusteella palautuvat painumat näyttäisivät olevan tässä kohteessa talvella tasaisempia, mutta esimerkiksi ratametrivälillä +49...+51 neljän peräkkäisen ratapölkyn eri päiden ja keskikohtien painumat ovat suhteellisen epätasaisia. Kaikki kuvassa esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen itäpäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 1,54 mm ja talvella 0,46 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 3,4-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin.



Kuva 7.12. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 7 Kivesjärvi–Paltamo.

Kuvassa 7.13 on esitetty siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitatut ratametrimillä +51 sijaitsevan instrumentoidun ratapölkyn päiden siirtymät. Kuvasta nähdään, että siirtymäanturin ja vastinlevyn painumien yhteenlaskettu palautuva painuma vastaa hyvin kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Referenssitankojen päihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla ei juuri havaittu painumia junan ohituksen aikana.



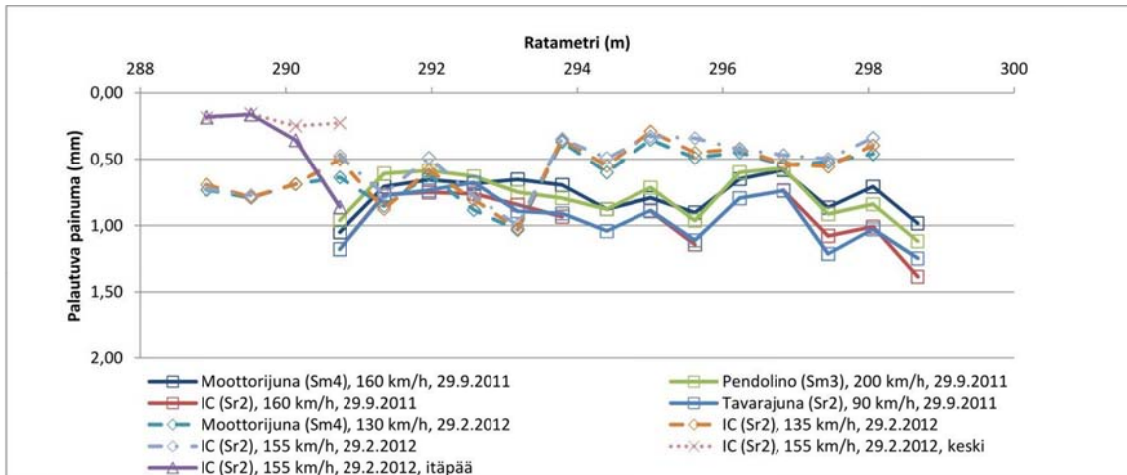
Kuva 7.13. Instrumentoidun ratapölkyn päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 7 Kivesjärvi–Paltamo.

Tässä kohteessa poikkeavaa verrattuna muihin koemittauskohteisiin on puuratapölkkyraide. Sekä syksyn että talven mittaustuloksia tarkasteltaessa vaikuttaisi siltä, että puuratapölkkyt jonkin verran epäsäännöllistävät ratapölkyn päiden painumia. Kuvasta 7.12 on lisäksi havaittavissa, että talvella ratametrivälillä +49...+50 ratapölkkyjen keskikohtien palautuvat painumat olivat vastaavien ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia suurempia. Tämä johtunee tuentatilanteen ja ratapölkky materiaalin yhteisvaikutuksesta.

7.8 Viiala–Mattila

Kohde esiteltiin luvussa 6.10. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia syyskuussa 2011 neljän junan ja helmikuussa 2012 kolmen junan ylityksen aikana. Poikkeuksena edelliseen talvimittauksissa ratametrivälille +289...+291 neljän peräkkäisen ratapölkyn keskelle ja itäpäihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla mitattiin ainoastaan yhden junan ylitys.

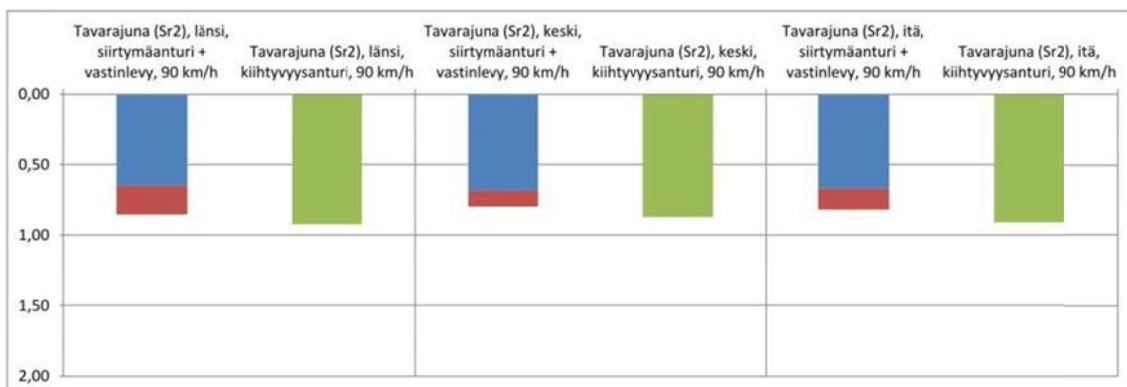
Kuvassa 7.14 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen länsipäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva ja pistekatkoviiva, ruutusymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty ratametrivälillä +289...+291 neljän ratapölkyn osalta myös niiden keskikohtien (pisteviiva, rastisymboli) ja itäpäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosisymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa yhden junan ylityksen aikana.



Kuva 7.14. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 8 Viiala–Mattila.

Kuvasta 7.14 havaitaan palautuvien painumien olleen syksyn mittauksissa kohtuullisen tasaisia radan pituussuunnassa raskaimpien Sr2-vetureiden aiheuttaessa jonkin verran suuremmat painumat kuin kevyempi sähkömoottorikalusto. Talvimittauksissa ratametrivälän +294...+299 palautuvat painumat olivat syksyn painumia tasa isempia, mutta ratametrivälillä +291...+294 mitatut painumat olivat talvella paikoin jopa suurempia kuin syksyllä ja kohtuullisen epätasaisia. Kaikki kuvassa esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen länsipäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 0,90 mm ja talvella 0,59 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 1,5-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin.

Kuvassa 7.15 on esitetty siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitatut ratametrillä +291 sijaitsevan instrumentoidun ratapölkyn päiden ja keskikohtien siirtymät yhden junan ylityksen aikana. Kuvasta nähdään, että siirtymäanturien ja vastinlevyjen painumien yhteenlaskettu palautuva painuma vastaa kohtuullisen hyvin kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Referenssitankojen päihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla havaittiin keskimäärin 0,14 mm siirtymät junan ohituksen aikana. Instrumentoidun ratapölkyn länsi- ja itäpäiden sekä keskikohtien painumat olivat lähes samansuuruisia.



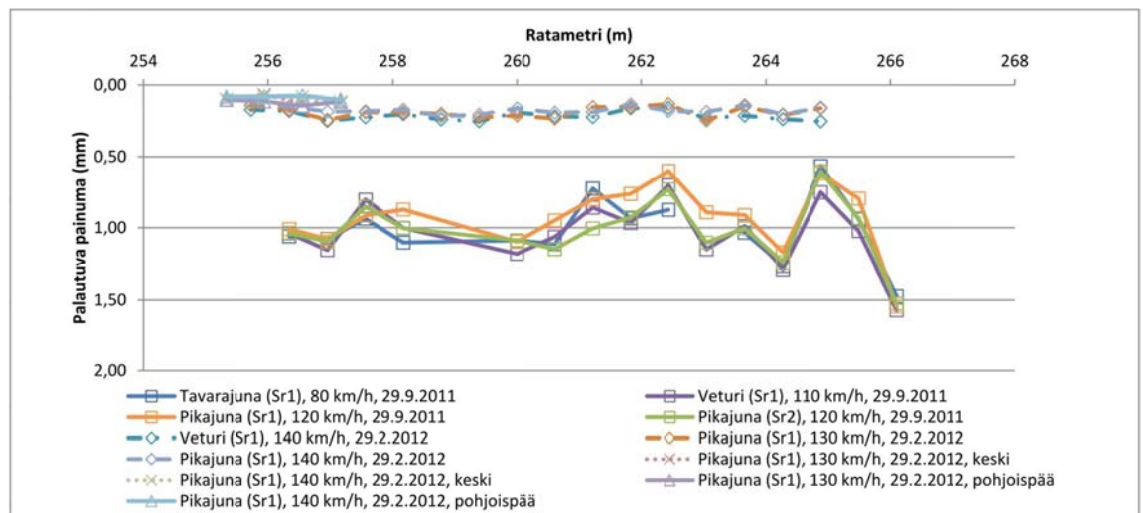
Kuva 7.15. Instrumentoidun ratapölkyn päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 8 Viiala–Mattila.

Tämä kohde oli ainoa koemittauskohde, jossa havaittiin talvimittauksissa suurempia palautuvia painumia kuin syksyllä. Tämä saattaa selittyä ratametrivälin +290...+294 routimisella raiteen keskeltä, jolloin ratapölkkyjen päiden alueella tuenta heikkenee ja palautuvat painumat kasvavat routanousun kasvaessa. Tätä näkökulmaa puoltavat talvella ratapölkkyjen keskeltä mitatut painumat, jotka ovat hyvin pieniä ja samanlaisesti esimerkiksi kuvassa 7.14 vasemmalta lukien neljännen ratapölkyn itäpäästä mitattu lähes syksyn painumien suuruinen painuma.

7.9 Suoniemi–Karkku

Kohde esiteltiin luvussa 6.11. Tässä kohteessa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia syyskuussa 2011 neljän junan ja helmikuussa 2012 kolmen junan ylityksen aikana.

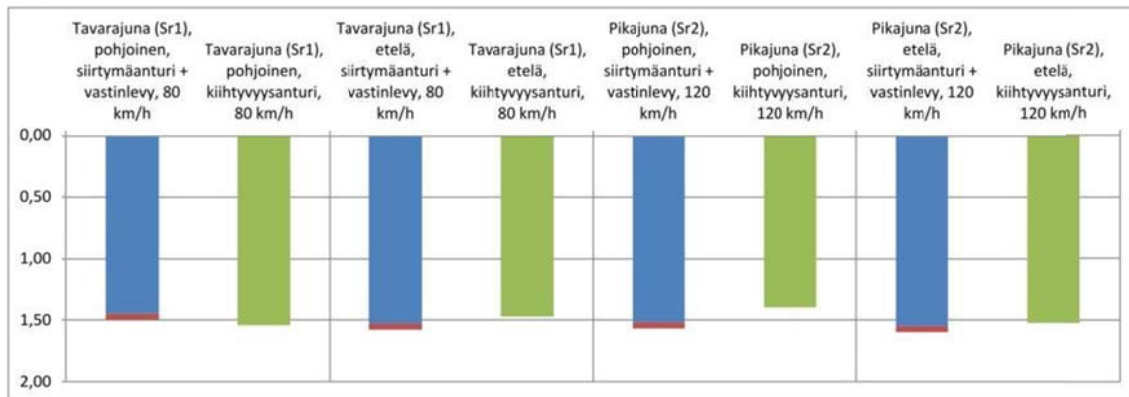
Kuvassa 7.16 on esitetty kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen eteläpäiden palautuvat painumat mitattujen junien ylitysten aikana sekä syksyllä (yhtenäinen viiva, neliösymboli) että talvella (katkoviiva ja pistekatkoviiva, ruutusymboli). Lisäksi kuvassa on esitetty ratametrivälillä +255...+257 neljän ratapölkyn osalta myös niiden keskikohtien (pisteviiva, rastisymboli) ja pohjoispäiden (yhtenäinen viiva, kolmiosymboli) palautuvat painumat talvimittauksissa.



Kuva 7.16. Kiihtyvyyssantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden ja keskikohtien palautuvat painumat kohteessa 9 Suoniemi–Karkku.

Kuvasta 7.16 havaitaan palautuvien painumien olleen syksyn mittauksissa kohtuullisen tasaisia radan pituussuunnassa. Suurimmillaan painumat olivat syksyn mittauksissa suunnilleen ratametrillä +266 sijaitsevan instrumentoidun ratapölkyn kohdalla. Instrumentoidun ratapölkyn tuentatilanne on saattanut jonkin verran heiketä routaseurantalaitteiston asennuksen yhteydessä. Talvimittauksissa kaikki mitatut palautuvat painumat olivat radan pituussuunnassa hyvin tasaisia ja suuruudeltaan pieniä. Kaikki kuvassa 7.16 esitellyt tulokset ja mitatut junat huomioiden ratapölkkyjen eteläpäiden keskimääräiset palautuvat painumat mittausosuudella olivat syksyllä 1,00 mm ja talvella 0,19 mm. Täten syksyn palautuvat painumat olivat keskimäärin 5,3-kertaisia verrattuna talven palautuviin painumiin eli ratapenkereen routaantumisella oli tässä kohteessa erittäin merkittävä vaikutus palautuviin painumiin.

Kuvassa 7.17 on esitetty siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitatut ratametrillä +266 sijaitsevan instrumentoidun ratapölkyn päiden siirtymät kahden junan ylityksen aikana. Kuvasta nähdään, että siirtymäanturien ja vastinlevyjen painumien yhteenlaskettu palautuva painuma vastaa kohtuullisen hyvin kiihtyvyyssantureilla mitattuja arvoja. Referenssitankojen päihin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla ei havaittu mainittavia siirtymiä junan ohituksen aikana. Instrumentoidun ratapölkyn pohjois- ja eteläpäiden painumat olivat lähes samansuuruisia.

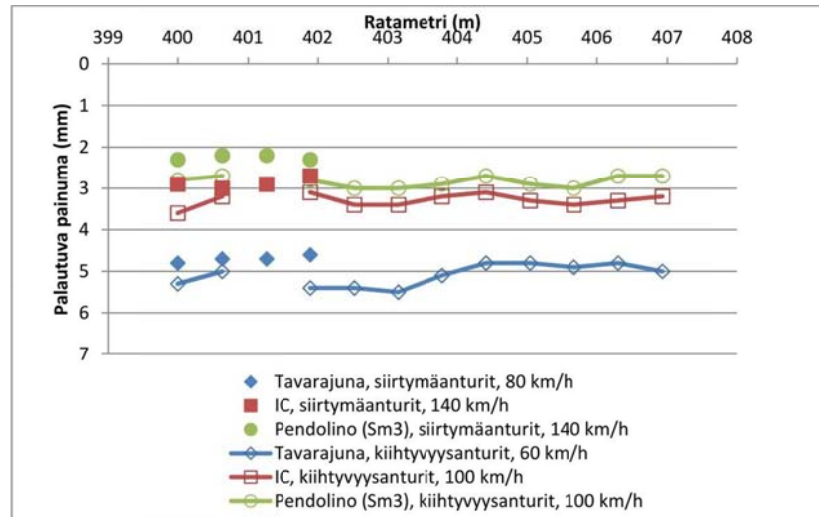


Kuva 7.17. Instrumentoidun ratapölkyn päiden palautuva painuma siirtymäantureilla ja kiihtyvyyssantureilla mitattuna syyskuussa 2011 kohteessa 9 Suoniemi–Karkku.

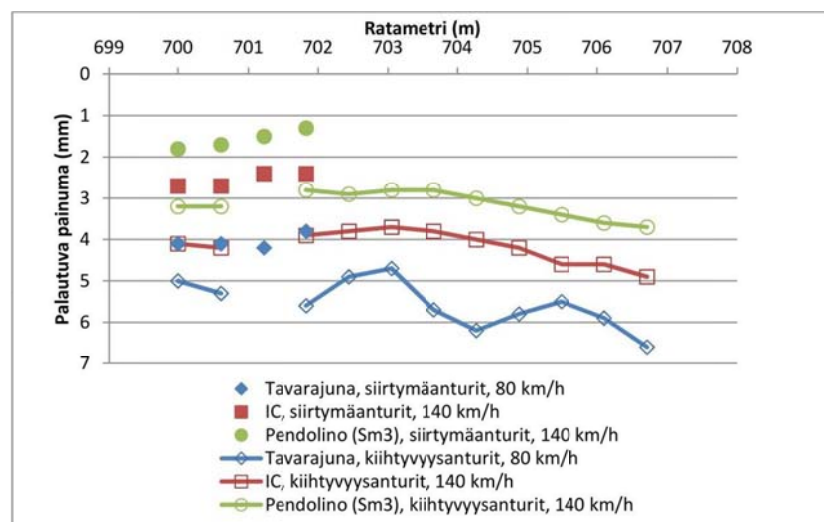
7.10 Vihanti–Tuomioja

Kohteet esiteltiin luvussa 6.12. Näissä kohteissa mitattiin ratapölkkyjen länsipäiden palautuvia painumia elokuussa 2011.

Kuvissa 7.18 ja 7.19 on esitetty vastaavassa järjestyksessä kohteiden 687+400 ja 689+700 ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kolmen erilaisen junatyyppin osalta. Tuloksiksi kuvissa on valittu suurimman dynaamisen liikkeen aiheuttaman telin palautuva painuma. Tavarajunalla suurimman painuman aiheuttivat raskaat täyteen kuormatut tavaravaunut ja IC-junalla Sr2-veturin teli. Pendolinolla kaikkien teliin aiheuttama palautuva painuma oli käytännössä samansuuruisen. Mitatut junat olivat molemmissa kohteissa samat.



Kuva 7.18. Kiihtyvyyssantureilla ja siirtymäantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kohteessa 10 Vihanti–Tuomioja ratakilometrillä 687+400.



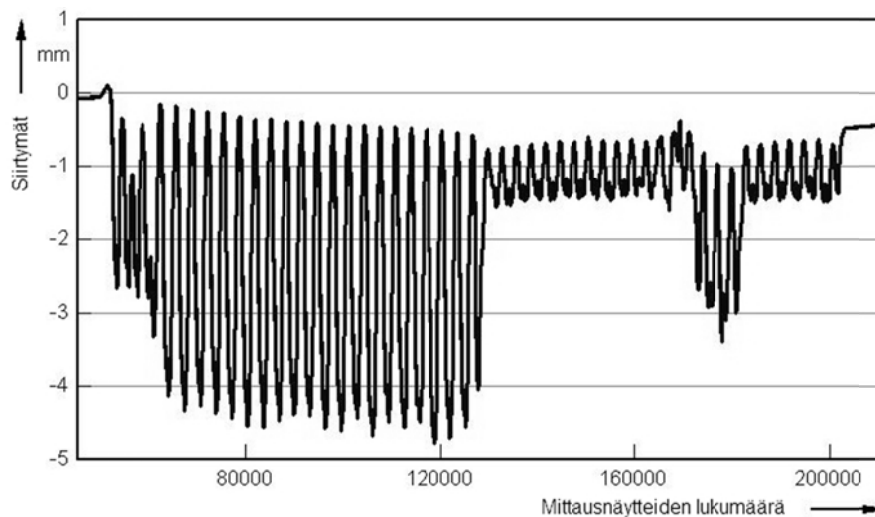
Kuva 7.19. Kiihtyvyyssantureilla ja siirtymäantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kohteessa 11 Vihanti–Tuomioja ratakilometrillä 689+700.

Kuvista 7.18 ja 7.19 havaitaan palautuvien painumien olleen molemmissa kohteissa suuruusluokaltaan varsin suuria. Osin tämänkaltainen tulos oli odotettavissa molempien kohteiden sijaitessa 1,5...2,0 metrin paksuisella turvepehmeiköllä. Molemmissa kohteissa on havaittavissa ero siirtymäanturien ja kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksissa. Kohteessa 689+700 tämä ero on hyvin selkeä. Mittaustulosten ero johtuu siirtymäanturimittauksessa referenssipisteinä käytettyjen kairatankojen siirtymistä, jolloin kiihtyvyyssanturit mittaavat suurempia painumia kuin siirtymäanturit. Molemmissa kohteissa toisen kairatangon päähän asennettiin kiihtyvyyssanturi tangon siirtymien seuraamiseksi ja havaittiin, että kiihtyvyyssanturin mittaama tangon siirtymä oli yhtenevä siirtymäanturi- ja kiihtyvyyssanturimittaustulosten eron kanssa. Näissä kohteissa kiihtyvyyssanturimittauksen tuloksia voidaan pitää siten luotettavampina kuin siirtymäanturien mittaustuloksia. Kohteen 689+700 huomattavasti selkeämpi ero tuloksissa verrattuna kohteeseen 687+400 johtunee siitä, että ensin mainitussa kohteessa rakennekerrosten läpäiseminen kairatangoilla oli hyvin hankalaa ja tangot jäi-

vät selkeästi vinoon. Kohteessa 687+400 kairatankojen asentaminen onnistui huomattavasti paremmin ja suurempaan.

Molemmissa kohteissa kevyin Pendolino (Sm3) aiheutti pienimmät palautuvat painumat, jotka olivat kiihtyvyyssantureilla mitattuna kohteessa 687+400 keskimäärin 2,84 mm ja kohteessa 689+700 keskimäärin 3,15 mm. Kuvista 7.18 ja 7.19 havaitaan tavarajunan aiheuttaneen huomattavasti Sr2-veturia suuremmat palautuvat painumat, vaikka tavarajunan raskaasti kuormattujen vaunujen ja IC-junan Sr2-veturin akselipainot olivat lähes samansuuruiset. Sr2-veturin aiheuttamat palautuvat painumat olivat kiihtyvyyssantureilla mitattuna kohteessa 687+400 keskimäärin 3,29 mm ja kohteessa 689+700 keskimäärin 4,16 mm, kun taas tavarajunan aiheuttamat suurimmat palautuvat painumat olivat kiihtyvyyssantureilla mitattuna kohteessa 687+400 keskimäärin 5,09 mm ja kohteessa 689+700 keskimäärin 5,56 mm.

Painumien suuruuseroa selittää niiden poimiminen suurimman palautuvan painuman kohdalta. Kuvassa 7.20 on esitetty siirtymäantureilla mitatut palautuvat painumat tavarajunan ylityksen aikana kohteessa 687+400. Kuvan tulokset on otettu tavarajunan ylityksen aikana siirtymäantureilla mitattujen ratapölkyn liikkeiden mediaanina. Mediaanin laskemista varten neljän peräkkäisen ratapölkyn siirtymäsignaalit kohdistettiin mittausaikaan muuttamalla samanhetkiseksi tapahtumiksi. Ilman tätä vaihesiirtoa aika-siirtymäkuvassa eri ratapölkkyjen liikkeet tapahtuvat luonnollisesti junan liikkeestä johtuen eriaikaisesti. Aika-akselilla lukuarvo tarkoittaa mittausnäytteen lukumäärää eli 10 000 näytettä tarkoittaa 2 sekuntia ajassa. Painumien suuruutta tarkasteltaessa on huomioitava, että kuvan 7.20 siirtymäanturitulosissa ei ole huomioitu kairatankojen siirtymien osuutta.



