

Riku Varis

Vaihderakenteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisuvaihtoehdot



Riku Varis

Vaihderakenteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisuvaihtoehdot

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 9/2017

Liikennevirasto
Helsinki 2017

Kannen kuva: Riku Varis

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-359-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Riku Varis: Vaihderakenteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät ongelmat ja niiden ratkaisuvaihtoehdot. Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2017. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 9/2017. 86 sivua ja 3 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-359-0.

Avainsanat: Vaihde, elastisuus, jäykkyysoongelmat, ratkaisuvaihtoehdot

Tiivistelmä

Tässä raportissa keskitytään Suomessa käytettävien vaihderakenteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyviin ongelmiin ja niiden ratkaisuvaihtoehtoihin. Työn päätavoitteena on saada selville, mitkä tekijät vaikuttavat eniten jäykkyyden vaihtumiseen vaihteen eri kohdissa. Tämän lisäksi raportissa käydään läpi myös junakuorman aiheuttamaan radan joustoon liittyviä asioita.

Raportti koostuu kirjallisuusselvityksestä, kunnossapitäjien haastatteluista sekä projektin aikana valittujen koevaihteiden mittaamisesta, tulosten esittelystä ja analysoinnista. Kirjallisuusselvitys-osiossa käydään läpi yksityiskohtaisesti nykyisen vaihderakenteen kaikki komponentit ja niiden vaikutukset rakenteen elastisuudelle. Osiossa keskitytään myös vaihderakenteen epäjatkuvuuskohtien tuomiin kuormitusongelmiin ja kunnossapidon merkitykseen osana vaihteen elastisuuden pysyvyyttä. Näiden havaintojen ja ongelmien vastapainoksi raportissa esitellään maailmalla kehitettyjä ratkaisuja pystysuuntaisen jäykkyyden hallitsemiseksi.

Kirjallisuusselvitys osoittaa, että vaihderakenne on erikoiskomponenttiansa takia merkittävästi normaalia linjaosuutta jäykempi ja tämä aiheuttaa epätoivottua muutosta rataan kohdistuviin kuormituksiin ja sitä kautta koko rakenteen elinkaareen. Jäykkien komponenttien lisäksi vaihteen epäjatkuvuuskohdat altistavat kielisovitus- ja risteysalueen voimakkaalle kuormituspiikeille, jolloin rakenne muuttuu ajan kuluessa hyvin epätasaiseksi niin jäykyydeltään kuin geometrialtaan.

Projektin aikana toteutetut kunnossapitäjien haastattelut osoittivat, että vaihteiden kunnossapitotavat vaihtelevat hyvin paljon kunnossapitoalueittain ja tähän vaikuttaa hyvin paljon alueen kunnossapitäjien oma kiinnostuneisuus ja ammattitaito. Näitä motivoitumiseen ja ammattitaidon lisääntymiseen liittyviä asioita ja tulisi jatkossa korjata Liikenneviraston toimesta yksikäsitteisemmän ohjeistuksen avulla.

Koevaihteissa toteutettujen mittausten pohjalta saadut tulokset vahvistavat kirjallisuusselvityksen keskeisiä huomioita. Radan palautuvan painuman tuloksissa näkyvät selkeitä viitteitä vaihderakenteen epätasaisesta painumisesta ja elastisuuden muutoksesta vaihdalueelle saavuttaessa. Mittaustulokset osoittavat myös sen, että vaihteen erikoisrakenteista johtuvat raiteen epätasaiset tuentamahdollisuudet vaikuttavat radikaalisti vaihderakenteen palautuvan painuman arvoihin. Lisäksi silmämääräiset havainnot koevaihteista kertovat, että kiskot kuluvat alueellisesti hyvin eri tavalla, jolloin kunnossapidon oikea-aikaisuuden ja ammattitaidon merkitys korostuu vahvasti vaihdealueella.

Riku Varis: Problem relaterade till vertikal styvhet i växelkonstruktioner och möjliga lösningsalternativ. Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2017. Trafikverkets undersökningar och utredningar 9/2017. 86 sidor och 3 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-359-0.

Sammanfattning

I denna rapport koncentrerar vi oss på problem med anknytning till vertikal styvhet i de växelkonstruktioner som används i Finland och alternativa lösningar på sådana problem. Huvudmålsättningen är att klarlägga vilka faktorer som mest påverkar att styvheten skiftar i växelns olika punkter. I rapporten finns också en genomgång av olika saker relaterade till den fjädring hos spåret som tåglasten orsakar.

Rapporten består av en litteraturöversikt, intervjuer med underhållspersonal och mätningar på provväxlar som utsågs under projektets gång, samt presentation och analys av resultat. I avsnittet med litteraturöversikten gör vi en detaljerad genomgång av alla komponenter i den nuvarande växelkonstruktionen och deras inverkan på konstruktionens elasticitet. I avsnittet koncentrerar vi oss också på belastningsproblem som växelkonstruktionen medför och på underhållets betydelse för elasticitetens varaktighet. Som motvikt till dessa observationer och problem presenterar vi i rapporten olika globalt utvecklade lösningar för att behärska vertikal styvhet.

Litteraturöversikten visar att växelkonstruktionen på grund av sina specialkomponenter är betydligt styvare än en normal spårdel och detta orsakar önskad förändring av de belastningar som riktas mot spåret, och därigenom påverkas hela konstruktionens livscykel. Förutom styva komponenter utsätter växelns diskontinuitetspunkter tungplacerings- och korsningsområdet för kraftiga belastningstoppar, vilket medför att konstruktionen med tiden förändras och blir mycket ojämn, både till styvhet och geometri.

De intervjuer med underhållspersonal som genomfördes under projektets gång visade att underhållsmetoderna för växlarna varierar mycket efter underhållsområden, och påverkas i hög grad av det egna intresset och yrkesskickligheten hos områdets underhållspersonal. Dessa till motivering och ökad yrkesskicklighet relaterade faktorer bör i fortsättningen åtgärdas genom Trafikverkets försorg med hjälp av entydigare instruktioner.

Baserat på resultat som erhöles genom mätningar genomförda på provväxlar styrker de centrala observationerna i litteraturöversikten. I resultaten avseende spårets återgående sättning syns tydliga indikationer på ojämn sättning hos växelkonstruktionen och elasticitetsförändringar vid ankomst till växelområdet. Mätresultaten visar också att de av växelns specialkonstruktion beroende ojämna möjligheterna att stötta upp spåret radikalt påverkar värdena för växelkonstruktionens återgående sättning. Dessutom förtäljer visuella observationer av provväxlarna att skenorna slits på mycket olika sätt områdesvis, och då förstärks betydelsen av rätttidigt underhåll och yrkesskicklighet inom växelområdet kraftigt.

Riku Varis: The complications of vertical stiffness of Finnish railway turnout and its countermeasures. Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2017. Research reports of the Finnish Transport Agency 9/2017. 86 pages and 3 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-359-0.

Summary

This report focus on the complications of vertical stiffness of finnish railway turnout and its countermeasures. The main goal of this study is to find out which factors are the most critical when the stiffness of turnout structure is changing throughout the turnout. In addition, the report also concentrates on the elasticity of turnout structure under the train loads.

This report consists of the literature review, interviews of the maintenance people and actual measurement results from the chosen test turnouts. The literature review goes through all the special components of the turnouts structure and clarifys their influence on the elasticity of turnout. This section also consentrates on the problems related to rail discontinuities of a turnout and highlighths the influence of a maintenance for stabilizing the elasticity in the structure. Also countermeasures for controlling this vertical stiffness are introduced.

The literature review points out that the turnout structure is actually stiffer than normal track section and that causes unwanted stresses to the track and has influence on the whole life cycle. Besides the stiff components, the discontinuities on switch area and crossing area are exposing the structure under impact loads which leads to uneven stiffness and track geometry.

The interviews of the maintenance people reveal that the maintenance practices vary quite much in different maintenance contracts and the final result is highly depending on the motivation and expertise of the maintenance crew. In future Finnish Tansport Agency should consentrate on these things by improving and simplifying their technical instructions.

The results of the actual measurements confirm the same observations as the literature review. The track deflection measurement results show clear references of uneven deflection and change of the elasticity comparing to normal track section. Results also reveal that due the uneven tamping the deflection in switch area and crossing area can be radically bigger. The visual inspection done in test turnouts also shows that the rail defect types varies in different areas so the timeliness and expertice of a maintenance people plays a huge role in life cycle of turnout.

Esipuhe

Tämä raportti liittyy Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Rakennustekniikan laitoksella, Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä tehtyyn tutkimukseen, jonka Liikenevirasto on tilannut osana rahoittamaansa Elinkaaritehokas rata -tutkimusohjelmaa.

Tutkimuksen vastuuhenkilöinä ovat yliopistolla olleet tutkija Riku Varis sekä professori Antti Nurmikolu. Liikeneviraston yhteyshenkilöinä asiaan liittyen ovat toimineet Tuomo Viitala, Tuija Myllymäki sekä Markku Nummelin.

Helsingissä helmikuussa 2017

Liikenevirasto
Ratatekninen yksikkö

Sisällysluettelo

1	PROJEKTIN TAUSTA JA TAVOITTEET	9
2	RADAN RAKENNEOSIEN JA VAIHDEKOMPONENTTIEN VAIKUTUS RADAN PYSTYSUUNTAISEEN JÄYKKYYTEEN.....	10
2.1	Radan linjaosuuksien rakenneosat	11
2.2	Vaihteen komponentit	13
2.2.1	Kiskomateriaali.....	14
2.2.2	Vaihteen kielirakenne ja risteysosa	15
2.2.3	Vaihdealuslevy.....	15
2.2.4	Välilevy.....	15
2.2.5	Korkkikumivälilevy.....	16
2.2.6	Kiskon kiinnitysosat	17
2.2.7	Vaihdepölkky.....	18
2.2.8	Yhteenveto.....	19
2.3	Vaihteen epäjatkuvuuskohdat.....	19
2.3.1	Siirtyminen kieleltä tukikiskolle.....	20
2.3.2	Siirtyminen risteysalueen yli	23
2.3.3	Kiskoajokset.....	26
2.3.4	Yhteenveto.....	26
2.4	Teoreettiset jäykkyyalueet.....	27
3	TARKASTUSTEN JA KUNNOSSAPIDON MERKITYS VAIHTEEN JÄYKKYYTEEN	30
3.1	Kunnossapidolliset ongelmakohdat vaihteissa	30
3.1.1	Vaihteen tukeminen.....	30
3.1.2	Vaihteen teräsosien kuluminen	32
3.1.3	Raideruuvien kestävyys	36
3.2	Kunnossapitäjien haastattelut.....	38
4	VAIHDERAKENTEEN JÄYKKYYDEN PARANTAMISVAIHTOEHDOT.....	42
4.1	Elastiset välilevyt koko vaihteen matkalla	42
4.2	Pohjaimet.....	45
4.3	Ontto pölkky	45
4.4	Kielisovitusalueen geometrinen optimointi	46
5	VAIHTEN PYSTYSUUNTAISEN KÄYTTÄYTYMISEN MITTAAMINEN JA HAVAINNOINTI KOEKOHTEISSA.....	49
5.1	Koekohteiden valinta ja esittely	49
5.2	Mittausjärjestelyt koekohteissa.....	54
5.2.1	Vaihteiden palautuvan painuman mittaaminen	55
5.2.2	Sepelin kuntotutkimukset	58
5.2.3	Kiskojen kulumisen sekä vaurioiden tutkinta	58
6	MITTAUSTULOKSET JA ANALYSOINTI.....	61
6.1	Vaihteiden palautuva painuma	61
6.1.1	Kaipiaisten vaihde V213.....	62
6.1.2	Kaipiaisten vaihde V215.....	63
6.1.3	Taavetin vaihde V413.....	64
6.1.4	Taavetin vaihde V 415.....	65

6.1.5	Tampereen vaihde V051.....	66
6.1.6	Tampereen vaihde V062.....	67
6.1.7	Tampereen vaihde V171.....	68
6.1.8	Tampereen vaihde V172.....	69
6.2	Sepelin kunto kohteissa.....	70
6.3	Kiskojen kunto kohteissa.....	72
6.3.1	Kiskon kulumamittaukset.....	72
6.3.2	Vaihteiden raidelevydet ja risteysgeometria.....	73
6.3.3	Kiskon silmämääräiset kuntotutkimukset.....	75
7	YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT.....	82
7.1	Yhteenveto koevaihteiden mittauksista.....	82
	LÄHTEET.....	85

LIITTEET

Liite 1	Välilevyn jännitys-venymäkäyrät
Liite 2	Vaihteen teoreettiset jäykkyyalueet
Liite 3	Vaihteiden raidelevydet

1 Projektin tausta ja tavoitteet

Suomen rataverkolla on tällä hetkellä noin 5500 vaihdetta, joiden turvallisuus ja toimintavarmuus ovat tehokkaan junaliikenteen perusedellytyksiä. Näistä varmistumiseksi vaihderakenteeseen kohdistuu suuri joukko monitahoisia teknisiä vaatimuksia, joiden myötä vaihde on aina merkittävä investointi. Sen myötä vaihteiden elinkaaritaloudellisuus heijastuu vaatimuksiksi pitkästä käyttöiästä ja kunnossapitotarpeen minimoinnista.

Nykyisellään Suomessa käytettävien vaihteiden rakenne on havaittu ongelmalliseksi erityisesti radan pystysuuntaisen jäykkyyden osalta. Elastisuuden vähäisyys vaihdealueella yhdistettynä vaihderakenteiden epäjatkuvuuskohtien aiheuttamiin suuriin dynaamisiin junakuormituksiin on arvioitu radan komponenttien vaurioitumista merkittävästi kiihdyttäväksi tekijäksi. Luonnollisesti tällä on pyörä-kisko-vuorovaikutuksen myötä suora yhteys myös liikkuvan kaluston kulun tasaisuuteen ja vaihteen vaurioitumisen kehittymiseen.

Vaihdealueilla on havaittu rakenteiden vaurioitumista monin eri tavoin. Korostuneiden vaurioiden on arvioitu olevan ensi sijassa seurausta radan liian suuresta jäykkyydestä ja sen aiheuttamasta seurausketjusta. Vaihteissa, erityisesti mangaaniristeyksissä ja kielisovituksissa, on havaittu kiskojen kulumista sekä pintavikoja. Tukikerroksen jauhautuminen ja siitä seuraavat raidegeometrian virheet ovat vaihdealueilla korostunut ongelma, jota lisää tukemisen haasteet tietyissä vaihteen osissa. Myös vaihdepölkkyjen ongelmista on viitteitä. Nämä ongelmat heijastuvat myös kaluston kulun epätasaisuuteen ja radalla syntyvään meluun.

Tämän projektin lähtökohtaisena tavoitteena on tutkia tarkemmin ratarakenteen pystysuuntaista käyttäytymistä vaihdealueella ja selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat eniten jäykkyyden vaihtumiseen vaihteen eri kohdissa. Pelkän rakenteen jäykkyyden muuttamisen lisäksi projektissa pohditaan myös radan jouston muuttumista. Tämä on tarpeellista, sillä vaihteen epäjatkuvuuskohdissa dynaamiset kuormituspiikit lisäävät radan joustoa, vaikka rakenteen jäykkyys pysyisikin vakiona. Radalla tehtävien jäykkyydsmitausten avulla selvitetään päällysrakenteen eri rakennekerrosten ongelmatyypit ja sitä kautta päästään käsiksi jäykkyyso Ongelmien syy-seuraus-suhteeseen. Mittausten rinnalla tuotetaan kirjallisuusselvitys, joka keskittyy maailmalla kehitettyihin ratkaisuihin pystysuuntaisen jäykkyyden hallitsemiseksi. Kirjallisuusselvityksen tuoman tiedon avulla mitattuihin jäykkyyso ngelmiin pystytään tarjoamaan tehokkaita ratkaisuja, jotta tulevaisuudessa tällaisilta ongelmilta vältyttäisiin.

2 Radan rakenneosien ja vaihdekomponenttien vaikutus radan pystysuuntaiseen jäykkyyteen

Radan kokonaisjäykkyyttä määritettäessä on tärkeää ymmärtää, että rata koostuu monesta eri rakenneosasta. Hyvin yleisellä tasolla ratarakenne voidaan jakaa neljään osaan, jotka ovat alusrakenne, tukikerros, ratapölkky ja ratakisko. Jo tämän yleisen jaon perusteella voidaan todeta, että näillä eri rakenneosilla on hyvinkin erilaiset jäykkyysominaisuudet, jotka siis yhdessä muodostavat radan kokonaisjäykkyyden. Näiden edellä mainittujen lisäksi ratarakenne, ja ennen kaikkea vaihde, sisältää monia elastisia komponentteja, jotka muuttavat merkittävästi radan kokonaisjäykkyyttä. Tämän luvun tarkoituksena on perehtyä hieman tarkemmin nimenomaan Suomessa käytettävien 60E1- ja 54E1-vaihteiden rakenneosien jäykkyysominaisuuksiin ja niiden vaikutukseen kokonaisjäykkyyden kannalta. Suomessa on nykyisin käytössä myös pienemmän kiskopainon vaihteita, mutta niitä ei enää asenneta uutena rataa. Vaihderakenteen kehityksen kannalta on siis järkevintä keskittyä näihin kiskoprofiililla 60E1 ja 54E1 varustettuihin vaihteisiin.

Ennen kuin voidaan tutkia tarkemmin yksittäisten rakenneosien vaikutusta radan pystysuuntaiseen kokonaisjäykkyyteen, on hyvä käydä läpi, miten tämä pystysuuntainen jäykkyys radalla määritellään. Radan pystysuuntainen kokonaisjäykkyys ilmoitetaan normaalisti joko suoraan radan jäykkyytenä K (track stiffness) tai ratamoduulina u (track modulus). Radan jäykkyys K määritellään staattisessa tilanteessa jousivakion tapaan yksinkertaisesti kuormittavan voiman ja kiskon taipuman suhteena yhtälön 1 mukaan. (Selig & Li 1994)

$$K = \frac{Q}{y_{max}} \quad (1)$$

missä

K	on	radan (pystysuuntainen) jäykkyys [N/mm]
Q	on	pyöräkuormitus [N]
y_{max}	on	kiskon pystysuuntainen taipuma suoraan kuorman alla [mm]

Radan jäykkyys on siis yleistermi, jolla voidaan kuvata kaikkien rakenneosien vaikutusta jäykkyyteen. Ratamoduuli u voidaan määritellä suoraan radan jäykkyyden avulla yhtälön 2 mukaisesti. (Selig & Li 1994)

$$u = \sqrt[3]{\frac{K^4}{64EI}} \quad (2)$$

missä

u	on	ratamoduuli [N/mm/mm]
E	on	kiskoteräksen kimmomoduuli [MPa]
I	on	kiskon jäyhyysmomentti [mm ⁴]

Kuten yhtälöstä 2 voidaan nähdä, ratamoduuli eroaa radan jäykkyydestä siinä, että se ei ota huomioon lainkaan kiskon vaikutusta jäykkyyteen. Tällöin erilaisten kiskoprofiilien vaikutus häviää ja saadaan ilmoitettua pelkästään kiskon alapuolisen rakenteen jäykköysarvo. Ratarakenteen jäykköyttä muokattaessa korjaavat toimet kohdistuvat yleisesti kiskon alapuoliseen rakenteeseen, jolloin ratamoduuli on sopivampi termi kuvaamaan tilannetta.

Radan jäykköyden tai siitä johdettavan ratamoduulin tarkka määrittäminen ei kuitenkaan ole aivan niin yksinkertaista, kuin se näiden yhtälöiden mukaan näyttää. Peltokangas et al. (2013) on mitannut pölkyn alapuolisen rakenteen jäykköyttä ja näiden mittausten perusteella voidaan muodostaa karkeat jäykköysluokat, jotka on esitetty taulukossa 1. Pölkystä mitatun jäykköyden avulla saadaan arvioitua myös rakenteen kokonaisjäykköyttä yhdistämällä mitattuihin arvoihin rakenteessa käytetyn välilevyn jäykköys, joka on Suomen linjaraitteella noin 100 MN/m.

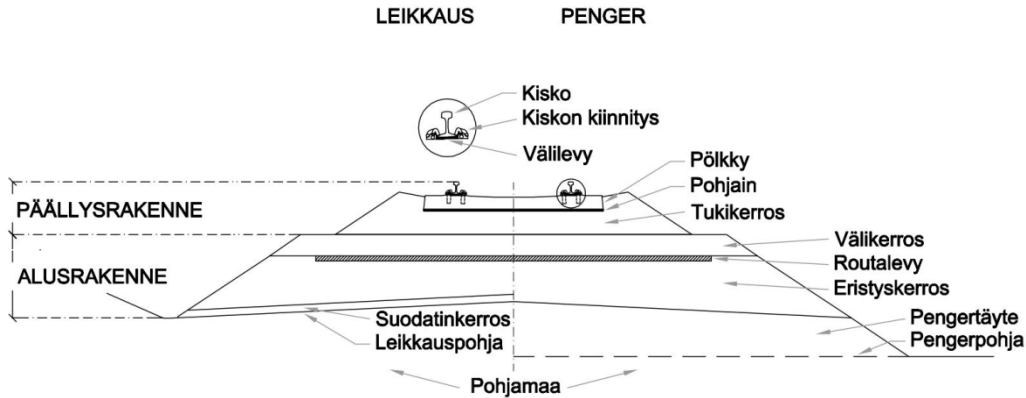
Taulukko 1. Pölkystä mitatun jäykköyden sekä rakenteen kokonaisjäykköyden raja-arvot, kun rakenteessa käytetyn välilevyn jäykköytenä pidetään vakioarvoa 100MN/m. (Peltokangas et al. 2013)

	Pölkystä mitattu radan pystysuuntainen jäykköys	Radan yhdistetty pystysuuntainen jäykköys
Elastinen rata	25 MN/m	20 MN/m
Normaali rata	100 MN/m	50 MN/m
Jäykkä rata	900 MN/m	90 MN/m

Berggrenin (2009) tekemien mittauksien mukaan radan jäykköyden K ja kiskon taipuman y suhde ei ole todellisuudessa täysin lineaarinen edes staattisessa tilanteessa. Epälineaarisuus on kuitenkin niin pientä, että normaalisti se jätetään huomioimatta. Radan jäykköys on riippuvaista myös junan kuormitustaajuudesta, joka saattaa muuttua hyvinkin paljon eri kalustojen välillä. Tällöin voidaan puhua dynaamisesta jäykköydestä, jota kuvataan normaalisti radan jäykköyden käänteisluvun, eli radan reseptanssin α avulla. Dynaamisen jäykköyden analysointi ei kuitenkaan kuulu tämän tutkimuksen tarkastelu kohteisiin vaan työssä tullaan keskittymään pelkästään staattisen jäykköyden määrittämiseen vaihtealueen rakenteissa.

2.1 Radan linjaosuuksien rakenneosat

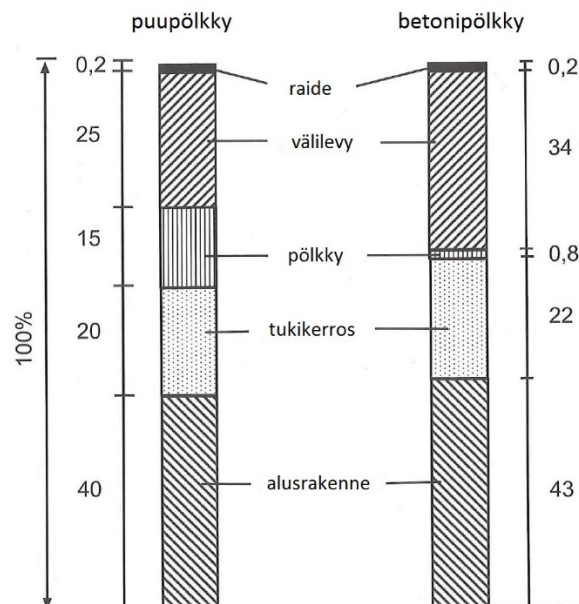
Jotta voitaisiin ymmärtää paremmin vaihteen kohdalla vallitsevaa radan jäykköyttä, on hyvä perehtyä ensin suoralle rataosalle rakennettavaan perinteiseen tukikerrokselliseen ratarakenteeseen. Kuva 1 esittää normaalin ratarakenteen rakenneosia.



Kuva 1. Radan rakenneosien nimityksiä. (Peltokangas et al. 2013.)

Kuvan 1 pohjalta voidaan hyvin todeta, että ratarakenne muodostuu lopulta hyvin monen eri rakenneosan yhdistelmästä ja näillä jokaisella on hyvin tärkeä tehtävä radan yleisen toiminnan sekä kokonaisjäykkyyden kannalta. Kuvassa on esitetty omana rakenneosanaan myös pölkyn alle asennettava pohjain, joka on vielä kohtalaisen harvinaisen näky normaalissa suomalaisessa ratarakenteessa. Sen käyttöä tullaan todennäköisesti kuitenkin tulevaisuudessa kasvattamaan Suomessa, jonka vuoksi se on esitetty kuvassa. Pohjaimen käytöllä on monia positiivisia ominaisuuksia ja vaikutuksia nimenomaan radan jäykkyyden pysyvyyden kannalta.

Tietyt rakenteet vaikuttavat kokonaisjäykkyyteen huomattavasti enemmän kuin toiset. Kokonaisjäykkyyteen vaikuttaa kunkin rakenneosan paksuus ja materiaalin kimmoduuli. Kuva 2 antaa hyvän peruskäsityksen eri rakennekerrosten vaikutuksesta radan toimintaan sekä puu- että betonipölkkyrakenteissa.



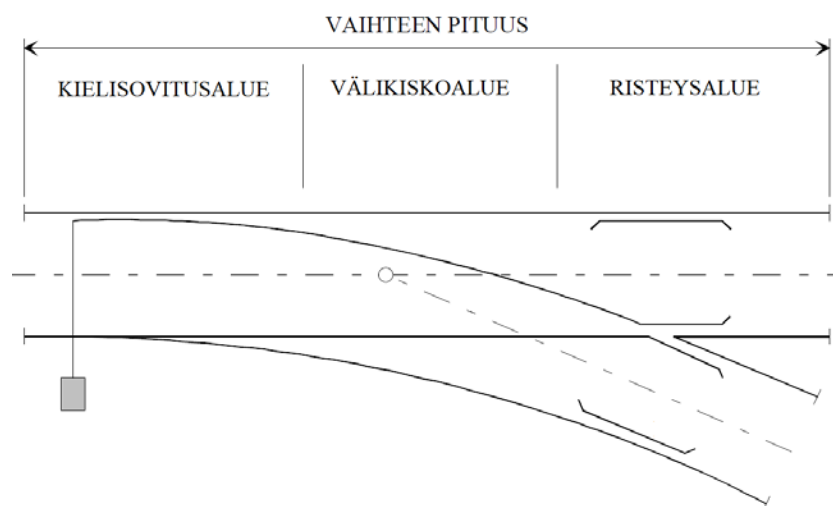
Kuva 2. Rakennekerrosten vaikutus kokonaisjäykkyyteen. (Lichtberger 2011)

Kuvassa 2 ei ole valitettavasti otettu lainkaan huomioon äsken mainitun pohjaimen vaikutusta. Normaalisti melko elastisen pohjaimen vaikutus näkyisi kuvassa siten, että se pienentäisi tukikerroksen ja alusrakenteen vaikutusta, jolloin näiden rakenneosien voidaan ajatella kestävän pidempään.

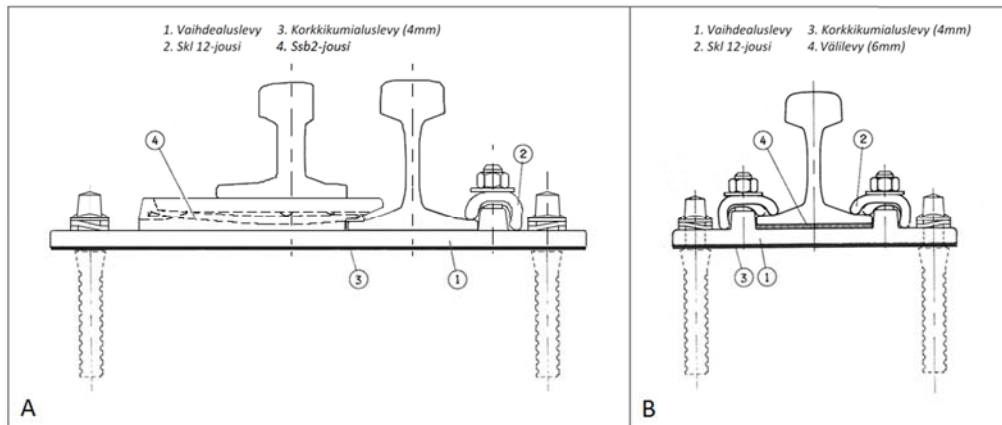
Näiden radan niin sanottujen perusosien jäykkyyksiä ja niiden vaikutuksia radan toimintaan on tutkittu jo hyvin paljon sekä ulkomailla että myös kotimaassa, joten tämä raportti ei tämän erityisemmin keskity näiden ominaisuuksien läpikäymiseen. Lisätietoa linjaosuuksien pystysuuntaisesta jäykkyydestä ja sen mittaamisesta löytyy Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä-sarjan julkaisusta 6/2013 (Peltokangas et al. 2013)

2.2 Vaihteen komponentit

Vaihteeseen tultaessa radan komponentit muuttuvat tukikerroksen yläpuolisen rakenteen osalta melko merkittävästi. Vaihteen kielien liikkuvuuden mahdollistamiseksi rakenteen täytyy sisältää tarvittavat toimilaitteet ja kielien alla toimivat liukulevyt. Nämä osat luonnollisesti muuttavat myös radan pystysuuntaista jäykkyyttä. Radan jäykkyyden osalta tilanteen tekee entistä mutkikkaammaksi se, että rakenne muuttuu vaihteen etu- ja takajatkoksen välissä useaan kertaan, jolloin vaihteen alueella on siis monia erilaisia jäykköysalueita. Vaihde voidaan rakenteensa ja toiminnallisuutensa johdosta jakaa kolmeen perusosaan: Kielisovitus-, välikisko- ja risteysalueeseen. Seuraavalla sivulla esitetty kuva 3 osoittaa, miten nämä alueet sijoittuvat vaihteen kokonaisrakenteeseen nähden. Kaksiosainen kuva 4 vuorostaan esittää pölkyn päällä olevat komponentit vaihteen kielisovitus- ja välikiskoalueella. Tästä kuvasta saa hyvän käsityksen, miten rakenne muuttuu siirryttäessä normaalilta linjaosuudelta vaihteeseen sekä myös vaihteen alueella tapahtuvista muutoksista. Kuvassa 4 on myös kerrottu vaihteen komponenttien nimitykset.



Kuva 3. Rautatievaihteen toiminnalliset pääosat. Kuva lainattuna muokattuna lähteestä (Liikennevirasto 2013a).



Kuva 4. (A) Pölkyn päällä olevat komponentit vaihteessa kielisovitusalueella.
(B) Pölkyn päällä olevat komponentitvaihteen välikiskoalueella.

Seuraavissa kappaleissa esitellään tarkemmin näitä vaihderakenteelle ominaisia komponentteja ennen kaikkea niiden pystysuuntaiset jäykkyysominaisuudet huomioiden.

2.2.1 Kiskomateriaali

Tutkittaessa vaihderakennetta ja sen jäykkyysominaisuuksia, on luontevinta lähteä liikkeelle rakenteen päällimmäisestä osasta, eli kiskosta. Kiskot valmistetaan rakenneteräksestä ja niiden luokittelu perustuu nykyään materiaalin kovuuteen Brinellin asteikolla. Normaalisti vaihdealueella käytetään ohjeen (Liikennevirasto 2013a.) mukaisesti kiskoteräslaataa R260 (Brinellin kovuus 260 HBW), mutta vilkkaasti liikennöidyissä paikoissa joudutaan harkitsemaan joskus lämpökäsitellyn R350HT-laadun käyttämistä. Kauppinen (2011, s. 22) on tutkimuksissaan todennut, että normaalisti tällainen materiaalin kovuuden kasvaminen huonontaa materiaalin sitkeysominaisuuksia, mutta lämpökäsittelyn avulla muokatuissa materiaaleissa sitkeys ei laske juuri lainkaan. Lämpökäsittely kasvattaa kovuuden ohella myös materiaalin murtolujuutta, jolloin kiskon ja kielen yleinen kulutuskestävyys paranee.

60E1- ja 54E1-vaihteissa voidaan lisäksi käyttää mangaaniteräksestä valettua risteysosaa. Vaihteen risteysosa joutuu liikenteen alla kovalle rasitukselle, sillä siihen kohdistuu jatkuvasti dynaamisia iskukuormituksia juna siirtyessä siipikiskon ja risteyskärjen väliin syntyvän epäjatkuvuuskohdan yli. Mangaaniterästä käytetään risteyksissä lähinnä sen hyvän muokkautumislujittuvuuden, kovuuden ja kulutuskestävyyden takia. Mangaaniteräs ei ole kuitenkaan lähtökohtaisesti kova materiaali, sillä sen kovuus muokkautumattomana on vain noin 225 HBW, jolloin se on käytännössä normaalia kiskoterästä pehmeämpää. Muokkautuneena mangaaniteräksen kovuus voi lähellä kiskon pintaa nousta kuitenkin jopa 600 HBW tasolle. (Qian et al. 2011) Tästä syystä on hyvin tärkeää varmistaa, että mangaaniteräs muokkautuu kunnolla, jotta sen kovuus, ja tätä kautta myös kulutuskestävyys, saadaan halutulle tasolle. Lopullinen mangaaniteräksen muokkautuminen tapahtuu vasta liikenteen alla, jolloin risteyskärjestä on hiottava pois muokkautumisessa syntyvä purse noin 100 000 bruttotonnin jälkeen asennuksesta. (Liikennevirasto 2013b)

Materiaalilaadulla on siis vaikutusta kiskojen ja vaihteen kielten vaurioitumiseen ja tätä kautta pitkäaikaiskestävyyteen. Tässä työssä olennaisiin jäykkyysominaisuuksiin sillä ei ole kuitenkaan suoranaista vaikutusta, sillä kaikkien kiskoterästen kimmomoduuli on rakenneteräksen tapaan noin $207 \cdot 10^3$ MPa. (Kauppinen 2011.) Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, ettei kiskon vaurioitumisella olisi merkitystä radan

jäykkyyteen. Väärin valitun kiskomateriaalin liian nopea kuluminen vaikuttaa junan kulun epätasaisuuteen, joka vuorostaan lisää junakuormien aiheuttamia dynaamisia kuormituksia. Kisko itsessään saattaa kestää melko pitkään tällaisten dynaamisten kuormitusten lisääntymisen, mutta radan muut rakenneosat vaurioituvat huomattavasti kiskoa nopeammin ja aiheuttavat tässä tilanteessa muutoksia radan jäykkyyteen.

