

Rami Paavilainen

**SUURNOPEUSRADAN
RAIDEGEOMETRIAN SOVITTAMINEN
NYKYISEEN RATALINJAAN**

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Rami Paavilainen: Suurnopeusradan raidegeometrian sovittaminen nykyiseen ratalinjaan–
Fitting the high-speed line geometry in existing railway area

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Huhtikuu 2021

Suomessa ajankohtaisia keskusteluaiheita ovat tunnin junat Helsingin ja Tampereen sekä Helsingin ja Turun välillä. Hankkeet ovat liikahtaneet keskusteluista jo hieman eteenpäin, sillä hankkeita on perustettu kuntien ja valtion kesken. Tässä kandidaatintyössä selvitetään edellytyksiä nopeuksien nostoon suurnopeusluokkaan raidegeometrian näkökulmasta nykyisellä ratalinjauksella Helsinki–Tampere välillä. Suurnopeusradalla suurin sallittu nopeus on vähintään 250 km/h, jolla henkilöliikenteen tulisi pystyä liikennöimään. Haasteen aiheuttaa lähinnä samoilla raitteilla liikennöivä hitaampi tavaraliikenne, jonka vaatimukset raidegeometrian suhteen ovat hyvin erilaiset.

Kandidaatintyö jakautuu kahteen osaan, jotka ovat kirjallisuustutkimus ja Helsinki–Tampere-rataosaan sijoittuva laskenta. Kirjallisuustutkimuksessa selvitetään raidegeometriaan liittyvää teoriaa. Laskennallisessa tarkastelussa tutkitaan Helsinki–Tampere-rataosuutta Väyläviraston geometriarekisterin avulla.

Laskennan tuloksena saatiin selville, että nykyisen ratalinjan kaarteet ovat suurelta osin liian pienisäteisiä täyttämään tavaraliikenteen ja suurnopeusluokassa kulkevan henkilöliikenteen vaatimukset. Käytettävällä junatyypillä on suuri vaikutus liian pienien kaarteiden lukumäärään. Kallistuvakorisella junakalustolla pystytään ajamaan tavoitenopeudella huomattavasti suurempi osa kaarteista kuin tavanomaisella junakalustolla.

Tarkasteltavalta Helsinki–Tampere-rataosuudelta laskettiin myös siirtymäkaarien pituuden riittävyys siten, että kallistuksen vajauksen muutos pysyisi sallituissa rajoissa. Tämän laskennan lopputuloksena todettiin, että hyvin suurin osa siirtymäkaarista on liian lyhyitä. Siirtymäkaarista osa saataisiin todennäköisesti sopimaan nykyiseen ratalinjaan, vaikka niitä pidennettäisiin. Tämänkin jälkeen osa siirtymäkaarista jäisi liian lyhyeksi.

Rataosuuden tarkastelun perusteella näyttäisi siltä, että tavaraliikennettä ja suurnopeusluokassa kulkevaa henkilöliikennettä ei ole mahdollista sovittaa nykyiseen ratalinjaan. Ratalinja vaatisi vähintään oikaisuja vaikeimpiin paikkoihin tai vaihtoehtoisesti kokonaan uuden ratalinjan, joka voitaisiin suunnitella sopimaan paremmin nopean junaliikenteen tarpeisiin. Järkevimmän vaihtoehdon löytäminen tarvitsee tarkempia tutkimuksia.

Avainsanat: Raidegeometria, suurnopeusrata, rautatieliikenteen kehittäminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.
OriginalityCheck service.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. RAIDEGEOMETRIAN TAUSTATEKIJÄT	2
2.1 Ympyräliike	2
2.2 Kiskojen ja pyörien välinen kontakti.....	2
2.3 Kallistuksen vajoaus ja liikakallistus	4
3. RAIDEGEOMETRIAN SUUNNITTELU SUOMESSA	5
3.1 Raidegeometrian suunnittelun taustaa	5
3.2 Kaarresäteet ja raiteiden kallistus.....	5
3.3 Siirtymäkaaret ja kallistusviisteet.....	6
3.4 Radan pystygeometrian suunnittelu	7
4. RADALLA LIIKENNÖIVÄ KALUSTO	9
4.1 Tavaraliikenne.....	9
4.2 Henkilöliikenne	9
5. GEOMETRIAN REUNAEDDOT	11
5.1 Henkilöliikenne.....	11
5.2 Tavaraliikenne.....	12
6. HELSINKI–TAMPERE-RATALINJAN TARKASTELU.....	13
6.1 Kaarresäteet	13
6.2 Siirtymäkaaret.....	16
7. YHTEENVETO.....	19
LÄHTEET	21

1. JOHDANTO

Suomessa poliittinen tahtotila on saada raideliikenteestä nopeampaa. Keskusteluissa puhutaan tunnin junista Helsinki-Tampere ja Helsinki-Turku välillä. Vaihtoehtoja toteutukselle ovat nykyisen ratalinjan kehittäminen tai kokonaan uuden linjauksen rakentaminen. Kumpaan tahansa tulevaisuudessa päädytäänkin, päärata Helsinki-Tampere välillä vaatii suuria investointeja, sillä se ei enää täysin palvele nykyisiä ja tulevia tarpeita nopeutensa ja kapasiteetin osalta. Tässä työssä selvitetäänkin Helsinki-Tampere radan nopeuksien noston edellytyksiä suurnopeusluokkaan, jolloin radan nopeusrajoitus on yli 250 km/h.

Nopeuden nostolle haasteita aiheuttavat radalla liikennöivän kaluston erilaiset tarpeet. Radalla liikennöi tavara- ja henkilöliikennettä, joiden tarpeet radan geometrialle ovat hyvin erilaiset. Rata onkin lopulta jonkinlainen liikennemäärillä painotettu kompromissi nopeiden henkilöjunien, sekä hitaiden ja raskaiden tavarajunien tarpeista (Liikennevirasto 2010, s. 20). Työssä tutustutaan näiden tarpeiden taustalla oleviin tekijöihin, joiden vuoksi raidegeometrian vaatimukset ovat erilaiset.

Suomessa radat tulee suunnitella Väyläviraston ohjeistuksien mukaan, jotka huomioivat myös EU tason säädökset. Näiden pohjalta selvitetään suunnittelun kulkua ja tarvittavia laskelmia, joita tarvitaan Helsinki–Tampere-rataosuuden tarkastelussa. Rataosuuden tarkastelussa tutustutaan olemassa olevaan geometriaan ja selvitetään ongelmakohtia, sekä millaisia muutoksia näihin tulisi tehdä, jotta sallittu nopeus voitaisiin nostaa vähintään 250 km/h. Tarkastelussa selvitetään pienin mahdollinen kaarresäde, joka ohjearvojen mukaan voidaan toteuttaa. Kaarteiden alussa ja lopussa sijaitsevista siirtymäkaarista tarkastellaan siirtymäkaaren pituutta. Siirtymäkaarten pituustarkastelu tehdään sallittujen kallistuksen vajauksien muutoksen avulla.

