



Väylävirasto
Trafikledsverket

Opinnäytetyö
6/2022

Matti Liski

Siirtymäkaaren optimointi suurnopeusradalla

Matti Liski

Siirtymäkaaren optimointi suurnopeusradalla

Opinnäytetyö 6/2022

Verkkajulkaisu pdf (www.vayla.fi)

ISSN 2490-1202

ISBN 978-952-405-014-2

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

puh. 0295 343 000

Matti Liski: Siirtymäkaaren optimointi suurnopeusradalla. Väylävirasto Helsinki 2022. Opinnäytetyö 6/2022. 70 sivua. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-405-014-2.

Avainsanat: radat, rautatiet, siirtymäkaari, ratageometria, klotoidi, Helmert, Bloss

Tiivistelmä

Suurnopeusradalla ajattaessa siirtymäkaaren ja kallistusviisteen muodon merkitys kasvavat entisestään. Liikennöinnin tulee olla ennen kaikkea turvallista, mutta samanaikaisesti matkustusmukavuuden tulee olla mahdollisimman hyvä ja rataan ja kalustoon koskevien voimien mahdollisimman pieniä. Siirtymäkaaren muotoa on optimoitu jo varhain, mutta eri maissa on edelleen käytössä lukuisia eri siirtymäkaaren muotoja.

Työn lähtökohtana oli löytää suomalaiseen rataverkkoon ja kalustoon sopiva suurnopeusradan siirtymäkaaren muoto. Tarkastelua suoritettiin niin matemaattisesti kuin simuloimalla erilaisia tilanteita Vampire PRO -ohjelmistoa hyödyntäen. Matemaattisessa tarkastelussa tutkittiin pääasiassa siirtymäkaaren muotoa, kallistusviistettä ja näistä seuraavia poikittaiskiintyvyyksiä. Simuloinnissa pystyttiin huomiomaan myös kaluston ja kiskon välinen kulkudynamiikka ja kisko- ja pyöräprofiilin kuluneisuus.

Tutkittavaksi valittiin kaksi maailmalla suurnopeusradalla käytettävää siirtymäkaarityyppiä; Saksassa laajalti käytössä oleva Blossin siirtymäkaari ja Japanissa esimerkiksi Shinkansen -radalla käytettävä kosinikaari. Tutkittavat kaaret valittiin käyttökokemusten ja melko yksinkertaisten määrittely-yhtälöiden vuoksi. Radanrakennuksen ja kunnossapidon kannalta moniosainen ja paloittain määritelty siirtymäkaaren muoto voisi olla turhan monimutkainen.

Tutkimuksen tukena oli Meeri-radantarkastusvaunun aineistoa. Mittaukset suoritettiin Rantaradalla noin 100 km/h nopeudella, joten suurnopeusratoja tarkastellessa ei mittausaineisto tarjonnut vertailukohtaa esimerkiksi simulointiajojen tuloksiin. Mittausaineistoa voitiin kuitenkin verrata laskennallisiin siirtymäkaariin ja niissä tapahtuviin kiihtyvyyksiin ja todentaa nämä mallit paikkansapitäviksi. Tarkoitus oli myös hyödyntää samalla rataosalla tapahtuneen nopeuden nostoon liittyvien koeajojen tuloksia, mutta tätä aineistoa ei ollut saatavilla numeerisena, eikä graafisen aineiston vertaileminen tuntunut työn luonteen vuoksi mielekkäältä.

Matemaattisia malleja hyödyntämällä pystyttiin myös määrittelemään Blossin siirtymäkaarelle ja kosinikaarelle siirtymäkaarien pituudet 250 ja 300 km/h nopeuksille. Suomalaisista suunnitteluohjeista löytyy jo ohjeelliset pituudet siirtymäkaarille näillä nopeuksilla, jolloin poikittaiskiintyvyyden ja sen muutoksen arvoja vertaamalla pystyttiin määrittämään suunnitteluohjeiden puitteissa sopivat arvot myös Suomessa vieraille siirtymäkaarille.

Siirtymäkaarien välillä suurimmat erot ovat havaittavissa matemaattisessa tarkastelussa. Merkittävimpiä tekijöitä olivat poikittaiskiintyvyyden muutosnopeus ja kaarevuuden kuvaajan jatkuvuus. Simulointiohjelmisto osoittautui hyvinkin haastavaksi käyttää, ja työn aikana ilmeni, että Ed-vaunun kalustomalli tulisi korvata suurnopeusradalle suunnittelulla kalustomallilla.

Työn lopputulemana oli, että klotoidin käyttäminen siirtymäkaarena suurnopeusradalla ei välttämättä ole paras mahdollinen vaihtoehto sen päissä esiintyvän kaarevuuden ja kallistusviisteen epäjatkuvuuden vuoksi. Työn keskeisenä tavoitteena oli kuitenkin myös muodostaa suositukset siirtymäkaaren muodolle ja parametreille eri nopeuksilla, mutta tämä tavoite vaatii vielä lisätutkimuksia etenkin simuloinnin saralla.

Matti Liski: Optimering av en övergångskurva på en höghastighetsbana. Trafikledsverket. Helsingfors 2022. Lärdomsprov 6/2022. 70 sidor. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-405-014-2.

Sammanfattning

Vid körning på en höghastighetsbana ökar betydelsen för formen på övergångskurvan och lutningsavfasningen ytterligare. Trafiken ska framför allt vara säker, men samtidigt ska passagerarkomforten vara maximalt bra och de krafter som banan och materielen utsätts för ska vara så små som möjligt. Formen på en övergångskurva har optimerats redan länge, men i olika länder används fortfarande olika former på övergångskurvor.

Utgångspunkten för arbetet var att hitta en lämplig form på övergångskurvor på höghastighetsbanor för det finländska bannätet och den finländska materielen. Granskningen gjordes såväl matematiskt som genom att simulera olika situationer genom att dra nytta av Vampire PRO-programvaran. I den matematiska granskningen undersöktes i huvudsak formen på övergångsbågen, lutningsavfasningen och de tvärsaccelerationer som följer av dessa. I simuleringen var det möjligt att beakta också framfartsdynamiken mellan materielen och rälsen och räls- och hjulprofilens slitage.

Två typer av övergångskurvor som används i världen på höghastighetsbanor valdes att undersökas; Bloss övergångskurva som används i omfattande grad i Tyskland och den cosinuskurva som används till exempel på Shinkanse-banan i Japan. De kurvor som undersöktes valdes på grund av användningserfarenheterna och de relativt enkla definitionsekvationerna. Med tanke på banbygge och underhållet kan en övergångskurvform vilken utgörs av flera delar och definierats i avsnitt vara onödigt komplex.

Studien stöddes av material från Meeri-baninspektionsvagnen. Mätningar utfördes på Kustbanan i en hastighet på cirka 100 km/h, varför mätninganordningarna i granskningen av höghastighetsbanor inte erbjöd en jämförelsepunkt mot till exempel resultaten av simuleringskörningarna. Mätningmaterialet kunde dock jämföras mot kalkylmässiga övergångskurvor och de accelerationer som äger rum i dessa och det kunde styrkas att dessa modeller är korrekta. En ytterligare avsikt var att utnyttja resultaten av provkörningarna i anknnytning till hastighetsökningen på banavsnittet, men detta material var inte tillgängligt i numerisk form, och på grund av arbetets form var det inte meningsfullt att göra en jämförelse med det grafiska materialet.

Genom att utnyttja matematiska modeller var det också möjligt att definiera längderna på övergångskurvorna för Bloss övergångskurva och cosinuskurvan i hastigheter på 250 och 300 km/h. De finländska planeringsanvisningarna innehåller redan indikativa längder för övergångskurvor i dessa hastigheter, varvid det genom att jämföra tvärsaccelerationen och ändringar i denna var möjligt att inom ramen för planeringsanvisningarna fastställa lämpliga värden också för övergångskurvor som är främmande i Finland.

De största skillnaderna mellan övergångskurvorna kan observeras i den matematiska granskningen. De viktigaste faktorerna var förändringshastigheten för tvärs-

accelerationen och kontinuiteten i krökningsgrafan. Simuleringsprogramvaran visade sig vara väldigt utmanande att använda och under arbetet kom det fram att materielmodellen av Ed-vagnstyp borde ersättas med en materielmodell som är planerad för höghastighetsbanor.

Slutsatsen av arbetet var att användning av klotoid som övergångskurva på en höghastighetsbana inte nödvändigtvis är det bästa möjliga alternativet på grund av den krökning som förekommer i dess ändor och diskontinuiteten i dess lutningsavfasning. Det centrala målet med arbetet var dock att bilda rekommendationer för formen på övergångskurvan och dessa parametrar i olika hastigheter, men detta mål kräver ytterligare undersökningar, framför allt när det gäller simuleringen.

Matti Liski: Optimization of transition curves on a high-speed railway track. Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2022. Thesis 70 pages. ISSN 2490-1202, ISBN 978-952-405-014-2.

Abstract

When driving on a high-speed track, the importance of the shape of the transition curve and the rate of change of cant increases even more compared to regular railway. Above all, traffic must be safe, but at the same time travel comfort must be as good as possible and the forces on the track and equipment must be kept to a minimum. The shape of the transition curve has been optimized early on, but there are still many different shapes of the transition curve in use in different countries.

The starting point of the work was to find a shape for the transition curve of the high-speed line suitable for the Finnish rail network and rolling stock. The review was performed both mathematically and by simulating different situations using Vampire PRO software. In the mathematical analysis, the shape of the transition curve, the rate of change of cant and the resulting transverse accelerations were mainly studied. In the simulation, it was also possible to consider the running dynamics between the rolling stock and the rail and the wear of the rail and wheel profile.

Two types of transition curves used on the high-speed tracks around the world were selected for this study; The Bloss transition curve, which is widely used in Germany, and the cosine curve used on the Shinkansen line, for example, in Japan. The curves to be studied were chosen because of user experience and fairly simple definition equations. From the point of view of track construction and maintenance, the complex and piecewise-defined shape of the transition curve could be unnecessarily complicated.

The study was supported by material from the Mermec ROGER 800 track inspection vehicle. The measurements were performed on the railway section 001 of Finnish railway network at a speed of about 100 km/h, so when looking at high-speed tracks, the measurement data did not provide a reference point for the results of the simulation runs. However, the measurement data could be compared with the calculated transition curves and the accelerations in them, and these models could be verified as correct. The results of the test runs related to the speed increase on the same section of track were also intended to be used, but this material was not available numerically and the comparison of the graphic material did not seem meaningful due to the nature of the work.

Utilizing mathematical models, it was also possible to determine the lengths of the transition curves at the speeds of 250 and 300 km/h for the Bloss transition curve and the cosine curve. The Finnish design guidelines already provide indicative lengths for transition s at these speeds, so that by comparing the values of the transverse acceleration and its change, it was possible to determine suitable values for the transition curves within the framework of the Finnish design guidelines.

The largest differences between the transition curves are observed in the mathematical analysis. The most significant factors were the rate of change of the transverse acceleration and the continuity of the curvature. The simulation software

turned out to be very challenging to use, and during the work it became apparent that the stock model of the Ed-wagon should be replaced with a model designed for high-speed track.

The result of this work was that the use of a clothoid on a high-speed track as a transition curve may not be the best option due to the discontinuity of curvature and tilting at its endpoints. However, to determine the shape and parameters of the transition curve at high-speed tracks requires further research especially in the field of simulation.

Esipuhe

Tämän diplomityön on tehnyt Matti Liski Tampereen yliopistossa Rakennetun ympäristön tiedekunnassa. Suurnopeusratojen suunnittelua varten tulisi löytää suomalaiseseen rataverkkoon ja kalustoon sopiva siirtymäkaaren muoto. Tässä työssä tutkittiin mahdollisia vaihtoehtoja kartoittamalla vaihtoehtoja sekä tutkimalla muutamia paljon käytettyä siirtymäkaarityyppiä tarkemmin simulointien avulla.

Työtä ohjasivat tekniikan tohtori Heikki Luomala ja diplomi-insinööri Riku Varis Tampereen yliopistosta sekä diplomi-insinööri Anton Aronen Väylävirastosta.

Helsingissä marraskuussa 2022

Väylävirasto
Väylien suunnittelu

Sisältö

LYHENTEET JA MERKINNÄT.....	12
1 JOHDANTO.....	13
2 RADAN GEOMETRIA.....	14
2.1 Vaakageometria.....	14
2.1.1 Suora.....	14
2.1.2 Ympyränkaari.....	16
2.1.3 Siirtymäkaari.....	17
2.1.4 Vaihde.....	19
2.2 Pystygeometria.....	20
2.2.1 Kaltevuusjakso.....	20
2.2.2 Pyöristyskaari.....	21
3 SIIRTYMÄKAAREN GEOMETRIA.....	22
3.1 Suomen rataverkolla käytettävät siirtymäkaaret.....	23
3.1.1 Klotoidi.....	23
3.1.2 Helmertin siirtymäkaari.....	25
3.2 Maailmalla käytössä olevia suurnopeusratojen siirtymäkaaria.....	27
3.2.1 Blossin siirtymäkaari.....	27
3.2.2 Kosinin muotoinen siirtymäkaari.....	28
3.3 Siirtymäkaaren raja-arvot.....	29
4 SIIRTYMÄKAARIEN MALLINTAMINEN.....	31
4.1 Matemaattisen mallin muodostaminen.....	31
4.1.1 Klotoidi.....	34
4.1.2 Helmertin siirtymäkaari.....	34
4.1.3 Blossin siirtymäkaari.....	34
4.1.4 Kosini.....	35
4.2 Siirtymäkaarien laskennallisten kiihtyvyyksien vertailu.....	35
5 RADANTARKASTUSMITTAUSAINEISTO.....	40
5.1 Mittausaineisto.....	40
5.2 Tutkittava rataosuus.....	40
5.3 Mittaustulokset.....	41
5.3.1 Kaarevuus.....	41
5.3.2 Kallistus.....	43
5.3.3 Poikittaiskiihtyvyys.....	44
6 SIMULOINTIAJOT SIIRTYMÄKAARISSA.....	47
6.1 Simuloinnin hyödyntäminen tutkimuksessa.....	47
6.2 Simuloinnissa käytetty ratamalli.....	47
6.3 Kalustomalli.....	49
6.4 Simulointiajot.....	50
6.5 Simuloitavat tilanteet.....	51
6.5.1 Nykyinen geometria.....	51
6.5.2 Teoreettiset tilanteet.....	51
7 SIMULOINNIN TULOKSET.....	53
7.1 Tulokset tutkittavalla rataosalla.....	53
7.1.1 Laskettu geometria.....	53

7.1.2	Tulokset muunnelluilla siirtymäkaarilla	54
7.2	Tulokset suurnopeusradalla	56
7.2.1	Klotoidi	56
7.2.2	Blossin siirtymäkaari	58
7.2.3	Kosinikaari	61
7.3	Tulosten vertailu	63
7.4	Yleistettävyyys ja luotettavuus	65
8	YHTEENVETO	67
	LÄHTEET	69

Lyhenteet ja merkinnät

a	ympyränkaaren keskuskulma
β	raiteen kallistuskulma
a_q	poikittaiskiihtyvyyden
A	vaihteen osan pituus etujatkoksesta matemaattiseen pisteeseen tai klotoidin parametri
B	vaihteen osan pituus matemaattisesta pisteestä takajatkokseen
C	vaihteen osan pituus matemaattisesta pisteestä poikkeavan raiteen takajatkokseen
D	raiteen kallistus ympyränkaarella
$d(l)$	raiteen kallistus siirtymäkaaren kohdassa /
F	voima
g	maan putoamiskiihtyvyyden
G	paino
$g(l)$	kaarevuuden muutos siirtymäkaaren kohdassa /
I	kallistuksen vajo
l	siirtymäkaaren kohta radan keskilinjaa pitkin mitattuna sen alkupisteestä tai pystygeometriassa kaltevuusjakson pituus
k	kaarevuus, säteen käänteisluku
k_0	kaarevuus siirtymäkaaren alussa
k_l	kaarevuus siirtymäkaaren lopussa
$k(l)$	kaarevuus siirtymäkaaren kohdassa /
KM	ratakilometrin tunnus ratakilometrijärjestelmässä
L_d	kallistusviisteen pituus
L_i	suoran tai ympyränkaaren pituus
L_k	siirtymäkaaren pituus
m	massa
R	vaakageometriassa ympyränkaaren säde
R_0	kaarresäde siirtymäkaaren alussa
R_l	kaarresäde siirtymäkaaren lopussa
R_v	pystygeometriassa pyörästyskaaren säde
RATO	ratatekniset ohjeet, Väyläviraston ohjeet rataverkon ja ratalaitteiden suunnittelua, rakentamista, tarkastusta ja kunnossapitoa varten
s	kaltevuusjakson pituuskaltevuus tai kiskon kulkupintojen välinen etäisyys
t	suuntakulma
v	nopeus
z	kaltevuusjakson korkeusero

1 Johdanto

Suomessa on viime vuosina käynnistetty kaksi nopeampiin junayhteyksiin tähtäävää ratahanketta; Turun tunnin juna ja Suomirata. Molempien tarkoituksena on lyhentää matkustusajoja ja sitä kautta parantaa kilpailukykyä sekä mahdollistaa kestävä ja ilmastotavoitteet huomioivaa kasvua koko maassa. Yksi tapa matkustajien lyhentämiseen on niin kutsuttu suurnopeusrata, jossa matkustajakaluston nopeus on suurempi kuin 250 km/h. Tässä työssä tarkoituksena on tutkia, onko suurnopeusradoille löydettävissä jokin nykyisin pitkälti käytössä olevaa klotoidia edullisempi siirtymäkaaren muoto.

Työn toimeksiantaja on Sweco Infra & Rail Oy ja sen on tilannut Väylävirasto. Työn alussa tutkitaan kirjallisuusselvityksen keinoin Suomessa ja maailmalla käytössä olevia siirtymäkaaria ja näihin liittyviä suosituksia. Erityisen kiinnostuksen kohteena ovat maailmalla suurnopeusradoilla käytössä olevat siirtymäkaaren muodot.

Käytössä olevista siirtymäkaarista tutkitaan niitä kuvaavien matemaattisten yhtälöiden avulla rataa ja kalustoon kohdistuvia voimia. Mallintaminen tapahtuu teoreettisten siirtymäkaaria kuvaavien ja niihin liittyvien suorien ja ympyränkaarien yhtälöiden perusteella, eikä siinä huomioida radassa olevia poikkeamia tai kiskon ja pyöräkertojen välistä vuorovaikutusta. Näin pyritään löytämään teoreettisella tasolla mahdollisimman optimaalinen siirtymäkaaren muoto, joka on sekä rataa kohdistuvilta vaikutuksiltaan että matkustusmukavuudeltaan mahdollisimman hyvä. Seuraavaksi tutkitaan mittausaineiston perusteella luodussa ratamallissa tapahtuvia simulointiajoja. Simulointiajoissa tutkitaan tarkemmin siirtymäkaarien alueella tapahtuvaa kaluston ja radan välistä vuorovaikutusta ja mittausaineiston perusteella luotu ratamalli antaa todenmukaisen kuvan radassa esiintyvistä geometriapoikkeamista sekä niiden vaikutuksesta kaluston kulkuun.

Optimoinnin ja simuloinnin perusteella tarkastellaan, onko siirtymäkaarelle olemassa nykyisten käytössä olevien sijasta suurnopeusradoille paremmin sopivaa vaihtoehtoa ja muodostetaan suositukset siirtymäkaaren suunnitteluun ja kunnossapitoon suurnopeusradalla. Toisaalta simulointien avulla voidaan myös tutkia, onko paremmalla siirtymäkaaren muodolla käytännön merkitystä, kun huomioidaan radan tuenta mahdollisesti liittyvät haasteet ja geometriassa väistämättä ajan saatossa esiintyvät poikkeamat.

2 Radan geometria

Radan geometrian perusteiden ymmärtäminen on oleellista, jotta voidaan hahmottaa mitä siirtymäkaarella tarkoitetaan ja mikä sen tehtävä on. Tässä luvussa esitellään radan vaak- ja pystygeometrian peruselementtejä ja niihin liittyviä raja-arvoja.

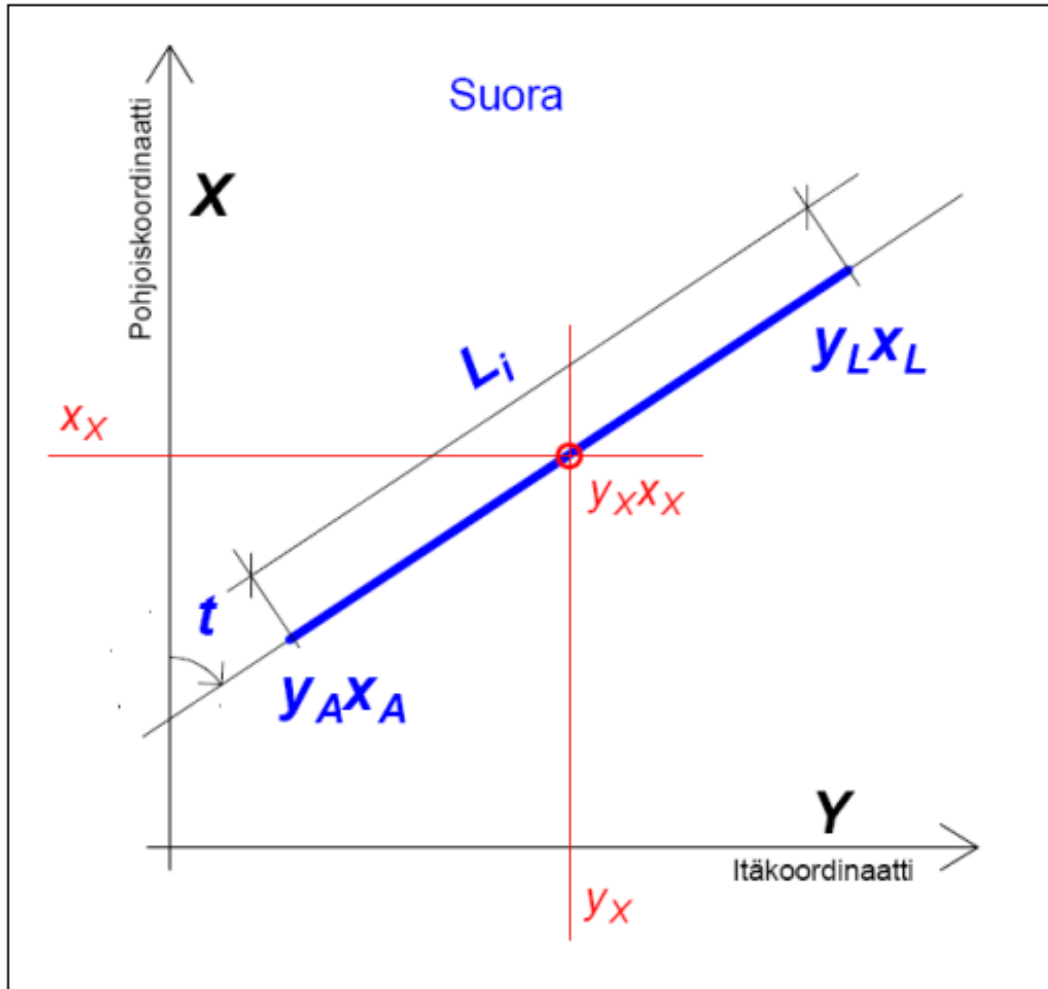
Radan geometrialla tarkoitetaan raiteen keskilinjaa kuvaavaa matemaattista mallia. Radan geometria on kolmiulotteinen, mutta se on yleensä jaettu erikseen vaak- ja pystygeometriaan ja edelleen näitä kuvaaviin elementteihin. Geometria esitetään jossakin geodeettisessä koordinaatistossa. (Väylävirasto, 2021c)

2.1 Vaakageometria

Raiteen vaakageometria muodostetaan sitä kuvaavien elementtien avulla. Näitä elementtejä ovat suora, ympyränkaari, siirtymäkaari ja vaihteet. Jokaiselle elementille on edelleen määritetty parametrin, jotka määrittävät sen muodon. Lisäksi elementin sijainti määritetään antamalla sen pääpisteille koordinaatit. Kun elementillä on muoto ja sijainti, on se määritelty ja osa raiteen geometriaa. (Taimela, 2012)

2.1.1 Suora

Raidegeometriassa suora on elementti, joka on suora viiva ja jolla on valmiissa geometriassa aina määrätty pituus. Toisin kuin yleisessä geometriassa, raidegeometriassa määrätyn pituisesta suorasta ei käytetä nimitystä jana. Suoran määrittää kaksi pistettä, jotka ovat sen alku- ja loppupisteet (y_1, x_1) ja (y_2, x_2) . Suoran parametri on sen pituus L_i . Vaihtoehtoisesti suora voidaan määrittää myös sen alku- tai loppupisteen, pituuden ja suuntakulman t avulla. (Taimela, 2012) Suora ja sen keskeiset parametrit on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Suora ja sen keskeiset pisteet ja parametrit. (Taimela, 2011)

Suoran pisteitä ja parametrejä voidaan laskea edelleen yleisesti geometriassa käytettyjen janan ja suoran pisteiden ja parametrien laskentaan käytettyjen kaavojen avulla.