2.2.2 Vaihteen kielirakenne ja risteysosa

Normaalilla linjaosuudella kiskojen muoto pysyy yleisesti ottaen hyvin muuttumattomana tarjoten junalle tasaisen kulkualustan. Vaihteen kohdalla tämä ei kuitenkaan ole niin yksinkertaista. Vaihteen ylityksessä junan toisen pyörän täytyy aina siirtyä kahden epäjatkuvuuskohdan yli samalla, kun toinen pyörä liikkuu pitkin yhtenäistä tukikiskoa. Vaihteen kärjessä pyörä siirtyy tukikiskolta kielirakenteen kautta uudelle tukikiskolle. Tämän lisäksi pyörän täytyy siirtyä vaihteen risteyskärjen kohdalla kiskolta toiselle. Kisko- ja kielirakenteen poikkileikkausprofiilissa tapahtuu siis junan toisen pyörän alla koko ajan muutoksia, jotka vaikuttavat luonnollisesti rakenteen neliömomenttiin ja tätä kautta jäykkyyteen. Kisko- ja kielirakenteen kokonaisprofiilin muutosta on kuitenkin hyvin vaikea kuvata minkään yhtälön avulla, jolloin myös jäykkyyden absoluuttista muutosta on vaikea arvioida. Voidaan myös olettaa, että tämä muutos ratarakenteen kokonaisjäykkyyteen on lopulta hyvin marginaalinen kiskomateriaalin kimmomoduulin ollessa hyvin korkea.

Vaihteen kieli- ja risteysalueella huomattavasti neliömomentin muuttumista merkittävämpi tekijä on epäjatkuvuuskohdissa syntyvät dynaamiset iskut. Näiden epäjatkuvuuskohtien muotoa ja junan kulkua niiden yli käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.1

2.2.3 Vaihdealuslevy

Normaalista linjaosuuden rakenteesta poiketen vaihteissa käytetään koko vaihteen alueella vaihdealuslevyä, johon kiskot kiinnitetään. Liikkuvan kielen alueella vaihdealuslevyissä on korotettu liukulevyosuus, jonka tehtävänä on tuoda vaihteen kieli samaan korkeusasemaan kiinteän tukikiskon kanssa ja tarjota kielelle mahdollisimman tasainen ja matalakirkainen liukualusta. Vaihdealuslevy huolehtii myös samalla tukikiskon kallistuksesta. Tämä rakenne on esitetty kuvassa 4A. Kielialueen ulkopuolella liukulevyä ei luonnollisesti tarvita, jolloin käytetään kuvan 4B mukaista rakennetta.

Vaihdealuslevy on rakenteen kokonaisjäykkyyden kannalta hyvin merkittävä osa. Tukikiskon ja kielen välinen korkeusasema on säilyttävä täysin muuttumattomana, jolloin niitä yhdistävän rakenteen täytyy olla liikkuvan kielen alueella mahdollisimman jäykkä. Tästä syystä vaihdealuslevy valmistetaan teräksestä, jolloin sen jäykkyysominaisuudet ovat samalla tasolla siihen kiinnitettävän kiskon kanssa. Korkeusaseman pysyvyyden varmistamiseksi tällä alueella ei tukikiskon ja aluslevyn välissä käytetä lainkaan elastisia välilevyjä. Tämä tekee vaihteen kielialueesta hyvin jäykän rakenneosan.

2.2.4 Välilevy

Kielialueen jälkeen vaihteen väliskiskoalueella rakenteen ei tarvitse olla enää yhtä jäykkä kuin kielialueella. Tällöin tukikiskon ja vaihdealuslevyn välissä voidaan käyttää elastista välilevyä, jonka sijainti näkyy kuvassa 4B. 60E1-vaihteissa käytettävä välilevy on paksuudeltaan 6 mm, kun 54E1-vaihteissa riittää pienemmän kuormituksen takia 4 mm levy. Välilevyä ei kuitenkaan käytetä lainkaan normaalin risteysosan alla, jolloin rakenne muuttuu jälleen hyvin jäykäksi risteysalueelle saavuttaessa. Erityispitkissä

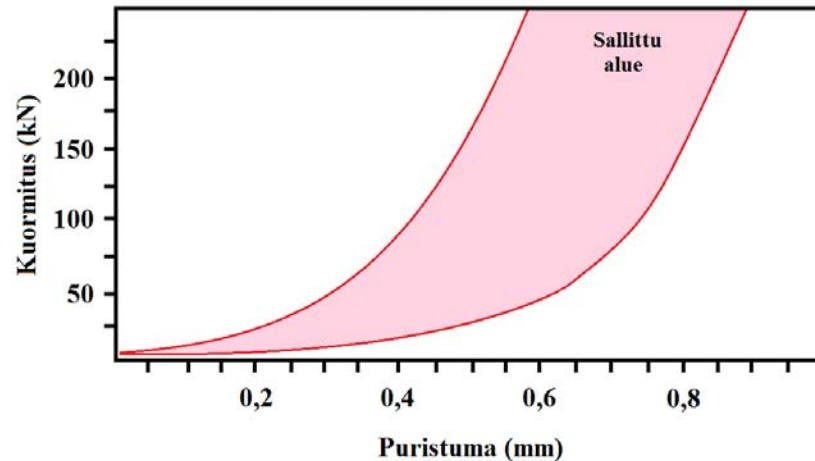
vaihteissa, jotka ovat varustettu kääntyväkärkisellä risteyksellä, käytetään kuitenkin normaalista risteyksestä poiketen risteuksen alla 9 mm välilevyä. Risteuksen alla olevien välilevyjen tarkempi sijainti on erikseen määritetty suurnopeusvaihteiden linjakuvioissa. (Liikennevirasto 2010.)

Näiden kaikkien välilevyjen jäykkyys perustuu Kansainvälisen Rautatieliiton (UIC) tekemään normiin 864-5 (International Union of Railways 1986.), jossa määritellään käytettävien välilevymateriaalien kaikki tekniset ominaisuudet ja käytettävät testausmenetelmät. Välilevyn jäykkyys määritellään normin mukaan tietyn kokoisille testikappaleille, jota kuormitetaan välillä 0-200 kN. Tämän kuormituksen perusteella on muodostettu liitteessä 1 näkyvät jännitys-puristumakäyrät. Jäykkyydet on määritelty UIC:n normissa vain 4,5 mm ja 9 mm paksuisille välilevyille, joten Suomessa 60E1-vaihteissa käytettävän 6 mm välilevyn jäykkyyttä ei ole suoranaisesti määritelty. Sen jäykkyys voidaan kuitenkin kohtalaisella tarkkuudella arvioida määriteltyjen välilevyjen jäykkyyksien perusteella. Välilevyn jäykkyyttä määritettäessä se kuvataan usein jousena, jolla on tietty jousivakio yksikössä kN/mm. Jousivakio tietyllä kuormitusalueella saadaan määritettyä kuvaajista suoraan yhtälön 1 avulla. Jännitys-puristumakäyriä analysoimalla voidaan todeta, että 4,5 mm välilevyn jäykkyys on radan normaalilla kuormitusalueella (20–95kN) noin 200 kN/mm ja 9 mm välilevyn jäykkyys noin 100 kN/mm. Näin ollen normaalin 6 mm välilevyn jäykkyys asettuu näiden väliin noin 130–140 kN/mm tasolle.

Vaihteen normaali välilevy on näin ollen rakenteena hieman linjaraitteella yleisesti käytettävää Vosslohin Zw 900 NT-välilevyä jäykempi. Linjaraitteen välilevy vastaa ominaisuuksiltaan käytännössä risteysosan alla käytettävää 9 mm välilevyä (Peltokangas 2013). Tämä on yksi konkreettinen selitys sille, miksi vaihdealue on kokonaisuutena linjaosuutta jäykempi.

2.2.5 Korkkikumivälilevy

Varsinaisen välilevyn ohella vaihteissa käytetään myös 4 mm paksuista korkkikumivälilevyä, joka on asennettava aina koko vaihteen matkalle. Korkkikumivälilevy asennetaan kuvan 4 mukaisesti vaihdealuelevyn ja vaihdepölkyn väliin, jossa sen pääasiallinen tehtävä on estää metallin ja betonin välinen suora kontakti. Tämä komponentti toimii kuitenkin siinä sivussa myös vaihderakenteen elastisuutta lisäävänä tekijänä. Korkkikumivälilevyn jäykkyysominaisuuksia on kuvattu normaalin välilevyn tapaan UIC:n normissa 864-5 (International Union of Railways 1986), jossa sille määritellään sekä staattinen että dynaaminen jäykkyys. Normi jaottelee korkkikumivälilevyt kolmeen eri kategoriaan niiden käyttökohteen mukaisesti. Tämä työn kannalta olennaiset 60E1-vaihteet kuuluvat kuitenkin kaikki kategoriaan 1, jossa nopeudet ovat yli 130 km/h ja akselipainot välillä 0–25 tonnia. Tällaisissa käyttökohteissa korkkikumivälilevyn jäykkyys tulee olla kuvassa 5 esitetyn jännitys-puristumakäyrän mukainen. Normi määrittelee, että testattavan levyn pinta-alan tulee olla 200 cm² ja paksuuden 5 mm.



Kuva 5. Korkkikumivälilevyn ($200\text{cm}^2 \times 5\text{mm}$) puristumakäyrä. Lainattu muokattuna lähteestä (International Union of Railways 1986).

Kuvasta 5 voidaan nähdä, että korkkikumivälilevyn jäykkyydelle on määritelty muiden välilevyjen tapaan tietty vaihteluväli, jonka rajoissa sen pitää olla. Nämä jäykkyyden raja-arvot voidaan ilmoittaa edellisen kappaleen tapaan jousivakion arvoina radan normaalilla kuormitusalueella (20–95 kN), jolloin korkkikumivälilevyn jäykkyyden tulee olla noin välillä 230–300 kN/mm. On tärkeää huomata, että nämä arvot pätevät 5 mm paksuiselle korkkikumilevyille, joten Suomessa käytettävä 4 mm levy on vielä hieman tätä jäykempi. Korkkikumivälilevyn voidaan siis todeta olevan komponenttina huomattavasti normaalia välilevyä jäykempi. Kun vielä muistetaan, että korkkikumivälilevyä kuormitetaan todellisuudessa isommalta pinta-alalta kuin välilevyä, lisääntyy komponenttien jäykkyysero entisestään.

Kohtalaisen jäykän korkkikumivälilevyn puristuma on siis nykyisellään hyvin pientä ($<0,3\text{mm}$) junan staattisten kuormitusten alaisena. Vaihterakenteen elastisuuden kannalta korkkikumivälilevyn jäykkyyssominaisuuksien parantaminen saattaisi olla siis hyvinkin potentiaalinen kehityskohde. Korkkikumivälilevy on käytännössä ainoa komponentti, jota käytetään muuttumattomana koko vaihtelalueella, joten sen kehityksellä voidaan vaikuttaa kerralla koko vaihteen elastisuuteen. Näihin vaihteen elastisuuden mahdollisiin kehityskohteisiin palataan vielä myöhemmin luvussa 4.

2.2.6 Kiskon kiinnitysosat

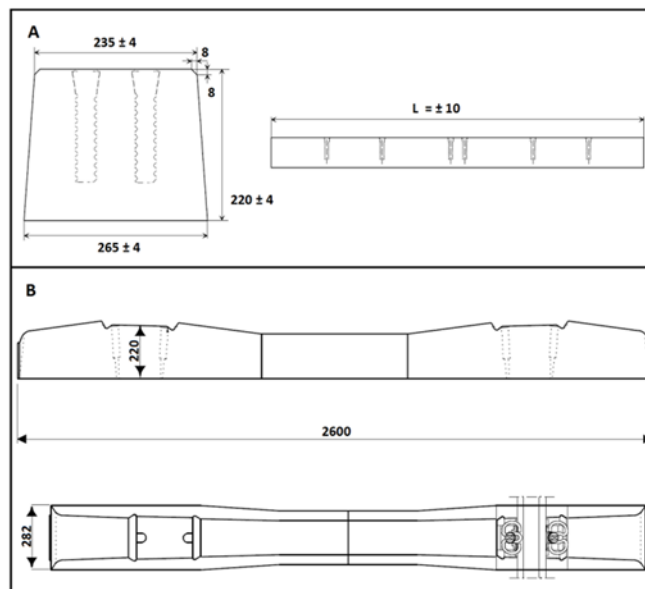
Nykyään kaikissa uusissa betonipölkkyvaihteissa käytetään linjaraitelta poiketen Skl 12-kiinnitystä. Tämän lisäksi kielialueella ja vastakiskosovituksen kohdalla käytetään kiskon sisäpuoliseen kiinnittämiseen Ssb2-kiinnitystä. Sekä Skl 12- että Ssb2-kiinnitys on esitettyä kuvassa 4A. Vaihteissa kiskonkiinnityksen päätehtävä on kiinnittää kisko tietyllä voimalla vaihtelulevyyn, jolloin kiskoihin kohdistuvat voimat siirtyvät vaihtelulevyyn ja sitä kautta edelleen pölkyille ja tukikerrokseen.

Vaihterakenteen elastisuuden kannalta merkittävin asia kiskonkiinnityksissä on nimenomaan kiinnitysvoima. Kiskon ja vaihtelulevyn välinen kiinnitysvoima määritellään Skl 12-jousen tapauksessa kiristettävän mutterin vääntömomentin avulla. Oikein kiinnitettynä Skl 12-jousen kiinnitysmomentti on 180–200 Nm, joka yleisesti vastaa kiskonkiinnityksissä vajaata 20 kN puristusvoimaa kiskon ja vaihtelulevyn välille. (Vossloh Rail Systems 1995) Vaihteen kielialueella kisko painautuu suoraan vaihtelulevyä vasten, jolloin tämä 20 kN puristus ei käytännössä vaikuta millään tavalla rakenteen pystysuuntaiseen elastisuuteen. Kielialueen ulkopuolella tämä

puristusvoima kohdistuu kuitenkin kiskon ja vaihdealuslevyn välissä olevaan elastiseen välilevyyn, jolloin siihen muodostuu noin 0,5 mm esipuristus. Tämä esipuristus muuttaa välilevyn käyttäytymistä junakuormitusten aikana, sillä sen joustokäyttäytyminen ei ole lineaarista, kuten liitteen 1 kuvaajasta voidaan huomata. Välilevymateriaalin elastisuuden suunnittelussa on otettu huomioon tämä esipuristus, jolloin välilevy toimii halutulla tavalla juuri kuormitusvälillä 20–95 kN. Väärällä kiristysmomentin arvolla välilevyn esipuristus muuttuu, jolloin välilevy ei enää toimi sille suunnitellulla kuormitusalueella. Jos kiristysmomentti on liian pieni, se heikentää lisäksi kiinnityksen läpivetovastusta, jolloin saattaa olla vaarana, että kiskot pääsevät vaeltamaan pituussuunnassa.

2.2.7 Vaihdepölkky

Vaihdealueella pölkyn rakenne eroaa huomattavasti linjaraitteella käytetyistä pölkkytyypeistä. Betonisen vaihdepölkyn ja linjaraitteella yleisesti käytetyn B97-pölkyn rakenne-eroa on havainnollistettu seuraavan sivu kuvan 6 avulla. Se osoittaa, että linjapölkyn ja vaihdepölkyn poikkileikkauksissa on merkittävä ero. Vaihdepölkyn poikkileikkaus on hyvin yksinkertainen ja pysyy vakiona koko pölkyn matkalla, kun taas linjapölkyn poikkileikkaus on vuorostaan huomattavasti monimuotoisempi ja se on selkeästi optimoitu kiskonkiinnitysten kohdalta. Tämän optimoinnin tavoitteena on rajoittaa junakuormitusten aiheuttamia jännityshuippuja poikkileikkauksen eri kohdissa. (Rantala et al. 2013) Vaihdepölkylle tällainen poikkileikkauksen optimointi on kuitenkin ongelmallista, sillä pölkyn kokonaispituus L ja kiskonkiinnitysten paikat muuttuvat vaihteessa koko ajan kiskojen erkaantuessa toisistaan. Vaihdepölkyn poikkileikkaus on siis yksinkertaisinta tehdä muuttumattomaksi, jotta pölkyn kokonaispituutta ja kiinnityskohtien paikkaa on helppo muuttaa.



Kuva 6. (A) Vaihdealueella käytettävä BP92 vaihdebetonipölkky. (B) Linjaraitteella nykyisin käytettävä B97 linjabetonipölkky.

Rakenteen elastisuuden kannalta vaihdepölkyn tärkeimpiä ominaisuuksia ovat nimenomaan sen kokonaispituus sekä kiskonkiinnitysten sijainti ja lukumäärä. Esimerkiksi 1:28-vaihteissa pölkyn pituus vaihtelee välillä 2600–5108 mm, joka ymmärrettävästi vaikuttaa pölkyn taipumaan ja tätä kautta vaihteen pystysuuntaiseen elastisuuteen. Junakuormitukset kohdistuvat pitkillä pölkkyillä vain pölkyn yhteen päähän kerrallaan, joten pölkkyä ei rasiteta tasaisesti. Tätä epätasaista kuormitusta lisää entisestään se, että vaihteen suoraa raidetta käytetään normaalisti huomattavasti enemmän kuin poikkeavaa raidetta. Pitkiä pölkkyjä käytetään myös vaihteen toimilaitteiden kohdalla, jolloin pölkky ei rasitu toimilaitteen alta juuri lainkaan käyttöikänsä aikana. Epätasainen rasitus johtaa pölkyn epätasaiseen kulumiseen sekä pölkyn huonoon tukeutumistilanteeseen.

Pölkyn taipumiseen ja tätä kautta elastisuuteen vaikuttaa myös kiskonkiinnitysten sijainti ja lukumäärä. Vaihteen välikiskoalueella ja risteysosassa pölkkyyn on aina kiinnitetty neljä kiskoja. Kuormitus kohdistuu kuitenkin aina vain kahteen kiskoon kerrallaan, jolloin kahden muun kiskon taivutusvastukset jäykistävät pölkkyä ja pyrkivät pienentämään sen taipumaa. Näiden jäykistävien kiskojen sijainti suhteessa kuormitettaviin kiskoihin luonnollisesti muuttuu vaihteen matkalla, jolloin jokaisen vaihdepölkyn lopullinen taipumakuvio on hyvin yksilöllinen. Tämä luo vaihteeseen entistä enemmän epätoivottua jäykkyysvaihtelua.

2.2.8 Yhteenveto

Kuten edellä olevissa luvuissa on osoitettu, Suomessa käytettävien 60E1- ja 54E1-vaihteiden rakenne on hyvin vaihteleva ja komponentit ovat nykyisellään melko jäykkiä verrattuna normaalin linjaraitteen komponentteihin. Jäykkyys johtuu pääosin siitä, että vaihteen kielialueella halutaan varmistaa tukikiskon ja vaihteen kielen välisen korkeusaseman pysyvyys, jolloin elastisia komponentteja ei käytetä käytännössä lainkaan. Vaihteen välikiskoalueella elastisuutta on hieman enemmän kiskon ja vaihtealuslevyn välissä käytettävän välilevyn johdosta. Tämä välilevy on kuitenkin huomattavasti linjaraitteella käytettävää välilevyä jäykempi.

Yksittäisten komponenttien jäykkyyden ohella myös rakenteen vaihtelevuus, kuten esimerkiksi pölkyn pituuden muuttuminen tai niiden huono tuentatilanne, tuo mukanaan ongelmia. Vaihteen alueella rakenteessa tapahtuu useita pystysuuntaiseen jäykkyyteen vaikuttavia muutoksia, jolloin muodostuu myös useita erilaisia jäykkyyalueita. Nämä rakenne-erot ja niistä johtuvat jäykkyyalueet on kuvattu tarkemmin luvussa 2.4.

2.3 Vaihteen epäjatkuvuuskohdat

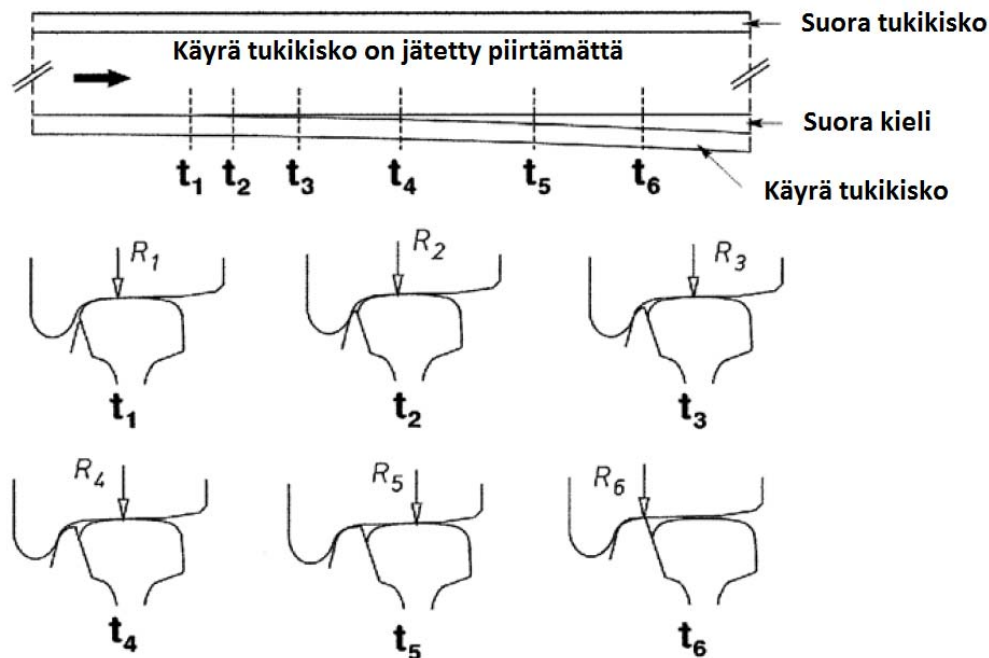
Vaihteen yksittäisten komponenttien jäykkyyden ohella vaihteen kokonaisjäykkyyteen vaikuttaa myös junakuormitusten aiheuttamat muutokset radan rakenteessa. Vastasennetun vaihderakenteen kokonaisjäykkyys voi erota merkittävästi käytetyn vaihteen jäykkyydestä, joka johtuu yksinomaan suuresta kuormitusmäärästä. Suurimmat muutokset radan rakenteeseen pääsee syntymään kohdissa, jotka altistuvat suurille dynaamisille iskukuormituksille. Tällaisia dynaamisia isku-kuormituksia syntyy esimerkiksi raitteen epäjatkuvuuskohdissa, joissa pyörän ja kiskon välinen kontaktikohta siirtyy äkillisesti paikasta toiseen. Vaihte sisältää aina vähintäänkin kaksi epäjatkuvuuskohtaa, joista toinen syntyy junan siirtyessä vaihteen kieleltä tukikiskolle ja toinen junan ylittäessä vaihteen risteysosan. Tämän lisäksi

vaihte saattaa sisältää myös muita epäjatkuvuuskohtia, jotka johtuvat esimerkiksi syntyneistä kiskovioista. Seuraavien lukujen tarkoituksena on kuvata tarkemmin näiden vaihteissa esiintyvien epäjatkuvuuskohtien rakennetta ja ominaisuuksia.

2.3.1 Siirtyminen kieleltä tukikiskolle

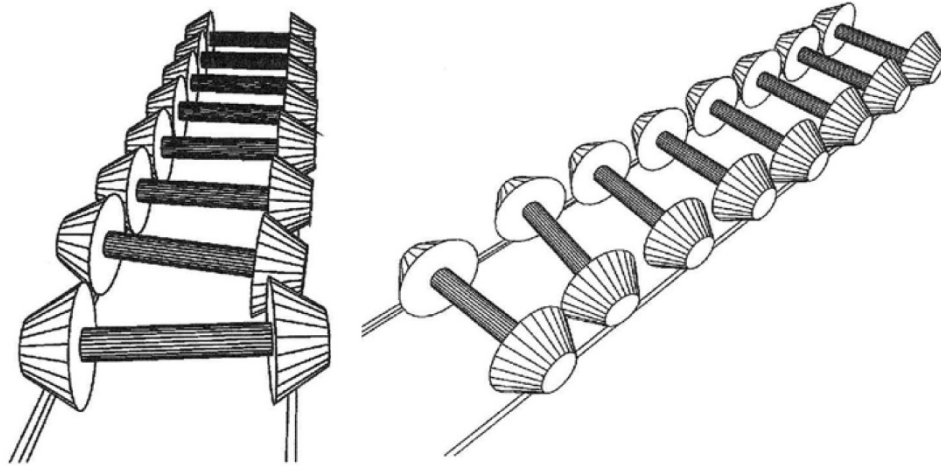
Vaihdetta ylitettäessä junan toisen pyörän on aina siirryttävä kiskolta toiselle. Tämä siirtyminen aiheuttaa raiteeseen epäjatkuvuuskohdan, jonka johdosta pyörä tekee tietyn suuruisen sivuttaissiirtymän. Kuvassa 7 on havainnollistettu ajan suhteen pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan siirtymistä junan siirryessä käyrältä tukikiskolta suoralle kielelle. Ajanhetki t_1 kuvaa tilannetta, jossa pyörä on juuri kielen kärjen kohdalla ja ajanhetki t_6 tilannetta, jossa pyörä lopulta siirtyy kokonaan vaihteen kielen varaan. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002)

Kuvasta 7 voidaan nähdä, että ajanhetkellä t_2 käyrän tukikiskon vuoksi raideleveys alkaa kasvaa, jolloin kontaktikohta R siirtyy hiljalleen kohti pyörän ulkoreunaa. Jokaisella ajanhetkellä käyrä tukikisko erkanee lisää, jolloin kontaktikohta siirtyy entistä ulommaksi pyörässä. Junan pyörän profiilin ollessa kartion muotoinen tämä siirtyminen johtaa siihen, että pyörän halkaisija kontaktikohdassa pienenee ja junan vasemman ja oikean pyörän kulkukehät eivät ole enää saman suuriset. Junan pyörät pyrkivät tietenkin tasoittamaan tämän kulkukehien eron, jolloin junan pyöräkerta lähtee tässä tilanteessa kasvavalla vauhdilla hakeutumaan poikittaissuunnassa kohti käyrää tukikisko. Tällöin tulee vaaraksi, että pyörän laippa törmää suoraan kieleen, jonka profiilin leveys kasvaa koko ajan. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002)



Kuva 7. Pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan (R_{1-6}) poikittaissuuntainen siirtyminen junan pyörän siirryessä tukikiskolta vaihteen kielelle. Kuva lainattu muokattuna lähteestä (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002).

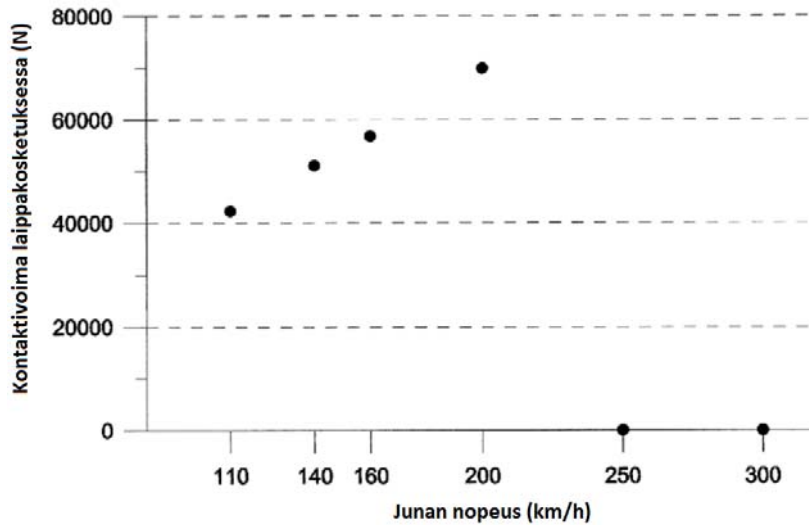
Viimeisellä ajanhetkellä t_6 voidaan huomata, kuinka kontaktikohta siirtyy hetkessä radikaalisti kohti pyörän sisäpintaa kiskojen alkaessa kantaa kielen kohdalta. Tällöin kontaktikohdan kulkukehä onkin yhtäkkiä merkittävästi suurempi kuin toisella pyörällä, jolloin pyöräkerta lähtee nopeasti hakeutumaan kohti radan keskikohtaa. Alla oleva kuva 8 havainnollistaa hyvin pyöräkerran poikittaissuuntaista liikettä kielen kärjen alueella.



Kuva 8. Pyöräkerran sivuttaissuuntainen hakeutuminen vaihteen kärjen alueella. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002.)

Pyöräkerran siirtyminen tukikiskolta vaihteen kielelle aiheuttaa siis merkittäviä liikkeitä edestakaisin. Pyörien jatkuva ja voimakas poikittaissuuntainen hakeutuminen aiheuttaa dynaamisten kuormitusten lisääntymistä, joka näkyy kulumisena junan pyörissä ja varsinkin vaihteen suorassa kielessä. Poikittaissuuntaiset liikkeet saattavat aiheuttaa lisäksi jo aiemmin mainitun laippakosketuksen pyörän ja suoran kielen välillä, jolloin kosketuksen synnyttävät iskukuormitukset vahingoittavat vaihdarakennetta entisestään. Pitkällä aikavälillä nämä ongelmat aiheuttavat ratarakenteen kunnan heikkenemistä, melutason lisääntymistä ja junan kulun epätasaisuutta. Nämä kaikki ongelmat heijastuvat tietenkin myös kunnossapitokustannuksiin. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002.)

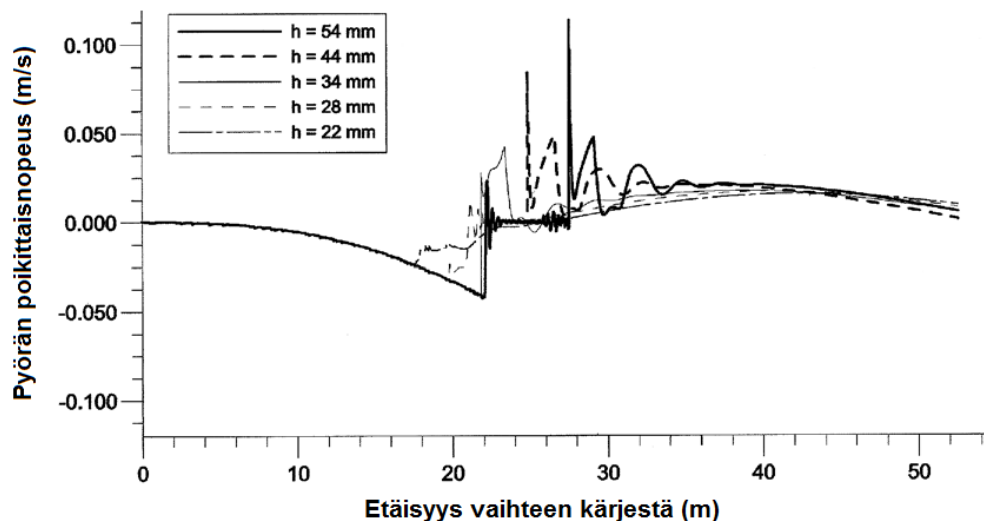
Euroopassa on tutkittu paljon eri tekijöiden vaikutuksia näihin poikittaissuuntaisiin liikkeisiin ja iskukuormiin. Yhtenä suurena tekijänä näissä ongelmissa on luonnollisesti junan nopeus. Yleisesti ottaen voidaan ajatella, että nopeuden kasvaessa myös poikittaissuuntaisten liikkeiden suuruus ja sitä kautta myös iskujen voimakkuus kasvaa. Kuva 9 kuitenkin osoittaa, että tämä suhde ei välttämättä pidä aina paikkaansa.



Kuva 9. Simulointimallilla saatu junan nopeuden vaikutus pyörän ja suoran vaihteen kielen väliseen kontaktivoimaan laippakosketustilanteessa. Käyrän tukikiskon kaarresäde kuvan tilanteessa 7000 m. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002.)

Kuvasta 9 voidaan nähdä kuinka simulointimallisissa pyörän ja suoran kielen välisen kontaktivoiman suuruus kasvaa käytännössä lineaarisesti nopeuden ollessa välillä 0–200 km/h. Suuremmissa nopeuksissa kontaktivoima tippuu yllättäen täysin nolleen, eli laippakosketusta ei toisin sanoen synny lainkaan. Tämä johtuu siitä, että junan nopeuden kasvattaminen ei kasvata poikittaisten liikkeiden nopeutta aivan suhteella 1:1. On siis olemassa tietty rajanopeus, jolla tietyn kaarresäteen omaava vaihteen kielisovitus ohitetaan yksinkertaisesti niin nopeasti, ettei pyöräkerta ehdi liikkumaan laippakosketukseen vaadittavaa matkaa poikittaissuunnassa. Lyhyissä vaihteissa tämä rajanopeus on ymmärrettävästi kuvan 6 tapausta pienempi, koska kielisovitus on huomattavasti lyhyempi.

Junan nopeuden ohella poikittaisvoimien suuruuteen vaikuttaa myös vaihteen kielen paksuus pyörän siirtymäkohdassa. Lähtökohtaisesti kielen on siirtymäkohdassa oltava profiiltaan riittävän paksu, jotta se pystyy kantamaan siihen kohdistuvan täyden pyöräkuorman. Toisaalta kieli ei saa olla liian paksu, jotta välttyttäisiin pyörän ja kielen väliseltä laippakontaktilta ja ylimääräisiltä sivuttaisliikkeiltä. Kuva 10 havainnollistaa kielen kontaktikohdan paksuuden h vaikutusta pyörän poikittaisnopeuteen tilanteessa, jossa junan pyörä ylittää vaihteen kärjestä kantaan päin.



Kuva 10. Kielen paksuuden vaikutus pyörän poikittaisnopeuteen. Lainattu muokattuna lähteestä (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002.)

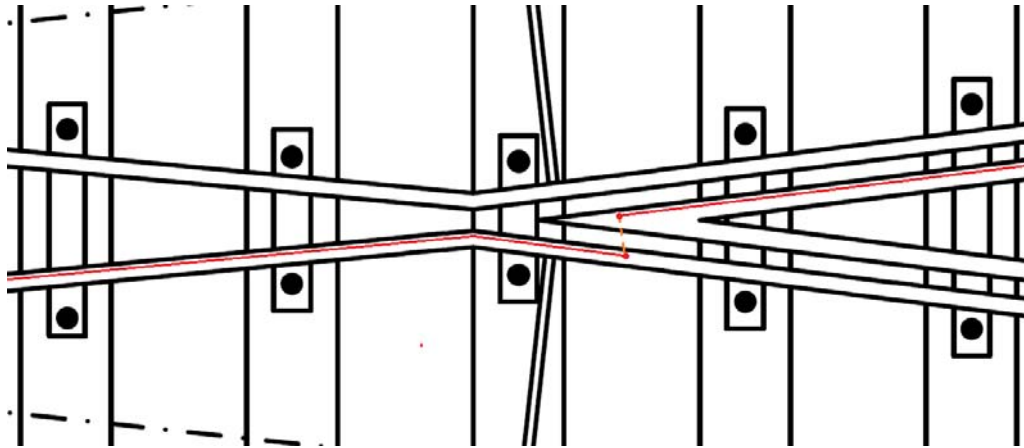
Kuvan 8 mukainen pyörän käyttäytyminen on hyvin havaittavissa myös kuvasta 10. Ennen varsinaista siirtymistä pyörän poikittaisnopeus kasvaa kiihtyvällä tahdilla vaihteen käyrän tukikiskon erkanemissuuntaan. Kuten kuvasta 10 voidaan huomata, kielen paksuudella ei ole vaikutusta pyörän sivuttaissiirtymiseen tällä alueella (0–15 m). Tämä on hyvin luonnollista, sillä pyörä ei ole kielen kärkialueella kontaktissa kieleen. Junan tullessa potentiaaliselle siirtymäalueella (15–25 m) kielen paksuuden vaikutus näkyy selkeästi pyörän poikittaisnopeuden arvoissa. Jos kielen paksuuden halutaan olevan siirtymäkohdassa hyvin suuri ($h=34\text{--}54\text{ mm}$), pyörän siirtyminen tukikiskolta kielelle tapahtuu melko myöhään, jolloin pyörän poikittaisnopeudessa tapahtuu hyvin äkillinen muutos. Tällainen äkillinen muutos aiheuttaa pyörän poikittaisnopeudessa suurta dynaamista vaihtelua, joka tarkoittaa käytännössä laippakontaktia ja merkittäviä poikittaissuuntaisia iskukuormituksia.