Kuva 7.20. Kohteessa 10 Vihanti–Tuomioja ratakilometrillä 687+400 siirtymäantureilla mitattu tavarajunan aiheuttama ratapölkkyjen pystysuuntaisen siirtymän mediaani.

Kuvasta 7.20 havaitaan, että kuvassa vasemmalla näkyvät Sr1-veturin neljä teliä aiheuttavat huomattavasti pienemmät painumat kuin veturia seuraavien tavaravaunujen telit. Kohteissa 10–13 oli toisen tutkimusprojektin kautta käytettävissä tietoa kuormituksen toimineiden junien tarkoista akselipainoista ja kalustotyypeistä, joiden perusteella voidaan arvioida veturin ja vaunujen aiheuttamien painumien erojen syitä. Pääosin painumaero johtuu tämän junan kohdalla akselipainoiltaan 10 % tarkkuudel-

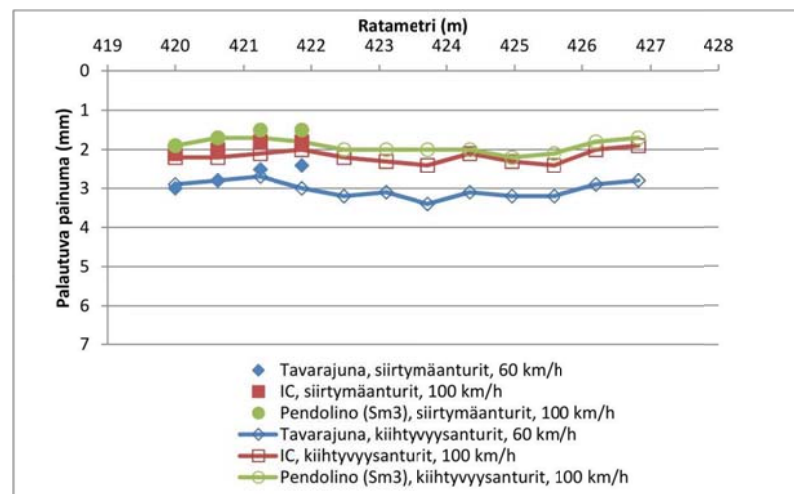
la samansuuruisten Sr1-veturin telien ja tavarajunassa olleiden VTad-vaunujen telien erisuuruista akseliväleistä. Sr1-veturin telien akseliväli on 2700 mm ja VTad-vaunun 1850 mm, minkä vaikutuksesta vaunun telin akseleiden kuormitusvaikutus on keskityneempi ja pistemäisempi aiheuttaen suuremman palautuvan painuman. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Sr2-veturin telin akseliväli on 2800 mm eli vajaat 4 % suurempi kuin Sr1-veturilla.

Junan pituudella ja telien akselivälillä näyttäisi siis olevan merkittäväkin vaikutus palautuvan painuman mittaustulokseen ainakin kyseisissä pohjamaolosuhteissa (vrt. luku 3.2.2). Kantavammilla pohjamailla ja talvella ratarakenteen routaannuttua telien akselivälin vaikutus on luultavasti vähäisempi.

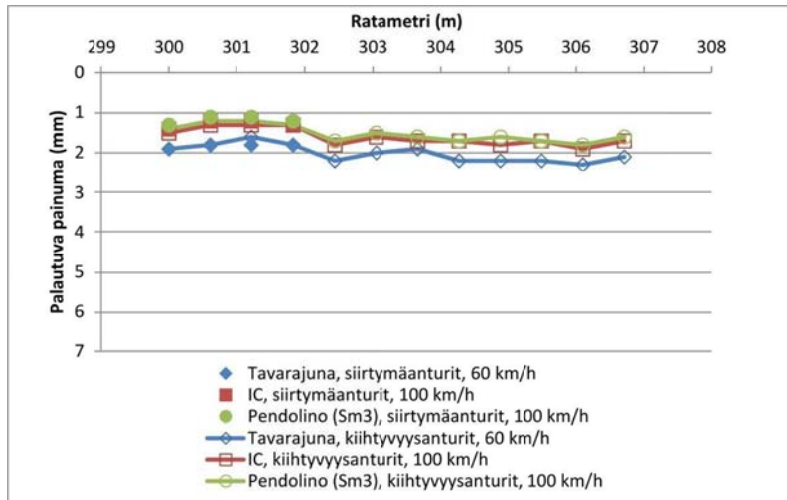
7.11 Hirvineva–Liminka

Kohteet esiteltiin luvussa 6.13. Näissä kohteissa mitattiin ratapölkkyjen länsipäiden palautuvia painumia elokuussa 2011.

Kuvissa 7.21 ja 7.22 on esitetty vastaavassa järjestyksessä kohteiden 718+420 ja 719+300 ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kolmen erilaisen junatyypin osalta. Tuloksiksi kuvissa on valittu suurimman dynaamisen liikkeen aiheuttaman telin palautuva painuma liikennepaikkavälin Vihanti – Tuomioja kohteiden tapaan.



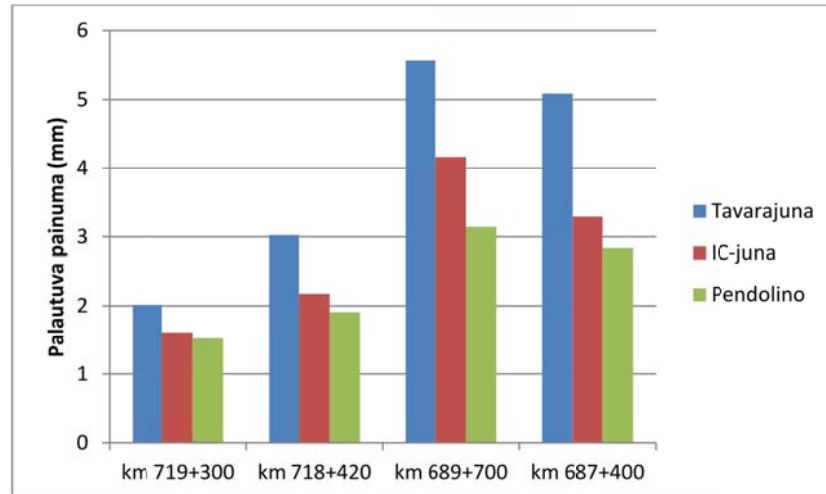
Kuva 7.21. Kiihtyvyyssantureilla ja siirtymäantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kohteessa 12 Hirvineva–Liminka ratakilometrillä 718+420.



Kuva 7.22. Kiihtyvyyssantureilla ja siirtymäantureilla mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat kohteessa 13 Hirvineva–Liminka ratakilometrillä 719+300.

Kuvista 7.21 ja 7.22 havaitaan palautuvien painumien olleen molemmissa kohteissa suuruusluokaltaan kohtuullisen suuria, mutta huomattavasti edellisessä luvussa esitellyjä, liikennepaikkaväliltä Vihanti – Tuomioja mitattuja painumia pienempiä. Lisäksi havaitaan, että kohteessa 718+420 mitatut painumat ovat jonkin verran suurempia kuin kohteesta 719+300 mitatut painumat. Tämänkaltainen tulos oli odotettavissa kohteen 718+420 sijaitessa turvepehmeiköllä, jonka alapuolella on heikosti kantavaa silttistä hiekkaa. Kohde 719+300 oli sitä vastoin valittu kohtuullisen kantavan pohjamaan alueelta vertailukohteeksi. Molemmissa kohteissa on paikoin havaittavissa pieniä eroja siirtymäanturien ja kiihtyvyyssantureiden mittaustuloksissa, jotka johtuvat kairatankojen siirtymistä. Kummassakaan kohteessa kairatankojen siirtymiä ei kuitenkaan mitattu kiihtyvyyssantureilla.

Molemmissa kohteissa Pendolino (Sm3) ja IC-junan Sr2-veturi aiheuttivat lähes samansuuruiset palautuvat painumat, jotka olivat kiihtyvyyssantureilla mitattuna Pendolinoille kohteessa 718+420 keskimäärin 1,91 mm ja kohteessa 719+300 keskimäärin 1,53 mm sekä Sr2-veturille kohteessa 718+420 keskimäärin 2,18 mm ja kohteessa 719+300 keskimäärin 1,61 mm. Kuvista 7.21 ja 7.22 havaitaan tavarajunan aiheuttaneen jonkin verran Sr2-veturia ja Pendolinoa suuremmat palautuvat painumat, vaikka tavarajunan raskaasti kuormattujen vaunujen ja IC-junan Sr2-veturin akselipainot ovat oletettavasti lähes samansuuruiset. Tavarajunan aiheuttamat suurimmat painumat olivat kiihtyvyyssantureilla mitattuna kohteessa 718+420 keskimäärin 3,03 mm ja kohteessa 719+300 keskimäärin 2,02 mm. Tätä havaintoa selittää jo edellisten kohteiden kohdalla esitelty kaluston telien erisuuruisten akselivälien vaikutus kuormituksen keskittymiseen ja painumien suuruuteen, mutta tässä tapauksessa tavarajunan vetävänä kalustoyksikkönä toimi Dr16 ja vaunujen tyypit vaihtelivat. Kuvassa 7.23 on vielä kootusti esitetty liikennepaikkaväleillä Hirvineva–Liminka ja Vihanti–Tuomioja sijainneiden kolmen turvepehmeikkökohteen sekä vertailukohteen 719+300 kiihtyvyyssantureilla mitattujen palautuvien painumien keskiarvot kullekin kalustotyypille. Painumat on poimittu suurimman palautuvan painuman aiheuttaneen akselin kohdalta.

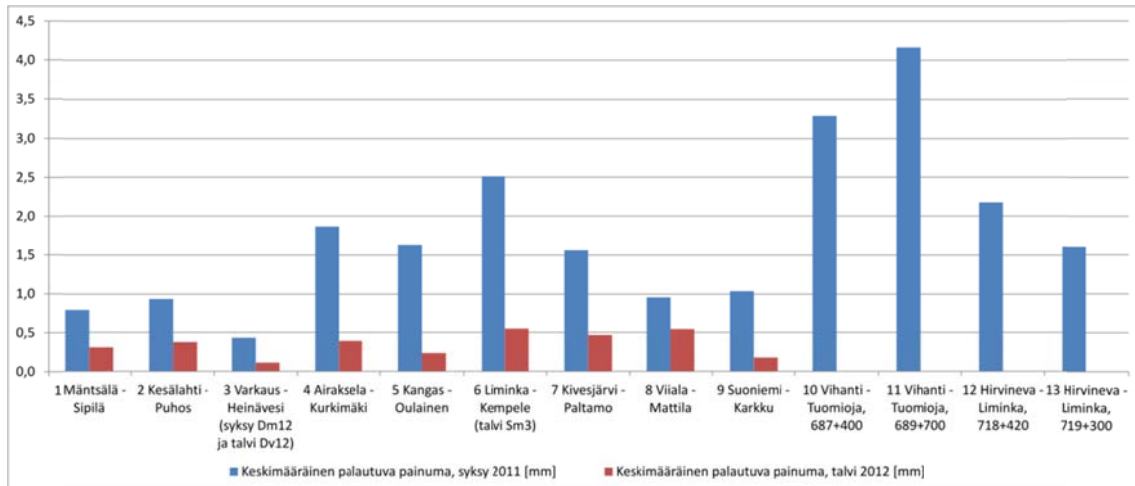


Kuva 7.23. Turvepehmeikkökohteiden ja vertailukohteen palautuvien painumien keskiarvot kiihtyvyyssantureilla mitattuna kullekin kalustotyypille koemittauskohteissa 10–13.

Yleisesti turvepehmeikkömittauksista voidaan todeta, että ennakkoon pehmeiköillä epävarmaksi oletettu kiihtyvyyssanturimittaus toimi ainakin näissä kohteissa moitteetta. Sitä vastoin aiemmin erittäin luotettavana pidetty tiiviiseen pohjamaahan tukeutuviin kairatankoihin perustuva siirtymäanturimittaus osoittautui hieman epävarmaksi. Siirtymäanturimittauksen varmuus todennäköisesti paransi, mikäli referenssipisteinä toimivat kairatangot asennettaisiin suojaputkeen ainakin radan rakennekerrosten osuudella.

7.12 Koemittautulosten yhteenveto

Kuvassa 7.24 on esitetty yhteenveto keskimääräisistä Sr1- tai Sr2-veturin alta mitatuista ratapölkyn päiden palautuvista painumista. Kohteissa 3 ja 6 tietoa Sr-vetureiden aiheuttamista painumista ei ollut saatavilla ja näiden kohteiden kohdalla tarkasteltu kalustotyyppi on ilmoitettu kuvassa. Kuvassa 7.24 esitellyissä tuloksissa on huomioitu kaikki ratapölkkyjen päistä kyseiselle kalustotyypille mitatut tulokset, myös mahdolliset huomattavan suuret painumat instrumentoitujen ratapölkkyjen kohdilla.



Kuva 7.24. Yhteenveto pääosin Sr1- tai Sr2-velureiden alta mitatuista ratapölkkyjen päiden keskimääräisistä palautuvista painumista koemittauskohteissa syksyllä 2011 ja talvella 2012.

Kohdekohtaisia palautuvia painumia käsiteltiin aiemmin tässä luvussa. Yleisesti kuvassa 7.24 esiteltujen palautuvien painumien suuruutta voidaan arvioida Rata teknisten ohjeiden osan 3 ”Radan rakenne” avulla, jossa todetaan, että ”olemassa olevilla maanvaraisesti perustetuilla radoilla ratapölkystä mitattavan radan palautuvan, pystysuuntaisen painuman on kaluston sallitun akselipainon suuruisen kuormituksen alaisena oltava vähintään 1 mm. Enimmäisarvo palautuvalle painumalle on vastaavasti 10 mm ratapölkystä mitattuna...”. Vastaavasti RATO3:n mukaan uudet maanvaraisesti perustettavat radat tulee suunnitella ja rakentaa siten, että radalla käytettävän kaluston sallitun akselipainon suuruinen kuormitus aikaansaa ratapölkkyssä 1...3 mm palautuvan pystysuuntaisen painuman. Turvepohjamailla sallitaan kuitenkin pystysuuntaisen palautuvan painuman olevan enintään 5 mm. [34]

Verrattaessa olemassa oleville radoille annettuja arvoja kuvassa 7.24 esitettyihin keskimääräisiin palautuviin painumiin havaitaan, että syksyllä 2011 kohteissa 1–3 ja 8 palautuvat painumat olivat keskimäärin alle 1 mm. Myös muissa kohteissa esiintyi yksittäisiä alle 1 mm suuruisia palautuvia painumia. Talvella 2012 keskimääräiset palautuvat painumat olivat kaikissa koemittauskohteissa 1–9 alle 1 mm suuruisia.

7.13 Videokamerakuvaus radan taipumatarkasteluissa

Jo alustavissa videokamerakuvaustulosten tarkasteluissa kävi ilmi, että kameralla ei ainakaan kyseisissä kohteissa voida luotettavasti mitata kiskon taipumaa johtuen kuormituksen aiheuttamasta värinästä ja ilmavirroista. Kameraa yritettiin myös siirtää kauemmas radasta värinävaikutuksen vähentämiseksi, mutta tällöin käytetyn kameralinjan optiikka ei enää riittänyt ja menetelmän tarkkuus heikkeni merkittävästi. Myös valaistusolosuhteilla havaittiin olevan hyvin merkittävä vaikutus mittauksilla saatavan videokuvan laatuun.

8 Jäykkyyden laskeminen koemittaustuloksista

Tässä luvussa esitellään jäykkyysarvojen ja ratamoduulien laskemista koemittauksilla saatujen painumatietojen perusteella. Aluksi luvussa esitellään koemittauksissa kuormituksena käytetyn radalla liikkuvan kaluston aiheuttaman kuormituksen suuruuden arviointia. Lisäksi luvussa esitellään laskentaan valitut menetelmät ja niille käytettävät lähtöarvot sekä käsitellään menetelmien käyttöön liittyviä rajoituksia ja huomioita. Luvun lopussa esitellään saadut tulokset ja analysoidaan koemittauskohteille eri vuodenaikoina saatuja jäykkyysarvoja ja ratamoduuleja.

8.1 Kuormitusten suuruus koemittauksissa

Koemittauksissa käytettiin kuormituksena radalla aikataulujen mukaan liikkuvaa, tyypiltään vaihtelevaa kalustoa. Kyseisen kaluston aiheuttaman kuormituksen suuruuden tarkka selvittäminen olisi vaatinut akselipainojen mittaamista, johon tämän tutkimuksen yhteydessä ei ryhdytty. Eri kalustotyyppien akselipainoja voidaan kuitenkin riittävän tarkasti arvioida Samppalan [102] diplomityössään tekemän pyörävoimailmaisimien mittausdatan analysoinnin avulla. Taulukossa 8.1 on esitetty pyörävoimailmaisimien mittausdatasta saadut staattisten akselipainojen keskiarvot kullekin koemittauksissa kuormituksena käytetylle kalustotyyppille lukuun ottamatta kalustotyyppejä Sm4 ja Sm6, joille esitetyt akselipainot ovat raportin tekijän omia arvioita.

Taulukko 8.1. Pyörävoimailmaisilla mitattujen staattisten akselipainojen keskiarvot kalustotyypeittäin.

Kalustotyyppi	Staattisen akselipainon keskiarvo (kN)
Sr1 <i>raskas sähköveturi</i>	214
Sr2 <i>raskas sähköveturi</i>	209
Dv12 <i>väliraskas dieselveturi</i>	162
Dm12 <i>dieselmoottorivaunu</i>	134
Sm3 (Pendolino) <i>sähkömoottorijuna</i>	142
Sm4 <i>lähiliikenteen sähkömoottorijuna</i>	125 (arvio)
Sm6 (Allegro) <i>sähkömoottorijuna</i>	170 (arvio)

Koska radalla liikkuvan kaluston rataan kohdistavat kuormitukset ovat sekä kvasi-staattisia että dynaamisia, päätettiin dynaamiset kuormitukset huomioida jäykkyyden laskennassa dynaamisella voimakertoimella. Samppalan [102] diplomityön mukaan perusteltuna arvona dynaamiselle voimakertoimelle voidaan pitää arvoa 1,1, sillä lovi-pyörien aiheuttamia tai muita hyvin korkeataajuisia dynaamisia kuormituksia ei ole tässä tapauksessa syytä huomioida.

Dynaamisen voimakertoimen mukainen kuormituslisäys ei kuitenkaan toteudu jokaisen yksittäisen ratapölkyn kohdalla eli voimakertoimen käyttö paikoin yliarvioi kuormituksen suuruutta. Kertoimen käytöllä voidaan kuitenkin huomioida ratapölkkyjen kiskoille tarjoamasta epäjatkevasta tuesta radan pituussuunnassa mahdollisesti aiheutuvan pienipiirteisen jäykkyysvaihtelun tuottamaa kuormituslisäystä, joten kertoimen käyttö on tältä osin perusteltua.

8.2 Laskentamenetelmät

Radan taipuma-/painumamittaustuloksille käytettäviä jäykkyyden laskentamenetelmiä esiteltiin luvussa 3.2. Huomattavaksi rajoitukseksi liittyen menetelmien suoraan käyttöön nousi se, että koemittauskohteissa mitattiin ratapölkkyjen päiden palautuvia painumia kiskon taipuman sijaan, jolloin välilevyn vaikutus taipumaan jää ottamatta huomioon. Laskentamenetelmiä voitiin kuitenkin hieman soveltaen käyttää myös ratapölkkyjen päiden painumatuloksien avulla.

8.2.1 Yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys

Luvussa 3.2.2 esitelty yksittäisen pisteen kuormitustesti vaikutti hyvin yksinkertaiselta ja nopealta tavalta ratkaista radan jäykkyys taipumamittaustuloksesta, sillä se vaatii taipuma-/painumamittaustuloksen ainoastaan yhdestä pisteestä. Koska koemittauksissa käytettiin kuormituksen radalla aikataulujen mukaan liikkuvaa kalustoa, ei kuormituksen säätely ollut mahdollista ja näin ollen myöskään jäykkyyden määrittäminen tietyltä kuormitusväliltä ei ollut mahdollista. Täten päädyttiin käyttämään jäykkyyden laskennassa yhtälöä 2.2 muistuttavaa yhtälöä 8.1.

$$K_{rp} = \frac{(0,5 \cdot Q_{akseli}) \cdot 1,1}{y_{rp}} \quad (8.1)$$

missä

K_{rp} on yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys [kN/mm]

Q_{akseli} on staattinen akselipaino taulukon 8.1 mukaisesti [kN]

y_{rp} on ratapölkyn pään palautuva painuma [mm]

Yhtälössä 8.1 käytetty kerroin 0,5 johtuu siitä, että jäykkyys lasketaan ainoastaan ratapölkyn toiselle päälle, jolloin akselipaino tulee muuttua pyöräkuormaksi kyseisellä kertoimella. Kerroin 1,1 on aiemmin esitelty dynaaminen voimakerroin.

Yksittäisistä ratapölkkyistä mitattujen radan jäykkyyksien laskennassa käytettiin tyyppillisesti kaksiakselisen telin yksittäisen akselin alta mitattua palautuvaa painumaa. Näin ollen telin toisen akselin mahdollinen vaikutus laskennassa käytettyyn painumaan jäi huomioimatta. Ainakin pehmeiden pohjamaiden alueilla saman telin toisen akselin kuormitusvaikutus vaikuttaa osittain mittaustulokseen, etenkin telin akselivälin ollessa suhteellisen pieni (ks. luku 7.10). Yhtälön 2.4 mukaista radan jäykkyyden ja ratamoduulin välistä muutosyhtälöä ei voida ainakaan suoraan käyttää yhtälöllä 8.1 määritetyn yksittäisestä ratapölkystä mitatun radan jäykkyyden kohdalla.

8.2.2 Ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuva ratamoduuli

Luvussa 3.2.1 esiteltiin kiskon taipumamuotoon perustuva testi. Tämänkaltaisen las-
kentamenetelmä vaikutti mielenkiintoiselta, sillä se huomioi kerrallaan yksittäistä
ratapölkkyä pidemmän osuuden radasta ja kaksiakselisen telin molempien akselien
aiheuttama kuormitus voidaan ottaa huomioon.