Suoran pituus L_i voidaan laskea kaavalla

$$L_i = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}, \quad (1)$$

ja suuntakulma t kaavalla

$$t = \tan^{-1} \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}. \quad (2)$$

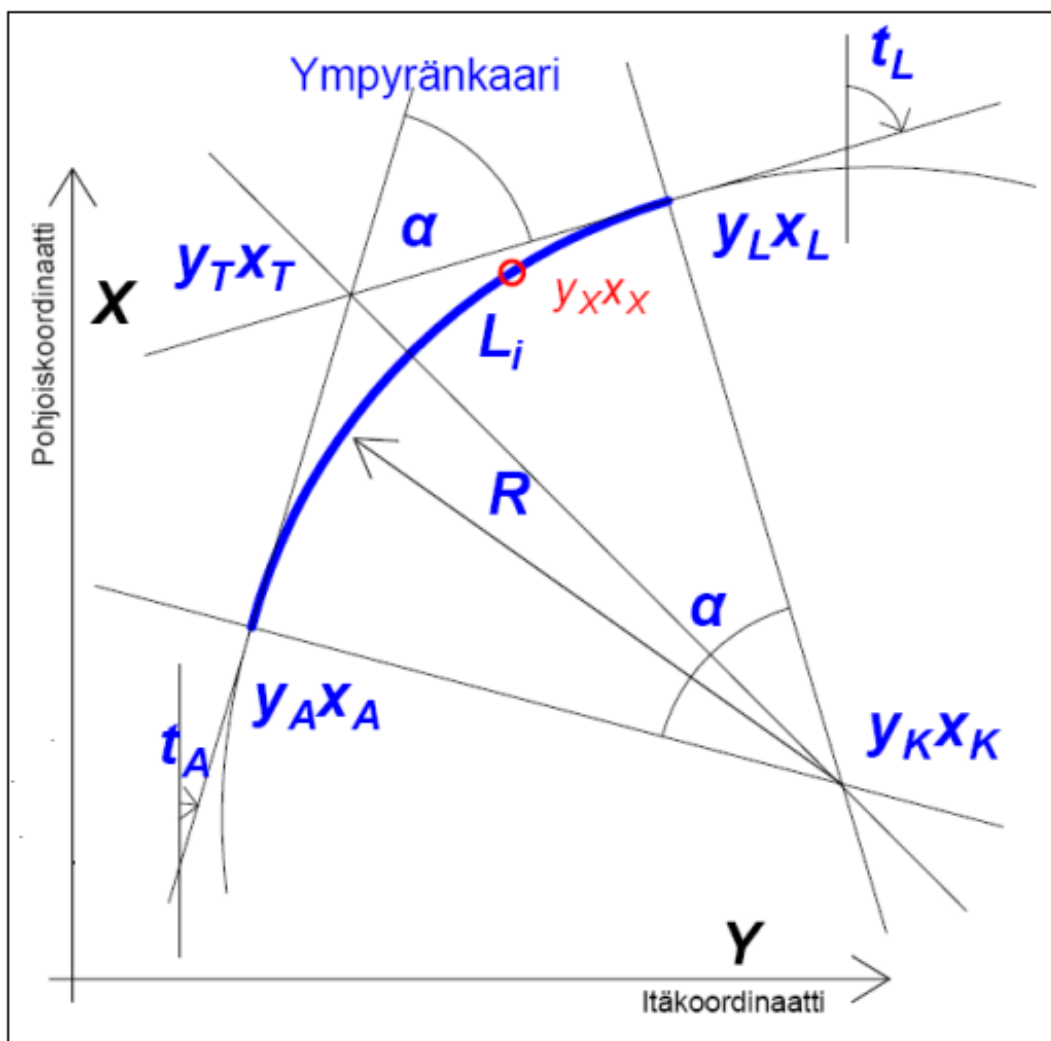
Kahden tunnetun pisteen kautta kulkevan suoran yhtälö, jonka avulla voidaan ratkaista mikä tahansa suoran piste, on muotoa

$$(y - y_1) = \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)}(x - x_1). \quad (3)$$

2.1.2 Ympyränkaari

Kaarre sisältää kaikki vaakatasossa tapahtuvat suunnanmuutoksen elementit, joissa raiteen suunta muuttuu samaan suuntaan. Kaarre voi muodostua myös pelkästä ympyränkaaresta, mutta yleensä kaarre sisältää ainakin siirtymäkaarria tai myös samaan suuntaan kääntyviä erisäteisiä ympyränkaaria. (Taimela, 2012)

Kirjassaan *Raidegeometria* (2012, s. 27) Reijo Taimela kuvaa ympyränkaarta seuraavasti: "Ympyränkaari on osa ympyrää, jonka säde on ympyränkaaren säde ja kaaren säteen keskipiste on ympyrän keskipiste." Ympyränkaari voi olla puolestaan määritelty usealla eri tavalla. Kun tunnetaan riittävä määrä tarvittavia tekijöitä, voidaan loput tärkeät pisteet ja parametrit laskea. (Taimela, 2011) Ympyränkaari ja sen keskeiset parametrit esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Ympyränkaari ja sen tärkeät pisteet ja parametrit. (Taimela, 2011)

Ympyränkaaren määrittämisen kannalta tärkeitä pisteitä ovat ympyrän keskipiste (y_0, x_0) , ympyränkaaren alku- ja loppupiste (y_1, x_1) ja (y_2, x_2) ja ympyränkaaren tangenttien leikkauspiste (y_t, x_t) . Ympyränkaaren alku- ja loppupisteitä voidaan kutsua myös tangenttipisteiksi. Parametreina ympyränkaarella on sen säde R , keskuskulma α ja pituus L_i . (Taimela, 2012)

Ympyränkaaren pituus lasketaan kaavalla:

$$L = 2\pi R \frac{\alpha}{400}, \quad (4)$$

missä R on ympyrän säde ja α on ympyrän keskipisteestä suorien tangenttipisteisiin piirrettyjen säteiden välinen suuntakulma gooneina. Keskuskulma α voidaan myös laskea loppu- ja alkusuunnan erotuksena, eli ympyränkaaren tangenttien suuntakulmien erotuksena. Kaaren pituuden kaavan avulla voidaan myös ratkaista ympyränkaaren keskuskulma.

Ympyränkaaren pisteitä voidaan ratkaista yleisen ympyrän yhtälön avulla, kun tiedetään yhden ympyränkaarella olevan pisteen koordinaatit ja sen säde.

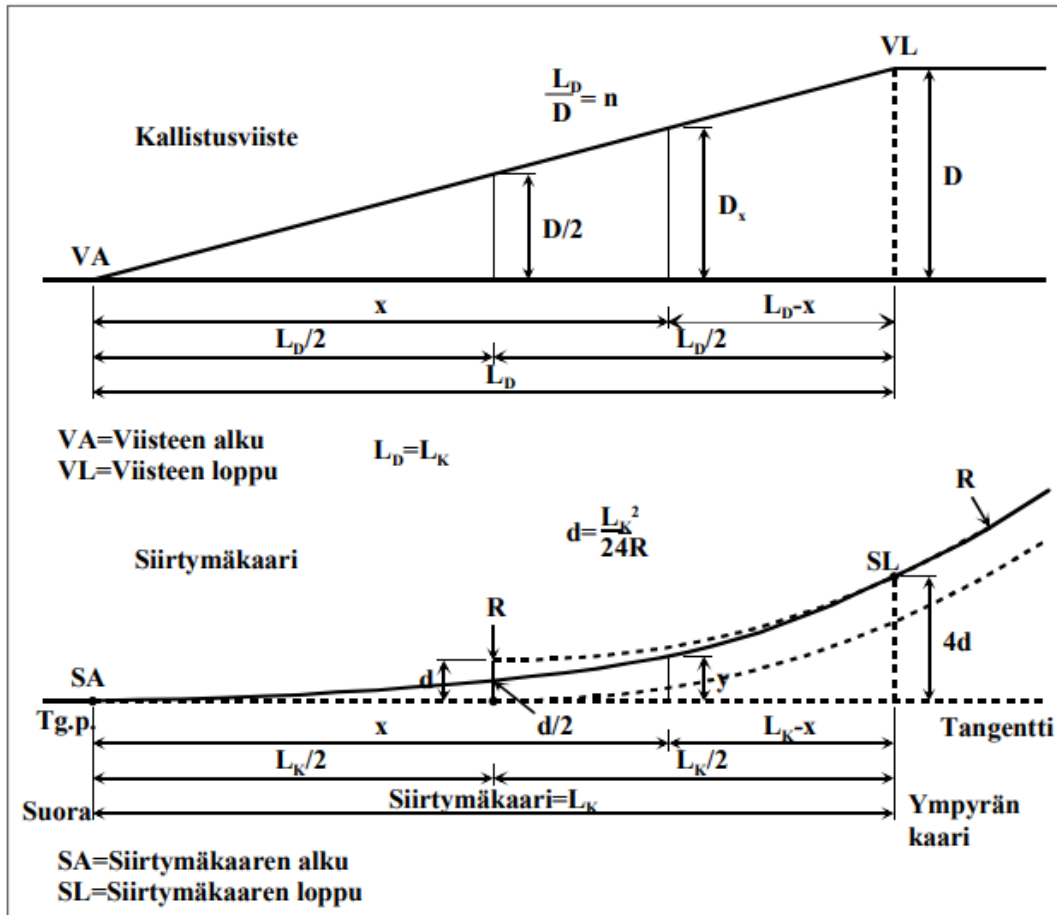
$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (5)$$

2.1.3 Siirtymäkaari

Siirtymäkaarta käytetään, jotta siirtymän suoralta kaarteeseen tapahtuu mahdollisimman sulavasti. Siirtymäkaari parantaa näin matkustusmukavuutta ja pienentää raiteeseen kohdistuvia voimia. Jos siirtymäkaarta ei käytetä, tapahtuu poikittaiskiihtyvyyden nykyys pistemäisesti suoran ja ympyränkaaren välisessä tangenttipisteessä. Tällöin nykyksen arvo saattaa kasvaa liian suureksi. Siirtymäkaarella kaarevuuden, eli kaarresäteen R käänteisarvo, kasvaa nolasta kohti ympyränkaaren kaarevuutta $1/R$. (Taimela, 2012)

Mikäli kaarteessa käytetään kallistusta, käytetään tällöin myös aina siirtymäkaaria. Raiteen kallistus muuttuu kallistusviisteen aikana suoran arvosta kaarteeseen arvoon. Kallistusviisteen pituus on sama kuin siirtymäkaaren pituus, mutta viisteen muoto riippuu siirtymäkaaren muodosta. Siirtymäkaarta voidaan käyttää myös niin kutsuissa korikaarissa, joissa on useita kaarresäteiltään erisuuria samaan suuntaan kääntyviä ympyränkaaria. Siirtymäkaarta tarvitaan korikaarissa, jotta nykyksen arvo ei kasva liian suureksi tai mikäli ympyränkaarissa käytetään erisuuruisia kallistuksia. (Taimela, 2012) Eri siirtymäkaaren muodot on esitelty tarkemmin luvussa 3.

Kuvassa 3 on esitetty, kuinka kallistusviiste muuttuu siirtymäkaaren matkalla. Kun kuljetaan suoralta kohti ympyränkaarta, kaarevuuden muutos siirtymäkaarella lisää poikittaiskiihtyvyyttä, tai kallistuksen vajuusta. Siirtymäkaarella kuitenkin kallistusta muutetaan kallistusviisteellä, jolloin poikittaiskiihtyvyys, eli kallistuksen vajuus, pienenee samassa suhteessa. (Taimela, 2012)



Kuva 3. Siirtymäkaari ja siihen liittyvä suora kallistusviiste. (Taimela, 2011)

Poikkeustapauksia lukuun ottamatta kallistusviisteen pituus L_D ja siirtymäkaaren pituus L_K ovat yhtä suuret. (Taimela, 2012) Kallistuksen arvo siirtymäkaaren kulloisessakin kohdassa riippuu käytettävän siirtymäkaaren ja sitä vastaavan kallistusviisteen muodosta.

Jotta kallistusviiste pienentää kallistuksen vajausta, eli poikittaiskiihtyvyyttä, samassa suhteessa kuin se kaarevuuden kasvaessa kasvaa, tulee kallistusviisteen olla suoraan verrannollinen siirtymäkaaren kaarevuuteen kulloisessakin kohdassa l . Kun siirtymäkaaren kaarevuutta kohdassa l kuvataan funktiolla $k(l)$ ja siirtymäkaaren jälkeisen kaaren kaarevuus on k_1 , saadaan kaava

$$\frac{k(l)}{k_1} = \frac{d(l)}{D}, \quad (6)$$

missä $d(l)$ on kallistus kussakin kohdassa ja D on siirtymäkaaren jälkeisen kaaren kallistus.

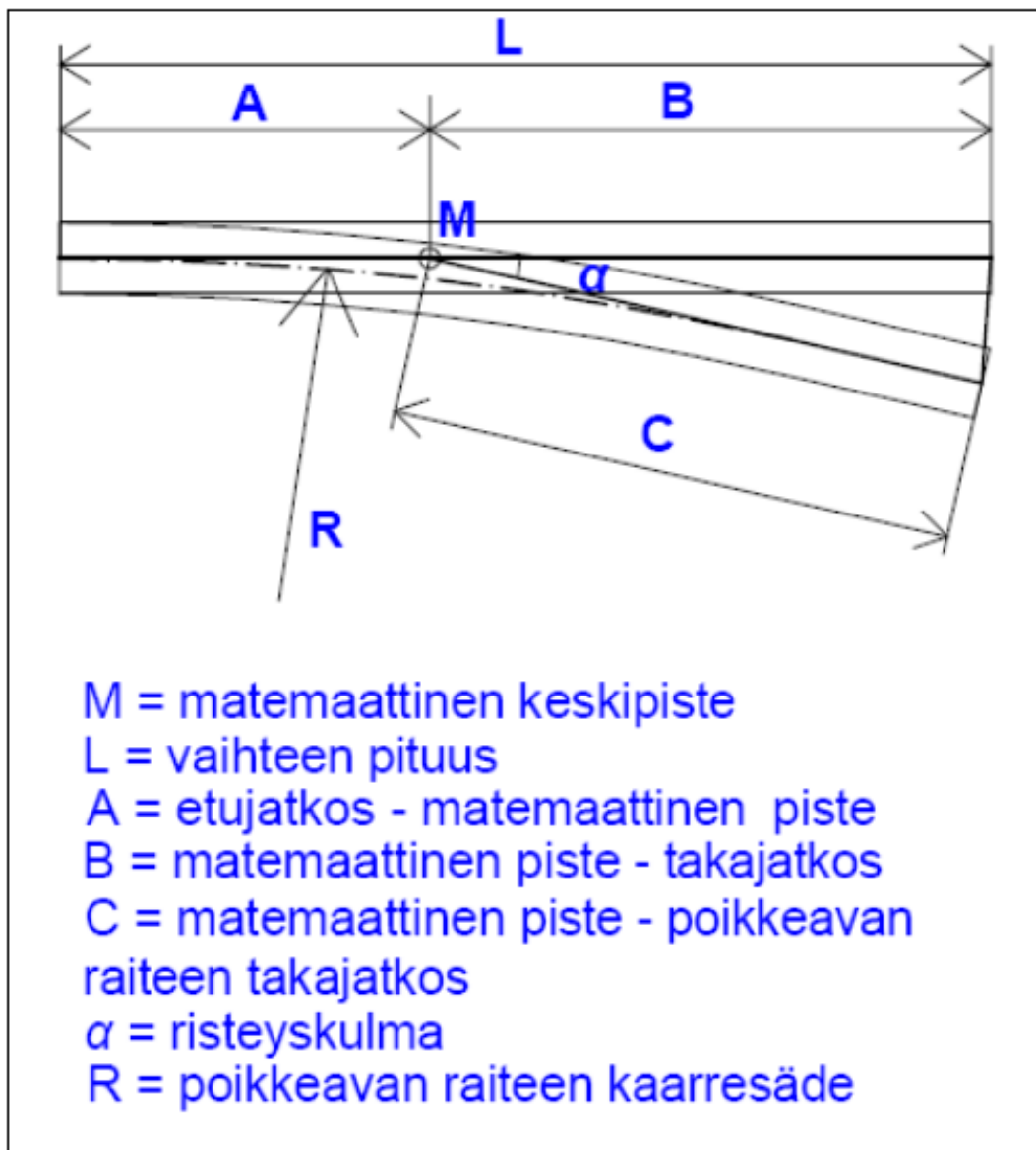
Kaavasta 7 voidaan ratkaista kallistusviisteen muoto $d(l)$

$$d(l) = \frac{k(l)D}{k_1}. \quad (7)$$

2.1.4 Vaihde

Vaihteeksi kutsutaan raiteiden liityntäkohtaa, jossa liikennettä voidaan ohjata tarpeen vaatiessa raiteelta toiselle. Erilaisilla vaihteilla voidaan tehdä eri muotoisia ja eri kulkunopeuden mahdollistavia yhteyksiä raiteiden välille. Raidegeometriaa suunniteltaessa vaihteet ovat valmiita elementtejä, joissa vaihteen geometria ja mitat ovat valmiiksi annettu. (Taimela, 2012)

Vaihteen muodon, päämitat ja risteyskulman määrittää vaihteen tyyppi. Useimmissa vaihteissa on suora raide ja poikkeava raide. Suora raide kulkee nimensä mukaisesti suoraa linjaa vaihteen läpi, ja poikkeava raide kääntyy raiteesta sivulle. Vaihteen jatkokseksi kutsutaan kohtaa, johon vaihde-elementin raiteet päättyvät ja vaihde liittyy muuhun raiteeseen. Näissä kohdissa vaihteen ja liittyvien raiteiden tangenttien tulee olla yhteneväiset. (Taimela, 2012) Yksinkertaisen vaihteen päämittoja on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Yleisen vaihdetyypin, yksinkertaisen vaihteen, päämittoja. (Taimela, 2012)

Vaihteen pituus L tarkoittaa vaihteen suoran raiteen pituutta. Pituus voidaan jakaa lisäksi kahteen osaan A ja B . A ulottuu etukatkoksesta matemaattiseen pisteeseen ja B vastaavasti matemaattisesta pisteestä takajatkokseen. Matemaattinen piste M on piste, jolla tarkoitetaan vaihteiden jatkosten tangenttien leikkauspistettä. Poikkeavan raiteen pituus C mitataan poikkeavan raiteen takajatkoksen tangentin suunnassa etäisyytenä matemaattiseen pisteeseen. Muita suunnittelun kannalta oleellisia mittoja ovat risteyskulma α , jolla tarkoitetaan suoran ja poikkeavan raiteiden takajatkoksen tangenttien välistä kulmaa, sekä poikkeavan raiteen kaarresäde R . (Taimela, 2012)

2.2 Pystygeometria

Raiteen pystygeometria muodostuu kahdesta pääelementistä, suorista kaltevuusjaksoista ja näiden väliin sijoitettavista kaltevuustaitteiden pyöristyskaarista. Nämä määrittävät paikalleen kaltevuusjaksojen taitepisteiden sijainneilla, korkeuksilla ja pyöristyskaarien kaarresäteillä. Elementit muodostavat raiteen korkeusviivan, jonka kunkin pisteen korkeus voidaan laskea näiden elementtien avulla. (Taimela, 2012)

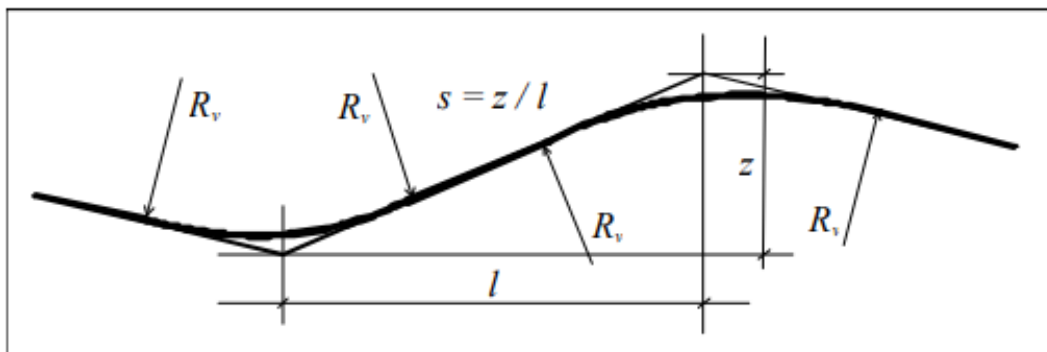
Raiteen korkeusasema ilmoitetaan radan korkeusviivan kohdalla, joka on määritetty kulkemaan aluslevyn tai välilevyn alapinnan tasossa kiskon kulkureunan kohdalla. Suoralla ja kallistamattomassa raiteessa raiteen kisko ilmoitetaan toisen, ja kallistetussa raiteessa alemman kiskon kulkureunan kohdalta.

2.2.1 Kaltevuusjakso

Kaltevuusjakso määrittetään sen taitepisteiden avulla. Sen pituus l on sen taitepisteiden välinen vaakasuora etäisyys raiteen keskilinjaa pitkin. Kaltevuusjakson korkeus z lasketaan taitepisteiden korkeuksista. Kaltevuusjakson pituuskaltevuus s lasketaan kaavalla

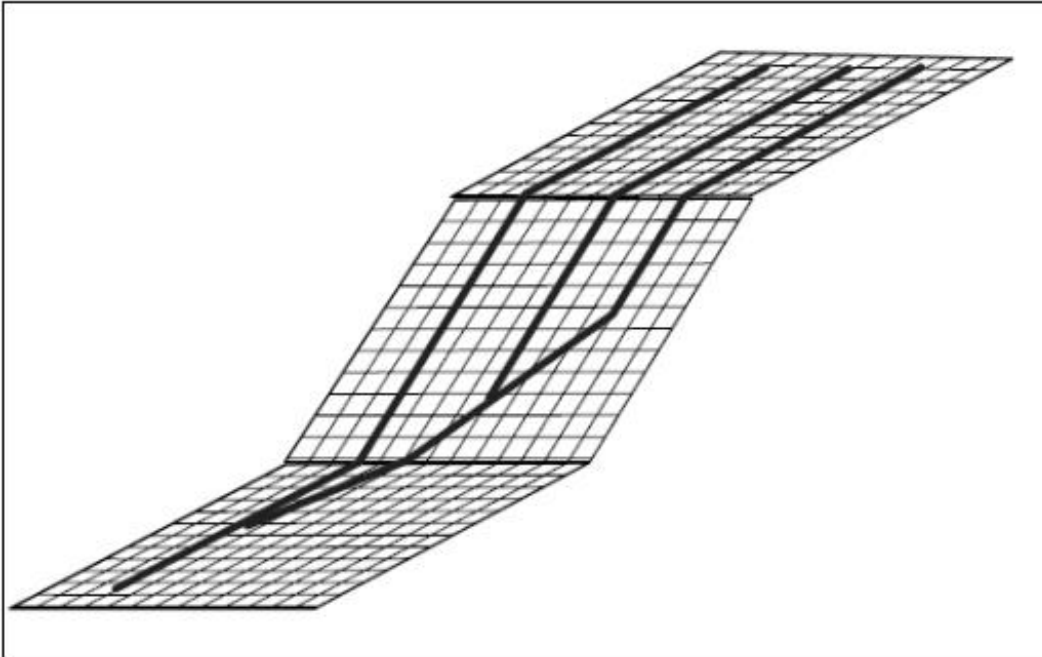
$$s = \frac{z}{l}, \quad (8)$$

mikä voidaan ilmoittaa joko promilleina tai desimaalilukuna. Negatiivinen arvo tarkoittaa alamäkeä pituusmittauksen suunnassa. (Taimela, 2012) Kaltevuusjakso kuvattuna kuvassa 5.