Vaihteen kieli voidaan vaihtoehtoisesti suunnitella myös siten, että juna siirtyy kielelle jo aiemmassa vaiheessa, jolloin kieli ei ole vielä niin paksu ($h=22\text{--}28\text{ mm}$). Tällöin on vaarana, että kieli ei kestä siirtymässä syntyviä iskukuormituksia. Kuvasta 10 voi kuitenkin havaita, että tässä tilanteessa siirtymä tapahtuu paljon sulavammin, eikä nopeuden arvossa ole havaittavissa äkkinäisiä muutoksia. Siirtymän aikana ei näin ollen synny lainkaan laippakontaktia, jolloin välttyään myös ylimääräisiltä dynaamisilta iskukuormituksilta. Näiden suurien iskukuormitusten puuttuessa ohuempikin kieliprofiili pystyy vastaanottamaan pyörän aiheuttamat rasitukset.

2.3.2 Siirtyminen risteysalueen yli

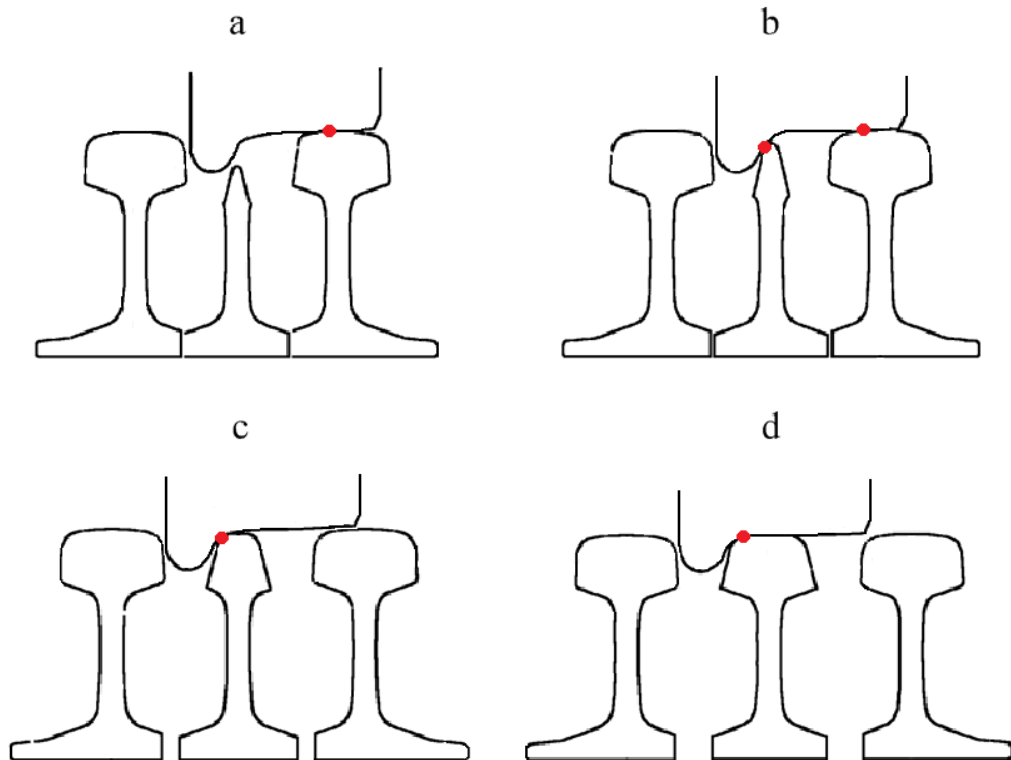
Vaihteen kielisovituksen ohella myös vaihteen risteysalueella junan pyörä joutuu kulkemaan kiskon epäjatkuvuuskohtan ylitse. Epäjatkuvuuskohtan muoto ja pyörän kulku sen yli on hieman erilainen riippuen siitä, onko kyseessä 1-kärkinen, 2-kärkinen vai kääntyväkärkinen risteys. Tässä raportissa keskitytään kuitenkin vain 1-kärkisen risteysalueen epäjatkuvuuskohtaan, joka on selkeästi yleisin risteystyyppi.

Epäjatkuvuuskohta muodostuu 1-kärkisessä risteyksessä kohtaan, jossa suoran raiteen sisäkisko ja poikkeavan raiteen ulkokisko kohtaavat. Kahden kiskon risteäminen ja kulku tämän kohdan yli mahdollistuu siipi- ja vastakiskojen avulla, joiden muoto on esitetty vaihteen rakennekuvassa (Kuva 3). Tarkemmin risteyksen rakennetta sekä pyörän ja kiskon välistä kontaktia ylityksen aikana on havainnollistettu seuraavan sivun kuvassa 11.



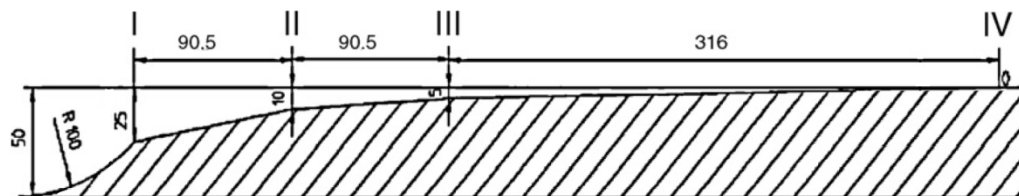
Kuva 11. Pyörän ja kiskon välinen kontakti pyörän siirtyessä risteyksen epäjatkuvuuskohdan yli. (Innotrack 2008)

Kuvasta 11 nähdään, kuinka pyörän ja kiskon välinen kontakti lähtee risteyskärjen kohdalla etenemään siipikiskoa pitkin. Samaan aikaan telin toinen pyörä kulkee pitkin suoraa tukikiskoa, jolloin pyörien välille syntyy vierintäsäde-eroa aivan kuten junan siirtyessä tukikiskolta kielelle (ks. 2.3.1). Risteyksen tapauksessa vierintäsäde-ero muodostuu kuitenkin huomattavasti nopeammin, jolloin pyörä lähtee hakeutumaan voimakkaasti kohti siipikiskoa. Pyörä ei kuitenkaan pysty etenemään siipikiskoa pitkin kuin pienen matkan, jonka jälkeen pyörän kulkupinnan sisäreuna ottaa kontaktin risteyskärkeen. Pyöräprofiilin kontaktikohdan muuttumista voidaan havainnollistaa myös risteyksen poikkileikkauksien avulla. Kuva 12 osoittaa pyörän ja kiskojen välistä kontaktia risteyksen 4 eri kohdassa.



Kuva 12. Pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan muuttuminen pyörän siirtyessä siipikiskolta risteyskärjelle. Lainattu muokattuna lähteestä (Markine et al. 2010)

Voidaan havaita, että kuvassa 12a kiskon ja pyörän välinen kontaktikohta siirtyy aivan pyörän kulkupinnan reunalle siipikiskon erkaantuessa radan keskilinjasta. Pyörän kohdatessa risteyskärjen kuvassa 12b syntyy hetkellisesti tilanne, jolloin pyörä on kontaktissa sekä siipikiskoon että tukikiskoon. Tämän jälkeen kuvat 12c ja 12d osoittavat, kuinka pyörä irtautuu siipikiskosta ja lähtee etenemään risteyskärjen osoittamaan suuntaan. Tarkoituksena on luoda mahdollisimman sysäyksetön siirtymä risteysalueen yli, jolloin oleellista on juuri risteyskärjen geometria. Kuten kuvista 12 a-d voidaan nähdä, risteyskärjen kärkiosa on siipikiskoja alempana, josta se nousee hiljalleen kohti siipikiskon korkeutta. Korkeuden muutos ei kuitenkaan voi tapahtua lineaarisesti, koska silloin pyörä saattaisi osua risteyskärkeen liian aikaisin ja siirtyminen kiskolta toiselle tapahtuu liian äkkinäisesti. Esimerkki risteyskärjen radansuuntaisesta geometriasta on esitelty kuvassa 13.



Kuva 13. Risteyskärjen radansuuntaisen geometria. (Markine et al. 2010)

Risteyskärjen pystygeometrian muutos tapahtuu monessa eri vaiheessa, kuten kuva 13 osoittaa. Aivan risteuksen kärjessä korkeuden muutos on melko nopeaa, mutta se ei saa olla liian nopeaa, jottei pyörän laippa osu risteyskärkeen (I-II). Tämän jälkeen tullaan pyörän teoreettiselle kontaktialueelle, jossa geometrian muutoksen täytyy olla hyvin hidasta (III-IV). Risteyskärjen nousun lisäksi pyörän kaltevuuden ja korkeusmuutoksia kompensoidaan siipikiskojen ylikorotuksella. Siipikiskot ovat noin 4–5 mm kiskon hamaran yläpuolella (Nummelin 1994). Näiden profiilimuutosten avulla pyörä pääsee siirtymään hiljalleen siipikiskolta risteyskärjelle kuvan 12b mukaisen hallitun kaksipistekontakti kautta ja suurilta dynaamisilta iskuilta välttään.

Edellä kuvattu risteuksen ylitys on kuitenkin täysin teoreettinen tilanne, jossa kaikki kontaktipinnat ovat ideaalisia ja pyörä kulkee ideaalisella kulkulinjalla. Todellisuudessa tällaiseen täysin hallittuun tilanteeseen ei päästä, sillä kontaktipinnat ovat aina kuluneita ja pyörä ei käytännössä koskaan liiku ideaalisella kulkulinjalla. Tähän teräsosien kuluneisuuteen keskitytään tarkemmin luvussa 3.1.2

2.3.3 Kiskojatkokset

Edellä käsitellyt epäjatkuvuudet syntyvät kohtiin, jossa junan pyörä joutuu siirtymään kiskolta toiselle. Tämän lisäksi vaihteessa on luonnollisesti kiskojatkoksia, joista muodostuu epäjatkuvuuskohtia pyörien kululle. Vaihteet valmistetaan ja asennetaan rataan kolmena isona elementtinä, jotka vastaavat käytännössä kuvassa 3 näkyviä vaihdealueita. Näiden elementtien liittämistä osaksi rataa muodostuu yhteensä neljä kiskoatkoksa. Risteuselementti itsessään sisältää myös jatkoksia, joiden lukumäärä riippuu siitä, miten risteys on valmistettu. Esimerkiksi mangaaniteräksestä valettu risteysosa liitetään hitsaamalla osaksi muuta risteuselementtiä, jolloin vaihteeseen muodostuu kaksi jatkoksa lisää.

Hitsatut jatkoksen vastaavat käytännössä jäykkyydeltään ja lujuudeltaan normaalia kiskoa, joten uudessa vaihteessa jatkos ei aiheuta epäjatkuvuutta pyörän kululle. Hitsatun jatkoksen ominaisuudet kuitenkin muuttuvat käytön aikana ja se muokkaantuu ja kuluu hieman eri tavalla kuin normaali kiskoteräs. Näin ollen jatkokseen muodostuu ajan mittaan pieni hitsin pituinen geometriavirhe, joka lisää muiden epäjatkuvuuskohden tavoin rataa kohdistuvia dynaamisia iskukuormituksia. Nämä dynaamiset kuormitukset eivät vahingoita ainoastaan jatkoskohtaa, vaan koko ympäröivää ratarakennetta, kuten kiskoja, pölkkyjä ja sepeliä. Kiskoatkoksesta syntyneet ongelmat laajenevat siis koko ratarakenteen ongelmaksi.

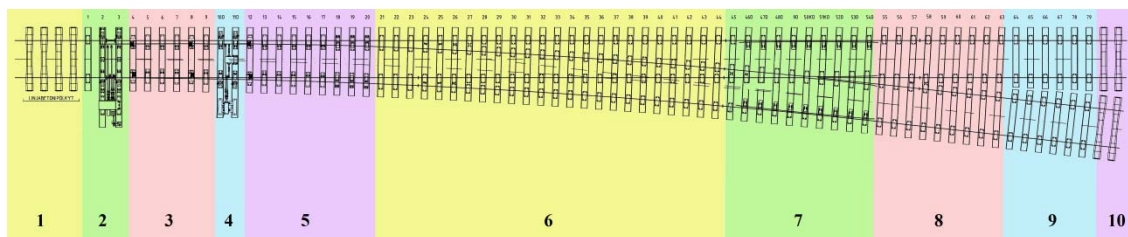
2.3.4 Yhteenveto

Yksinkertaisessa vaihteessa on monta epäjatkuvuuskohtaa, jotka aiheuttavat muutoksia junan kululle. Kiskoatkokosten lisäksi pyörän kulkupinnan epäjatkuvuutta muodostuu kohtiin, joissa pyörä siirtyy tukikiskolta kielelle sekä siipikiskolta risteyskärjelle. Näissä kahdessa epäjatkuvuuskohdassa samalla akselilla oleviin pyöriin muodostuu optimitalanteessakin kulkusäde-eroa, joka saa aikaan pyörien poikittaissuuntaista liikettä. Tämä poikittaissuuntainen liike aiheuttaa ylimääräisiä dynaamisia kuormituksia, jotka kuluttavat sekä rataa että pyöriä. Kiskoatkoksen ja pyörien kontaktipintojen kulumisen seurauksena ongelmat lisääntyvät entisestään, koska silloin siirtyminen epäjatkuvuuskohdan ylitse ei tapahdu enää optimaalisella tavalla. Liiallisen kulumisen seurauksena pyörä saattaa liikkua epäjatkuvuuskohdassa myös pystysuunnassa, josta seuraa todella merkittäviä iskukuormituksia. Näissä epäjatkuvuuskohdissa on siis

erittäin tärkeää, että kiskojen ja kielten geometria on suunniteltu oikein ja niiden kulumista voidaan hallita tehokkaasti.

2.4 Teoreettiset jäykkyysalueet

Edellä esitetty luku 2.2 osoittaa, että vaihderakenne muuttuu komponenttitasolla hyvin paljon vaihteen eri osissa. Nämä komponenttimuutokset vaikuttavat luonnollisesti suoraan vaihteen elastisuuteen. Tällöin vaihde voidaan teoriassa jakaa tiettyihin jäykkyysalueisiin sen perusteella, mitä komponentteja milläkin alueella käytetään. Kuva 14 osoittaa teoreettiset jäykkyysalueet normaalissa 1:9-risteyssuhteella olevassa vaihteessa.



Kuva 14. YV60-300-1:9-O vaihteen teoreettiset jäykkyysalueet.

Kuvassa 14 vaihde on jaettu yhteensä 10 eri jäykkyysalueeseen rakenteensa mukaan. Sama kuva on esitetty suurempana liitteessä 2. Tarkemmat kuvaukset jokaisesta jäykkyysalueesta on esitetty alla:

1. Normaali rata ennen etujatkosta:

Rakenne: kisko – 6mm Zw 900 NT-välilevy – linjapölkky.

Tällä alueella vallitsee normaali linjaraitteen jäykkyys, jossa elastisena komponenttina toimii Vosslohin Zw 900 NT-välilevy. Lisätietoa tämän rakenteen jäykkyysominaisuuksista löytyy Liikenneviraston julkaisusta 6/2013.

2. Vaihteen kärkitoimilaitteen kohta (pölkky 1-3):

Rakenne: kisko ja kuormittamaton kieli – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy (4 mm) – pitkä vaihdepölkky.

Rakenne muuttuu suhteessa linjaraitteeseen merkittävästi. Elastisia komponentteja ei liikkuvan kielen takia käytetä käytännössä lainkaan, joka tekee rakenteesta hyvin jäykän. Toisaalta toimilaitetankojen johdosta 2. ja 3. pölkyn väliä ei päästä tukemaan koneellisesti, jolloin pölkky saattavat olla ilmassa. Tämä taas vähentää rakenteen jäykkyyttä. Yhdessä nämä ominaisuudet johtavat siihen, että näiden muutaman pölkyn kohdalle alkaa ajan mittaan syntyä geometriavirhettä.

3. Välialue vaihteenkääntölaitteen ja kääntöavustimen välissä (pölkky 4-9):

Rakenne: kisko ja osittain kuormitettu vaihteen kieli – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – vaihdepölkky.

Toimilaitteiden väliin jäävä alue, jossa jäykkyys on kohtalaisen tasaista. Alueiden 2 ja 4 ongelmat voivat kuitenkin levitä myös tälle välialueelle. Tällä alueella kunnan heikkenemistä voi aiheuttaa myös pyörän siirtyminen tukikiskolta kielelle.

4. Vaihteen kääntöavustimen kohta (pölkkyt 10-11):

Rakenne: kisko ja kuormitettu vaihteen kieli – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – pitkä vaihdepölkky.

Tämä alue vastaa hyvin paljon aluetta 2, jossa toimilaitetankojen takia sepelin koneellinen tuenta on mahdotonta. Tämä tarkoittaa sitä, että täällä alueella tukikerroksen kunto on hyvin usein heikko ja geometriavirheitä pääsee syntymään.

5. Kielisovituksen kanta-alue (pölkkyt 11-20):

Rakenne: kisko ja kuormitettu kielen kantaosa – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – vaihdepölkky.

Elastisuudeltaan kohtalaisen tasainen alue, jossa kielen geometria alkaa vastata normaalia kiskoprofiilia. Vaihteen tiukka kaarresäde saattaa aiheuttaa kulumista poikkeavan raiteen ulkokiskoissa, jolloin poikittaisuuntaiset kuormituksen lisääntyvät.

6. Vaihteen välikiskoalue (pölkkyt 21-44):

Rakenne: 4 kiinteää kiskoa – 6mm elastinen välilevy – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – vaihdepölkky.

Tällä alueella rakenteen jäykkyyttä lisää 4 kiinteää kiskoa, mutta niiden alla oleva 6 mm välilevy vuorostaan vähentää rakenteen jäykkyyttä. Ero äskeiseen alueeseen on lopulta hyvin pieni. Pölkyn pidentyessä tukeminen on hankalampaa, joka voi vaikuttaa rakenteen kokonaisjäykkyyteen. Risteyskärjen läheisyys voi aiheuttaa junan kulkuun häiriöitä myös tällä alueella. Ulkokaarten kiskot poikkeavalla raiteella kuluvat edellisen alueen tapaan normaalia enemmän kaarresäteen takia.

7. Vaihteen risteysalue (pölkkyt 45-54):

Rakenne: mangaaniteräksinen risteysosa sekä vastakiskot ja siipikiskot – Välilevy – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – pitkä vaihdepölkky.

Risteysosan epäjatkuvuuskohta aiheuttaa dynaamisia iskukuormia, jotka rasittavat rakennetta. Sepelin kunto heikkenee iskujen vaikutuksesta todella paljon, koska rakenteessa ei ole lainkaan elastista välilevyä. Näin ollen rata painuu ja iskut lisääntyvät entisestään. Alue voidaan kuitenkin tukea vaihteentukemiskoneella, toisin kuin kielisovitusalue.

8. Risteyksen jälkeinen pitkien pölkkyjen alue (55-63):

Rakenne: kiskot (4 kpl) – 6mm elastinen välilevy – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – pitkä vaihdepölkky.

Risteyksen takana kiskot ovat yhä kiinni samassa todella pitkässä pölkkyssä, jonka kuormitus on hyvin epätasaista (vrt. suorat kiskot ja poikkeavat kiskot). Risteyskärjen läheisyys voi aiheuttaa junan kulkuun häiriöitä myös tällä alueella.

9. Vaihteen takajatkosalueet (pölkkyt 64-79):

Rakenne: kiskot (4 kpl) – 6mm elastinen välilevy – vaihdealuslevy – korkkikumivälilevy – 2 erillistä vaihdepölkkyä.

Siirtyminen pitkältä pölkyltä lyhyelle ja päinvastoin voi aiheuttaa jähkyysmuutoksia. Siirtymäkohdan jälkeen rata hyvin stabiili.

10. Normaali rata vaihteen jälkeen:

Rakenne: kisko – 6mm Zw 900 NT-välilevy – linjapölkky.

Tämä alue vastaa jäykkyydeltään käytännössä aluetta 1.

Näiden jäykkyydsalueiden lisäksi vaihteessa on joitakin erikoisratkaisuja, joiden takia jäykkyys voi teoriassa muuttua. Tällaisia on esimerkiksi johtojen läpivientipölkkyt, joita esimerkkivaihteessa ovat pölkkyt 8, 38 ja 39. Jäykkyysero normaaliin vaihtepölkkyyn verrattuna on kuitenkin niin pieni, ettei sitä ole erikseen huomioitu.

Pidemmissä vaihteissa on useampien toimilaitteiden vuoksi enemmän jäykkyydsalueita. Nämä ylimääräiset jäykkyydsalueet muodostuvat alueiden 3 ja 4 perään ja vastaavat käytännössä alueita 2, 3 ja 4. Esimerkiksi 1:18-vaihteen jäykkyydsalueet voitaisiin ilmaista suoraan edellä esitettyjen alueiden mukaan: 1-2-3-4-3-2-3-4-5-6-7-8-9-10.

3 Tarkastusten ja kunnossapidon merkitys vaihteen jäykkyyteen

Vaihterakenteen komponenttien ohella ymmärrettävästi myös niiden kunnossapidolla ja tarkastustoiminnalla on suuri merkitys radan kuntoon ja sen pysyvyyteen. Luvuissa 2.3 2.4 ja 2.4 on osoitettu, että vaihterakenteen eri osiin voi muodostua merkittäviä rasituksia junan yliajon aikana. Samalla on kuitenkin todettu, että ideaalisessa tilanteessa näitä rasituksia ei välttämättä synny lainkaan tai ne ovat hyvin maltillisia. Ideaalinen tilanne vastaa käytännössä hyvin suunniteltua ja asennettua uutta vaihdetta. Tämä on hyvin olennainen tieto, sillä kunnossapidon perimmäinen tarkoitus on nimenomaan pitää vaihterakenne mahdollisimman uutta vastaavana. Onnistuneella kunnossapidolla voidaan siis saavuttaa selkeää hyötyä vaihteen toiminnalle. Tämä luku keskittyy vaihteen tarkastukseen ja kunnossapitoon sekä niissä havaittuihin ongelmiin nimenomaan radan jäykkyyšnäkökulman kannalta.

3.1 Kunnossapidolliset ongelmakohdat vaihteissa

Radan tarkastuksen ja kunnossapidon kannalta vaihde sisältää paljon erityiskomponentteja, joiden kunnolla on hyvin suuri merkitys vaihteen toiminnalle. Näitä komponentteja ovat esimerkiksi risteyskärki, kielisovitus, vaihdepölkkyt ja toimilaitteet. Näiden erityiskomponenttien tehokas kunnossapito vaatii paljon erityisosaamista, joka eroaa normaalin linjaraitteen kunnossapidosta.

Suurella osalla vaihteissa tehtävistä kunnossapitotoimista on joko suora tai välillistä vaikutusta vaihteen elastisuuteen. Elastisuuteen välillisesti vaikuttavia kunnossapitotehtäviä on esimerkiksi toimilaitetankojen pituuden säätäminen tai kiskojen ja kielien profiilin ylläpito. Näiden toimien laiminlyönti vaikuttaa suoraan vaihteissa syntyviin dynaamisiin kuormituksiin, jotka heikentävät tukikerroksen kuntoa ja muuttavat vaihterakenteen elastisuutta. Tällöin on pakko suorittaa vaihteen tukeminen, jolla on suora vaikutus tukikerroksen kuntoon ja näin ollen myös elastisuuteen. Puhtaasti elastisuuden kannalta ajatellen vaihteen tukeminen onkin selkeästi vaihteen kunnossapidon tärkein osa-alue. Muilla kunnossapitotoimilla pystytään kuitenkin ehkäisemään vaihteen tukemisen tarvetta, jolloin niiden merkitystä ei voi vähätellä.

Vaihteiden kohdalla monimutkainen ja alati muuttuva rakenne tekee kunnossapidosta ja tarkastustoiminnasta kuitenkin hyvin hankalaa. Seuraavissa kappaleissa on tarkasteltu lähemmin näitä elastisuuden kannalta tärkeitä tarkastus- ja kunnossapitotehtäviä sekä niissä havaittuja ongelmia.

3.1.1 Vaihteen tukeminen

Kuten edellä todettiin, yksi merkittävimmistä kunnossapidon tehtävistä vaihteissa on radan tukeminen. Tukemisen päätarkoituksena on poistaa radassa havaitut geometriavirheet, jotka johtuvat pölkkyjen vääristä asemasta sekä vaaka- että pystysuunnassa. Geometriavirheet korjataan tukemiskoneella, joka tarttuu kiskoon ja nostaa sen pölkkyineen oikeaan asemaan. Noston jälkeen tukemiskoneen tuentahakut puristavat sepelin nostetun pölkyn alle, jolloin pölkky jää korjattuun asemaansa. Näin edetään pölkky kerrallaan, kunnes haluttu alue on saatu tuettua. Radan asennuksen yhteydessä

alkuperäinen geometria voi olla hyvin kaukana lopullisesta tavoitteesta, jolloin rataa ei voida kerralla nostaa lopulliseen geometriaansa. Tällöin tuettava alue on ajettava läpi useaan kertaan. On kuitenkin äärimmäisen tärkeää muistaa, että sepelin koneellinen puristaminen pölkyn alle hienontaa kiviainesta, jolloin kiviaineksen laatu heikkenee jokaisella tukemiskerralla. Tästä syystä tuentaa ei saa koskaan tehdä ilman todellista tarvetta. (Liikennevirasto 2013b)

Vaihteessa on normaaliin linjaraitteeseen verrattuna monia eroavaisuuksia, jotka vaikuttavat merkittävästi radan tukemiseen. Tukemiseen vaikuttavista eroista voidaan mainita esimerkiksi pölkyn poikkileikkausmuoto, pölkyn vaihtelevan pituus, kieli- ja risteysgeometriat sekä vaihteessa kiinni olevat toimilaitteet, jotka tekevät vaihteen tukemisesta normaalia hankalampaa. Tästä syystä vaihteen tukemista varten on kehitetty aivan erillisiä vaihteentukemiskoneita, jotka ottavat huomioon nämä eroavaisuudet. Suurimpana erona normaaliin linjaraitteen tukemiskoneeseen on kyky nostaa myös vaihteen poikkeavaa kiskoa, jolloin myös pitkiä pölkkyjä voidaan nostaa koko matkaltaan (Kuva 15). Tämä pienentää kiskon kiinnityksiin kohdistuvia voimia jopa puolella. Lisäksi vaihteentukemiskoneen tukemishakuilla on enemmän vapausasteita, eli niitä voidaan vapaammin kallistella ja liikutella sekä radansuunnassa että poikittaissuunnassa. (Lichtberger 2011.) Tämä ominaisuus on vaihteen tukemisessa välttämätöntä raiteiden erkaantuessa jatkuvasti toisistaan.

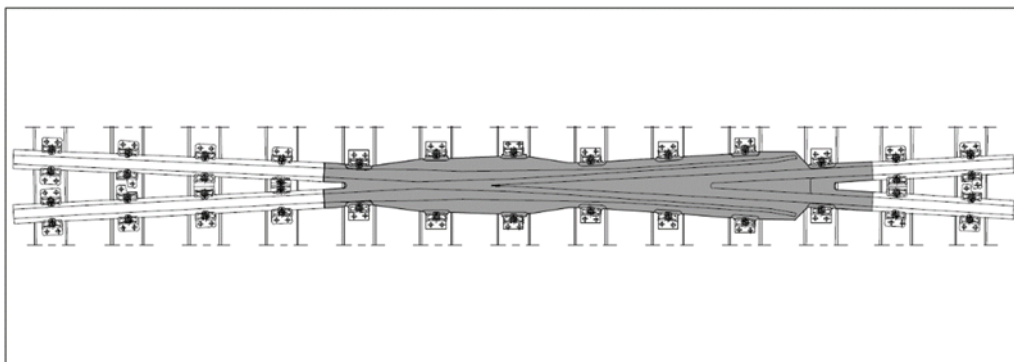


Kuva 15. Vaihteentukemiskone tukemassa risteyskärkeä Viinikan ratapihalla.

Vaihteentukemiskonekaan ei kuitenkaan pysty tukemaan vaihdetta aivan kokonaan. Suomessa käytettävät vaihteenkääntölaitteet ja valvontalaitteet on suunniteltu siten, että niiden kääntö- ja valvontatangot kulkevat sepelitukikerroksessa kahden pitkän vaihdepölkyn välissä. Näin ollen näitä pölkkyjä ei voida koneellisesti tukea, sillä tukemishakut vaurioittaisivat tankoja. Koneellisen tuennan jälkeen näitä kohtia yritetään tukea käsikäyttöisillä laitteilla, mutta tällä tavoin pystytään hyvin harvoin saavuttamaan tasaisia ja ennen kaikkea kestäviä tuloksia. Tuennan puuttumisen seurauksena sepeli jatkaa hienonemistaan toimilaittepölkkyjen alla. Tällainen hyvin pistemäinen tukikerroksen hienonemisongelma johtaa yleensä tilanteeseen, jossa sepelin ja pölkyn välinen kontakti katoaa täysin. Tämä johtuu siitä, että jäykkä kisko

pitää ongelmakohtan pölkkyjä ympäröivien pölkkyjen tasolla. Pölkkyt ikään kuin roikkuvat ilmassa. Junakuormitusten alaisena kisko kuitenkin taipuu, jolloin ilmassa olevat toimilaitepölkkyt iskeytyvät jo ennestään hienontuneeseen sepeliin ja tilanne pahenee entisestään. Toimilaitteiden kohdalle muodostuu siis helposti merkittävä jäykkyyden muutoskohta, jossa muodostuvat dynaamiset iskut heikentävät myös ympäröivää ratarakennetta.

Toimilaittekohtien lisäksi myös risteysalue aiheuttaa ongelmia vaihteen tukemisessa. Hyvän tukemistuloksen saavuttamiseksi on tärkeää, että tukemiskoneet puristaisivat sepeliä mahdollisimman lähellä kiskoja, jotta sepeli tukisi pölkkyä optimaalisesti juuri rasituskohdasta. Vaihteen risteyksissä ongelmaksi muodostuu kuitenkin risteuksen kärkiosan leveys. Varsinkin mangaaniteräksestä valettu risteyskärkiosa on siipikiskoi-neen melko leveä (Kuva 16), jolloin tukemishakut jäävät hyvin etäälle varsinaisesta rasituskohdasta. Näin ollen tukemishakujen vaikutusalue ei välttämättä yllä aivan risteyskärjen keskelle, jossa rasitukset ovat suurimmillaan. Kunnossapitäjiltä saatujen havaintojen perusteella risteyskärjen alla on havaittu pölkkyjen selkeää taipumista, joka on todennäköisesti seurausta juuri tästä seikasta. Nykyisen ohjeistuksen mukaisesti (Liikennevirasto 2013b) pölkyn taipumista tulee kompensoida risteuksen aluslevyjen alle asennettavilla lisälevyillä, joiden materiaalia ei kuitenkaan ohjeissa määritellä. Tällä toimenpiteellä ei todennäköisesti kuitenkaan saavuteta samoja tuloksia kuin tehokkaalla tuennalla.



Kuva 16. Mangaaniteräksestä valettu risteysosa YV60-300-1:9-vaihteessa. (Liikennevirasto 2013a)

Risteuksen leveyden lisäksi risteuksen tukemista hankaloittaa myös siipikiskojen ylikorotus, jonka vuoksi siipikiskot ovat normaalin kulkupinnan yläpuolella. Jos siipikiskot tuetaan normaalin linjaraitteen tasoon, vaihte kallistuu ja vaihdepölkkyt taipuvat risteuksen alta. Tämä ongelma on kuitenkin täysin vältettävissä kunnossapitäjän riittävällä ammattitaidolla.

3.1.2 Vaihteen teräsosien kuluminen

Tukemisongelmien ohella myös vaihteen teräsosien kuluminen aiheuttaa ongelmia kunnossapidolle. Kuten aiemmin jo todettiin, kulumisella ei ole suoranaista vaikutusta vaihteen kokonaisjäykkyyden arvoon. Kiskon kulumisella ja jäykkyydellä on itse asiassa molemminpuolinen suhde. Luvun 2 perusteella voidaan todeta, että yksittäisten vaihdekomponenttien jäykkyys tekee vaihderakenteesta kokonaisuutena jäykän. Tämä jäykkyys aiheuttaa liikenteen alla kiskojen kulumista, joka lisää junasta aiheutuvia dynaamisia kuormia. Dynaamisten kuormien suuruus ja epäsäännöllisyys heikentävät sepelin kuntoa ja näin ollen heikentävät radan jäykkyyttä. Eli käytännössä jäykkyys vaikuttaa kulumiseen, joka edelleen vaikuttaa jäykkyyteen.

Yksittäisten komponenttien jäykkyyden ohella vaihteen kulumisongelmat johtuvat epäjatkuvuuskohtien aiheuttamista iskuista ja poikkeavan raiteen tiukoista kaarteista, joissa ei käytetä lainkaan siirtymäkaaria. Näin ollen suurimmat kulumat sijoittuvat nimenaan lyhyissä vaihteissa kielisovituksen siirtymäkohtaan, poikkeavan raiteen välikiskoalueelle sekä risteyskärkeen ja siipikiskoisiin.

Edellä esitetyissä kuvissa 7 ja 12 on kiskon poikkileikkauksien avulla esitetty kuinka junan pyörä siirtyy vaihteen epäjatkuvuuskohtien yli vaihteen kielisovituksessa ja risteysalueella. Näistä kuvista voidaan havaita, kuinka siirtymäkohtien kiskoprofiilit on suunniteltu tarkasti siten, että pyörä pääsee siirtymään sysäyksettömästi epäjatkuvuuskohtien yli hallitun kaksipistekontaktin avulla. Näiden epäjatkuvuuskohtien kulumisen luonnollisesti muuttaa pyörän kulkurataa, jolloin siirtyminen ei tapahdu enää alkuperäisen suunnitelman mukaisesti. Tästä johtuen siirtymä epäjatkuvuuskohtien ylitse aiheuttaa ylimääräisiä pysty- ja poikittaissiirtymiä. Nämä ylimääräiset liikkeet aiheuttavat luonnollisesti dynaamisen kuormituksen lisääntymistä, joka kuluttaa pyörä- ja kiskoprofiileja lisää ja tilanne pahenee entisestään.

Kassa & Nielsen (2008) ovat tutkimuksissaan perehtyneet yleisesti vaihteen kunnan heikkenemiseen johtaviin tekijöihin ja niiden yhteisvaikutukseen. He valitsivat yhteensä 14 eri vaihteen kuntoon vaikuttavaa tekijää ja määrittivät niille sekä optimaalisen että heikentyneitä tilannetta kuvaavan arvon. Näiden arvojen avulla pystyttiin muodostamaan erilaisia kombinaatioita, joiden käyttäytymistä tarkasteltiin simuloimalla pyörän kulkua vaihteen kielisovituksen yli.