Tarkastelussa keskitytään vaakageometriaan, sillä pystygeometrian osalta määrääväksi tulee raskas tavaraliikenne. Raskasta tavaraliikennettä liikennöi jo nyt rataosuudella. Tämän tarkastelu ei ole työn laajuuden kannalta tarpeenmukaista, sillä pystygeometria pysynee ennallaan. Tarkasteltavan alueen laajuuden vuoksi tarkastelusta rajataan pois myös vaihtealueet ja rautatieliikennepaikat.

2. RAIDEGEOMETRIAN TAUSTATEKIJÄT

2.1 Ympyräliike

Radan geometrian taustalla vaikuttaa mekaniikan toinen peruslaki eli dynamiikan peruslaki. Dynamiikan peruslain mukaan kappale on kiihtyvässä liikkeessä, jos siihen vaikuttavien voimien summa on nolosta poikkeava. Junan ollessa kaarteessa vaikuttaa siihen tällöin vähintään normaalikiihtyvyys, jonka suunta on kaarteeseen keskipistettä kohti.

Geometrian suunnittelussa kiinnostava seikka on junan mahdollinen nopeus kaarteessa. Dynamiikan peruslain mukaan

$$F = ma \quad (1)$$

jossa F on kiihtyvyyden a suunnassa vaikuttava voima ja m kappaleen massa. Ympyräliikkeen tapahtuessa vakionopeudella, vaakatasossa olevalla radalla poikittaiskiihtyvyys on yhtä suuri, kuin normaalikiihtyvyys a_n . Normaalikihtyvyydelle ja nopeudelle on yhteys

$$a_n = \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

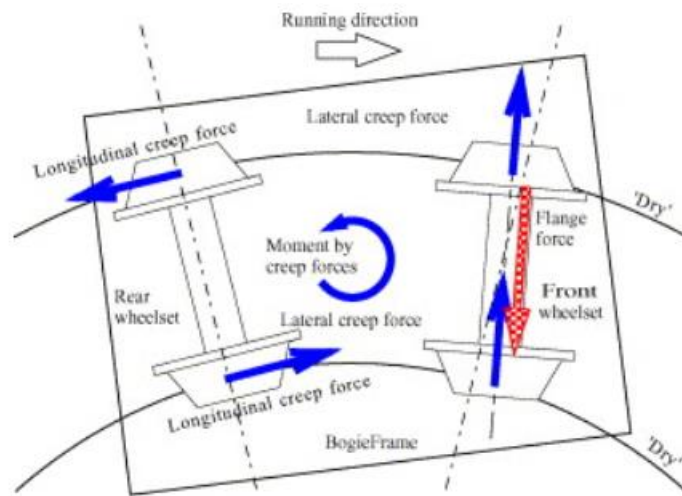
jossa r on ympyräradan säde. (Salmi & Virtanen 2006, s. 49) Yhdistämällä kaavat (1) ja (2) saadaan mahdollisen nopeuden ja voimien välille yhteys. Poikittaiskiihtyvyys kasvaa kuitenkin helposti liian suureksi kallistamattomalla radalla. Kallistamalla rataa saadaan junan painovoimasta radan suuntainen komponentti, joka vaikuttaa kiskojen tasossa olevaan poikittaiskiihtyvyyteen.

Yhdistettäessä ympyrän kaari ja suora ympyrän tangentin suuntaisesti tapahtuu siirtymien ympyräliikkeeseen välittömästi yhdistymispisteen jälkeen. Tässä pisteessä tapahtuu nykäys. Nykäyksellä tarkoitetaan kiihtyvyyden aikaderivaattaa eli kiihtyvyyden muutosta. Nykäyksen vaikutusten vähentämiseksi suoran ja ympyrän väliin voidaan sijoittaa siirtymäkaari. Siirtymäkaaren säde lähtee pienenevänsä hyvin suuresta arvosta kohti kaarteeseen sädetä. (Salminen & Virtanen 2006, s. 36)

2.2 Kiskojen ja pyörien välinen kontakti

Suurin osa vetureista sekä vaunuista on varustettu telillä, joka kytkee kaksi akselia toisiinsa. Teli aiheuttaa kaarteissa vastusta, joka riippuu kaarteeseen säteestä ja teliä kuormittavasta massasta. Erityisesti pienisäteiset kaarteet ja suuret akselipainot, joita esiintyy

tavaraliikenteessä, aiheuttavat suurta vastusta. Henkilöliikenteen junissa akselipainot ja vaunujen lukumäärä ovat tavanomaisesti pienempiä, jolloin ilmiö ei ole niin merkittävä.



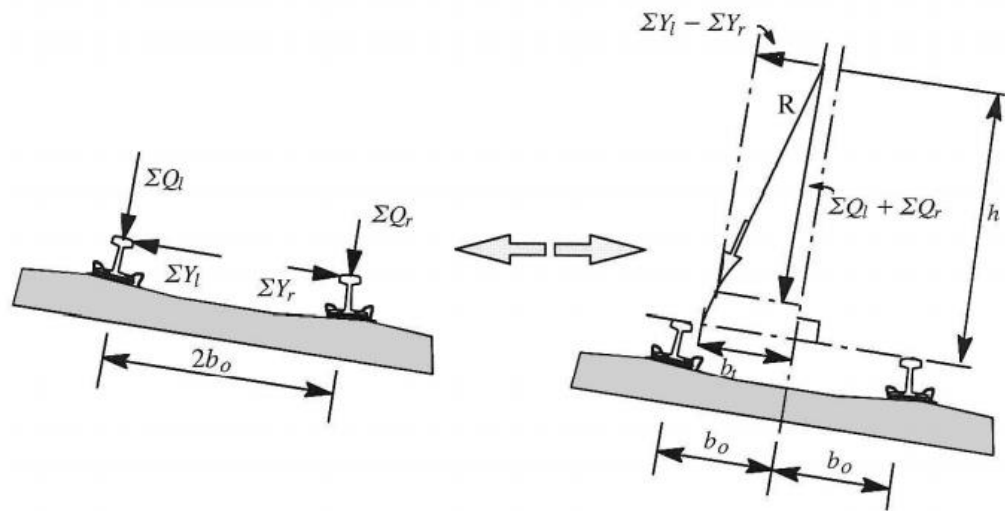
Kuva 1. Kiskojen ja pyörien kontaktista aiheutuvat voimat (Matsumoto et al. 2005, s. 1027).

Telin vaikuttavat vaakasuuntaiset voimat ovat esitetty kuvassa 1. Pyörät ovat kiinnitetty kiinteästi akseliin, jonka vuoksi ne pyörivät samaa nopeutta. Kaarteessa tämä aiheuttaa vastusta, sillä pyörän kulkema matka on pidempi ulkokaarteessa kuin sisäkaarteessa. Nämä taka-akseliin syntyvät voimat aiheuttavat teliin momentin, joka painaa etuakselin ulkokaarten puoleista pyörää kiskoja päin. (Matsumoto et al. 2005, s. 1027) Tämä aiheuttaa kuvassa 1 punaisella esitetyn laippavoiman, joka edelleen aiheuttaa kitkaa kiskon ja pyörän väliin ja vastustaa näin liikettä. Suuri laippavoima lisää vaunun raiteilta suistumisen riskiä ja kuluttaa pyöriä ja kiskoja (Matsumoto et al. 2005, s. 1027).

