

Jimi Andersson

SIIRTYMÄRAKENTEIDEN MERKITYS SUURNOPEUSRADOILLA

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Heikki Luomala
Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jimi Andersson: Siirtymärakenteiden merkitys suurnopeusradoilla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Helmikuu 2022

Tässä työssä käsitellään siirtymärakenteita, joiden avulla radassa esiintyviä äkillisiä jäykkyydenmuutoksia pyritään vähentämään. Jäykkyydenmuutoksia esiintyy niin sanotuissa epäjatkuvuuskohdissa, joita voivat olla esimerkiksi siltapäädtyt, tunneliaukot ja ratarummut. Tämä jäykkyydenmuutos aiheuttaa rataa lisärasituksia, jotka voivat aiheuttaa epätasaisuuksia, jotka taas aiheuttavat lisää rasitusta. Syntyvät lisärasitukset ovat dynaamisia ja täten kasvavat nopeuden kasvaessa. Aihe on siis ajankohtainen, koska Suomessa on suunnitteilla ratoja, joiden ajonopeudet ovat suurempia kuin aikaisemmin.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, jossa hyödynnettiin sekä kotimaisia että ulkomaalaisia kirjallisuuslähteitä. Aluksi tutkittiin epäjatkuvuuskohtia, niiden esiintymistä ja vaikutusta radan tasaisuuteen. Epäjatkuvuuskohdat aiheuttivat huomattavasti enemmän korjauskustannuksia, kuin muut radan osat. Epäjatkuvuuskohtien aiheuttama epätasaisuus myös aiheutti lisäkuormituksia rataa. Tuloksena selvisi myös, että siirtymärakenteilla voidaan vaikuttaa radassa esiintyviin jäykkyydenmuutoksiin ja täten vähentää epäjatkuvuuskohtiin syntyviä epätasaisuuksia. Monia eri siirtymärakennetyyppejä löydettiin, mutta tyypillisimmät olivat siirtymälaatat ja erilaiset jäykkyyttä vähentävät rakenteet. Suurnopeusratojen merkitystä tulevaisuuden kannalta tutkittiin ja niiden lisääntyminen Suomessa sekä maailmalla vaikuttaa todennäköiseltä. Nopeuden lisäämisellä huomattiin olevan merkittävä vaikutus rataa kohdistuviin voimiin, erityisesti epätasaisen kohdan yli kuljettaessa.

Siirtymärakenteiden käyttö Suomessa on melko vähäistä ja sen lisääntymiselle olisi tarvetta erityisesti, jos nopeuksia tullaan kasvattamaan. Siirtymärakenteiden pidentäminen nykyisestä olisi myös tärkeää. Niiden pidentämisellä todettiin olevan merkittävä vaikutus lisärasitusten ehkäisemiseen. Siirtymärakenteita voitaisiin pidentää hyödyntämällä niitä monipuolisemmin, esimerkiksi lisäämällä jäykkyyttä siirtymälaatan avulla ja vähentämällä sitä jähkemältä puolelta jäykkyyttä vähentävillä rakenteilla.

Avainsanat: Siirtymärakenne, suurnopeusrata, epäjatkuvuuskohta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Jimi Andersson: The importance of transition structures on high-speed railways

Bachelor's Thesis

Tampere University

Faculty of Built Environment

February 2022

This work deals with transition structures, which are used for lessening sudden stiffness changes in the track structure. These changes in stiffness occur in so called transition zones. Examples of transition zones are bridge approaches, tunnel openings and culverts. This change in stiffness causes additional stress to the track, which can cause unevenness, which in turn causes more stress to the track. This additional dynamic load caused by the transition zone increases if the speed of the train increases. Therefore, this subject is quite timely due to the increase in speed on railways that are being designed today in Finland.

The text was written by researching Finnish and foreign works about the subject. First the effects and occurrence of transition zones on the track was researched. It was found that much more maintenance costs were spent on transition zones in comparison to other parts of the track. The unevenness caused by transition zones also caused additional loading on the track. It was found that transition structures have a reductive effect on the unevenness of the track caused by transition zones. Many different types of transition structures were found, the most typical being approach slabs and different structures that are designed to decrease the stiffness of the track. The future of high-speed rail was studied, and their increase in the future, both in Finland and abroad, seems plausible. Speed increases influenced the loads on to the track, especially increasing the loads on uneven parts of the track.

The use of transition structures, especially in Finland, is quite rare and the requirement for more usage will increase especially if the running speeds increase in the future. Increasing the length of the transition structures was also found to be a good improvement, since the increase in length was found to have a positive effect on decreasing the additional stresses caused by transition zones. Length could be increased by utilizing different types of transition structures. For an example, in addition to using an approach slab, stiffness could be decreased on the stiffer side of the track.

Keywords: Transition structure, high-speed rail, transition zone

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä työ on laadittu Tampereen yliopiston tekniikan alan kandidaatintyönä. Työ opetti tieteellisen tekstin kirjoittamiseen liittyviä taitoja, mutta opetti minua myös paljon itseäni kiinnostavasta aiheesta. Suuret kiitokset Heikki Luomalalle, joka toimi työn ohjaajana ja auttoi perehdyttämään minut aiheeseen sekä auttoi ymmärtämään hankalia käsitteitä. Kiitokset myös pienryhmässä saaduista palautteista.

Tampereella, 6.2.2022

Jimi Andersson

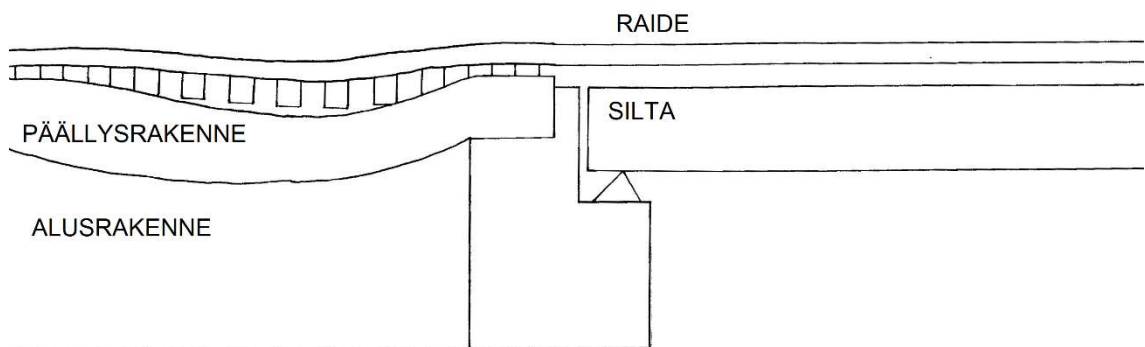
SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RADAN TASAISUUS JA EPÄJATKUVUUSKOHDAT	3
2.1 Radan rakenne	3
2.2 Radan tasaisuuden mittaaminen	4
2.3 Epäjatkuvuuskohtat.....	5
2.4 Pystysuuntaiset poikkeamat epäjatkuvuuskohdissa	5
2.5 Pystysuuntaisten poikkeamien vaikutus rasitukseen	7
3. SIIRTYMÄRAKENTEIDEN PERUSTEET	9
3.1 Siirtymärakennetyyppejä.....	9
3.2 Vaikutus pystysuuntaisiin poikkeamiin	11
3.3 Siirtymärakenteiden suunnittelu	13
4. NOPEUDEN KASVATTAMISEN VAIKUTUS	15
4.1 Suurnopeusrata	15
4.2 Nopeuden vaikutus rasitukseen.....	15
4.3 Nopeuden vaikutus siirtymärakenteiden suunnitteluun.....	17
5. PÄÄTELMÄT	19
LÄHTEET	20

1. JOHDANTO

Rautateiden ajonopeudet kasvavat maailmanlaajuisesti. Nopeuden lisääminen myös lisää tarvetta tasaiselle radalle, sillä tasainen rata on tärkeä vaatimus rautatien turvallisuudelle ja matkamukavuudelle. Tasaisuuden takaaminen vaatii enemmän radan suunnittelulta ja rakentamiselta. Suomessakin uusien rataosuuksien ja ratauudistuksien nopeusrajoitukset tulevat mahdollisesti olemaan korkeampia kuin ennen ja tämä tuo radalle lisää rasitusta sekä tiukentaa laatuvaatimuksia.