Tutkimukset osoittivat, että vaikuttavimmat tekijät radan kunnan heikkenemiselle ovat junan akselipaino, pyörän ja kiskon välinen kitkakerroin sekä pyörän profiilin muoto. Kieliprofiilin osalta simuloinneissa oli mukana uusi, kulunut sekä plastisesti muokkautunut profiili. Näistä vaihtoehdoista plastisella muokkautumisella oli suurin vaikutus radan kulumiseen, kun se yhdistettiin edellä mainittujen parametrien kanssa. (Kälvälä 2013)

Kielisovituksen tapaan kulumista tapahtuu myös siipikiskoissa ja risteyskärjessä. Alfi & Bruni (2009) ovat simuloimalla tutkineet kiskon ja pyöräprofiilin kulumisen ja geometriavirheiden vaikutusta risteyskärjessä syntyviin kuormituksiin. Taulukossa 2 on listattuna risteyksessä syntyvät pystysuuntaiset kuormitukset kolmessa eri simulointitapauksessa.

Taulukko 2. Vaihteen risteyskärjen kohdalla syntyvät pystysuuntaiset kuormitukset kolmessa eri simulointitapauksessa. (Kälvälä 2013)

Pääraide			
Tapaus	Maksimi pystysuuntainen voima Q [kN]	Minimi pystysuuntainen voima Q [kN]	Pystysuuntainen kiihtyvyys kiskon tasolla [m/s ²]
a	63,9	18,9	9,44
b	61,1	17,7	22,72
c	118,3	0	47,25
Poikkeava raide			
Tapaus	Maksimi pystysuuntainen voima Q [kN]	Minimi pystysuuntainen voima Q [kN]	Pystysuuntainen kiihtyvyys kiskon tasolla [m/s ²]
a	74,3	14,7	3,6
b	86,5	15,6	6,2
c	125,4	0	9,1

a = Uusi pyörä ja kiskoprofiili ja geometrialtaan virheetön vaihde
 b = Uusi pyörä ja kiskoprofiili, geometriassa pieniä virheitä
 c = Kulunut pyörä ja kiskoprofiili, geometriassa pieniä virheitä

Taulukosta 2 nähdään, että varsinkin kisko- ja pyöräprofiilin kulumisella on todella suuri merkitys risteyksessä syntyviin pystysuuntaisiin voimiin. Pääraidetta ajettaessa voima Q kasvaa kuluneilla profiileilla lähes kaksinkertaiseksi uusiin profiileihin verrattuna. Poikkeavalla raiteellakin vaikutus on absoluuttisesti samankaltaista, mutta voimien tasot ovat kauttaaltaan hieman suurempia, koska pyörä on lähempänä laippakosketusta vaihteen tiukan kaarteeseen takia. Pelkät geometriavirheet eivät näytä vaikuttavan yhtä radikaalisti voimien syntyyn, sillä ero ideaalitalanteeseen on vain muutamia prosentteja. Myös pystysuuntainen kiihtyvyys muuttuu merkittävästi kaikkien simulointitapausten välillä. Kiihtyvyyden arvot ovat kuitenkin pääraiteella huomattavasti isompia, johtuen junan suuremmasta nopeudesta. Mielenkiintoisena yksityiskohtana voidaan myös huomata, että kuluneilla profiileilla pystysuuntainen minimivoima on kumpaankin suuntaan ajettaessa nolla. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että pyörän ja kiskon välinen kontakti irtoaa jossakin kohdassa hetkellisesti.

Taulukko 2 osoittaa, että jos kulumista ei pystytä hallitsemaan, se johtaa kuormitusten merkittävään lisääntymiseen. Ajan kuluessa kulumisen voi lisäksi johtaa tilanteeseen, jossa pyörän laippa törmää risteuksen terävään kärkeen. Tästä syntyy vielä huomattavasti suurempia iskumaisia kuormituksia, jotka voivat murtaa koko risteuksen. Teräsosien ohella dynaamiset iskukuormitukset vahingoittavat tietenkin myös muuta ratarakennetta, jolloin koko radan kunto heikkenee.

Näiden kulumisvaikutusten ehkäisemiseksi kiskoja voidaan kunnossapitaa kiskojen hitsaamisella, profiilin hionnalla tai kiskon vaihdolla. Tarve näille toiminnoille määritellään vaihteen kunnossapitotarkastuksien yhteydessä, jotka perustuvat suurelta osin silmämääräiseen tarkastamiseen. Silmämääräisen tarkastuksen jälkeen voidaan tarpeen mukaan suorittaa myös kiskoja ultraäänitarkastusta (VR Track 2011). Säännöllinen silmämääräinen tarkastus saattaa olla tietyin edellytyksin hyvä keino seurata vaih-

teen eri osien kulumista, mutta se vaatii kunnossapitäjältä erittäin harjaantunutta näkemystä kulumisen kehittymisestä. Kunnossapitäjä voi arvioida vaihteen kulumista eri vikatyypeille määritettyjen virhepisteiden avulla. Vaihteen kuntoa arvioidessa tulee kuitenkin ottaa huomioon myös liikennemäärät ja junanopeudet, joilla on merkittävä vaikutus vaihteen kulumiseen. Silmämääräisellä tarkastuksella voidaan kuitenkin hyvin havaita esimerkiksi mangaaniteräksestä valmistettujen risteysten muokkauslujittumisvaiheessa tapahtuva purseen muodostuminen. Kokenut kunnossapitäjä pystyy silmämääräisesti havaitsemaan koska purse on hiottava pois, jotta risteys toimisi optimaalisella tavalla.

Ultraäänitarkastuksen tarkoituksena on havaita halkeamia kiskon sisältä. Ultraääni on kuitenkin havainnointitapana sellainen, että se havaitsee pinnalta lukien vain ensimmäisen särön. Pinnan lähellä olevan vian alla voi olla muitakin kiskon halkeamia, mutta niitä ei pystytä tällä tavoin havaitsemaan. Ultraäänitarkastus mahdollistaa kuitenkin tehokkaasti yksittäisten kiskovikojen havainnoinnin ja seurannan. Kiskon sisäisten säröjen tarkastelu on erittäin tärkeää, sillä esimerkiksi kielessä havaittu 5 mm:n säröviika saattaa murtaa koko kielen puolella vuodessa jatkuvan liikenteen alla. (VR Track 2011)

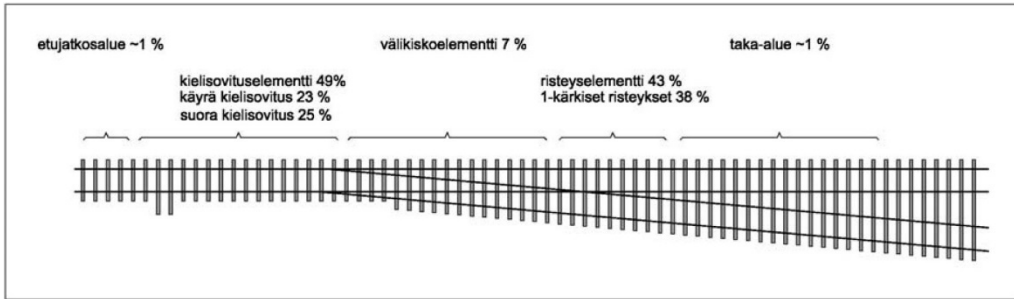
Silmämääräisen tarkastuksen lisäksi vaihteen kielisovituksen kulumista voidaan mitata erillisellä mittatulkilla, mutta niiden käyttö on harvinaista. Mittatulkien käytöstä on kerrottu lisää kunnossapitäjien haastattelujen yhteydessä kappaleessa 3.2

Jos tarkastuksessa ilmenee kiskon kulumista, kunnossapitäjän on pystyttävä tapauskohtaisesti valitsemaan oikea kunnossapitotehtävä. Tämä saattaa monessa tilanteessa olla ongelmallista, sillä kiskon kulumiseen liittyy usein myös kiskon sisäiset murtumat ja väsymisilmiöt, joita on silmämääräisessä tarkastuksessa mahdotonta havaita. Yleisimmin radan tarkastuksessa päädytään kiskoja päälle hitsaamiseen, jolla voidaan korjata puhtaasti kiskon kulumisesta johtuvia ongelmia. Kiskoja hitsaaminen tulee tehdä Liikenneviraston ratateknisten ohjeiden osan 12 ”Päällysrakennehitsaus” mukaisesti. Kokemus on osoittanut, että hitsaus on edullisinta tehdä ajanhetkellä, jolloin kisko on kulunut 3-4 mm (Liikennevirasto 2013b).

Jos kulumisen on hyvin voimakasta ja kiskossa on havaittavissa myös murtumia, joudutaan turvautumaan kiskoja hiontaan, jotta murtumat saadaan poistettua. Kielen liikkuvalla alueella kiskohionta on vaihdon ohella ainoa kunnossapitotoimi, sillä kielen päälle hitsaaminen on kielletty. Kielen muotoiluhiontaa käytetään tilanteissa, joissa kielen kulumisen johdosta pyörä siirtyy kielelle liian aikaisin. Kieli saa kantaa junakuormia vasta, kun sen selän leveys on 25 mm tai suurempi. (Liikennevirasto 2013b)

Vaihteiden tarkan geometrian vuoksi kunnossapidossa joudutaan usein turvautumaan myös kiskon vaihtoon. Varsinkin kielisovitusalueella tukikiskon ja kielen välisen aseman muuttuminen kulumisen tai muun syyn johdosta korjataan usein vaihtamalla koko kielisovitus. Tämä on helpoin keino varmistaa näiden kahden osan täydellinen yhteensopivuus.

Kiskon kulumaa ja kiskovikoja esiintyy koko vaihteen matkalla. Kunnossapitoalueella 1 ja välillä Lahti-Vainikkala tehtyjen ultraäänitarkastusten pohjalta on kuitenkin pystytty selvittämään, miten kiskoviat tilastollisesti jakaantuvat vaihteen eri elementteihin. Kuvassa 17 on esitetty kiskovikojen prosentuaalista jakautumista 60E1-vaihteen eri osissa.



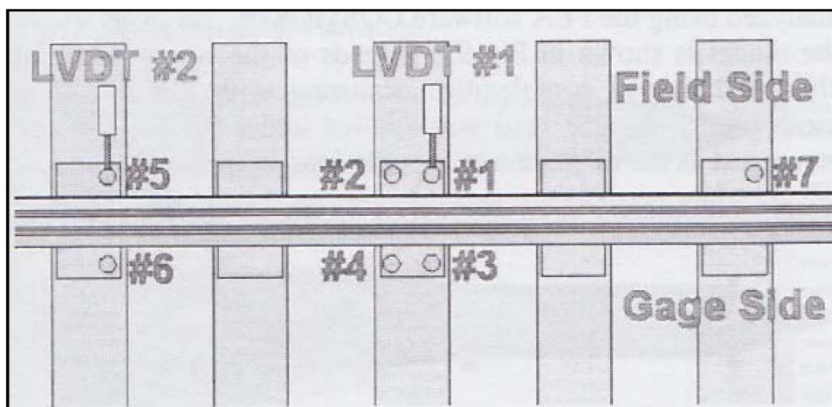
Kuva 17. Vikojen prosentuaalinen jakautuminen 60E1-vaihteissa kunnossapito-alueella 1 ja välillä Lahti-Vainikkala. (VR Track 2011)

Kuvasta 17 voidaan selkeästi nähdä, että vaihteissa havaitut kulumisongelmat keskittyvät hyvin suurelta osin kielisovituksen ja risteysalueen kohdalle. Näiden kahden alueen yhteenlaskettu osuus vioista on jopa 92 %. Se on hyvin ymmärrettävää, sillä nämä kohdat sisältävät kiskon epäjatkuvuuskohdan. Kielisovituksessa viat jakaantuvat käytännössä tasan suoran ja poikkeavan raiteen kesken, joka entisestään alleviivaa sitä, että epäjatkuvuuskohdalla on suurin merkitys kiskovikojen synty-miseen.

3.1.3 Raideruuvien kestävyys

Kuten jo aiemmin luvussa 2.2.6 todettiin, kiskon kiinnitysosien oikealla kiristysmomentilla on suora vaikutus vaihteen välilevyn puristumaan ja näin olen vaihde-rakenteen jäykkyyden arvoon. Kiskonkiinnitysten lisäksi ongelmia aiheuttaa myös vaihdealuslevyn kiinnittämiseen käytettävien raideruuvien kestävyys.

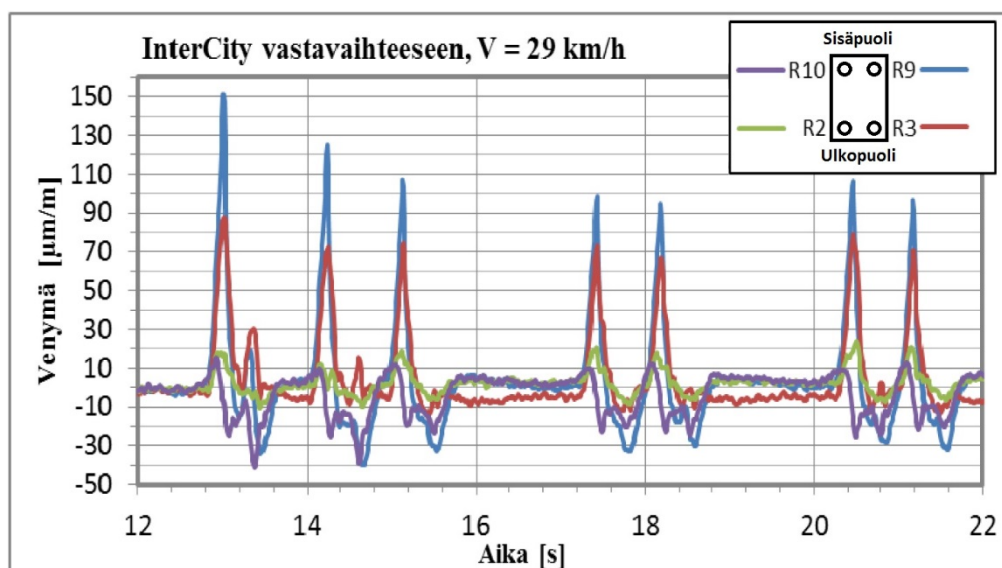
Raideruuvien kestävyys on tutkittu maailmalla useastikin, mutta tutkimukset on pääosin keskittynyt puupölykytetyille radoille. Näistä voidaan esimerkkinä mainita yhdysvaltalaisen Dick et al. (2007) tekemä tutkimus, jonka tarkoituksena oli selvittää raideruuveihin kohdistuvia taivutuskuormia tiukassa kaarteessa. Ruuvien rakenteeseen haluttiin tehdä mahdollisimman vähän muutoksia, joten tutkimusryhmä kehitti tätä tehtävää varten oman mittausmenetelmän. Menetelmässä testattaviin raideruuveihin porattiin keskelle reikä, johon asennettiin venymäliuskoilla varustetut sovitimet. Raideruuvien taipuessa sovitimiin kohdistuu täysin identtinen taipuma, joka on mitattavissa venymäliuskojen avulla. Anturoitujen ruuvien sijainti on esitetty kuvassa 18. (Salminen 2013)



Kuva 18. Anturoitujen raideruuvien sijainti. (Salminen 2013)

Tutkimukset osoittivat, että raideruuvit voivat todellisuudessa katketa nimenomaan kaluston poikittaissuuntaisten kuormitusten aiheuttaman taivutusväsymisen myötä. Ongelmat johtuvat pääosin siitä, että poikittaiset kuormitukset eivät jakaudu lähellekään tasaisesti neljän kiinnitysruuvin kesken. Ruuvi numero 2 kantoi mittauksissa noin 2,5 kertaa enemmän kuormaa kuin muut samassa levyssä kiinni olevat raideruuvit. Samaan aikaan ruuvi numero 4 ei kantanut kuormia käytännössä lainkaan. Näin epätasainen kuormitusjakauma johtaa pidemmällä aikavälillä ruuvin numero 2 väsymisvaurioon, jonka jälkeen kuormitukset jakaantuvat uudelleen jäljelle jäävien 3 ruuvin kesken. Jos kuormituksen epätasainen jakaantuminen jatkuu myös tässä tilanteessa, ruuvit väsyvät yksi kerrallaan. (Salminen 2013)

Suomessa raideruuvien katkeamisia on esiintynyt lyhyissä vaihteissa. Ongelmia on havaittu erityisesti vaihteen poikkeavan raiteen vastakiskosovituksessa sekä poikkeavan raiteen ulkokiskossa lähellä vaihteen risteystä. Salminen (2013) on tutkimuksissaan keskittynyt nimenomaan näihin vaihteissa havaittuihin raideruuviongelmiin. Hänen tutkimuksissaan Tampereen ratapihalla sijaitsevaan vaihteeseen TPE Vo11, asennettiin neljään vaihtealustuslevyyn anturoidut raideruuvit, joiden venymää mitattiin venymäliuskojen avulla. Mittauskohdista kolme sijaitsivat edellä mainituilla ongelma-alueilla, jonka lisäksi yksi mittaus tehtiin vertailun vuoksi poikkeavan raiteen takajatkoksessa. Mittauksista saatuja raideruuvien venymiä vastakiskon kohdalla on esitelty kuvassa 19. (Salminen 2013)



Kuva 19. Raideruuvien venymä vastakiskosovituksen keskimmaisessä vastakiskopukissa (Pölkky 50KO). Kuva lainattu muokattuna lähteestä (Salminen 2013).

Mittauksista saadut tulokset olivat hyvin samankaltaisia kuin edellä esitetyt yhdysvaltalaisen tulokset. Takajatkoksen referenssipisteessä venymät jakaantuivat vielä hyvin tasaisesti neljän eri raideruuvien kesken. Kuormituksen alaisena yksittäisen ruuvin venymä oli referenssipisteessä noin 15 µm/m. Muissa mittauspisteissä kuormitus oli kuitenkin huomattavasti epätasaisempaa. Suurimmat ja epätasaisimmat venymät raideruuveihin syntyivät vastakiskosovituksen keskimmaisessä vastakiskopukissa (Pölkky 50KO). Kuva 19 osoittaa, kuinka pyöräkuorman ansiosta raideruuviin R9 kohdistuu hetkellisesti jopa kymmenkertainen venymä suhteessa referenssipisteen ruuveihin. Myös ruuvin R3 kohdistuu huomattavasti keskiarvoa suurempia venymiä, jolloin nämä ruuvit ovat hyvin alttiita väsymisvaurioille. (Salminen 2013)

Kunnossapidon kannalta raideruuvien katkeaminen on hyvin ongelmallinen tilanne. Kokemus on osoittanut, että raideruuvi katkeaa useimmiten ruuvin kannasta päin katsottuna toisen tai kolmannen kierteen kohdalta. Tällöin ruuvin kanta ei välttämättä irtoa pölkyn muovisesta kiinnitysholkista, jolloin päältäpäin ei ole välttämättä havaittavissa minkäänlaista näkyviä oireita ruuvin vaurioitumisesta. Joissakin tapauksissa vaurion voi havaita ruuvin jousirenkaan hienoisesta löystymisestä, mutta normaalisti vaurioita täytyy etsiä koputtelemalla ruuvin kanta vasaralla ja kuulostelemalla ruuvista syntyvää ääntä. Täysin katkenneesta ruuvista syntyy hiukan kimeämpi kilahdus kuin ehjästä. Tämä vaatii kunnossapitäjältä kuitenkin todella harjaantunutta kuuloaistia. Paras ja varmin keino vaurion havainnointiin on ruuvin täydellinen irrottaminen. Tällä tavalla pystytään havaitsemaan myös osittain vaurioituneet raideruuvit, jolloin ne voidaan poistaa käytöstä ennen varsinaista katkeamista. (Salminen 2013)

Raideruuvien katkeaminen vaikuttaa pääosin radan poikittaissuuntaisen siirtymien kasvuun. Sillä on kuitenkin jonkinlaista vaikutusta myös radan pystysuuntaiseen käyttäytymiseen, sillä ruuvin katkeaminen vähentää vaihtealustavyyden alla olevan korkkikumivälilevyn esipuristusta, jolloin se joustaa junakuormien alla hieman enemmän. Korkkikumivälilevyn puristumakäyrästä (Kuva 5) voidaan kuitenkin havaita, että vaikutus on hyvin vähäistä (<0,5mm).

3.2 Kunnossapitäjien haastattelut

Tässä luvussa aiemmin esitetyt asiat osoittavat, että vaihteen häiriöttömään toimintaan ja sen kunnossapitoon liittyy monia ongelmia. Edellä mainittujen ongelmien painoarvoja on pyritty selvittämään haastatteleamalla vaihteen kunnossapidosta vastaavia henkilöitä sekä isännöitsijöitä muutamalta eri kunnossapitoalueella. Haastattelujen toisena tavoitteena oli saada selville, millä rataosilla sijaitsee pystysuuntaisen elastisuuden mittaamiseen parhaiten soveltuvia vaihteita. Haastatteluista saadut tiedot olivatkin lopulta määrävissä asemassa mittausvaihteiden valinnassa, joita esitellään tarkemmin luvussa 5.1.

Haastattelun pohjana toiminut kysymyssarja pyrittiin suunnittelemaan siten, että se antaa kunnossapitäjälle mahdollisuuden kertoa alkuun omin sanoin havaitsemistaan ongelmista, jonka jälkeen siirryttiin yksityiskohtaisempiin kysymyksiin. Tällöin voidaan varmistaa, että kunnossapitäjän mielestä olennaiset asiat tulevat keskusteluissa esille ja keskustelu etenee kunnossapitäjän valitsemaan suuntaan. Tällöin on myös tiedostettava, että eri kunnossapitäjien kanssa käydyt keskustelut etenevät aluksi hyvin eri suuntiin riippuen yksittäisen ihmisen näkemyksistä. Kysymyssarjan runkokysymykset on esitetty alla:

1. Yleiset kokemukset vaihderakenteen suurimmista ongelmista? Liittyvätkö rakenteeseen vai liikenteeseen/kalustoon?
2. Onko teidän mielestänne vaihderakenteen jäykkyyden tutkiminen järkevää?
3. Missä vaihteen kohdissa mahdollisia jäykkyyksmuutoksia on havaittu?
4. Mikä on vaihteen yleisin vauriotyyppi ja mitä toimenpiteitä ne vaativat?
5. Mitä muita vaurioita on havaittu ja mitä toimenpiteitä ne vaativat?
6. Pidätkö omaa rekisteriä vaihteista ja niissä havaituista vioista?
7. Jos tällainen rekisteri on olemassa, onko se paperiversio vai sähköinen dokumentti?
8. Ilmoitatteko kaikki tarkastuksessa tehdyt havainnot yleiseen vaihderekisteriin?

9. Minkälaisia mittalaitteita kunnossapitäjät käyttävät tarkastuksissaan?
10. Käytetäänkö teidän tekemissä tarkastuksissa kielen ja tukikiskon välistä korkeus-
asemaa mittaavaa tulkkia?
11. Jos tällaista mittatulkkiä käytetään, kirjataan tulokset jotenkin ylös?
12. Onko pitkän ja lyhyen vaihteen vaurioilla jotakin eroa?
13. Tehdäänkö vaihteissa paljon ultraäänitarkastuksia?
14. Miten pölkkyjä tuetaan toimilaitteiden kohdalta?
15. Noudattaako kunnossapitäjä orjallisesti kääntöavustimen säätöohjeita?
16. Käytetäänkö risteysalueella erillisiä korotuslevyjä pölkyn ja kiskon välissä?
17. Kuinka usein vaihteen risteyskärki hiotaan?

Keskusteluissa kävi selkeästi esille, että vaihderakenteen suurimmat ongelmat ovat tällä hetkellä nimenomaan vaihteen tukemiskäytännöissä ja vaihteen teräsosien kulumisessa. Raiteen tukemista tekevien ihmisten ammattitaito kuulemma vaihtelee hyvin paljon ja tämä näkyy erityisesti osaamista vaativilla vaihdealueilla. Ammattitaidon puute on johtanut monissa vaihteissa pölkyn asemavirheisiin ja tätä kautta radan geometriavirheisiin. Kulumisongelmia kerrottiin olevan erityisesti välikisko-
alueella ja risteyskärjessä.

Kaikki haastatteluihin osallistuneet henkilöt näkivät vaihderakenteen jäykkyyden tutkimisen hyvinkin merkittäväksi asiaksi. Tämä johtuu siitä, että monia vaihteissa havaittuja ongelmia joudutaan tällä hetkellä korjaamaan ilman, että tiedetään niihin johtaneita syitä. Radan jäykkyyttä ei käytännössä nykyään mitata millään tavalla, joten tässä nähdään olevan yksi hyvä kehityskohde syiden ratkaisemiseksi. Kunnossapitäjät yhdistävät jäykkyyden muuttumisen usein radan tarkastusvaunulla havaittuihin korkeuspoikkeamiin, joita esiintyy erityisesti kielisovitus- ja risteysalueilla.

Kunnossapitäjien mukaan vaihteissa tehdään säännöllisesti sekä vaihteen silmämääräistä tarkastusta että ultraäänitarkastusta. Tarkastusten yhteydessä tehtävissä kirjauksissa nähdään kuitenkin kauttaaltaan selkeästi kaksi isoa puutetta. Ensimmäisenä puutteena ilmeni se, että nykyisin kirjatut tehdään sääntöjen puuttuessa hyvin epävirallisesti esimerkiksi merkitsemällä ne omaan henkilökohtaiseen vihkoon. Toisena vielä suurempana puutteena nähdään lisäksi se, että kirjauksia tehdään vain ja ainoastaan konkreettisista toimenpiteistä, eli osien vaihdosta tai kiskojen hitsaamisesta. Jos tarkastettava vaihde ei vaadi toimenpiteitä, tarkastuksesta ei kirjata mitään ylös. Tämä johtaa käytännössä siihen, että alkavia vikoja ei ole merkitty mihinkään, koska ne eivät vielä vaadi toimenpiteitä. Ongelmia lisää vielä entisestään se, että tarkastukset tehdään silmämääräisesti, jolloin monia vikoja saattaa jäädä jopa havaitsematta.

Kunnossapitäjät kertoivat, että aikaisemmin kaikki vaihteet pisteytettiin niiden kunnan mukaan, mutta tästä tavasta on luovuttu ja nykyisen ohjeistuksen mukaisesti pisteytys tehdään vain vaihtoon tarkoitetuille vaihteille. Tässä asiassa voitaisiin miettiä palautamista takaisin kaikkien vaihteiden pisteyttämiseen, jolloin pystyttäisiin pitämään kattavaa ja ajantasaista rekisteriä kaikkien vaihteiden kunnosta. Samalla olisi varmasti myös syytä tarkastella pisteytyksen kriteerejä ja muokata ne sellaisiksi, että ne palvelevat jokaisen vaihteen tarkastamista. Tämä pisteyttäminen tulisi tehdä jokaisella kunnossapitoalueella yhden ihmisen toimesta, jolloin mielipide-erot eivät vaikuttaisi pisteytykseen. Tällaisen rekisterin luominen vaatii tietenkin lisää työtä, mutta kunnossapitäjien mielestä se selkeyttäisi ja yhdenmukaistaisi huomattavasti tarkastustoimintaa.

Tarkastuksissa käytettävistä laitteista mainitaan yleisimmin juuri raidelevyden mitta-laitte, jonka käyttö on selkeimmin määritelty Liikenneviraston ohjeissa (Liikennevirasto 2013b). Tämä lisäksi tarkastuksissa voidaan käyttää myös tukikiskon ja kielen välistä korkeusasemaa mittaavaa tulkkia. Tämä laite ei ole kuitenkaan läheskään kaikkien kunnossapitäjien käytettävissä, jolloin sen käyttöaste on hyvin alhainen. Käyttöastetta vähentää myös se, että tulkille ei ole kunnossapitäjien tietojen mukaan olemassa min-käänlaista käyttöohjetta. Ohjeistuksen puuttuminen johtaa siihen, että tulkkia saate-taan käyttää vain silloin tällöin ja mitään ei kirjata ylös.

Lyhyiden ja pitkien vaihteiden vioissa ei nähdä merkittäviä eroja. Lyhyissä vaihteissa saattaa esiintyä vaihtotöiden takia enemmän poikkeavan raiteen kulumista, kun taas pitkissä vaihteissa ongelmat keskittyvät suurien nopeuksien takia monesti geometrian pysyvyyteen. Tämä on kuitenkin niin tapauskohtaista, että suoraa suhdetta vaihteen pituuden ja vikatyypin välille ei voida vetää.

Toimilaitteiden kohdalla vaihteentukemiskoneen käynnin jälkeistä tilannetta pyritään parantamaan käsikäyttöisillä tuentalaitteilla. Kunnossapitäjillä on kuitenkin yleisessä tiedossa, että käsikäyttöiset laitteet murskaavat sepeliä merkittävästi, joten näiden laitteiden käyttöä ehkä hieman varotaan. Joillakin alueilla on annettu jopa erillisiä ohjeita, joiden mukaan käsituentalaitetta saa käyttää vain äärimmäisissä tilanteissa ja silloinkin varoen. Risteysalueella tällaista jälkituontaa tehdään huomattavasti harvemmin, koska uskotaan, että vaihteentukemiskone on saanut kyseisen kohdan riittävän hyvään kuntoon. Risteyskärjen alla on kuitenkin myöhemmin havaittu pölkyn taipu-mista, joten tämä uskomus saattaa useassa tapauksessa olla virheellinen.

Keskusteluissa otettiin esiin kysymyksen 15 kohdalla myös kääntöavustimen säätämi-nen, koska lähiaikoina on saatu havaintoja epäkeskeisesti säädetyistä kääntöavusti-men kääntötangoista. Kysymys herättikin paljon keskustelua ja epätietoisuutta siitä, onko tämän asian kanssa ollut ongelmia. Yleisesti haastateltavat eivät pitäneet kääntöavustimen säätämistä kovinkaan merkittävänä asiana, kunhan avoimen kielen ja tu-kikiskon välinen laippavälitys pysyy riittävänä. He myös tiedostivat, että riittävä laip-paura pystytään saavuttamaan ilman, että tangot on säädetty keskeisesti. Kukaan haastateltavista henkilöistä ei kuitenkaan tiedostanut, että kääntöavustimessa kehityvä kieltä paikallaan pitävä jousivoima pienenee tangon epäkeskeisen säädön myötä. Kun tämä tuli keskusteluissa esille, kunnossapitäjät vaativat parempaa koulutusta ja ohjeistusta kääntöavustimen säätämiseksi tulevaisuudessa.

Risteyskärjen alle asennettavien lisälevyjen käytöstä haastateltavat olivat kohtalaisen yksimielisiä. He kaikki pitivät tätä korjaustapana, joka toimii lähinnä muutaman yksit-täisen pölkyn hetkellisenä ensiapuna, jotta kallista vaihteentukemiskonetta ei tarvitsisi tilata niin usein. Tämä korjaustapa on kuitenkin hyvin kyseenalainen, sillä se ei millään tavalla poista pölkyn taipumisen taustalla olevaa ongelmaa, joka on kunnossapitäjille edelleen mysteeri. Monen kunnossapitäjien mielestä lisälevyt tulisi ehdottomasti pois-taa radasta seuraavan tuennan yhteydessä, jolloin rata saataisiin jälleen alkuperäisen rakenteen mukaiseksi. Kaikkialla näitä levyjä ei kuitenkaan poisteta ja kokemukset ovat osoittaneet, että muutamissa vaihteissa nämä lisälevyt ovat olleet radassa useita vuo-sia.

Risteyskärjen hiomisesta keskusteltaessa kävi hyvin selkeästi ilmi, että risteuksen alkuhiontaa pidetään ensiarvoisen tärkeänä kunnossapitotoimena varsinkin mangaaniteräsristeyksissä. Liikenneviraston ohjeissa (Liikennevirasto 2013b) on annettu risteykselle tietty tonnimäärä, jonka jälkeen siitä kuuluu hioa pois muokkauslujittumisessa syntynyt purse. Ongelmaksi muodostuu usein se, että kunnossapitaja ei laske hiomisajankohtaa tonnien vaan päivien perusteella. Tällöin hionta saattaa tapahtua väärään aikaan, jolloin risteuksen kulkupinta ei ole vielä riittävän muokkautunut tai vastaavasti pursesta on päässyt muodostumaan liian paljon.

4 Vaihterakenteen jäykkyyden parantamisvaihtoehdot

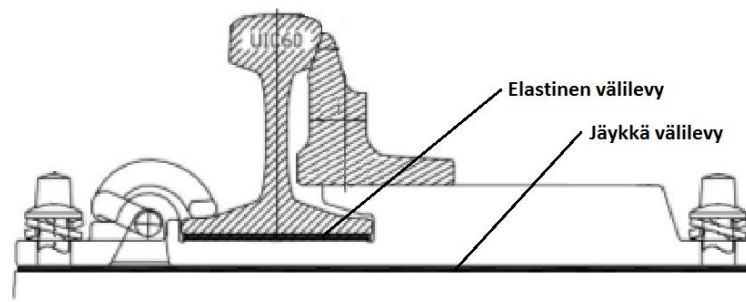
Kuten edellisissä luvuissa on hyvin käynyt ilmi, vaihterakenteen jäykkyyden ja juna-ylitysten aikana syntyvien kuormitusten kanssa on nykyisellään monia ongelmia. Nyt kun ongelmat on tuotu selkeästi esille, on syytä siirtyä pohtimaan mahdollisia parantamisvaihtoehtoja, joilla vaihterakenteesta saadaan tehokkaampi ja ennen kaikkea elastisempi tulevaisuudessa. Osa Suomessa todetuista ongelmista on havaittu myös muualla maailmassa, joten ratkaisuja näihin ongelmiin on kehitelty varsinkin Euroopassa jo vuosia. Tämä luvun tarkoituksena on käydä läpi, millaisia rakenteellisia ratkaisuja elastisuuden parantamiseen on viime aikoina kehitelty. Samalla tehdään myös pohdintaa siitä, mitkä näistä ratkaisuista soveltuisivat parhaiten Suomen ratarakenteeseen ja Suomessa valitseviin olosuhteisiin.

4.1 Elastiset välilevyt koko vaihteen matkalla

Nykyisen vaihterakenteen suurimmaksi ongelmaksi voidaan kirjallisuusselvityksen perusteella laskea varsinaisten elastisten välilevyjen puute. Kielisovitusalueella sekä risteyskärjen alla välilevyjä ei käytetä lainkaan ja vaihteen välikiskoalueella käytetään kiskon ja vaihterakenteen välissä 6 mm paksuista elastista elementtiä, joka on kuitenkin ominaisuuksiltaan melko jäykkä verrattuna normaaliin linjaraitteeseen (ks. luku 2.2.4). Kokonaisen rataosuuden toimivuuden kannalta olisi nimenomaan tärkeää, että vaihterakenteen kokonaisjäykkyys pystyttäisiin muokkaamaan mahdollisimman lähelle linjaraitteen kokonaisjäykkyyttä. Yhtä tärkeänä seikkana voidaan pitää sitä, että kokonaisjäykkyys pysyy mahdollisimman muuttumattomana vaihteen eri osien välillä. Näin ollen päästäisiin eroon jäykkyyden muutoskohdista vaihteen kaikissa kohdissa (ks. luku 2.4).