Kuva 5. Kaltevuusjakson pituus, korkeus ja pituuskaltevuus. (Taimela, 2011)

Useampiraiteisilla radoilla tai ratapihoilla voidaan määrittää usealle raiteelle yhteinen korkeusviiva. Tällöin korkeusviiva määritetään yhdelle määrittelyraiteelle ja muut raiteet noudattavat määrittelyraiteen korkeusviivatasoa. Näin korkeusviivan taso on kaikilla raiteilla sama määrittelyraiteen kohtisuorassa poikkileikkauksessa. Pituuskaltevuudet voivat kuitenkin erota toisistaan, mikäli poikkileikkausten väliset etäisyydet vaihtelevat tai radat eivät ole yhdensuuntaiset. (Taimela, 2012) Kaltevuustason periaate esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Kaltevuustaso. (Taimela, 2012)

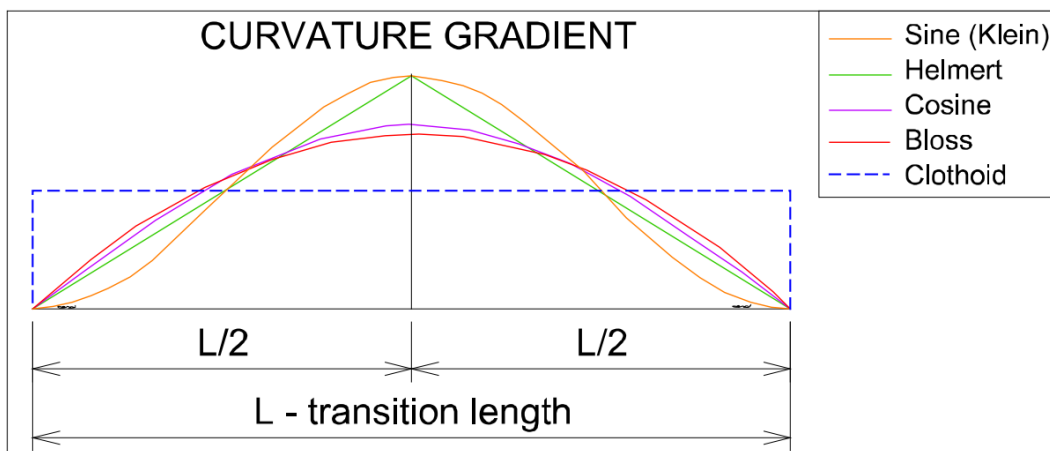
Pyöristyskaarien tangenttipisteet rajaavat kaltevuusjaksolta sen suoran osuuden, jonka pituus on pyöristyskaarien välinen vaakasuora etäisyys. Suoran osuuden pituuksia ei kuitenkaan yleensä merkitä suunnitelmiin, vaan suunnitelmissa käytetään koko kallistusjakson pituutta taitepisteestä taitepisteeseen. Korkeusviivan korkeus suoran osuudella voidaan laskea suoran yhtälöitä käyttäen. (Taimela, 2012)

2.2.2 Pyöristyskaari

Korkeusviiva pyöristetään taitepisteiden kohdalla pyöristyskaarella. Pyöristyskaari on aina ympyränkaari ja sen sädettä kutsutaan pyöristyskaarresäteeksi ja merkitään R_v . Pyöristyskaaren määrittävät kaltevuusjaksojen taitepiste, siitä lähtevät kaltevuusjaksot ja pyöristyskaarresäde. Pyöristyskaarien yhteydessä ei käytetä siirtymäkaaria.

3 Siirtymäkaaren geometria

Siirtymäkaarena voidaan käyttää matemaattista käyrää, jonka kaarevuus muuttuu käyrän matkalla. Siirtymäkaaret voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: lineaarisesti ja epälineaaraisesti kaareutuviin. (Ciobanu, 2015) Lineaarisesti kaareutuvia siirtymäkaaria ovat esimerkiksi klotoidi ja kolmannen asteen käyrä. Näissä poikittaiskiihtyvyyden arvo on koko siirtymäkaaren matkalla vakio. Epälineaarisesti kaareutuvia siirtymäkaaria ovat muun muassa Blossin, Ruchin ja Helmertin siirtymäkaaret sekä sinimuotoinen käyrä. Epälineaarisesti kaareutuivissa kaarissa poikittaiskiihtyvyys on siirtymäkaaren päätepisteissä nolla ja se saavuttaa maksimiarvonsa yleensä kaaren keskellä. (Ciobanu, 2015) Eri siirtymäkaaria ja niiden kaarevuuden muutoksia esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Eri siirtymäkaarien kaarevuuden muutoksia. (Ciobanu, 2015)

Suomessa yleisimmin käytössä oleva siirtymäkaaren muoto on klotoidi, mutta Suomen rataverkolla esiintyy myös Helmertin siirtymäkaaria, joskin niitä pyritään uusissa suunnitelmissa välttämään. (Taimela, 2012)

Klotoidia pidettiin pitkään optimaalisena siirtymäkaaren muotona sen geometrinen ominaisuuksien vuoksi. Myöhemmin on kuitenkin poikittaiskiihtyvyyden muutoksia ja sen vaikutuksia kalustoon tutkittaessa huomattu, ettei klotoidi ole paras mahdollinen siirtymäkaaren muoto suurilla nopeuksilla liikuttaessa. (Brustad ja Dalmo, 2020) (Klauder, 2012) Merkittävin haittapuoli lineaarisissa siirtymäkaarissa, ja täten myös klotoidissa, on siirtymäkaaren päässä tapahtuva äkillinen poikittaiskiihtyvyyden muutoksen ja kallistusviisteen ilmaantuminen. (Ciobanu, 2015) (Pascal, 2020) Tämän ilmiön voimakkuus on verrannollinen nopeuden neliöön heikentäen matkustusmukavuutta ja kasvattaen rataa kohdistuvia voimia. (Ciobanu, 2015)

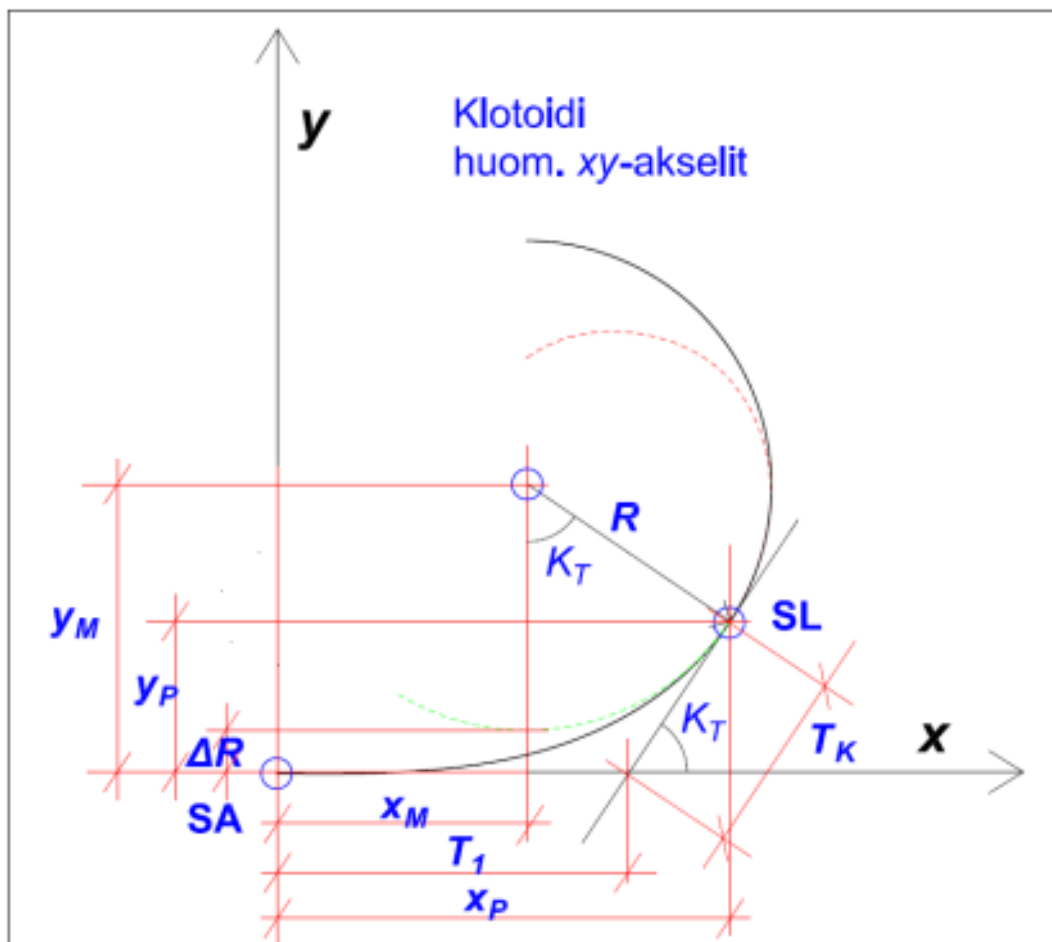
Siirtymäkaaren kallistusviisteen muoto riippuu siirtymäkaaren kaarevuutta kuvaavasta yhtälöstä. Kulloisenkin kaarevuuden ja kallistuksen suhde siirtymäkaaren jälkeiseen kaarevuuteen ja kallistukseen ovat aina samat, jolloin kallistus d missä tahansa siirtymäkaaren kohdassa l voidaan ratkaista kaavasta 7, joka on esitetty kappaleessa 2.1.3.

3.1 Suomen rataverkolla käytettävät siirtymäkaaret

Suomessa on käytössä kaksi eri siirtymäkaaren muotoa, klotoidi ja niin kutsuttu Helmertin siirtymäkaari, joka tunnetaan myös nimellä 4. asteen siirtymäkaari. Klotoidissa kaarevuus kasvaa suoraviivaisesti kohti siihen liittyvän kaaren kaarresädettä ja vastaavasti Helmertin siirtymäkaaren muoto on 4. asteen käyrä. (Taimela, 2012)

3.1.1 Klotoidi

Klotoidin käsittely matemaattisesti on kaavoista laskemalla äärimmäisen työlästä. Tästä johtuen laskenta suoritetaan yleensä koneellisesti laskinta tai tietokonetta käyttäen. Klotoidi ja siihen liittyvät muuttujat on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Klotoidi ja sen muuttujat. Klotoidi on pisteiden SA ja SL välinen musta viiva ja punainen katkoviiva on klotoidin jatke. Pisteestä SL jatkuva musta viiva on ympyränkaari, jonka jatke on vihreä katkoviiva. (Taimela, 2011)

Klotoidin laskennassa käytettävät muuttujat ovat klotoidin parametri A , ympyränkaaren säde R , ympyränkaaren lyhin etäisyys klotoidin tangentista ΔR , klotoidin pituus L_K , klotoidin tangenttien välinen kulma K_T , klotoidin alku- ja päätepisteen

koordinaatit (x_0, y_0) ja (x_1, y_1) , klotoidin pitkä tangentti siirtymäkaaren alkupisteestä tangenttien leikkauspisteeseen T_1 ja klotoidin lyhyt tangentti siirtymäkaaren loppupisteestä tangenttien leikkauspisteeseen T_K .

Klotoidi määritellään kaavalla

$$RL_K = A^2, \quad (9)$$

klotoidin tangenttien välinen kulma voidaan puolestaan laskea

$$K_T = \frac{L_K^2}{2A^2}, \quad (10)$$

ja nämä yhdistämällä voidaan kaava 3 esittää muodossa

$$K_T = \frac{L_K^2}{2A^2} = \frac{L_K}{2R} = \frac{A^2}{2R^2}. \quad (11)$$

Klotoidin käsittelyn helpottamiseksi se voidaan approksimoida käyttäen sen likiarvona kolmannen asteen käyrää. Tällöin käytetään kaavaa

$$y \approx \frac{x^3}{6RL_K}, \quad (12)$$

jossa y kuvaa y -koordinaattia kohdassa x ja $y \ll x$. Kolmannen asteen käyrä kuvaa klotoidia hyvin, kun liikutaan klotoidin suoralta lähtevällä alkuosalla. Kolmannen asteen käyrän kaavassa käyrän mitta x ja siirtymäkaaren pituus L_K lasketaan kuitenkin x -akselia pitkin, kun klotoidin kaavassa käytetään klotoidia pitkin kuljettua matkaa. Y -koordinaatin laskemiseen siirtymäkaaren lopussa käytetään kaavaa

$$y \approx 4d \approx \frac{L_K^2}{6R}, \quad (13)$$

missä d kuvaa ympyränkaaren sivusiirtymää, joka lasketaan kaavalla

$$d \approx \frac{L_K^2}{24R}. \quad (14)$$

Kaarevuus klotoidin kussakin kohdassa l määritellään kaavalla

$$k(l) = k_0 + \frac{l}{L_k R} \quad (15)$$

ja vastaavasti kaarevuuden muutos saadaan derivoimalla kaarevuus muuttujan l suhteen

$$g(l) = \frac{\partial k(l)}{\partial l} = \frac{1}{L_k R}. \quad (16)$$

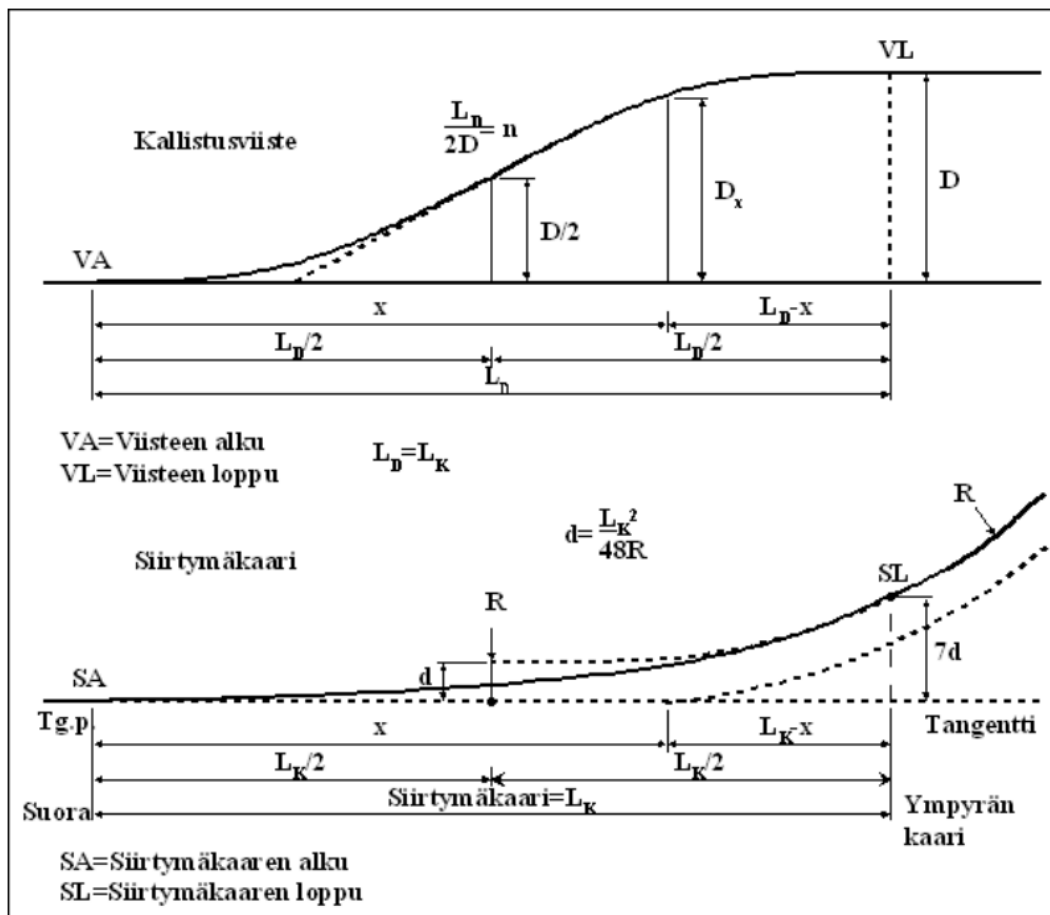
Koska klotoidin kaarevuus muuttuu suoraviivaisesti, on sen kaarevuuden muutos suhteessa kaarella kuljettuun matkaan aina siirtymäkaaren pituudesta ja ympyränkaaren kaarevuudesta riippuva vakio.

Klotoidissa käytetään suoraa kallistusviistettä sen kaarevuuden muuttuessa myös suoraviivaisesti. Klotoidin kallistus voidaan määrittää sijoittamalla sen kaarevuuden yhtälö kaavaan 17 jolloin saadaan, että

$$d(l) = \frac{D \left(k_0 + \frac{l}{L_k R} \right)}{k_1} \quad (17)$$

3.1.2 Helmertin siirtymäkaari

Helmertin siirtymäkaari on 4. asteen kaari ja siitä käytetään myös vastaavaa nimitystä. Sen yhteydessä käytetään S-kallistusviistettä, jonka muoto noudattaa siirtymäkaaren kallistuskuvaaajaa. Helmertin siirtymäkaaren kallistusviiste ja kaarevuuskuvaaja esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Helmertin siirtymäkaaressa käytettävä S-kallistusviiste ja sitä vastaava siirtymäkaaren kuvaaja. (Taimela, 2011)

Helmertin siirtymäkaaresta saadaan klotoidia pidempi samalla ympyränkaaren sivusiirtymällä d . Samalla sivusiirtymällä Helmertin siirtymäkaaren pituus on $\sqrt{2}$ kertaa klotoidin pituus. Tästä voi olla etua, mikäli kallistusviisteen jyrkkyys on klotoidin yhteydessä määräävä tekijä. Etu on kuitenkin verrattain pieni, sillä parametrien raja-arvot ovat S-kallistusviisteessä erilaiset kuin suorassa kallistusviisteessä. Helmertin siirtymäkaaressa geometrian muutos tapahtuu pääosin siirtymäkaaren keskiosassa, jolloin raiteeseen kohdistuvat voimat ovat suuremmat kuin klotoidissa.

Tämä aiheuttaa haasteita raiteen muodon säilyttämisessä ja kunnossapidossa. (Taimela, 2012)

Helmertin siirtymäkaaren y-koordinaatti voidaan laskea kaavoilla

$$y \approx \frac{x^4}{6RL_K}, \text{ kun } x \leq \frac{L_K}{2} \quad (18)$$

ja

$$y \approx -\frac{x^4}{6RL_K} + \frac{2x^3}{3RL_K} - \frac{x^2}{2R} + \frac{L_K x}{6R} - \frac{L_K^2}{48R}, \text{ kun } \frac{L_K}{2} < x \leq L_K, \quad (19)$$

joissa x ja L_K lasketaan suoraa x-akselia pitkin ja R on ympyränkaaren kaarresäde metreinä. (Taimela, 2011)

Tässä työssä on kuitenkin mielekkäämpää käyttää merkintätapaa, jossa Helmertin siirtymäkaaren kaarevuus kulloisessakin siirtymäkaaren kohdassa l saadaan laskettua kaavoilla

$$k(l) = \frac{1}{R_0} + 2 \left(\frac{l}{L} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right), \text{ kun } x \leq \frac{L_K}{2} \quad (20)$$

ja

$$k(l) = \frac{1}{R_1} - 2 \left(\frac{(L-l)^2}{L} \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_0} \right) \text{ kun } \frac{L_K}{2} < x \leq L_K, \quad (21)$$

missä R_0 on siirtymäkaarta edeltävän kaaren kaarresäde ja R_1 on siirtymäkaaren jälkeisen kaaren kaarresäde, l on siirtymäkaaren alusta kuljettu matka ja L siirtymäkaaren kokonaispituus. (Kufver, 1997)

Kaavat voidaan myös laskennan helpottamiseksi kirjoittaa muodossa

$$k(l) = k_0 + 2 \left(\frac{l}{L} \right)^2 (k_1 - k_0), \text{ kun } x \leq \frac{L_K}{2} \quad (22)$$

ja

$$k(l) = k_1 - 2 \left(\frac{(L-l)^2}{L} \right) (k_1 - k_0) \text{ kun } \frac{L_K}{2} < x \leq L_K, \quad (23)$$

missä k_0 ja k_1 ovat kaarresäteitä R_0 ja R_1 vastaavat kaarevuudet $k_0 = \frac{1}{R_0}$ ja $k_1 = \frac{1}{R_1}$.

Kaavat 22 ja 23 derivoimalla muuttujan l suhteen, voidaan määrittää Helmertin siirtymäkaaren kohdassa l tapahtuva kaarevuuden muutos.

$$g(l) = \frac{\partial k(l)}{\partial l} = 4l \frac{(k_1 - k_0)}{L^2} \text{ kun } x \leq \frac{L_K}{2} \quad (24)$$

ja

$$g(l) = \frac{\partial k(l)}{\partial l} = 4 \frac{(k_1 - k_0)(L - l)}{L^2} \text{ kun } \frac{L_K}{2} < x \leq L_K. \quad (25)$$

Kallistusviivteen muoto voidaan ratkaista sijoittamalla Helmerin kaarevuuden yhtälöt kaavaan 17, jolloin

$$d(l) = \frac{\left(k_0 + 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 (k_1 - k_0)\right) D}{k_1 - k_0} \text{ kun } x \leq \frac{L_K}{2} \quad (26)$$

ja

$$d(l) = \frac{\left(k_0 - 2 \left(\frac{(L-l)^2}{L}\right) (k_1 - k_0)\right) D}{k_1 - k_0} \text{ kun } \frac{L_K}{2} < x \leq L_K. \quad (27)$$

3.2 Maailmalla käytössä olevia suurnopeusratojen siirtymäkaaria

Japani oli ensimmäinen maa, joka otti laaja-alaisesti käyttöön epälineaariset siirtymäkaaret tuolloin vastavalmistuneella Tōkaidō Shinkansenin suurnopeusradalla vuonna 1964. Nykyisinkin kosnin avulla määritetty siirtymäkaari on käytössä kaikilla maan suurnopeusjunaverkon rataosuuksilla, missä nopeus ylittää 100 km/h. (Ciobanu, 2015)

Euroopassa Saksa oli ensimmäinen maa, jossa asennettiin epälineaarisia siirtymäkaaria Torcheim – Bamberg rataosuudelle. Nykyisin Saksassa on käytössä klotoidin lisäksi Blossin, Helmertin ja sinimuotoiset siirtymäkaaret. (Ciobanu, 2015)

Ranskassa on päädytty niin suurnopeus- kuin tavanomaisillakin radoilla eräänlaiseen hybridiratkaisuun. Siirtymäkaarena käytetään klotoidia jonka päihin on lisätty epälineaarinen siirtymäkaarijakso pehmentämään kaarevuuden muutosta. Suurnopeusradalla jakson pituus on 40 ja perinteisillä rataosuuksilla 20 metriä. (Ciobanu, 2015)

3.2.1 Blossin siirtymäkaari

Saksassa käytössä oleva Blossin siirtymäkaari määritellään kaavalla

$$y = \frac{1}{R} \left(\frac{l^4}{4L^2} - \frac{l^5}{10L^3} \right), \quad (28)$$

missä R on ympyränkaaren kaarresäde, L on siirtymäkaaren pituus ja l on matka siirtymäkaaren alusta. (Ciobanu, 2015) Vastaavasti Blossin siirtymäkaaren kaarevuus kulloisessakin kohdassa voidaan määrittää kaavalla

$$k(l) = \frac{1}{r(l)} = k_0 + \left(\frac{3l^2}{L^2} - \frac{2l^3}{L^3} \right) (k_1 - k_0), \quad (29)$$

missä r on siirtymäkaaren kaarresäde kohdassa l sekä k_0 siirtymäkaarta edeltävän ja k_1 siirtymäkaaren jälkeisen kaaren kaarevuus. (Kufver, 1997)

Edelleen derivoimalla kaavaa 29 siirtymäkaaren kohdan l suhteen saadaan kaarevuuden muutos siirtymäkaaren kohdassa l .

$$g(l) = \frac{6l}{RL^2} \left(1 - \frac{l}{L}\right) (k_1 - k_0). \quad (30)$$

Kaarevuuden muutos saa maksimiarvon kohdassa $l = \frac{L}{2}$, joka on myös nähtävissä kuvassa 7 esitetystä kaarevuuden muutosta kuvaavista käyristä. Kyseisessä kohdassa kaarevuuden muutos saavuttaa arvon

$$g\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{3}{2RL}. \quad (31)$$

Blossin siirtymäkaareissa kallistusviiste noudattaa yhtälöä

$$d(l) = \frac{\left(k_0 + \left(\frac{3l^2}{L^2} - \frac{2l^3}{L^3}\right)(k_1 - k_0)\right)D}{k_1 - k_0}, \quad (32)$$

Samoja suunnitteluparametreja käyttäen tulee Blossin siirtymäkaaresta 50 % pidempi kuin vastaavassa kohdassa käytettävästä klotoidin muotoisesta siirtymäkaaresta. Vaikka Blossin siirtymäkaarta käytettäessä voitaisiin käyttää kokonaisuudessaan jyrkempää kallistusviistettä, tulee siirtymäkaaresta silti väistämättä klotoidia pidempi. Tämä täytyy huomioida jo suunnittelutyön varhaisessa vaiheessa, eritoten mikäli nykyisiä rataosuuksia aiotaan muuttaa hyödyntämällä Blossin siirtymäkaarta. (Ciobanu, 2015)

3.2.2 Kosinin muotoinen siirtymäkaari

Japanissa käytössä olevan kosinimuotoisen siirtymäkaaren kaarevuus kulloisessakin siirtymäkaaren kohdassa määritellään kaavalla

$$k(l) = k_0 + \frac{\left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{L}l\right)\right)}{2} \times (k_1 - k_0), \quad (33)$$

missä L on siirtymäkaaren pituus ja R ympyränkaaren säde (Kufver, 1997). Kaarevuuden muutos saadaan derivoimalla kaava 33 siirtymäkaarta kuljetun matkan suhteen

$$g(l) = \frac{\partial k(l)}{\partial l} = \frac{\pi \sin\left(\frac{\pi}{L}l\right)}{2L} \times (k_1 - k_0), \quad (34)$$

Vastaavasti raitteen kallistus kussakin kohdassa l voidaan laskea edelleen Kufverin (1997) mukaan kaavalla

$$d(l) = \frac{d}{2} \left(1 - \cos\frac{\pi}{L}l\right). \quad (35)$$

Molemmissa kaavoissa (10) ja (11) L on siirtymäkaaren kokonaispituus, l on siirtymäkaaren alusta kuljettu matka. Kaavassa 10 R on siirtymäkaaren jälkeisen ympyränkaaren kaarresäde ja kaavassa 11 d on ympyränkaareissa käytetty kallistus. (Fischer, 2009)

Kuten Blossin siirtymäkaaren tapauksessa, tulee myös kosinin muotoisella kaarella ottaa huomioon siirtymäkaaren klotodia suurempi pituus. (Ciobanu, 2015)

3.3 Siirtymäkaaren raja-arvot

RATO 2 (Väylävirasto, 2021c) määrittelee raiteen kallistuksen maksimiarvoksi sepeliraiteella 150 mm ja lupa-arvoksi 180 mm. Samassa julkaisussa kerrotaan kallistuksen vajauden maksimiarvoiksi 100 mm, kun $250 \text{ km/h} < V \leq 300 \text{ km/h}$ ja 80 mm nopeudella $V > 300 \text{ km/h}$. Nopeudella $250 \text{ km/h} < V \leq 300 \text{ km/h}$ voidaan sepeliraiteella käyttää kallistuksen lupa-arvoa 130 mm ja arvon voi korottaa 150 mm raiteilla, jotka eivät ole sepelipohjaisia, esimerkiksi kiintoraiteella. Taulukossa 1 on esitetty kallistuksen vajauksen maksimiarvot ja niitä vastaavat poikittaiskiihtyvyyden arvot.