Tämä työ tutkii eräitä ongelmakohtia, jotka voivat syntyä siirtymävyöhykkeille, missä radan rakenteen jäykkyydessä tapahtuu äkillinen muutos. Kun rataa ja sen rakennetta raskittava liikkuva kalusto siirtyy jäykästä rakenteesta pehmeämpään tai toisinpäin, aiheuttaa se radan pehmeälle puolelle huomattavasti enemmän painumaa verrattuna jäykkään puoleen. Näitä kohtia kutsutaan epäjatkuvuuskohdiksi. Kuten kuvasta 1 nähdään, voi epätasainen painuma aiheuttaa epäjatkuvuuskohtaan ramppimaisen nousun jäykemmälle osuudelle, joka puolestaan aiheuttaa entistä enemmän rasituksia nousun tai las-
kun aiheuttaman pystysuuntaisen kiihtyvyyden takia.



Kuva 1. Periaatekuva epäjatkuvuuden vaikutuksista radan rakenteeseen.

Painumien aiheuttama epätasaisuus tuottaa matkustajille epämukavuutta. Samalla epätasaisuus voi johtaa pölkkyjen roikkumiseen, joka saa pölkkyt iskeytymään raidesepeliin,

kun liikkuva kalusto kulkee ongelmakohdan yli. Tämä iskukuormitus voi johtaa raide-
desepelin murskautumiseen. Pahimmassa tapauksessa syntyvät epätasaisuudet ja nii-
den aiheuttamat muut ongelmat ovat niin suuria, että ne vaativat radan kunnostamista,
joka luonnollisesti aiheuttaa lisäkustannuksia ja tekee ongelman ennaltaehkäisemisestä
kannattavampaa myös taloudellisesti.

Radan epätasaisuusongelmien ennaltaehkäisemiseksi epäjatkuvuuskohtiin voidaan ra-
kentaa siirtymärakenteita, joiden tehtävänä on tasoittaa jäykkyydenmuutosta ja epäta-
saista painumaa kohdissa, joissa ongelmaa voi esiintyä. Tällaisia kohtia ovat esimerkiksi
siltojen päädyt, missä sillan jäykkä rakenne ei anna radan painua miltei yhtään verrattuna
sitä edeltävään maanvaraisesti tuettuun rataan.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, minkälainen vaikutus siirtymärakenteilla on rauta-
teiden laatuun ja kestävyYTEEN, erityisesti liikkuvan kaluston nopeuden lisääntyessä. Toi-
nen tavoitteista on myös koota kotimaisista sekä ulkomaisista kirjallisuuslähteistä tiivis
alustus siirtymärakenteiden ominaisuuksista ja vaikutuksista radan kuntoon, sillä varsin-
kin kotimaisen aineiston määrä aiheesta on niukkaa.

Työssä käydään läpi radan rakenne sekä epäjatkuvuuskohtien aiheuttamat haittavaiku-
tukset rakenteisiin. Tämän lisäksi käydään läpi, kuinka nämä haittavaikutukset lisäävät
turvallisuusriskejä, epämukavuutta sekä korjauskustannuksia rautateillä. Selvitettävänä
on myös siirtymärakenteiden toiminnalliset perusteet. Sen lisäksi esitellään tarkempia
esimerkkejä siirtymärakenteiden mitoituksista ja siitä, kuinka nopeuksien lisääminen vai-
kuttaa rasitukseen ja täten siirtymärakenteiden mitoitukseen.

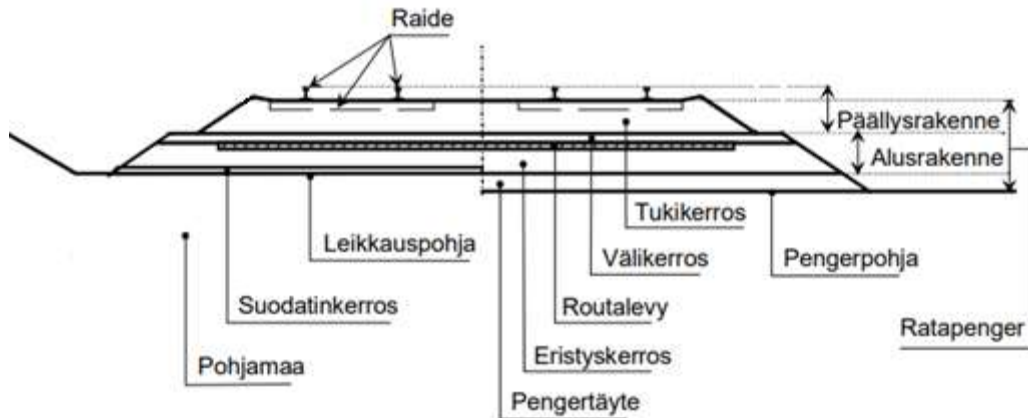
2. RADAN TASAISUUS JA EPÄJATKUVUUS-KOHDAT

Rautateiden tehokkuus perustuu kiskon ja teräspyörän väliseen alhaiseen vierintävas-tukseen, joka mahdollistaa suurien massojen kuljettamisen suhteellisen pienitehoisella vetokalustolla. Suurien painojen sekä nopeuksien takia radalle syntyvät kuormat ovat suuria ja radan tulee olla hyvin tuettuna, jotta se pysyy omassa asemassaan. Toinen vaikuttava tekijä on ympäristön aiheuttama rasitus, kuten routiminen. Näiden haasteiden vuoksi radan rakenne tulee suunnitella ja toteuttaa tarkasti. Tässä luvussa käsitellään radan rakennetta ja sen epäjatkuvuuskohtiin syntyviä epätasaisuuksia, joita siirtymära-kenteilla pyritään ennaltaehkäisemään.

2.1 Radan rakenne

Liikkuvan kaluston käyttämä raide koostuu kiskoista, niitä yhdistävästä osista, kuten ra-tapölkkyistä ja kiskonkiinnityksistä, sekä muista erikoisrakenteista, kuten vaihteista. Raide voi olla joko maanvaraisesti tuettu, jolloin maan päälle rakennetaan ratapenger sisältäen eri rakennekerroksia, tai se voi olla tuettu muulla tavalla, esimerkiksi sillalla, jolloin ra-kennekerroksia ei välttämättä ole laisinkaan. Kuvassa 2 on esitetty poikkileikkaus tyypil-lisestä radan rakenteesta ja siihen on merkitty eri rakenneosien nimityksiä. Liikennevi-rasto (2018, s. 6–8) määrittelee radan rakenneosia seuraavanlaisesti:

- Tukikerroksen tehtävä on pitää raide asemassaan ja jakaa kuormia alemmille kerroksille.
- Välikerros luo tukikerrokselle tasaisen alustan ja estää tukikerroksen kiviainek-sen sekoittumisen alempiin kerroksiin.
- Eristyskerros jakaa koko rakenteen kuormat pohjamaalle sekä eristää pohja-maata vähentäen sen routimista ja myös estää veden kapillaarisen nousun.
- Ratapenger on rakennekerrokset ja pengertäytteen käsittävä kokonaisuus.
- Pohjamaa on maa heti ratapenkereen alla.
- Päällysrakenne on tukikerroksen ja raiteen sisältävä osuus ratapenkereestä.
- Alusrakenne on tuki-, väli- sekä eristyskerroksen sisältävä osuus ratapenke-reestä.



Kuva 2. Radan rakenteeseen liittyviä nimityksiä. Kuva muokattu lähteestä (*Liikennevirasto 2018, s. 8*).