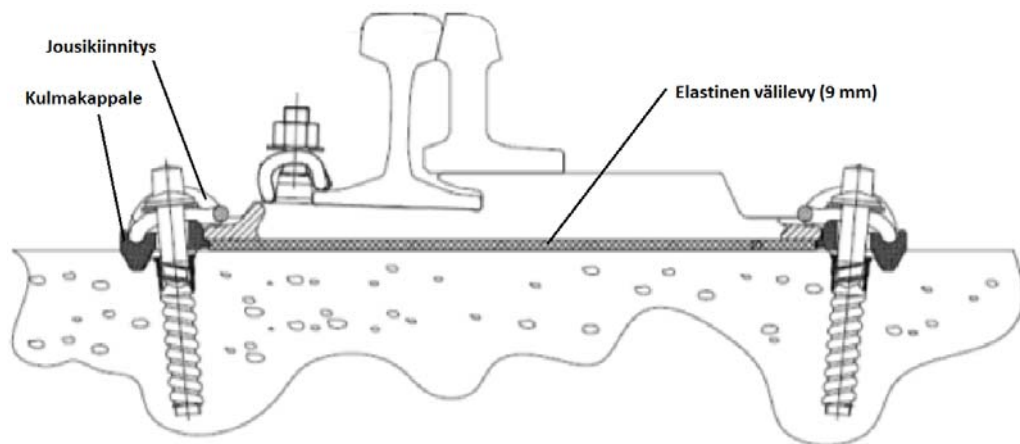
Tällaisen ratkaisun saavuttaminen vaatii ensisijaisesti sen, että välilevyjä tulee käyttää jokaisen vaihtepölkyn kohdalla. Välilevyjen sijoittaminen kielisovitusalueelle ei ole aivan yksinkertaista, sillä vaihteen kielen pitää pystyä nykyiseen tapaan liikkumaan mahdollisimman vapaasti vaihterakenteen päällä. Lisäksi vaihteen kielen ja tukikiskon tulee pysyä pystysuunnassa mahdollisimman samalla tasolla, jotta pyörän siirtyminen näiden välillä olisi sysäyksetöntä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että tukikiskon ja vaihteen kielen täytyy olla saman elastisen rakenteen päällä, jotta ne liikkuvat pystysuunnassa yhtenäisenä pakettina.

Muualla maailmassa on tälläkin hetkellä käytössä monia eri ratkaisuja, jotka tarjoavat lisää elastisuutta Suomen normaaliin kielisovitusalueeseen verrattuna. Osassa näistä ei ole kuitenkaan pohdittu riittävästi kielisovitusalueen kokonaistoimintaa. Esimerkkinä tällaisesta toimii Ruotsissa käytettävä UIC60- vaihde, jossa pelkästään tukikisko on elastisen välilevyn päällä kuvan 20 mukaisesti. Tällöin rakenne on kielen alla selkeästi tukikiskoa jäykempi ja osat taipuvat kuormituksen aikana pystysuunnassa eri määrän. Vaihterakenteen ja pölkyn välissä käytetään Suomen rakenteen tavoin kohtalaisen jäykkää välimateriaalia, joka ei siis toimi elastisena elementtinä. Tätä välilevyä ei voida tässä rakenteessa muuttaa elastisemmaksi, koska tällöin vaihterakenteen ja pölkyn väliseen raideruuvikiinnitykseen kohdistuisi liian paljon vaakasuuntaisia kuormituksia, joita se ei kestä.



Kuva 20. Poikkileikkauskuva Ruotsissa käytössä olevasta UIC-60 vaihteesta. Tukikiskon oikeanpuolista kiinnikettä ei ole merkitty kuvaan. Kuva lainattu muokattuna lähteestä (Vossloh 2014).

Radan kokonaistoiminnan kannalta olisi tehokkaampaa, että elastisuus pystyttäisiin toteuttamaan nimenomaan vaihdealuslevyn ja pölkyn välisessä materiaalissa, jolloin koko kielisovitusrakenne olisi yhden ja saman välilevyn päällä. Tähän ratkaisuun päästään suunnittelemalla vaihdealuslevyn kiinnitys siten, että se pystyy vastaanottamaan elastisuudesta aiheutuvia vaakakuormia. Tähän kiinnitystapaan on helppo hakea ideoita normaalin linjaraiteen kiskonkiinnityksestä, jossa vaakakuormat kannetaan pölkkyihin ”upotetun” kulmakappaleen (ohjauslevyn) avulla. Tällaista kulmakappaletta voidaan käyttää myös vaihdealuslevyn kiinnityksessä kuvan 21 tapaan, jolloin elastisuus saadaan yhtenäiseksi koko kielisovituksessa.



Kuva 21. Poikkileikkauskuva Ruotsissa kehitteillä olevasta uudesta 60E-vaihteesta. Tukikiskon oikeanpuolista kiinnikettä ei ole merkitty kuvaan. Kuva lainattu muokattuna lähteestä (Vossloh 2014).

Pölkyn ja vaihdealuslevyn välille saadaan jousikiinnityksellä (skl 14 tms.) riittävän suuri puristusvoima, mutta samalla se mahdollistaa vaihdealuslevylle riittävän pystysuuntaisen liikkeen kuormituksen aikana. Tällaisessa kiinnityksessä välilevy ja jousikiinnike täytyy aina valita yhteensopiviksi, jotta pystytään varmistamaan, että elastisen välilevyn puristumat eivät missään tilanteessa ylitä jousikiinnikkeelle suunniteltua liikevaraa.

Samanlaisen kulmakappaleen käyttäminen on mahdollista myös kielisovitusalueen ulkopuolella. Kiinteän kiskon alueella nykyiset kallistetut vaihdealuslevyt voidaan korvata pölkkyyn valetulla kallistuksella, jolloin rakenne muistuttaa hyvin paljon nykyistä linjaraitteen skl 14-kiinnitystä. Kuvassa 22 on esimerkki tällaisesta valetulla kallistusosalla varustetusta vaihdepölkystä.



Kuva 22. Vaihdepölkky, johon on valettu kallistettu korokeosa.

Kulmakappaleen käyttäminen vaihteessa vaatii luonnollisesti myös uusien ”lovellisten” pölkkyjen kehittämistä ja valmistamista, jolloin tällaisen ratkaisun käyttäminen nykyisissä vaihteissa vaatisi todella paljon muutostöitä ja sitä kautta myös kustannuksia. Uusissa vaihteissa tällaisen tekniikan käyttäminen on kuitenkin vähintäänkin suositeltavaa, sillä sen avulla vaihderakenteen jäykkyyttä pystytään muokkaamaan melko vapaasti erilaisilla välilevyvalinnoilla.

Elastisemmän välilevyn vaikutuksia radan käyttäytymiseen on tutkittu maailmalla myös ennen tätä projektia. Tästä on hyvänä esimerkkinä Markine et al. (2010) tekemä tutkimus, jossa perehdyttiin vaihderakenteen elastisiin ominaisuuksiin ja niiden vaikutukseen risteysalueen vierintäväsytymisen kannalta. Tutkimus perustui laskennallisten mallien käyttöön, joten tulokset eivät ole radalta mitattuja todellisia arvoja.

Tulosten mukaan vierintäväsytymisen risteysalueella johtuu suurimmaksi osaksi korkea- ja matalataajuisista dynaamisista iskuista (P_1 -voimat). Testit osoittivat, että muuttamalla vaihteen elastisia parametreja voidaan näitä voimia pienentää huomattavasti, jolloin myös vierintäväsytymisen vähenee. Elastisuutta muokattiin välilevyjen ohella myös muilla keinoin, kuten pohjaimilla ja alusmatoilla. Näistä elastisista komponenteista välilevyllä on selkeästi suurin merkitys vierintäväsytymiseen, kun taas vuorostaan alusmaton vaikutus on käytännössä mitätön. Pelkällä pehmeällä välilevyllä (40 kN/mm) päästiin 21 % parannukseen kiskovoimissa, 67 % parannukseen pölkkyyn kohdistuvissa voimissa ja 28 % parannukseen alusrakenteeseen siirtyvissä voimissa. Pohjaimen käyttö vaikuttaa enemmänkin matalalla taajuudella olevien kuormitusten vallitessa, jolloin se vähentää alusrakenteeseen siirtyvää kuormaa. Pehmeän välilevyn ja pohjaimen yhteiskäytöllä voidaan siis ehkäistä sekä korkea- että matalataajuisien kuormitusten suuruutta rata-rakenteessa. (Markine et al. 2010)

4.2 Pohjaimet

Kuten jo edellisessä luvussa kävi ilmi, pohjaimet ovat välilevyjen ohella todella varteen-otettava tapa parantaa ratarakenteen elastisuutta. Normaalissa ratarakenteessa pölkyn ja tukikerroksen välinen rajapinta on käytännössä täysin jäykkä betonin ja sepelin välinen kontakti. Sepelin ison raekoon vuoksi tämä kontakti on lisäksi hyvin epätasainen, eli pölkky lepää käytännössä sepelin epäsäännöllisten terävien särmien päällä. Tästä syystä varsinainen kontaktipinta-ala näiden kahden elementin välissä jää hyvin pieneksi, jolloin kontaktipaine kasvaa.

Pohjain ovat nimensä mukaisesti pölkyn pohjaan asennettava elastinen komponentti, jonka perimmäisenä tarkoituksena on nimenomaan muuttaa pölkyn alapinnan ja tukikerroksen välistä kontaktia. Se valmistetaan tavallisesti joko polyuretaanista, luonnonkumista tai etyyli-vinyylisetaatista (EVA). Useimmiten pohjain kiinnitetään pölkyn pohjaan jo pölkyn valamisen aikana, jolloin liitoksesta tulee todella kestävä. Pohjain voidaan kuitenkin kiinnittää myös olemassa olevan ratapölkky pintaan esimerkiksi suihkuttamalla, maalaamalla tai liimaamalla. Pohjaimellista pölkkyä käytettäessä sepelin terävät särmät painuvat elastista pohjainta vasten, jolloin pölkyn ja sepelin välinen kontaktipinta-ala voi kasvaa jopa 35 %. (Müller-Boruttau & Kleinert 2001.)

Pohjaimia voidaan siis käyttää käytännössä kaikkien erimallisten betonipölkkyjen pohjassa, jolloin niistä saadaan hyötyä sekä linjaraitteella että vaihteissa. Vaihteissa pohjainten kuormitusta tasaavat ominaisuudet korostuvat vielä entisestään, sillä varsinkin risteysalueella yksittäiseen pölkkyyn kohdistuu hyvin epätasainen kuormitus. Pohjaimien ominaisuuksista ja sen vaikutuksista radan käyttäytymiseen on kerrottu tarkemmin Liikenneviraston julkaisussa 19/2015. (Luomala et al. 2014)

4.3 Ontto pölkky

Nykyisen vaihderakenteen yksi ongelmallisimmista kohdista radan kunnossapidon – ja näin ollen myös radan painuman – kannalta on vaihteenkääntölaitteen ja valvontakoskettimen alla olevat kaksi peräkkäistä pitkää pölkkyä. Kuten kappaleessa 3.1.1 on todettu, näitä pitkiä pölkkyjä ei pystytä nykyvaihteissa tukemaan koneellisesti lainkaan, jolloin ne painuvat huomattavasti muita pölkkyjä enemmän. Tämä painuminen on myös havaittavissa käytännössä kaikissa tämän projektin aikana mitatuissa vaihteissa. Näitä painumatuloksia käsitellään luvussa 6 .

Tämän ongelman välttämiseksi nämä kaksi pölkkyä voidaan korvata yhdellä ontolla teräspölkkyllä, jonka sisälle kääntö- ja valvontatangot voidaan sijoittaa kuvan 23 mukaisesti. Tämä pölkky voidaan tukea koneellisesti normaalin betonipölkyn tapaan, jolloin tangot eivät häiritse tukemisurakkaa. Onton pölkky tarjoaa tangoille suojaa myös vaihteen käytön aikana, jolloin sepeli ei pääse vahingoittamaan tankoja ja suljettu tila pystytään lämmittämään tarvittaessa pienemmällä lämmitysteholla. (Voestalpine, 2015) Tämä on todella olennaista Suomen oloissa, jossa joudutaan usein turvautumaan tankojen lämmitykseen vaihteen toiminnan varmistamiseksi.



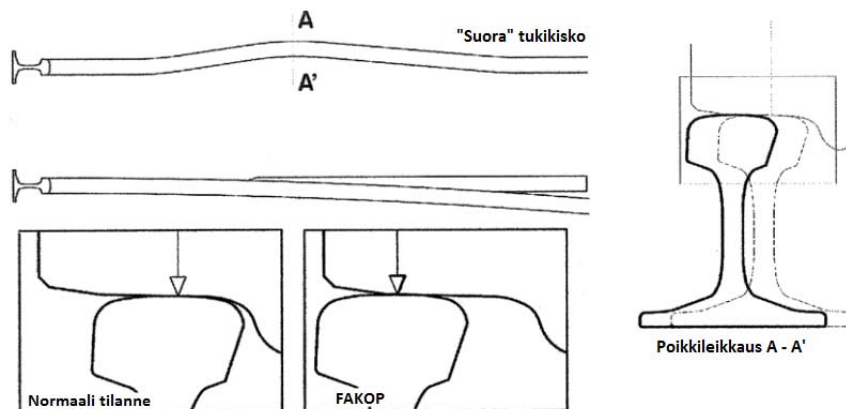
Kuva 23. Ontto teräspölkky kahden betonipölkyn korvaajana. Kääntötankojen sijainnin havainnollistamiseksi pölkystä on poistettu kuvan ajaksi kansirakenne.

Tällaisen pölkkyvaihdoksen tekeminen aiheuttaa kuitenkin myös muita muutoksia. Jotta kaksi betonipölkkyä voidaan korvata yhdellä teräspölkkyllä, täytyy myös teräspölkyn viereisiä pölkkyjä siirtää hieman tasaisen pölkkytysjaon aikaansaamiseksi. Onton pölkyn käyttäminen vaatii myös uuden kääntölaitetyypin käyttämistä, sillä nykyiset kahden pölkyn väliin asetetut kääntölaitteet eivät sovellu kiinnitettäväksi yksittäiseen onttoon pölkkyyn. Näin ollen ontton pölkyn asentaminen käytössä olevaan vaihteeseen ei ole aina taloudellisesti järkevää, mutta uusia vaihteita suunniteltaessa se on todella varteenotettava vaihtoehto poistamaan vaihteen tukemisongelmia.

4.4 Kielisovitusalueen geometrinen optimointi

Luvussa 2.3.1 on käsitelty kielisovitusalueen epäjatkuvuuskohdan rakennetta ja sen aiheuttamaa poikittaissiirtymää junan pyörille kuvan 8 mukaisesti. Tämä sivuttaisliike on siis epätoivottua ja aiheuttaa varsinkin laippakosketuksen syntyessä ylimääräisiä dynaamisia kuormituksia rataa. Maailmalla on tehty tutkimuksia tämän poikittaissiirtymän vaikutuksista ja myös siitä, miten siitä mahdollisesti voidaan päästä eroon. Tästä on esimerkkinä Bugarin & Carcia Dias-de-Villegas (2002) tekemä tutkimus, jossa esitellään kaksi erilaista tapaa vähentää sivuttaisliikettä. Nämä kummatkin pyrkivät siis käytännössä optimoimaan pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan sijaintia kielisovitusalueen suorassa tukikiskossa.

Ensimmäistä näistä tavoista kutsutaan nimillä FAKOP / KGO (Fahrkinematische Optimierung / Kinematic Gauge Optimisation), jotka tarkoittavat kummatkin raidelevyyden kinemaattista optimointia, jonka periaate on esitettyinä kuvassa 24.

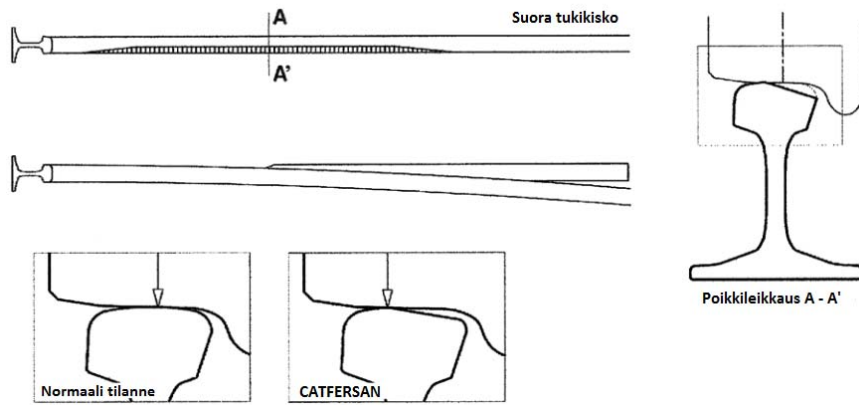


Kuva 24. Esimerkkikuva raidelevyyden kinemaattisen optimoinnin (FAKOP) toteutuksesta. Kuvaan ei ole piirretty selkeyden vuoksi lainkaan käyrää kielikiskoa. Lainattu muokattuna lähteestä (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002).

Kinemaattisen optimoinnin ideana on, että vaihteen suoraan tukikiskoon tehdään pieni raidelevyyden levitys, jolloin se kompensoi käyrän tukikiskon aiheuttamaa sivuttaisliikettä. Kuten luvussa 2.3.1 esitettiin, sivuttaisliike johtuu siitä, että käyrän tukikiskon vuoksi kontaktikohta R (ks. kuva 7) siirtyy hiljalleen kohti pyörän ulkoreunaa. Raidelevyyden levityksestä johtuen pyörän ja kiskon välinen kontakti siirtyy myös ”suoran” tukikiskon puolella pyörän ulkokehälle, jolloin vierintäsäde-eroa ei pääse syntymään. Ilman vierintäsäde-eroa sivuttaisliikettä ei pääse syntymään ja pyörät kulkevat hallitummin epäjatkuvuuskohdan ylitse. (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002)

Tällainen raidelevityksen tekeminen vaihteen suoraan tukikiskoon on kuitenkin hyvin hankalaa, sillä sen tulisi vastata kaarevuudeltaan mahdollisimman tarkasti käyrän tukikiskon muotoa vähentääkseen sivuttaisliikettä. Kiskon siirtäminen vaatisi myös pölkkyyn porattujen kiskonkiinnitysreikien siirtämistä, eli käytännössä täysin uusia erikoispölkkyjä. Kyseinen kohta olisi myös ongelma vaihteen tarkastuslaitteille, jotka pitäisivät kyseistä levitystä luonnollisesti raideleveysvirheenä (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002).

Toinen sivuttaisliikettä pienentävä ratkaisukeino on niin sanottu CATFERSAN-menetelmä, jossa pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan siirtäminen toteutetaan vaihteen suoran tukikiskon koneistuksella kuvan 25 mukaisesti.



Kuva 25. *Esimerkkikuva pyörän ja kiskon välisen kontaktikohdan optimoinnista (CATFERSAN). Kuvaan ei ole piirretty selkeyden vuoksi lainkaan käyrää kielikiskoa. Lainattu muokattuna lähteestä (Bugarin & Garcia Diaz-de-Villegas 2002).*

CATFERSAN-menetelmässä on siis junan pyörän kannalta kyse täysin samasta asiasta kuin edellisessä FAKOP-menetelmässä, mutta se toteutetaan eri tavalla. Kuten edellä kerrottiin, FAKOP-menetelmän toteutus on käytännössä hyvin vaikeaa, koska kiskoa joudutaan siirtämään. CATFERSAN-menetelmässä kisko pysyy täysin paikallaan ja muutokset tapahtuvat ainoastaan kiskon kulkupinnan koneistuksella. Sopivan koneistettavan muodon määrittäminen on aivan yhtä vaikeaa kuin FAKOP-menetelmässäkin, mutta sen toteutus on huomattavasti realistisempaa ja onnistuu myös olemassa olevaan vaihteeseen, koska uusia komponentteja ei tarvita.

Koska nämä kummatkin menetelmät vähentävät junan pyörien sivuttaisliikettä kielialueella, ne saattavat hieman heikentää junan kulkuominaisuuksia vaihteen poikkeavalle raiteelle kuljettaessa, jolloin pyörien olisi tarkoituskin liikkua sivusuunnassa. Tämä voidaan kuitenkin monessa vaihteessa hyväksyä, koska poikkeavan raiteen käyttöaste ei ole normaalisti yhtä suuri kuin suoran raiteen ja nopeudet ovat poikkeavalla raiteella pienempiä. Tapauksissa, jossa poikkeavaa raidetta käytetään hyvin runsaasti, kieliprofiilin optimointi ei ole paras mahdollinen ratkaisu.

5 Vaihteen pystysuuntaisen käyttäytymisen mittaaminen ja havainnointi koekohteissa

Kirjallisuusselvityksen ohella vaihderakenteen pystysuuntaista käyttäytymistä tutkittiin projektissa myös koekohteissa järjestettyjen mittausten avulla. Tällä tavalla pyritään antamaan vahvistusta edellisissä luvuissa esitetyille teorioille vaihteen eri osien käyttäytymisestä. Tässä luvussa esitellään valitut koekohteet sekä käydään läpi, millälaisilla mittauskeinoilla radan pystysuuntaista käyttäytymistä on tarkoitus tutkia.

5.1 Koekohteiden valinta ja esittely

Jo heti projektin alkuvaiheista lähtien oli hyvinkin selvää, että koekohteiden valinnalla tulee olemaan suuri merkitys. Tästä syystä parhaiten radan pystysuuntaista käyttäytymistä ilmentävien koekohteiden valinta tehtiin hyvin harkiten ja valinnassa otettiin vahvasti huomioon sekä Liikenneviraston, Destian että VR Trackin esille tuomat havainnot rataverkoltamme. Alkuperäisenä valintakriteerinä toimi Liikennevirastolta saadut tiedot, joiden mukaan kunnossapitoalueella 7 on ollut paljon ongelmia juuri radan jäykkyyteen liittyvissä asioissa. Tällä alueella liikkuu paljon raskasta tavarajunakalustoa, joka rasittaa rataa merkittävästi. Mittaustulosten yleistämiseksi projektissa haluttiin valita vaihteita myös toiselta kunnossapitoalueelta. Toiseksi kunnossapitoalueeksi valittiin kunnossapitoalue 3, jossa on myös ollut ongelmia niin puu- kuin betonipölkkyvaihteissa.

Varsinaisten vaihteiden valintaa helpotti huomattavasti kunnossapitäjien ja isännöitsijöiden haastattelut, joita esiteltiin tarkemmin luvussa 3.2 Näissä keskusteluissa tuli esille monia varteenotettavia ehdotuksia hyväksi mittausvaihteiksi, joten lopulta valinta pystyttiin tekemään täysin näiden ehdotusten pohjalta. Mitattavia vaihdekohteita valittiin lopulta 8 kappaletta, joista puolet (4) sijaitsi kunnossapitoalueella 7, ja loput (4) kunnossapitoalueella 3.

Kunnossapitoalueelta 7 mittauskohteiksi valittiin Kaipiaisen liikennepaikan vaihteet V213 ja V215 sekä Taavetin liikennepaikan vaihteet V413 ja V415. Kaipiaisten V213 (Kuva 26) on vuonna 2009 asennettu YV60-900-1:18-V vaihde, joka sijaitsee Kouvola-Luumäki-radon pohjoisella raiteella.



Kuva 26. Kaipiaisten liikennepaikan vaihde V213.

Tällä raiteella liikennöi paljon raskasta Venäjältä päin tulevaa kalustoa, joka on aiheuttanut vaihteeseen vuosien varrella paljon kiskovikoja ja tuentatarvetta. Kunnossapitäjiltä saatujen tietojen mukaan tämä vaihde täytyy tukea käytännössä joka syksy, joka viittaa merkittävään tukikerroksen heikkenemiseen. Talven 2012-2013 jälkeen radan tarkastusvaunu EMMA havaitsi vaihteessa kallistuspoikkeamaa ja toukokuussa 2013 tehdyissä ultraäänitarkastuksissa löytyi ympärilyöntivikaa vaihteen suoran puolen välikiskoalueelta. Samassa tarkastuksessa havaittiin myös pitkittäissuuntaista halkeamaa risteuksen siipikiskon pinnan alla.



Kuva 27. Kaipiaisten liikennepaikan vaihde V215, jonka takana näkyy myös toinen mittausvaihde V213.

Kaipiaisten toinen kohde V215 (Kuva 27) on vuonna 2009 asennettu YV60-300-1:9-V vaihde, joka sijaitsee äskeisen vaihteen V213 perässä samalla raiteella, jolloin niiden kummankin läpi kulkee käytännössä sama liikenne. Tähän vaihteeseen pätee käytännössä samat joka syksyiset tukemistarpeet ja vaihteessa on havaittu myös korkeuspoikkeamaa keväällä 2013.



Kuva 28. Taavetin liikennepaikan vaihde V413.

Taavetin liikennepaikalla sijaitsevat vaihteet V413 (Kuva 28) ja V415 (Kuva 29) ovat Kaipiaisten vaihteiden tapaan peräkkäin samalla raiteella. V413 on vuonna 2008 asennettu pitkä YV60-900-1:18-O vaihde, kun V415 on vuorostaan lyhyt YV60-300-1:9-O vaihde, joka on asennettu vuonna 2010. Kummatkin vaihteet ovat Kaipiaisista poiketen eteläisellä raiteella, johon ei kohdistu niin suurta kuormitusta kuin pohjoisen raiteelle. Kummassakin vaihteessa on kuitenkin havaittu kunnossapitäjän mukaan kiskovikoja, sekä pölkköjen painumista suoran puolen vastakiskon kohdalta.



Kuva 29. Taavetin liikennepaikan vaihde V415.

Kunnossapitoalueelta 3 mittauskohteiksi valittiin Tampereen ratapihalla sijaitsevat vaihteet V051, V062, V171 ja V172. Vaihte V051 (Kuva 30) on asennettu vuonna 2000 ja se on tyypiltään YV60-300-1:9-V. Tässä vaihteessa on jouduttu tekemään kielisovituksen ja välikiskojen vaihtotöitä vuonna 2011 ja tarve näiden osien uudelle vaihdolle on arvioitiin jo vuodelle 2014. Vaihte altistuu siis jatkuvasti voimakkaalle kulumiselle. Ongelmista kertoo myös se, että radan tarkastusvaunu on havainnut vaihteessa kierousvirhettä useaan kertaan vuosina 2012 ja 2013.



Kuva 30. Tampereen liikennepaikan vaihte V062 ja sen vastavaihte V051.

Vaihte V062 (Kuva 30) on edellisen vaihteen V051 vastavaihte Tampereelta Seinäjoelle lähtevien raiteiden 192 ja 193 välillä. Se on asennettu rataan vuonna 2001 ja on tyypiltään vastavaihteensa tapaan YV60-300-1:9-V. Myös tämä vaihte altistuu merkittäville kulutuskuormituksille varsinkin poikkeavan raiteen puolella, jonka takia poikkeavan raiteen kieli tukikiskoineen on jouduttu vaihtamaan vuonna 2011. Saman kunnossapidon yhteydessä vaihteesta vaihdettiin myös risteysosa. Merkittävästä kulumisesta kertoo se, että vuoden 2011 vaihtotoimista huolimatta vaihteen poikkeava raide oli mittaushetkellä (kesä 2013) silminnähden kulunut. Kunnossapitäjien mukaan vaihteen kielisovitus piti vaihtaa vuoden 2013 aikana, mutta tekemämme havainnot toukokuussa 2014 osoittivat, että vaihtoa ei jostakin syystä ole päästy suorittamaan.

Kolmas mittausvaihte V171 (Kuva 31) on asennettu rataan vuonna 2000 ja se on tyypiltään YV60-300-1:9-V. Vaihteessa on tehty risteysvaihto vuonna 2011 ja oikean kielisovituksen vaihto vuonna 2012. Viimeaikaiset havainnot ovat osoittaneet, että ainakin risteys on pysynyt hyvässä kunnossa vaihdon jälkeen. Vaihteessa on havaittu V051 tapaan kierousvirhettä vuosien 2012 ja 2013 aikana.



Kuva 31. Tampereen liikennepaikan vaihde V171.

Viimeisin mittausvaihde V172 (Kuva 32) on edellisen vaihteen V171 vastavaihde Tampereelta Seinäjoelle lähtevien raiteiden 191 ja 192 välillä. Vaihde on asennettu vuonna 2000 ja se on tyypiltään YV60-300-1:9-V. Myös tähän vaihteeseen on tehty kunnossapitäjältä saatujen tietojen mukaan oikeanpuoleisen kielisovituksen sekä välikiskon vaihto vuonna 2012.



Kuva 32. Tampereen liikennepaikan vaihde V172.

Taulukkoon 3 on vielä yhteenvedona koottu kaikkien koevaihteiden olennaisimmat tiedot, eli vaihdetyyppi, asennusvuosi, vaihteen arvioitu bruttotonnitilanne, suunniteltu vaihtovuosi sekä elinkaaren aikana vaihteessa havaitut ongelmat. Bruttotonnitiedot perustuvat kyseisellä rataosalla toteutuneisiin kuormitusmääriin, joita on pyritty jakamaan tasan alueen vaihteiden kesken.

Taulukko 3. Koekohteiden tiedot. (* Arvioitu tilanne vuoden 2013 lopussa.)

	Vaihdetyyppi	Asennusvuosi	Vaihteen bruttotonnit (Mbrt)*	Jäljellä olevat bruttotonnit (Mbrt)*	Suunniteltu vaihtovuosi	Havaitut ongelmat
Kpa V213	YV60-900-1:18-V	2009	63,7	215,8	2030	Paljon kiskovikoja ja tuentatarvetta
Kpa V215	YV60-300-1:9-V	2009	63,7	125,8	2023	Paljon tuentatarvetta
Taa V413	YV60-900-1:18-O	2008	79,5	200,5	2029	Kiskovikoja ja pölkkyjen painumista
Taa V415	YV60-300-1:9-O	2010	51,2	138,9	2024	Kiskovikoja ja pölkkyjen painumista
Tpe V051	YV60-300-1:9-V	2000	152,3	37,8	2017	Vakavaa kulumista kielisovitusalueella
Tpe V062	YV60-300-1:9-V	2001	56,4	133,6	2027	Vakavaa kulumista kielisovitusalueella
Tpe V171	YV60-300-1:9-V	2000	152,3	37,8	2017	Kierousvirhettä ja risteysalueen murtumia
Tpe V172	YV60-300-1:9-V	2000	152,3	37,8	2017	

Yhteenvedosta voidaan havaita, että koekohteet ovat hyvin eri-ikäisiä. Asennusvuodesta ei voida kuitenkaan suoraan päätellä mitään vaihteen nykyisestä kunnosta tai mahdollisesta vaihtovuodesta, sillä kuormitusmäärät eri vaihteiden välillä vaihtelevat suuresti. Tästä hyvänä esimerkkinä toimii Tampereen vaihde V062. Se on ollut radassa jo yli kymmenen vuotta, mutta sille ei ole kertynyt kovinkaan paljon bruttotonneja, sillä se ei sijaitse pääraiteella.

5.2 Mittausjärjestelyt koekohteissa

Edellä esitetyissä koekohteissa tehdyt mittaukset ajoittuivat ajanjaksoille 20.–21.8.2013 sekä 2.–3.9.2013. Elokuun mittauksissa keskityttiin Tampereen liikennepaikalla sijaitseviin vaihteisiin (4 kpl), jonka jälkeen syyskuussa oli vuorossa Kaipiaisten (2 kpl) sekä Taavetin (2 kpl) vaihteet. Vaihteiden jäykkyyden ja siihen liittyvien osatekijöiden mittaamista varten laadittiin tarkat mittaussuunnitelmat, jotta ja etenkin mittaustekijät eri vaihteissa pysyisivät mahdollisimman vakioina. Tämä on vaihdemittauksissa erityisen tärkeää, sillä radan rakenne muuttuu vaihteen alueella käytännössä koko ajan. Tästä voidaan ottaa esimerkkinä kielisovituksen kiskoprofiili, joka muuttuu merkittävästi jo yhden pölkkyvälin aikana.

Kuten aiemmissa luvuissa on hyvin käynyt esille, vaihteen kokonaisjäykkyys ja radan jousto riippuvat monesta eri tekijästä. Tästä syystä mittauksissa ja tarkastuksissa tehtiin sekä kiskoista, pölkkyistä että sepelistä. Seuraavissa luvuissa on kuvattu tarkemmin koekohteissa suoritettujen mittausten sisältöä.

5.2.1 Vaihteiden palautuvan painuman mittaaminen

Yksi merkittävimmistä vaihteen jäykkyyden arviointikeinoista on radan palautuvan painuman mittaaminen. Radan palautuvalla painumalla tarkoitetaan radan pystysuuntaista liikettä kuormituksen alaisena, joka palautuu saman tien, kun kuorma on ylittänyt kyseisen mittauskohdan. Tällä niin sanotulla radan joustolla on suora yhteys radan jäykkyyteen ja jouston liiallinen kasvu indikoi näin ollen myös radan yleisen kunnan heikkenemistä. Radan palautuvan painuman ohella voitaisiin seurata myös radan pysyvää painumaa, mutta tämä vaatisi pidempiaikaista seurantaa, joten se päätettiin jättää tämän projektin ulkopuolelle.

Radan palautuvaa painumaa voidaan mitata sekä jatkuvalla että pistemäisellä menetelmällä. Kuten aiemmin todettiin, palautuvan painuman mittaaminen on hyvin olennainen asia radan jäykkyyden arvioinnissa, joten mittaus päätettiin toteuttaa kummallakin näistä menetelmistä. Seuraavissa kappaleissa on kerrottu tarkemmin näistä kahdesta mittausmenetelmästä.

5.2.1.1 Jatkuva menetelmä

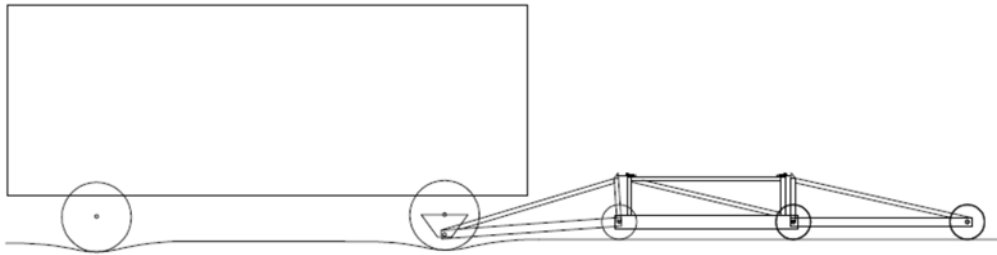
Radan palautuvan painuman jatkuva mittaaminen toteutettiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksella kehitellyn jäykkyydmittalaitteen avulla, joka on esitetty kuvassa 33. Mittalaite on suunniteltu siten, että se pystytään etupäästään kiinnittämään suoraan Tka7- ratakuorma-auton akseliin, jolloin Tka7 toimii sen veto-kalustona.



Kuva 33. TTY:llä kehitetty radan palautuvaa painumaa mittaava vaunu.

Mittalaitteen toiminta perustuu radan pystysuuntaisen geometrian mittaamiseen sekä kuormittamattomasta että kuormitetusta radasta. Kuten kuvasta 33 voidaan nähdä, mittalaite koostuu kolmesta kevyestä akselista, jotka mittaavat radan pystysuuntaisen geometrian ensin kalustoyksikön tuottaman akselikuorman alaisena ja tämän jälkeen kuormittamattomana. Radan taipuma saadaan selville näiden kahden mittaustuloksen erotuksena, jonka avulla päästään kiinni radan kokonaisjäykkyyteen.