Kaarteissa kallistetuilla raiteilla ongelmia aiheuttavat kaluston vaihtelevat nopeudet. Nopeus vaikuttaa junaan vaikuttavaan normaalikiihtyvyyteen kaavan (2) mukaan, joka kasvattaa myös radan suuntaista normaalikiihtyvyyden komponenttia. Tämän seurauksena radan tason suuntainen poikittaiskihtyvyys kasvaa nopeuden kasvaessa ja vastaavasti pienenee nopeuden pienentyessä. (Liikennevirasto 2010, s. 30)

Poikittaiskihtyvyys aiheuttaa kiskoille epätasaista kuormitusta, jonka kasvaessa liian suureksi riski kiskoilta suistumiseen kasvaa (Lindahl, M. 2001, s. 53). Poikittaiskihtyvyyden ollessa positiivinen on kuvan 2 tapaan kaarteeseen ulompi, korkeammalla sijaitseva kisko enemmän kuormitettu. Tällainen kuormitus syntyy suurella nopeudella kulkevasta

junasta. Samassa kaarteessa riittävän hitaasti kulkeva juna aiheuttaa negatiivisen poikittaiskiihtyvyyden, joka kuormittaa alemmää kiskoa enemmän.



Kuva 2 Kiskojen ja pyörien väliset voimat, sekä varmuus kiskoilta suistumista vastaan (Lindahl, M. 2001, s. 53).

2.3 Kallistuksen vajoaus ja liikakallistus

Radan suunnittelussa käytetään poikittaiskiihtyvyyden sijasta kallistuksen vajousta tai liikakallistusta. Kallistuksen vajoaus on kyseessä, kun poikittaiskiihtyvyyden suunta on ulkokaarteeseen ja vastaavasti radassa on liikakallistusta poikittaiskiihtyvyyden ollessa sisäkaarteeseen suuntaan. Kallistuksen vajoaus ja liikakallistus kertovat millimetreinä raiteen kallistuksen poikkeaman tasapainotilasta. Tasapainotilassa radan kaarevuus, kallistus ja junan nopeus ovat sopivat, jolloin kallistuksen vajoaus on nolla. Tällöin raiteen kallistus kompensoi poikittaiskiihtyvyyden. (Liikennevirasto 2010, s. 8, 28)

Kallistuksen vajoaukselle ja poikittaiskiihtyvyydelle löytyy yhteys kaavasta, (Liikennevirasto 2010, s. 30)

$$a_q = \frac{g \cdot l}{1600} \quad (3)$$

jossa a_q on poikittaiskiihtyvyys radan tasossa, g putoamiskiihtyvyys ja l kallistuksen vajoaus.

3. RAIDEGEOMETRIAN SUUNNITTELU SUOMESSA

3.1 Raidegeometrian suunnittelun taustaa

Rautatien geometrian suunnittelun lähtökohtia ovat liikenteellisten tarpeiden, turvallisuuden, ympäristön, kaluston, rakentamisen ja kunnossapidon vaatimusten ja tavoitteiden toteuttaminen (Liikennevirasto 2010, s. 16). Edellä mainittujen asioiden tulisi toteutua lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Pitkällä aikavälillä liikenteelliset tarpeet näyttäisivät kehittyvän kohti lyhyempiä matka-aikoja, mikä tarkoittaa suurempia nopeuksia. Tavaraliikenteen osalta kehitys näyttäisi olevan kohti suurempia akselipainoja, joka aiheuttaa yhteen sovittamiselle ja geometrian suunnittelulle haasteita.

Geometrian suunnittelu jaetaan vaak- ja pystygeometriaan, joiden on sovittava saumattomasti yhteen. Vaakageometrian suunnittelussa käytetään elementteinä: (Liikennevirasto 2010, s. 27)

- suoria
- ympyränkaaria
- siirtymäkaaria
- vaihteita.

Näiden lisäksi ympyränkaarissa käytetään kallistuksia, sekä siirtymäkaarissa kallistusviisteitä. Pystygeometrian suunnittelussa elementteinä ovat ainoastaan suorat ja ympyränkaaret. (Liikennevirasto 2010, s. 20)

3.2 Kaarresäteet ja raiteiden kallistus

Sallittava kaarresäde riippuu aina nopeudesta ja käytettävästä kallistuksesta. Liian suuret kallistukset tai liian pienet kaarresäteet tekevät matkustamisesta epämiellyttävää, vaikka juna geometriasta selviytyisikin suistumatta. Tavaraliikenteen kanssa ei voida kappaleessa 2.1 esitetyistä syistä johtuen käyttää liian pieniä kaarresäteitä, joissa on suuri kallistus. Taulukossa 1 on ohjeistusta Suomessa käytettäväksi suositelluista normaalikallistuksista.

Taulukko 1 Väyläviraston suositeltavat kaarresäteet eri nopeuksilla ja normaalikallistuksilla (Liikennevirasto 2010, s. 28).

Normaalikallistus [mm]	Mitoitusnopeus [km/h]									
	50	80	100	120	140	160	180	200	220	250
~110	300	500	800	1100	1500	1900	2400	3000	3500	4500
~80	400	700	1000	1500	2000	2600	3300	4000	5000	6500
~40	600	1200	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000

Normaalikallistusten saavuttaminen vaatisi etenkin nopeusalueella $V > 250$ km/h todella suuria kaarresäteitä pienillä normaalikallistuksilla. Väyläviraston mukaan tavaraliikennettä ajatellen raiteen normaalikallistus tulisi olla enintään 40–80 mm ja henkilöliikenteen kohdalla 80–110 mm. Normaalikallistus voidaan laskea kaavalla

$$D = \frac{8V^2}{R}, \quad (4)$$

jossa D on raiteen normaalikallistus, V kaarteeseen mitoitussäde (km/h) ja R säde (m). (Liikennevirasto 2010, s. 31) Normaalikallistus on lähellä tasapainokallistusta. Normaalikallistuksessa tasapainokallistus on jätetty hieman vajaaksi eli normaalikallistuksessa on jo hieman kallistuksen vajausta. Tasapainokallistus D_{EQ} voitaisiin halutessa laskea korvaamalla kaavan (4) kerroin kahdeksan arvolla 12,5. (Liikennevirasto 2010, s. 31) Raiteen kallistuksen ollessa tiedossa voidaan selvittää kallistuksen vaje kaavalla

$$I = \frac{12,5V^2}{R} - D \quad (5)$$

jossa I on kallistuksen vaje yksikössä millimetri ja D raiteen todellinen kallistus. (Liikennevirasto 2010, s. 31)

3.3 Siirtymäkaaret ja kallistusviisteet

Siirtymäkaarien suunnittelussa on huomioitava kallistuksen muutosnopeus. Siirtymäkaaren aikana kallistus muuttuu nolosta kaarteeseen olevaan vakiokallistukseen. Lisäksi siirtymäkaaren aikana kaaren säde muuttuu äärettömästä säteen arvosta kohti ympyräkaaren sädettä. Siirtymäkaaren tyypin mukaan muutoksen nopeus on vakio tai muuttuva.