2.2 Radan tasaisuuden mittaaminen

Liikenne ja ympäristökijät kuormittavat radan rakenteita, mikä johtaa siihen, että rata siirtyy alkuperäisestä asemastaan. On olemassa tapoja seurata radan aseman poikkeamia, joiden avulla pystytään löytämään ongelmakohdat, mikä taas antaa mahdollisuuden korjata vaaralliseksi muodostuneet kohdat tai antaa mahdollisuuden ennaltaehkäistä poikkeamien pahenemisen näissä kohdissa. Pystysuuntaisia poikkeamia voi syntyä radan epätasaisesta painumasta, jolloin radan rakenne ja sen alla oleva pohjamaa painuu epätasaisesti. Toinen pystysuuntainen siirtymä on taipuma, jota kutsutaan myös palautuvaksi painumaksi. Palautuva painuma esiintyy radassa vain silloin kun rataa kuormitetaan, eli liikkuvan kaluston kulkiessa sen yli. Tässä työssä käsiteltävissä epäjatkuuskohdissa esiintyy usein sekä pysyvää että palautuvaa painumaa. Suomen rataverkolla operoi radantarkastusvaunu MEERI, joka suorittaa radan kunnan tarkastusta, käymällä koko rataverkon läpi useasti vuodessa. Vaunu mittaa useita asioita radasta, joista yksi on radan geometria. (Väylävirasto 2021a)

Suomessa on myös käytössä yksinomaan radan palautuvaa painumaa mittaava laitteisto, joka on Suomessa kehitetty, sillä muut samankaltaiset mittalaitteet ovat suunniteltu eri raideleveyksille. Luomala et al. (2015, s. 12–17) esittelevät tämän Suomessa toimineen mittalaitteiston toimintaperiaatteen ja mittaustuloksia. Mittalaitteiston idea perustuu siihen, että rataa kuormittaa tässä tapauksessa veturi, jonka akselipaino tunnetaan. Täten tiedetään, kuinka suuri voima rataan kohdistuu, ja syntyvä palautuva painuma siis määräytyy tämän kuormituksen takia. Mittalaitteiston yksi pääty on kiinni veturin akselissa, jonka kohdalla palautuvaa painumaa mitataan. Veturi vetää mittalaitteistoa,

jonka paino on melko pieni, mikä tarkoittaa, että mittalaitteiston toinen pääty ei aiheuta merkittävää palautuvaa painumaa, ja täten eri päätyjen painumaero kertoo, paljonko rata painuu kuormitetulta kohdalta. (Luomala et al. 2015, s. 12–17)

2.3 Epäjatkuvuuskohtat

Kuten todettua, radan rakenteen äkkinäinen muuttuminen synnyttää epäjatkuvuuskohtia. Tyypillisiä epäjatkuvuuskohtien esiintymispaikkoja ovat sillat, joissa maanvaraisesti tuettu rata vaihtuu sillalla tuettuun rataan. Muita ongelmakohtia voivat olla esimerkiksi kallioleikkaukset tai tunnelit, joissa kallion pinta ei painu verrattuna maaperään, sekä laatalle perustetut raiteet ja erikoisrakenteet, kuten vaihteet.

Epäjatkuvuuskohtissa ratojen huoltotarpeet ilmaantuvat selkeästi useammin, sillä rasi-
tukset raidekomponentteihin sekä rakennekerrokseen kasvavat. Fortunato et al. (2013, s. 2) mainitsevat, että espanjalaisella suurnopeusradalla siltojen ja rumpujen siirtymäkohdissa huoltotarve saattoi olla 3–6-kertainen verrattuna normaaliin rataosuuteen. Samalla korjauskustannukset siirtymäkohdissa voivat olla kaksinkertaisesti kalliimpia niiden vaikean korjattavuuden takia. Esimerkiksi siltoihin tuettujen raiteiden nostaminen on rajoitettua, jottei raiteen kiinnitys vaurioitu. (Fortunato et al. 2013, s. 2)

2.4 Pystysuuntaiset poikkeamat epäjatkuvuuskohtissa

Kuten alaluvussa 2.2 mainittiin voi pystysuuntaisia poikkeamia olla radassa joko pysyvän painuman muodossa tai palautuvan painuman muodossa. Epäjatkuvuuskohtissa tapahtuu usein aluksi epätasaista painumaa, jossa esimerkkinä maanvaraisesti tuettu rata painuu ajan kuluessa ja kuormitusten takia huomattavasti enemmän kuin jäykempi sillalle perustettu rata. Sen lisäksi epäjatkuvuuskohtaan voi syntyä palautuvaa painumaa, osittain juuri epätasaisen painuman ansiosta ja osittain jäykkyseron ansiosta. (TTCI 2006, s. 4–5) Kuvassa 3 on vakava tapaus sillapäättyyn syntyneestä pystysuuntaisesta poikkeamasta, jossa ratapölkkyjen alapuolinen tukikerros on syrjäytynyt niin paljon, että ratapölkkyt ja kisko todennäköisesti roikkuvat tai ovat huonosti tuettu.

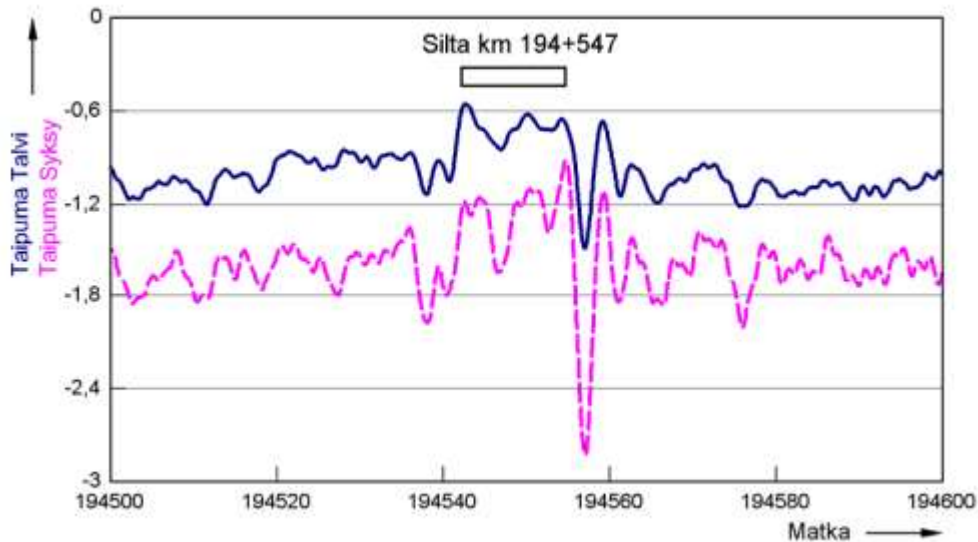


Kuva 3. Esimerkki epäjatkuvuuskohdan aiheuttamasta pystysuuntaisesta poikkeamasta radalla (Li et al. 2016, s. 124).

Pohjamaalla on suuri vaikutus palautuvan painuman syntymiseen epäjatkuvuuskohdissa, sillä sen jäykkyys tulee maakerroksista, joiden ominaisuudet ja täten myös jäykkyydet vaihtelevat huomattavasti enemmän kuin homogeenisemmällä ratapenkereellä. Luomala ja Nurmikolu (2012) osoittavat, että jokia ylittävien siltojen siirtymäkohdilla, joissa jokea ympäröivä maa on yleensä pehmeää savea, oli tapahtunut suurempia painumia kuin alikulkusilloilla, joissa maaperä on yleensä jäykempää. Tuloksiin vaikuttivat kuitenkin myös se, että jokia ylittävät sillat olivat jäykemmin tuettuja ja raide oli kiinnitetty suoraan siltaan, kun taas alikulkusilloilla raide oli tukikerroksen päällä. Tukikerros alikulkusiltojen päällä vähensi siis jäykkyyseroa.

Luomala et al. (2015) ovat käsitelleet alaluvussa 2.2 käydyn mittalaitteiston tekemiä taipumamittauksia Lielähti–Ylöjärvi-rataosuudelta. Mittaukset tehtiin sekä talvella että syksyllä, jolloin roudan vaikutus painumiin tuli myös huomioitua. Erityistä huomiota kiinnitettiin osuuksiin radassa, jossa erilaiset rakennemuutokset, kuten rummut ja sillat, mahdollisesti olisivat aiheuttaneet ongelmia radan tasaisuuteen jäykkyyserojen vuoksi. Tuloksista huomattiin, että esimerkiksi yhdellä sillalla esiintyi huomattavia eroja painumissa ympäröivän radan, sillan päätyjen ja itse sillan kohdalla. Kuten kuvasta 4 huomataan, ovat painumat sillan kohdalla pienempiä kuin ympäröivällä radalla, ja sillan päätyjen kohdalla ilmaantuu selkeät vajoamat, jotka todennäköisesti johtuvat sillan ja ympäröivän radan jäykkyyksien äkkinäisestä muutoksesta. Tuloksista huomattiin myös, että syksyn ja