Mittalaitteen kaksi ensimmäistä akselia toimivat referenssipisteinä määrittäessä radan kuormitettu pystysuuntainen geometria. Kuormittamaton geometria määritetään vastaavasti mittalaitteen ensimmäisen akselin suhteen toisen ja kolmannen akselin toimiessa referenssipisteinä. Näin saadaan aikaiseksi kaksi suhteellista korkeusviivaa, jotka on mitattu akselivälin (3m) pituuden verran eri kohdissa. Jotta näitä korkeusviivoja voidaan vertailla keskenään, mittaustulokset sidotaan tarkasti paikkaan. Tämä tehdään pyörän pyörimistä mittaavan pulssianturin avulla. Paikkaan sidottu kuormittamattoman geometrian signaali on helppo siirtää vakiomatkan verran eteenpäin siten, että eri korkeusviivojen lukuarvot edustavat samaa paikkaa. Kuva 34 havainnollistaa mittalaitteen eri osien toimintaa tilanteessa, jossa vetokaluston raskaat akselit muodostavat rataa palautuvaa painumaa.



Kuva 34. Periaatekuva jatkuvatoimisesta jäykkyyden mittauslaitteesta.

Jatkuvatoiminen jäykkyyden mittalaite on kehitetty osana radan kokonaisjäykkyyden mittaamista ja modifiointia käsittelevää projektia. Tämän projektin loppuraportissa on kerrottu yksityiskohtaisemmin vaunun ominaisuuksista ja radan painuman laskentata-voista. (Luomala et al. 2014)

5.2.1.2 Pistemäinen menetelmä

Jatkuvaan mittaukseen kykenevän mittalaitteen ohella radan palautuvaa painumaa mitattiin tässä projektissa myös pistemäisellä menetelmällä. Tässä tapauksessa pistemäinen palautuvan painuman mittaus toteutettiin kiihtyvyyssanturien avulla. Anturit kiinnitettiin kiskon jalkaan magneettien avulla, jolloin ne saatiin helposti pystyasentoon. Tämä oli hyvin tärkeää, sillä kyseiset kiihtyvyyssanturit kykenevät mittaamaan kiihtyvyyttä ainoastaan yhdessä suunnassa. Kuva 35 havainnollistaa kiihtyvyyssanturien kiinnitystä risteyskärjen kohdalla.



Kuva 35. Radan palautuvaa painumaa mittaavat kiihtyvyyssanturit.

Kiihtyvyyssmittaus toteutettiin yhteensä 16 anturilla. Tällä anturimäärällä suoritettiin lyhyissä vaihteissa yhteensä 4 mittausta ja pitkissä vaihteissa 6 mittausta. Anturit sijoitettiin kuvan 35 mukaisesti pölkkyjen keskilinjan kohdalle vaihteen eri kohtiin. Antureiden tarkemmat sijainnit eri mittauskerroilla on esitettyinä pölkkynumeron perusteella taulukossa 4.

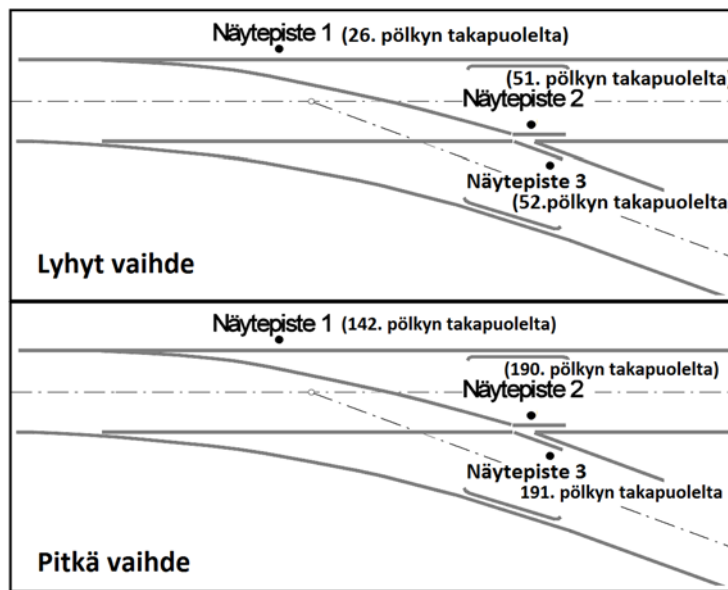
Taulukko 4. Kiihtyvyyssantureiden kiinnityskohdat sekä lyhyissä että pitkissä vaihteissa.

	Lyhyet vaihteet	Pitkät vaihteet
Mittaus 1	Vasempaan kiskoon pölkkyjen nro. -3 ... 13 keskikohdalle	Vasempaan kiskoon pölkkyjen nro. -2 ... 114 keskikohdalle
Mittaus 2	Oikeaan kiskoon pölkkyjen nro. -3 ... 13 keskikohdalle	Oikeaan kiskoon pölkkyjen nro. -2 ... 114 keskikohdalle
Mittaus 3	Vaihteen risteyskärkeen pölkkyjen nro. 43 ... 58 keskikohdalle	Vasempaan kiskoon pölkkyjen nro. 115 ... 130 keskikohdalle
Mittaus 4	Suoran raiteen ulkokiskoon pölkkyjen nro. 43 ... 58 keskikohdalle	Oikeaan kiskoon pölkkyjen nro. 115 ... 130 keskikohdalle
Mittaus 5		Vaihteen risteyskärkeen pölkkyjen nro. 182 ... 197 keskikohdalle
Mittaus 6		Suoran raiteen ulkokiskoon pölkkyjen nro. 182 ... 197 keskikohdalle

Anturien kiinnityksessä tuli lisäksi ottaa huomioon esimerkiksi se, että lyhyiden vaihteiden kielisovitusalueella junan pyörät siirtyvät tukikiskolta kielelle noin pölkyn numero 8 kohdalla. Tästä syystä anturit kiinnitettiin todellisuudessa vaihteen kieleen pölkkyjen 8 ... 13 kohdalla. Risteysalueella kiinnitystä vaikeutti se, että mangaaniteräs ei ole magneettista materiaalia, jolloin anturit oli kiinnitettävä kuvassa 35 näkyvällä tavalla skl-12 kiinnitysjouseen. Jousen voidaan katsoa liikkuvan samassa tahdissa kiskon kanssa, jolloin sen liikkeiden mittaamisella päästään kiinni risteyskärjen pystysuuntaiseen painumiseen.

5.2.2 Sepelin kuntotutkimukset

Radan painuman ohella koekohteissa suoritettiin myös sepelin kuntotutkimuksia. Kuten luvussa 3.1.1 todettiin, sepelin kunnolla on todella suurta merkitystä radan jäykkyyteen ja junakuormien aiheuttamaan painumaan sekä hetkellisesti että pysyvästi. Kuntoa tutkittiin sepelinäytteiden avulla, jotka tehtiin Ratahallintokeskuksen määrittelemän sepelitukikerroksen laadun tutkimusohjeen (1997) mukaisesti. Sepelinäytteitä tulee ohjeen mukaan ottaa kahdesta eri pisteestä vaihteen matemaattisen keskipisteen ja risteyskärjen kohdalta, mutta näiden kohtien lisäksi tässä projektissa valittiin myös kolmas näytepiste laajempien tulosten saamiseksi. Kaikkien näytepisteiden tarkat sijainnit sekä lyhyissä että pitkissä vaihteissa on määritelty kuvassa 36.



Kuva 36. Sepelinäytteiden näytepisteiden sijainti sekä lyhyissä että pitkissä vaihteissa.

Ratahallintokeskuksen ohjeen (1997) mukaan näyte otetaan betoniratapölkkyraiteella aina pölkyn pään kohdalta näytteenottoisyvyyden ollessa noin 30–40 cm radan korkeusviivan alapuolella. Tältä syvyydeltä otetaan noin 20x20x10 cm kokoinen sepelinäyte, jonka massa tulisi olla välillä 6–8 kg. Näytteiden seulonnasta ja käsittelystä kerrotaan lisää tulosten esittelyn yhteydessä kappaleessa 6.2.

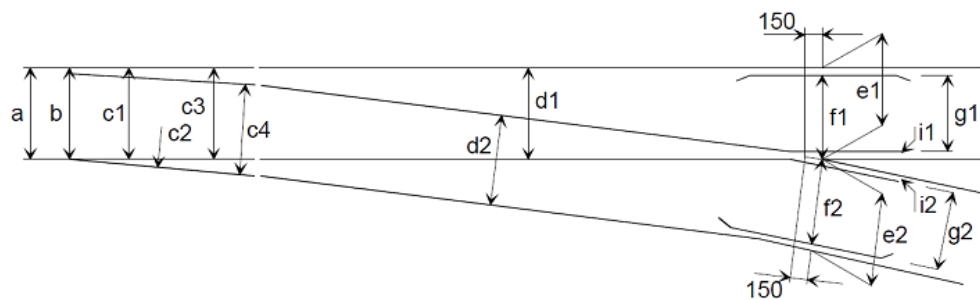
5.2.3 Kiskojen kulumisen sekä vaurioiden tutkinta

Vaihderakenteen kokonaisvaltaisen kunnan tutkimiseksi koekohteissa mitattiin ja tarkasteltiin myös kiskojen kulumista ja kiskon pinnassa ja pinnan alla olevien vaurioiden määrää. Kiskojen ja vaihteen kielien kulumista tutkittiin sekä mittaamalla että silmä-määräisen tarkastuksen avulla. Kulumista mitattiin kaikissa koekohteissa raideleveysmitan sekä Greenwood Engineeringin kehittämän MiniProf -laitteen avulla. MiniProf laitteen avulla pystytään käytännössä mittaamaan useiden eri komponenttien profiileja laitteessa olevan piirtomittapään avulla (Kuva 37). Mittauksen aikana laite tallentaa jatkuvasti mittapään kärjen tarkkaa asemaa, jolloin profiili muodostuu tallennetusta pistepilvijoukosta. Mittapäällä pystytään siihen liitetystä lisäosista riippuen mittaamaan kiskojen, pyörien tai esimerkiksi junan jarrulevyjen profiilin muotoa. Tämä projektin yhteydessä oli käytössä ainoastaan linjakiskojen mittaamiseen soveltuvat laitteistot, joten tarkoituksena oli lähinnä testata, miten nämä laitteet soveltuvat vaihteen kielien profiilimittaukseen.



Kuva 37. MiniProf-mittalaite.

Kiskoprofiilien mittauspisteinä käytettiin osittain samoja pisteitä, joista mitattiin vaihteen raideleveyttä. Raideleveyden mittauspisteet valikoituivat Liikenneviraston ratateknisissä ohjeissa (Liikennevirasto 2013b) määriteltyjen tarkastuspisteiden a - i mukaan, jotka ovat esitettyinä kuvassa 38. Raideleveysmitan avulla osassa kohteissa mitattiin myös siipikiskojen ja risteyskärjen välisen korkeusaseman muuttumista raiteen pituussuunnassa. Korkeusmittoja mitattiin risteyskärjestä alkaen vaihteen kantaan päin tarkalleen 10 cm välein, joka on myös Innotrack -projektin aikana tehdyissä tutkimuksissa (Innotrack 2009a) todettu risteysgeometrian hahmottamisen kannalta optimaaliseksi mittaussväliksi.



Kuva 38. Raideleveyden tarkastuskohteet. (Liikennevirasto 2013b)

Käytössämme olevalla linjaraitteen kiskojen mittaamiseen tarkoitetulla MiniProf-laitteistolla ei ole mahdollista mitata lainkaan risteysaluetta, joten profiilit mitattiin ainoastaan pisteistä a – d. Profiilit mitattiin näissä kohdissa aina sekä vasemmasta että oikeasta kiskosta, jolloin lopulliseksi mittapistemääräksi muodostui profiilien osalta 16 kpl /vaihde.

Kuvassa 38 esitettyjen mittapisteiden lisäksi kiskojen ja kielten kulumista ja vaurioita arvioitiin kävelytarkastuksien avulla, jossa mahdollisia poikkeavuuksia havainnoitiin silmämääräisesti. Silmämääräisten tarkastusten avulla pystyttiin havaitsemaan myös kiskoviat, jotka eivät osuneet varsinaisiin mittauskohtiin. Kävelytarkastuksien yhteydessä tutkittiin samalla myös vaihdepölkkyjen kuntoa silmämääräisesti.

Nämä kaikki edellä mainitut tarkastelut keskittyivät ainoastaan kiskon ja kielen pinnalla oleviin vaurioihin. Pinnassa havaittujen vaurioiden lisäksi vaihteita tutkittiin ultraäänen avulla, joka havaitsee myös pinnan alla olevia vaurioita. Mittauspisteet näihin tutkimuksiin valittiin aiempien kunnossapitotarkastusten yhteydessä havaittujen ongelmakohtien perusteella.

6 Mittaustulokset ja analysointi

Edellisessä luvussa esitellyt mittaukset tuottivat suuren määrän erilaista dataa, joka kertovat valittujen koevaihteiden nykytilasta ja vaihteiden pystysuuntaisesta käyttäytymisestä junakuormitusten alaisena. Tässä luvussa keskitytään tarkemmin näihin koekohteista saatuihin tuloksiin ja niistä tehtyihin havaintoihin. Vaihteen palautuvan painuman tulokset esitellään ja analysoidaan seuraavissa luvuissa ensin vaihdekohtaisesti. Tämän esitystavan avulla pystytään luomaan selkeä ja erillinen kuva jokaisen koevaihteen nykykunnosta. Loput varsinaisista mittaustuloksista esitellään pienemmän datamäärän vuoksi kootusti, jonka jälkeen esitellään vaihteista tehdyt silmämääräiset havainnot. Näiden kaikkien tietojen perusteella vaihteita pystytään vertailemaan keskenään. Vertailun yhteydessä pystytään myös hieman arvioimaan, kuinka hyvin eri mittauksissa onnistuttiin ja kuinka hyvin ne soveltuvat vaihteen jäykkyyden ja palautuvan painuman tutkimiseen.

6.1 Vaihteiden palautuva painuma

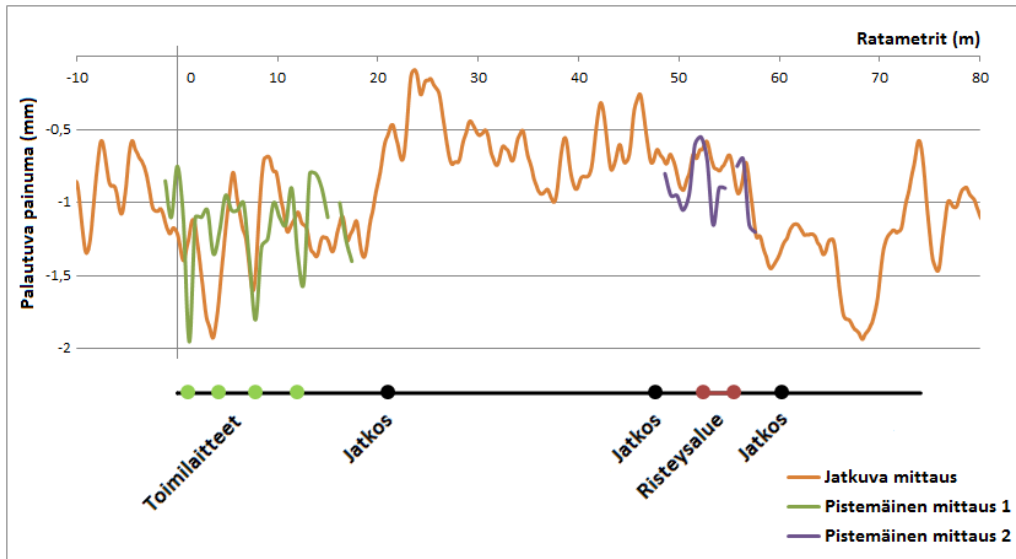
Vaihteen pystysuuntaista palautuvaa painumaa mitattiin koekohteissa sekä jatkuvalla että pistemäisellä menetelmällä, kuten luvussa 5.2.1 on esitetty. Kaikki tässä raportissa esitellyt tulokset on mitattu junan ajaessa vaihteiden suoraa raidetta, jolloin on voitu käyttää suurempia nopeuksia. Varsinkin pistemäisten kiihtyvyyssanturimittausten kohdalla on olennaista, että kuormitusnopeus on riittävä. Pienillä nopeuksilla myös kiihtyvyyden muutokset ovat pieniä, jolloin anturit eivät pysty erottamaan niitä riittäväällä tarkkuudella. Tulosten yhdenmukaistamiseksi mittauksissa ei kuitenkaan käytetty oikeaa liikennettä, vaan vaihteiden yli ajettiin Tka7-työkoneella nopeuden ollessa aina 50 km/h.

Jäykkyydsvaunun rakenteesta ja mittaustekniikasta johtuen painuman jatkuva mittaus on vuorostaan tehokkainta suorittaa mahdollisimman hitaalla vauhdilla, jotta kevyt mittausvaunu ei lähde tärisemään. Sekä jatkuvat että pistemäiset mittaukset toistettiin vähintään kerran, jotta tulosten luotettavuus kasvaisi. Analysointivaiheessa huomattiin, että tulokset olivat hyvin toistuvia, joten kuvaajissa on lopulta esitetty vain yhden mittauskerran tulokset. Koska kummatkin menetelmät mittaavat käytännössä samaa asiaa, on näistä saadut tulokset havainnollisinta esittää rinnakkain samassa kaaviossa. Junan yliajon aikana rataa kohdistuu todella paljon erilaisia kuormia, jotka aiheuttavat korkeataajuisia pienen amplitudin värähtelyä kiskossa. Nämä korkeataajuiset värähtelyt häiritsevät jonkin verran kiihtyvyyssantureiden avulla mitattua siirtymän tulkinta, joten aivan kaikista mittapisteistä ei ollut saatavilla luotettavia tuloksia. Epäluotettavat kiihtyvyyssanturitulokset ovat poistettu lopullisista kuvaajista, jolloin pistemäisten mittausten kuvaajissa voi esiintyä katkoksia.

Mittauksia suoritettiin yhteensä kahdeksassa kohteessa, jotka on kaikki esitelty luvussa 5.1. Kaikissa kohteissa suoritettiin täysin samat mittaukset, jolloin tulokset ovat periaatteessa suoraan vertailtavissa keskenään. Seuraavissa alaluvuissa esitellään vaihteiden pystysuuntaista palautuvaa painumaa vaihdekohtaisesti.

6.1.1 Kaipiaisten vaihde V213

Seuraavan sivun kuva 39 esittää Kaipiaisten vaihteen V213 pystysuuntaista palautuvaa painumaa. Vaihteiden keskinäisen vertailun helpottamiseksi kaikki vaihteet on aseteltu kuvaajiin siten, että niiden kärki on ratametrimillä nolla ja kanta osoittaa kasvavien rata-metriensä suuntaan.



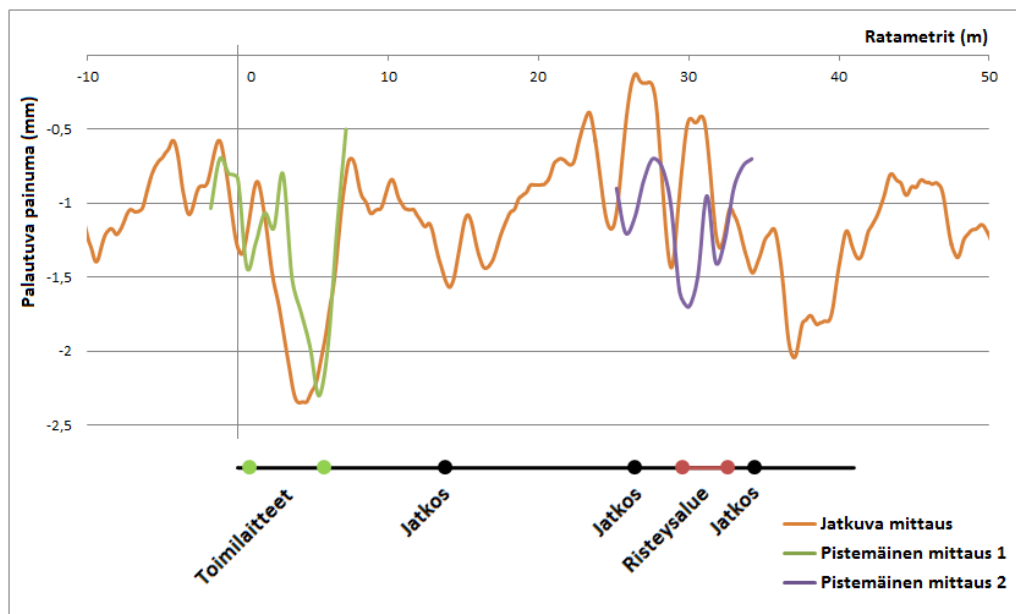
Kuva 39. Kaipiaisten vaihteen V213 (YV60-900-1:18-V) palautuva painuma jatkuvalla sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

Kuvasta 39 voidaan hyvin huomata kuinka rakenteen palautuva painuma muuttuu vaihteen alueella. Vaihteen kielisovituksen alueella palautuva painuma on selkeästi suurempaa verrattuna vaihteen välikiskoalueeseen. Aivan vaihteen kärjen alueella on lisäksi havaittavissa palautuvan painuman äkkinäisiä muutoksia, jotka viittaisivat yksittäisten pölkkyjen heikkoon tuentatilanteeseen. Toimilaitteiden kohdalla pölkkyjen epätasainen tuentatilanne on hyvin todennäköistä, sillä toimilaitetangot estävät vaihteen koneellisen tuennan pitkien toimilaitteepölkkyjen kohdalla. Toimilaitteiden välissä on aina muutamia koneellisesti tuettuja pölkkyjä, jolloin vaihteeseen syntyy helposti kuvassa näkyvää epätasaisuutta. Pitkässä vaihteessa epätasaisuutta tulee luonnollisesti pidemmälle matkalle, koska vaihde sisältää yhteensä 4 toimilaitetta.

Kuten äsken jo mainittiin, välikiskoalueella palautuva painuma on keskiarvillisesti huomattavasti maltillisempaa, eikä siinä tapahdu myöskään yhtä rajuja muutoksia kuin kielisovitusalueella. Tässä vaihteessa palautuva painuma on hyvin maltillista myös risteysalueella, joskin pistemäinen mittaus osoittaa pieniä painuman muutoksia juuri risteyskärjen kohdalla. Mielenkiintoinen huomio on myös se, että vaihteen takajatkosalueella näyttäisi olevan selkeä ”monttu” joka sijoittuu suurin piirtein kohtaan, jossa pitkät vaihtepölkkyt muuttuvat kahdeksi erillispölkkyksi (kuva 14 alueet 8->9). Tämä rakenteen muutos siis selkeästi vaikuttaa radan palautuvaan painumaan.

6.1.2 Kaipiaisten vaihde V215

Kaipiaisten toisen mittausvaihteen palautuvaa painumaa on havainnollistettu kuvassa 40. Vaihteen kärki on jälleen aseteltu ratametritille 0 ja kanta osoittaa kasvavia ratametreja kohden. Edellisestä vaihteesta V213 poiketen kyseessä on lyhyt vaihde. Tämä vaikuttaa toimilaitteiden määrään ja sitä kautta myös vaihteen kärjen palautuvaan painumaan. Kuvasta 40 nähdään, että vaihteeseen muodostuu yliajon aikana selkeä yksittäinen painumapiikki kielen kannassa olevan toimilaitteen läheisyyteen. Painumapiikin leveys on tässä tapauksessa noin 5 metriä, jolloin se ei selity pelkästään yksittäisen tukemattoman toimilaitteepölkyn painumisella. Ongelma on todennäköisesti lähtenyt liikkeelle toimilaitteen tukemattomien pölkkyjen kohdalta, mutta ajan saatossa painumaa on alkanut muodostua myös viereisten pölkkyjen kohdalle, jotka joutuvat toimilaitteepölkyn liiallisen painumisen myötä kovemmalle rasitukselle.



Kuva 40. Kaipiaisten vaihteen V215 (YV60-300-1:9-V) palautuva painuma jatkuvalle sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

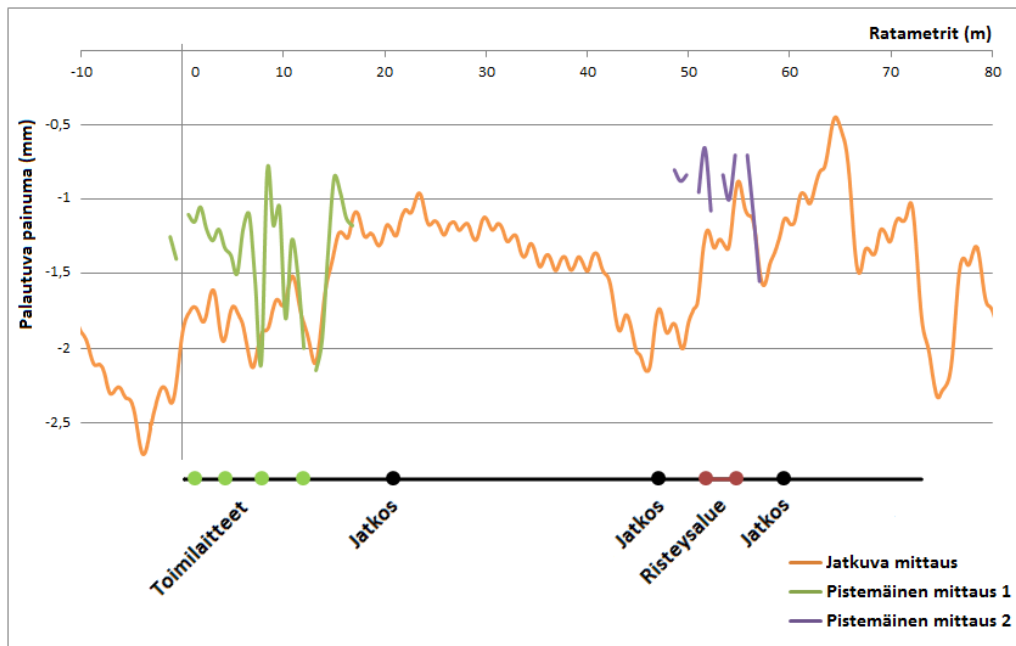
Tarkempi analysointi itse asiassa osoittaa, että palautuva painuma saattaa tulevaisuudessa vielä kasvaa radikaalisti vaihteen kielisovitusalueella. Kuvaajasta nähdään, että painumaa on syntynyt myös kärkitoimilaitteen kohdalla, eikä kahden toimilaitteen välissä ole käytännössä enää kuin kaksi tehokkaasti toimivaa pölkkyä. Jos näiden pölkkyjen tukemiskyky pääsee jostain syystä heikkenemään, toimilaitteiden väliin syntyy huolestuttavan suuri yhtenäinen painuma-alue, joka luo vaihteen kärkialueelle luultavasti jo pysyvää geometriavirhettä.

Vaihteen välikiskoalueella palautuva painuma on jälleen hieman maltillisempaa kuin kielisovitusalueella. Vaihde-elementtien jatkoskohdan nähdään aiheuttavan rakenteeseen pientä painumaa, mutta sen vaikutus ei lopulta ole kuin 0,5 mm luokkaa. Risteys-elementin kohdalla on vuorostaan havaittavissa muutamia yksittäispölkkyjä, joiden painuma on suurien dynaamisten kuormitusten takia päässyt kasvamaan huomattavasti keskiarvoa suuremmaksi. On myös mielenkiintoista huomata, että korkeista kuormituksista huolimatta palautuvan painuman keskiarvo on risteysalueella hieman muita alueita pienempää. Tämä selittyy sillä, että normaalin risteuksen alla ei käytetä lainkaan elastisia välilevyjä, joka tekee rakenteesta hyvin jäykän.

Edellisen vaihteen tapaan myös tässä vaihteessa on havaittavissa selkeä painuma vaihteen takajatkosalueella. Näiden tulosten perusteella olisi siis selkeästi syytä kiinnittää erityishuomiota myös vaihteen taka-alueen elastisuuteen, jota ei normaalisti pidetä niin kriittisenä ongelma-alueena.

6.1.3 Taavetin vaihde V413

Kuvassa 41 on esitetty Taavetissa sijaitsevan vaihteen V413 pystysuuntainen palautuva painuma jatkuvalla ja pistemäisellä menetelmällä mitattuna. Kuvaajasta nähdään, että vaihteen V413 pystysuuntaisessa painumakäyttäytymisessä on havaittavissa yhtäläisyyksiä Kaipiaisten vaihteen V213 kanssa.



Kuva 41. Taavetin vaihteen V413 (YV60-900-1:18-0) palautuva painuma jatkuvalla sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

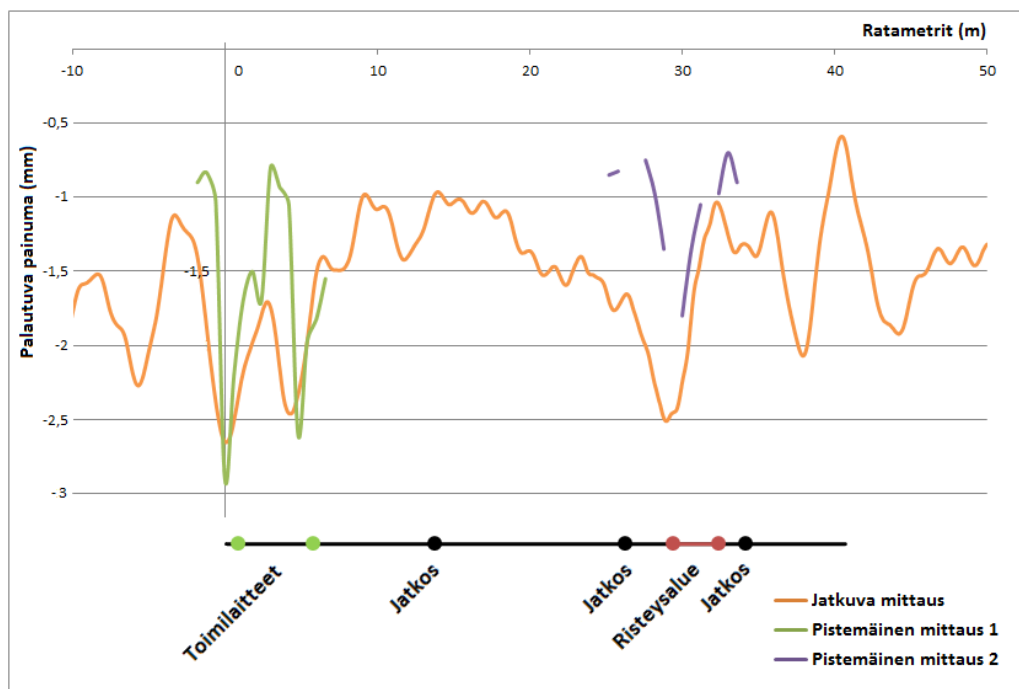
Toimilaitteiden alueella painumassa tapahtuu selkeitä muutoksia, varsinkin kun tarkastellaan pistemäisten mittausten tuloksia. Jatkuvan mittauksen tuloksissa painumamerot eivät näytä niin suurilta, mutta siihen vaikuttaa paljolti se, että vaihteen etupuolella näyttäisi olevan vielä toimilaittealueettakin isompia painumaongelmia. Kyseessä on pitkä vaihde, jolloin painuma sijoittuu kohtaan, jossa linjapölkyt vaihtuvat vaihdepölkkyiksi (kuva 14 alueet 1->2). Rakenneosien muutoksesta johtuva jäykkyyden vaihtuminen on siis todennäköisin lähtökohta tällaiselle painumiselle. Mitatut painuma-arvot ovat kuitenkin siinä mielessä mielenkiintoisia, että rakenne vaihtuu kyseisessä kohdassa elastisesta linjaraitteen rakenteesta huomattavasti jähkemäksi vaihderakenteeksi, jolloin painuman pitäisi periaatteessa vähentyä siirtymäkohdassa. Tilanne voi uuden vaihteen kohdalla ollakin tällainen, mutta se ei säily pitkään, sillä siirtymäkohta aiheuttaa rakenteeseen aina dynaamisia iskuja. Nämä iskut heikentävät sepeliä, jolloin tilanne kääntyy lopulta mitatun tilanteen kaltaiseksi. Tässä kyseisessä vaihteessa painumaa selittää entisestään se, että oikeanpuolista liikennettä käytettäessä vaihteesta ajetaan useimmiten myötävaihteen suuntaan, jolloin painuma on muodostunut vaihteen kärjen eteen.

Tämä kohta on kuitenkin täysin tuettavissa, jolloin ongelmat pitäisi saada korjattua tehokkaan tukemisen avulla. Jälkeenpäin on kuitenkin hyvin vaikea arvioida, onko tämä kyseinen kohta ollut viime tukemiskerran jälkeen kunnossa.

Vaihteen välikiskoalueella painuman arvot ovat jälleen hyvin maltillisia ja ne pysyvät käytännössä muuttumattomina. Risteyselementin etuosaan muodostuu yliajon aikana hiukan suurempaa painumaa ja tämän jälkeen painuma vaihtelee hyvin paljon koko vaihteen takaosassa. Vaihteen etualueen tavoin myös vaihteen taakse pääsee muodostumaan merkittävää painumaa, eli vaihteen kummatkin päät ovat palautuvan painuman osalta melko huonossa kunnossa. Painumat eivät kaikissa tapauksissa ole lukuarvoiltaan kovinkaan suuria, mutta painuman arvon nopeat vaihtelut tekevät tilanteesta aivan yhtä vakavan, sillä ne viittaavat junan epätasaiseen kulkuun ja näin ollen kuormitusten kasvamiseen tulevaisuudessa.

6.1.4 Taavetin vaihte V 415

Kuva 42 havainnollistaa Taavetin lyhyen vaihteen V415 palautuvaa painumaa edellisten vaihteiden tapaan. Tässä vaihteessa toimilaitteiden kohdalla olevien pölkkyjen tukemattomuus näkyy hyvinkin selvästi. Sekä pistemäisessä että jatkuvassa mittauksessa on nähtävissä selkeät painumapiikit kummankin toimilaitteen kohdalla. Ennen toimilaitteita sekä toimilaitteiden välissä tilanne on hetkellisesti huomattavasti parempi, joka viittaa siihen, että vaihdetta on kenties tuettu lähiaikoina. Tätä havaintoa tukee myös välikiskoalueen tasainen käyttäytyminen.