Suomessa siirtymäkaari on tyypillisesti klotoidi, jota tulee käyttää kallistetuissa kaarteissa (Liikennevirasto 2010, s. 32). Klotoidin säde muuttuu tasaisesti kohti ympyräkaaren sädettä. Klotoidin vähimmäispituudeksi on määritetty Suomessa 20 m, mutta suositeltava vähimmäispituus on kuitenkin 30 m. (Liikennevirasto 2010, s. 33) Klotoidin laskennassa käytettävä kaava on

$$L_n R_n = A^2, \quad (6)$$

jossa L_n on klotoidin pituus suoralta ympyrän kaarelle, R_n ympyrän säde pituuden L_n päässä klotoidin alusta. Parametri A kuvaa klotoidin säteen muutosnopeutta ja sen yksikkö on metri. (Liikennevirasto 2010, s. 33) Klotoidi vaikuttaa ympyränkaaren asemaan, sitä edeltävästä suorasta katsottuna. Sivusiirtymä d voidaan laskea kaavalla, (Liikennevirasto 2010, s. 34)

$$d = \frac{L_k^2}{24R} \quad (7)$$

jossa L_k on siirtymäkaaren pituus. Klotoidin aiheuttama sivusiirtymä on lyhyillä siirtymäkaarilla kymmenien senttimetrien luokkaa, joten tämän työn tarkasteluun asialla ei ole suurta vaikutusta.

Tärkeä asia siirtymäkaarien suunnittelussa ovat kallistusviisteet. Kallistuksen vajauksen muutos saadaan laskettua kaavalla (Liikennevirasto 2010, s. 33)

$$\frac{dI}{dt} = \frac{IV}{3,6L_k}, \quad (8)$$

jossa L_k on kallistusviisteen pituus, joka yleensä on sama kuin siirtymäkaaren pituus. Siirtymäkaaren suunnittelussa suurilla nopeuksilla kallistuksen vajauden muutos määrää todennäköisesti siirtymäkaaren pituuden, sillä suurilla nopeuksilla kaavan (8) osoittaja kasvaa voimakkaasti.

3.4 Radan pystygeometrian suunnittelu

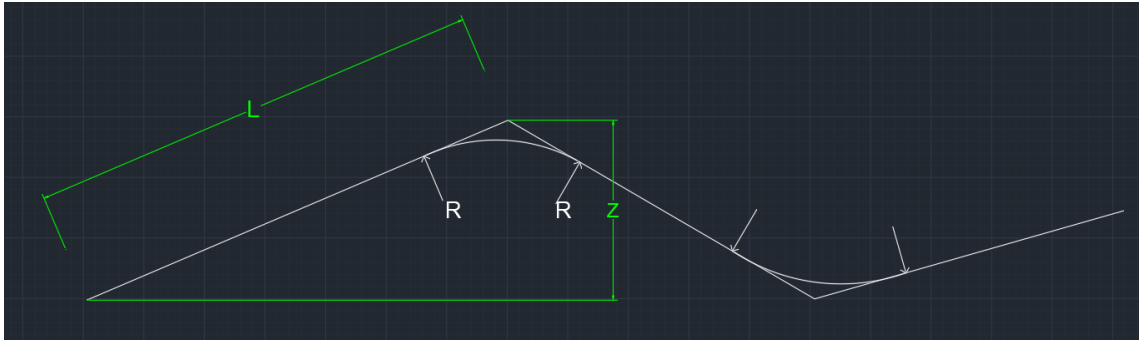
Radan pystygeometria muotoillaan Suomessa ympyränkaarien, eli pyöristyskaarten ja suorien avulla (Liikennevirasto 2010, s. 20). Pystygeometrian suunnittelu on yksinkertaisempaa kuin vaakageometrian. Pystygeometrian suunnittelussa selvitetään maaston ja liikenteen tavoitteiden mukaan radan pituuskaltevuus.

Pituuskaltevuus saadaan kaavalla, (Liikennevirasto 2010, s. 20)

$$s = 1000 \frac{z}{l} \quad (9)$$

jossa z on taitepisteiden välinen korkeusero, ja l taitepisteiden välinen etäisyys rataa pitkin. Pituuskaltevuuden yksikkö on promille, jonka vuoksi kaavassa (9) on kerroin 1000.

Eri pituuskaltevuuksissa olevien suorien leikkauspisteisiin syntyy taitepisteitä. Taitepisteissä olevat kulmat pyöristetään pyöristyskaarilla, joiden säteiden symboli on R_v . Pyöristyskaari sovitetaan taitepisteeseen kuvan 3 osoittamalla tavalla. Pyöristyskaaren säteen määrää raiteiden tavanomaisen liikenteen nopeus. Pyöristyssäteen tulee Väyläviraston ohjeistuksen mukaan sijaita välillä $R_v = \left(\frac{V^2}{3}\right) m \dots 50000 m$ (Liikennevirasto 2010, s. 24).



Kuva 3. Pituuskaltevuuksien laskennassa käytettävät mitat Z ja L ja pyöristyskaari.

Väyläviraston ohjeeseen on koottu ohjearvoja suoran rataosuuden pituuskaltevuuksista, joita on esitetty taulukossa 2. Taulukoitujen arvojen lisäksi väylävirasto on määritellyt yli 250 km/h matkustajaliikenne radan lupa-arvoksi 35 %.

Taulukko 2. Väyläviraston ohje pituuskaltevuuksien arvoista suoralla radalla (Liikennevirasto 2010, s. 21).

Rata	Pituuskaltevuus [%]		
	Suositteltava	Maksimi-arvo	Lupa-arvo
Sekaliikenne radat	≤ 10	12,5	25
Matkustajaliikenne radat	≤ 10	15	40
Tavaraliikenne radat	≤ 10	12,5	25
Sivuraiteet	≤ 12,5	15	30

Pituuskaltevuuden arvoja on pienennettävä kaarteissa. Suoralla sallittua pituuskaltevuutta pienennetään kaarteissa ominaiskaarrevastuksen verran. Tämä voidaan laskea kaavalla (Liikennevirasto 2010, s. 21)

$$W_r = \frac{650}{R-55} \quad (10)$$

jossa W_r on ominaiskaarrevastus yksikössä promille. Kaarteiden lisäksi myös tunnelit aiheuttavat vastusta, jolloin pituuskaltevuutta on pienennettävä.

4. RADALLA LIKENNÖIVÄ KALUSTO

4.1 Tavaraliikenne

Tavaraliikenne on yleensä hidaskulkuista ja raskasta. Tavarajunan keskimääräinen paino oli esimerkiksi 2018 vuonna 1516 tonnia (Traficom 2018, s. 26). Junien painoja määrittää osaltaan sallitut akselipainot, jotka ovat suurimmalla osalla rataverkkoa 22,5 tonnia (Liikennevirasto 2018, s. 25). Helsingin ja Tampereen välisellä rataosuudella voidaan kuitenkin vetää raskaampia junia, sillä suurin sallittu akselipaino on 25 tonnia (Väylävirasto 2021). Suurempi akselipaino lisää entisestään ongelmia tavarajunien liikkumiseen jyrkemmin kallistetuilla raiteilla.