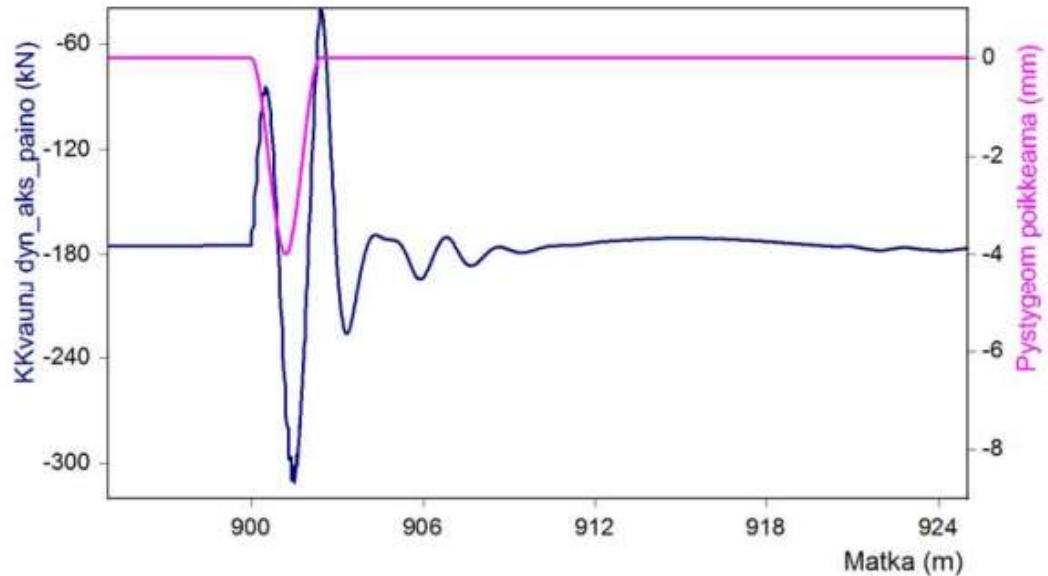
talven mittauksissa radan painumassa on noin 0,6 mm ero, mikä todennäköisesti johtuu siitä, että routa jäykistää radan rakennetta. Erot sillan päätyjen kohdalla eivät myöskään olleet talven mittauksessa yhtä suuria kuin syksyn mittauksessa, mikä kertoo, että epä-jatkuvuuskohtien painumiin vaikuttavat myös maakerrokset, joissa routa pääsee vaikuttamaan. (Luomala et al. 2015)



Kuva 4. Palautuvan painuman mittaustulokset sekä talvi- että syysmittauksesta Epilänharjun alikäytävän kohdalta. Matkan yksikkönä metri ja taipuman yksikkönä millimetri. (Luomala et al. 2015, s. 35)

2.5 Pystysuuntaisten poikkeamien vaikutus rasitukseen

Kuula et al. (2017, s. 32) osoittaa että pienelläkin korkeuspoikkeamalla poikkeamalla on suuri vaikutus rataan vaikuttavalla kuormalla kuopan aiheuttaman kiihtyvyyden takia. Tulokset saatiin mallintaohjelmalla, jossa tarkasteltava nopeus oli 200 km/h ja radassa olevaa korkeuspoikkeamaa voitiin vaihdella. Kuvasta 5 nähdään, että neljän millimetrin korkeuspoikkeama 2,4 metrin välillä aiheutti 175 kN kuormaan korkeimmillaan yli 125 kN suuruisen lisäyksen ja yli 115 kN vähennyksen. Kuormituksen epätasaisuus myös jatkui yli 24 metrin pituiselle alueelle.



Kuva 5. 4 mm korkeuspoikkeaman vaikutus rataan kohdistuvaan kuormitukseen kilonewtoneina (Kuula et al. 2017, s. 32).

Tämä kuorman lisääntyminen johtuu siitä, että äkkinäinen korkeusero aiheuttaa liikkuvan kaluston massaansa pystysuuntaisen kiihtyvyyden, joka puolestaan lisää rataa kohdistuvaa kuormitusta. Kuormitusten aiheuttamat rasitukset vaikuttavat kuitenkin rataa eri tavoin, riippuen mistä suunnasta epäjatkuvuuskohtaa lähestytään. Jos kalusto liikkuu jäykemmältä osuudelta pehmeämmälle osuudelle, on tuloksena useammin radan geometrian huonontuminen, eli pystysuuntaiset poikkeamat ja raideseppelin sekä ratapölkkyjen liikkuminen. Kun liikkuva kalusto taas lähestyy pehmeämmältä puolelta jäykemmälle puolelle liittyvät vauriot usein päällysrakenteen rikkoutumiseen iskumaisen rasituksen takia. (TTCI 2006, s.4–5)

On tärkeää kuitenkin huomioida, että radan tarkastelu kaksiulotteisesti ja yksinkertaisella kuormalla ei välttämättä luo realistista kuvaa siitä, kuinka junan aiheuttama kuormitus oikeasti vaikuttaa radan rakenteeseen. Kuten Asghari et al. (2021) toteaa, tulee simuloinnissa tutkia rakennetta kolmiulotteisesti ja junan aiheuttamia kuormia monipuolisemmin kuin vain pysyvänä kuormana. Tämä johtuu siitä, että vaunujen ja vetureiden aiheuttamiin kuormiin vaikuttaa niiden sisältämä jousitus, joka tekee kuormituksesta epätasaisemman, erityisesti kohdissa, missä pystysuuntaiset vaihtelut ovat nopeita. Realistisempiin tuloksiin päästään erilaisilla kolmiulotteisilla elementtimenetelmillä. (Asghari et al. 2021)

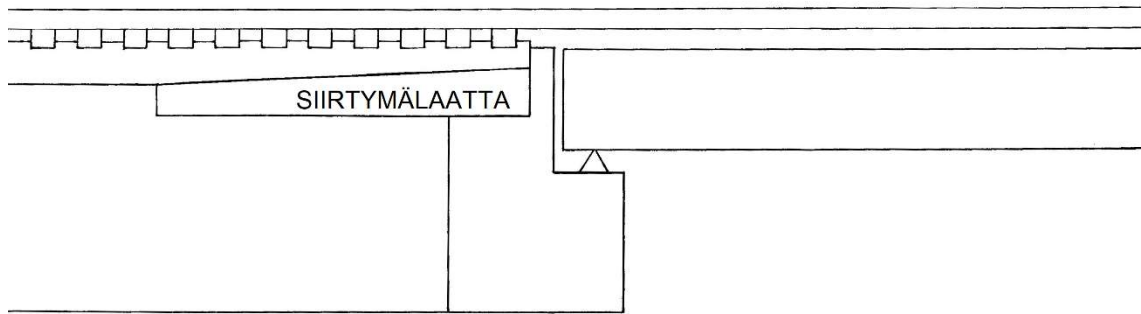
3. SIIRTYMÄRAKENTEIDEN PERUSTEET

Edellä mainittujen radan epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia ongelmia varten on kehitelty sekä ennaltaehkäiseviä ratkaisuja että korjaustoimenpiteitä. Tässä kappaleessa käsitellään ongelmaa ennaltaehkäiseviä siirtymärakenteita, eli radan siirtymäkohtiin kehitettyjä ratkaisuja, joiden tehtävänä on vähentää jäykkyyseroa tai mulla tavalla vähentää epäjatkuvuuskohtien haittavaikutuksia radan rakenteen toimintaan. Jäykkyyseroja voidaan lievittää esimerkiksi vähitellen jäykentämällä radan rakennetta pehmeällä osuudella tai vähentämällä rakenteen jäykkyyttä jäykemmällä osuuksilla kuten silloilla. (Setsobhonkul et al. 2017)

3.1 Siirtymärakennetyyppejä

Siirtymärakennevaihtoehtoja on monia ja niitä voidaan hyödyntää yhtäaikaisesti. Siirtymärakenteiden valinta tulisi olla tapauskohtaista. Valinnassa pitäisi huomioida kyseisen epäjatkuvuuskohdan ominaisuuksia, kuten pohjamaan painumaominaisuudet ja jäykkyysero epäjatkuvuuskohdan eri puolien välillä. Toinen tärkeä asia ottaa huomioon on radalla kulkevan liikenteen piirteet, kuten sen nopeus, akselipaino ja liikennemäärä. Näillä arvoilla on vaikutusta rataa kohdistuvaan rasitukseen ja täten myös siirtymärakennetarpeeseen. Esimerkkinä sillat voivat olla rakennettu tukikerroksen kanssa tai ilman, jolloin jäykkyyserossa on huomattava ero ja siltaan tuetun radan asemaa on vaikeampi korjata mahdollisten painumien esiintyessä, joka tarkoittaa, että siltaan tuetun radan siirtymärakennetarvetta tulisi tutkia huolellisemmin. (Asp 2011, s. 113)

Yksi yleinen maanvaraisesti perustetulle radan puolelle rakennettava siirtymärakenne on siirtymälaatta, joka on esitetty kuvassa 6. Se rakennetaan kohtaan juuri ennen epäjatkuvuuskohtaa, eli esimerkiksi siltojen tapauksissa se on tuettu siltaan ja ulottuu siitä pois päin. Ne ovat raudoitettuja, betonista valettuja laattoja ja ne rakennetaan radan alusrakennekerrokseen. Laatta valetaan usein kaltevana tai kiilamaisena, jotta jäykkyydenmuutos tapahtuisi vähitellen. (Setsobhonkul et al. 2017) Suomen rautateille on rakennettu siirtymälaattoja, joita on käytetty betonirakenteisten siltojen yhteydessä ja vanhempien saneerattujen teräsrakenteisten siltojen yhteydessä. Nämä siirtymälaatat ovat pituudeltaan 5 metriä sekä leveydeltään metrin ja ne rakennetaan radan välikerrokseen (Asp 2011, s. 111).