Kuva 42. Taavetin vaihteen V415 (YV60-300-1:9-0) palautuva painuma jatkuvalla sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

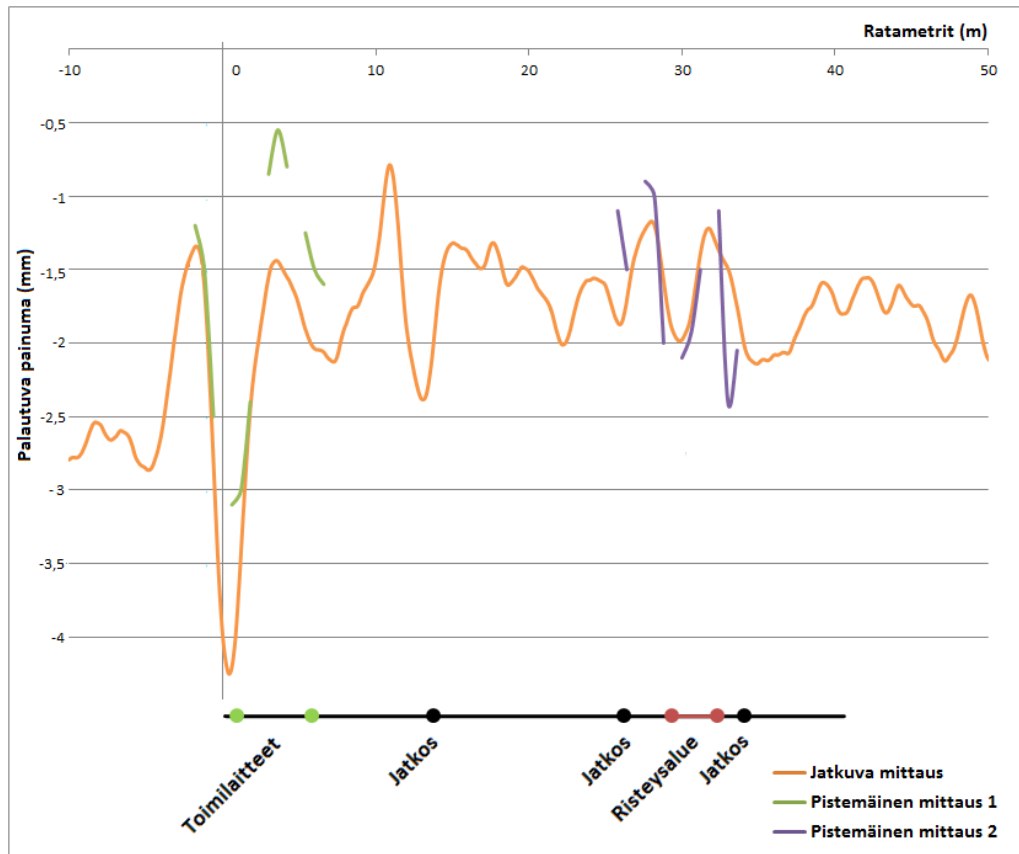
Risteysalueella ei ole kuitenkaan merkkejä kovinkaan tehokkaasta tuennasta tai ainakaan sen pysyvyydestä. Pistemäisistä mittauksista saatujen tulosten perusteella voidaan havaita, että risteyskärjen alueella on käytännössä kaksi yksittäistä pölkkyä, jotka painuvat yliajon aikana yli 1,5 mm enemmän kuin viereiset pölkkyt. Staattisilla akseli-kuormilla (n. 70 kN) näin suuret taipumaerot eivät olisi edes mahdollisia yhden pölkyn matkalla, mutta kuormitusten suuren dynaamisuuden vuoksi taipumia voidaan pitää todellisina. Näiden kahden ”huonon” pölkyn välissä on ainoastaan kaksi paremmin tukeutunutta pölkkyä, jotka ymmärrettävästi joutuvat erittäin kovalle rasitukselle kantaessaan ison osan huonosti tukeutuneiden pölkkyjen kuormasta. Nämä ongelmat olivat ennustettavissa jo mittauksilla, sillä risteyskärki oli silmin nähden kulunut ja junien yliajon aikana risteys kolisi hyvin voimakkaasti. Näistä kiskovaurioista on kerrottu lisää luvussa 6.3.

Jatkuvassa mittauksessa risteyskärjen ongelmat eivät näy aivan yhtä radikaalisti, mutta se johtuu todennäköisesti vain siitä, että jäykkyyksmittalaitteen mittakanta ei pysty erottamaan toisistaan kahta näin lähekkäin olevaa ”monttua”. Näistä jäykkyyksvaunun mittakannan aiheuttamista mittausvirheistä on kerrottu lisää vaunua koskevassa loppuraportissa (Luomala et al. 2014).

Kuvasta 42 huomataan, että palautuvan painuman äkkinäiset muutokset jatkuvat myös vaihteen takajatkosalueella. Tähän on varmasti osasyynä vaihteen rakennemuutokset, joiden vaikutuksia on havaittu myös edellä olevissa vaihteissa. Tässä kohdassa on kuitenkin todennäköisempää, että risteysalueen ongelmat ovat syynä myös vaihteen takaosaan painumiin. Oikeanpuolisella liikenteellä kulkusuunta on tässä vaihteessa yleisesti vastavaihteen suuntaan, jolloin juna kulkee risteysalueelta vaihteen kantaan päin. Näin selkeät risteysalueen painumat todennäköisesti poikkeuttavat junan pyörien kulkureittiä, jolloin dynaamiset kuormitukset lisääntyvät myös vaihteen taka-alueella, jossa pyörä pyrkivät uudelleen tasapainoasemaan. Alun perin pienellä alueella olevat paikalliset virheet voivat siis vaikuttaa välillisesti hyvinkin suurelle alueelle.

6.1.5 Tampereen vaihde V051

Alla oleva kuva 43 esittää Tampereen liikennepaikalla sijaitsevan vaihteen V051 palautuvaa painumaa. Sekä pistemäinen että jatkuva mittaus osoittaa vaihteessa olevan täysin samoja ongelmia kuin Kaipiaisten ja Taavetin vaihteissa. Suurin ongelma tässä vaihteessa on selkeästi kärkitoimilaitteen kohdalle muodostunut todella suuri painumapiikki, jonka rinnalla sekä kääntöavustimen kohdan painumat että risteysalueen painumat näyttävät mitättömiltä. Risteysalueen tilanteen todellista arviointia kuitenkin hankaloittaa se, että pistemäiset mittaukset ja jatkuva mittaus ovat painuman osalta ehkä hieman ristiriidassa keskenään.



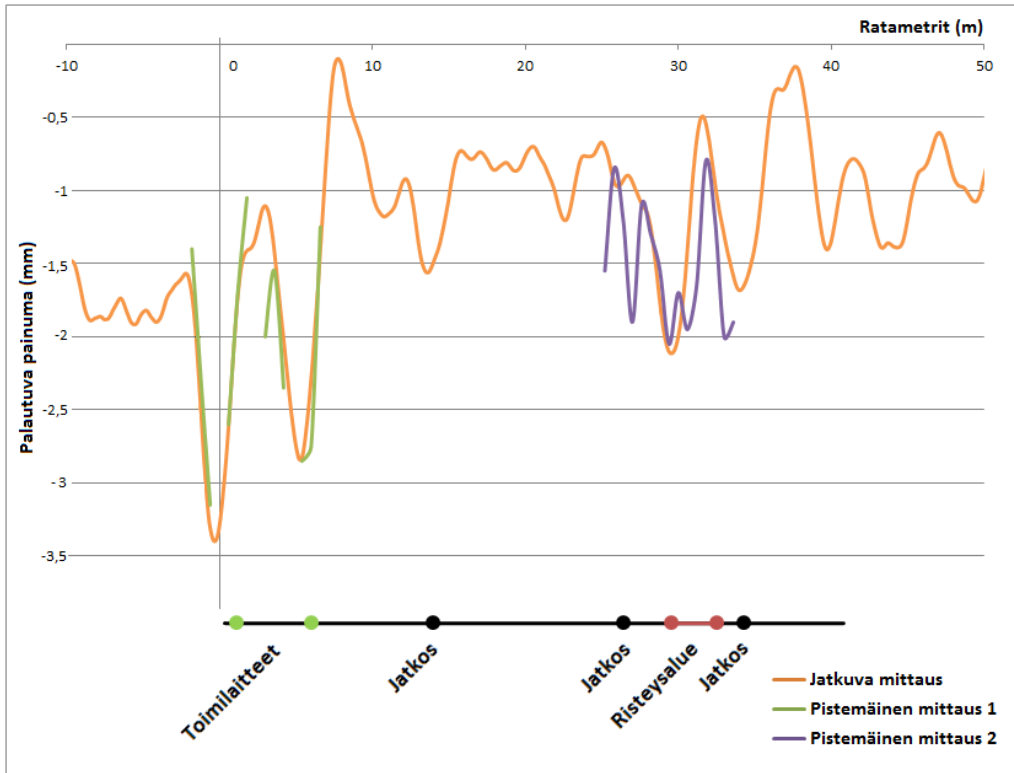
Kuva 43. Tampereen vaihteen V051 (YV60-300-1:9-V) palautuva painuma jatkuvalla sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

Hieman edellisistä vaihteista poiketen, kielisovituksen ja välikiskoalueen välisen jatkoksen kohdalle on myös muodostunut selkeää painumavaihtelua. Samankaltaista ongelmaa on havaittavissa esimerkiksi Kaipiaisten vaihteen V215 jatkoksessa (ks. kuva 40), mutta siellä painumavaihtelut eivät ole lähellekään yhtä suuria. Kuvasta 43 voidaan myös havaita, että palautuvan painuman perustaso on huomattavasti alempana vaihteen kärjen edessä, eli vaihdealue on tässä tapauksessa huomattavasti ympäröivää aluetta jäykempi. Tämä sama taipuman kasvu tapahtuu myös kuvan 43 ulkopuolella vaihteen takajatkoksen jälkeen (noin 70 m kärjestä). Tätä ilmiötä on käyty tarkemmin läpi mittausten yhteenvedon ja päätelmien yhteydessä luvussa 7.

Vaihteen kärjen suurille painumavaihteluille voidaan etsiä syitä myös vaihteen iästä ja kuormitusmääristä. Tämä kyseinen vaihde on ollut pääraiteella jo yli kymmenen vuotta (ks. taulukko 3), jonka aikana siihen on kohdistunut kuormitusta arvioiden mukaan noin 150 MBr. Painumilla on siis ollut aikaa kehittyä ja ilman koneellista tuentaa tätä kehitystä ei ole nähtävästi saatu pysähtymään.

6.1.6 Tampereen vaihde V062

Äskeisen vaihteen vastavaihteena toimivan vaihteen V062 palautuvan painuman kuvaajat on esitetty kuvassa 44. Tässä vaihteessa käntöavustimen kohta näkyy kummasakin mittauksessa selvemmin kuin edellisessä tapauksessa. Edellisten vaihteiden tapaan painuman arvot stabiloituvat hieman välikiskoalueella, jonka jälkeen risteysalueen ongelmat näkyvät jatkuvana painuman vaihteluna ilman suuria absoluuttiarvoja.



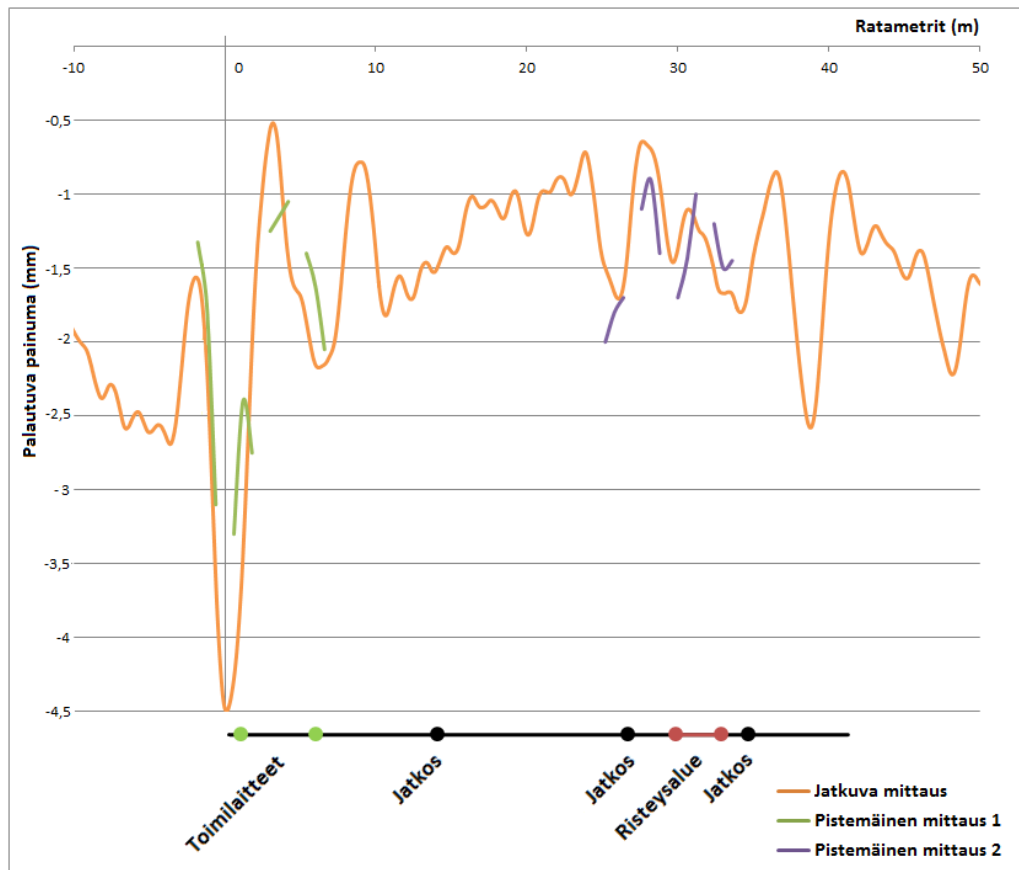
Kuva 44. Tampereen vaihteen Vo62 (YV60-300-1:9-V) palautuva painuma jatkuvalla sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

Tässäkin vaihteessa on nähtävissä, että painuman perustaso muuttuu vaihteeseen tullessa. Painuman perustaso on vaihtealueella helpointa määrittää välikiskoalueen painumasta, jossa käyttäytyminen on normaalisti melko stabiilia. Painuman arvot vaihteen välikiskoalueella ovat kuvan 44 perusteella noin 1 mm pienempiä kuin ennen vaihtetta, eli jäykkyyden arvossa on tapahtunut selkeä muutos.

Painumat osoittavat, että tämäkin vaihde on joutunut kovalle rasitukselle, vaikka taulukon 3 arvot näyttävät aivan jotain muuta. Bruttotonnitiedot saattavat tässä kyseisessä vaihteessa olla tosin aliarvioituja, koska sitä käytetään paljon Tampereen asemalla pysähtyvien junien vaihtoliikenteeseen.

6.1.7 Tampereen vaihde V171

Tampereen asemalta lähtevien pääraiteiden välisen raiteenvaihtopaikan vaihteen V171 palautuvaa painumaa on havainnollistettu kuvassa 45. Vaihteen kärjen ongelmat ovat jälleen selkeimmin esillä ja painumat muistuttavat muutenkin hyvin paljon edellä esitetyn vaihteen Vo51 tilannetta.

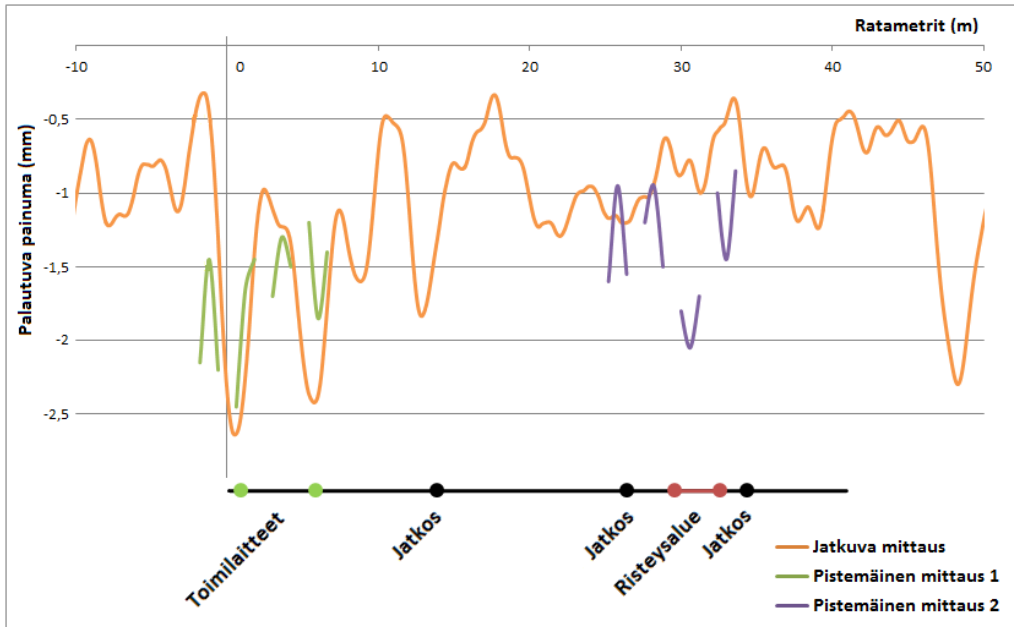


Kuva 45. Tampereen vaihteen V171 (YV60-300-1:9-V) palautuva painuma jatkuvalle sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

Kielisovitusalueen ongelmien jälkeen vaihteen V171 välikisko- ja risteysalue on painumien osalta kohtalaisen stabiileja. Vaihteen takajatkoksessa on vuorostaan muodostunut selkeä painumapiikki, joka johtuu Kaipiaisten vaihteen V213 tapaan pölkkytieduuden muuttumisesta. Tämä osoittaa hyvin sen, että vaihtealueen painumaongelmiin löytyy hyvin monia eri syitä. Ne eivät ole riippuvaisia toisistaan, eikä niitä kaikkia voida korjata yksittäisellä kunnossapitotoimella. Näin ollen huonoa kärkialuetta saattaa seurata hyvä välikisko- ja risteysalue, jonka jälkeen ongelmia on jälleen havaittavissa takajatkoksessa.

6.1.8 Tampereen vaihte V172

Tampereen viimeisen mittausvaihteen V171 palautuvan painuman käyrät on esitetty kuvassa 46. Heti ensisilmäyksellä voidaan havaita, että painumat ovat selkeästi pienempiä kuin muissa Tampereen vaihteissa.



Kuva 46. Tampereen vaihteen V172 (YV60-300-1:9-V) palautuva painuma jatkuvalla sekä pistemäisellä mittausmenetelmällä mitattuna.

Samat kärkialueen painumaongelmat ovat kyllä nähtävillä omina piikkeinään, mutta niiden absoluuttiarvot eivät ole niin merkittäviä kuin edellä. Bruttotonniarvioiden (ks. taulukko 3) mukaan kuormitusmäärät vaihteissa V172 ja V171 ovat täysin samoja, mutta nämä painumatulokset viittaisivat siihen, että vaihdetta V172 ei kuormiteta yhtä rajusti. Tässä kohdassa arviot kuormituksen tasaisesta jakautumisesta eivät siis välttämättä päde.

6.2 Sepelin kunto kohteissa

Sepelinäytteitä otettiin kussakin koekohteessa kuvan 36 mukaisesti kolmesta eri pölkkyvälistä, joiden perusteella pystyttiin määrittämään raideseppelin kuntoa vaihteiden eri kohdissa. Taulukko 5 osoittaa eri raekokojen prosentuaalisen osuuden näytteestä sekä niistä määritetyn rakeisuusluvun kaikissa koekohteissa. Rakeisuusluku on määritetty 1 mm, 8 mm, ja 25 mm seulojen läpi menneen kiviaineksen summana. Näiden lisäksi taulukossa 5 on esitetty kussakin näytteessä olevan hienoaineksen (<0,063 mm) määrä, joka kertoo suoraan sepelin routimisherkkyydestä.

Taulukko 5 osoittaa selkeästi, että sepeli koostuu kaikissa näytteissä pääosin isoista (>25 mm) rakeista, joka tarkoittaa sitä, että sepeli on hyvälaatuista. Tuloksista huomataan myös, että joissakin kohteissa risteyskärjen alta otetut sepelinäytteet ovat jopa hieman parempilaatuisia kuin välikiskoalueen näyte. Tämä on hieman yllättävää, sillä risteyskärkeen tiedetään kohdistuvan suuria dynaamisia kuormia, joiden seurauksena sepelin voisi olettaa olevan huonokuntoisempaa kuin muilla alueilla. Tämä voi johtua myös siitä, että näytteenottoon osallistui 3 eri ihmistä, jolloin näytteenottotapojen erot saattavat näkyä tuloksissa. Tulokset kuitenkin osoittavat, että kaikissa koevaihteissa tulisi kyetä vielä kauttaaltaan hyviin tuentatuloksiin ja riittävän suuri raekoko takaa tuentatilanteen säilyvyyden.

Taulukko 5. Koekohteista otettujen sepelinäytteiden rakekoot ja niistä määritetyt rakeisuusluvut.

Rakeisuus (mm)	<0,063 %	<1 %	<8 %	<25 %	Rakeisuus luku
Kpa V213					
Piste 1	1	3	10	33	46
Piste 2	0,5	1	7	29	37
Piste 3	0,2	0	2	12	14
Kpa V215					
Piste 1	0,8	2	5	19	26
Piste 2	0,9	2	9	32	43
Piste 3	1,1	3	10	28	41
Taa V413					
Piste 1	1,4	3	10	40	54
Piste 2	0,4	1	4	21	26
Piste 3	0,6	1	3	22	26
Taa V415					
Piste 1	0,4	1	1	8	11
Piste 2	0,4	1	3	22	26
Piste 3	0,3	1	2	10	12
Tpe V051					
Piste 1	0,9	2	4	11	16
Piste 2	1	2	5	17	24
Piste 3	0,3	1	1	6	8
Tpe V062					
Piste 1	0,5	2	2	12	15
Piste 2	0,7	2	4	15	20
Piste 3	0,8	3	5	15	22
Tpe V171					
Piste 1	2,4	4	6	18	28
Piste 2	0,4	1	2	11	13
Piste 3	0,2	0	1	3	4
Tpe V172					
Piste 1	0,1	1	3	10	14
Piste 2	0,7	1	3	12	16
Piste 3	0,4	1	1	7	10

Tuloksiin vaikuttaa luonnollisesti myös sepelin ikä. Kunnossapitäjiltä saatujen tietojen perusteella Kaipiaisten ja Taavetin vaihteisiin ei ole vaihteiden asennuksen jälkeen tehty sepelin vaihtoa, joten näissä kohteissa sepelin ikä on mittaushetkellä ollut noin 4–6 vuotta. Normaalilla linjaosuudella tämän ikäisen sepelin voitaisiin olettaa olevan pääosin kohtalaisen hyvässä kunnossa, mutta vaihteiden muuttuvat dynaamiset kuormitukset tekevät tilanteesta huomattavasti hankalamman arvioitavaksi. Tässä tapauksessa sepeli on hyväkuntoista, joka näkyy kohtalaisen pieninä rakeisuuslukuina. On kuitenkin hyvä muistaa, että näytepisteiden hyvät rakeisuusluvut eivät poista sitä mahdollisuutta, että joidenkin yksittäisten pölkkyjen alla olisi silti mittaushetkellä hienontunutta sepeliä. Luvussa 6.1 esitetyt äkilliset painuman muutokset viittaisivat nimenomaan tällaisiin paikallisiin sepeliongelmiin.

6.3 Kiskojen kunto kohteissa

Sepelinäytteiden ohella syitä rakenteen elastisuuden muutoksin pyrittiin löytämään myös kiskojen kunnosta. Kuten luvussa 3.1.2 on todettu, kiskojen kulumisen ei suoraanaisesti muuta rakenteen elastisuutta, mutta sen synnyttämät dynaamiset kuormituslisät vaikuttavat kuitenkin välillisesti vaihteen elastisuuteen. Mittausten ja silmäämäärien havaintojen avulla pystytään tunnistamaan kulumisen ongelmakohdat, jolloin päästään kiinni myös dynaamisten kuormituslisien syntymiseen.

6.3.1 Kiskon kulumamittaukset

Kielisovituksen ja välikiskoalueen kiskon kulumaa pyrittiin mittaamaan luvussa 5.2.3 esitellyn MiniProf-laitteen avulla. Laite oli varustettu ainoastaan normaalin kiskoprofiilin mittaukseen soveltuvalla mittapäällä, jota yritettiin soveltaa myös vaihteiden kielten mittaamiseen. Mittausten aikana kävi kuitenkin nopeasti esille, että kyseinen laite ei sovellu parhaalla mahdollisella tavalla kielisovituksen profiilimittausten tekemiseen.

Jotta tuloksia voitaisiin vertailla keskenään, vaihteen kielen ja tukikiskon muodostama kokonaisprofiili tulisi mitata yhdessä. Kielen kanta-alueella tämä yhteisprofiili muuttuu kuitenkin hyvin leveäksi, jolloin yksittäisen linjakiskon mittaamiseen suunniteltu piirtokynä ei enää ylety mittaamaan koko profiilia. Tällöin profiileista jää puuttumaan tukikiskon ulkoreuna, joka vaikeuttaa analysointia huomattavasti. Tukikiskon käyttämättömän ulkoreunan mittapisteen toimivat normaalisti referenssipisteinä, joiden perusteella kaikki profiilit saadaan asemoitua päällekkäin vertailua varten. Ilman ulkoreunaa mitatusta profiilista on hyvin vaikea löytää riittävästi muuttumattomia referenssipisteitä.

Toinen ongelma vaihteen kielen profiilimittauksessa on oikean referenssiprofiilin määrittäminen. Linjarajteelta saatuja mittaustuloksia voidaan vertailla aina standardista muodostettuun referenssiprofiiliin, joka löytyy MiniProf:n ohjelmistosta valmiina. Kielen profiili muuttuu kuitenkin koko ajan, jolloin kiinnostavasta kohdasta mitatulle profiilille ei ole normaalisti olemassa referenssiprofiilia, johon sitä voisi verrata.

Näiden ongelmien vuoksi vaihteen kiskoprofiilin mittaamiseen tarvitaan sekä erilliset laitteet että uudenlaiset mittaustavat. Laitteistopuolella kielten ja varsinkin risteysalueen mittaamiseen on käytettävä Miniprof-laitteen Switch-lisäosaa, jonka avulla mittapäättä voidaan liikuttaa kiskon poikittaissuunnassa yksittäisen mittaustapauksen aikana. Lisäosa tallentaa piirtokynän liikkeen lisäksi laitteen poikittaisliikkeen, jolloin myös leveämpien profiilien mittaaminen on mahdollista.

Oikeiden laitteiden lisäksi myös mittaustapoja täytyy muuttaa siten, että ne ottavat huomioon sekä kielten että risteysalueen profiilin jatkuvan muuttumisen. Tämä voidaan ottaa huomioon ainoastaan siten, että vaihteen kiskoprofiileja mitataan aina samoista ennalta määritetyistä kohdista. Tällöin referenssiprofiilien luominen on ainakin periaatteessa mahdollista mittaamalla profiilit kokoonpanovaiheessa olevasta vaihteesta. Profiilien vertailun kannalta on tärkeää, että mittapisteen määrittely on hyvin tarkasti ja yksikäsitteisesti, sillä jo 10 mm ero mittapisteen pituussuuntaisessa sijainnissa tekee vertailusta mahdotonta. Tässä projektissa saatujen kokemusten pohjalta tällaisen vaihtemittauksiin soveltuvan erillisen mittauskonseptin luominen on tulevaisuudessa mahdollista.

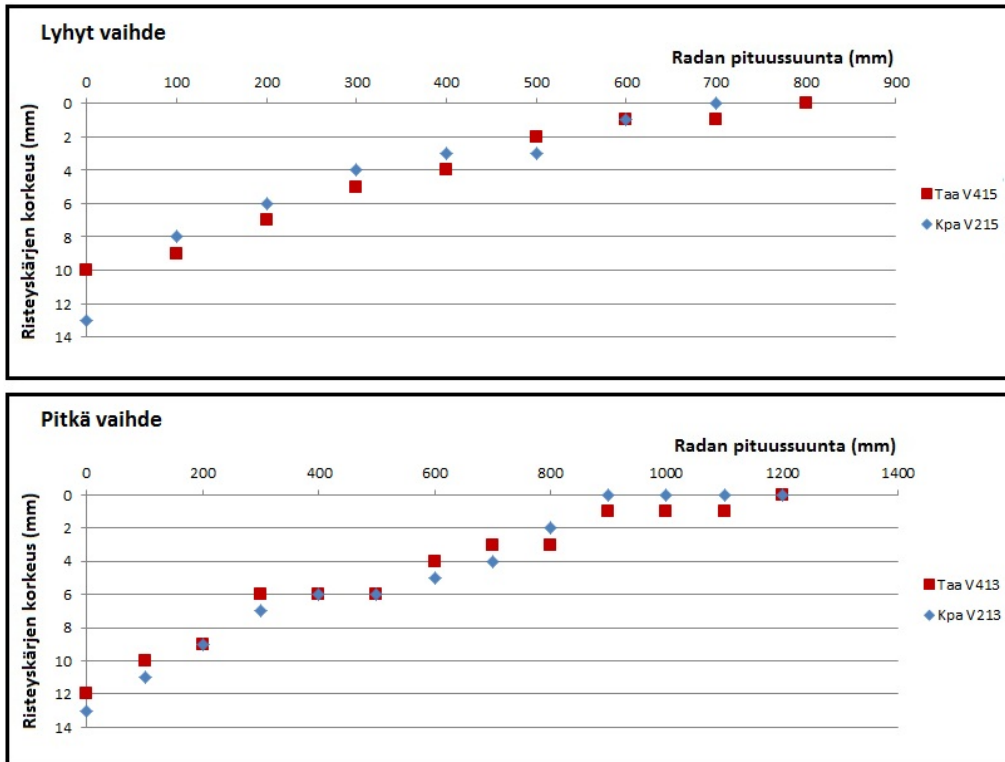
6.3.2 Vaihteiden raideleveydet ja risteysgeometria

Miniprof-mittausten ohella vaihteista mitattiin myös raideleveyttä Liikenneviraston ohjeissa (2013b) määritetyistä kohdista. Liitteessä 3 esitetään erikseen sekä lyhyiden että pitkien vaihteiden raideleveydet vaihteiden eri kohdissa. Mittausten perusteella voidaan sanoa, että raideleveydet ovat suurimmassa osassa vaihteita täysin niille määritettyjen toleranssien sisällä. Osasyynä näin hyviin tuloksiin on se, että toleranssi- ja akuuttiarvot ovat raideleveyden kasvun tapauksessa todella väljiä. Raideleveydelle sallitaan kunnossapidollisesti jopa 15mm kasvu ja akuuttiraja ylitetään vasta 23 mm jälkeen. Kriittisimmillä alueilla vaihteen kärjessä ja risteyksessä nämä rajat ovat onneksi hieman kireämmät, mutta näiden alueiden välistä raideleveys saa kasvaa käytännössä vapaasti.

Ainoastaan Tampereen vaihteissa V051 ja V062 on havaittavissa kunnossapitotoleranssien ylityksiä sekä kielisovituksen että välikiskoalueen osalta. Mitatut arvot ovat todella paljon nimellisarvon (1524 mm) yläpuolella, mutta äsken mainittujen väljien kunnossapitotoleranssien vuoksi rajat ylittyvät vain täpärästi. Syyt näihin kunnossapitotoleranssien ylityksiin oli selkeästi havaittavissa ja niitä käsitellään tarkemmin silmämääräisten kuntotutkimusten yhteydessä luvussa 6.3.3 .

Valitettavasti Tampereen ratapihan vaihteista ei ole tiedossa kaikkia tarkastusmittoja, sillä mittausten ensimmäisessä vaiheessa näitä ei katsottu tarpeelliseksi mitata. Mittausten toisessa vaiheessa suunnitelmat tarkentuivat, mutta tämän jälkeen ei ollut enää mahdollisuutta palata ensimmäisen koekohteen vaihteisiin tekemään puuttuvia mittauksia. Tämän lisäksi analysoinnissa havaittiin, että vaihteen V062 f-mitat on mitattu virheellisesti, joten ne on poistettu taulukosta.

Ensimmäisen vaiheen jälkeen mittaussuunnitelmaan tehtiin myös muita muutoksia. Toisessa vaiheessa mittauksiin sisällytettiin esimerkiksi siipikiskon ja risteyskärjen välisen korkeuden mittaaminen. Näiden mittojen avulla vaihteiden risteysgeometrioita voidaan vertailla keskenään. Kuva 47 esittää eri vaihteiden risteysgeometriat sekä lyhyissä että pitkissä vaihteissa.



Kuva 47. Siipikiskojen ja risteyskärjen välinen korkeusasema Kaipiaisten ja Taavetin koevaihteissa.

Kuvasta 47 voidaan havaita, että risteyskärjen geometrioissa on selkeitä eroja. Kenties merkittävin ero geometrioiden välillä on se, että korkeuden arvo 0 saavutetaan sekä lyhyissä että pitkissä vaihteissa selkeästi eri kohdassa. Tällä seikalla on suora yhteys pyörän sujuvaan siirtymiseen siipikiskolta risteyskärjelle. Risteyskärjen kantaosan kulumisen aiheuttaa viivästystä pyörän siirtymiseen ja lisää dynaamista kuormitusta. Lyhyiden vaihteiden kohdalla Taavetin vaihde V415 on käytännössä koko matkalta enemmän kulunut ja risteyskärki saavuttaa siipikiskon korkeustason vasta 100 mm myöhemmin kuin vastaava Kaipiaisten vaihde V215. Kulumisen ja dynaamisten iskujen välinen suhde näkyy suoraan vaihteiden palautuvassa painumassa (vrt. Kuva 40 ja Kuva 42). Vaihteen V415 risteysalueella on huomattavasti enemmän painumavaihtelua kuin vaihteen V215 kohdalla.

Myös pitkien vaihteiden kohdalla Taavetin vaihde V413 saavuttaa siipikiskon tason huomattavasti Kaipiaisten vaihdetta V213 myöhemmin. Tässä tapauksessa kulumisen vaikutukset eivät näy yhtä selkeästi vaihteiden palautuvassa painumassa, mutta se vaikuttaa silti heikentävästi pyörän siirtymiseen. Toinen mielenkiintoinen havainto pitkien vaihteiden risteyskärjistä on se, että risteyskärjen nousu ei ole kummassakaan tapauksessa lineaarista, vaan risteys nousee kahdessa eri osassa.

Tämä syvällisempi geometrioiden analysointi on kuitenkin melko vaikeaa, sillä mittoja on otettu yhteensä vain neljästä vaihteesta. Jotta risteyskärjen muotoa voitaisiin arvioida tarkemmin, olisi otosmäärää kasvatettava huomattavasti sekä otettava mukaan myös referenssiarvot, eli täysin käyttämättömän risteyskärjen mitat. Nämä alustavat kokeet kuitenkin osoittivat, että risteyskärjen korkeusaseman mittaaminen ja vertailu on mielekästä, kun halutaan pienentää risteyskärjessä syntyviä dynaamisia kuormituksia.

6.3.3 Kiskon silmämääräiset kuntotutkimukset

Kiskojen kuntotutkimukset lähtivät kaikissa kohteissa liikkeelle silmämääräisten tarkastuksien avulla. Tällä tavalla pystytään saamaan hyvin nopeasti karkea yleiskuva vaihteen kiskojen kunnosta, joka auttaa varsinaisten mittausten arvioinnissa. Kaipiaisten pitkä vaihde V213 havaittiin olevan silmämääräisesti melko hyvässä kunnossa. Risteysalueella vaihteen poikkeavalla raiteella havaittiin kuitenkin useita ympärilyöntivi-koja, joista yksi on esitettyä alla kuvassa 48. Tällaiset kiskoviat ovat kohtalaisen ikäviä alueella, joka muutenkin altistuu epäjatkuvuuskohtansa takia vaihtuville dynaamisille kuormituksille.



Kuva 48. Kaipiaisten vaihteessa V213 havaittu ympärilyöntivika.

Tässä vaihteessa nämä dynaamiset kuormitukset eivät kuitenkaan kasva välttämättä kovin suuriksi, sillä vaihteen risteyskärki oli hyvässä kunnossa. Se voidaan havaita tarkastelemalla kuvassa 49 näkyvää risteyskärjen korotusta, joka ei ole kulunut käytännössä lainkaan. Tämä helpottaa huomattavasti pyörän siirtymistä kärjen epäjatkuvuuskohdan ylitse.