Suomessa käytössä olevat tavaravaunut koostuvat kaksi- ja neliakselisista vaunuista, jotka ovat varustettu erilaisilla päällysrakenteilla. (Traficom 2021, s. 24)

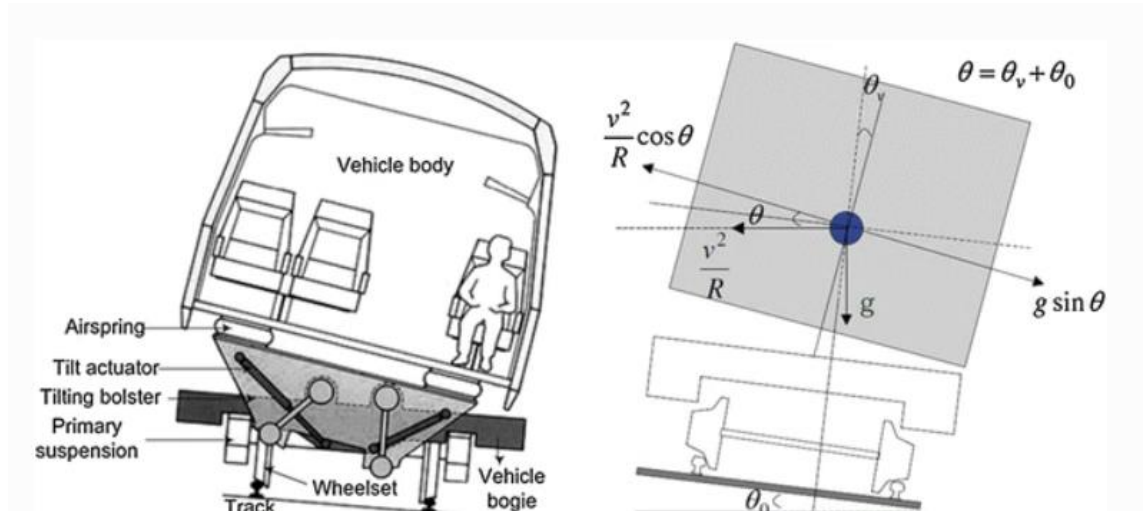
Tällä hetkellä suurin sallittu nopeus tavarajunille on 120 km/h (Väylävirasto 2019, s. 30). Kevyemmät tavarajunat voivat saavuttaa maksiminopeuden 120 km/h, mutta 25 tonnin akselipainolla ei päästä näin suuriin nopeuksiin. Raskaammilla junilla nopeudet ovat tyyppillisesti 70–100 km/h välillä.

4.2 Henkilöliikenne

Jokaisella radalla on mitoitusnopeus, joka on suurin radalla käytettävä nopeus. Suomessa voidaan käyttää kalustokohtaisia nopeusrajoituksia, jotka rajoittavat nopeutta tietyillä junatyypeillä. Nopeimmilla rataosilla mitoitusnopeutta voivat liikennöidä kallistuvakoriset junat, joita suomessa ovat esimerkiksi Sm3 ja Sm6 nimikettä käyttävät Pendolinot ja Allegro-junat (Liikennevirasto 2010, Liite 3). Näiden junien huippunopeus on 220 km/h ja koria voidaan kallistaa maksimissaan kahdeksan astetta (Alstom 2010).

Kallistuvakorisia junia on kahta tyyppiä: passiivisesti ja aktiivisesti kallistuvia. Passiivisesti kallistuva juna kallistuu itsestään kaarteissa. Se kiertyy massakeskipisteensä ympäri ja korin alaosa pyrkii liukumaan ulkokaarteeseen päin. Näitä pidetään turvattomampina kuin aktiivisesti kallistuvia. Aktiivisesti kallistuvan junan kallistuksia ohjataan rataan ja junaan sijoitettujen anturien avulla, jotka antavat junaan tarvittavat tiedot, jolloin esimerkiksi hydraulikan avulla juna saadaan kallistumaan. Aktiivisesti kallistuvissa junissa massakeskipisteen sijainti ei muutu oleellisesti, joka osaltaan lisää turvallisuutta. (Pettersson, R. 2008, s. 5)

Kallistuvakorisen junan kallistus vaikuttaa siis lähinnä matkustusmukavuuteen. Kuvan 4 osoittamalla tavalla kallistuksen säätäminen vaikuttaa poikittaiskiihtyvyyteen korin lattian suunnassa. Matkustajiin kohdistuvaa poikittaiskiihtyvyyttä saadaan näin pienennettyä, jolloin nopeutta voidaan nostaa, jos vaakavoimat ovat raiteen tasossa riittävän pienet.



Kuva 4. Kallistuvakorisen junan poikittaiskiihtyvyydet (Darlon, A.O & Marinow, M. 2015).

5. GEOMETRIAN REUNAEHDOT

5.1 Henkilöliikenne

Reunaehtojen selvittämiseksi tutkitaan Väyläviraston RATO 2 ohjetta ja EN-13803 standardia. Väyläviraston suunnitteluohjeet täyttävät Eurokoodien ja EN-standardien vaatimukset. EN-13803 standardi asettaa arvoille maksimin ja minimin, mutta kansallisessa ohjeessa, kuten RATO2, varmuutta voidaan lisätä. EN-13803 standardin ja RATO 2-ohjeen vaatimukset koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Kallistuksen maksimiarvot 1524 mm leveille raiteille.

Ohje	Tarkennus	Kallistus D [mm]
Väylävirasto, RATO2	Maksimi	150
	Lupa-arvo	180
EN-13803 Standardi	Yleinen	165
	Sillat ja vaihteet	125

Maksimikallistus sepeliraitteella Suomessa on 150 mm, mutta perustellusta syystä Väyläviraston luvalla voidaan käyttää 180 mm kallistusta. (Liikennevirasto 2010, s. 29) EN-13803 standardi sallisi käytettäväksi huomattavasti suuremman 165 mm kallistuksen yleisenä maksimiarvona.

Vielä suurempia erot ovat taulukon 4 kallistuksen vajauksissa. Toisaalta näissä ohjeissa nopeusluokat ovat hieman erilaiset, joka osaltaan voi selittää eroja. Kallistuvakorille kalustolle sallitaan jopa 290 mm kallistuksen vajoitus nopeuteen 260 km/h asti. Nopeusrajoitus kallistuvakorilla kalustolla asettuu 260 km/h nopeuteen, sillä nopeampia ratoja ei ole Euroopassa suunnitteilla toteutettavaksi tällaisella kalustolla. (EN-13803 2017, s. 31) Suomessa käytössä olevien kallistuvakoristen junien sm3 ja sm6 sallitut kallistuksen vajaukset ovat 293 mm (Liikennevirasto 2010, Liite 1).

Taulukko 4. Kallistuksen vajauksen maksimiarvot 1524 mm leveillä raiteilla.