Kuva 6. Periaatekuva kiilamaisesta siirtymälaatasta sillanpäädyssä.

Kiskoja ja ratapölkkyjä voidaan myös hyödyntää jäykkyyseron loiventamiseksi. Ratapölkkyjä voidaan pidentää pehmeältä puolelta rataa, vähitellen lisäämällä pölkkyjen pituutta, jotta jäykkyysero loiventuu osittain. Pölkkyjen välistä etäisyyttä voidaan myös tihentää. (TTCI 2006, s. 8–9) Pölkkyjen materiaalilla voidaan myös vähentää radan jäykkyyttä jäykemmältä osuudelta. Komposiittinen ratapölkky on osoittanut testeissä hyväksi jäykkyyden tasoittajaksi, melkein tehden jäykkyyksistä yhtä suuret maanvaraisesti ja sillalle perustetulla radalla. (TTCI 2006, s. 14–15) Kiskoja voidaan hyödyntää lisäämällä niitä suojakiskoja tapaan varsinaisten ajokiskoja väliin. Silloille asennettavia suojakiskoja voidaan myös pidentää, jotta ne ulottuvat pidemmälle siltojen päädyistä. Tämä jäykentää siltojen päätyjä ja jakaa kuormia suuremmalle alueelle sekä ehkäisee kiskoja pituus-suuntaisten jännitysten aiheuttamaa nurjahdusta, jos rata pääsee roikkumaan tukikerroksesta. (Asp 2011, s. 109–110)

Edellä mainitun komposiittipölkyn lisäksi radan jäykkyyttä voidaan vähentää erilaisilla kumimatoilla ja joustavilla kiskonkiinnittimillä. Samassa testissä mikä tehtiin komposiittipölkkyillä, saatiin betonisten ratapölkkyjen alle asennetuilla kumipohjaimilla sillan puolinen jäykkyys jopa pienemmäksi kuin siltapäädyn jäykkyys. Näiden pohjainten käyttöä on hyödynnetty myös estämään raideseppelin murskautumista. (TTCI 2006, s.14–15) Ruotsissa sijaitseva Malmö-tunnel on esimerkki kohteesta, missä on käytetty montaa ratkaisua jäykkyydenmuutoksen loiventamiseen. Tunnelien tapauksissa jäykkyydenmuutos johtuu louhitun tunnelin kallioperän liikkumattomuudesta. Ratkaisuna tunnelin suuaukon pohjamaata on vahvistettu geotekstiileillä ja geoverkoilla sekä pohjamaa on hyvin tiivistetty 10 metrin pituiselta matkalta. Tunnelin puolella kiskonkiinnitykset vaihtuvat jäykemmiksi kolmesti 40 metrin välein, täten muutosta saadaan loivennettua. Siirtymärakenteilla varustettu alue radasta on siis yhteensä noin 90 metriä pitkä. (Asp 2011, s. 112)

3.2 Vaikutus pystysuuntaisiin poikkeamiin

TTCI:n (2006) tekemässä artikkelissa käydään läpi eri siirtymärakenteiden vaikutuksia rataan, joita tutkittiin GEOTRACK nimisellä simulointiohjelmalla. Rakenteiden vaikutuksista tutkittiin muun muassa kiskon taipuma, ratamoduuli ja tukirakenteen sekä alusrakenteen jännitystila. Kuvan 7 taulukossa on esitetty eri suuruisten akselikuormien vaikutuksia eri jäykkyyksien pohjamaille perustetuille radoille ilman minkäänlaisia siirtymärakenteita. Akselikuorman yksikkönä on käytetty kipsiä, jotka voidaan muuttaa kilonewtoneiksi, kertomalla arvo kertoimella 4,448. Täten esimerkiksi 12 kipsiä voidaan ilmaista noin 53 kN:na. Pohjamaiden kimmomoduuli E_r on ilmaistu yksikössä ksi, joka voidaan muuttaa megapascaliksi kertomalla 6,895. Jännitystilaa kuvaava psi saadaan muutettua kilopascaliksi samalla kertoimella. Taipuman (Rail Deflection) yksikkönä on käytetty tuumia, jotka voidaan muuttaa millimetreiksi kertomalla 25,4. Taulukossa on myös tulokset erikseen betoni- ja puuratapölkyille. Taulukon tulokset eivät ole erityisen yllättäviä, mutta ne toimivat vertauksena siirtymärakenteellisten ratojen tuloksille.

		Concrete Ties			Wood Ties		
		12 kips	15 kips	22.5 kips	12 kips	15 kips	22.5 kips
High-Stiffness Subgrade $E_r = 20$ ksi	Rail Deflection (in)	0.021	0.027	0.040	0.026	0.032	0.048
	Modulus (lb/in/in)	9,236	9,236	9,236	7,269	7,269	7,269
	Ballast Stress (psi)	16.9	21.1	31.6	14.4	18.0	26.9
	Subgrade Stress (psi)	3.7	4.6	7.0	3.6	4.5	6.8
Average-Stiffness Subgrade $E_r = 10$ ksi	Rail Deflection (in)	0.030	0.038	0.057	0.033	0.042	0.063
	Modulus (lb/in/in)	5,757	5,757	5,757	5,100	5,100	5,100
	Ballast Stress (psi)	15.8	19.8	29.6	13.9	17.4	26.1
	Subgrade Stress (psi)	3.3	4.2	6.2	3.4	4.2	6.3
Low-Stiffness Subgrade $E_r = 2$ ksi	Rail Deflection (in)	0.091	0.114	0.170	0.096	0.120	0.180
	Modulus (lb/in/in)	1,336	1,336	1,336	1,249	1,249	1,249
	Ballast Stress (psi)	20.0	25.0	37.6	11.4	14.3	21.4
	Subgrade Stress (psi)	1.9	2.4	3.6	2.0	2.5	3.8

Kuva 7. Simuloinnin tulokset eri jäykkyyksien pohjarakenteille ja eri pölkyille, ilman laat-
taa. (TTCI 2006, s. 18).

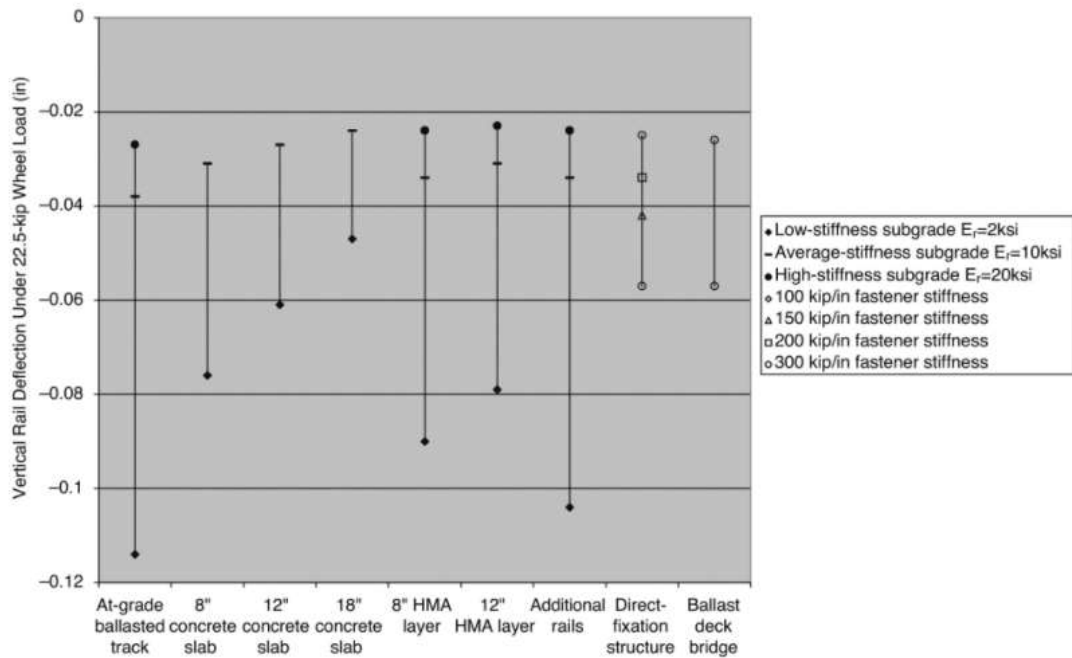
Simuloinnissa noin 6 metriä pitkä siirtymälaatta asetettiin suoraan radan tukikerroksen alle. Siirtymälaatan vaikutuksia ei kokeiltu pohjamaassa, jossa oli korkea jäykkyys, sillä se olisi tarkoittanut liian suurta ratamoduulia. Eri paksuisia laattoja myös kokeiltiin. Kuvan 8 taulukossa on esitetty eri paksuisten siirtymälaattojen vaikutus radan käyttäytymiseen betonipölkkyraiteella. Tuloksista huomataan, että siirtymälaatalta on huomattava vaikutus taipumaan sekä ratamoduuliin. Esimerkiksi 53 kN:n (12 kips) akselikuormalla 8 tuuman paksuinen laatta taipuu keskiverto jäykkyyden pohjamaan radalla noin 0,127 millimetriä vähemmän kuin ilman siirtymälaattaa. Tämä on noin 17 prosenttia pienempi tulos.