Kuva 49. Risteyksen korotus Kaipiaisten vaihteessa V213.

Myös vaihte V215 oli äskeisen vaihteen tapaan silmämääräisesti hyvässä kunnossa. Risteysalueella oli pyörän siirtymäkohdassa havaittavissa hyvin pieniä painautumia, mutta ne eivät todennäköisesti lisää rataa kohdistuvia voimia juuri lainkaan. Silmämääräisen tarkastuksen ohella näiden vaihteiden risteyskohtia tarkasteltiin myös ultraäänilaitteen avulla, koska niissä oli havaittu kiskon sisäisiä halkeamia aiemmissä tarkastuksissa. Kyseiset poikkeamat oli merkattu kiskon kylkeen keltaisella liidulla, jota näkyy osittain myös kuvassa 49. Halkeamia ei kuitenkaan saatu tällä kerralla näkyviin, joka saattoi johtua käytössä olleen ultraäänilaitteen epätarkkuudesta tai väärästä tekniikasta.

Taavetin vaihteessa V413 kiskot ovat hyvässä kunnossa ainakin kielisovituksen ja välikiskoalueen osalta. Risteyskärjen taakse on muodostunut pieniä painautumia, jotka saattavat muuttaa kiskoon kohdistuvia kuormituksia. Painautumien lisäksi oikeanpuoleisessa siipikiskossa on havaittavissa merkkejä kiskon päällehitsaamisesta, jotka on esitetty kuvassa 50.



Kuva 50. Taavetin vaihteen V413 siipikisko, jossa on merkkejä kiskon päällehitsaamisesta.

Kiskotarkastusten yhteydessä havaittiin myös muutamia pölkkyvaurioita (Kuva 51). Vaihteen välikiskoalueen pölkystä numero 173 on lohjennut iso pala, joka viittaa siihen, että pölkkyä on kolautettu asennuksen tai kunnossapidon yhteydessä melko rajusti. Kyseinen vika ei ole pölkyn tukeutumisen kannalta vakava, mutta näin suuri halkeama saattaa edistää pölkyn teräspunoksien korroosiota, jolloin pölkyn käyttöikä lyhenee merkittävästi.



Kuva 51. Vaurioitunut pölkky Taavetin vaihteen V413 risteysalueella.

Taavetin toisessa vaihteessa V415 kiskot ovat hyvässä kunnossa vaihteen kielisovituksen ja välikiskoalueen osalta. Vaihteen risteysalue on kuitenkin silmin nähden huonossa kunnossa, joka on havaittavissa kuvassa 52. Risteyskärjen kiiltävästä osuudesta on selkeästi nähtävissä kiskon ja pyörän välinen kontaktikohta. Varsinkin poikkeavalle raiteelle ajettaessa tässä kontaktissa on selkeä epäjatkuvuuskohta jo huomattavasti ennen varsinaiselle risteyskärjelle siirtymistä.



Kuva 52. Taavetin vaihteen V415 kulunut risteysosa.

Tämä kontaktikohdan siirtyminen johtuu todennäköisesti joko risteuksen siipikiskojen liiallisesta ylikorotuksesta tai normaalin kulkupinnan voimakkaasta kulumisesta. Kisko-pyöräkontaktin epäjatkuvuudet tässä kohdassa vaikuttavat tietenkin negatiivisesti myös risteyskärjelle siirtymiseen. Mittausten aikana nämä ongelmat pystyivät havaitsemaan myös junan synnyttämistä äänistä. Junan pyörät kolahtivat todella voimakkaasti risteyskärkeen, eli siirtyminen risteyskärjelle ei tapahdu missään nimessä sulavasti.

Taavetin vaihteessa V415 havaittiin myös toinen merkittävä ongelma. Vaihteessa käytettävän Railex-kääntöavustimen käyttötanko oli silmin nähden vääntynyt ja avoimen kielen ulkoreunassa oli selkeitä kulumajälkiä, jotka ovat nähtävissä kuvassa 53.



Kuva 53. Avoimen kielen ulkoreunan kulumisjäljet Taavetin vaihteessa V415.

Nämä kielessä näkyvät kulumat johtuvat pyörän laipan sisäreunan kosketuksesta kieleen, joka johtuu siitä, että laippaura tukikiskon ja avoimen kielen välillä on jostain syystä liian pieni. Tällaisessa tilanteessa pyörä iskeytyy avointa kieltä vasten kehittäen todella suuria iskuvoimia Railexin kääntötankoon. Toisella puolella kiinni oleva kieli estää Railexin tankoa pakenemasta, jolloin tanko nurjahtaa. Nurjahduksen jälkeen tangon kokonaispituus ei ole enää sama, joka vaikuttaa Railexin kehittämiin pitovoimiin. Tämän ongelman ohella iskukuormitukset välittyvät kieliä pitkin myös vaihteenkääntölaitteelle, jolloin ne voivat aiheuttaa toimintahäiriöitä myös vaihteen varsinaiseen lukitukseen. Tällaisia vaihteen lukituksen toimintahäiriöitä on tapahtunut ainakin Toijalassa 2009 sekä Vammalassa 2013, jotka saattavat johtua nimenomaan pyörän kosketuksesta avoimeen kieleen.

Tampereen vaihteen V051 kielet (Kuva 54) olivat katselmuksen perusteella kohtalaisen kuluneet, varsinkin poikkeavalla raiteella. Tämä johtuu siitä, että Tampereen aseman vaihtoliikenne kulkee hyvin paljon tämän vaihteen kautta, jolloin myös vaihteen poikkeavaa raidetta käytetään todella paljon.



Kuva 54. Tampereen vaihteen V051 oikeanpuoleinen kielisovitus.

Kuvasta 54 nähdään, että aivan kielen kärjestä on kulumisen seurauksena irronnut pieniä paloja ja kielen profiili on muutenkin hyvin epätasainen. Tämä viittaisi vahvasti vaihteen kärjessä tapahtuvaan laippakosketukseen, sillä kielen kärjen ei kuuluisi olla normaalisti lainkaan kontaktissa pyörän kanssa.

Kävelytarkastuksissa havaittiin geometriavirheitä myös vaihteen risteysalueella. Kuva 55 osoittaa kuinka vaihteen poikkeavan raiteen ulkokisko on selkeästi painunut välirikkolementin ja risteyslementin jatkoskohdasta. Tämä luo rataan epätasaista kuormitusta ja näkyy luonnollisesti myös radan painumassa. Kyseisen vaihteen palautuvan painuman kuvaaja (kuva 43) esittää suoran raiteen tilannetta, jolloin tämä vaurio ei valitettavasti näy kuvassa.



Kuva 55. Tampereen vaihteen V051 poikkeavan raiteen ulkokiskon painuma

Näiden havaintojen yhteydessä vaihteessa huomattiin myös muutamia katkenneita raideruuveja. Samoja ongelmia on havaittu aiemmin myös muissa vaihteissa ja asiaa on tutkittu Liikenneviraston ja Aalto-yliopiston toimesta vuonna 2013. Lisätietoa näistä raideruuviongelmistä ja niiden mittaamisesta löytyy Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä-sarjan julkaisusta 32/2013 (Salminen 2013).

Vaihteen V051 vastavaihteena toimiva V062 kärsii käytännössä samoista kulumisongelmista. Myös tässä vaihteessa ongelmat näkyvät poikkeavalla raiteella, joka on vielä huomattavasti enemmän kulunut kuin edellä esitelty V051. Kuvasta 56 näkyy selkeästi, kuinka ulkokiskon kulkureunaan on muodostunut kulumisen seurauksena pyörän laipan muotoinen kuvio. Kulumisen voimakkuus näkyy myös sepelin joukossa olevan metallihiukkasten määrästä.



Kuva 56. Tampereen vaihteen VO62 poikkeavan raiteen voimakkaasti kulunut kisko.

Laipan muoto oli havaittavissa vaihteen kärjestä melkein risteyskärkeen asti, eli pyörä etenee laippakosketuksessa käytännössä koko vaihteen matkan. Tämä poikkeavan raiteen kuluminen on havaittavissa myös raideleveysmittauksissa, joiden tulokset on esitetty liitteessä 3. Raideleveys on selvästi kasvanut sekä kielialueella (c2-mitta) että välikiskoalueella (d2-mitta). Suoran raiteen raideleveys on näistä kohdista huomattavasti parempi, joten ongelmat kohdistuvat mittaustenkin perusteella vahvasti poikkeavaan raiteeseen. Laippakosketus on vaurioittanut myös kielen kärkeä, joka on havaittavissa kuvassa 57. Nämä kulumat eivät kuitenkaan näy raideleveyden arvossa.



Kuva 57. Laippakosketuksen vaurioittama kieli Tampereen vaihteessa VO62.

Kiskon ja kielen huonon kunnon voi havaita myös junaylityksen aikana kuuluvasta kirs-kunasta, joka alkoi jo vaihteen etupuolella. Nämä kulumisongelmat voi alun perin joh-tua yksinkertaisesti kyseisen kohdan raidegeometriasta. Vaihteen etupuolella on hyvin tiukka kaarre ($R = 300\text{m}$), joka yhdessä vaihteen poikkeavan raiteen kanssa muodostaa käytännössä jatkuvan kaarteena. Varsinaisessa kaarteessa ei voi vaihteiden takia olla lainkaan kallistusta, jolloin pyörät ajautuvat helposti laippakosketukseen tai ainakin hyvin lähelle laippakosketusta jo huomattavasti ennen vaihdetta. Pyörät eivät siis tule vaihteeseen läheskään optimaalisella linjalla jolloin syntyy kuvissa 56 ja 57 näkyviä ongelmia. Ulkokiskossa havaittu laippakosketus vaikuttaa selkeästi myös sisäkiskoon. Laippakosketuksen synnyttämä kitka saa aikaan sen, että yksittäisen telin pyörät eivät pyöri samalla nopeudella, jolloin sisäkiskoon syntyy kuvassa 58 näkyvää korrugaatiota.



Kuva 58. Tampereen vaihteen V062 poikkeavan raiteen sisäkiskon korrugaatio.

Analysoimalla kuvaa 58 tarkemmin, voidaan kiskossa havaita sekä lyhyen että pitkän matkan korrugaatiota. Lyhyen matkan korrugaatio näkyy kiskossa pieninä poikittaisjuovina, kun taas pitkän matkan korrugaatio näkyy pidempänä raiteen pystysuuntaisena aaltoiluna. Tämä aaltoilu jatkuu käytännössä risteysalueen yli aina vastavaihteen V051 risteykseen asti. Näiden havaintojen pohjalta voidaan todeta, että tämän kyseisen vaihteen kiskot ovat selkeästi kunnossapidon tarpeessa. Kielisovituksen osalta täydellinen kiskon vaihto on ainoa järkevä kunnossapitotoimi, joka oli kunnossapitosuunnitelmissa merkattu vuodelle 2013. Kesällä 2014 tehty tarkastus kuitenkin osoitti, että tätä vaihtoa ei ollut jostain syystä tehty. Näin suuret kisko-ongelmat vaurioittavat kasvavien kuormitusten kautta koko ratarakennetta ja myös vaihteesta kulkevia pyöriä, joten kunnossapito tulisi tehdä tällaisissa tilanteissa ensi tilassa.

Pääraiteiden raiteenvaihtopaikkana toimivien vaihteiden V171 ja V172 kiskot ovat edellä esitettyihin Tampereen vaihteisiin verrattuna kauttaaltaan huomattavasti paremmassa kunnossa. Vaihteen V172 risteyksessä on aiemmissa tarkastuksissa havaittu pieniä kiskon sisäisiä murtumia muutamassakin kohdassa, jonka vuoksi kyseistä risteystä tarkasteltiin ultraäänilaitteen avulla. Nämä vauriot saatiin näkyviin ultraäänen avulla, mutta ne eivät ainakaan mittaushetkellä näyttäneet kovinkaan paljon vaikuttavan vaihteen toimintaan.

7 Yhteenveto ja päätelmät

Tässä työssä oli lähtökohtaisena tavoitteena selvittää nykyisen 60E1-vaihteiden pystysuuntaiseen jäykkyyteen liittyvät ongelmat ja niiden syyt. Tähän asiaan pureuduttiin analysoimalla ensin kirjallisuusselvityksen avulla jokaisen vaihdekomponentin ja rakenneratkaisun roolia jäykkyyden osatekijänä. Tämä lisäksi työn aikana toteutettiin laajat kenttämittaukset, joilla pyrittiin osoittamaan nämä kirjallisuusselvityksen aikana esille tulleet ongelmakohdat myös käytännössä.

Kirjallisuusselvitys Suomessa käytettävien 60E1- ja 54E1-vaihteiden rakenteeseen liittyen osoitti, että vaihdekomponentit ovat nykyisellään melko jäykkiä verrattuna normaalin linjaraitteen komponentteihin. Jäykkyys johtuu pääosin siitä, että vaihteen kielialueella halutaan varmistaa tukikiskon ja vaihteen kielen välisen korkeusaseman pysyvyys, jolloin elastisia komponentteja ei käytetä käytännössä lainkaan. Vaihteen välikiskoalueella elastisuutta on hieman enemmän kiskon ja vaihdealuslevyn välissä käytettävän välilevyn johdosta. Tämä välilevy on kuitenkin huomattavasti linjaraitteella käytettävää välilevyä jäykempi. Elastisuusongelmia vaihteissa lisää entisestään myös epäjatkuvuuskohdat, jotka aiheuttavat muutoksia junan kululle ja lisäävät rataan kohdistuvia dynaamisia iskuja. Kisko jatkokosten lisäksi pyörän kulkupinnan epäjatkuvuutta muodostuu kohtiin, joissa pyörä siirtyy tukikiskolta kielelle sekä siipikiskolta risteyskärjelle.

Vaihteen komponentteihin liittyvien jäykkyyso Ongelmien lisäksi vaihdealue on haastava rakenne myös kunnossapidon kannalta. Raitteen onnistunut tukeminen on linjaraitteen tapaan myös vaihdealueella ensiarvoisen tärkeää, mutta rakenteen monimuotoisuus ja vaihtelevuus hankaloittavat tuennan tekemistä ja nostavat ammattitaidon merkityksen entistä korkeammalle.

Kunnossapitäjän ammattitaitoon liittyy myös kiskojen ja raideruuvien kunnan arviointi. Näitä asioita arvioidaan nykyään pääosin silmämääräisen tarkastuksen avulla, joka luonnollisesti vaatii hyvinkin paljon ammattitaitoa ja selkeitä ohjearvoja. Tässä projektissa toteutettujen kunnossapitäjien haastatteluiden perusteella kuitenkin selvisi, että tämä ammattitaito on eri kunnossapitoalueilla hyvin vaihtelevaa. Olennaisia asioita ei välttämättä pidetä tärkeinä ja kunnossapitoon käytettävät työkalutkin saattavat erota toisistaan eri kunnossapitoyritysten välillä. Haastattelut selvensivät myös sitä, että Liikenneviraston antama ohjeistus ei ole parasta mahdollista. Liikenneviraston tulisi siis jatkossa pyrkiä paremmin varmistamaan kunnossapitäjien osaamisen taso ja motivaatio tällaisissa merkittävässä kunnossapitotöissä.

7.1 Yhteenveto koevaihteiden mittauksista

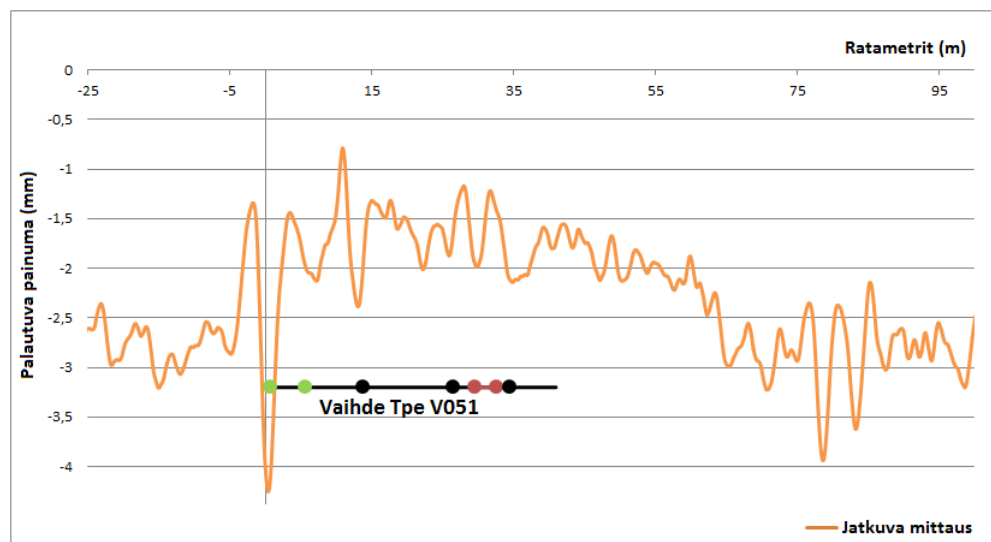
Koevaihteista on mittausten perusteella löydettävissä monia ongelmakohtia, jotka vaikuttavat rakenteen elastisuuteen. Selkeimmin ongelmat olivat havaittavissa rakenteen palautuvan painuman mittauksissa, jossa löydettiin myös monia yhdistäviä tekijöitä eri koevaihteiden välillä. Yksi suurimmista yhteisistä ongelmista oli selkeästi vaihteen toimilaitepölkkyjen painuminen. Kuvien 39–46 perusteella kaikista koevaihteista on löydettävissä näitä kärkialueen ongelmia, jotka johtuvat siitä, että toimilaitepölkkyjen kohdalla rakenteen koneellinen tuenta ei ole mahdollista. Tuennan puuttuessa sepeli murenee toimilaitepölkkyjen alla muuttaen radan jäykkyyttä ja

lisäten näin dynaamisia iskukuormituksia. Pahimmillaan radan palautuva painuma muuttui jopa 3 mm toimilaitteen kohdalla, jota voidaan pitää hyvin merkittävänä siirtymänä.

Toistuvia painumaongelmia havaittiin myös vaihteiden risteysosan kohdalla. Nämä painumat eivät olleet niin merkittäviä kuin kärkialueella (noin 1,5 mm), mutta kyseessä on silti yhtä suuri ongelma, sillä nämä painumat ovat muodostuneet rataan jatkuvasta tuennasta huolimatta. Jos risteys jätettäisiin tukematta toimilaitteiden tapaan, painumat olisivat luultavasti jopa suurempia kuin vaihteen kärkialueella. Tämä arvio perustuu siihen, että risteyskohdan epäjatkuvuus aiheuttaa suurempia dynaamisia kuormituslisäjä kuin vaihteen kärki.

Painumamittauksista löytyi myös tiettyjä ominaisuuksia, jotka eivät esiintyneet aivan kaikissa koevaihteissa. Yksi tällaisista ominaisuuksista on yleisen painumatason muuttuminen vaihteen alueella, joka on esitetty Tampereen vaihteen V051 osalta kuvassa 59. Tässä vaihteessa radan painuma vaihteen ulkopuolelta pysyy melko tarkasti 2,5–3 mm välissä, mutta vaihdealueella painuman taso pienenee välittömästi noin 1 mm. Syyt tähän painuman pienentymiseen löytyvät vaihdekomponenttien elastisuuden puutteesta, josta on kerrottu tarkemmin luvussa 2.2.

Nämä tulokset ovat hyvin mielenkiintoisia, sillä ne eroavat merkittävästi esimerkiksi Innotrack -projektissa tehdyistä mittauksista (Innotrack 2009b). Näissä Saksassa suoritetuissa mittauksissa saatiin tuloksia, joissa vaihdealueen jäykkyys oli monessa kohdassa huomattavasti pienempi kuin ympäröivän radan. Tämä on osoitus siitä, että erilaisilla komponenttivalinnoilla voidaan selkeästi vaikuttaa ratarakenteen kokonaisjäykkyyteen ilman, että vaihteen toimintakyky heikkenee.



Kuva 59. Painumatason vaihtuminen Tampereen vaihteessa V051.

Palautuvan painuman mittauksia voidaan näiden huomioiden valossa pitää hyvinkin onnistuneina. Kummankin mittaustavan (pistemäinen ja jatkuva) avulla saatiin merkittävimmät ongelmat esille ja tulokset eivät eroa kovinkaan paljon toisistaan. Muutamassa yksittäisessä mittauspisteessä tulokset erosivat toisistaan selkeämmin, mutta sitä voidaan pitää hyvinkin perusteltuna, sillä jatkuva mittaus toteutettiin nopeudella 10 km/h ja pistemäinen mittaus nopeudella 30 km/h. Tällä nopeuserolla on selkeästi vaikutusta pyörien aiheuttamaan dynaamiseen kuormituslisään, jolloin kokonaiskuormitus on hetkellisesti hieman erilainen.

Vaikka painumaongelmia havaittiin käytännössä jokaisessa koevaihteessa, sepelin kunto oli rakeisuusnäytteiden mukaan yllättävän hyvä (ks. Taulukko 5). Tämä osoittaa, että standardin mukaisista näytepisteistä otetuilla näytteillä ei päästä riittävän tehokkaasti kiinni muissa mittauksissa havaittujen ongelmien syihin. Näytteitä ei kuitenkaan otettu suurimmista painuman ongelmakohdista, kuten vaihteenkääntölaitteen tai kääntöavustimen alta. Vaihteen elastisuutta tutkittaessa olisikin kenties syytä miettiä sepelin näytteenottopisteitä uudemman kerran ja keskittyä myös vaihteen kielisovitusalueen sepeliin. Tässä projektissa otetut näytteet kertovat kuitenkin siitä, että kielisovituksen ulkopuolella sepelillä on vielä kyky tukea rataa riittävästi, jolloin ongelmiin pitäisi pystyä vastaamaan tehokkaalla tukemistyöllä.

Silmämääräiset havainnot osoittivat, että koekohteista löytyy myös selkeitä kiskovikoja ja kiskon kulumaa. Isoimmat ongelmat kulumisenkin kannalta olivat havaittavissa vaihteen kielialueella ja risteyskärjessä. Eli toisin sanoen kiskojen kulumista ja radan palautuvaa painumaa on havaittavissa kohdissa, johon kohdistuu suuria dynaamisia kuormituksia. Näillä ongelmilla ja kuormituksella on jatkuva vaikutus toisiinsa, eli kuormitus lisää kulumaa ja painumaa, jotka syntyessään lisäävät kuormitusta entisestään. Tämän oravanpyörän pysäyttämiseksi on keskityttävä sekä dynaamisten kuormitusten pienentämiseen että ongelmien nopeaan korjaamiseen.

Rinnakkain tämän projektin kanssa Liikennevirasto aloitti uuden elastisemman vaihteen kehittämisen. Rinnakkaisprojektin päätarkoituksena on suunnitella ja rakentaa eri yhteistyökumppanien kanssa Suomen olosuhteisiin soveltuva elastisempia prototyypivaihteita, joita voidaan asennuksen jälkeen ryhtyä seuraamaan tässä projektissa esitetyillä mittaustavoilla. Potentiaalisten mittaustapojen ohella tässä raportissa läpi käydyt ongelmat ovat olleet erinomaisia lähtötietoja uuden vaihteen kehitykselle. Suuri osa luvussa 4 esitellyistä rakenneratkaisuista on jo otettu käyttöön ensimmäisissä prototyypivaihteissa, jotka asennettiin Kouvolaan syksyllä 2014 ja Ouluun kesällä 2016.

Lähteet

- Alfi, S. & Bruni, S. 2009. Mathematical modeling of train-turnout interaction. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. Vol. 47:5. pp. 551-574.
- 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.
- Bugarin, M. R. & Garcia Diaz-de-Villegas, J-M. 2002. Improvements in railway switches. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. pp. 275-286.
- Innotrack, 2008. D3.1.1. – List of key parameters for switch and crossing monitoring. 16 p. + app. 26 p.
- Innotrack, 2009a. D3.1.4. – Summary of results from simulations and optimisation of switches. 38 p.
- Innotrack, 2009b. D3.1.11. – Results of continuous RSMV stiffness measurements on switches at DB. 15 p. + app. 7 p.
- International Union of Railways. 1986. UIC code 864-5. Technical specification for the supply of rail seat pads. 4th edition. 30 p.
- Kassa, E. Nielsen, J.C.O. 2008. Dynamic interaction between train and railway turnout: full-scale field test and validation of simulation models. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. Vol. 46. pp. 521-534.
- Kauppinen, M. 2011. *Ratakiskon elinkaari*, Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2011. 113 s.
- Kälvälä, J. 2013. *Akuuttirajat rautatievaihteiden mittauksissa*. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 29/2013. 91 s. + liitt. 17 s.
- Lichtberger, B. 2011. *Track Compendium*. Hampuri, Eurailpress. 621 p.
- Liikennevirasto. 2002. *Ratatekniset ohjeet ja määräykset (RAMO) osa 11, Radan päällysrakenne*. Helsinki. 87 s. + liitt.36 s.
- Liikennevirasto. 2010. *Technical specification for 54E1 and 60E1 railway turnouts*. Helsinki. 36 s.
- Liikennevirasto. 2013a. *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 4, Vaihteet*. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 22/2012. 47 s. + liitt.12 s.
- Liikennevirasto. 2013b. *Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 14, Vaihteiden tarkastus ja kunnossapito*. Helsinki. Liikenneviraston ohjeita 7/2013. 27 s. + liitt.20 s.

Luomala, H., Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. 2014. Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015. 108 s.

Markine, V.L., Steenbergen, M.J.M.M., Shevtsov, I.Y. 2010. Combatting RCF on switch points by tuning elastic track properties. *Wear* 271. pp. 158–167.

Müller-Boruttau, F.H., Kleinert, U. 2001. Sleepers with sole pads. Vortrag WCRR 2001. 6 p.

Nummelin, M. 1994. Rautatievaihteet. Mikkeli, VR-pääkonttori, ratayksikkö. Länsi-Savo Oy. 144 s.

Peltokangas, O., Luomala, H. & Nurmikolu, A. 2013. Radan pystysuuntainen jäykkyys ja sen pistemäinen mittaaminen. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 6/2013. 190 s. + liitt. 4 s.

Qian, L., Feng, X. and Zhang, F. 2011. Deformed Microstructure and Hardness of Hadfield High Manganese Steel. *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 8 (2011) pp. 1623-1628.

Rantala, T., Kerokoski, O. & Nurmikolu, A. 2013. Betoniratapölkyn rakenteellinen toiminta ja vaurioitumismekanismit. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2013. 156 s. + liitt. 1 s.

Salminen, E. 2013. Raideruuvivauriot lyhyissä vaihteissa. Helsinki, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2013. 81 s. + liitt. 9 s.

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.

Ratahallintokeskus. 1997. Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohje. 3 s.

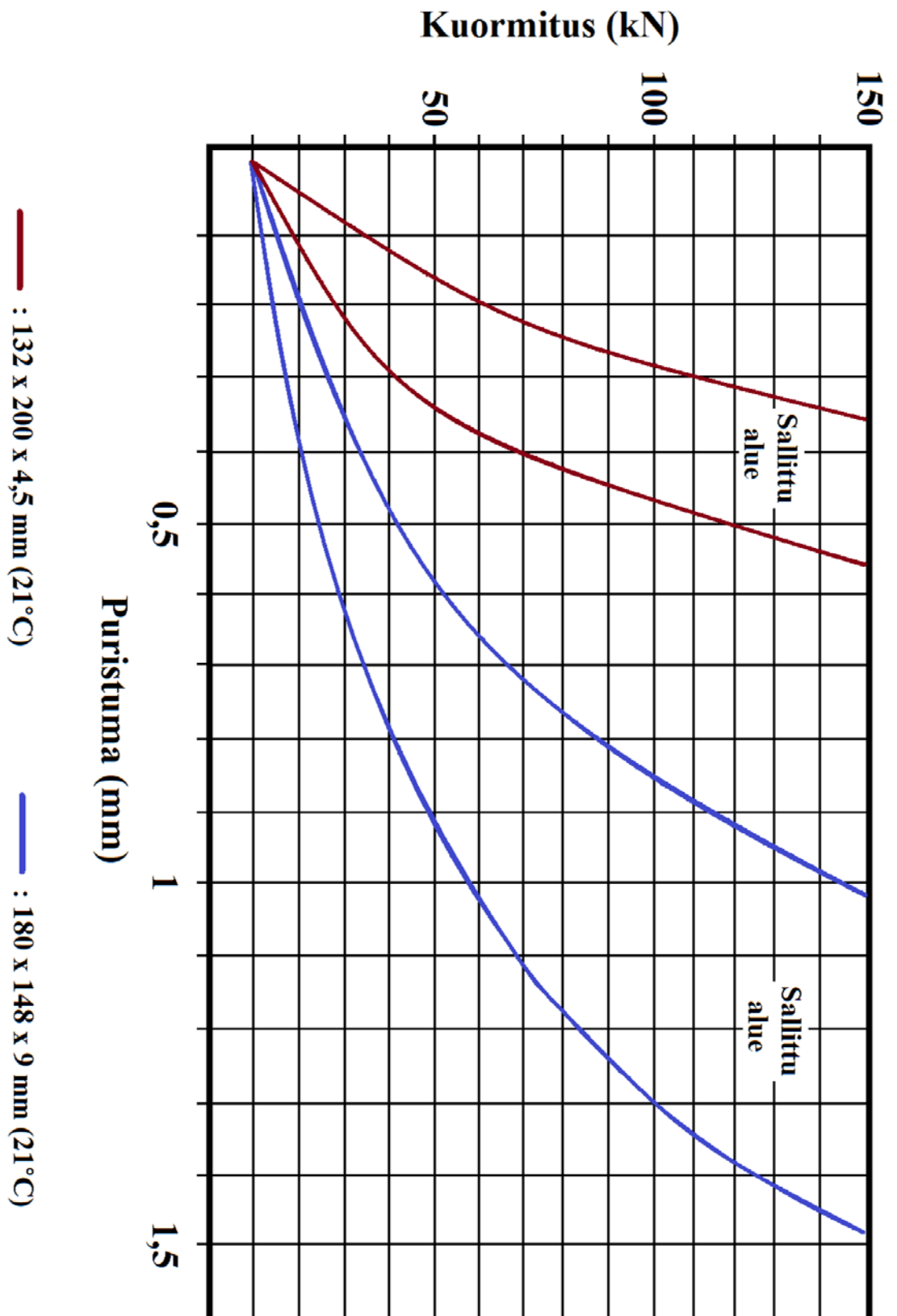
Voestalpine, Hollow Steel Sleepers. [WWW] [Viitattu 19.10.2015] Saatavissa: http://www.voestalpine.com/weichensysteme/static/sites/co07/downloads/en/products/tunnels/TSW_en.pdf

Vossloh Gogifer. 2014. Meeting presentations 12.8.2014. 83 p.

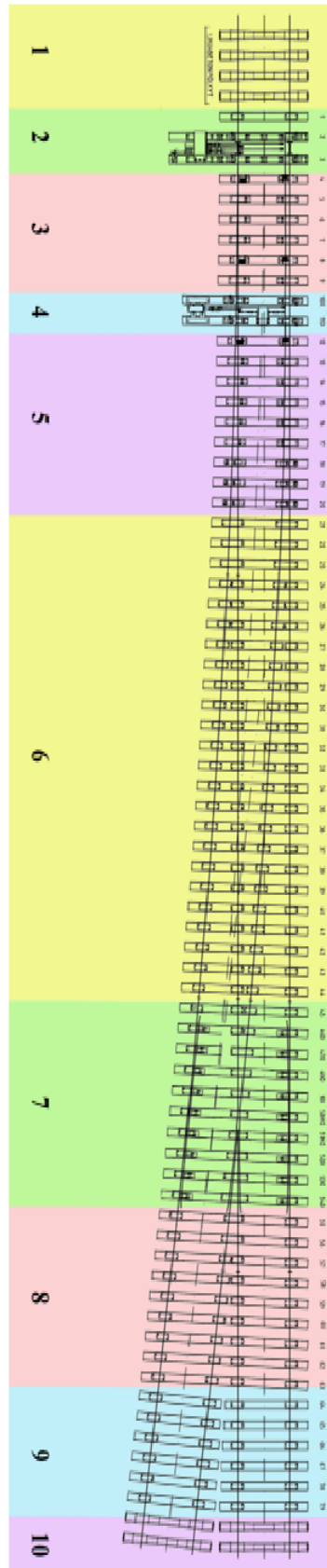
Vossloh Rail Systems. 1995. The Vossloh Rail Fastening System W14. Product Information. Nr. 2/45. 9 p.

VR Track. 2011. Kunnossapitoalue 1, Lahti-Vainikkala 60E1-vaihteiden ultraäänitarkastusten raportointi. 24 s. + liitt. 7 s.

Välilevyn jännitys-venymäkäyrät



Vaihteen teoreettiset jäykkyysalueet



Lyhyet vaihteet:

Vaihte	a	b	c1	c2	c3	c4	d1	d2	f1	f2	e1	e2	g1	g2	i1	i2
Kpa V215	1526	1527	1526	1526	1524	1525	1527	1529	1479	1480	1522	1526	1434	1438	43	41
Taa V415	1524	1522	1525	1524	1523	1524	1526	1526	1483	1482	1524	1525	1437	1439	47	45
Tpe V051	1531	1530	1529	1534	-	-	1528	1540	1482	1480	1524	1525	-	-	-	-
Tpe V062	1525	1526	1527	1536	-	-	1530	1540	-	-	1525	1527	-	-	-	-
Tpe V171	1524	1525	1528	1528	-	-	1528	1533	1483	1484	1525	1524	-	-	-	-
Tpe V172	1524	1525	1527	1529	-	-	1526	1533	1482	1484	1524	1527	-	-	-	-
Nimellinen	1524	1525	1524	1524	1524	1524	1524	1524	1482	1482	1524	1524	1438	1438	44	44
Akuuttraja min	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1478	1478	1519	1519	1432	1432	41	41
Akuuttraja max	1535	1532	1535	1547	1547	1547	1535	1547	1486	1486	1527	1527	1440	1440	49	49
Kun.pitotol. min pää	1521	1522	1521	1521	1521	1521	1521	1521	1480	1480	1521	1521	1434	1434	43	43
Kun.pitotol. max pää	1530	1530	1530	1531	1530	1539	1530	1539	1484	1484	1527	1527	1438	1438	47	47

Pitkät vaihteet:

Vaihte	a	b	c1	c2	c3	c4	d1	d2	f1	f2	e1	e2	g1	g2	i1	i2
Kpa V213	1525	1526	1524	1522	1523	1524	1525	1526	1480	1482	1522	1522	1432	1437	44	43
Taa V413	1524	1524	1524	1525	1522	1522	1524	1526	1523	1523	1483	1484	1436	1439	45	43
Nimellinen	1524	1525	1524	1524	1524	1524	1524	1524	1482	1482	1524	1524	1438	1438	44	44
Akuuttraja min	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1520	1478	1478	1519	1519	1432	1432	41	41
Akuuttraja max	1535	1532	1535	1547	1547	1547	1535	1547	1486	1486	1527	1527	1440	1440	49	49
Kun.pitotol. min pää	1521	1522	1521	1521	1521	1521	1521	1521	1480	1480	1521	1521	1433	1433	43	43
Kun.pitotol. max pää	1530	1530	1530	1531	1530	1531	1530	1531	1484	1484	1527	1527	1438	1438	47	47

Vaihteiden raidelevyydet

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-317-359-0
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