Kallistuksen vajauksen tai poikittaiskiihtyvyyden raja-arvot eivät varsinaisesti vaikuta siirtymäkaaren suunnitteluun, sillä kallistuksen vajoisuus eikä poikittaiskiihtyvyys voi siirtymäkaarella olla suurempi kuin ympyränkaarella. Siirtymäkaaren matkalla määrääväksi tekijäksi muodostuu usein kallistusviiste ja sen jyrkkyys. Kallistusviisteen pituus mitoitetaan useimmiten kallistusviisteen muodon ja jyrkkyyden mukaan, ja tällöin kallistusviiste määrittää siirtymäkaaren pituuden. Siirtymäkaaren suunnittelussa oleellisempaa onkin huomioida poikittaiskiihtyvyyden muutosnopeus itse poikittaiskiihtyvyyden sijaan, sillä poikittaiskiihtyvyys saavuttaa suurimman arvonsa vasta ympyränkaarella, kun taas ympyränkaarella liikuttaessa on poikittaiskiihtyvyyden muutosnopeus 0. (Väylävirasto, 2021c) Raja-arvot kallistuksen vajauksen muutosnopeudelle ja nykyäkselle on esitetty myös taulukossa 1.

Taulukko 1. Kallistuksen vajauksen ja poikittaiskiihtyvyyden sekä niiden muutosnopeuksien raja-arvot. (Väylävirasto, 2021c)

Nopeus (km/h)	250–300	> 300
Kallistuksen vajauksen (mm) raja-arvo	100	80
Poikittaiskiihtyvyyden raja-arvo (m/s^2)	0.61	0.49
Kallistuksen vajauksen muutosnopeuden raja-arvo (mm/s)	49	73
Poikittaiskiihtyvyyden muutoksen raja-arvo (m/s^2)	0.30	0.45

Raiteiden mitoituksessa käytetään käytännön syistä yleensä nopeuden yksikkönä km/h, mutta laskennan helpottamiseksi on tämän työn myöhemmissä vaiheissa käytetyissä kaavoissa pitäyditty yksikössä m/s.

Kallistusviisteen pituuden, ja sitä kautta siirtymäkaaren pituuden, määrittämiseen käytetään Suomessa tyypillisesti niin kutsuttua viistekerrointa. Viistekerroin lasetaan suoralle kallistusviisteelle, eli klotoidin tapauksessa kaavalla

$$n = 1000 \frac{L}{D} \quad (36)$$

ja S-kallistusviisteen, eli Helmertin siirtymäkaaren, tapauksessa kaavalla

$$n = 500 \frac{L}{D}, \quad (37)$$

missä L on siirtymäkaaren pituus ja D on ympyränkaaren kallistusviiste. (Väylävirasto, 2021c) Viistekertoimen suositus-, raja- ja lupa-arvot esitetty taulukossa 2. Taulukossa esitettyjen arvojen lisäksi viistekertoimen on oltava pääraiteella vähintään 400 ja sivuraiteella vastaavasti 300. Väyläviraston ohjeessa *RATO 2* ei kerrota miten viistekertoimen kaavat muodostuvat, joten viistekertoimien laskeminen muille siirtymäkaarille tai sen käyttäminen siirtymäkaarien vertailussa ei ole mahdollista.

Taulukko 2. Viistekertoimen arvot esitettynä nopeuden (V) kertoimena (Väylävirasto, 2021c)

	Suora kallistusviiste	S-kallistusviiste
Suositteltava	10V	6V
Raja-arvo	8V	5V
Lupa-arvo	6V	4V

Taulukossa 1 esitettyjä arvoja käytetään tässä työssä myös niiden siirtymäkaarien tarkasteluun, jotka eivät ole Suomessa käytössä. Viistekertoimen käyttäminen ei ole mielekästä, sillä sen määritelmää ei ole suunnitteluohjeessa kerrottu eikä sen määrittäminen arvailujen perusteella ole tällöin uusille siirtymäkaarityypeille varmastikaan virheetöntä.

4 Siirtymäkaarien mallintaminen

4.1 Matemaattisen mallin muodostaminen

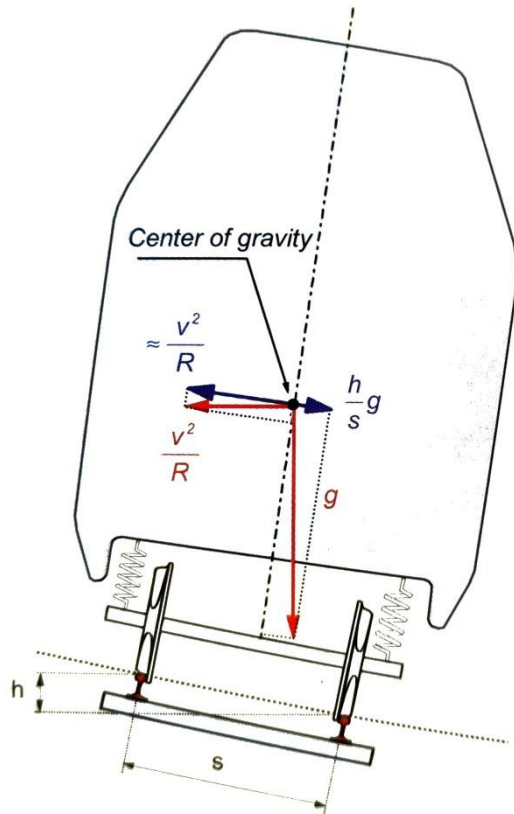
Tässä työssä käytettävä matemaattinen malli perustuu siirtymäkaareissa tapahtuvaan poikittaiskiihtyvyyteen ja sen muutoksiin. Suomessa kaaria tai siirtymäkaaria ei yleensä mitoiteta käyttämällä poikittaiskiihtyvyyttä, vaan kallistuksen vajaan, jonka tunnus on I ja yksikkö on millimetri. Poikittaiskiihtyvyyden ja kallistuksen vajaan välinen yhteys ilmaistaan kaavalla

$$a_q = \frac{gI}{1600}, \quad (38)$$

missä a_q on kompensoimaton poikittaiskiihtyvyys kiskon selän ja vaunun lattian tason suunnassa ja g Maan putoamiskiihtyvyys. (Väylävirasto, 2021c)

Toinen määräävä tekijä, etenkin siirtymäkaareissa, on nykäys. Suomessa nykäystä kuvataan usein kallistuksen vajaan muutosnopeutena. Nykäyksen määrittäminen kulloisessakin siirtymäkaaren kohdassa on hankalaa poikittaiskiihtyvyyden yhtälön ollessa siirtymäkaarten tapauksissa melko monimutkainen johtuen muuttuvasta kaarresäteestä sekä raiteen kallistuksesta. Kuitenkin kallistuksen ja kaarevuuden suhteen ollessa suoraan verrannolliset siirtymäkaaren jälkeisen ympyränkaaren kallistukseen ja kaarevuuteen, voidaan todeta poikittaiskiihtyvyyden muutoksen saavuttavan suurimman arvonsa siinä siirtymäkaaren kohdassa, missä kaarevuuden muutoskin on suurin. Näin voidaan laskea poikittaiskiihtyvyyden muutoksen suurin ja mitoittava arvo.

Junaan kaarteissa kohdistuvat voimat on esitetty kuvassa 10. Kuvassa kiskon selän ja vaunun lattian tason suuntainen kiihtyvyys on approksimoitu yhtä suureksi, kuin vaakasuuntainen poikittaiskiihtyvyys, mutta alla on vastaavat kaavat johdettu myös ilman kyseistä approksimointia.



Kuva 10. Vaunuun kohdistuvat kiihtyvyydet kaarteessa. Kuvan tunnus h vastaa tässä työssä käytettyä kallistuksen tunnusta D . (Esveld, 2001)

Lattian tason ja kiskon selän suuntainen kompensoimaton poikittaiskiihtyvyys lasketaan junan keskeiskiihtyvyyden avulla. Keskeiskiihtyvyys kaarteessa ilmaistaan kaavalla

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (39)$$

v on nopeus ja R on ympyräradan säde. Edelleen junan vaakasuoraa keskihakuvoimaa vastaava keskeiskiihtyvyysovoima F

$$F_x = \frac{mv^2}{R}, \quad (40)$$

missä m on junan massa. Lisäksi junaan vaikuttaa painovoima, jonka aiheuttama paino lasketaan kaavalla

$$G = mg. \quad (41)$$

Raitteen kallistuskulma β voidaan laskea kiskojen kulkupintojen välisestä matkasta s ja raitteen kallistuksesta D kaavalla

$$\sin \beta = \frac{D}{s}, \quad (42)$$

jolloin

$$\beta = \sin^{-1} \frac{D}{s}. \quad (43)$$

Kiskojen kulkupinnan välisen etäisyyden vaakasuora komponentti s_x ratkaistaan kaavasta

$$s_x = \cos \beta = \cos(\sin^{-1} \left(\frac{D}{s} \right)), \quad (44)$$

jolloin

$$s_x = \sqrt{1 - \frac{D^2}{s^2}}. \quad (45)$$

Näin saadaan keskihakuvoiman kiskon selän ja lattian tason suuntainen komponentti, joka on

$$F_{lattia} = F_s \cos \beta = F_s \sqrt{1 - \frac{D^2}{s^2}} \quad (46)$$

ja junan painon kiskon selän ja lattian tason suuntainen komponentti saadaan vastaavasti laskettua kaavalla

$$G_{lattia} = G \sin \beta = mg \frac{D}{s}. \quad (47)$$

Vähentämällä nämä toisistaan saadaan kiskon selän ja vaunun lattian tason suuntaiseksi kompensoimattomaksi voimaksi

$$F_{lattia} - G_{lattia} = m \frac{v^2}{R} \sqrt{1 - \frac{D^2}{s^2}} - mg \frac{D}{s} \quad (48)$$

joka voidaan muuttaa kiihtyvyydeksi jakamalla se puolittain vaunun massalla, jolloin saadaan kompensoimaton poikittaiskiihtyvyys a_q vaunun lattian ja kiskon tasossa

$$a_q = \frac{v^2}{R} \sqrt{1 - \frac{D^2}{s^2}} - g \frac{D}{s}. \quad (49)$$

Siirtymäkaarta kuvaamaan käytetään kaarevuuden yhtälöitä ja säteen ja kaarevuuden yhteys on $R = 1/k$, joten kirjoitetaan

$$a_q = kv^2 \sqrt{1 - \frac{D^2}{s^2}} - g \frac{D}{s}. \quad (50)$$

Laskemisen yksinkertaistamiseksi approksimoidaan kaava vielä muotoon

$$a_q = kv^2 - g \frac{D}{s}, \quad (51)$$

sillä $\sqrt{1 - \frac{D^2}{s^2}} \approx 1$, mutta ei kuitenkaan suurempaa kuin 1,

jolloin sen approksimoiminen voisi pienentää kasvattaa poikittaiskiihtyvyyden arvoja ja johtaa virheisiin mitoitustilanteessa. Näin toimitaan myös suomalaisessa mitoitushjeessa ja esimerkiksi Coenraad Esveld oppikirjassaan *Modern Railway Track* (2001), joten monimutkaisemman kaavan hieman tarkemman teoreettisen kiihtyvyyden arvon määrittämiseksi ei ole tarpeen.

4.1.1 Klotoidi

Klotoidin poikittaiskiihtyvyyttä voidaan mallintaa sijoittamalla kaavaan 51 sen kalistusviisteen ja kaarevuuden yhtälöt, jolloin saadaan

$$a_{qc} = \left(k_0 + \frac{l}{L_k R}\right) v^2 - g \frac{\left(\frac{D \left(k_0 + \frac{l}{L_k R}\right)}{k_1}\right)}{s}, \quad (52)$$

4.1.2 Helmertin siirtymäkaari

Helmertin siirtymäkaarella poikittaiskiihtyvyys noudattaa yhtälöä

$$a_{qh} = \left(k_0 + 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 (k_1 - k_0)\right) v^2 - g \frac{D_1 \left(k_0 + 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 (k_1 - k_0)\right)}{k_1 - k_0} \frac{1}{s}, \quad (53)$$

kun $l < \frac{L}{2}$ ja

$$a_{qh} = \left(k_1 - 2 \left(\frac{(L-l)^2}{L}\right) (k_1 - k_0)\right) v^2 - g \frac{\left(k_0 - 2 \left(\frac{(L-l)^2}{L}\right) (k_1 - k_0)\right) D}{k_1 - k_0} \frac{1}{s} \quad (54)$$

kun $\frac{L}{2} \leq l < L$.

4.1.3 Blossin siirtymäkaari

Blossin siirtymäkaarella poikittaiskiihtyvyys noudattaa yhtälöä

$$a_{qb} = \left(k_0 + \left(\frac{3l^2}{L^2} - \frac{2l^3}{L^3}\right) (k_1 - k_0)\right) v^2 - g \frac{\left(k_0 + \left(\frac{3l^2}{L^2} - \frac{2l^3}{L^3}\right) (k_1 - k_0)\right) D}{k_1 - k_0} \frac{1}{s}, \quad (55)$$

Kaava saadaan sijoittamalla poikittaiskiihtyvyyden kaavaan 51 Blossin siirtymäkaaren kaarevuutta kuvaava yhtälö 29.

4.1.4 Kosini

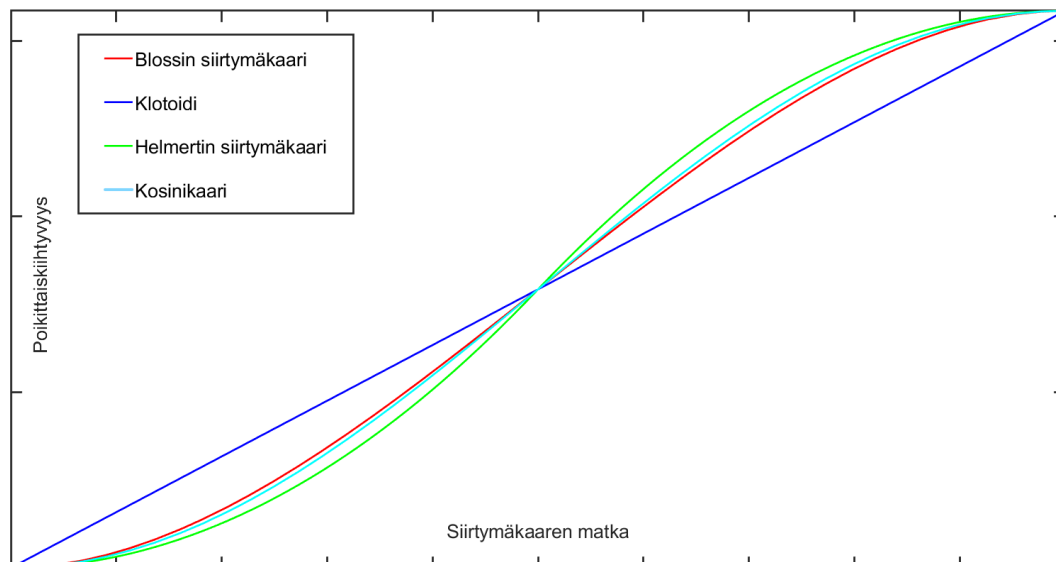
Kosinikaarella poikittaiskiihtyvyys noudattaa yhtälöä

$$a_{qcos} = \left(k_0 + \frac{(1 - \cos \frac{\pi l}{L})}{2} \times (k_1 - k_0) \right) v^2 - g \frac{\frac{D}{2}(1 - \cos \frac{\pi l}{L})}{s}. \quad (56)$$

Kaava saadaan sijoittamalla poikittaiskiihtyvyyden kaavaan 51 kosinikaaren kaarevuutta kuvaava yhtälö 33.

4.2 Siirtymäkaarien laskennallisten kiihtyvyyksien vertailu

Eri siirtymäkaarien laskennallisten poikittaiskiihtyvyyksien kuvaajat on esitetty kuvassa 11. Kuvasta voidaan tulkita, että pienin poikittaiskiihtyvyyden muutos on klotoidilla, mutta sen molemmissa päässä on epäjatkuvuuskohta, joka johtuu klotoidin kaarevuuden yhtälöstä, sillä poikittaiskiihtyvyys on suoraan verrannollinen siirtymäkaaren, tai kaaren, kaarevuuteen. Blossin siirtymäkaarella puolestaan on pienin muutosnopeus niistä yhtälöistä, jotka kuitenkin suoraan tai ympyränkaareen liittyttäessä muodostavat jatkuvan funktion. Myös kosinikaaren derivaatan maksimiarvon nähdään jo sen kuvaajan perusteella olevan Helmertin siirtymäkaarta pienempi.



Kuva 11. Poikittaiskiihtyvyyksien kuvaajat eri siirtymäkaarityypeille.

Jotta voidaan tarkastella siirtymäkaarien eroja suurilla nopeuksilla ajettaessa, tulee ensin määrittää mitkä ovat ne kaarresäteet ja kallistukset, jotka ovat nykyisten ohjeistusten puitteissa edes mahdollisia. Taulukossa 3 on esitetty Väyläviraston suunnitteluohjeen *RATO 2:n* mukaisia eräitä normaalikallistuksia vastaavia kaarresäteitä. Taulukon mukaisesti suositellaan, että pääasiallisesti matkustajaliikenteeseen tarkoitettulla radalla kallistus olisi enintään 80–110 mm.

Taulukko 3. Normaalikallistuksia ja vastaavia kaarresäteitä eri tavoitenopeuksilla. (Väylävirasto, 2021c)

Normaalikallistus [mm]	Tavoitenopeus [km/h]										
	50	80	100	120	140	160	180	200	220	250	300
-110	300	500	800	1100	1500	1900	2400	3000	3500	4500	6500
-80	400	700	1000	1500	2000	2600	3300	4000	5000	6500	8500
-40	600	1200	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9500	18000

Taulukosta 3 valittiin tarkasteltavaksi ainoastaan suurimmalla normaalikallistuksella käytettävät kaarresäteet. Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty eri kallistuksilla ja nopeuksilla laskettuja kallistuksen vajauksen ja poikittaiskiihtyvyyden arvoja. Sinisellä on esitetty Väyläviraston ohjeen mukaista taulukkoa 3 vastaavat poikittaiskiihtyvyyden ja kallistuksen vajauksen mukaiset arvot. Punaisella on esitetty ne arvot, joissa luvussa 3.4 esitetyt suurnopeusradalle määritetyt raja-arvot ylittyvät. Vihreällä puolestaan esitetty tässä työssä tarkasteltaviksi ja myöhemmässä vaiheessa myös simuloitaviksi valitut siirtymäkaaren arvot.

Tarkasteltavaksi valitut siirtymäkaaren arvot valittiin *RATO 2*:ssa esitetyn normaalikallistuksia ja niitä vastaavien kaarresäteiden pohjalta. Poikittaiskiihtyvyyksien ja kallistuksen vajauksen arvot taulukoitiin eri kallistuksilla ja kulkunopeuksilla, jonka jälkeen valittiin myös sellaiset kallistuksen raja- ja lupa-arvoa vastaavat kaarresäteiden arvot, joilla kallistuksen vajauksen ja poikittaiskiihtyvyyden arvot vastasivat likimain taulukossa 3 esitettyjen arvojen vastaavia tuloksia.

Taulukko 4. Poikittaiskiihtyvyyden arvoja eri kallistusten, nopeuksien ja kaarresäteiden mukaan taulukoituna.

Poikittaiskiihtyvyys (m/s ²)							
	Kallistus (mm)	110	110	130	130	150	150
	Nopeus	250	300	250	300	250	300
Kaarresäde (m)	2500	1.25	2.10	1.13	1.98	1.01	1.86
	2600	1.18	2.00	1.06	1.87	0.94	1.75
	2700	1.11	1.90	0.99	1.77	0.87	1.65
	2800	1.05	1.81	0.93	1.68	0.80	1.56
	2900	0.99	1.72	0.87	1.60	0.74	1.47
	3000	0.93	1.64	0.81	1.52	0.69	1.40
	3100	0.88	1.57	0.76	1.44	0.64	1.32
	3200	0.83	1.50	0.71	1.37	0.59	1.25
	3300	0.79	1.43	0.66	1.31	0.54	1.18
	3400	0.74	1.37	0.62	1.25	0.50	1.12
	3500	0.70	1.31	0.58	1.19	0.46	1.06
	3600	0.67	1.25	0.54	1.13	0.42	1.01
	3700	0.63	1.20	0.51	1.08	0.38	0.96
	3800	0.59	1.15	0.47	1.03	0.35	0.91
	3900	0.56	1.11	0.44	0.98	0.32	0.86
	4000	0.53	1.06	0.41	0.94	0.29	0.82
	4100	0.50	1.02	0.38	0.90	0.26	0.77
	4200	0.47	0.98	0.35	0.86	0.23	0.73
	4300	0.45	0.94	0.32	0.82	0.20	0.70
	4400	0.42	0.90	0.30	0.78	0.18	0.66
	4500	0.40	0.87	0.27	0.75	0.15	0.62
	4600	0.37	0.84	0.25	0.71	0.13	0.59
	4700	0.35	0.80	0.23	0.68	0.11	0.56
	4800	0.33	0.77	0.21	0.65	0.09	0.53
	4900	0.31	0.74	0.19	0.62	0.06	0.50
	5000	0.29	0.71	0.17	0.59	0.04	0.47
	5100	0.27	0.69	0.15	0.56	0.03	0.44
	5200	0.25	0.66	0.13	0.54	0.01	0.42
	5300	0.24	0.64	0.11	0.51	-0.01	0.39
	5400	0.22	0.61	0.10	0.49	-0.03	0.37
5500	0.20	0.59	0.08	0.47	-0.04	0.34	
5600	0.19	0.57	0.06	0.44	-0.06	0.32	
5700	0.17	0.54	0.05	0.42	-0.07	0.30	
5800	0.16	0.52	0.03	0.40	-0.09	0.28	
5900	0.14	0.50	0.02	0.38	-0.10	0.26	
6000	0.13	0.48	0.01	0.36	-0.12	0.24	
6100	0.12	0.46	-0.01	0.34	-0.13	0.22	
6200	0.10	0.45	-0.02	0.32	-0.14	0.20	
6300	0.09	0.43	-0.03	0.31	-0.15	0.18	
6400	0.08	0.41	-0.04	0.29	-0.17	0.17	
6500	0.07	0.39	-0.06	0.27	-0.18	0.15	

Taulukko 5. Kallistuksen vajauksen arvoja eri kallistusten, nopeuksien ja kaarresäteiden mukaan taulukoituna.

Kallistuksen vajoaus (mm)							
	Kallistus (mm)	110	110	130	130	150	150
	Nopeus	250	300	250	300	250	300
Kaarresäde (m)	2500	203	340	183	320	163	300
	2600	190	323	170	303	150	283
	2700	179	307	159	287	139	267
	2800	169	292	149	272	129	252
	2900	159	278	139	258	119	238
	3000	150	265	130	245	110	225
	3100	142	253	122	233	102	213
	3200	134	242	114	222	94	202
	3300	127	231	107	211	87	191
	3400	120	221	100	201	80	181
	3500	113	211	93	191	73	171
	3600	107	203	87	183	67	163
	3700	101	194	81	174	61	154
	3800	96	186	76	166	56	146
	3900	90	178	70	158	50	138
	4000	85	171	65	151	45	131
	4100	81	164	61	144	41	124
	4200	76	158	56	138	36	118
	4300	72	152	52	132	32	112
	4400	68	146	48	126	28	106
	4500	64	140	44	120	24	100
	4600	60	135	40	115	20	95
	4700	56	129	36	109	16	89
	4800	53	124	33	104	13	84
	4900	49	120	29	100	9	80
	5000	46	115	26	95	6	75
	5100	43	111	23	91	3	71
	5200	40	106	20	86	0	66
	5300	37	102	17	82	-3	62
	5400	35	98	15	78	-5	58
5500	32	95	12	75	-8	55	
5600	30	91	10	71	-10	51	
5700	27	87	7	67	-13	47	
5800	25	84	5	64	-15	44	
5900	22	81	2	61	-18	41	
6000	20	78	0	58	-20	38	
6100	18	74	-2	54	-22	34	
6200	16	71	-4	51	-24	31	
6300	14	69	-6	49	-26	29	
6400	12	66	-8	46	-28	26	
6500	10	63	-10	43	-30	23	

Taulukoitujen arvojen perusteella valittavat kaarresäteet, kallistukset ja nopeudet esitetty edelleen taulukossa 6. Siirtymäkaarten pituudet valitaan siten, että poikittaiskiihtyvyyden tai kallistuksen vajauksen muutosnopeudet eivät ylitä. Samalla voidaan tutkia mikä siirtymäkaaren muoto on suunnittelun jouhevuuden ja ympyränkaarensivusiirtymän kannalta edullisin vaihtoehto.