Matalan jäykkyyden pohjamaassa tulos on kuitenkin vielä huomattavampi 0,762 millimetriä, joka on noin 33 prosenttia pienempi tulos. Kun 12 tuuman laattaan lisätään 6 tuumaa paksuutta ei taipuma kuitenkaan vähene enemmän kuin kun 8 tuuman laattaan lisätään 4 tuumaa paksuutta.

		8-in Slab			12-in Slab			18-in Slab		
		12 kips	15 kips	22.5 kips	12 kips	15 kips	22.5 kips	12 kips	15 kips	22.5 kips
Average-Stiffness	Rail Deflection (in)	0.025	0.031	0.046	0.022	0.027	0.041	0.019	0.024	0.036
	Modulus (lb/in/in)	7,622	7,622	7,622	8,896	8,896	8,896	10,759	10,759	10,759
Subgrade	Ballast Stress (psi)	17.3	21.7	32.5	18.4	23.0	34.6	14.0	17.5	26.3
	Subgrade Stress (psi)	1.3	1.6	2.7	0.9	1.1	1.6	0.6	0.7	1.0
Low-Stiffness	Rail Deflection (in)	0.061	0.076	0.114	0.049	0.061	0.091	0.037	0.047	0.070
	Modulus (lb/in/in)	2,288	2,288	2,288	3,085	3,085	3,085	4,404	4,404	4,404
Subgrade	Ballast Stress (psi)	16.8	2.1	27.4	18.6	23.2	34.8	13.8	17.3	24.9
	Subgrade Stress (psi)	0.7	0.8	1.3	0.4	0.5	0.8	0.2	0.3	0.5

Kuva 8. Simuloinnin tulokset eri paksuisille laatoille betonisilla ratapölkyillä eri akselikuormilla (TTCI 2006, s.24).

Myös muiden siirtymärakenteiden vaikutuksia rataa simuloitiin. Kuvassa 9 on esitetty kuvaajia eri siirtymärakenteiden vaikutuksista radan taipumaan eri jäykkyyksien pohjamaissa noin 100 kN:n (22,5 kips) akselikuormituksella. Siirtymälaattojen lisäksi kuvaajia löytyy radoista, joihin on lisätty asfaltoitu kerros (HMA eli Hot Mix Asphalt). 8 tuuman kerros vaikuttaa tehokkaalta ratkaisulta matalan ja keskivero jäykkien pohjamaiden tapauksessa. 12 tuumainen kerros myös toimii matalan ja keskivero jäykkyyden pohjamaissa, mutta ei vähennä taipumaa erityisesti korkean jäykkyyden pohjamaassa, 8 tuuman kerrokseen verrattuna. Lisäraiteet vähentävät taipumaa vain hieman kaikissa tapauksissa. Kaksi oikeanpuoleisinta kuvaajaa näyttävät tuloksia taipumista kiintoraiteilla (Direct fixation structure) ja tukikerroksellisen sillan radalla (Ballast deck bridge) eri jäykkyyksillä kiskokiinnityksillä.



Kuva 9. Taipuma arvoja siirtymärakennetyyppiakohtaisesti 22,5 kips akselikuormalla ja betonisilla ratapölkkyillä (TTCI 2006, s. 32).

3.3 Siirtymärakenteiden suunnittelu

Jokaista epäjatkuvuuskohtaa olisi hyvä tarkastella yksittäisenä tapauksena. Niihin vaikuttavat jäykkyyseron lisäksi myös pohjamaaolosuhteet kuten routivuus ja painumaominaisuudet, kuten alaluvussa 2.4 todettiin. Liian tarkka kohteen tutkiminen kuitenkin johtaisi liian suuriin kustannuksiin, joten on tehtävä joitain yleistyksiä ja olettamuksia suuri- ja keskisuuriteisten tietojen perusteella. Liikennevirasto (2018, s. 18) määrittelee enimmäisarvot pituuskaltevuudenmuutoksille eri radan alusrakenneluokille. Korkeimman luokan eli luokan 4 pituuskaltevuudenmuutos saa olla enintään 0,1 % ensimmäisen kahden vuoden sekä 2–9 vuoden aikana. (Liikennevirasto 2018, s. 18)

Alaluvussa 3.2 huomattiin, että siirtymälaatan paksuuden lisääminen johtaa pienempiin taipumiin ja suurempiin jäykkyyksiin. Paksuuden lisääminen kuitenkin jossain vaiheessa ei enää ole suotavaa sillä se lisää kustannuksia ja ei tuota yhtä suurta parannusta tietyn paksuuden jälkeen. Samanlainen päätelmä tuli Asghari et al. (2021) suorittamasta simulaatiosta, jossa käytettiin kolmiulotteista elementtimenetelmää. Simuloitu juna kulki 250 km/h nopeudella eri paksuisten siirtymälaattojen yli. Tuloksena 50 cm ja 70 cm laatat vähensivät taipumaa 29 % ja 38 % verrattuna 30 cm laattaan. Samassa simuloinnissa kokeiltiin myös laatan pituuden lisäämisen vaikutusta. Tuloksista tuli ilmi, että pituuden

lisääminen aiheuttaa pienen taipuma lisäyksen kohdassa, missä laatta loppuu, mutta taipuman suureneminen tapahtuu paljon loivemmin. (Asghari et al. 2021) Asp (2011, s. 111) myös mainitsee, että laatan pituuden lisääminen johtaa hyvin paksuun laattaan, sillä kuormanjakautumiskyvyn varmistamiseksi laatan jäykkyyttä, eli mahdollisesti pak-suutta tulisi lisätä. Samalla mainitaan, että yksittäisiä osista koostuvien siirtymälaattojen epätasaista painumaa voitaisiin ehkäistä yhdistämällä ne terästuenalla. (Asp 2011, s. 111)

4. NOPEUDEN KASVATTAMISEN VAIKUTUS

Nopeuksien lisääminen raideliikenteessä on aina sen alkuajoista asti ollut tavoitteena liikenteen tehokkuuden parantamiseksi. Nykyään nopeuksien lisäämisellä tavoitellaan muun muassa parempaa kilpailukykyä lentoliikenteen kanssa. Raideliikennettä mainostetaan tulevaisuuden kulkumuotona sen matalampien päästöjen takia. Nopeuden lisääminen tuo luonnollisesti kuitenkin myös omat haasteensa ratojen suunnitteluun ja rakentamiseen. Tässä luvussa tarkastellaan raideliikenteen nopeuden kasvattamisen vaikutus epäjatkuvuuskohdissa syntyviin epätasaisuuksiin ja miten lisääntyvät rasitukset tulisi huomioida siirtymärakenteiden suunnittelussa.