Luvussa 3.2.1 esiteltyyn taipumamuotoon perustuvan testin kohdalla taipumamuoto
selvitettiin mittaamalla paikallaan pysyvän kuormituksen aiheuttamat taipumat koko
taipumasuppilon alueella, mikä vaatii runsaasti taipumamittauksia eri pisteissä.
Koemittauksissa saaduille ratapölkkyjen päiden palautuville painumille taipumamuotoon
perustuvaa menetelmää sovellettiin siten, että tarkasteluun valittiin yksi, mitta-
usosuuden keskimääräistä palautuvaa painumaa edustava, ratapölkky. Tämän rata-
pölkyn pään painumamittausprofiilista poimittiin yhden telin aiheuttama taipuma-
muoto, jonka oletettiin vastaavan paikallaan pysyvän kuormituksen ja useiden taipu-
mamittausten käytöllä saavutettavaa taipumasuppiloa (vrt. kuva 4.22). Näin saadun
taipumamuodon avulla laskettiin ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuva
ratamoduuli yhtälön 8.2 mukaisesti. Yhtälö on samankaltainen kuin taipumamuotoon
perustuvan testin yhteydessä esitelty yhtälö 3.18 ja geofonien mittaustulosten hyö-
dyntämisen yhteydessä esitelty yhtälö 4.2.

$$u_{rp} = \frac{(0,5 \cdot n \cdot Q_{akseli}) \cdot 1,1}{A_{rp} \cdot v} \quad (8.2)$$

missä

u_{rp}	on ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuva ratamoduuli [N/mm/mm]
n	on rataa kuormittavien akseleiden lukumäärä
Q_{akseli}	on staattinen akselipaino taulukon 8.1 mukaisesti [kN]
A_{rp}	on ratapölkystä mitatun taipumamuodon pinta-ala ajan suhteen [mm·s]
v	on kuormittavan kaluston nopeus [m/s]

Yhtälössä 8.2 käytetty kerroin 0,5 johtuu akselipainon muuntamisesta pyöräkuormak-
si kyseisellä kertoimella. Kerroin 1,1 on aiemmin esitelty dynaaminen voimakerroin.

Taipumamuodon pinta-alan laskemiseen käytettiin koemittaustulosten käsittelyyn
käytettyä ohjelmistoa. Koska mittaukset tehtiin ajan suhteen, saadaan pinta-alan yk-
siköksi mm·s. Kerrottaessa kyseinen pinta-ala kuormituksena käytetyn kaluston no-
peudella, aikayksiköt supistuvat pois yhtälöstä.

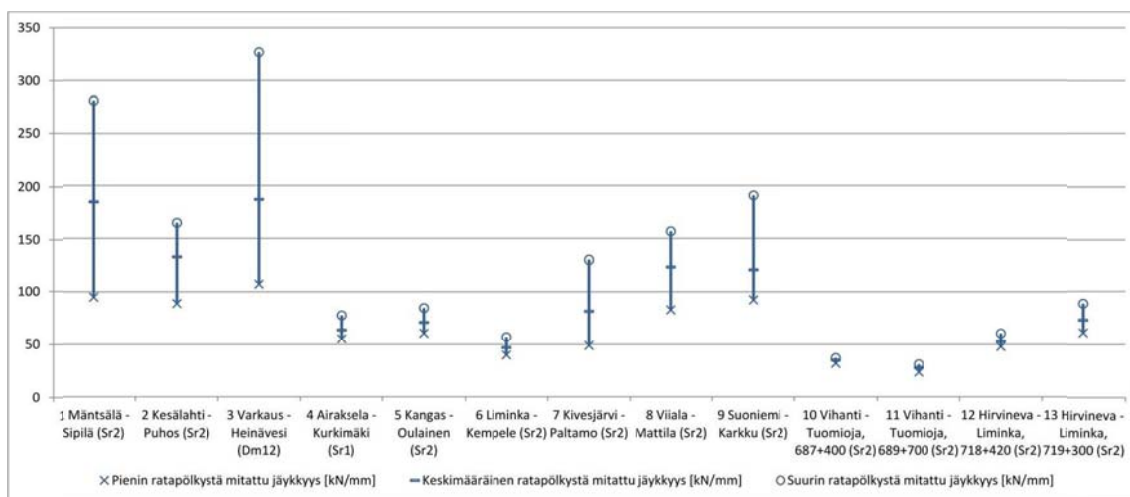
On huomioitava, että käytettäessä yhtälöä 8.2 oletetaan ratamoduulin olevan vakio
koko taipumasuppilon alueella. Käytännössä taipumasuppilon alueella ratamoduuli
voi kuitenkin vaihdella huomattavastikin esimerkiksi ratapölkkyjen erilaisen tukeu-
tumistilan seurauksena.

8.3 Jäykkyys- ja ratamoduulitulokset

8.3.1 Yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet

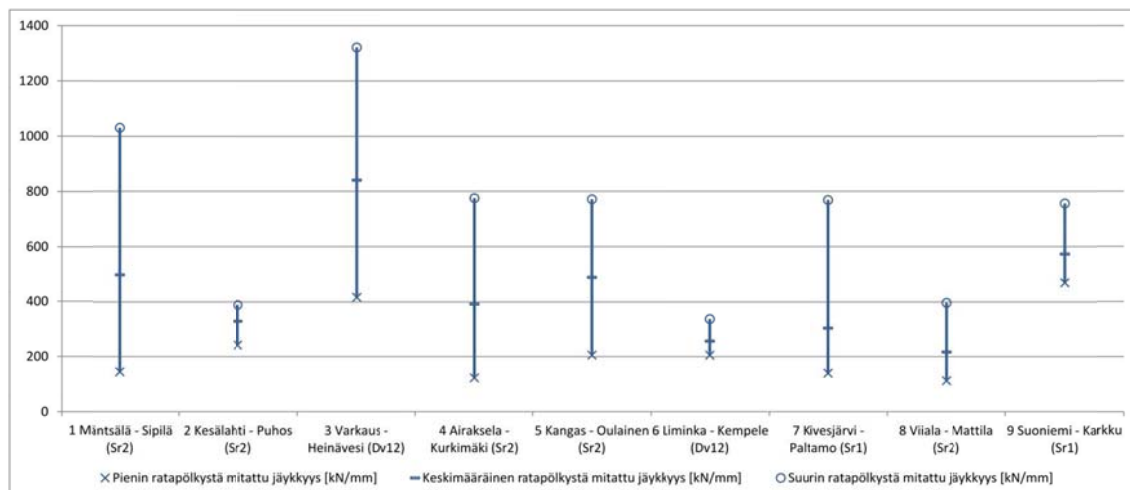
Kuvissa 8.1 ja 8.2 on esitetty vastaavassa järjestyksessä syksyllä 2011 ja talvella 2012 koemittauskohteissa tehtyjen mittausten tulosten perusteella yhtälöllä 8.1 lasketut ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet. Kuvissa on esitetty 15–20 peräkkäistä ratapölkkyä sisältäneiltä, luvussa 7 esitellyiltä, mittausosuuksilta saatu keskimääräinen ratapölkkyistä mitattu radan jäykkyys sekä pienin ja suurin yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys kussakin koemittauskohteessa. Kuvia tarkasteltaessa on huomioitava niiden jäykkyyksakselien erilaiset skaalaukset. Yksityiskohtaisemmat jäykkyyksiprofiilit kunkin koemittauskohteen koko mittausosuudelta on esitetty liitteessä 3.

Jäykkyytuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että kohteissa 1, 2 ja 9 routaseuranta varten instrumentoidun ratapölkyn huomattavan suuret palautuvat painumat jäätettiin kuvissa 8.1 ja 8.2 esitellyissä tuloksissa huomioimatta, sillä niiden katsottiin johtuneen routaseurantalaitteiston asennuksesta. Liitteen 3 jäykkyyksiprofiileissa näidenkin ratapölkkyjen tulokset on esitetty.



Kuva 8.1. Pienin, keskimääräinen ja suurin yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys koemittauskohteissa syksyllä 2011.

Kuvassa 8.1 esitellyt syksyllä 2011 ratapölkkyistä mitatut keskimääräiset radan jäykkyyksiä tarkasteltaessa havaitaan niiden vaihtelevan suunnilleen välillä 25...190 kN/mm. Pienimmät jäykkyydet mitattiin turvepehmeikkökohteista 10 ja 11 liikennepaikkaväliltä Vihanti–Tuomioja. Suurimmat yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet mitattiin syksyllä kohteista 1 ja 3, joissa kallionpinta sijaitsee hyvin lähellä rakennekerrosten alapintaa. Kohteessa 3 kuormittavana kalustotyyppinä toimi muista kohteista poiketen Dm12. Yleisesti ottaen vaikuttaisi siltä, että suhteellisen alhaista keskimääräistä jäykkyyttä edustavien kohteiden kohdalla myös ratapölkystä mitatun radan jäykkyyden vaihteluväli on pienempi.



Kuva 8.2. Pienin, keskimääräinen ja suurin yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys koemittauskohteissa talvella 2012.

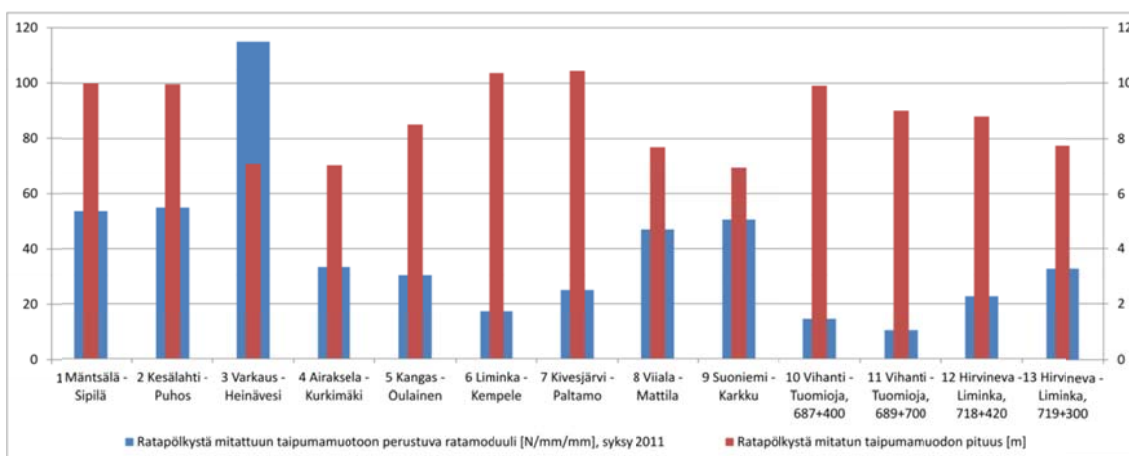
Kuvassa 8.2 esitellyjä talvella 2012 ratapölkystä mitattuja keskimääräisiä jäykkyyksiä tarkasteltaessa havaitaan keskimääräisten jäykkyyksien vaihtelevan suunnilleen välillä 200...850 kN/mm eli jäykkyydet ovat huomattavasti syksyllä 2011 mitattuja jäykkyyksiä suurempia. Laskennassa käytetyt kalustotyypit on ilmoitettu kuvassa 8.2 kohteen nimen jälkeen. Yleisesti vaikuttaisi siltä, että talvella jäykkyyden vaihteluväli on huomattavasti sulan maan aikaa laajempi. Tämä vaihteluvälin laajeneminen johtunee siitä, että talvimittauksille tyypillisillä pienillä painuma-arvoilla palautuvien painumien muutoksien vaikutus laskennalliseen jäykkyyteen on suurempi. Jäykkyyden vaihtelu on pienintä kohteissa 2 ja 6, joissa rata sijaitsee korkealla penkereellä ja suurinta kohteissa 1 ja 3, joissa sulan maan aikana mitatut keskimääräiset jäykkyydet olivat suhteellisen korkeita.

Tarkasteltaessa liitteessä 3 esitettyjä syksyn ja talven jäykkyyden profiileja rinnakkain havaitaan, että sulan maan aikainen jäykkyyden vaihtelu vaikuttaa merkityksettömältä talven jäykkyyden vaihtelun rinnalla. Lisäksi liitteen 3 jäykkyyden profiileista havaitaan, että raskaimpien kalustotyyppien Sr1 ja Sr2 aiheuttamien palautuvien painumien perusteella yhtälöllä 8.1 lasketut jäykkyydet ovat tyypillisesti kevyempien kalustotyyppien aiheuttamista palautuvista painumista laskettuja suurempia. Tämä johtunee pääosin radan kuormituskäyttämisen epälineaarista luonteesta ja siitä, että jäykkyyksien laskennassa käytettiin kuormitusvälinä nollakuorman ja täyden kuormituksen erotusta tukeutumiskuorman ja täyden kuormituksen erotuksen sijaan.

8.3.2 Ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit

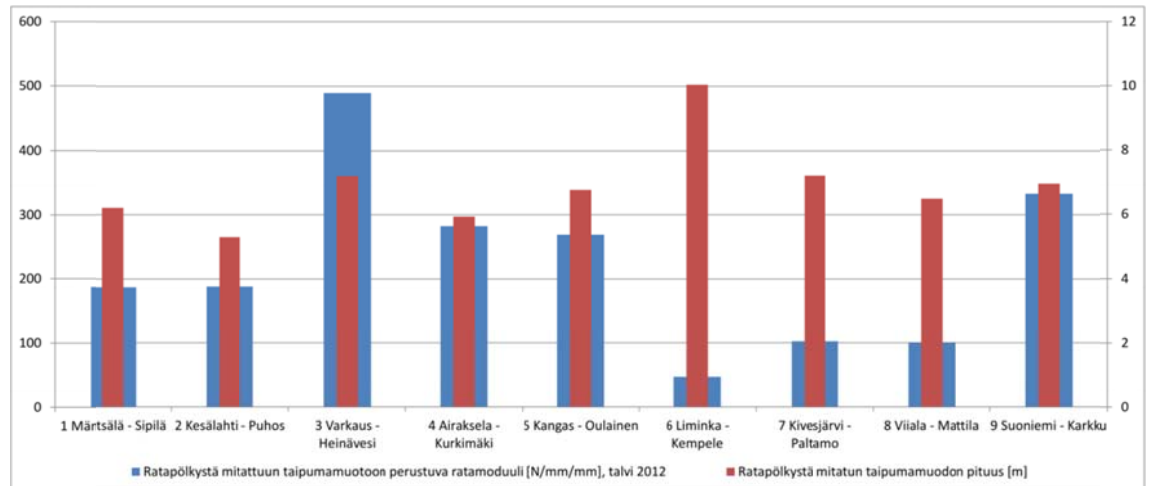
Kuvassa 8.3 on esitetty yhtälöllä 8.2 lasketut ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit sekä näitä vastaavien taipumamuotojen pituudet radan pituussuunnassa koemittauskohteissa 1-13 syksyllä 2011. Tarkasteltaessa ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvia ratamoduuleja, havaitaan niiden vaihtelevan suuruudeltaan välillä 10...115 N/mm/mm. Suurin ratamoduuli saatiin kohteesta 3, jossa myös keskimääräinen yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys oli suurin. Kohteesta 3 kuormittavana kalustona toimi muista kohteista poiketen kevyehkö Dm12, kun muiden kohteiden kohdilla ratamoduulit laskettiin Sr-veltureiden aiheuttamista taipumamuodoista. Pienimmät ratamoduulit saatiin pehmeikkökohteista 6 ja 10-12.

Tarkasteltaessa taipumamuotojen pituuksia syksyllä 2011, havaitaan niiden vaihteluvälin olevan noin 7...10,5 m eli taipumamuotojen pituuksien ääriarvojen erotus vastaa 5-6 ratapölkkyväliä välin ollessa 0,61 m. Telien alta mitatut taipumamuodot vastasivat siis noin 11 – 17 ratapölkkyväliä eli telien kuormitus jakaantui huomattavasti luvussa 2.4.1 esitellyjä yleistyksiä pidemmälle osuudelle radan pituussuunnassa. Yleisesti ottaen vaikuttaisi siltä, että alhaisen ratamoduulin kohdalla taipumamuodon pituus on suhteellisen suuri, mutta suuri taipumamuodon pituus ei aina indikoi pientä ratamoduulia. Tämä käy hyvin ilmi esimerkiksi vertailemalla kohteita 1 ja 9, joissa saadun ratamoduulin suuruus on suunnilleen sama, vaikka taipumamuotojen pituus eroaa noin 3 m. Vastaavasti vertailemalla kohteita 3 ja 4 havaitaan, että samalla taipumamuodon pituudella voidaan saada hyvinkin erisuuruiset ratamoduulit. On kuitenkin huomattava, että taipumamuodon määrittäminen kiihtyvyyssanturimittaustuloksesta on jonkin verran riippuvaista datan laadusta eikä näin ollen ole aina absoluuttisen tarkkaa. Likimääräistä kohteiden välistä vertailua on kuitenkin mahdollista tehdä, koska kaikkien kohteiden taipumamuodot valittiin samoin periaattein.



Kuva 8.3. Ratapölkkyä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit (vasen pystyakseli) ja vastaavien taipumamuotojen pituus (oikea pystyakseli) koemittauskohteissa 1-13 syksyllä 2011.

Kuvassa 8.4 on esitetty yhtälöllä 8.2 lasketut ratapölkkyä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit sekä näitä vastaavien taipumamuotojen pituudet radan pituussuunnassa koemittauskohteissa 1-9 talvella 2012. Laskennassa käytettiin Sr-ventureiden aiheuttamia taipumamuotoja lukuun ottamatta kohteita 3 ja 6, joissa kuormittavat kalustotyypit olivat vastaavassa järjestyksessä Dv12 ja Sm3.

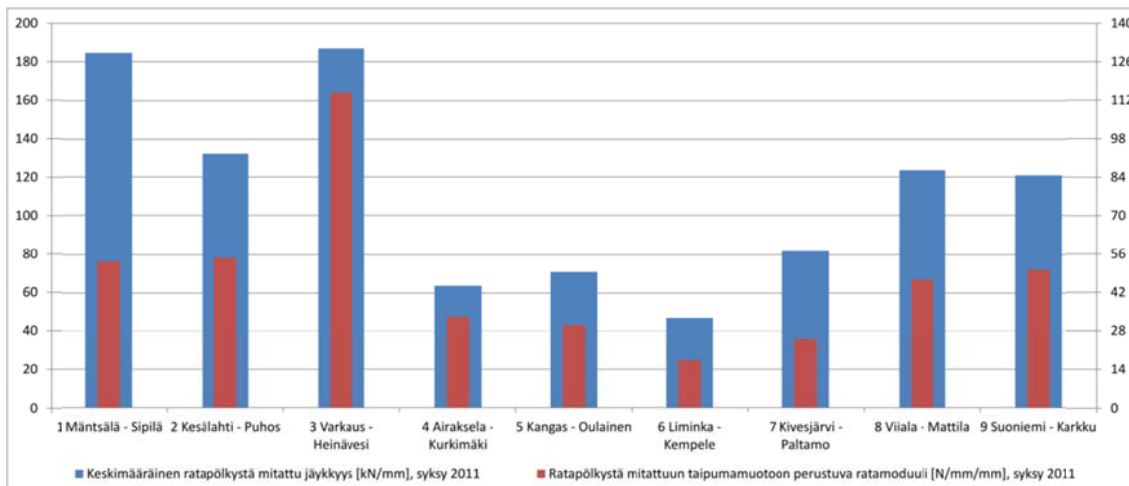


Kuva 8.4. Ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit (vasen pystyakseli) ja vastaavien taipumamuotojen pituus (oikea pystyakseli) koemittauskohteissa 1-9 talvella 2012.

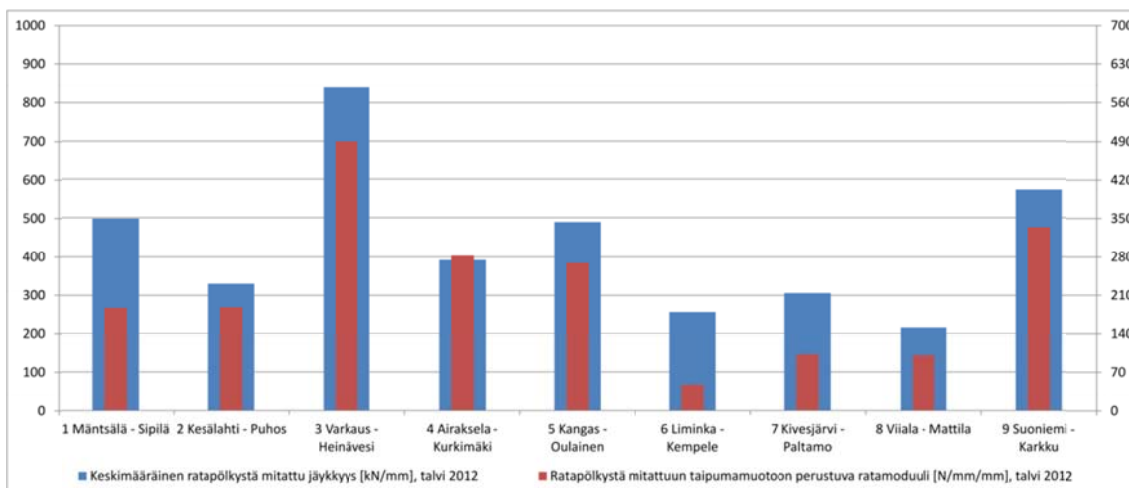
Talvella ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit vaihtelivat suunnilleen välillä 50...500 N/mm/mm ollen huomattavasti syksyn vastaavia arvoja suurempia. Suurin ratamoduuli saatiin myös talvella kohteesta 3 ja pienin pehmeikkökohteesta 6. Tarkasteltaessa taipumamuotojen pituuksia talvella 2012, havaitaan niiden vaihteluvälin olevan noin 5,3...10 m eli taipumamuotojen pituuksien ääriarvojen erotus vastaa 7 – 8 ratapölkkyväliä välin ollessa 0,61 m. Taipumamuodon pituus ei siis lyhentynyt syksyn mittauksista saatuihin pituuksiin verrattuna läheskään samassa suhteessa kuin ratamoduulit kasvoivat. Tämä viittaa siihen, että yhtälöllä 8.2 saatavaan ratamoduulin arvoon vaikuttaa taipumamuodon pituutta merkittävämmiin painumien suuruustaso.

8.4 Tulosten analysointi

Kuvissa 8.5 ja 8.6 on esitetty vastaavassa järjestyksessä syksyn 2011 ja talven 2012 mittaustuloksista saadut keskimääräiset ratapölkystä mitatut jäykkyydet ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit koemittauskohteiden 1–9 osalta.