Taulukko 6. Työssä tutkittaviin siirtymäkaariin liittyvät kaarresäteet, kallistukset ja nopeudet.

Kallistus (mm)	110	110	130	130	150	150
Nopeus (km/h)	250	300	250	300	250	300
Kaarresäde (m)	4500	6500	4000	5800	3600	5300

5 Radantarkastusmittausaineisto

5.1 Mittausaineisto

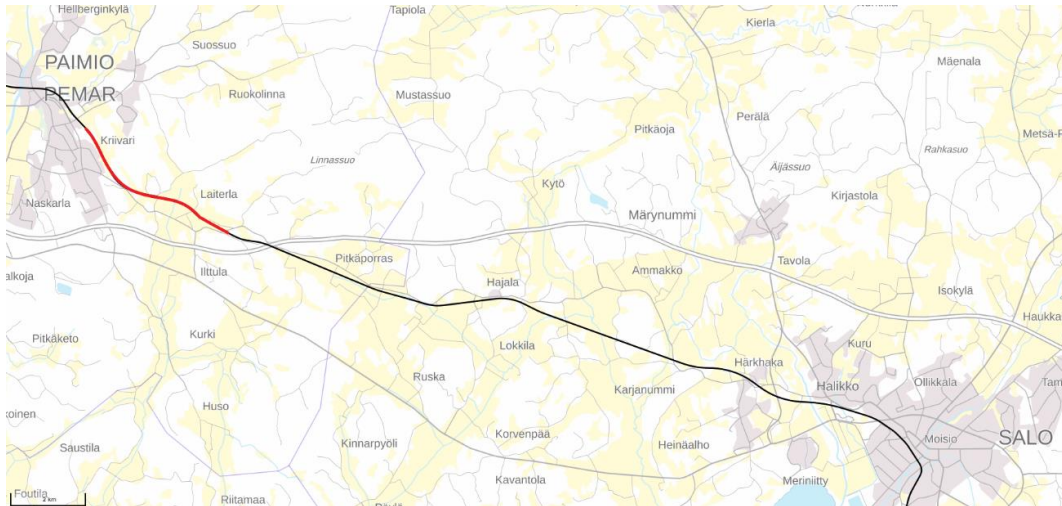
Mittausaineistona käytettiin radantarkastusvaunu Meerin rantaradalta tuottamaa mittadataa. Aineiston tiedot on esitetty taulukossa 7. Meeri on italialaisen Mermecin valmistama Roger 800 -mallin radantarkastusvaunu. Vaunun mittausjärjestelmistä on saatavilla hyvin vähän tietoa yrityssalaisuuksien vuoksi, mutta se kykenee mittaamaan kattavasti radan geometriaa ja tämän lisäksi ajolangan kuntoa ja ulträänänen avulla kiskojen rakenteellisia vaurioita. (Mermec, 2016) Meerin käyttöönotossa ja sertifiointissa on myös noudatettu standardia SFS-EN 13848. (Viitala, 2016)

Taulukko 7. Mittausaineiston tiedot. (Väylävirasto, 2021b, 2021a)

Rataosan numero:	001
Rataosan tunnus:	KKNTKU
Raide:	1
Alkupiste:	Kirkkonummi
Loppupiste:	Turku
Päivämäärä:	20.9.2021
Kellonaika:	13:41:17
Lämpötila:	14,7°C
Kunnossapitotaso:	1A

5.2 Tutkittava rataosuus

Jotta siirtymäkaarista muodostettujen matemaattisia malleja voidaan mielekkäällä tavalla tässä tutkimuksessa hyödyntää, päätettiin tutkia olemassa olevaa rataosaa. Tutkittavaksi alueeksi valikoitu rantaradan osuus KM 165 + 080 – KM 169 + 560, joka sijaitsee rataosalla 001 välillä Salo–Paimio ja sisältää molempia suomessa käytössä olevia siirtymäkaarityyppejä, klotoideja ja Helmertin siirtymäkaaria. Tutkimusvälin sijainti esitetty kartalla kuvassa 12.



Kuva 12. Tutkittava rataosuus merkattu punaisella. (Maanmittauslaitos 2022)

Rataosalla on lisäksi suoritettu nopeudennostoon tähtääviä koeajoja, joissa kyseisellä tutkittavalla osuudella on ajettu lähes 200 km/h. Lisäksi osuudelta on saatavissa suhteellisen tuoretta radantarkastusvaunu Meerin tuottamaa mittausdataa, joka on saatavilla niin graafisena kuin numeerisenakin aineistona. Näitä tuloksia laskennallisiin arvoihin ja simulointiajoihin vertaamalla voidaan muodostaa parempi käsitys siirtymäkaaren muodon valinnan merkityksestä. Kaikissa tämän kappaleen kuvissa kilometrivälillä KM 165 + 000 – 167 + 500 esiintyvässä S-kaarteessa on käytössä Helmertin siirtymäkaaret ja vastaavasti kohdan KM 167 + 500 jälkeen sijaitsevassa kaarteessa käytetään klotoidoja.

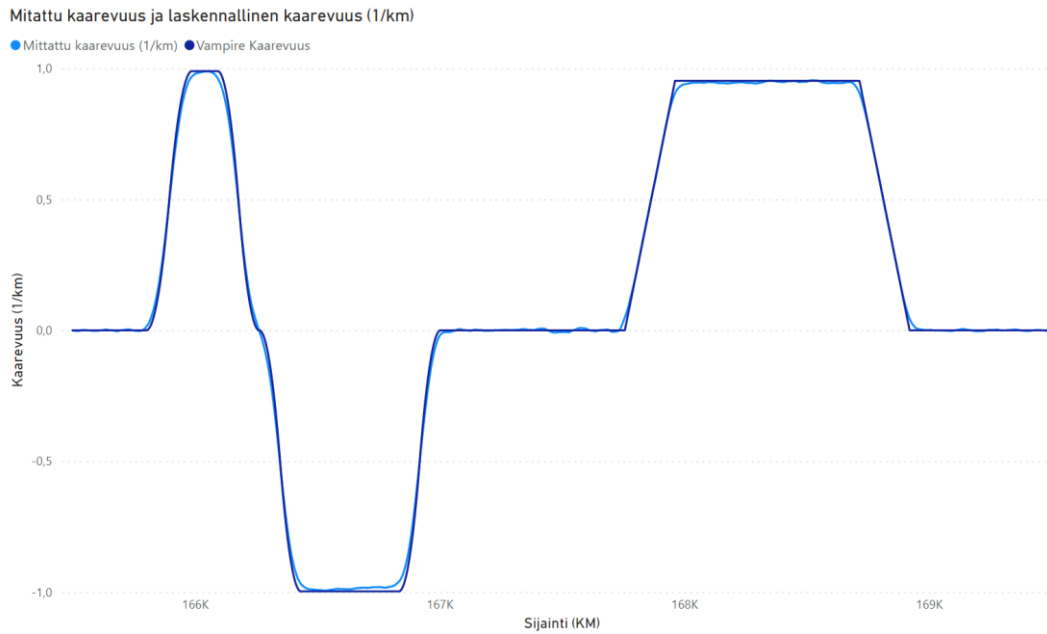
5.3 Mittaustulokset

Tarkastellaan Meerin tuottamaa edellä esiteltyä mittausdataa ja verrataan sitä pääpistelaskennan perusteella muodostettuun laskennalliseen geometriatietoon. Tarkastelun kohteena ovat siirtymäkaarten osalta oleelliset suureet eli kaarevuus, kallistus ja poikittaiskiihtyvyys mutta myös muut tarkasteltavalle osuudelle osuvat geometriavirheet on eritelty ja huomioitu.

5.3.1 Kaarevuus

Radantarkastusvaunulla mitattu kaarevuus noudattelee melko hyvin osuuden laskennallista kaarevuutta. Kuvassa 13 on esitetty samassa kuvaajassa rataosan mitattu ja laskennallinen kaarevuus ja kuvassa 14 vastaavasti lisäksi näiden välinen erotus ja paikalliset maksimi- ja minimiarvot. Suurimmat eroavaisuudet ovat siirtymäkaarissa ja lähinnä niiden alku- ja loppuosissa. Kaarteissa ja suoralla kaarevuudet vastaavat lähes täsmälleen toisiaan, joskin joitain geometriapoikkeamia radassa mittausten mukaan esiintyy. Siirtymäkaarien alussa ja lopussa mitattu kaarevuus muuttuu huomattavasti laskennallista hitaammin.

Klotoidin teoreettisen muodon mukaista kaarevuuden kuvaajan epäjatkuvuuskohtaa ei mitatusta aineistosta ole havaittavissa. Klotoidin ongelmakohtaksi on kuvattu sen alku- ja loppupisteessä olevaa kaarevuuden epäjatkuvuuskohtaa ja siitä johtuvaa äkillistä poikittaiskiihtyvyyden muutosta (Ciobanu, 2015). Mittaustiedosta ei selviä onko kyseessä jo radan tuentavaiheessa tapahtuva muutos vai muuttuuko radan geometria ajansaatossa kohti mittaustulosten mukaista geometriaa.



Kuva 13. Mitattu ja laskennallinen kaarevuus n. väliltä KM 165 – KM 170.

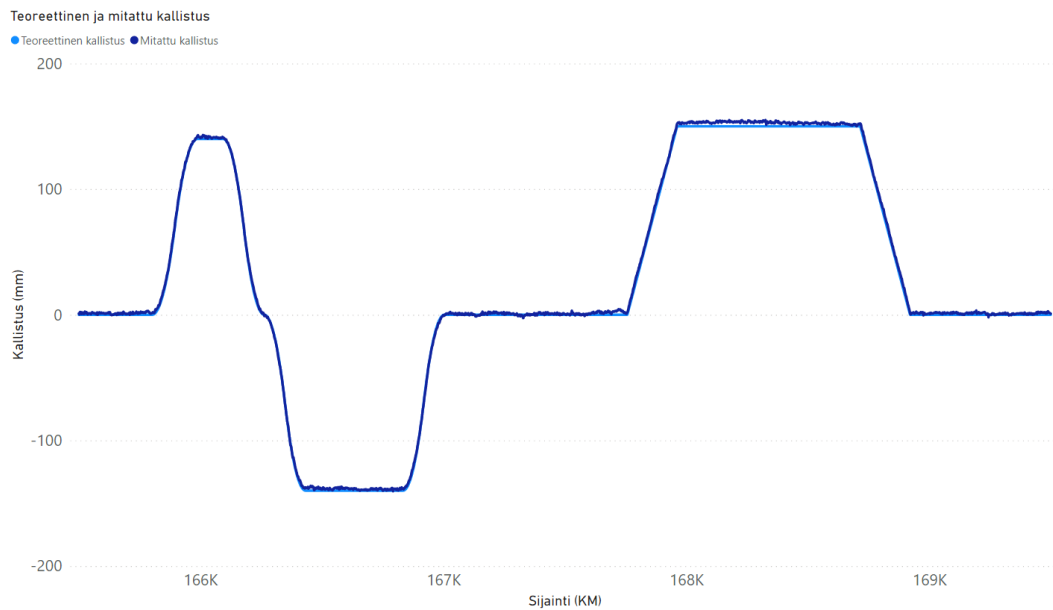


Kuva 14. Kaarevuudet, niiden välinen erotus ja paikalliset maksimi- ja minimiarvot.

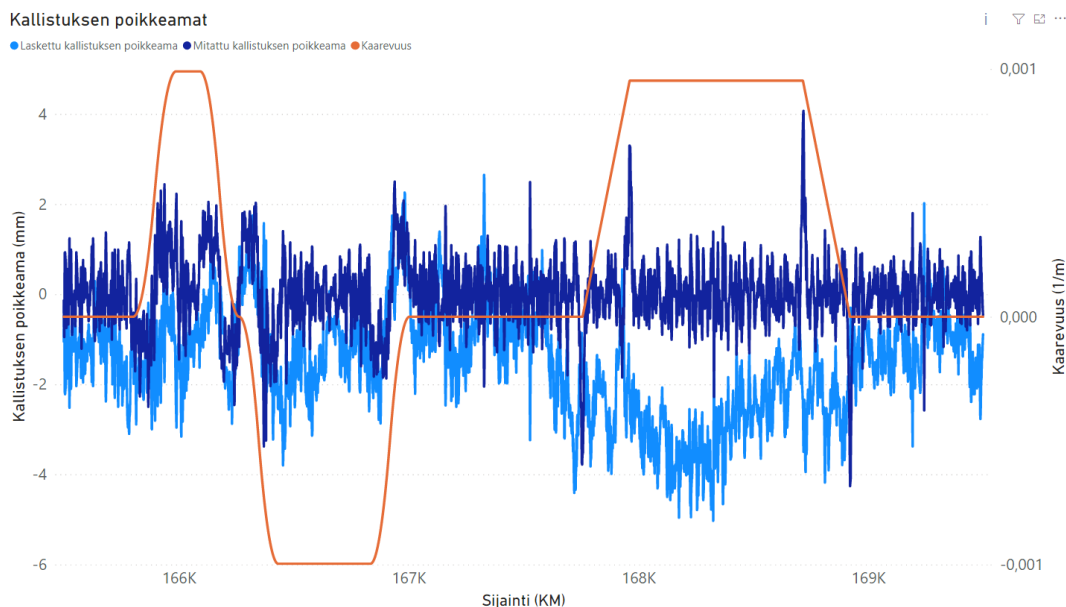
Kuvasta 12 on selkeästi nähtävissä, että suurimmat eroavaisuudet laskennallisen ja mitatun geometrian välillä tapahtuvat siirtymäkaarien alku- ja loppupisteissä. Erot ovat myös samaa suuruusluokkaa. Erot todennäköisesti johtuvat juuri siirtymäkaarten päissä tapahtuvista poikittaiskiihtyvyyden muutoksista, mutta Helmerlin siirtymäkaaren puolivälissä, jossa sen kaarevuuden ja poikittaiskiihtyvyyden muutos on suurimmillaan, ovat erot laskennalliseen geometriaan samansuuruisia tai jopa pienempiä kuin vastaavasti suoralla rataosuudella.

5.3.2 Kallistus

Kallistuksen osalta mitattu aineisto noudattelee hyvin pitkälti pääpistelaskennan mukaan muodostettua laskennallisen kallistuksen kuvaajaa. Laskennallinen ja mitattu kallistus esitetty kuvassa 15. Kuvan mittakaavasta huolimatta on nähtävissä, että myös kallistuksen tapauksissa suurimmat poikkeamat esiintyvät juuri siirtymäkaarten ja tässä tapauksessa myös klotoidien alku- ja loppupisteiden lähellä. Kuvassa 16 on esitetty mitattu ja laskettu kallistuksen poikkeama.



Kuva 15. Laskennallinen ja mitattu kallistus.

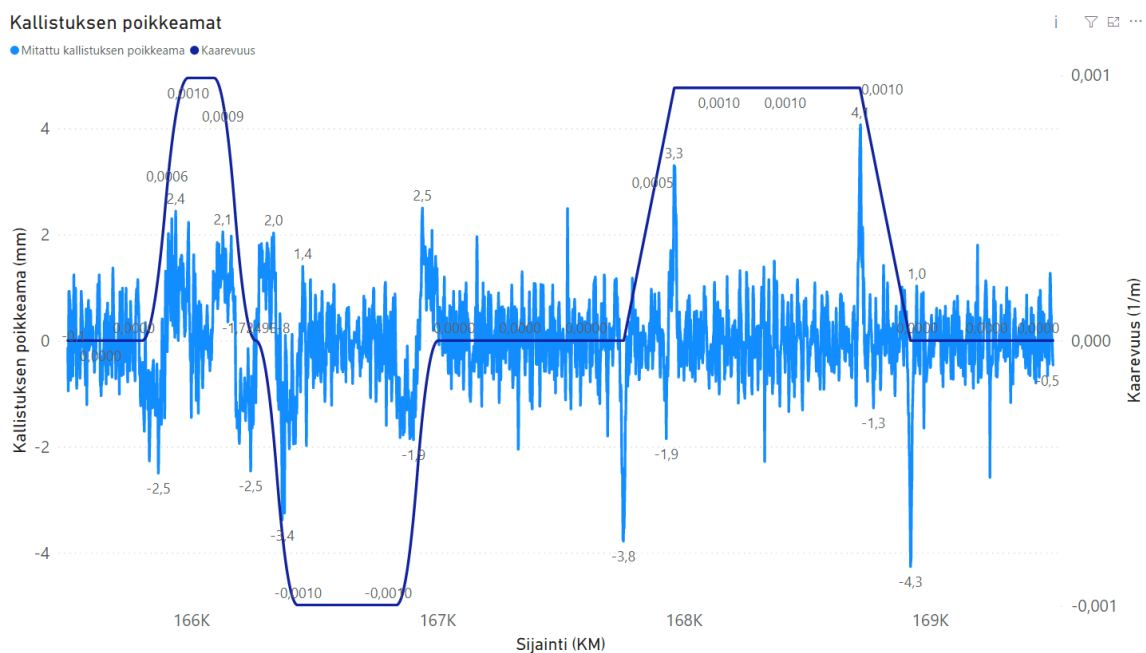


Kuva 16. Laskettu ja mitattu kallistuksen poikkeama. Kaarevuuskuvaaja oranssilla helpottamaan eri geometriaelementtien hahmottamista.

Kallistuksen mitatussa ja lasketussa poikkeamassa on jonkin verran eroja, jotka eivät selity pelkästään mittaukseen liittyvän paikkatiedon tarkkuudella. Mittauksissa olevat erot voivat selittyä ainakin osittain pääpistelaskennan iällä, sillä tuorein

käytettävissä ollut pääpistelaskenta Salo–Paimio-rataosuudelta oli vuodelta 2008. Mikäli geometria on sen jälkeen uudelleen laskettu ja siinä käytettyjä kallistuksia muutettu, voi ero selittyä sillä. Mitatussa poikkeamassa on kuitenkin selkeät piikit klotoidin alku- ja loppupisteessä, joten sitä voi tämän perusteella pitää ainakin sijaintitiedoltaan varsin luotettavana aineistona.

Kuvassa 17 on kuvaajan selkeyttämiseksi esitetty pelkkä mitattu poikkeama ja sen lokaalit maksimi- ja minimiarvot. Kuvaajasta voidaan tulkita, että virheet ovat suurimmillaan klotoidin alku- ja loppupisteissä. Myös Helmertin siirtymäkaaren päätepisteissä esiintyy poikkeamia, mutta ne ovat suuruudeltaan vain noin 60 % klotoidilla tapahtuvista poikkeamista.



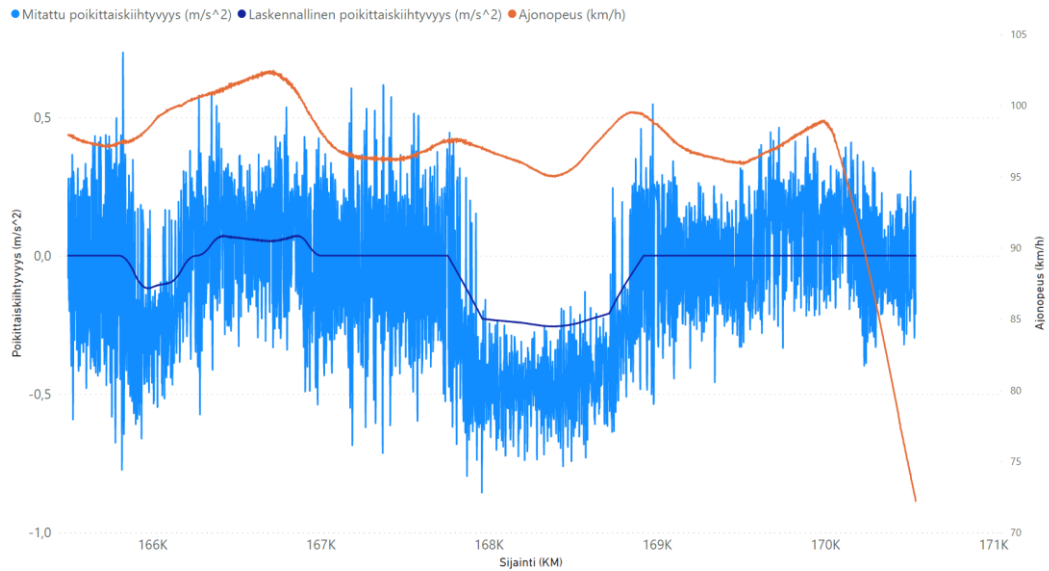
Kuva 17. Mitattu kallistuksen poikkeama ja lokaalit maksimi- ja minimiarvot numeerisesti merkittynä.

Kunnossapitotasolla 1A, johon myös tarkasteltava rataosa kuuluu, on yli 3 mm poikkeama kallistuksessa luokiteltavissa C-luokan virheeksi, joten Helmertin siirtymäkaarella kallistus on vielä raja-arvojen mukainen, mutta klotoidilla 3 mm raja-arvo ylitty.

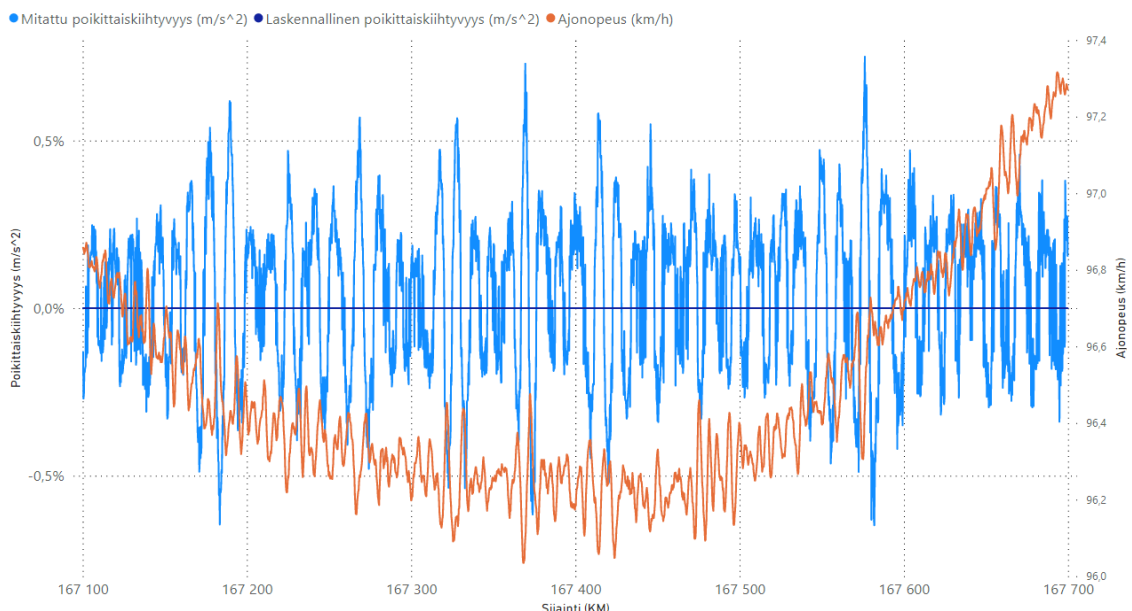
5.3.3 Poikittaiskiihtyvyys

Meerin tuottamaan dataan liittyvä tutkimuksellinen ongelma on se, että mittauksia tehdessä tulee ajonopeuden olla huomattavasti rataosalla käytettävää liikennöinti-nopeutta pienempi. Tämä aiheuttaa sen, että kaarteissa ei esiinny kallistuksen vajousta, vaan liikakallistusta, jolloin vaunuun kohdistuu kiskojen selän tasossa kiihtyvyyttä sisäkaarten suuntaan. Toki useilla rataosilla ympyränkaaren säde ja kallistus tulee optimoida niin, ettei kallistuksen vajoaus ylitä sallittua raja-arvoa nopeilla junilla, mutta liikakallistus ei kasva liian suureksi hitaammilla junilla. Tässä työssä on kuitenkin tarkoitus tutkia suurnopeusratoja, jolloin oletettavasti kyse on matkustajaliikenteestä, eikä suuri kallistuksen vajoaus ole matkustusmukavuuden kannalta edullista, vaikka tietty määrä kallistuksen vajousta tarvitaan etenkin kaluston ohjautuvuuden, mutta myös matkustusmukavuuden parantamiseksi. (Whitney and McManus, 2017)

Laskennallinen ja mitattu poikittaiskiihtyvyys rataosuudella on esitetty kuvassa 18. Kuvasta nähdään, että ideaalinen matemaattinen malli ei huomioi radan ja kiskon välistä vuorovaikutusta eikä niin kutsuttua Klingelin liikettä, missä juna pyöräkerta oskilloi sivusuunnassa tietyllä taajuudella, johon vaikuttavat kaluston nopeuden lisäksi pyörän tehollinen kartiokkuus ja pyörän ympäröimä. Mittausaineistosta luodussa graafissa nähdään, että Klingelin liikkeen aallonpituus on noin 12 m. Tarkempi graafi, josta on arvioitavissa liikkeen aallonpituus väliä KM 167+100 – KM 167 + 700 on esitetty kuvassa 19.