4.1 Suurnopeusrata

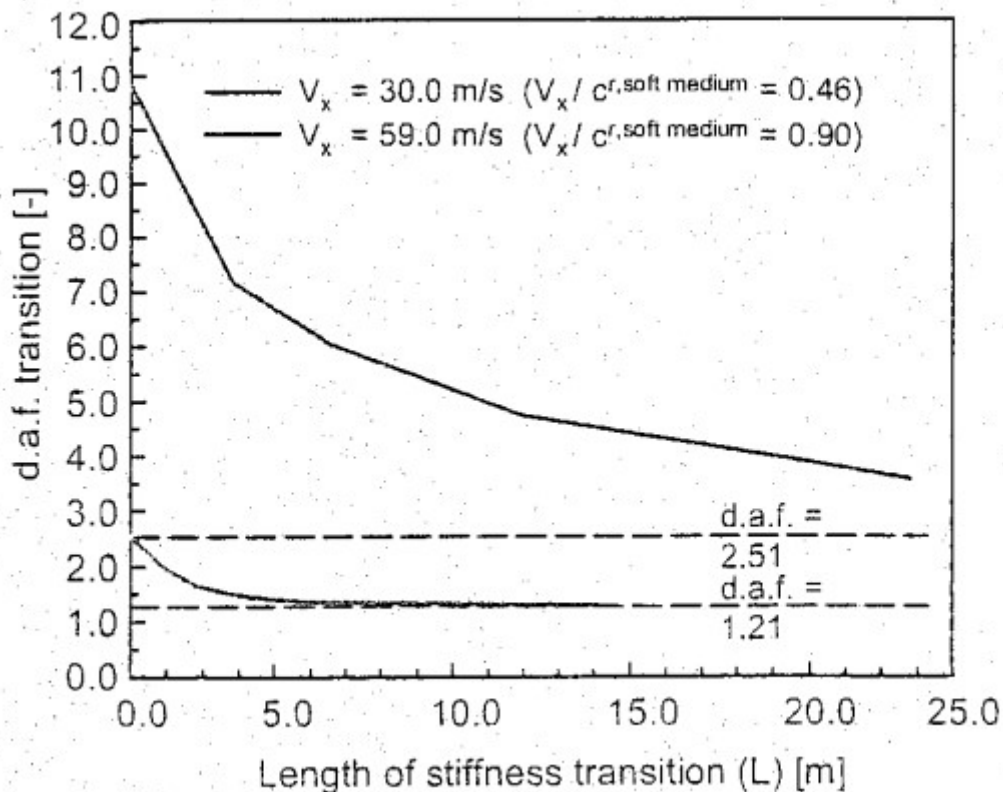
Kansainvälisen rautatieliiton (UIC) mukaan suurnopeusradaksi luokitellaan uudet radat, joissa päästään liikennöimään vähintään 250 km/h nopeuksilla ja vanhat saneeratut radat, joissa päästään liikennöimään vähintään 200 km/h nopeuksilla. Suurnopeusradoilla myös oletetaan esiintyvän teknisesti korkeampitasoista infrastruktuuria, suurnopeusjunien lisäksi tämä voi tarkoittaa parempia turvalaitteita, viestintää ja radan rakenteen komponentteja. Vuosittain jo yli kolme miljardia matkustajaa kulkee suurnopeusradoilla maailmanlaajuisesti. Ratojen yhteenlaskettu pituus on melkein 56 000 km ja tämän luvun arvellaan kaksinkertaistuvan seuraavan 30 vuoden aikana. (UIC 2021a)

Suomessa on yhteensä 1 120 kilometriä rataosuutta, jotka täyttävät nämä vaatimukset (UIC 2021b). Nämä osuudet ovat kuitenkin vanhoja rataosuuksia, joita on päivitetty, sillä henkilöjunien suurin sallittu nopeus on tällä hetkellä 220 km/h (Väylävirasto 2021b). Yleissuunnitelmavaiheessa oleva uusi ratayhteys Espoosta Saloon, joka on osa nopeampaa yhteyttä Helsingistä Turkuun, voisi mahdollisesti sisältää osuuksia, joissa päästään kulkemaan 250 km/h nopeuksilla. Tämä uusi rata sisältää arviolta 21 uutta tunnelia, sekä noin 120 uutta siltaa. (Salo et al. 2018) Epäjatkuvuuskohdat siltojen ja tunnelien kohdilla tulee huomioida entistä tarkemmin, jos tavoitteena on Suomen ensimmäinen alusta asti suurnopeusradaksi suunniteltu ratayhteys.

4.2 Nopeuden vaikutus rasituksiin

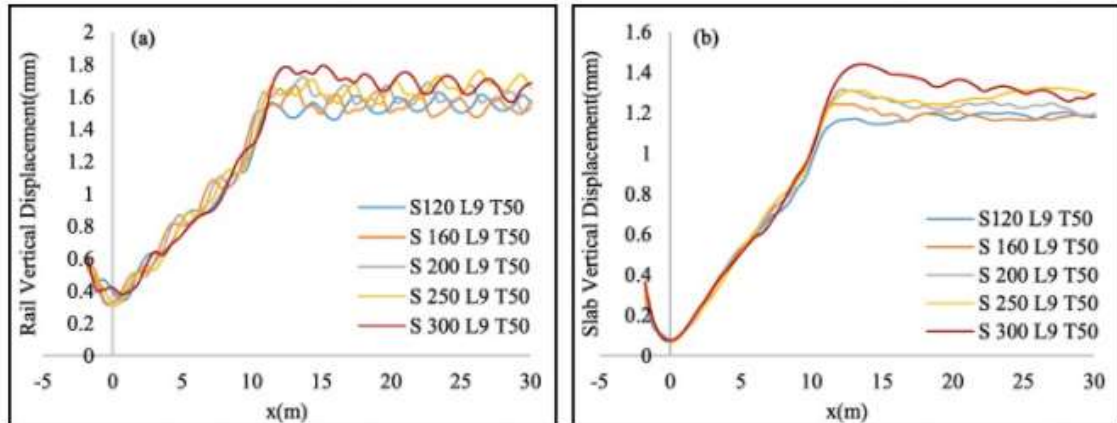
Nopeuden lisääminen vaikuttaa liikkuvan kaluston raiteeseen kohdistaman dynaamisen kuorman suuruuteen. Koska dynaamisen kuorman määrittäminen on monimutkaista, on

sen vaikutuksia varten kehitetty dynaaminen suurennuskerroin, jolla staattinen akseli-kuorma voidaan kertoa, antaen tulokseksi kuorman, joka kuvaa liikkeessä olevan junan aiheuttamaa kuormitusta. Tämä suurennuskerroin tunnetaan myös nimellä sysäyskerroin tai sysäyslisä. (Asp 2011, s. 95) Suuri sysäyskerroin aiheuttaa suurempia kuormia ja täten lisää siirtymäkohdan epätasaisia muodonmuutoksia (Asp 2011, s. 110). Esveld (2001, s. 169–170) käy läpi tilanteen, jossa on laskettu liikkuvan junan vaikutuksia siirtymävyöhykkeeseen, jossa kuljetaan pehmeältä savelta jäykemmälle hiekalle. Tilanteesta laskettiin sysäyskerroimia (d.a.f. – dynamic amplification factor) kahdella eri nopeudella kulkevasta junasta. Tulokset näkyvät kuvan 10 kuvaajassa. Tulokset osoittavat, että nopeuden kaksinkertaistaminen aiheuttaa suuren lisäyksen sysäyskerroimeen kaikilla siirtymän (Length of stiffness transition) pituuksilla. Esimerkiksi 5 metrin siirtymä saven ja hiekan välillä synnyttää 30 m/s nopeudella kulkevalla junalla sysäyskerroimeksi noin 1,22 suuruisen arvon, kun taas 59 m/s nopeudella arvo on noin 6,5. (Esveld 2001, s. 169–170)



Kuva 10. Kuvaajat 30 m/s ja 59 m/s nopeuksilla kulkevien junien aikaansaamista sysäyskerroimista eri siirtymärakenteen pituuksilla (Esveld 2001, s. 169).

Asghari et al. (2021) yhtenä tutkimuksena myös vertailtiin eri nopeuksien vaikutusta raataan, jossa oli 9 metriä pitkä ja 50 cm paksu siirtymälaatta. Laatan sekä raiteen taipumia (Vertical Displacement) on esitetty kuvan 11 kuvaajissa. Eri nopeudet, joita tutkittiin, olivat 120 km/h, 160 km/h, 200 km/h, 250 km/h ja 300 km/h. Tuloksista käy ilmi, että nopeuden lisäämisellä ei ole erityistä vaikutusta itse siirtymälaatan kohdalla, mutta sen jälkeen esimerkiksi 300 km/h nopeus tuottaa 25 % suuremmat muodonmuutokset verrattuna muodonmuutoksiin 120 km/h nopeudella. (Asghari et al. 2021)



Kuva 11. Nopeuksien vaikutus raiteen ja laatan taipumaan. (Asghari et al. 2021).