Ohje	Sallittu nopeus V [km/h]	Tarkennus	Kallistuksen vajoitus [mm]
Väylävirasto, RATO2	250-300	Maksimi	100
	250-300	Lupa-arvo	130
EN-13803 Standardi	220-300	Yleinen	160
	80-260	Kallistuvakorinen kalusto	290

Kallistusviisteet on mitoitettava, siten että kiihtyvyyden muutos ei ole liian suuri. Liikenneviraston ohjeen mukaan kallistuksen vajauksen muutos kaavan (8) mukaan laskettuna tulisi olla maksimissaan 73 mm/s. Suositeltava arvo olisi kuitenkin alle 49 mm/s. (Liikennevirasto 2010, s. 33) EN-13803 standardi antaa kallistuvakorille kalustolle hieman suuremman kallistuksen vajauksen muutoksen arvon, 80 mm/s nopeusalueella $225 \text{ km/h} < V \leq 260 \text{ km/h}$, kun siirtymäkaari on klotoidi. Kallistuksen vajauksen muutoksen ohjearvot on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Ohjearvoja kallistuksen vajauksen muutosnopeuteen.

Ohje	Tarkennus	dl/ds [mm/s]
Väylävirasto, RATO2	Suositus	49
	Maksimi	73
EN-13803 Standardi	Maksimi	80

5.2 Tavaraliikenne

Hitaan tavaraliikenteen kannalta geometriaa suunniteltaessa kysymykseen tulee yleensä liikakallistus. Liikenneviraston (2010) ohjeessa kallistuksen vajauksen minimiarvot on määritelty nopeudelle 60 km/h. EN-13803 standardi antaa tässäkin mahdollisuuden itseisarvoltaan suurempiin liikakallistuksiin. Taulukossa 6 esitetyt rajat koskevat ratalinjalla liikennöivää hitainta junaa.

Taulukko 6. Kallistuksen vajauksen minimiarvot 1524 mm leveillä raiteilla.

Ohje	Nopeus V [km/h]	Tarkennus	Kallistuksen vajoitus [mm]
Väylävirasto, RATO2	60	Suosittelava	-73
	60	Ehdoton	-105
EN-13803 Standardi	-	Normaaliraja	-115
	-	Poikkeusraja	-150

6. HELSINKI–TAMPERE-RATALINJAN TARKASTELU

6.1 Kaarresäteet

Ratalinjan tarkastelu pohjautuu Väyläviraston ylläpitämän geometriarekisterin tietoihin. Rekisteristä poimitaan tarvittavat parametrit, joiden avulla lasketaan raiteen kallistus ja kallistuksen vajoaus. Vertaamalla laskettuja tuloksia kohdassa 5. esitettyihin reunaehtoihin, saadaan selville, voidaanko nykyisellä ratalinjalla liikennöidä 250 km/h. Tarkastelun helpottamiseksi koodataan laskentataulukot eri väreillä, värikoodit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Laskentataulukoissa käytettyjen värikoodien selitykset.

Värikoodi	Selitys
	Täyttää Väyläviraston ja EN-13803 standardin maksimin
	Täyttää EN-13803 standardin maksimin
	Ylittää Väyläviraston, sekä EN-13803 standardin maksimiarvon

Laskenta aloitetaan laskemalla suurin mahdollinen kallistus D_{max} . Suurimman kallistuksen määrää radan hitain juna, jolloin nopeutena käytetään 50 km/h ja kallistuksen vajouksena taulukosta 6 löytyvää maksimiarvoa -105 mm. Sijoitetaan nopeus, kallistuksen vajoaus ja ratageometriarekisteristä poimittu kaarresäde kaavaan (5), jolloin saadaan taulukoihin 8, 9, ja 10 lasketut maksimikallistukset.

Maksimikallistuksen ollessa selvillä, voidaan laskea kallistuksen vajoaus käyttäen edellä laskettua kallistusta, nopeutta 250 km/h ja ratageometriarekisterin kaarresäteitä. Lasketut kallistuksen vajoukset on myös taulukoitu taulukoihin 8, 9 ja 10. Vertaamalla laskettuja kallistuksen vajouksia taulukon 4 reunaehtoihin saadaan selville, voidaanko kaarteissa ajaa 250 km/h.

Taulukko 8. Helsinki–Tampere-ratalinjan pienimpiä kaarresäteitä vastaavat kallistuksen vajaukset ja hitaan liikenteen määräämät maksimikallistukset.

Kilometrilukema	Loppukilometri	R (m)	D_{\max} (mm), kun $l=-105$ mm ja $V=50$ km/h	l , kun $D=D_{\max}$ ja $V=250$ km/h
0000+0563.892	0000+0621.793	600	157	1145
0000+0604.061	0000+0692.523	600	157	1145
0003+0597.722	0003+0628.525	600	157	1145
0108+0444.583	0108+0589.538	602	157	1141
0003+0159.577	0003+0220.641	660	152	1031
0003+0157.922	0003+0212.067	675	151	1006
0002+0885.530	0002+0984.497	700	150	966
0002+0903.602	0002+0974.099	700	150	966
0003+0535.350	0003+0648.614	700	150	966
0016+0182.572	0016+0215.177	750	147	895
0001+0330.375	0001+0360.512	770	146	869
0148+0291.665	0148+0536.869	839	142	789
0148+0242.412	0148+0531.462	848	142	779
0003+0959.037	0004+0099.409	890	140	738
0003+0072.894	0003+0169.264	900	140	728
0015+0578.058	0015+0641.006	900	140	728
0015+0745.717	0015+0808.665	900	140	728

Taulukosta 8 nähdään ensimmäisen kaarteiden olevan säteeltään 700 m, jossa kallistus täyttää ohjearvot hitaalle liikenteelle. Tällöin kallistuksen vajoaus on kuitenkin 966 mm nopealle liikenteelle, joka on moninkertaisesti yli ohjearvojen. Ratageometriarekisterin kilometrilukuja vertaamalla Väyläviraston luetteloon rautatiepaikoista (2016), voidaan todeta kaikkien kaarteiden, joiden säde on alle 1500 m, sijaitsevan rautatieliikennepaikkojen läheisyydessä. Junat pysähtyvät rautatieliikennepaikoilla, joten 250 km/h nopeustarkastelu ei ole näissä paikoissa järkevää.

Taulukko 9. Kallistuksen vajaukset eri kaarresäteillä. Ensimmäinen kallistuvakorisen kaluston kallistuksen vajauksen ohjearvon täyttävä kaarresäde korostettu.

Kilometrulukema	Loppukilometri	R (m)	D_{max} (mm), kun $l=-105$ mm ja $V=50$ km/h	l , kun $D=D_{max}$ ja $V=250$ km/h
0075+0588.369	0076+0140.303	1775	123	318
0100+0228.272	0101+0252.999	1776	123	317
0075+0587.263	0076+0141.409	1777	123	317
0345+0451.916	0345+0835.011	1790	122	314
0070+0481.022	0070+0534.778	1790	122	314
0005+0320.263	0005+0790.623	1850	122	300
0005+0316.317	0005+0750.387	1860	122	298
0184+0556.459	0184+0780.348	1893	122	291
0184+0556.459	0184+0780.348	1893	122	291
0108+0200.811	0108+0384.297	1898	121	290
0184+0556.357	0184+0780.588	1898	121	290
0108+0200.332	0108+0386.261	1900	121	290
0150+0590.955	0150+0842.804	1900	121	290
0150+0589.570	0150+0843.223	1904	121	289
0107+0350.420	0107+0448.753	1925	121	285
0147+0011.642	0147+0095.022	1930	121	284
0012+0632.519	0012+0972.485	1950	121	280

Pienin ohjearvot täyttävä kaarresäde on 1898 m, joka löytyy taulukosta 9. Tämän saavuttamiseksi kallistuksen vajoaus on 290 mm, jolloin on käytettävä kallistuvakorista kalustoa. Käytettäessä tavanomaista junakalustoa kallistuksenvajoaus saa olla taulukon 4 mukaan 100 mm, jolloin taulukosta 10 katsottuna pienin mahdollinen kaarresäde on 3659 m.