Kuva 18. Tutkittavan rataosuuden mitattu ja teoreettinen poikittaiskiihtyvyys. Ajonopeus esitetty oranssilla viivalla.



Kuva 19. Mitattu ja teoreettinen poikittaiskiihtyvyys suoralla rataosuudella välillä KM 167 + 100 – KM 167 + 700. Ajonopeus esitetty oranssilla viivalla.

Kuvaajista on havaittavissa Klingelin liikkeestä huolimatta selkeä korrelaatio lasketun ja mitatun poikittaiskiihtyvyyden välillä. Mitatussa aineistossa kuitenkin vaikut-

taa esiintyvän oikealle kääntyvissä kaarteissa huomattavasti laskennallista suurempaa poikittaiskiihtyvyyttä. Kuvassa 15 nämä ovat kohtia, joissa poikittaiskiihtyvyys on negatiivinen. Syitä tälle voi olla anturin asemointi tai kalibrointi, mutta koska Meerin mittausjärjestelmästä ei ole saatavilla juuri lainkaan tietoa on tämän varmentaminen mahdotonta. Suorilla ja vasempaan kaartavissa kaarteissa poikittaiskiihtyvyys sen sijaan vastaa melko hyvin laskennallista poikittaiskiihtyvyyttä.

6 Simulointiajot siirtymäkaarissa

6.1 Simuloinnin hyödyntäminen tutkimuksessa

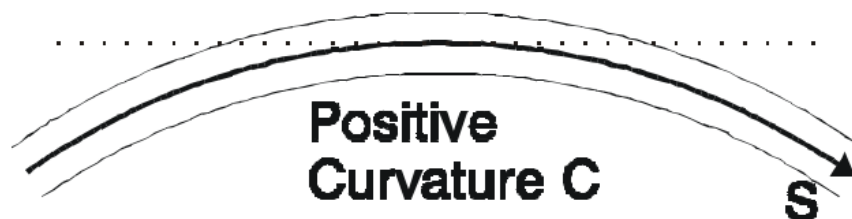
Simuloinnin tavoitteena on tutkia kaluston kulkua erityyppisissä siirtymäkaarissa ja saada tarkempaa tietoa kalustoon ja rataan kohdistuvista voimista. Simulointiajoissa pystytään huomioimaan myös kiskon ja pyöräkerran välinen vuorovaikutus, jolloin saadaan huomattavasti todellista tilannetta paremmin vastaava kuva kaluston kulusta, kuin ideaalisilla malleilla poikittaiskiihtyvyyksiä laskettaessa. Simulointiohjelmana toimii Vampire PRO, joka perustuu monikappaledynamiikkaan ja sen avulla voidaan arvioida radan komponenttien toimivuutta. Siirtymäkaaria on tarkoitus tarkastella niin toimivuuden kuin matkustusmukavuudenkin näkökulmasta. Turvallisuutta ei erikseen arvioidu, mutta koska tarkoituksena on laatia toimiva ja matkustusmukavuudeltaan ihanteellinen rata, voidaan tämän työn ja olemassa olevien suunnitteluohjeiden puitteissa sen olevan myös turvallinen.

Siirtymäkaarien voimia laskettaessa näennäinen poikittaiskiihtyvyyys on suhteellisen helppo laskea fysiikan peruskaavoja käyttäen, mutta kaluston ja radan vuorovaikutus on niin kompleksista, että näiden asioiden mallintaminen on ilman ohjelmiston apua jopa mahdotonta. Lisäksi vuorovaikutuksien mallintamiseen vaikuttaa, mitä asioita simuloinnista tarkastellaan ja minkälaisia muuttujia siinä otetaan huomioon.

6.2 Simuloinnissa käytetty ratamalli

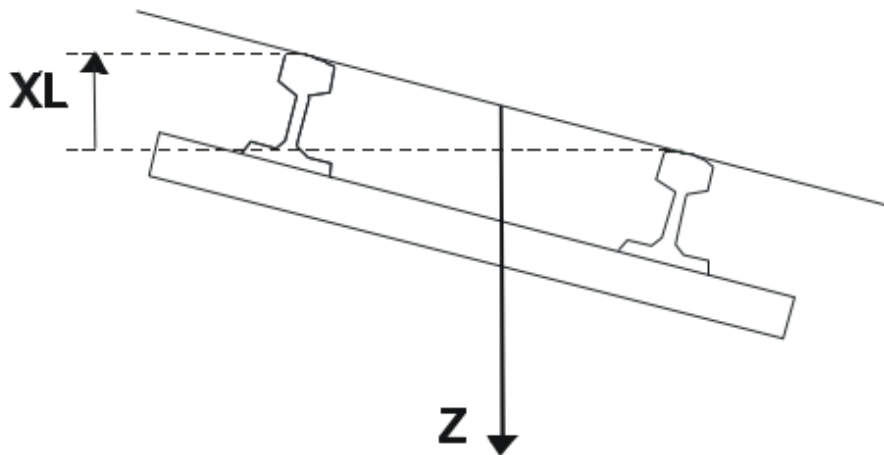
Simuloinnissa käytettävän ratamallin muodostamiseen hyödynnettiin olemassa olevaa rantaradan geometriaa väliltä KM 165 + 500 – KM 169 + 500, joka sisältää kumpaakin Suomessa käytössä olevaa siirtymäkaarityyppiä, eli Helmertin siirtymäkaaria ja klotoideja. Geometria muodostettiin pääpistelaskennan ja näistä eroteltävien geometriaelementtien mukaan.

Simulointiohjelmiston käyttämä geometriatiedosto sisältää neljä parametria, jotka ovat paalulukema, radan kaarevuus, radan pystysiirto ja raiteen kallistus. Paalulukema kuvaa radalla kuljettua matkaa ja kaarevuus kulloisenkin paalulukun silloista kaarevuutta. Kaarevuuden positiivinen suunta on oikealle ja negatiivinen vastavasti vasemmalle ja sen yksikkö on 1/km. Positiivisella parametrilla kuvattu kaarevuus havainnollistettu kuvassa 20. (DeltaRail Group Limited, 2007)



Kuva 20. Vampire Pro ohjelman geometriatiedoston mukainen positiivinen kaarevuus. (DeltaRail Group Limited, 2007)

Radan pystysiirron positiivinen suunta on alaspäin ja raiteen kallistuksen tapauksessa positiivinen arvo kuvaa vasemman kiskon ja negatiivinen oikean kiskon nostoa. Sekä pystysiirron että kallistuksen yksikkönä on millimetri. Raiteen kallistus tapahtuu kiertämällä rataa sen keskilinjan ympäri, kunnes haluttu kallistus millimetreinä kahden eri kiskon välillä on saavutettu. (DeltaRail Group Limited, 2007). Tästä syystä rataa tulee aina kallistaessa nostaa puolet halutusta kallistuksen arvosta, jotta simuloinnissa käytettävään ratamalliin ei tule epätoivottuja pystysuuntaisia siirtymiä. Raiteen pystysiirto ja kallistus Vampire PRO -ohjelmassa esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Raiteen kallistus (XL) ja pystysiirto (Z) Vampire PRO -ohjelmassa tapahtuvien parametrien mukaisesti esitettynä. (DeltaRail Group Limited, 2007)

Kun siirtymäkaaren muotona on klotoidi on geometrian syöttäminen ohjelmistoon varsin vaivatonta. Ohjelmaan syötetään pääpisteet ja niitä vastaavat parametrien arvot, jonka jälkeen ratamallia muodostaessaan ohjelma interpoloi pääpisteiden väliset arvot lineaarisesti. (DeltaRail Group Limited, 2007) Muita siirtymäkaarien muotoja käytettäessä tämä ei kuitenkaan onnistu, sillä kaarevuus tai raiteen kallistus ei näissä tapauksissa muutu lineaarisesti. Näissä tapauksissa geometriatiedostoa luodessa hyödynnettiin Meerin käyttämää 0,25 m mittakantaa, jotta tulokset olisivat mahdollisimman hyvin vertailtavissa radantarkastusmittausten tuloksiin. Esimerkki ohjelmiston käyttämästä geometriatiedostoformaattista esitetty kuvassa 22.

DESIGN
UNITS VAMPIRE

S-Curve 1195m with 110mm of cant and 2007m with 60mm of cant km215 Tampere-Orivesi

0.00	0.00	0.00	0.00
100.00	0.00	0.00	0.00
230.00	0.837	-55.00	110.00
700.00	0.837	-55.00	110.00
830.00	0.00	0.00	0.00
865.00	0.00	0.00	0.00
955.00	-0.498	-30.00	-60.00
1137.00	-0.498	-30.00	-60.00
1227.00	0.00	0.00	0.00
1327.00	0.00	0.00	0.00

Kuva 22. Vampire PRO -ohjelmistoon syötettävä geometriatiedosto. Parametrit vasemmalta oikealle ovat paalulukku, kaarevuus, pystysiirto ja kallistus.

Tutkittaessa muita siirtymäkaaren muotoja nykyisten siirtymäkaarien tilalle vaihdettiin tutkittava siirtymäkaari, muuttamatta sen pituutta tai ympyränkaareissa käytettäviä kallistuksen arvoja. Kallistusviisteen muoto muutettiin kuitenkin vastaamaan aina kulloistakin käytössä oleva siirtymäkaarta.

Simuloinnissa hyödynnettiin myös olemassa olevaa radassa olevia epäsäännöllisyyksiä kuvaavaa tiedostoa, vaikka geometria olisi luotu pelkästään pääpistelasentaa hyödyntäen. Epäsäännöllisyyksien lisääminen simuloinnissa käytettävään malliin luo huomattavasti todenmukaisemman kuvan kaluston kulusta, jolloin tuloksia on helpompaa vertailla esimerkiksi mittaustuloksiin.

6.3 Kalustomalli

Kalustomallina käytettiin kuvassa 23 esitettyä kaksikerroksista Ed-vaunukalustoa, sillä se oli ainut saatavilla oleva verifioitu malli. Malli ei välttämättä vastaa todellisesti suurnopeusradalla tulevaisuudessa kulkevaa kalustoa ollessaan kaksikerroksin ja sen ilmoitettu maksiminopeus on 200 km/h. (Transtech, 2021) Verifioidun kalustomallin käyttäminen nähtiin kuitenkin tutkimustyössä järkeväksi sen ollessa parhaiten Suomessa radalla kulkevaa kalustoa vastaava malli. Kalustomallin verifiointista ja käytetystä mallista kerrotaan tarkemmin Väyläviraston julkaisussa *Monikappaledynamiikkaan perustuvien kalustomallien verifiointi* (Loponen ym., 2020).



Kuva 23. Ed -vaunu Turussa vuonna 2013. (Wikipedia, 2021)

Kalustomallin parametreja ei muutettu, sillä työn tarkoituksena on tutkia eri siirtymäkaarten muotojen vaikutusta kaluston kulkuun ja matkustajien kokemaan poikittaiskiihtyvyyteen sekä rataan vaikuttaviin voimiin. Simuloinnissa käytetty akselipaino oli 150 kN. Kalustomallin pyöräprofiiliksi valittiin hieman kulunut profiili, jotta simulointi vastaisi mahdollisimman hyvin todellisia tilanteita.

Kalustomalliin asetettiin simulointiohjelmistossa massakeskipisteestä kiihtyvyyttä mittaava anturi. Kiihtyvyyttä pystytään mittaamaan niin poikittais-, pituus- kuin pysytysuunnassakin. Tässä työssä suurin painoarvo kohdistuu poikittaiskiihtyvyyden ja sen muutoksen tarkasteluun, mutta muita kiihtyvyyksiä mitattiin mahdollisten simuloinnissa tapahtuneiden virheiden löytämiseksi.

6.4 Simulointiajot

Simulointiajot suoritettiin tutkittavalla rataosalla sen nykyisellä lasketulla geometrialla, Meerin mittaustuloksista saadulla geometrialla ja kuvitteellisilla geometrioilla, missä kaikki siirtymäkaaret oli korvattu joko Blossin siirtymäkaarin tai kosinikaarin. Siirtymäkaarien muodon vaihtelusta johtuvaa sivusiirtymää tai niistä aiheutuvia maankäytöllisiä tai suunnitteluvaiheessa muuten esiintyviä haasteita ei huomioitu. Simuloinnit suoritettiin neljällä eri nopeudella 50 km/h välein. 50 km/h, 100 km/h, 150 km/h ja 200 km/h. Simulointi yritettiin suorittaa myös 250 km/h nopeudella, mutta tämä päättyi simuloinnin virheeseen, jossa juna olisi oletettavasti suistunut raiteiltaan. 250 km/h simuloinnin ei toisaalta voinut oletakaan onnistuvan rataosalla tai kalustolla, joita ei tällaisiin nopeuksiin ole suunniteltu, mutta ne olisivat voineet tarjota mielenkiintoista tietoa tulevia suurnopeushankkeita ajatellen.

Simuloinnista saadut tulokset kuvaavat poikittaiskiihtyvyyttä ohjelmiston käyttöohjeen mukaan matkustajan tai kiihtyvyyssanturin kokemana kiihtyvyytenä ja kiihty-

vyyttä kuvataan kiertyvän kaluston asennon mukaisessa koordinaatistossa. (DeltaRail Group Limited, 2007) Näin voidaan olettaa, että kiihtyvyys vastaa riittävän tarkasti kaavan 51 mukaista approksimoitua poikittaiskiihtyvyyttä. Simuloitaessa poikittaiskiihtyvyys vaikuttaa olevan hieman laskennallista poikittaiskiihtyvyyttä suurempi. Laskennallinen poikittaiskiihtyvyydenkin on kuitenkin hyvin teoreettinen ideaalisen tilanteen poikkeustapaus, joten tällainen ero ei ole este tulosten käyttämiseen eri siirtymäkaaren muotojen poikittaiskiihtyvyyksien vertailussa.

6.5 Simuloitavat tilanteet

Työssä hyödynnettiin simulointiajoja niin olemassa olevan geometrian osalta, kuin kappaleessa 4.2 esitettyjen taulukoiden mukaisten teoreettistenkin tilanteiden osalta. Eri simulointitilanteet kuvattu tarkemmin seuraavissa kappaleissa.

6.5.1 Nykyinen geometria

Nykyisestä geometriasta muodostettiin niin pääpistelaskennan kuin mittauksienkin perusteella malli, jossa kaluston kulkua simuloitiin. Nykyistä rataosaa ei kuitenkaan ole suunniteltu suuriin yli 250 km/h nopeuksiin, joten simuloitessa suurin nopeus, jota järkevästi pystyttiin tässä työssä hyödyntämään, oli 200 km/h. Suuremmilla nopeuksilla simuloitaessa simulointi päättyi virheeseen, joka olisi ohjelman mukaan käytännössä tarkoittanut junan raiteilta suistumista. Tarkkaa suistumisnopeutta ei kuitenkaan ohjelmistoa hyödyntäen alettu iteroimaan, sillä jo aiemmin kävi selväksi, ettei kaluston kulku tällaisilla nopeuksilla olisi matkustusmukavuuden tai turvallisuuden kannalta järkevää. Simulointiajot suoritettiin 50, 100, 150 ja 200 km/h nopeuksilla.

Nykyisestä geometriasta myös muokattiin siten, että jokainen rataosalla sijainnut siirtymäkaari korvattiin joko Blossin siirtymäkaarella tai kosinikaarella. Siirtymäkaarien pituuksia ei kuitenkaan näissä tapauksissa muutettu.

6.5.2 Teoreettiset tilanteet

Jotta voitaisiin vertailla siirtymäkaaria myös suurilla nopeuksilla, oli muodostettava sellaiset geometriat, joilla suuret 250 km/h ja 300 km/h nopeudet olisivat mahdollisia. Ympyränkaaren ja kallistuksen arvot määräytyivät taulukoiden 4 ja 5 avulla.

Siirtymäkaaren pituuden määrittämiseen käytettiin poikittaiskiihtyvyyden muutoksen arvoa. Kaikilla tutkittavilla siirtymäkaaren muodoilla, lukuun ottamatta klotidia, saavuttaa siirtymäkaaren muutos suurimman arvonsa aina siirtymäkaaren puolivälissä, kuten on aiemmin esitetty kuvassa 5. Eri siirtymäkaarien poikittaiskiihtyvyyksien arvojen kaavat ovat kohtalaisen monimutkaisia, joka tekee niiden derivoinnista verrattain hankalaa. Siksi päätettiin taulukoida poikittaiskiihtyvyyksien muutoksen arvoja kunkin kaaren muodon puolivälissä kasvattaen siirtymäkaaren pituutta aina 5 m, kunnes päästään nykyisten suunnitteluohjeiden mukaisiin raja-arvoihin.

Simuloinnissa käytetyt kallistukset olivat 110 ja 130 mm, nopeudet 250 ja 300 km/h. Näitä vastaavat kaarresäteet ja siirtymäkaarien pituudet on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Kutakin kallistusta, nopeutta ja kaarresädettä vastaavat siirtymäkaaren pituudet.

	Kallistus (mm)	110	110	130	130
	Nopeus (km/h)	250	300	250	300
	Kaarresäde (m)	4500	6500	3600	5300
Siirtymäkaaren pituus (m)	Klotoidi	250	200	315	245
	Bloss	375	300	470	365
	Kosini	390	315	490	385

Kuten aikaisemmin todettiin kappaleessa 3.3.1, nähdään myös taulukosta, että klotoidilla vaadittavan siirtymäkaaren pituus on huomattavasti lyhyempi verrattessa Blossin siirtymäkaareen tai kosinikaareen. Myös klotoidin pituuden määrittämiseen on käytetty poikittaiskiihtyvyyden muutosta, vaikka suunnitteluohje tuntee myös viistekertoimen käyttämisen mitoittavana suurena. Muille siirtymäkaarille ei kuitenkaan ole määritetty viistekertoimen laskukaavaa, joten vertailukelpoisuuden vuoksi päädyttiin mitoittavana suurena poikittaiskiihtyvyyden muutokseen.

7 Simuloinnin tulokset

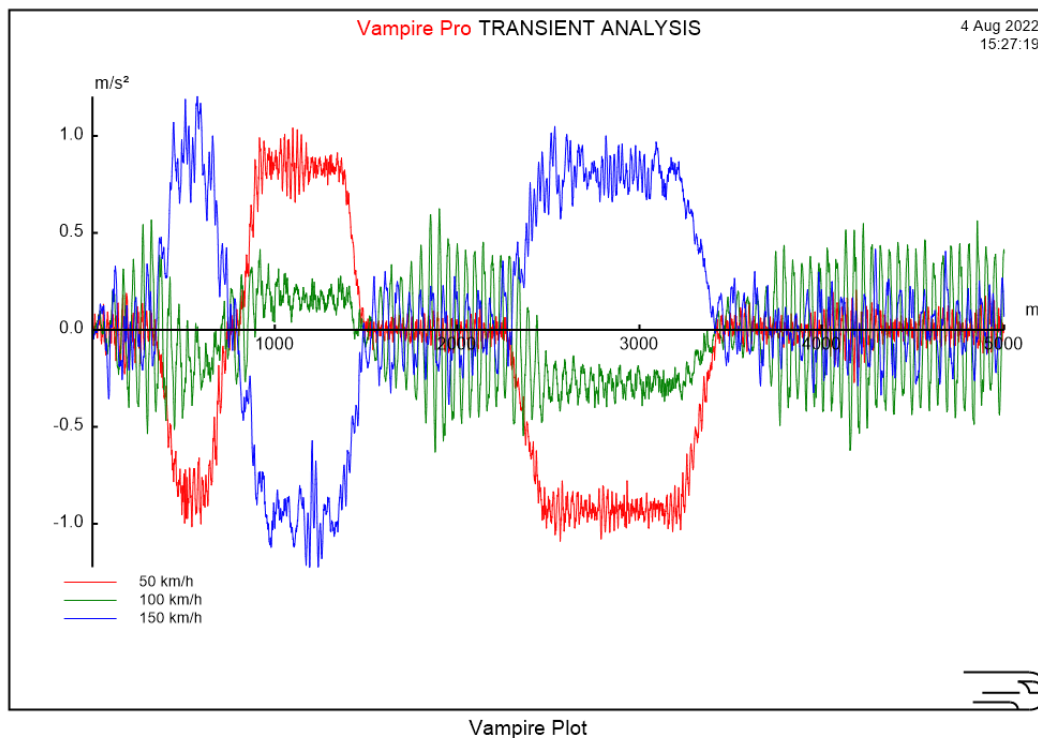
Tässä luvussa esitetään kunkin simulointiajon tulokset poikittaiskiihtyvyyden kuvaajana ratamallilla kuljetun matkan suhteen. Tuloksissa on nähtävissä melko suuriakin poikittaiskiihtyvyyksien arvoja. Simulointiohjelmistossa käytetyn anturin kuvaus oli "acceleration seen by passenger or accelerometer" eli matkustajan tai kiihtyvyyksianturin kokema kiihtyvyys. (DeltaRail Group Limited, 2007) Tällöin anturin koordinaatisto kiertyy radan ja kaluston kallistusten mukana, joka voi osaltaan hieman vaikuttaa simulointien tuloksiin. Tuloksien suuruusluokka on kuitenkin järkevä verrattuna esimerkiksi kaluston massakeskipisteen kiihtyvyyksiä mittaavaan anturiin, joka ei lainkaan huomionut raiteen kallistuksen aiheuttamaa kiihtyvyyttä sisäkaartein suuntaan.

7.1 Tulokset tutkittavalla rataosalla

Ensin tarkasteltiin tuloksia kuvassa 10 esitetyllä tarkasteltavalla rataosalla. Rataosasta muodostettiin mallit pääpistelaskennan ja Meerin mittausaineiston perusteella. Lisäksi muodostettiin kuvitteelliset mallit, jossa Helmertin siirtymäkaaret ja klotoidit oli korvattu vuoroin Blossin siirtymäkaarella tai kosinikaarella. Blossin siirtymäkaaria ja kosinikaaria käytettäessä siirtymäkaarien pituuksia ei muutettu.

7.1.1 Laskettu geometria

Kuvassa 24 on esitettynä lasketun geometrian mukaan luodun ratamallin poikittaiskiihtyvyydet eri nopeuksilla.

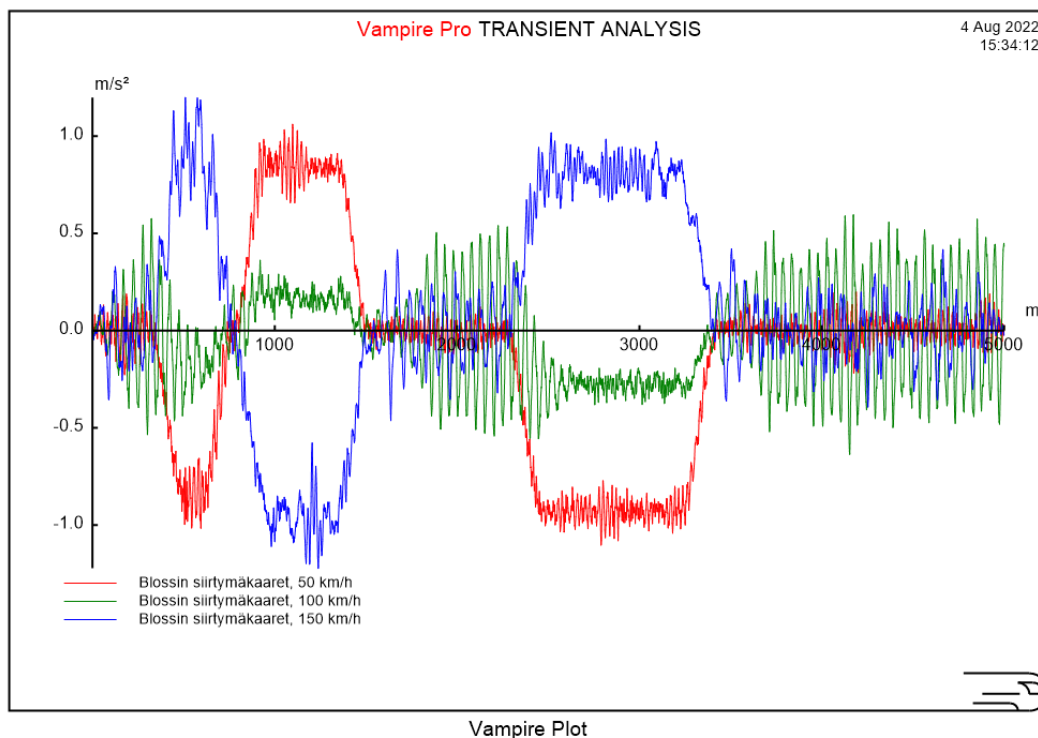


Kuva 24. Poikittaiskiihtyvyyden kuvaajat laskennallisen geometrian avulla luodusta ratamallista. Simulointiajojen nopeudet väreittäin: 50 km/h punaisella, 100 km/h vihreällä ja 150 km/h sinisellä viivalla.