Kuva 8.5. Keskimääräiset ratapölkystä mitatut jäykkyydet (vasen pysty akseli) ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit (oikea pysty akseli) koemittauskohteissa 1–9 syksyllä 2011.



Kuva 8.6. Keskimääräiset ratapölkystä mitatut jäykkyydet (vasen pysty akseli) ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit (oikea pysty akseli) koemittauskohteissa 1–9 talvella 2012.

Kuvissa 8.5 ja 8.6 esitettyjen tulosten lukuarvopohjainen vertailu eri laskentamenetelmien välillä ei liene tarkoituksenmukaista johtuen menetelmien erilaisista mahdollisuuksista huomioida esimerkiksi useampi lähekkäin oleva akselikuorma tai pidempi osuus radan pituussuunnassa. Sen sijaan vertailemalla eri laskentamenetelmillä saatujen tulosten suhteellisia muutoksia eri vuodenaikoina saatetaan saada hyödyllistä tietoa esimerkiksi ratapölkkyjen tukeutumistilasta. Suhteellisen vertailun helpottamiseksi molempien kuvien pystyakseleiden maksimiarvojen suhde on sama.

Yleisesti ottaen kuvista 8.5 ja 8.6 on havaittavissa, että ratamoduulien suhteellinen kasvu syksyn ja talven välillä on ratapölkystä mitattujen jäykkyyksien suhteellista kasvua suurempaa lukuun ottamatta pehmeikkökohdetta 6.

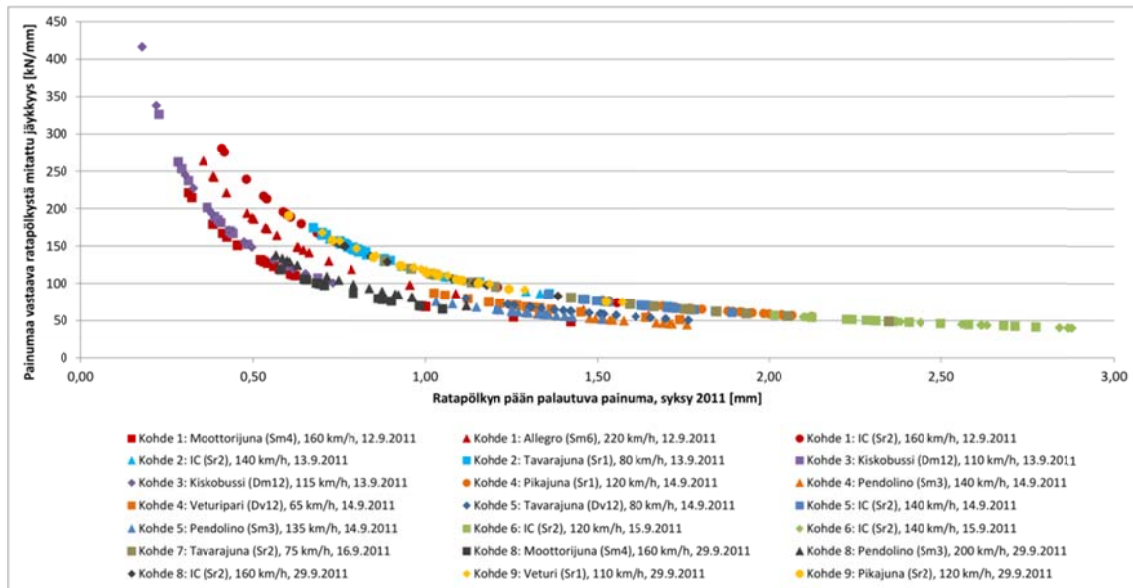
Tarkasteltaessa esimerkiksi kohteiden 1 ja 3 välisiä jäykkyyksien ja ratamoduulien suhteellisia muutoksia syksyn ja talven mittausten välillä havaitaan, että syksyllä molempien kohteiden ratapölkystä mitatut jäykkyydet ovat suunnilleen samat. Talvella

tilanne on muuttunut siten, että kohteessa 1 ratapölkystä mitattu jäykkyys on kasvanut huomattavasti kohdetta 3 vähemmän. Tämä voidaan tulkita myös siten, että kohteessa 1 ratapenkereen jäätyminen on vaikuttanut huomattavasti vähemmän palautuvien painumien suuruuteen kuin kohteessa 3. Ilmiötä mahdollisesti selittävänä tekijänä voidaan nostaa esiin ratapölkkyjen heikko tukeutumistilanne, sillä se mahdollistaa kohtuullisen suurten palautuvien painumien syntymisen myös talvella ratarakenteen routaannuttua. Samankaltainen ilmiö on havaittavissa myös kohteessa 2.

Myös kohteen 8 kohdalla on havaittavissa, että jäykkyyden ja ratamoduulin suhteellinen kasvu syksyn ja talven välillä on muita kohteita vähäisempää. Tämä saattaa selittyä radan routimisella raiteen keskellä viitaten kuvan 7.14 yhteydessä tehtyihin päätelmiin. Tällöin ratapölkkyjen päiden tuenta on heikentynyt ja mahdollistaa päiden kohtuullisen suuret palautuvat painumat vähäiselläkin kuormituksella.

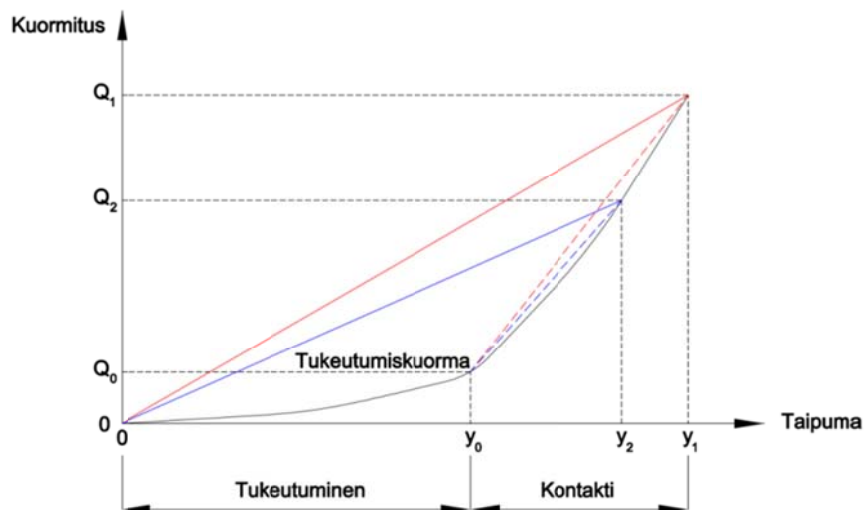
Yhtälöillä 8.1 ja 8.2 laskettujen jäykkyyksien ja ratamoduulien vertailu kirjallisuudessa esitettyihin, eri puolilla maailmaa mitattuihin arvoihin on hankalaa johtuen siitä, että tämän tutkimuksen yhteydessä palautuvat painumat mitattiin ratapölkystä kiskon taipuman sijaan ja siitä, että tyypilliset ratarakenteet ja pohjamaaolosuhteet voivat vaihdella huomattavasti eri maiden välillä. Esimerkinomaisesti voidaan kuitenkin mainita, että Selig & Li [4] pitävät kiskon taipumasta määritettyä ratamoduulia 28 N/mm/mm minimiarvona hyvin toimivalle radalle. Radan kokonaisjäykkyydeksi muutettuna tämä tarkoittaa kiskotyypillä UIC 60 arvoa 55 kN/mm [6]. Kuvasta 8.5 havaitaan, että jopa ilman välilevyn mahdollisesti huomattavaakin jäykkyyсарvoja pienentävää vaikutusta mitatut jäykkyyсарvot olivat useissa kohteissa yllä mainittua minimiarvoa alhaisempia tai hyvin lähellä sitä. Lopez Pita et al. [103] mainitsevat suurnopeusradan kiskosta määritetyn jäykkyyden optimiväliksi 70 – 80 kN/mm perustuen kunnossapitokustannuksiin ja energiankulutukseen. Mikäli tämän tutkimuksen mittauksissa olisi huomioitu välilevyn kokoonpuristuma, olisivat saadut jäykkyyсарvot olleet systemaattisesti selvästi pienempiä.

Kuvassa 8.7 on esitetty kohteiden 1-9 osalta kaikki syksyllä 2011 mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat sekä niitä vastaavat jäykkyydet. Kustakin kohteesta mitattuja painumia ja niitä vastaavia jäykkyyksiä on kuvattu kohdekohtaisilla väreillä ja eri junat on kuvattu eri symbolein. Vastaava kuva talven mittaustuloksille ja niistä lasketuille jäykkyyksille on esitetty liitteen 4 kuvassa 1. Kuvasta 8.7 havaitaan selkeästi kolme eri pistejoukkojen muodostamaa käyrää. Lähempi tarkastelu osoittaa, että ylimmän käyrän pistejoukon muodostavat raskaimpien Sr1- ja Sr2-vetureiden aiheuttamat painumat ja vastaavasti alimman käyrän pistejoukon muodostavat kevyimpien Sm3- ja Sm4- sekä Dm12-kaluston aiheuttamat painumat. Sama ilmiö on havaittavissa liitteen 4 kuvasta 1. Kuvasta 8.7 käy myös hyvin ilmi jo kuvien 8.1 ja 8.2 yhteydessä mainittu palautuvien painumien yleisen suuruusluokan vaikutus jäykkyyteen. Vertaamalla esimerkiksi tilannetta, jossa palautuva painuma kasvaa arvosta 0,25 mm arvoon 0,50 mm ja tilannetta, jossa palautuva painuma muuttuu arvosta 2,25 mm arvoon 2,50 mm nähdään, että edellisessä tapauksessa yhtälöllä 8.1 saatava jäykkyys pienenee lähes 150 kN/mm kun taas jälkimmäisessä tapauksessa vain noin 10 kN/mm hieman kalustotyypistä riippuen.



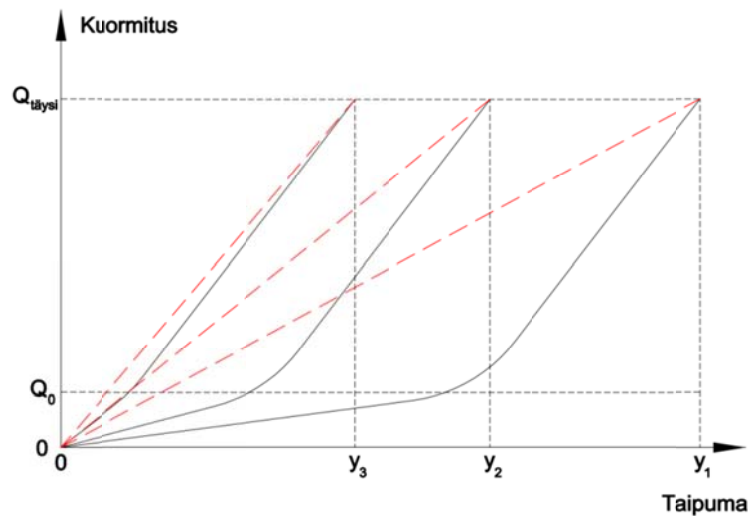
Kuva 8.7. Kohteissa 1–9 syksyllä 2011 mitatut eri kalustotyyppien aiheuttamat ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat ja painumia vastaavat ratapölkkyistä mitatut jäykkyydet.

Kuvassa 8.7 havaittava eripainoisia kalustotyyppijä edustavien pistejoukkojen kasautuminen omiksi käyriksi selittyy sillä, että tässä tutkimuksessa mittaukset tehtiin nollakuormituksen ja täyden kuormituksen välillä. Tätä ajatusmallia selkeyttää kuva 8.8, jossa on esitetty havainnekuva kuormitusvälin valinnan vaikutuksesta laskennallisesti saatavaan jäykkyyteen. Tämän tutkimuksen tapaan toteutettuja mittauksia kuvaavat origosta lähtevät ehjät viivat, joista sininen viiva voisi kuvata esimerkiksi kevyemmän Sm3-kaluston (Pendolino) ja punainen viiva esimerkiksi raskaamman Sr2-veturin mittaustulosta. Kuvasta havaitaan ehjien viivojen kulmakerrointen olevan huomattavan erilaiset. Mikäli painumamittaus olisi tehty kevyen tukeutumiskuorman ja täysien kuormitusten Q_1 ja Q_2 väliltä, olisi tuloksiksi saatu sinisellä ja punaisella katkoviivalla kuvatut painuma-kuormitus-viivat. Näiden katkoviivojen kulmakerrointen ero on merkittävästi tämän tutkimuksen tuloksia kuvaavien viivojen vastaavaa eroa pienempi.



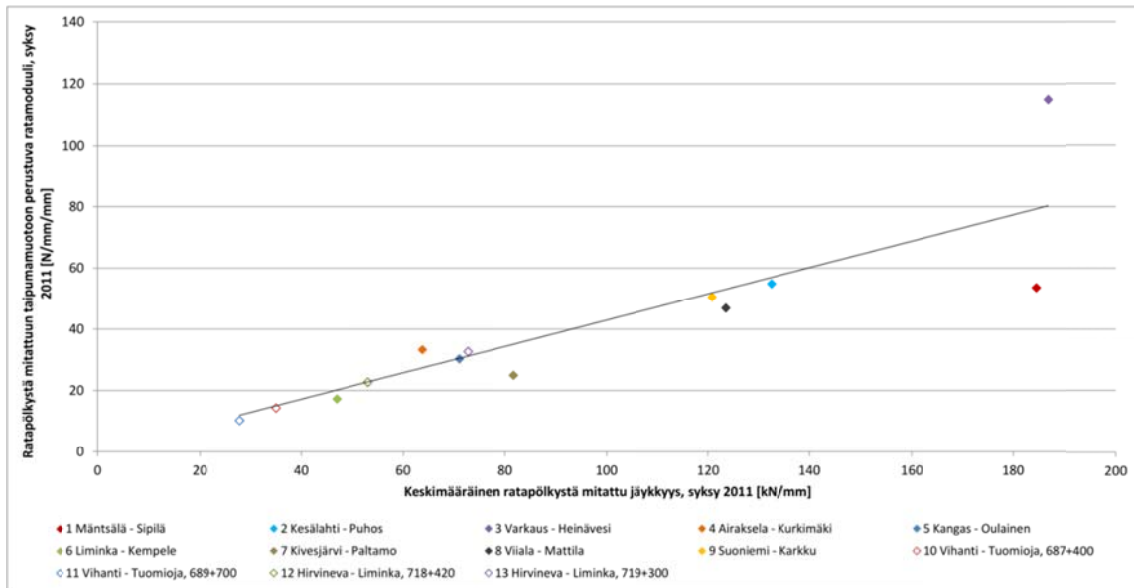
Kuva 8.8. Havainnekuva kuormitusvälin valinnan vaikutuksesta laskennallisiin jäykkyyksiarvoihin.

Siinä missä kuva 8.8 selitti kuormitusvälin valinnan vaikutusta jäykkyyteen, pyrkii kuva 8.9 havainnollistamaan ratapölkkyjen erilaatuisen tukeutumistilan vaikutusta laskennalliseen radan jäykkyyteen. Kuvasta 8.9 havaitaan, että myös samassa kohteessa ja samanpainoisella kuormituksella voidaan tulokseksi saada hyvin erisuuruisia jäykkyyksarvoja riippuen ratapölkkyjen tukeutumiseen vaadittavasta taipumasta. Tämän tutkimuksen tapaan määritettyjä jäykkyyksarvoja on kuvattu kuvassa punaisilla katkoviivoilla. Kuvassa kohteen yhtenäisiä ominaisuuksia ratapölkkyjen tukeutumistilaa lukuun ottamatta on pyritty kuvaamaan käyttämällä kuormitus-taipuma-kuvaajille samaa kulmakerrointa kuormitusvälillä $Q_0 - Q_{täysi}$. Tämän voidaan nähdä kuvaavan tukikerroksen alapuolisen ratarakenteen yhteneväisiä ominaisuuksia tarkasteltaessa yksittäistä kohdetta.



Kuva 8.9. Ratapölkkyjen tukeutumistilan vaikutus laskennalliseen jäykkyyteen.

Kuvassa 8.10 on esitetty syksyn 2011 mittaustuloksista lasketut keskimääräiset yksittäisestä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvat ratamoduulit koemittauskohteiden 1-13 osalta. Samanlainen kuva talven 2012 mittaustulosten osalta on esitetty liitteen 4 kuvassa 2. Kuvasta 8.10 on selkeästi havaittavissa kohtuullisen vahva korrelaatio jäykkyyksien ja ratamoduulien välillä kohteita 1 ja 3 lukuun ottamatta. Talven mittaustulosten välillä korrelaatio ei ollut yhtä selkeä, mikä johtuu todennäköisesti tukeutumistilanteen korostuneesta roolista talvella.



Kuva 8.10. Keskimääräisen yksittäisestä ratapölkystä mitatun radan jäykkyyden ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvan ratamoduulin välinen korrelaatio syksyn 2011 mittaustulosten perusteella.

Kohteen 3 poikkeaminen trendiviivasta saattaa johtua siitä, että kohdetta edustava jäykkyys ja ratamoduuli on laskettu kevyehkön Dm12-kalustotyypin aiheuttamista painumista muiden kohteiden tulosten edustaessa raskaan Sr1 tai Sr2-kaluston aiheuttamia painumia. Kohteen 1 kohdalla poikkeaman voidaan epäillä johtuvan joidenkin ratapölkkyjen huomattavasti heikentyneestä tukeutumistilasta, mikä vaikuttaa taipumamuodon pituuteen.

9 Päätelmät

9.1 Radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli kirjallisuuslähteiden avulla selvittää millä suureilla radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä voidaan kuvata, miten kyseiset suuret määritetään, miten radan kokonaisjäykkyys muodostuu radan rakenneosien jäykkyyksien yhteisvaikutuksesta ja mitä kokonaisjäykkyys indikoi koko ratarakenteen tai sen yksittäisten osien toiminnasta ja kunnosta. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös maailmalla radan jäykkyyden mittaamiseen käytettyjä pistemäisiä mittaamenetelmiä, joista löydettiin toistakymmentä erilaista sovellusta. Näistä sovelluksista valittiin kolme menetelmää, joilla tehtiin koemittauksia Suomen rataverkon eri osissa.

Radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä kuvataan yleisesti joko radan jäykkyydellä, joka määritetään kuormituksen ja sen aiheuttaman taipuman suhteena tai rata-moduulilla, joka kuvaa Winklerin alustan muodostamaa kiskon liikettä vastustavaa voimaa radan pituussuuntaista millimetriä kohden, kun kisko taipuu yhden millimetrin. Nämä määritelmät vaativat kiskon taipuman mittaamisen. Yleisesti voidaan todeta radan jäykkyyden kuvaavan jäykkyyksominaisuutta yksittäisessä pisteessä ja rata-moduulin huomioivan yksittäistä pistettä laajemman alueen radan pituussuunnassa.

Kirjallisuuslähteiden perusteella pohjamaalla on radan yksittäisistä rakenneosista ehdottomasti merkittävin vaikutus radan kokonaisjäykkyyteen. Erilaisista pohjamaaolosuhteista saadut koemittaukselliset tulokset puoltavat tätä näkemystä. Lisäksi sekä kirjallisuustutkimuksen että koemittauksien perusteella voidaan todeta, että ratapölkkyjen tukeutumistilalla saattaa olla hyvinkin merkittävä vaikutus laskennalliseen jäykkyyteen. Muita kohtuullisen merkittäviä tekijöitä ovat joustavat elementit, kuten välilevy ja mahdollinen pohjain sekä karkearakeisten rakennekerros materiaalien kerrospaksuudet.

Sekä hyvin suuren että hyvin alhaisen radan kokonaisjäykkyyden on todettu olevan tiettyjen radan rakenneosien kokemien rasitusten kannalta haitallisia. Hyvin jäykällä radalla radan jousto-ominaisuudet dynaamisia kuormituksia vastaan ovat riittämättömät ja hyvin joustavalla radalla taipuma kaikissa radan rakenneosissa kasvaa haitallisen suureksi. Lisäksi jäykkyyden huomattava vaihtelu radan pituussuunnassa on epäedullista, sillä se lisää muun muassa dynaamisten kuormitusten ja iskuvoimien todennäköisyyttä sekä heikentää matkustusmukavuutta. Maailmalla radan jäykkyydestiedossa on nähty huomattavaa potentiaalia toimia radan kunnossapidon työkaluna ongelmallisten rataosuuksien paikallistamisessa ja kunnossapitotöiden vaikutusten todentamisessa.

9.2 Koemittausmenetelmät ja -tulokset

Radan jäykkyyden koemittausmenetelmiksi tässä tutkimuksessa valikoituivat kiihtyvyyden- ja siirtymäanturit sekä videokamerakuvaus. Koemittauksia tehtiin syksyllä 2011 kolmessatoista kohteessa eri puolilla rataverkkoa ja talvella 2012 vertailumittauksia näistä yhdeksässä kohteessa. Kiihtyvyydenturimittaus osoittautui erittäin toimivaksi mittausmenetelmäksi kaikissa olosuhteissa. Sitä vastoin aiemmin luotettavana pidetty tiiviiseen pohjamaahan saakka asennettuun referenssitankoon perustuva siirtymäanturimittaus osoittautui pehmeiköillä hieman epävarmaksi referenssitankojen liikkeiden takia. Menetelmän toimivuutta luultavasti parantaisi referenssitankojen asentaminen suojaputkeen radan rakennekerrosten osuudelta. Videokamerakuvaus havaittiin melko nopeasti liian epävarmaksi menetelmäksi junien aiheuttamien ilmavirtojen ja värinävaikutusten takia.

Tässä tutkimuksessa radan jäykkyydelle päädyttiin käyttämään termiä *yksittäisestä ratapölkystä mitattu radan jäykkyys* ja ratamoduulille termiä *ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuva ratamoduuli* johtuen siitä, että tämän tutkimuksen koemittauksissa mitattiin aikataulujen mukaan liikkuneiden junien aiheuttamia ratapölkyn päiden palautuvia painumia kiskon taipuman sijaan. Näin ollen tässä tutkimuksessa mitatut jäykkyydet ja ratamoduulit eroavat jonkin verran edellä esitellyistä määritelmistä.

Tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyillä koemittauksilla saatiin ensi kertaa tässä laajuudessa tietoa radalla liikkuvan kaluston aiheuttamista ratapölkkyjen palautuvista painumista Suomen rataverkolla. Sulan maan aikana syksyllä koemittauskohteissa mitatut ratapölkkyjen päiden palautuvat painumat vaihtelivat välillä 0,3...6,6 mm ja talvella välillä 0,1...1,1 mm. Suurimmillaan painumat olivat pehmeikkökohteissa 6 ja 10-12 sekä pienimmillään kallioleikkauskohteessa 3. Ratarakenteen routaantumisella havaittiin olevan erittäin merkittävä vaikutus jäykkyyteen, sillä syksyllä mitatut palautuvat painumat olivat joissain kohteissa jopa yli viisinkertaisia talvella mitattuihin verrattuna. Lisäksi, varsinkin kohteen 1 kohdalla, havaittiin, että palautuvien painumien suuruus voi vaihdella huomattavasti jopa peräkkäisten ratapölkkyjen välillä.

Koemittauksilla saatujen mittaustulosten perusteella lasketut keskimääräiset yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet vaihtelivat kohteittain syksyllä välillä 28...187 kN/mm ja talvella välillä 217...840 kN/mm. Vastaavasti ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvien ratamoduulien vaihteluväli oli syksyllä 10...115 N/mm/mm ja talvella 47...490 N/mm/mm. Laskettujen jäykkyyksien ja ratamoduulien välillä havaittiin syksyn mittauksissa kohtuullisen vahva korrelaatio. Talvella ratapölkkyjen tukeutumistilanteen vaikutuksen korostuessa korrelaatio ei ollut yhtä vahva.

Ratapölkkyistä mitatuista jäykkyyksistä havaittiin, että suuremman jäykkyyden omaavilla rataosuuksilla jäykkyyden vaihtelu on selvästi suurempaa kuin pienemmän jäykkyyden omaavilla rataosuuksilla. Tämä johtuu siitä, että jäykkyyden ollessa suuri, pienetkin erot palautuvissa painumissa vaikuttavat merkittävästi laskennalliseen jäykkyyteen. Tilanne korostuu etenkin silloin, kun palautuvan painuman lukuarvo lähestyy nolaa, sillä se tarkoittaa jäykkyyden lähestyvän ääretöntä. Käytettäessä radalla liikkuvaa kalustoa kuormituksena ei kuormitusta voida säädellä ja jäykkyys on määritettävä nolakuormituksen ja täyden kuormituksen väliltä sen sijaan, että huomioitaisiin esimerkiksi epätäydellisestä tukeutumistilasta johtuva radan kuormitus-

käyttäytymisen epälineaarisuus määrittämällä jäykkyys kevyen tukeutumiskuorman ja täyden kuormituksen väliltä. Tämä johti tässä tutkimuksessa siihen, että raskaampien Sr1 ja Sr2-vetureiden alta mitatut jäykkyydet olivat kevyemmän kaluston alta mitattuja suurempia.

Ratamoduulien osalta havaittiin, että alhaiset ratamoduulit indikoivat suhteellisen suuresta taipumamuodon pituudesta radan pituussuunnassa. Sitä vastoin suhteellisen laaja taipumamuoto ei aina edusta alhaista ratamoduulia. Näin ollen voidaan taipuman/painuman suuruusluokkaa pitää taipumamuodon pituutta määräävämpänä tekijänä ratamoduulin muodostumisessa.

Vertailtaessa tässä tutkimuksessa saatuja jäykkyyksiä ja ratamoduuleja muissa maissa mainittuihin, pääosin kiskon taipuman mittaamiseen perustuviin minimisuositusarvoihin, voidaan todeta tässä tutkimuksessa sulan maan aikaan mitattujen jäykkyyksiarvojen suuruusluokan olleen useissa, pääosin pehmeiköillä sijainneissa, kohteissa jopa huomattavasti kyseisiä minimiarvoja alhaisempia tai hyvin lähellä niitä. Tosin myös syksyllä joissain kohteissa ja talvella kaikissa kohteissa mitatut jäykkyyksiarvot olivat huomattavasti miniarvoja suurempia. Tämän tutkimuksen koemittauksissa välilevyn kokoonpuristuman vaikutusta kokonaistaipumaan ei voitu ottaa huomioon. Mikäli välilevyn vaikutus olisi huomioitu, olisivat saadut jäykkyyksiarvot olleet systemaattisesti ja merkittävästi nyt saatuja alhaisempia. Näin ollen voitaneen todeta, että tämän tutkimuksen koemittauskohteissa radan jäykkyyksiominaisuudet ovat pääosin melko alhaisia verrattuna maailmalla optimaalisena pidettyyn jäykkyyksitasoon.

9.3 Jatkotutkimus

Kiihtyvyyksianturimittaus havaittiin erittäin toimivaksi menetelmäksi yksittäisten ongelma-kohteiden ja lyhyiden, enintään muutamien kymmenien peräkkäisten ratapölkkyjen mittaisten rataosuusien tutkimiseen. Mikäli radan kokonaisjäykkyyttä halutaan mitata koko rataverkon mittakaavassa, on jatkuvan mittausmenetelmän kehittämisen tarve ilmeinen. Luvussa 5.4 esitellyn prototyypin kehittämistä jatketaan tästä eteenpäin täyden mittakaavan suuntaan. Ratkaistavia asioita täyden mittakaavan mittauslaitteen kohdalla ovat muun muassa tarvittava pyörän halkaisija, pyörien kartiokkuus, mittalaitteen akseleiden keskinäiset etäisyydet ja nivelmekanismit kaarteita varten. Tavoitteena on tehdä radan jäykkyyksimittaus täydessä mittakaavassa vielä kesän 2012 aikana jollakin rajatulla alueella, kuten esimerkiksi ratapihalla.

Kun tulevaisuudessa jäykkyyttä pystytään mittaamaan jopa useilla eri menetelmillä, radan jäykkyyttä tulisi pystyä myös modifioimaan haluttuun suuntaan. Tällä osalla alueella potentiaalisimmalta jatkotutkimuskohteilta vaikuttavat pohjaimet ja etenkin välilevyt, sillä ne ovat kohtuullisen helposti vaihdettavissa/asennettavissa myös ole-massa oleville radoille.

Berggren [6] on vuonna 2009 todennut osuvasti, että vaikka radan pystysuuntaista kokonaisjäykkyyttä on tutkittu ja mitattu jo 1970-luvulta lähtien, ollaan vielä kaukana radan jäykkyyden ja sen vaikutusten täydellisestä ymmärtämisestä. Tämä ilmenee muun muassa yleiseurooppalaisen standardin puuttumisena radan jäykkyyden osalta. Jotta saataisiin lisätietoa jäykkyydestä ja sen kehittymisestä verrattuna radan kunnan kehittymiseen, olisi suositeltavaa jatkaa säännöllisiä sulan maan ajan ja talven mittauksia tämän tutkimuksen koekohteissa ja kenties laajemminkin rataverkon eri osissa.

Lisäksi mielenkiintoinen ajankohta mittauksille olisi keväällä roudan sulamisen aikaan. Vertailemalla radan geometristä kuntoa ja sen kehittymistä radan jäykkyytasoon ja sen muutoksiin olisi mahdollista arvioida optimaalista radan jäykkyyttä tai jäykkyyden vaihteluväliä Suomen rataverkolla.

Lähteet

1. Direktiivi 2008/57/EY Rautatiejärjestelmän yhteentoimivuudesta yhteisössä. Yhteentoimivuuden tekninen eritelmä. Tavanomaisen rautatiejärjestelmän infrastruktuuriosajärjestelmä. Bryssel 2011. Euroopan komissio. 68 s.
2. Mäkelä, E. (2002). Raiteen, ratapenkereen ja -rummun yhteistoiminta. Lisensiaatintutkimus. Tampere 2002. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Pohja- ja maarakenteiden laboratorio. 162 s. + liitt. 7 s.
3. Skoglund, K. A. (2002). A Study of Some Factors in Mechanistic Railway Track Design. Eng.D Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Faculty of Engineering and Technology. 160 p., 37 app.
4. Selig, E. T. & Li, D. (1994). Track Modulus: Its Meaning and Factors Influencing It. Transportation Research Record. No. 1470, Railroad Research Issues. pp. 47-54.
5. Korkeamäki, S. (2011). Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 4/2011. 93 s.
6. Berggren, E. (2009). Railway Track Stiffness, Dynamic Measurements and Evaluation for Efficient Maintenance. PhD Thesis. Stockholm 2009. Royal Institute of Technology (KTH), Aeronautical and Vehicle Engineering, Division of Rail Vehicles. 123 p.
7. Ratahallintokeskus. (2002). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO), osa 11, radan päällysrakenne. Helsinki. 87 s. + liitt. 26 s.
8. Selig, E. T. & Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London, Thomas Telford Publications. 407 p.
9. Kauppinen, M. (2011). Ratakiskon elinkaari. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011. 113 s.
10. Esveld, C. (2001). Modern Railway Track. Second Edition. MRT-Productions, The Netherlands. 654 p.
11. Kaewunruen, S. & Remennikov, A. M. (2006). Laboratory measurements of dynamic properties of rail pads under incremental preload. University of Wollongong, Faculty of Engineering. 7 p.
12. Wu, T. X. & Thompson, D. J. (1999). The effects of local preload on the foundation stiffness and vertical vibration of railway track. Journal of Sound and Vibration. Vol. 219. No. 5. pp. 881-904.
13. Grassie, S. L. (1989). Resilient railpads: their dynamic behaviour in the laboratory and on track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol. 203. No. F1. pp. 25-32.

14. Teknikum Oy. Technical Specification: Rubber railway pad Zw 900 NT for Vossloh system Skl 14 / Nordic conditions. Vammala, Finland, 11.6.1997. Telefax. 8p.
15. Kaewunruen, S. & Remennikov, A. M. (2008). An Alternative Rail Pad Tester for Measuring Dynamic Properties of Rail Pads Under Large Preloads. *Experimental Mechanics*. Vol. 48. No. 1. pp. 55-64.
16. RSSB, Rail Safety & Standards Board. (2005). Review of the effect of track stiffness on track performance. 27 p., 30 app.
17. SFS-EN 13481-2. Kiskoliikenne. Rata. Kiinnitysjärjestelmien vaatimukset. Osa 2: Betonisten ratapölkkyjen kiinnitysjärjestelmät = Railway applications. Track. Performance requirements for fastening systems. Part 2: Fastening systems for concrete sleepers. Helsinki 2002, Suomen Standardisoimisliitto. 10s. + liitt. 7 s.
18. Ratahallintokeskus. (2008). Esijännitetyt betoniratapölkkyt: Betoniratapölkkyjen tekniset toimitusehdot. 21 s.
19. Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Helsinki 2004. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. 193 s.
20. Lundqvist, A. & Dahlberg, T. (2005). Load impact on railway track due to unsupported sleepers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 219. No. 2. pp. 67-77.
21. Zhang, S., Xiao, X., Wen, Z. & Jin, X. (2008). Effect of unsupported sleepers on wheel/rail normal load. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28. pp. 662-673.
22. International Union of Railways. (2009). Under Sleeper Pads – Summarising Report. Wien 2009. 40 p.
23. Witt, S. (2008). The Influence of Under Sleeper Pads on Railway Track Dynamics. Linköping University, Division of Solid Mechanics. 48 p.
24. Tiflexin [www-sivujen TRACKELAST-osio](http://www.tiflex.co.uk/track_home/under/under.html). Viitattu 29.6.2011. Saatavilla: http://www.tiflex.co.uk/track_home/under/under.html
25. Ratahallintokeskus. (2008). Kehäradan kiintoraideselvitys. Helsinki 2008. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 17/2008. 88 s. + liitt. 31 s.
26. Peltonen, T. & Backholm, M. (2009). Raideliikenteen runkomelun tutkimuksia, USP-radon eristävyysmittaukset. Helsinki 2009. Insinööritoimisto Akukon Oy. 7 s. + liitt. 11 s.
27. Loy, H. (2009). Under Sleeper Pads in Turnouts. *European Rail Technology Review*. Vol. 49. pp. 35-38.
28. Kleinert, U., Krüger, M. & Ripke, B. (2006). Applications and Benefits of Elastic Elements in Ballasted Track, DB AG – Experiences of Users. Paris 2006. UIC Seminar.

29. Ratahallintokeskus. (2004). Standardin SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset kansallinen soveltamisohje. 7 s.
30. Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2010). Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raideseppelin ominaisuuksiin. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. 64 s. + liitt. 3 s.
31. Peltonen, T. & Backholm, M. (2010). Kehärata, avorataosuuden rakentamissuunnittelu, runkomelun tarkennettu selvitys. Insinööritoimisto Akukon Oy. Helsinki 2010. 11 s. + liitt. 16 s.
32. Getzner Werkstoffen www-sivujen Railway-osio. Viitattu 14.7.2011. Saatavilla: <http://www.getzner.com/en/downloads/brochures/>
33. Tiflexin www-sivujen TRACKELAST-osio. Viitattu 14.7.2011. Saatavilla: http://www.tiflex.co.uk/track_home/ballast/ballast.html
34. Ratahallintokeskus. (2008). Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3, radan rakenne. Helsinki 2008. 50 s. + liitt. 35 s.
35. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL), 21230 Välikerrokset ratarakenteissa 2009/1. (2009). Verkkopäivitys. Viitattu: 15.7.2011. Saatavilla: http://www.rts.fi/infraryl/21230_Valikerrokset_ratarakenteissa_2009_1.pdf
36. Kalliainen, A., Luomala, H., Jäniskangas, T., Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2011). Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. 152 s.
37. Kolisoja, P. (1993). Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Helsinki 1993. Tielaitoksen selvityksiä 38/1993. 147 s.
38. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL), 21220 Eristyskerrokset ratarakenteissa 2009/1. (2009). Verkkopäivitys. Viitattu: 15.7.2011. Saatavilla: http://www.rts.fi/infraryl/21220%20_Eristyskerros_ratarakenteissa_2009_1.pdf
39. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL 2010). (2010). Osa 1, Väylät ja alueet. Rakennustietosäätiö RTS. 524 s. + liitt. 30 s.
40. Tiehallinto. (2004). Tietoa tiensuunnitteluun nro 73, ennakkotietoa uudesta tierakenteen mitoitusohjeesta. 16 s. + liitt. 4 s.
41. Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2001). XPS-routalevyeristeet ratarakenteessa, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Helsinki 2001. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2001. 97 s. + liitt. 17 s.
42. Ratahallintokeskus. (2002). XPS-routalevyjen tekniset toimitusehdot. 279/731/02. 3 s.
43. Finnfoam Oy:n www-sivut, lujuusominaisuudet, 2009. Viitattu: 20.10.2011. Saatavilla: <http://www.finnfoam.fi/index.php?page=f113fa6900c6a87dd2d57cac353b8a3>

44. BASF webpage, Styrodur C, suositellut käyttökohteet ja tekniset tiedot, 2010. Viitattu: 20.10.2011. Saatavilla:
http://www.basf.de/basf2/img/produkte/kunststoffe/styrodur/downloads/SF/Styrodur_Suosittelut_kaeyttökohteet_ja_tekniset_tiedot.pdf
45. Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2001). Tutkimusraportti: EPS-routalevyt ratarakenteessa – Kuntotilan arviointi Limingassa km 721+800 – 722+360. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohja- ja maarakenteiden laboratorio. 16 s. Julkaisematon.
46. Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2003). Tutkimusraportti: EPS-routalevyt ratarakenteessa; Kuntotilan arviointi rataosalta Orivesi – Jämsänkoski km 238+580 ja 239+100 otetuista näytteistä. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennetekniikan laitos, Pohja- ja maarakenteiden laboratorio. 14 s. Julkaisematon.
47. Heikkilä, J. (2011). Radan perustaminen. Rautatiesuunnittelun erikoisopintojaksion (RASU) 3. seminaari. 19.10.2011. 33 s. Julkaisematon.
48. Sussmann, T. R., Ebersöhn, W. & Selig, E. T. (2001). Fundamental nonlinear track load-deflection behavior for condition evaluation. *Transportation Research Record* 1742. Paper No. 01-2916. pp. 61-67.
49. Chaar, N. & Berg, M. (2005). Vehicle-Track Dynamic Simulations of a Locomotive Considering Wheelset Structural Flexibility and Comparison with Measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Vol. 219. pp. 225-238.
50. Rail Corporation New South Wales (RailCorp). (2009). Engineering Manual - Track. Rail Defect Handbook: Some Rail Defects, their Characteristics, Causes and Control. 82 p.
51. Rantala, T. Betoniratapölkyn vaurioitumismekanismit. Diplomityö. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 88 s. + liitt. 36 s.
52. Raymond, G. P. (1985). Analysis of track support and subgrade stability. Lecture notes. 22 p.
53. Riessberger, K. (1998). Track Part of the system 'railway'. Lecture material, Nordic railway seminar 1998. 46 p. Julkaisematon.
54. Nurmikolu, A. (2007). Betoniratapölkkyjen toistokuormitustestaus erilaisilla tukikerroksilla. Tampere 2007. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden laitos. 47 s. + liitt. 12 s. Julkaisematon.
55. Burrow, M., Teixeira, P. F., Dahlberg, T. & Berggren, E. (2009). Track Stiffness Considerations for High Speed Railway Lines. In: Scott, N. P. (ed.). *Railway Transportation: Policies, Technology and Perspectives*. 2009. Nova Science Publishers. pp. 303-354.
56. Schmid, F. (ed.). *Best Practice in Wheel-Rail Interface Management for Mixed Traffic Railways*. First Edition. Birmingham 2010. University of Birmingham Press, A & N Harris. 500 p.

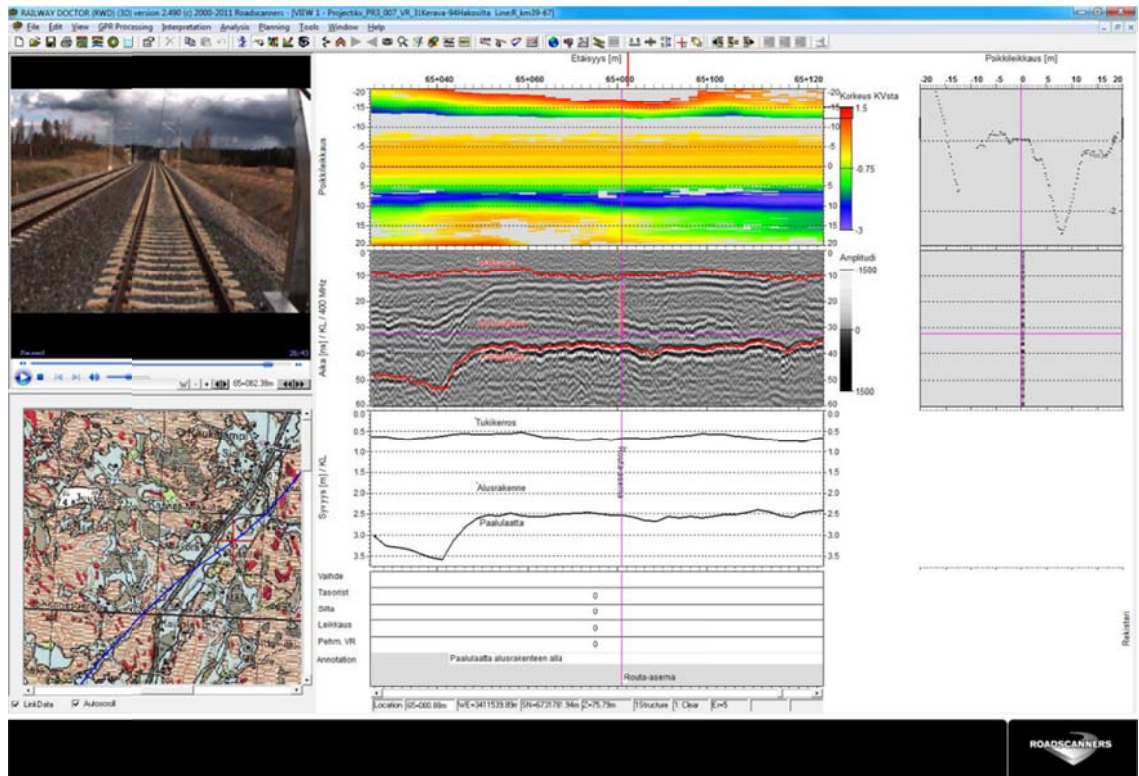
57. Thompson, D. & Jones, C. (2006). Noise and Vibration from Railway Vehicles. In: Iwnicki, S. (ed.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics. London 2006. Chemical Rubber Company (CRC) Press, pp. 279-325.
58. Grönblom, A. (2005). Ratarakenteen mallintaminen BOEF-teorian mukaan. Rata-tekniikkaseminaari 11.3.2005. 44 s. Julkaisematon.
59. Zarembski, A. M. & Choros, J. (1980). On the Measurement and Calculation of Vertical Track Modulus. Proceedings of American Railway Engineering Association (AREA). Bulletin 675. Vol. 81. pp. 156-173.
60. Read, D., Chrismer, S., Ebersöhn, W. & Selig, E. (1994). Track Modulus Measurements at the Pueblo Soft Subgrade Site. Washington D.C. Transportation Research Record 1470. pp. 55-64.
61. Cai, Z., Raymond, G. P. & Bathurst, R. J. (1994). Estimate of Static Track Modulus Using Elastic Foundation Models. Washington D.C. Transportation Research Record 1470. pp. 65-72.
62. INNOTRACK –project. (2006). Methods of track stiffness measurements. Viitattu: 20.7.2011. Saatavilla:
http://www.innotrack.net/IMG/pdf/d2111-f3-methods_of_track_stiffness_measurements.pdf
63. Luomala, H. (2010). Ratapenkereiden monitorointi. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. 85 s. + liitt. 10 s.
64. Brough, M., Stirling, A., Ghataora, G. & Madelin, K. (2003). Evaluation of railway trackbed and formation: a case study. NDT & E International. Vol. 36. No. 3. pp. 145-156
65. Burrow, M. P. N., Chan, A. H. C. & Shein, A. (2007). Deflectometer-based analysis of ballasted railway tracks. Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering. Vol. 160. No. 3. pp. 169-177.
66. RSSB, Rail Safety & Standards Board. The effect of track stiffness on track performance. Project brief (T372). 4 p.
67. Kim, D., Kim, S. & Lee, J. (2006). Easy Detection and Dynamic Behavior of the Unsupported Sleepers in High Speed Ballasted Track. 7th World Congress on Railway Research, Montreal, Canada, 4-8 June 2006. 8 p.
68. Zarembski, A. M., McConnell, D. P. & Lovelace, W. S. (1980). New Car for Measurement and Evaluation of Gage-Widening Resistance of Track. Proceedings of American Railway Engineering Association (AREA). Bulletin 678. Vol. 81. pp. 402-429.
69. Li, D., Thompson, R., Marquez, P. & Kalay, S. (2002). Development and Implementation of a Continuous Vertical Track Support Testing Technique. TRB 2003 Annual Meeting. 20 p.