Taulukko 10. Kallistuksen vajaukset eri kaarresäteillä. Ensimmäinen tavanomaisen kaluston kallistuksen vajauksen ohjearvot täyttävä kaarresäde korostettu.

Kilometrilukema	Loppukilometri	R (m)	D_{max} (mm), kun $l=-105$ mm ja $V=50$ km/h	l , kun $D=D_{max}$ ja $V=250$ km/h
0006+0134.218	0006+0199.207	3500	114	109
0010+0083.268	0010+0133.869	3500	114	109
0010+0617.960	0010+0669.347	3500	114	109
0036+0681.098	0036+0882.854	3596	114	104
0009+0822.919	0010+0027.073	3600	114	103
0014+0770.391	0014+0813.000	3600	114	103
0014+0933.059	0014+0976.160	3600	114	103
0068+0459.590	0068+0688.226	3659	114	100
0014+0763.285	0014+0810.452	3700	113	98
0014+0950.451	0015+0016.422	3700	113	98
0068+0456.854	0068+0690.712	3794	113	93
0247+0379.326	0247+0462.527	3887	113	88
0000+0618.472	0000+0621.412	4000	113	83
0010+0286.759	0010+0340.684	4000	113	83
0010+0634.993	0010+0711.430	4000	113	83
0014+0370.916	0014+0427.087	4000	113	83
0014+0721.163	0014+0796.798	4000	113	83

Väyläviraston geometriarekisterin mukaan tarkasteltavalla välillä on yli 1500 m säteisiä kaarre-elementtejä yhteensä 365 kpl. Kaarteista 59 kpl on säteeltään 1500–1898 m, jolloin 16 % kaarteista on liian pieniä kallistuvakorille junalle, joka ajaa 250 km/h. Kaarresäteeltään 1500–3659 m on geometriarekisterissä 229 kpl, jolloin tavanomaiselle junalle 63 % kaarteista on liian pieniä nopeudella 250 km/h. Prosenttiosuudet ovat suuntaa antavia, sillä yli 1500 m kaarteita voi myös sijaita rautatieliikennepaikoilla.

6.2 Siirtymäkaaret

Siirtymäkaarissa olevien kallistusviisteiden riittävyys voidaan tarkastaa kaavalla (8), jonka lähtötiedoksi poimitaan geometriarekisteristä siirtymäkaaren pituus. Laskentaa varten tarvitaan myös siirtymäkaareen liittyvän kaarteiden kallistuksen vajaus. Tämä saadaan laskemalla suurin kallistus D_{max} kaavalla (5) vastaavasti, kuin kappaleessa 6.1. Seuraavaksi lasketaan kallistuksen vajaus kaavalla (5), kun $D = D_{max}$ ja $V=250$ km/h. Sijoittamalla edellä laskettu kallistuksen vajaus, geometriarekisteristä poimittu siirtymäkaa-

ren pituus ja tavoitenopeus 250 km/h kaavaan (8), saadaan kallistuksen vajauksen muutos yksikössä mm/s. Näitä kallistuksen vajauksen muutoksen arvoja on laskettu taulukoon 11.

Taulukko 11. Ote Excelistä, jossa laskettu kallistuksenvajauksen muutoksia.

Kilometriliikema	Loppukilometri	Siirtymäkaaren pituus (m)	R (m)	D_{\max} (mm), kun $l=105$ mm ja $V=50$ km/h	l , kun $D=D_{\max}$ ja $V=250$ km/h	dl/ds (mm/s)
0086+0719,901	0086+0874,901	155	2295	119	222	99
0009+0504,603	0009+0564,592	60	4000	113	83	95
0067+0299,196	0067+0349,196	50	4401	112	65	91
0067+0916,148	0067+0966,148	50	4401	112	65	91
0151+0936,400	0152+0048,890	113	2967	116	148	91
0151+0936,474	0152+0049,047	113	2968	116	148	91
0019+0378,085	0019+0493,217	115	3000	115	145	88
0070+0387,139	0070+0481,022	94	3380	114	117	86
0182+0812,765	0182+0960,765	148	2595	117	184	86
0109+0560,483	0109+0700,024	140	2756	116	167	83
0112+0593,135	0112+0723,135	130	3034	115	142	76
0112+0185,178	0112+0315,177	130	3045	115	141	75
0181+0827,206	0181+0980,438	153	2766	116	166	75
0036+0403,476	0036+0453,359	50	4710	112	54	75
0036+0412,796	0036+0462,797	50	4710	112	54	75
0010+0584,992	0010+0634,993	50	4745	112	53	74
0003+0525,049	0003+0597,722	71	4200	112	74	72
0008+0617,021	0008+0657,043	40	5150	111	41	71
0005+0901,496	0006+0021,706	120	3380	114	117	68
0010+0209,032	0010+0255,986	47	5000	111	45	66
0038+0907,920	0038+0998,373	90	4000	113	83	64
0039+0807,835	0039+0897,985	90	4000	113	83	64
0178+0734,285	0178+0894,284	160	2990	115	146	63
0179+0249,924	0179+0409,924	160	2992	115	146	63
0179+0579,529	0179+0739,288	160	2992	115	146	63
0014+0813,000	0014+0873,149	60	4700	112	55	63
0081+0177,719	0081+0237,720	60	4700	112	55	63
0011+0041,145	0011+0090,746	50	4985	111	45	63
0013+0729,876	0013+0779,841	50	4985	111	45	63
0179+0249,618	0179+0409,376	160	2997	115	145	63
0179+0249,924	0179+0409,924	160	2997	115	145	63

Taulukko 11 on ote Excelissä suoritetusta laskennasta. Kallistuksen vajauksen muutos riippuu siirtymäkaaren pituudesta ja siirtymäkaareen liittyvän kaarteeseen säteestä, jonka takia taulukkoa ei pysty järjestämään yhden muuttujan suhteen järkevasti. Taulukosta 11 voidaan silti nähdä erilaisia kombinaatioita, jotka täyttävät ohjearvot.

Excelissä suoritettuna tarkemman tarkastelun mukaan Helsinki–Tampere-välillä on siirtymäkaaria 428 kpl. Näissä kallistuksen vajauksen muutosnopeus on Väyläviraston ohjeen

mukaan sopiva 167:n siirtymäkaaren kohdalla, mikä on 39 % kaikista välin siirtymäkaarista. EN-13803 standardin täyttää 173 siirtymäkaarta, mikä on 40 % kaikista siirtymäkaarista.

7. YHTEENVETO

Raidegeometrian suunnittelussa on huomioitava kaikki junatyypit, joita radalla liikennöi. Tällöin raidegeometria on harvoin optimaalinen yhdellekään junalle. Tarkastettava Helsinki–Tampere-väli on Suomen rataverkon tärkeä tavaraliikennereitti, mutta toisaalta myös matkustajamäärältään suurin henkilöliikennereitti (Liikennevirasto 2018 s. 29, 37). Tämän vuoksi ei voida ainoastaan painottaa nopeasti kulkevaa henkilöliikennettä.