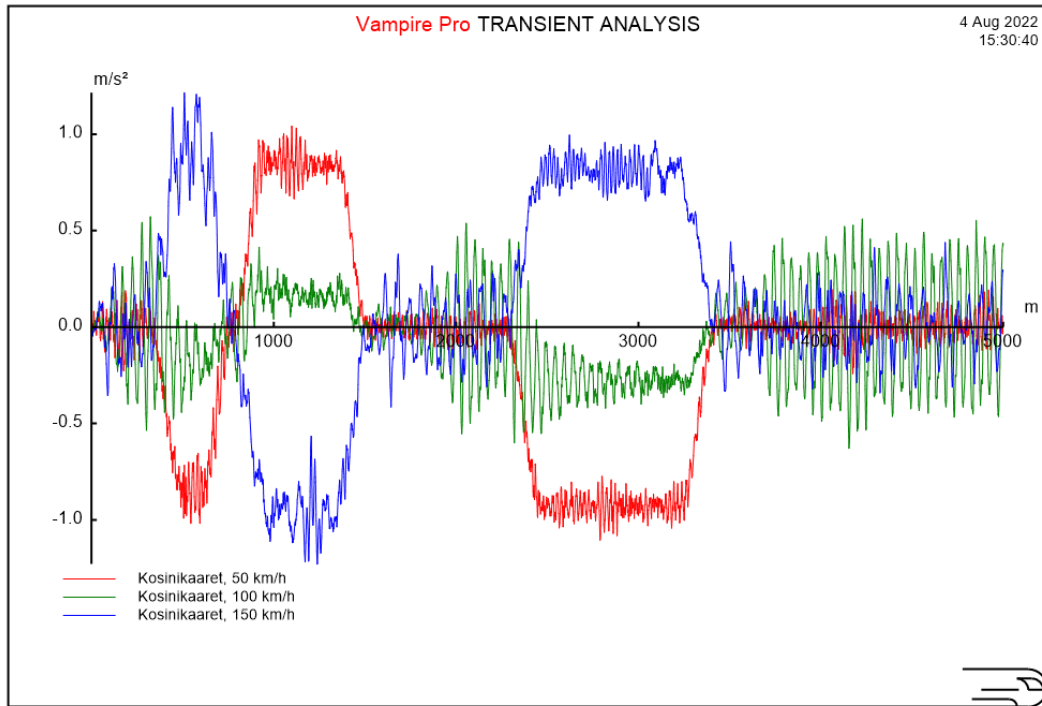
Kuvassa ennen paalua 2000 esiintyvässä S-kaarteessa on käytössä Helmertin siirtymäkaaret ja vastaavasti paaluvälillä 2000–4000 sijaitsevassa kaarteessa käytössä on klotoidi. Kuvaajassa ei ole nähtävissä selkeää eroa klotoidin ja Helmerin siirtymäkaaren välillä. Huomionarvoista on kuitenkin 100 km/h nopeudella suorilla osuuksilla tapahtuva kaluston ilmeisen epästabiili kulku, jota ei esiinny yhtä voimakkaana edes 200 km/h nopeudella (ei kuvassa). Tämä oletettavasti johtuu kalustomallin kulkuominaisuuksista ja mahdollisesti simulointitilanteesta käytetystä radan epäjatkuvuutta kuvaavasta irregularity-tiedostosta. Voidaan olettaa, että juuri noin 100 km/h nopeudella epäjatkuvuudet radassa johtavat kaluston hyvinkin voimakkaaseen edestakaiseen epästabiiliin sivuttaisliikkeeseen, joka aiheuttaa merkittäviä poikittaiskiihtyvyyksiä myös suoralla rataosuudella. Liikettä kutsutaan myös *hunting*-liikkeeksi. (Korkeamäki, 2011)

7.1.2 Tulokset muunnelluilla siirtymäkaarilla

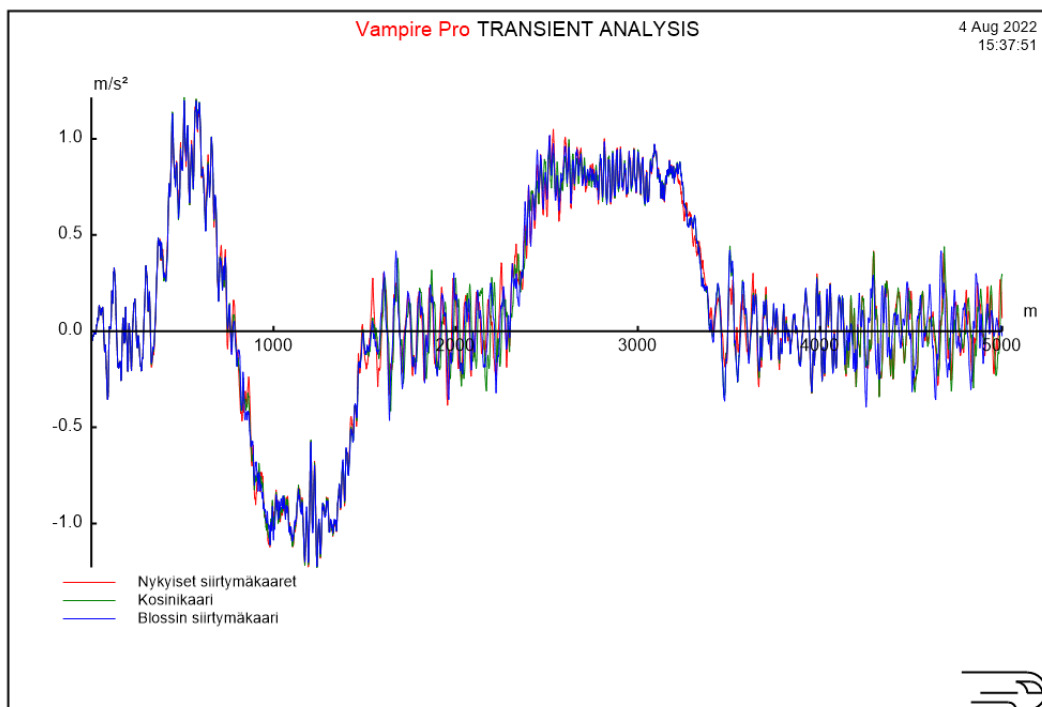
Nykyistä rataa tutkittiin myös siten, että nykyiset siirtymäkaaret vaihdettaisiin Blossin siirtymäkaariin tai kosinikaariin. Poikittaiskiihtyvyydet Blossin siirtymäkaarin muokatulla radalla esitetty kuvassa 25 ja kosinikaarin kuvassa 26. Kuvassa 27 on yhdistetty kaikkien kolmen tapauksen kuvaajat, kun simuloinnissa käytettiin nopeutta 150 km/h.



Kuva 25. Poikittaiskiihtyvyyden kuvaajat Blossin siirtymäkaarin lasketusta ratamallista.



Kuva 26. Poikittaiskiihtyvyyden kuvaajat kosinikaarin lasketusta ratamallista.



Kuva 27. Poikittaiskiihtyvyyden kuvaajat tutkittavalla rataosalla eri siirtymäkaarin 150 km/h nopeudella.

Kuvaajat ovat jälleen lähes identtisiä sekä keskenään, että aikaisemmin muodostettuihin lasketun ratamallin perusteella simuloituihin kiihtyvyyksiin. Pitkästä tarkastelujaksosta johtuen yksittäisillä siirtymäkaarilla eroja voi olla vaikeampi huomata. Lisäksi pienillä nopeuksilla siirtymäkaaren muodon merkitys on vähäisempi,

kuin suurilla nopeuksilla ajettaessa. Tästä syystä työssä on myöhemmin tarkasteltu eri siirtymäkaaria 250 ja 300 km/h nopeuksilla ja lyhyemmällä tarkasteluvälillä.

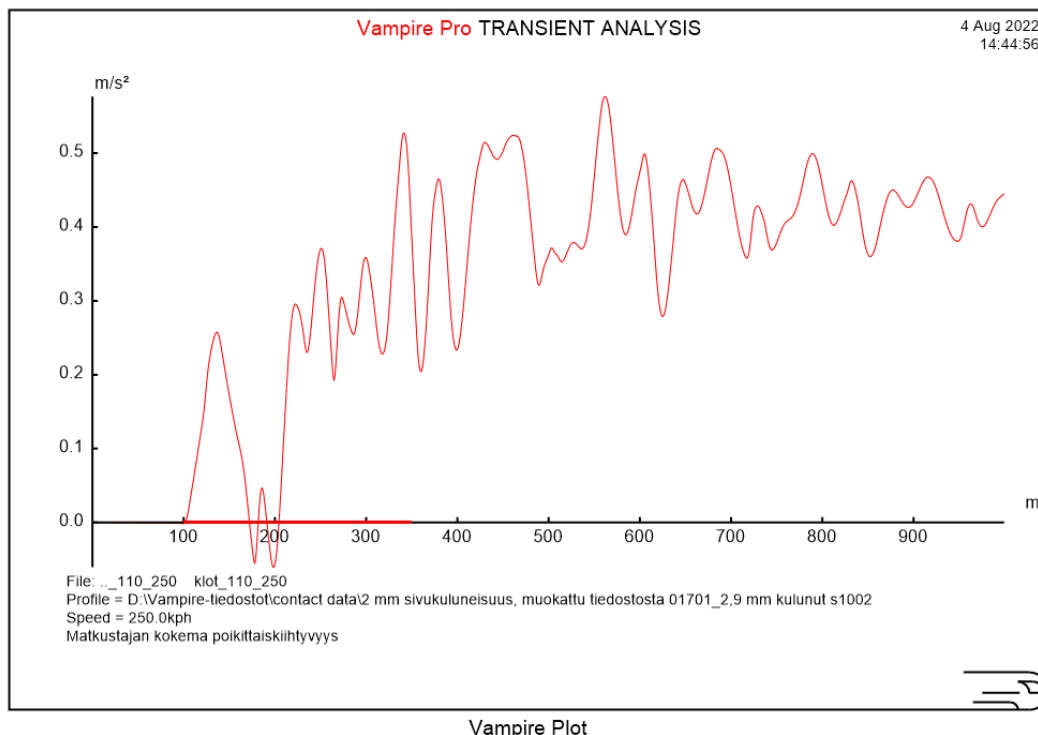
7.2 Tulokset suurnopeusradalla

Simulointia varten muodostettiin luvussa 4.2 esitettyjen raja-arvojen perusteella ratamallit kolmelle eri siirtymäkaarityypille: klotoidille, Blossin siirtymäkaarelle ja kosinikaarelle. Helmertin siirtymäkaarta ei otettu tarkasteluun mukaan, sillä sen käyttöä on nykyisten suunnitteluohjeiden puitteissa jo pyritty välttämään. (Väylävirasto, 2021c)

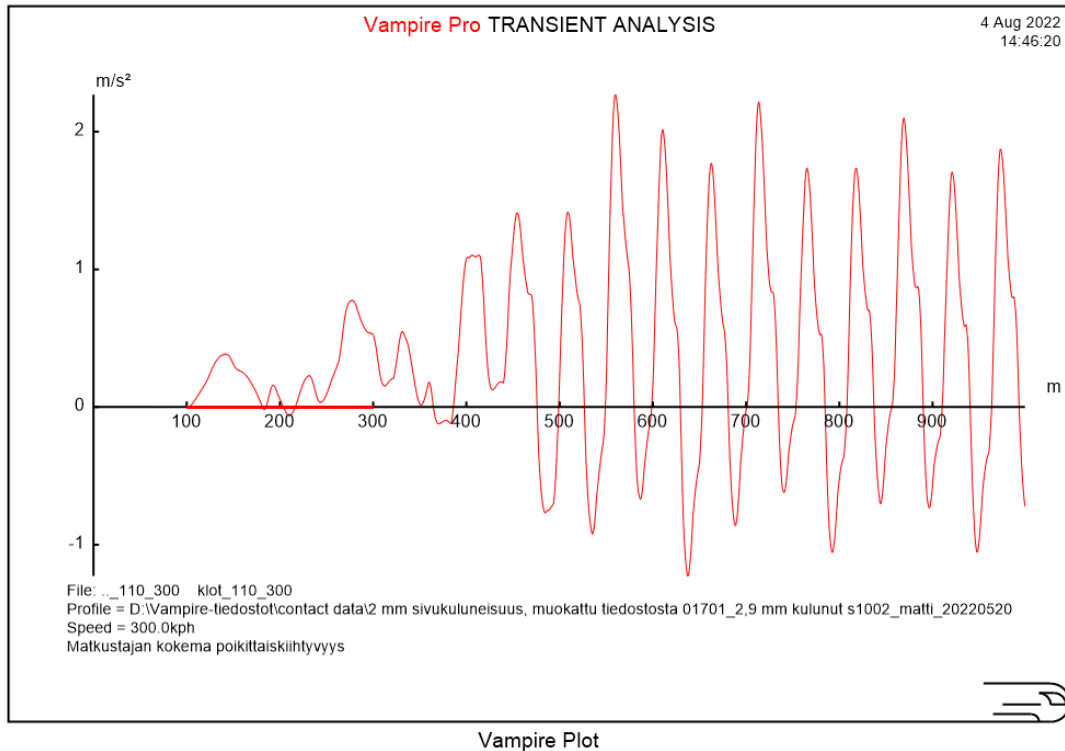
Suurnopeuksilla tapahtuvia simulointeja varten radan geometriaa kuvaavista tiedostoista poistettiin radan epäjatkuvuuksia kuvaava niin kutsuttu irregularity-tiedosto. Ilman tätä muutosta olisi kaluston kulku muuttunut lähes välittömästi epästabiiliksi eikä siirtymäkaarien välisiä eroja olisi voitu tutkia. Myös ilman epäjatkuvuuksia muuttuu kaluston liike 300 km/h nopeuksilla lähes välittömästi kaarteeseen alkaessa epästabiiliksi siirtymäkaaren muodosta riippumatta. Tämä tosin on selitettävissä Ed-vaunun kalustomallilla ja sillä, ettei kyseistä kalustoa ole suunniteltu näihin nopeuksiin.

7.2.1 Klotoidi

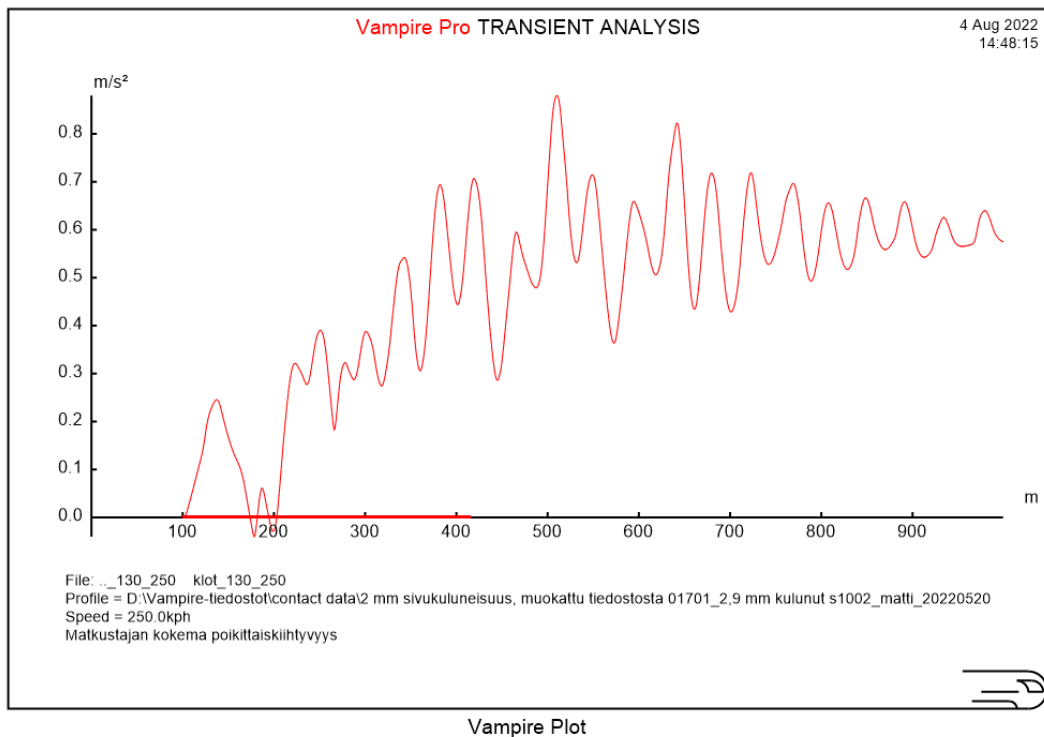
Klotoidin muotoisen kaaren ja sitä seuraavan ympyränkaaren poikittaiskiihtyvyydet eri nopeuksilla ja kallistuksilla esitetty kuvissa 28–31. Kuvaajia ja niiden välisiä eroja on tutkittu tarkemmin kappaleessa 7.3.



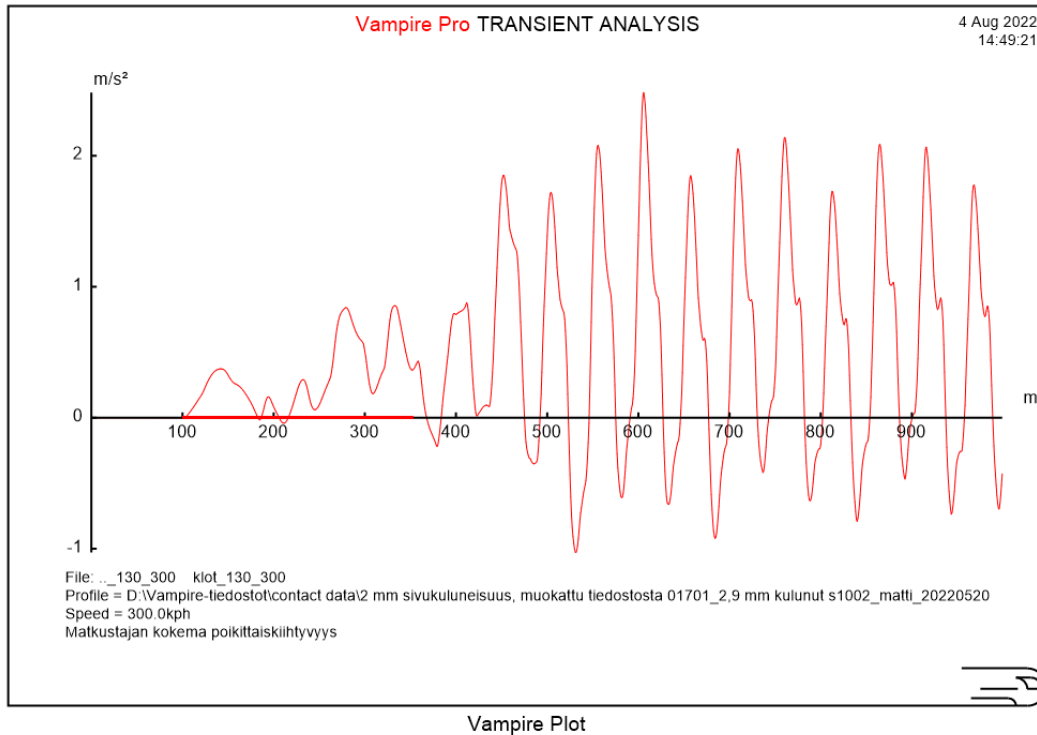
Kuva 28. Poikittaiskiihtyvyys klotoidin muotoisessa siirtymäkaarella nopeudella 250 km/h ja 110 mm kallistuksella. 250 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



Kuva 29. Poikittaiskiihtyvyys klotoidin muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 300 km/h ja 110 mm kallistuksella. 200 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



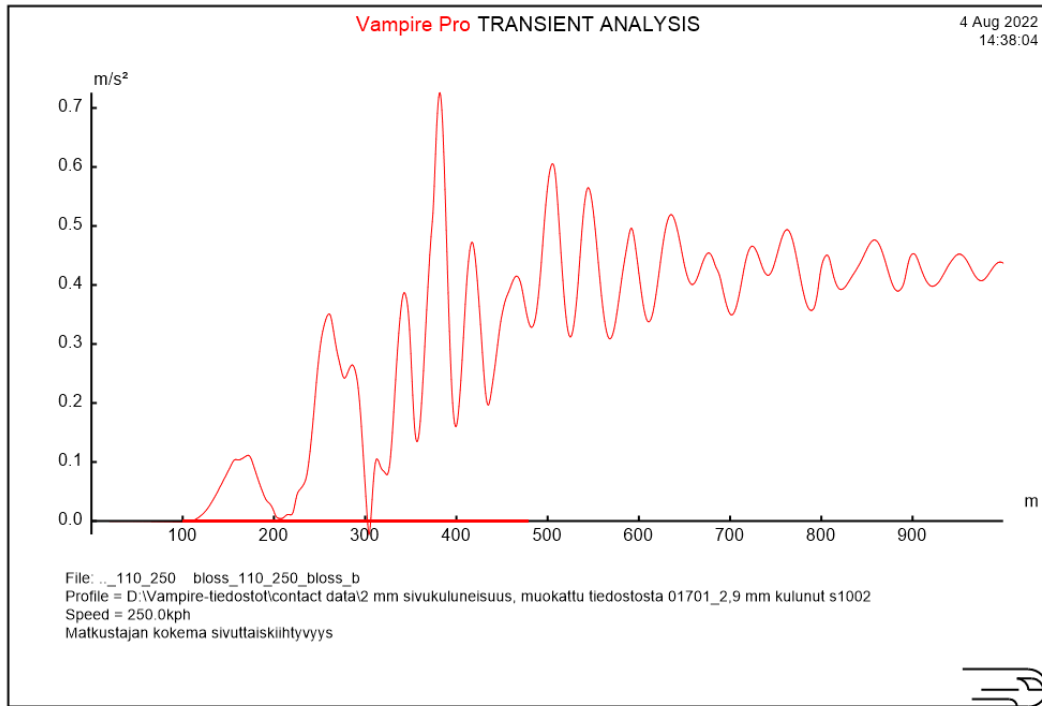
Kuva 30. Poikittaiskiihtyvyys klotoidin muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 250 km/h ja 130 mm kallistuksella. 315 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



Kuva 31. Poikittaiskiihtyvyys klotoidin muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 300 km/h ja 130 mm kallistuksella. 245 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.

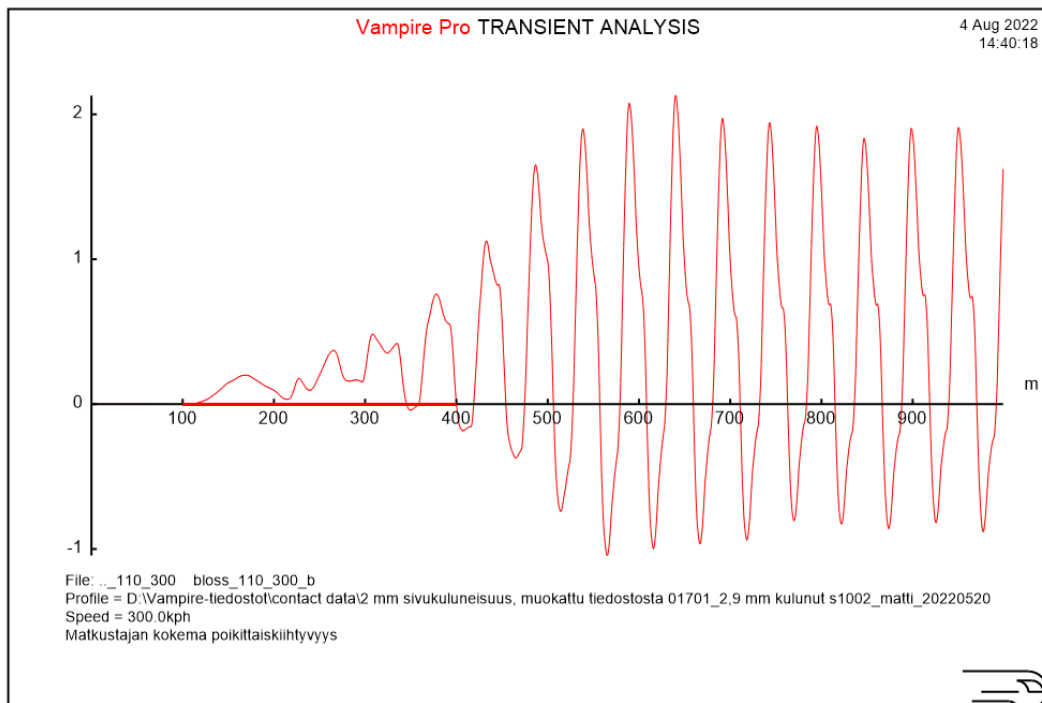
7.2.2 Blossin siirtymäkaari

Blossin siirtymäkaaren muotoisen kaaren ja sitä seuraavan ympyränkaaren poikittaiskiihtyvyydet eri nopeuksilla ja kallistuksilla esitetty kuvissa 32–35. Kuvaajia ja niiden välisiä eroja on tutkittu tarkemmin kappaleessa 7.3.