70. Fröhling, R., D. (1997). Deterioration of railway track due to dynamic vehicle loading and spatially varying track stiffness. Eng.D Thesis. University of Pretoria, Faculty of Engineering. 149 p.
71. Mäkynen, A. (2000). Position-sensitive devices and sensor systems for optical tracking and displacement sensing applications. Eng.D Thesis. Oulu 2000. University of Oulu, Department of Electrical Engineering. 125 p.
72. Pinto, N. M. P., Ribeiro, C. A., Mendes, J. & Calçada, R. (2009). An optical system for monitoring the vertical displacements of the track in high speed railways. 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Portugal, 20-24 July 2009. 9 p.
73. Hamamatsu webpage, Position Sensitive Detectors, Catalog 2/2010. Viitattu: 28.7.2011. Saatavilla:
http://sales.hamamatsu.com/assets/pdf/catsandguides/psd_kpsd0001e05.pdf
74. Hendry, M. T. (2007). Train-induced dynamic response of railway track and embankments on soft peaty foundations. Eng.D Thesis. Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada. 101 p. 13 app.
75. Silva, F. C. M., Paiva, C. E. L. & Aguiar, P. R. (2007). Evaluation of track / Ballast behavior under increased axle load: Measuring deflections on track. International Heavy Haul Conference (IHHA), Proceedings of Specialist Technical Session, Kiruna, Sweden, 11-13 June 2007. pp. 31-38.
76. Valasti, P. (2002). Moderni seisminen mittausysteemi. Helsingin yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. 82 s. + liitt. 13 s.
77. Bowness, D., Lock, A. C., Powrie, W., Priest, J. A. & Richards, D. J. (2007). Monitoring the dynamic displacements of railway track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. Vol. 221. No. 1. pp. 13-22.
78. Priest, J. A. & Powrie, W. (2009). Determination of Dynamic Track Modulus from Measurement of Track Velocity during Train Passage. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Vol. 135. No. 11. pp. 1732-1740.
79. Luomala, H. (2008). Tutkimus raiteen toiminnasta siltojen päätyenkereellä. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteet. 18 s. Julkaisematon.
80. Luomala, H. (2009). Siltapäätymittaukset välillä Pännäinen-Kokkola ja Tuomioja-Liminka. Tampereen teknillinen yliopisto, Maa- ja pohjarakenteiden yksikkö. 28 s. Julkaisematon.
81. Sustained Performance of Railway Tracks (SUPERTRACK). (2005). Final report by CEDEX, Instrumentation, monitoring and physical modeling of high-speed line. 34 p.
82. Halttunen, J. Anturit. (2001). Tampereen teknillinen korkeakoulu. Luento moniste. 171 s.

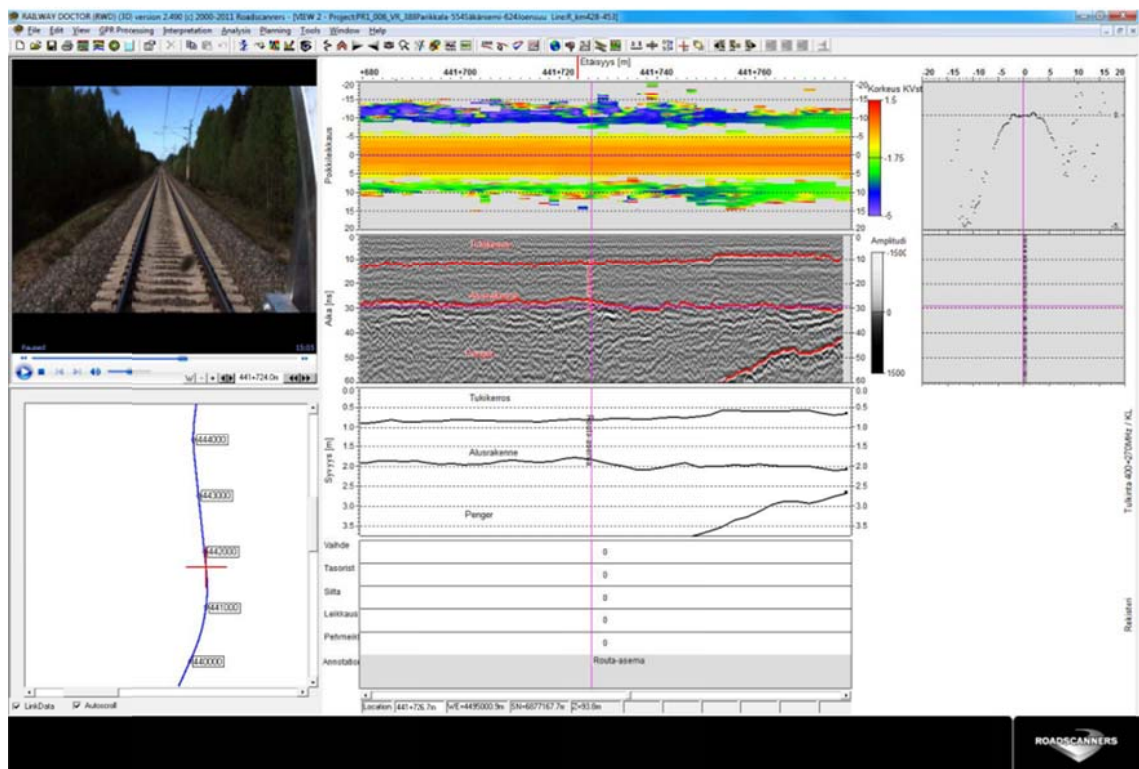
83. Macro Sensors. (2003). LVDT Basics. Technical Bulletin 0103. 4 p.
84. Anderson, J. S. & Rose, J. G. (2008). In-Situ Test Measurement Techniques Within Railway Track Structures. Proceedings of ASME/AIIEE/ASCE Joint Rail Conference, Wilmington, Delaware, USA, April 2008. 21 p.
85. Gräbe, H. (2009). Track deflection measurement using particle image velocimetry. Civil Engineering: Magazine of the South African Institution of Civil Engineering. Vol. 17. No. 4. pp. 18-22.
86. White, D. J., Take, W. A. & Bolton, M. D. (2003). Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. Géotechnique. Vol. 53. No. 7. pp. 619-631.
87. VR Track Oy:n internetsivut. Radantarkastus. Viitattu: 1.3.2012. Saatavilla: <http://www.vrtrack.fi/fi/index/kalusto/radantarkastus.html>
88. Plasser & Theurer. Esitemateriaali. Track recording cars. Efficient monitoring of the track geometry quality for cost-efficient maintenance strategies.
89. SFS-EN 13848-1 + A1. Kiskoliikenne. Rata. Ratageométrian laatu. Osa 1: Ratageométrian kuvaus = Railway applications. Track. Track geometry quality. Part 1: Characterisation of track geometry. Helsinki 2008, Suomen Standardisoimisliitto. 25 s. + liitt. 1 s.
90. Berggren, E. (2005). Dynamic Track Stiffness Measurement – A New Tool for Condition Monitoring of Track Substructure, Licentiate Thesis, Report TRITA AVE 2005:14, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm 2005. 85 p.
91. Hosseingholian, M., Froumentin, M. & Robinet, A. (2011). Dynamic Track Modulus from Measurement of Track Acceleration by Portancemetre. Proceedings of 9th World Congress on Railway Research (WCRR), Lille, France, 22-26 May 2011. 12 p.
92. Li, D., Thompson, R. & Kalay, S. (2002). Development of Continuous Lateral and Vertical Track Stiffness Measurement Techniques. Proceedings from Railway Engineering, London 2002.
93. Wangqing, W., Geming, Z., Kaiming, L. & Lin, L. (1997). Development of inspection car for measuring railway track elasticity. Proceedings from 6th International Heavy Haul Conference, Cape Town 1997.
94. Norman, C., Farritor, S., Arnold, R., Elias, S.E.G., Fateh, M. & Sibaie, M. E. (2004). Design of a System to Measure Track Modulus from a Moving Railcar. Proceedings from Railway Engineering, London 2004. 25 p.
95. Berggren, E. (2005). The Role of Vertical Track Stiffness Measurements in Condition Based Maintenance of Railway Tracks – A Pilot Study. 45 p.
96. SBB:n internetsivut. Viitattu: 3.5.2012. Saatavilla: <http://www.sbb.ch/en/corporation/sbb-as-business-partner/offers-for-rus/measurement-and-diagnostic-technology.html>

97. Sussmann, T. R. (2007). Track Geometry and Deflection from Unsprung Mass Acceleration Data. Proceedings from Railway Engineering Conference, London 2007.
98. Rasmussen, S., Krarup, J. A. & Hildebrand, G. (2002). Non-contact Deflection Measurement at High Speed. 6th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, 24-26th June, 2002 Lisbon, Portugal. 8 p.
99. Greenwood Engineering (GE) internetsivut. Traffic Speed Deflectometer. Viitattu: 15.5.2012. Saatavilla: <http://www.greenwood.dk/tsd.php>
100. Liikenneviraston www-sivut. Rataverkon keskeiset ominaisuudet 31.12.2010. Suomen rataverkko. Viitattu: 3.11.2011. Saatavilla: http://portal.liikennevirasto.fi/portal/page/portal/f/liikennevirasto/tilastot/vaylatilastot/rataverkko_keskeiset_ominaisuudet/Suomen%20rataverkko.pdf
101. Liikennevirasto. (2010). Verkkoselostus 2012. Helsinki 2010. Liikenneviraston väylätietoja 3/2010. 37 s. + liitt. 101 s.
102. Sampaala, P. Rautateille asennettujen pyörävoimailmaisimien mittausdata ja pyörävoiman raja-arvot. Diplomityö. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan koulutusohjelma. 100 s. + liitt. 35 s.
103. Lopez Pita, A., Teixeira, P. F. & Robuste, F. (2004). High speed and track deterioration: The role of vertical stiffness of the track. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 2004. Vol 218. pp. 31-40.

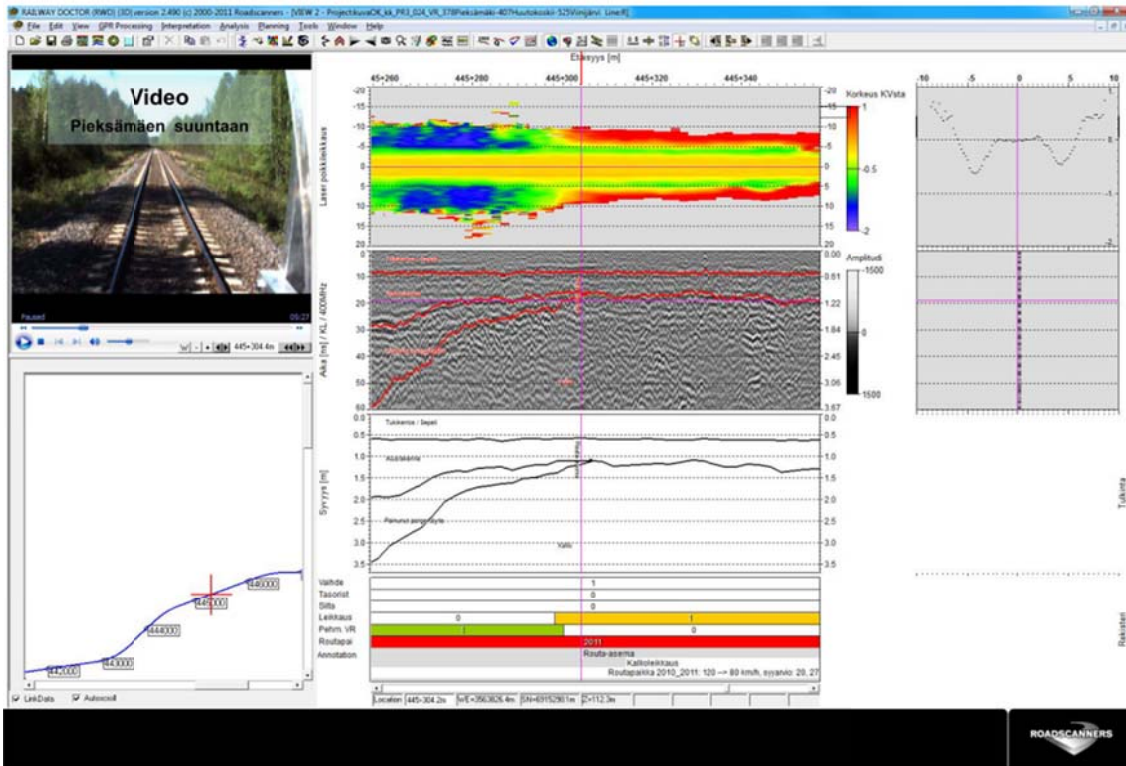
Routa-asema Mäntsälä km 65+030



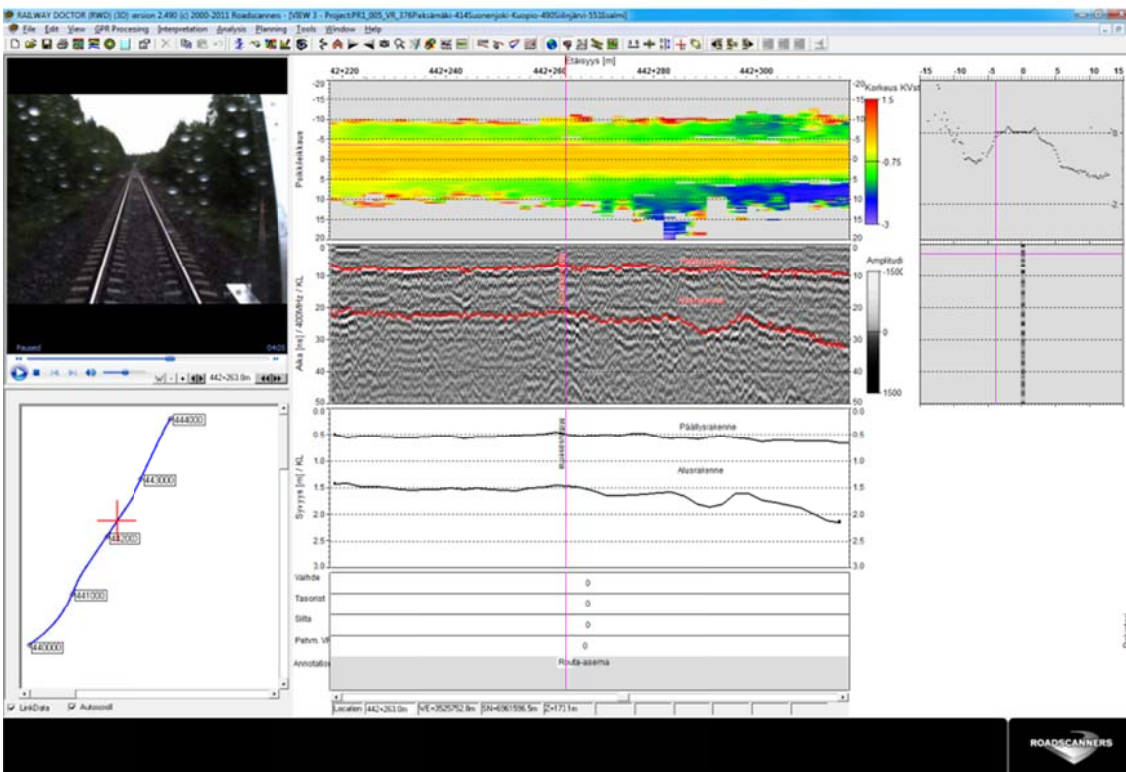
Routa-asema Kesälahti km 441+727



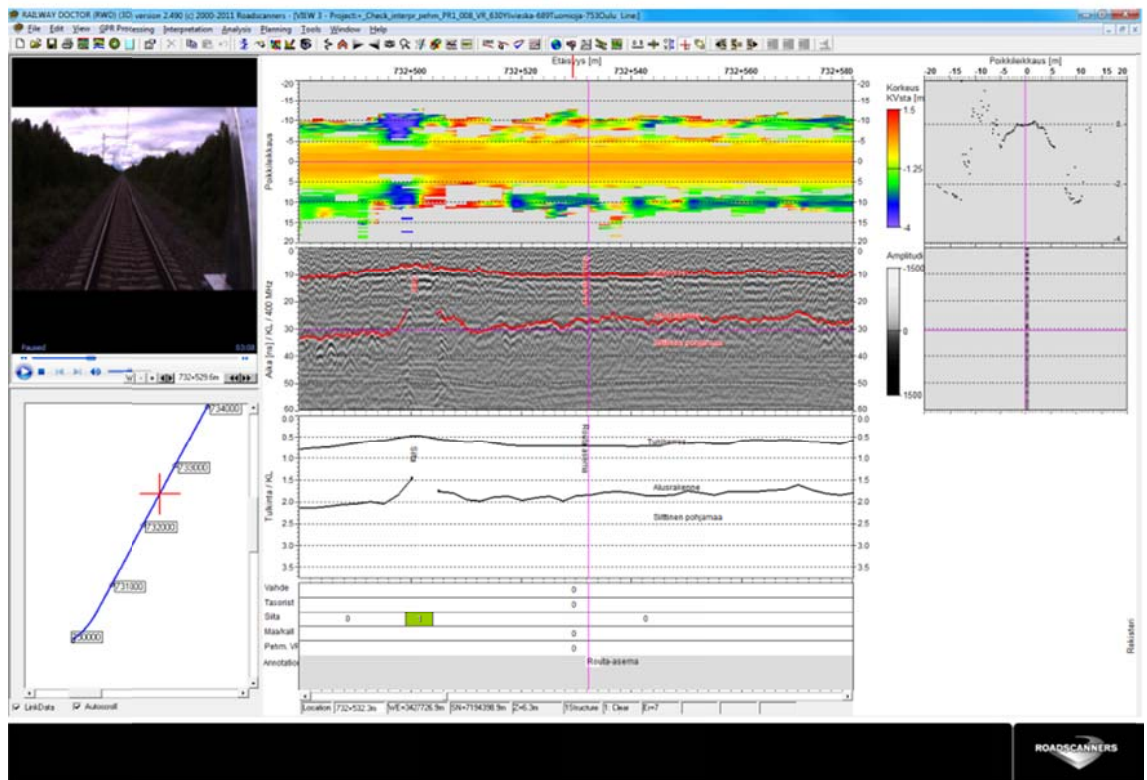
Routa-asema Varkaus-Heinävesi km 445+303