Tavaraliikenteen vaatimukset huomioiden näyttäisi, että 250 km/h kulkeva nopein juna ja 50 km/h mitoitettu hitain juna eivät pysty liikennöimään nykyisten Väyläviraston ohjearvojen puitteissa samoilla raiteilla. Väyläviraston maksimiarvo kallistuksen vajaukselle on 100 mm ja ehdoton minimi -105 mm. Näillä kallistuksen vajauksilla pystytään ajamaan 50 km/h ja 250 km/h nopeuksilla 37 % rataosuuden kaarteista.

Tosin kalustovalinnoilla voidaan vaikuttaa tähän merkittävästi. Kallistuvakorikiselle kalustolle voidaan sallia 290 mm kallistuksen vajoaus. Tällöin 50 km/h ja 250 km/h nopeudet täyttävät ohjearvot 84 %:ssa kaarteista. Nyt huomattavan suuri osa kaarteista voidaan ajaa nopeudella 250 km/h, mutta edelleen merkittävä osa on kaarresäteeltään liian pieniä.

Rataosuuden siirtymäkaarista suurin osa 61 % on liian lyhyitä 250 km/h kulkevalle junalle. Siirtymäkaaret saadaan tästä huolimatta todennäköisesti suurelta osin sovitettua nykyiseen ratalinjaan, koska kaavalla (7) laskettava siirtymäkaaren sivusiirtymä suoran ja ympyräkaaren välillä jää pieneksi, vaikka siirtymäkaarta pidenettäisiin huomattavasti. Paikoissa, joissa siirtymäkaaret ovat kahden kaarteiden välissä, siten ettei niiden välissä ole suoraa, voi tästä syntyä ongelma.

Tarvittava raidegeometria voidaan saada sopimaan ratalinjaan paremmin käyttämällä lupa-arvoja, joita voidaan käyttää poikkeustapauksissa Väyläviraston luvalla. Lupa-arvojen käyttöä varten on kuitenkin esitettävä riittävät perustelut. Liikenneviraston laatimissa ohjeissa ohjearvot ovat pääsääntöisesti itseisarvoltaan hieman pienempiä, kuin EN-13803 standardissa esitetyt vastaavat arvot. Näitä käyttämällä saataisiin hieman suurempi osa rataa mahtumaan ohjearvojen sisälle, mutta käyttö edellyttäisi Liikenneviraston laatimien suunnitteluohjeiden muokkaamista.

Raidegeometrian suunnittelussa ei ole kuitenkaan suositeltavaa käyttää jatkuvasti parametrien maksimi- ja minimiarvoja (Liikennevirasto 2010, s.16). Näin ollen Helsinki–Tampere-ratalinjan nopeuksien nosto ei onnistu suurnopeusluokkaan koko matkalta ilman rataoikaisuja. Kaarteista ja siirtymäkaarista suuri osa on alimitoitettuja ja moni on lähellä

maksimi- ja minimiarvoa, jolloin ratkaisu ei ole hyvä. Vanhasta ratalinjasta pystyttäisiin hyödyntämään kuitenkin osia, jos ei lähdetä tekemään kokonaan uutta ratalinjaa.

Radan nosto suurnopeusluokkaan vaati myös muita tarkasteluja kuin pelkästään raidegeometrian mitoittamista. Välityskyvyn riittävyyteen tulevaisuudessa on myös kiinnitettävä huomiota, onko kaksi raidetta riittävä Suomen vilkkaimmalla rautatieyhteysvälillä? Vastauksen ollessa kyllä, voi olla järkevää jatkaa nykyisen väylän kehittämistä ja mahdollisia oikaisuja. Mikäli raiteita tarvitaan lisää, ei välttämättä ole järkevää kehittää nykyistä linjausta suurnopeusluokkaan, jos voidaan rakentaa viereen kokonaan uusi raide, joka sopii raidegeometrialtaan paremmin tarkoitukseensa.

LÄHTEET

Alstom (2010). Helsinki-St. Petersburg Allegro, highspeed Pendolino train, presented in Finland station in Saint-Petersburg, Lehdistöiedote, Saatavissa: (15.3.2021) <https://www.alstom.com/press-releases-news/2010/10/press-releases-pendolino-helsinki-october>

Darlon, A.O. & Marinov, M. (2015). Suitability of Tilting Technology to the Tyne and Wear Metro System, Springer link, Saatavissa: (20.2.2021) <https://link.springer.com/article/10.1007/s40864-015-0007-8#citeas>

Lindahl, M. (2001). Track geometry for high-speed railways, Royal Institute of Technology, Stockholm, saatavissa: (20.2.2021) <http://www.europakorridoren.se/sv/wp-content/uploads/2016/11/spargeometri.pdf>

Matsumoto, A., Sato, Y., Ohno, H., Tomeoka, M., Matsumoto, K., Ogino, T., Tanimoto, M., Oka, Y. & Okano, M. (2005). Improvement of bogie curving performance by using friction modifier to rail/wheel interface verification by full-scale rolling stand test, Wear 258 pp. 1201–1208

Persson, R. (2008). Tilting trains: Technology, benefits and motion sickness. Licentiate thesis, Royal Institute of Technology, Saatavissa: (20.2.2021) <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:13865/FULLTEXT01.pdf>

Salmi, T. & Virtanen, S. (2006). Dynamiikka, Pressus Oy, Tampere

SFS-EN 13803 (2017). Railway applications. Track. Track alignment design parameters. Track gauges 1 435 mm and wider, Suomen standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki.

Liikennevirasto (2010). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 2: Radan geometria, Liikenneviraston ohjeita, Helsinki, Saatavissa: (23.1.2021) https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2010-03_rato_2_radan_geometria_web.pdf

Liikennevirasto (2016). Luettelo rautatieliikennepaikoista, Liikenneviraston väylätietoja 1/2016, Helsinki, Saatavissa: (17.3.2021) https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lv_2016-01_luettelo_rautatieliikennepaikoista_web.pdf

Liikennevirasto (2018). Rataverkon kokonaiskuva, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 37/2018, Helsinki, Saatavissa: (15.3.2021) https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-37_rataverkon_kokonaiskuva_web.pdf

Traficom (2018). Rautatietilasto, Helsinki, Saatavissa: (10.2.2021) https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Rautatietilasto_2.12_uusi.pdf

Väylävirasto (2010). Geometriarekisteri

Väylävirasto (2019). Rautateiden verkkoselostus 2021, Väyläviraston julkaisuja 46/2019, Helsinki, Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2019-46_vs2021_web.pdf

Väylävirasto (2021). Yhteysvälikortti: Tampere-Helsinki -ratayhteys, Saatavissa: (8.3.2021) <https://vayla.fi/documents/25230764/35412225/Helsinki-Tampere+ratayhteys.pdf/c87129bd-f227-45a3-95e0-c54f798870d1/Helsinki-Tampere+ratayhteys.pdf?t=1582630410830>