4.3 Nopeuden vaikutus siirtymärakenteiden suunnitteluun

Liikennevirasto (2021, s. 14) määrittää suurimmat sallitut dynaamiset pyöräkuormat. Sallitut kuormat pienenevät mitä suurempi nopeus on, eli radan epätasaisuuksista ja jäykkyyseroista aiheutuvat lisäkuormat tulisi minimoida entistä enemmän nopeuden kasvaessa. (Liikennevirasto 2021, s. 14) Asp (2011, s. 111) toteaa, että terässilloilla on historiallisesti riittänyt pelkkä massanvaihto ja tiivistys siltapäädissä, liian suurten epätasaisuuksien syntymisen ehkäisemiseksi. Syynä tähän on ollut matalammat nopeudet radalla. Nopeuksien kasvaessa kuitenkin pelkkä massanvaihto ja tiivistys ei ole riittänyt, ainakaan niillä pituuksilla millä maa-ainesta on tiivistetty. Erityisen tärkeää siis nopeuksien kasvaessa on muistaa tarpeeksi pitkä siirtymämatka pehmeämmästä alueesta jäykempään alueeseen. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi pelkkä siirtymälaatta voi olla riittämätön, koska sen pituus ei riitä siirtymän pidentämiseen ja siirtymä laatalta pehmeämmälle tai jäykemmälle osuudelle voi olla liian jyrkkä. (Asp 2011, s. 111)

Edellisen alaluvun kuvasta 10 nähdään, että siirtymän pituuden lisääminen aiheuttaa suuremman nopeuden (59 m/s) tapauksessa jyrkemman vähennyksen sysäyskertoi-
meen. Pituutta muuttamalla ei kuitenkaan päästä samoihin lukemiin kuin hitaammassa

tapauksessa, mutta se on ymmärrettävää nopeuseron ollessa näin suuri. Toisin sanoen siirtymän pidentäminen vähentää rasiusten suuruutta tehokkaammin suuremmilla nopeuksilla.

5. PÄÄTELMÄT

Yksi työn tavoitteista oli selvittää, miten radalla esiintyy epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia epätasaisuuksia ja näistä koituvia ongelmia. Selvisi, että kohdat missä tällaisia epätasaisuuksia usein esiintyy ovat esimerkiksi siltapäädtyt, kalliopoikkileikkaukset sekä tunnelit. Selvisi myös, että korjaustarve ja -kustannukset näissä kohdissa ovat todettu huomattavasti korkeammiksi muihin rataosuuksiin verrattuna. Epätasaisuuksien esiintymisen aiheuttaa äkillinen jäykkysero radassa, joka aiheuttaa epätasaisista painumaa ja täten lisää rasituksia syntyneen korkeuspoikkeaman takia. Ongelma on siis itseään pahentava.

Epätasaisuuksia vastaan kehiteltyjä siirtymärakenteita on monipuolisesti valittavissa. Niillä voidaan joko lisätä tai vähentää jäykkyyttä, mutta lopullinen tavoite on jäykkyydenmuutoksen muokkaaminen mahdollisimman pitkäksi. Jäykkyydenmuutoksen pidentäminen pidemmälle alueelle radasta onkin ehkä tärkein asia mitä siirtymärakenteissa tulisi parantaa. Suomessa on hyödynnetty enimmäkseen vain 5 metrisiä siirtymälaattoja, joka ei todennäköisesti ole riittävä pituus erityisesti, jos nopeuksia aiotaan nostaa uusilla ja saneeratuilla rataosuuksilla. Laatan pidentämiseen kuitenkin myös tuo esiin omat ongelmat, kuten kustannusten nousu, kun laatan paksuutta joudutaan myös kasvattaa kuormanjakautumiskyvyn varmistamiseksi (Asp 2011, s. 111). Monipuolisempi siirtymärakenteiden käyttö olisi siis suotavaa. Toinen asia mikä tulisi ottaa huomioon on se, että jokainen epäjatkuvuuskohta on yksilöllinen pohjaolosuhteiden kannalta ja ympäristön sekä liikenteen aiheuttaman rasituksen kannalta. Mitään yksittäistä halpaa ja hyvää ratkaisua, jota voitaisiin hyödyntää jokaisessa epäjatkuvuuskohdassa, ei todennäköisesti löydy.

Suurnopeusradat tulevat lisääntymään tulevaisuudessa maailmanlaajuisesti, mutta mahdollisesti myös Suomessa. Työn tärkeimpänä tavoitteena oli selvittää siirtymärakenteiden merkitys suurnopeusradoilla. Nopeuksien lisääminen lisää huomattavasti rataan kohdistuvaa rasitusta. Jännityslisäys huomataan erityisesti kohdissa missä epätasaisuudet aiheuttavat liikkuvaan kalustoon äkkinäisiä pystysuuntaisia liikkeitä. Näitä epätasaisuuksia voisi ennaltaehkäistä siirtymärakenteilla, mutta nopeuksien ollessa korkeammat, on varmistuttava siitä, että niiden pituus on riittävä. Jännityslisäyksen lisäksi nopeuksien kasvatus vaatii entistä enemmän, että rata pysyy oikeassa asemassaan ja täten entistä pidemmät siirtymärakenteet saattavat olla ainoa ratkaisu varmistaa, että vaatimukset täytetään.

LÄHTEET

- Asghari, K., Sotoudeh, S., & Zakeri, J.-A. (2021). Numerical evaluation of approach slab influence on transition zone behavior in high-speed railway track. *Transportation Geotechnics*.
- Asp, O. (2011). Tukikerroksettömien rautatiesiltakansien kehittäminen. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä.
- Fortunato, F., Paixão, A. & Calçada, R. (2013). Railway Track Transition Zones: Design, Construction, Monitoring and Numerical Modelling. *International Journal of Railway Technology*.
- Esveld, C. (2001). *Modern Railway Track*, MRT-Productions
- Kuula, P., Luomala, H.A., Pulkkinen, E. & Kolisoja, P. (2017). Tukikerroksen toiminnan kehittäminen. Liikennevirasto.
- Li, D., Hyslip, J., Sussmann, T. & Chrismer S. (2016). *Railway Geotechnics*. CRC Press, Boca Raton FL.
- Liikennevirasto (2018). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3: Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita, Helsinki.
- Luomala, H.A. & Nurmikolu A. (2012). Railway Track Stiffness Measurements on the Bridge Transition Zones. 2nd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG) International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- Luomala, H.A., Peltokangas, O., Rantala, T. & Nurmikolu, A. (2015). Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi. Liikennevirasto.
- Salo, M., Mäenpää, H. & Fagerholm, K. (2018). Espoo - Salo-oikoradan yleissuunnitelma. Väylävirasto. Päivitetty 10.10.2018. Saatavissa (viitattu 5.12.2021): https://vayla.fi/documents/25230764/35412622/ESA_Salon+infotilaisuus+10.10.2018.pdf/7db6ec53-e795-4e8f-9f52-e076811ea40b/ESA_Salon+infotilaisuus+10.10.2018.pdf?t=1539953625490
- Setsobhonkul, S., Kaewunruen, S. & Sussman, J.M. (2017). Lifecycle Assessments of Railway Bridge Transitions Exposed to Extreme Climate Events. *Frontiers in Built Environment*.

Transportation Technology Center, Inc. (TTCI). (2006). Design of Track Transitions. Colorado, USA: Transportation Technology Center, Inc. (TTCI).

UIC (2021a). Intercity and High-speed. UIC. Saatavissa (viitattu 5.12.2021): <https://uic.org/passenger/highspeed/>

UIC (2021b). High Speed Lines in the World (Summary). UIC. Päivitetty 1.6.2021. Saatavissa (viitattu 5.12.2021): https://uic.org/IMG/pdf/20210601_high_speed_lines_in_the_world.pdf

Väylävirasto (2021a). Uusi radantarkastusvaunu Meeri kerää kattavasti tietoa ratojen kunnosta. Väylävirasto. Julkaistu 19.2.2021. Saatavissa (viitattu 22.12.2021): <https://vayla.fi/-/uusi-radantarkastusvaunu-meeri-keraa-kattavasti-tietoa-ratojen-kunnosta>

Väylävirasto (2021b). Rataverkko. Väylävirasto. Saatavissa (viitattu 5.12.2021): <https://vayla.fi/vaylista/rataverkko>