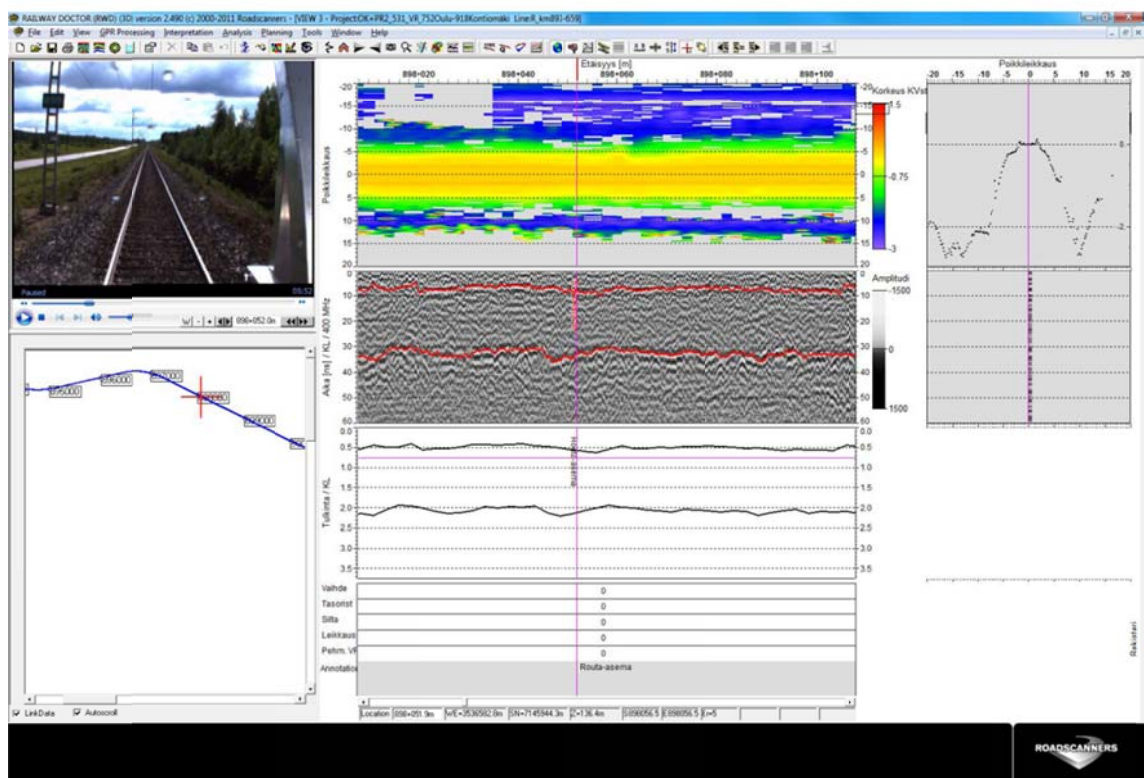
Routa-asema Airaksela km 442+263



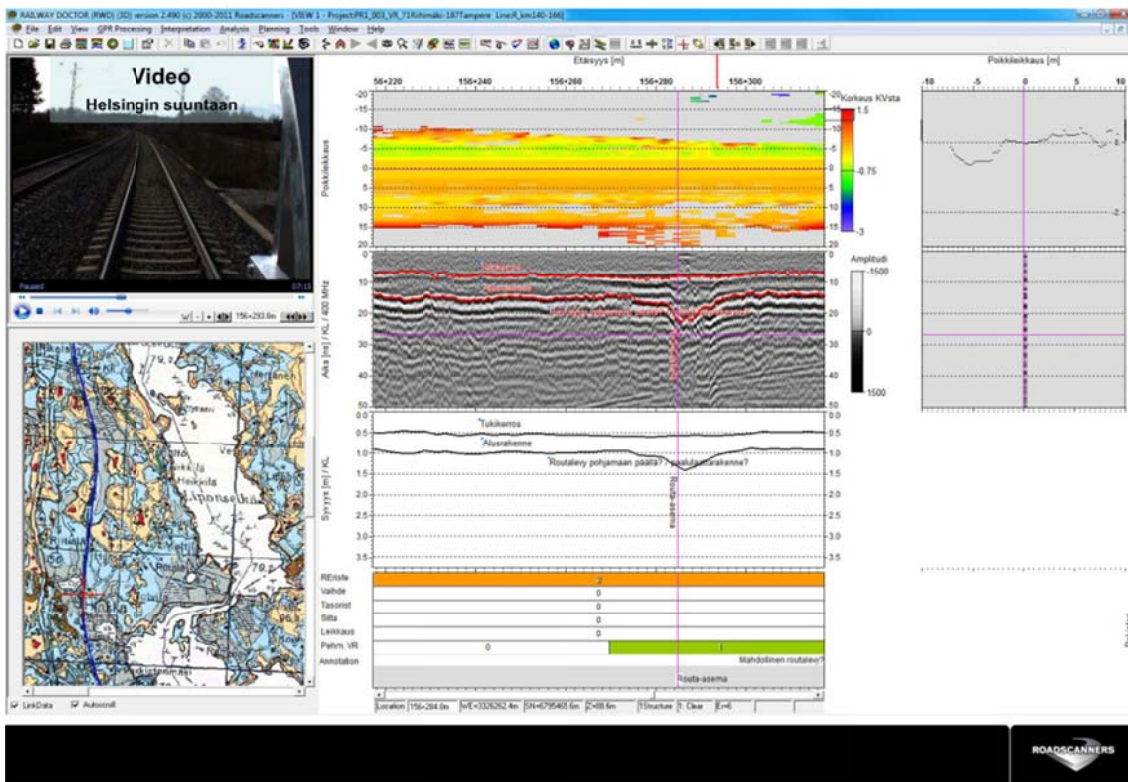
Routa-asema Liminka km 732+483



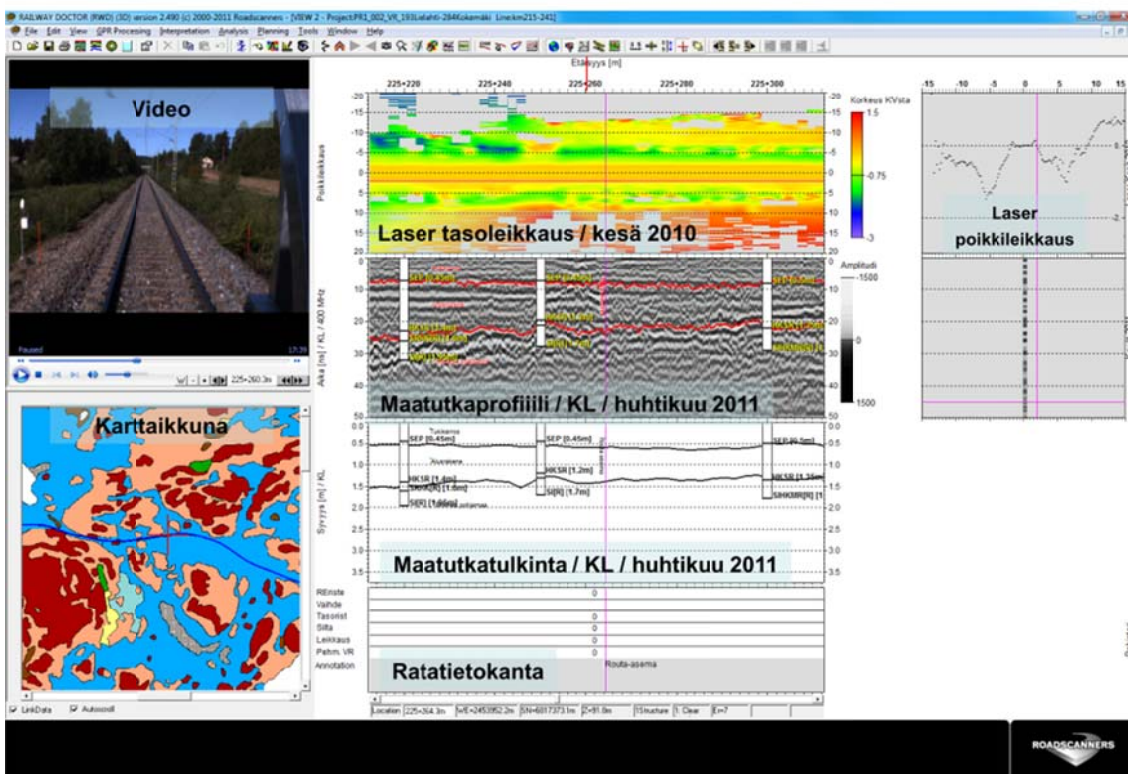
Routa-asema Paltamo km 898+050



Routa-asema Viiala km 156+285



Routa-asema Karkku km 225+264

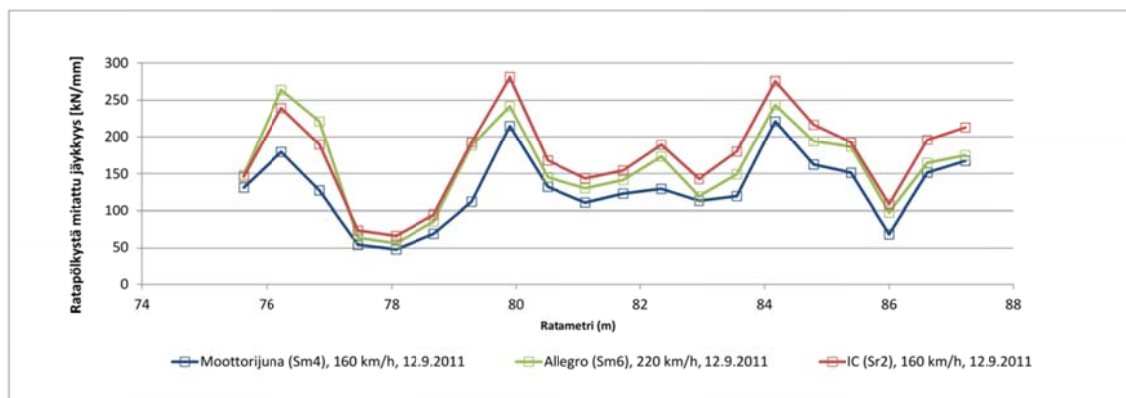


Geometria	Mäntsälä - Sipilä, 65+079	Kesälahti - Puhos, 441+725	Varkaus - Heinävesi, 445+300	Airaksela - Kurkimäki, 442+260	Kangas - Oulainen, 648+200	Liminka - Kempele, 732+527	Kivesjärvi - Paitamo, 898+051	Viiala - Mattila, 156+291	Suomiemi - Karkku, 225+266	Vihanti - Tuomioja, 687+400 / 689+700	Hirvineva - Liminka, 718+420 / 719+300
Vaakageometria	Loiva kaarre	Kaarre	Suora	Suora	Suora	Suora	Suora	Kaarre	Siirtymäkaari	Suora / Suora	Suora / Suora
Pystygeometria	Viittää lounaaseen	Viittää pohjoiseen	Viittää länteen	Viittää pohjoiseen	Viittää etelään	Tasainen	Viittää itään	Viittää pohjoiseen	Viittää itään	Pohjoiseen/Etelään	Etelään / Etelään
Poikkileikkaus	Leikkaus	Penger, korkeus 5 m	Leikkaus	Penger, matalahko	Penger, noin 2 m	Penger, 3,8 m	Penger	Lähies tasamaalla	Penger	Lähies tasamaalla	Penger, noin 2 m
Päällysrakenneluokka	D	C ₂	C ₂	C ₂	D	D	C ₁	D	C ₁	D	D
Kiskotyypit	60 EI	54 EI	54 EI	54 EI	60 EI	60 EI	54 EI	60 EI	54 EI	60 EI	60 EI
Kiinnitysjärjestelmä	Vossloh SKI 14	Vossloh SKI 14	Vossloh SKI 14	Vossloh SKI 14	Vossloh SKI 14	Vossloh SKI 14	Hey Back	Pandrol e-clip	Pandrol e-clip	Vossloh SKI 14	Vossloh SKI 14
Pölkkytyyppi	BP99-04	B97-03	B97-02	B97-03	B97-03	BP99-01	Puu	BP89	B75	BP99-03 / B97-01	BP99-00/-01
Välilevy	Zw 900 NT _s	Zw 900 NT _s	Zw 900 NT _s	Zw 900 NT _s	Zw 900 NT _s	Zw 900 NT _s	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa	Zw 900 NT _s	Zw 900 NT _s
Tukikerros paksuus [mm]	550	600	600	500	Ei tietoa	900	550	650	700	Ei tietoa	Ei tietoa
Alusrakenne-kerros paksuus [mm]	2000	1000	600	700	Ei tietoa	500	1450	450	450	Ei tietoa	Ei tietoa
Alusrakennemateriaali	KaM	srHk	srHkMir	srHk	Sr	Hk	Hk	srHkMir	srHkMir	Ei tietoa	Hk / Sr
Rakennekerros paksuus yhteensä [mm]	2550	1600	1200	1200	noin 1700	1400	2000	1100	1150	1500-2000 / 1500	2000 / Ei tietoa
Pengertäytet paksuus [mm]	-	4000 (arvio)	-	-	-	-	-	-	Ei tietoa	-	-
Pengertäyttemateriaali	-	siHKMir	-	-	-	hkSiMir	-	-	Si	-	-
Routalevy: paksuus, materiaali ja sijainti	-	-	-	50 mm, EPS, tukikerroksen alla	-	50 mm, EPS, tukikerroksen alla	-	100 mm, XPS, alusrakenteen alla	-	Ei tietoa	Ei tietoa
Kerros paksuus [m]	0,6	Ei tietoa	0 - 0,2	Ei tietoa	0,2 + >1,3	8,5 + >6,4	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa	2 + >2 / 1,5 + >2	4 + 1 / >5
Maalaji	HkMir (kivinen)	Melko kantava	Mr	siHKMir	Si + HKMir	IJSI + siHK	HkMir	siHKMir	Sa	Tv + Hk / Tv + Hk	Tv + HKMir / HKMir
Tiivis pohjamaakerroksen etäisyys [m] ³	0	Ei tietoa	0	Ei tietoa	0,2	Ei tietoa	0	0	Ei tietoa	3 / 1,5	5 / 0
Kallio pinnan etäisyys [m] ⁴	0,6	Ei tietoa	0 - 0,2	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa	3,1-5,8	Ei tietoa	Ei tietoa	Ei tietoa
Roudan syvyys, 2/2012 [m]	1,6	1,8	1,1	0,85	1,3	1,4	1,4	0,8	1,2		
Syksyn 2011 mittaukset	12.9.2011	13.9.2011	13.9.2011	14.9.2011	14.9.2011	15.9.2011	16.9.2011	29.9.2011	29.9.2011	31.8.2011	29.8.2011
Kiihtyvyyssanturit	20 kpl/12G	20 kpl/12G	20 kpl/12G	20 kpl/12G	20 kpl/12G	18 kpl/12G	20 kpl/12G	20 kpl/12G	18 kpl/12G	12/12G / 8/12G + 4/3G	12/3G / 12/12G
Siirtymäanturit	0	2	2	2	0	2	2	3	2	4 / 4	4 / 4
Videokamerakuvaus	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Ei / Kyllä	Ei / Kyllä
Mitattujen peräkkäisten ratapölkkyjen määrä ⁵	20	17	17	17	20	15	17	15	15	12	12
Talven 2012 mittaukset	28.2.2012	9.2.2012	8.2.2012	8.2.2012	6.2.2012	7.2.2012	7.2.2012	29.2.2012	29.2.2012	Ei talvimittauksia	Ei talvimittauksia
Kiihtyvyyssanturit	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G	20/12G + 4/3G		
Mitattujen peräkkäisten ratapölkkyjen määrä ⁵	48	16	16	16	16	16	16	16	16		

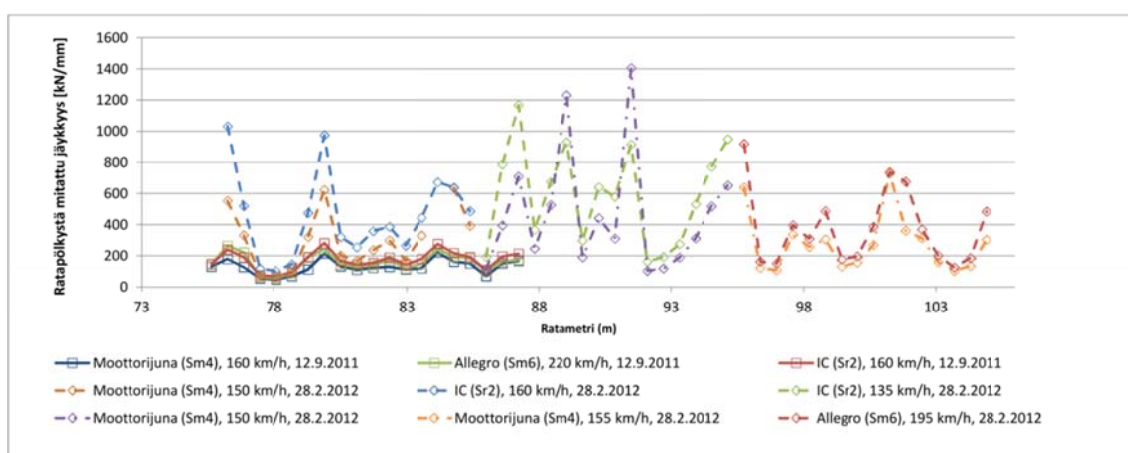
³ Mittauksella tarkoitetaan tässä kiihtyvyyssanturimittauksia.

⁴ Etäisyys on ilmoitettu etäisyydenä alusrakenteen alapintaan.

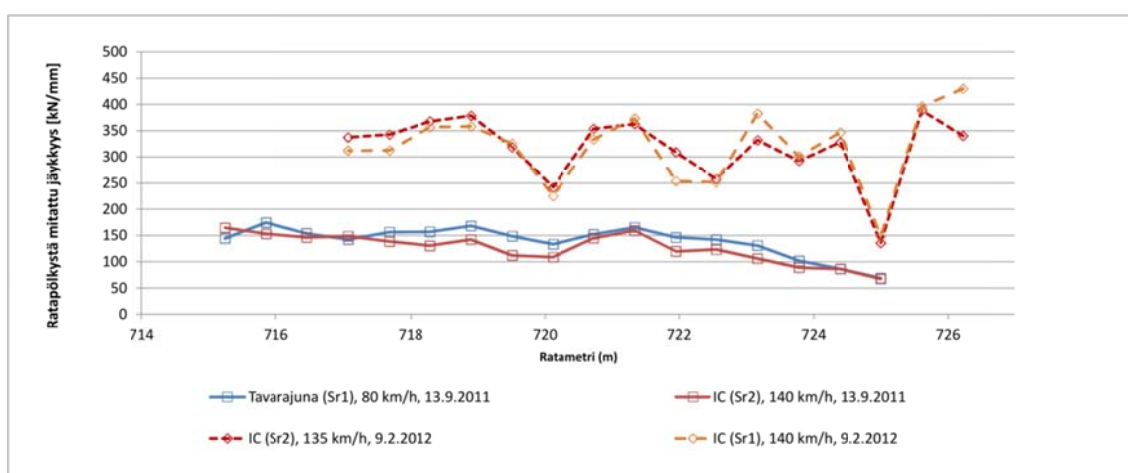
⁵ Tyypillisesti kyseisen kiinnitysjärjestelmän kanssa käytettävä välilevy RATO 11 "Radan päällysrakenne" mukaan.



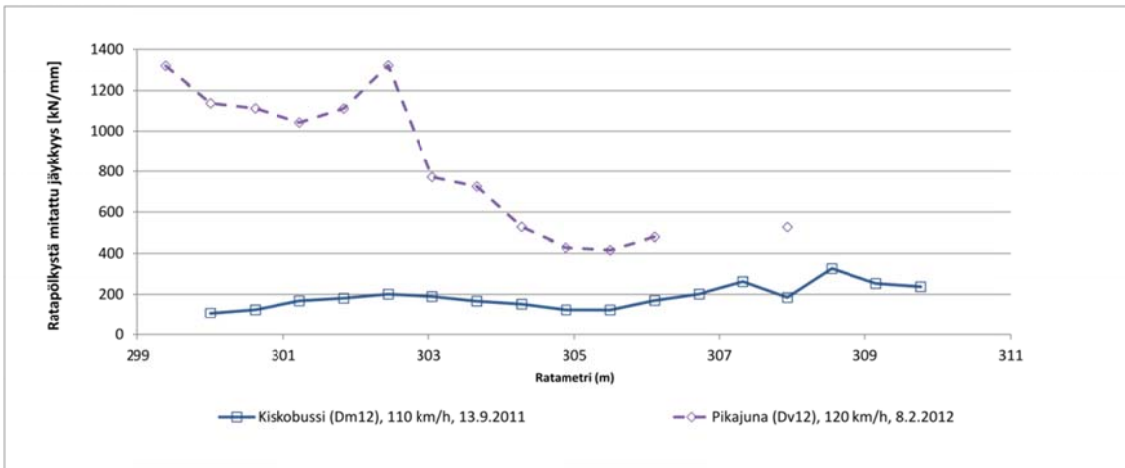
Kuva 1. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 1 Mäntsälä – Sipilä syksyllä 2011.



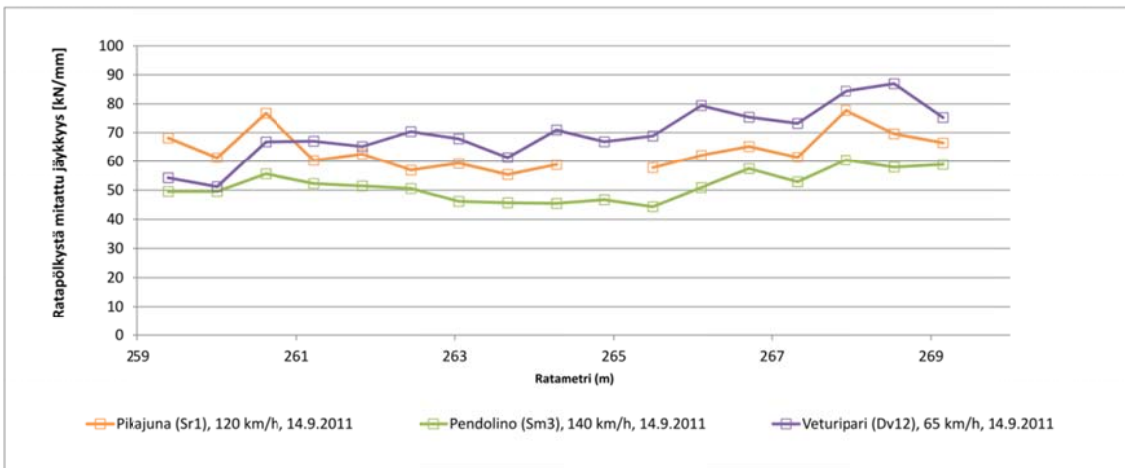
Kuva 2. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 1 Mäntsälä – Sipilä syksyllä 2011 ja talvella 2012.



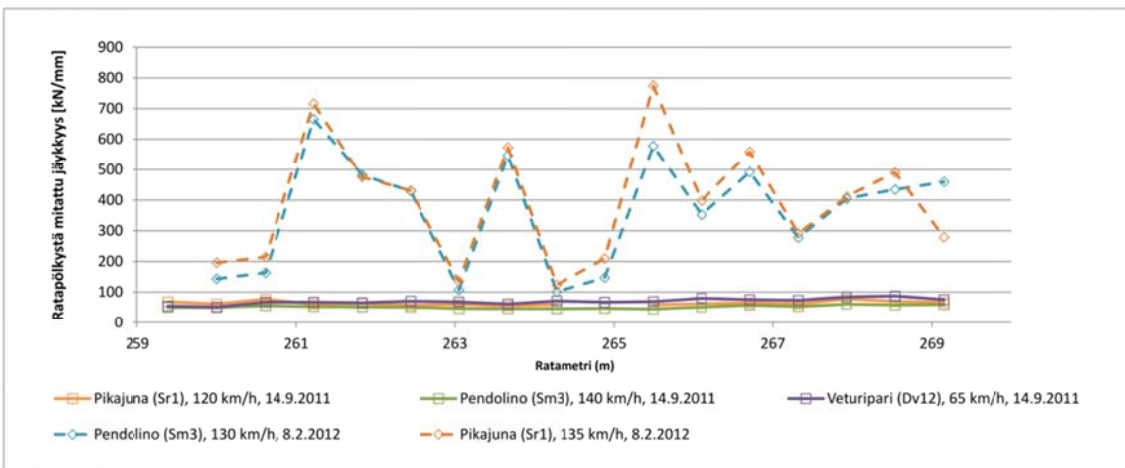
Kuva 3. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 2 Kesälahti – Puhos syksyllä 2011 ja talvella 2012.



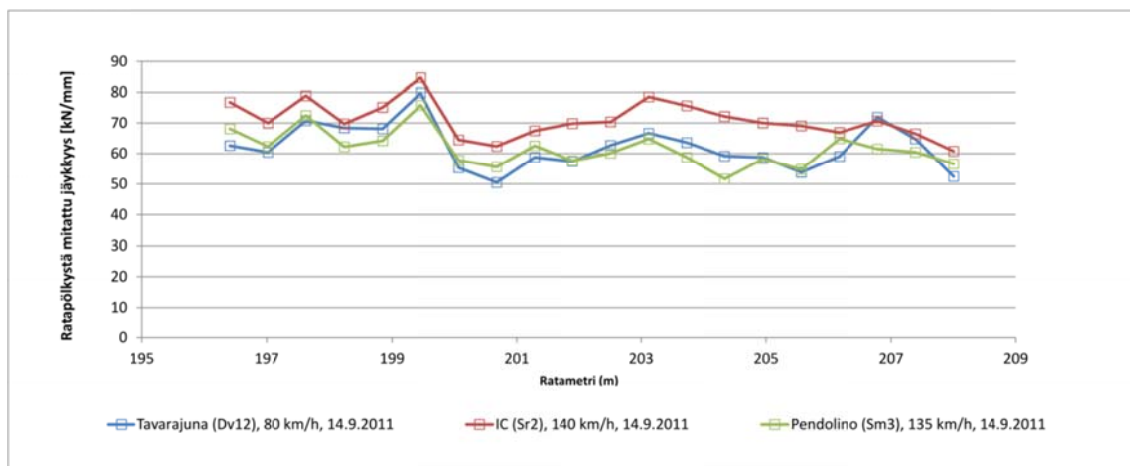
Kuva 4. Yksittäisistä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 3 Varkaus – Heinävesi syksyllä 2011 ja talvella 2012.



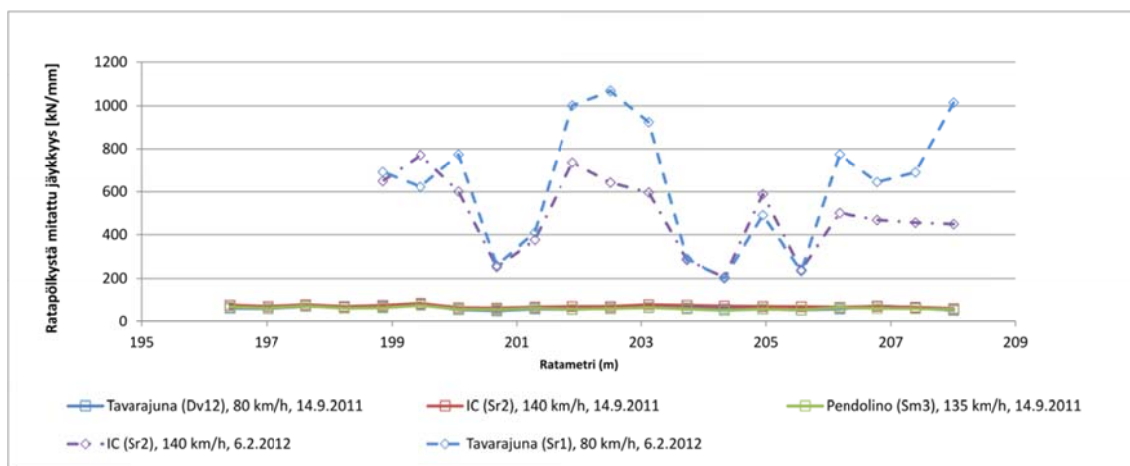
Kuva 5. Yksittäisistä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 4 Airaksela – Kurkimäki syksyllä 2011.



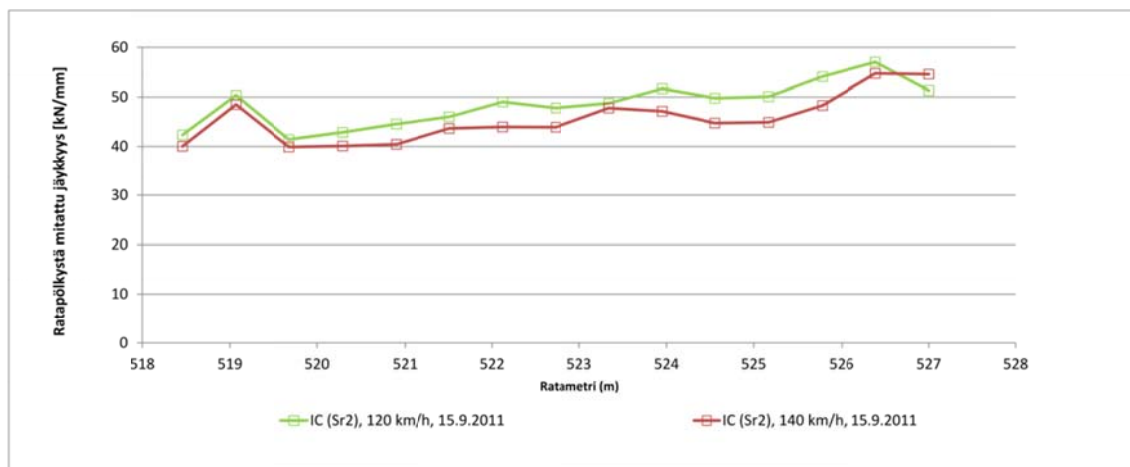
Kuva 6. Yksittäisistä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 3 Airaksela – Kurkimäki syksyllä 2011 ja talvella 2012.



Kuva 7. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 5 Kangas – Oulainen syksyllä 2011.

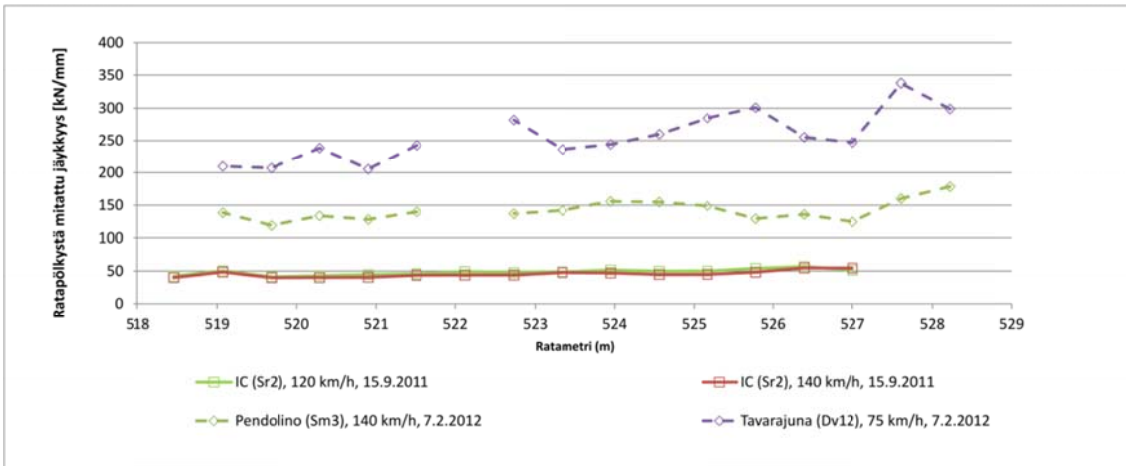


Kuva 8. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 5 Kangas – Oulainen syksyllä 2011 ja talvella 2012.

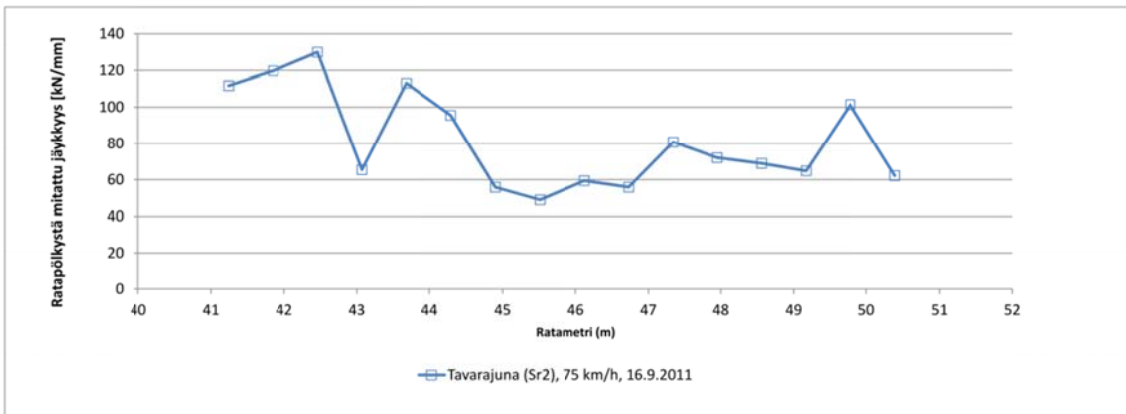


Kuva 9. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 6 Liminka – Kempele syksyllä 2011.

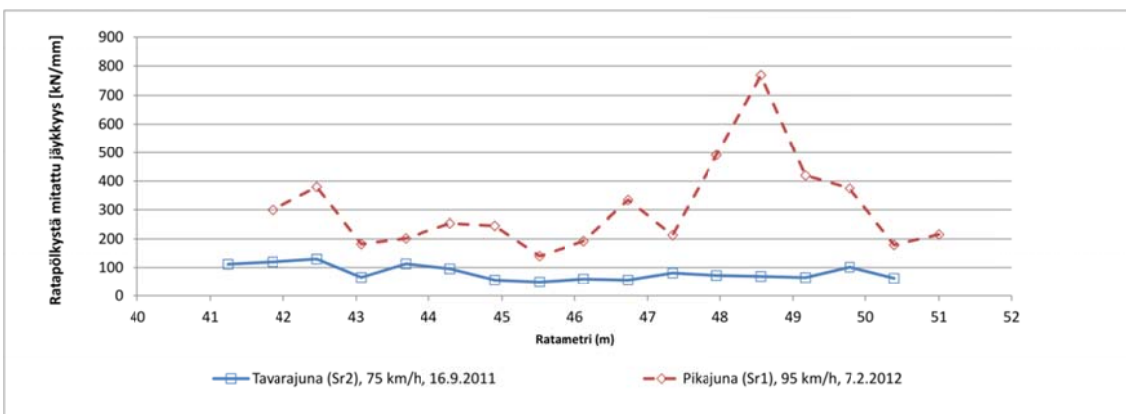
LIITE 3 / 4 (6)



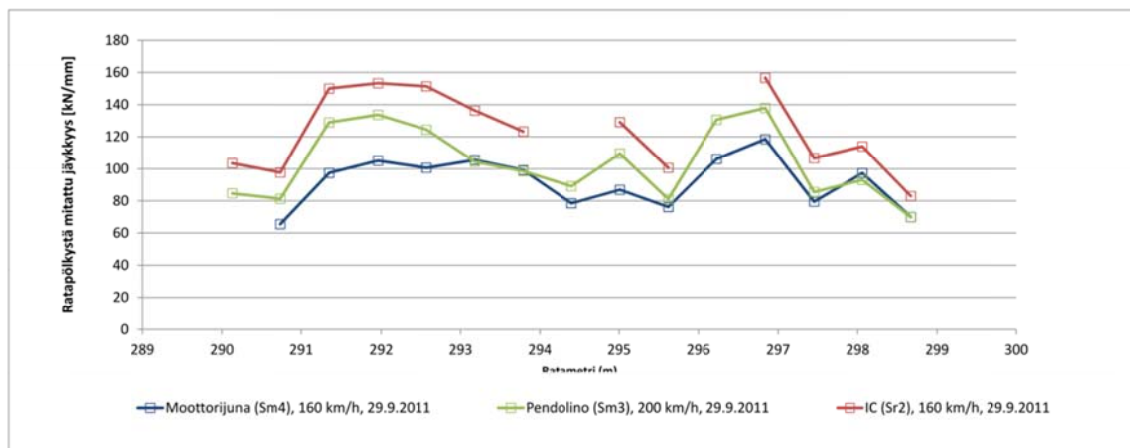
Kuva 10. Yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 6 Liminka – Kempele syksyllä 2011 ja talvella 2012.



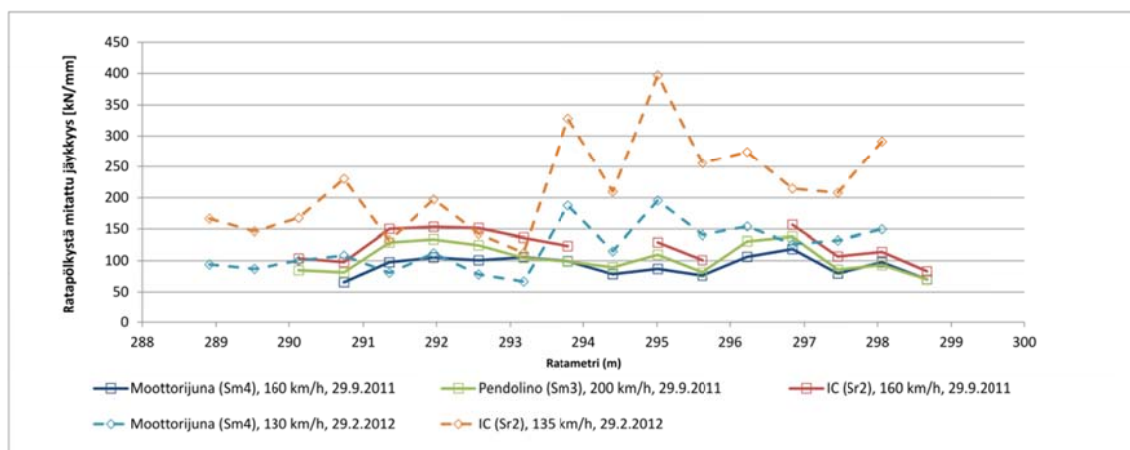
Kuva 11. Yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 7 Kivesjärvi – Palmamo syksyllä 2011.



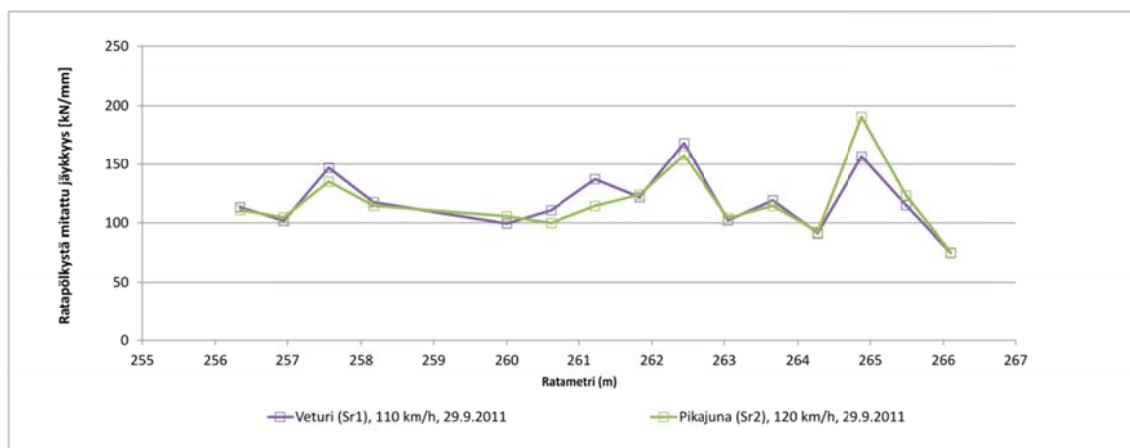
Kuva 12. Yksittäisistä ratapölkkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 7 Kivesjärvi – Palmamo syksyllä 2011 ja talvella 2012.



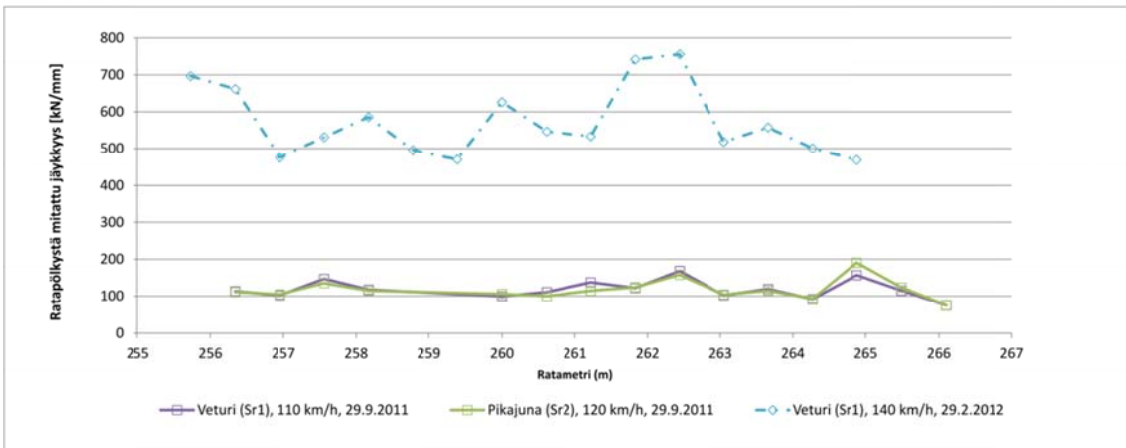
Kuva 13. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 8 Viiala – Mattila syksyllä 2011.



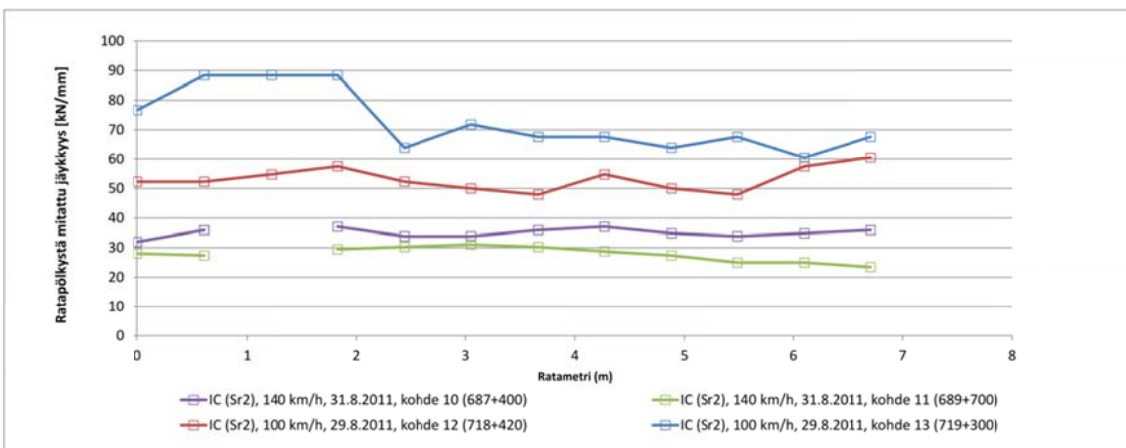
Kuva 14. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 8 Viiala – Mattila syksyllä 2011 ja talvella 2012.



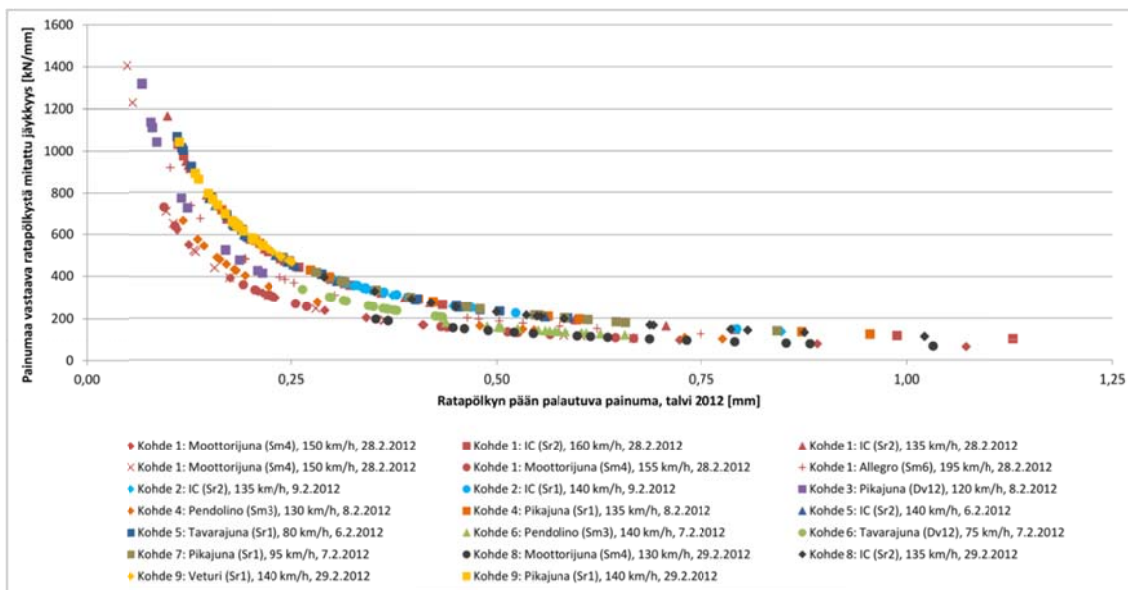
Kuva 15. Yksittäisistä ratapolkyistä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 9 Suoniemi – Karkku syksyllä 2011.



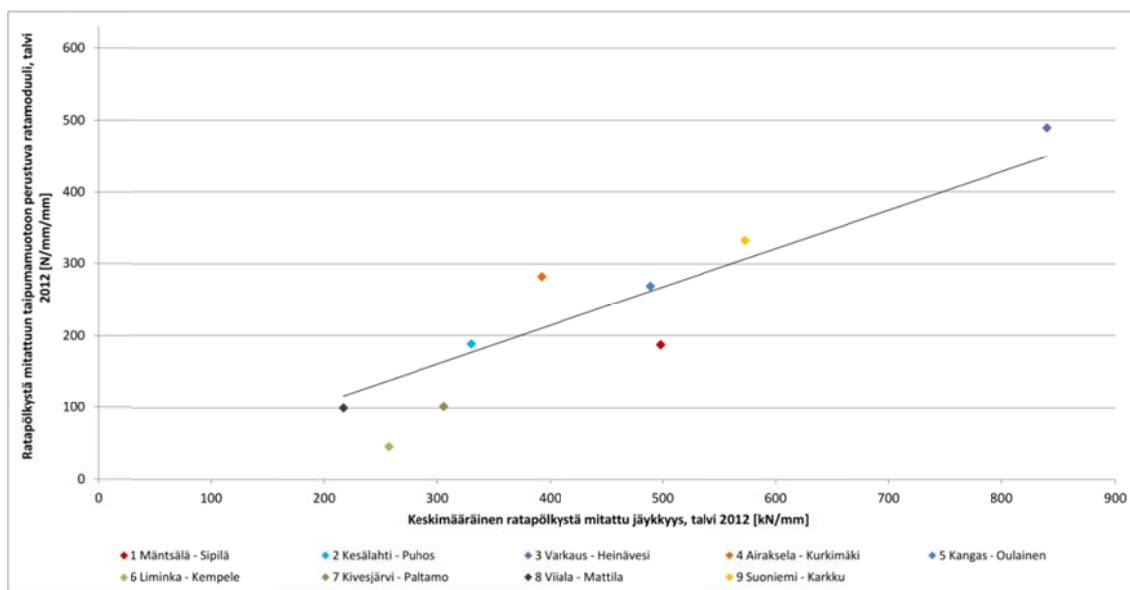
Kuva 16. Yksittäisistä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet kohteessa 9 Suoniemi – Karkku syksyllä 2011 ja talvella 2012.



Kuva 17. Yksittäisistä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet kohteissa 10-11 Vihanti – Tuomioja ja 12-13 Hirvineva – Liminka syksyllä 2011. Kunkin kuvaajan selitteessä annettu kohdekohtainen ratakilometri sijaitsee kuvassa ratametrillä 0.



Kuva 1. Kohteissa 1-9 talvella 2012 mitatut eri kalustotyyppien aiheuttamat ratapölkkyjen pään palautuvat painumat ja painumia vastaavat yksittäisestä ratapölkystä mitatut radan jäykkyydet.



Kuva 2. Keskimääräisen yksittäisestä ratapölkystä mitatun radan jäykkyyden ja ratapölkystä mitattuun taipumamuotoon perustuvan ratamoduulin välinen korrelaatio talven 2012 mittaustulosten perusteella.