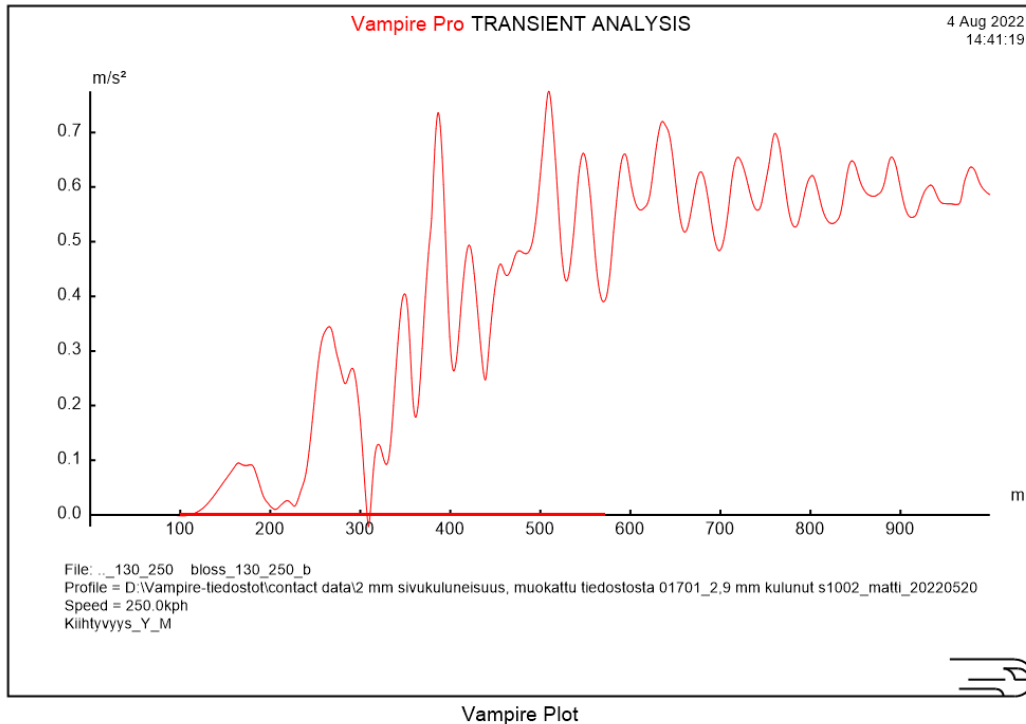
Vampire Plot

Kuva 32. Poikittaiskiihtyvyyden Blossin siirtymäkaaren muotoisessa siirtymäkaareissa nopeudella 250 km/h ja 110 mm kallistuksella. 375 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.

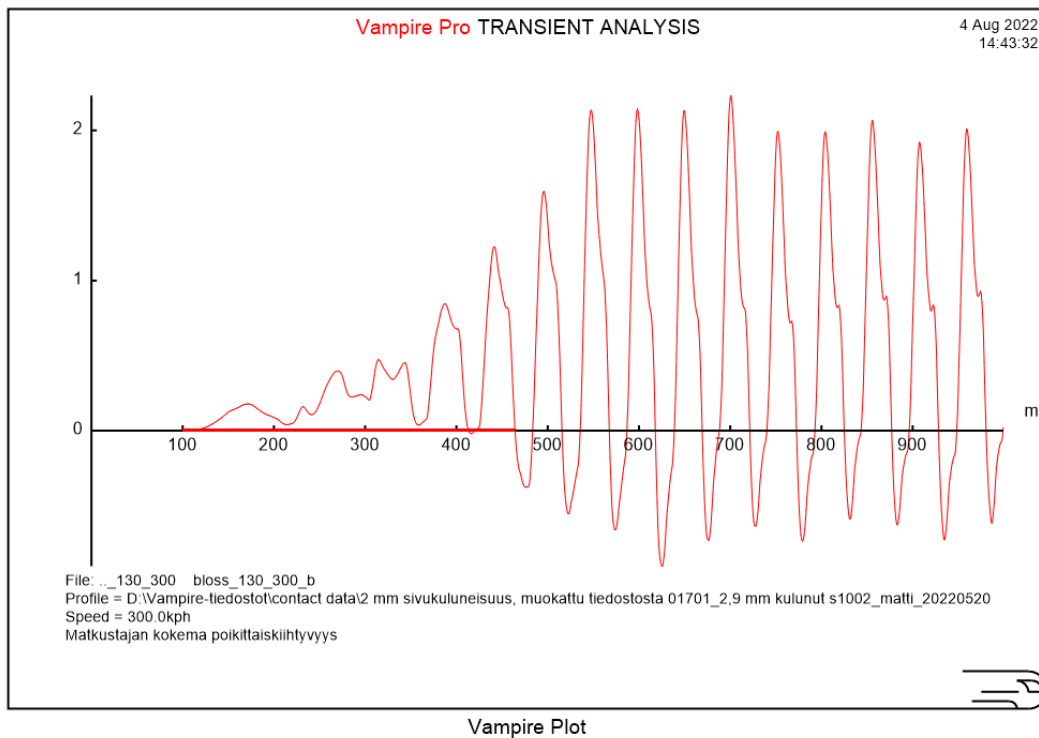


Vampire Plot

Kuva 33. Poikittaiskiihtyvyyden Blossin siirtymäkaaren muotoisessa siirtymäkaareissa nopeudella 300 km/h ja 110 mm kallistuksella. 300 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



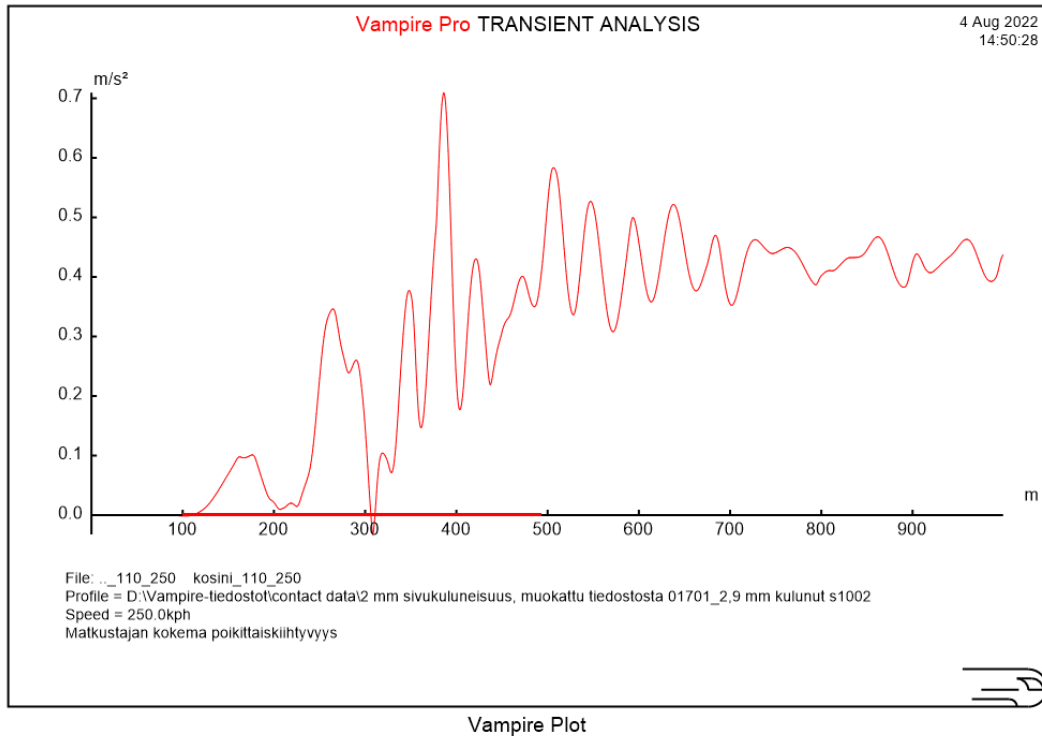
Kuva 34. Poikittaiskiihtyvyyden Blossin siirtymäkaaren muotoisessa siirtymäkaareissa nopeudella 250 km/h ja 130 mm kallistuksella. 470 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



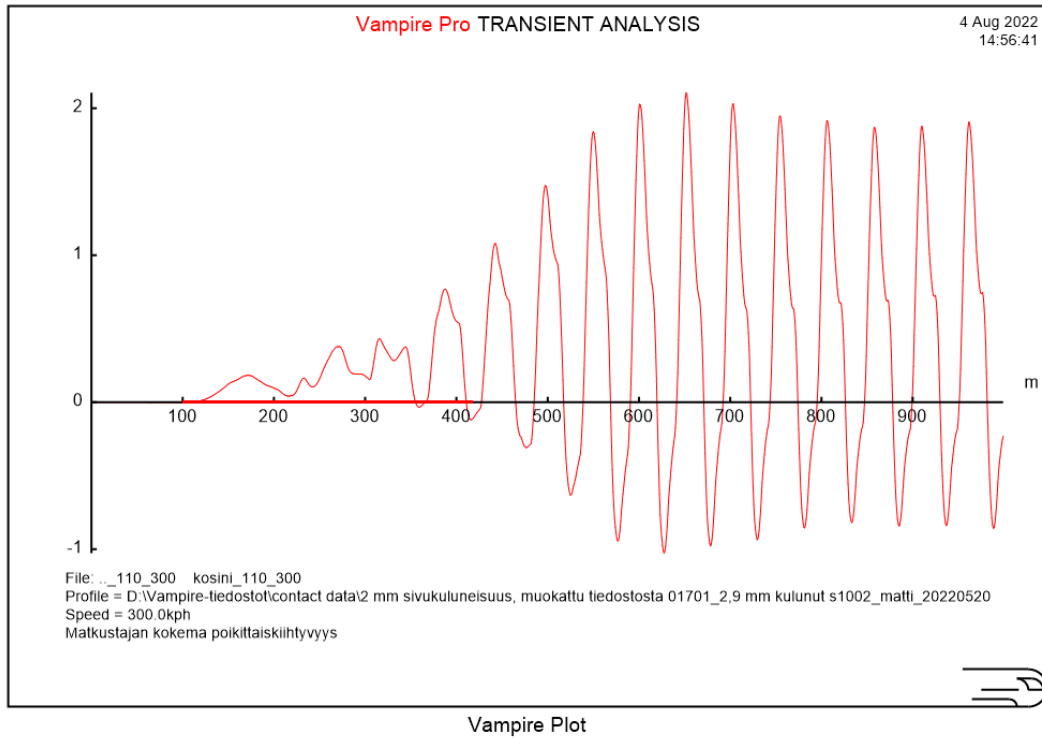
Kuva 35. Poikittaiskiihtyvyyden Blossin siirtymäkaaren muotoisessa siirtymäkaareissa nopeudella 300 km/h ja 130 mm kallistuksella. 365 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.

7.2.3 Kosinikaari

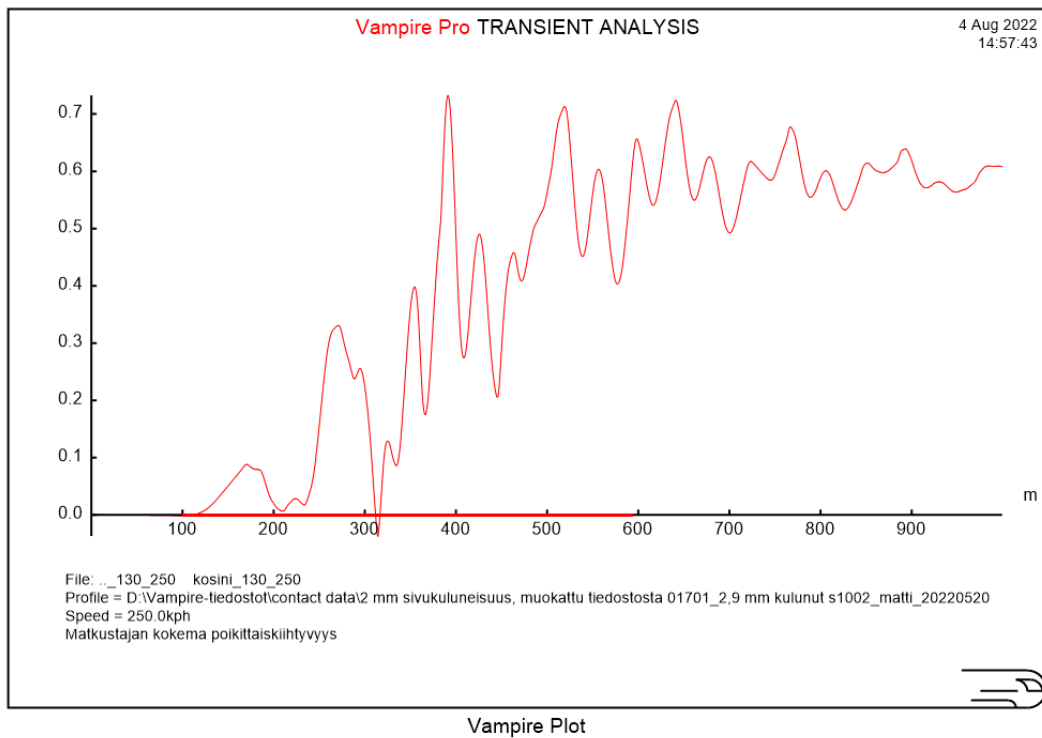
Kosinikaaren muotoisen kaaren ja sitä seuraavan ympyränkaaren poikittaiskiihtyvyydet eri nopeuksilla ja kallistuksilla esitetty kuvissa 36–39. Kuvaaajia ja niiden välisiä eroja on tutkittu tarkemmin kappaleessa 7.3.



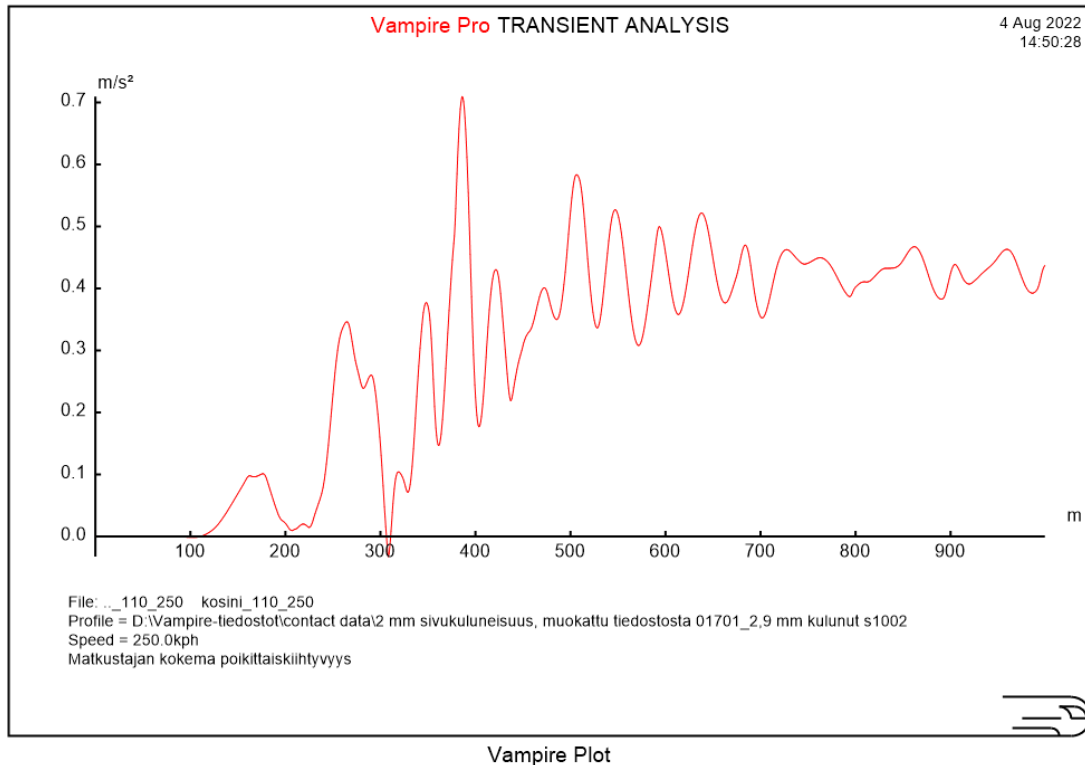
Kuva 36. Poikittaiskiihtyvyys kosinikaaren muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 250 km/h ja 110 mm kallistuksella. 490 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



Kuva 37. Poikittaiskiihtyvyyks kosinikaaren muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 300 km/h ja 110 mm kallistuksella. 315 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



Kuva 38. Poikittaiskiihtyvyyks kosinikaaren muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 250 km/h ja 130 mm kallistuksella. 490 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.



Kuva 39. Poikittaiskiihtyvyys kosinikaaren muotoisessa siirtymäkaaressa nopeudella 300 km/h ja 130 mm kallistuksella. 385 m pitkä siirtymäkaaren osuus esitetty punaisella janalla.

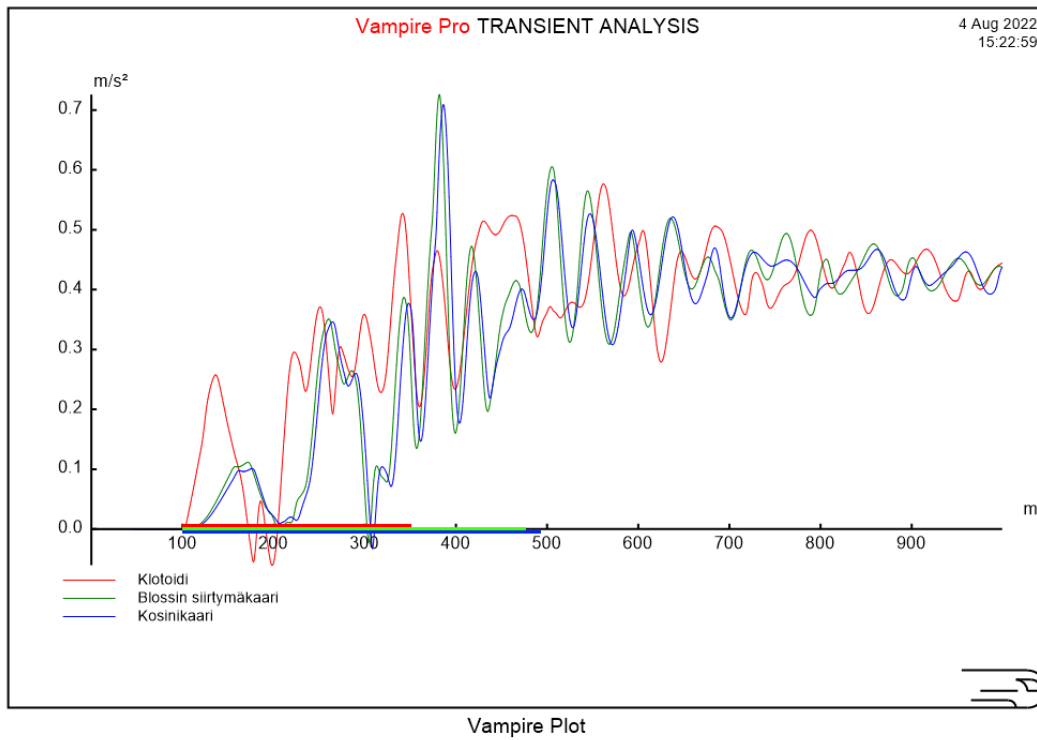
7.3 Tulosten vertailu

Kuvissa 40 ja 41 on esitetty kaikkien siirtymäkaaren muotojen poikittaiskiihtyvyyksien kuvaajat 250 km/h nopeuksilla. Blossin siirtymäkaaren ja kosinikaaren kuvaajat muistuttavat hyvin pitkälti toisiaan ja niissä nähtävissä oleva kaluston ja radan vuorovaikutuksesta johtuva poikittaissuuntainen edestakaisen liikkeen taajuus on lähes sama. Blossin siirtymäkaaren ja kosinikaaren kaarevuuskuvaajat muistuttavat melko paljon toisiaan, samoin kuin niiden teoreettinen poikittaiskiihtyvyys kuvassa 11. Tästä syystä niiden kiihtyvyydet muistuttanevat myös simuloidessa hyvin paljon toisiaan. Erot näyttävät muodostuvan lähinnä siirtymäkaarien pituuksien ja sitä kautta sijaintien erosta. Suurus ja suunta muistuttavat hyvin pitkälti toisiaan.

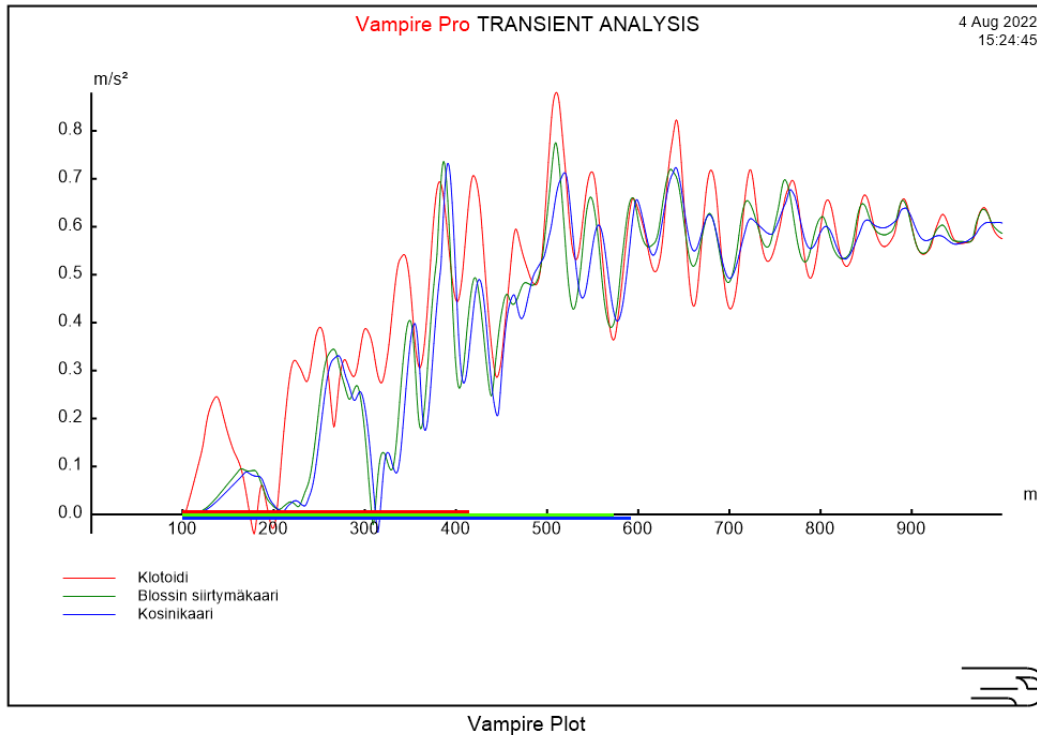
Klotoidia kohtaan suurin kritiikki kohdistuu sen kaarevuuden ja kallistusviisteen muodon epäjatkuvuuteen. Tästä syystä sen alku- ja loppupisteissä esiintyy äkillisiä poikittaiskiihtyvyyden muutoksia. Nämä muutokset ovat nähtävissä myös simuloimalla muodostetuissa poikittaiskiihtyvyyden kuvaajissa. Etenkin suoralta kaarelle siirryttäessä esiintyy klotoidilla selkeästi Blossin siirtymäkaaren ja kosinikaaren kuvaajista erottuva piikki poikittaiskiihtyvyydessä. Tämä on selitettävissä klotoidin suoraviivaisella kaarevuuden muutoksella. Blossin siirtymäkaarella ja kosinikaarella suurimmat muutokset tapahtuvat siirtymäkaaren puolivälin tienoilla, jossa myös niiden kaarevuuden muutos on suurin.

Klotoidin alkupisteessä nähtävä äkillinen poikittaiskiihtyvyyden arvo on kuitenkin melko pieni, kun sitä verrataan esimerkiksi poikittaiskiihtyvyyden raja-arvoon,

0,49 m/s². Myöskään poikittaiskiihtyvyyden muutos, eli nykäys ei näytä esimerkiksi Blossin siirtymäkaarella tai klotoidikaarella tapahtuvia nykäyksiä suuremmalta.



Kuva 40. Poikittaiskiihtyvyydet 250 km/h nopeudella ja 110 mm kallistuksella. Klotoidi punaisella, Blossin siirtymäkaari vihreällä ja kosinikaari sinisellä viivalla. Siirtymäkaarien osuudet esitetty vastaavilla väreillä mittajanalla.



Kuva 41. Poikittaiskiihtyvyydet 250 km/h nopeudella ja 130 mm kallistuksella. Klotoidi punaisella, Blossin siirtymäkaari vihreällä ja kosinikaari sinisellä viivalla. Siirtymäkaarien osuudet esitetty vastaavilla väreillä mittajanalla.

7.4 Yleistettävyys ja luotettavuus

Simuloinnin tuloksia tarkasteltaessa tulee huomioida, että jokainen simulointi on suoritettu ilman geometriassa esiintyviä poikkeamia ja samoilla kiskon ja pyörän profiilin muodoilla. Kuvaajissa esiintyvät voimat voivat siis poiketa riippuen valittujen profiilien ja poikkeamatiedostojen mukaan. Työhön haluttiin valita mahdollisimman hyvin todellista tilannetta vastaavat parametrit, joten virheettömällä rata-geometrialla tai kiskon ja pyörän profiililla simulointien tekeminen ei ollut tutkimuksen kannalta mielekäs vaihtoehto. Poikkeamatiedosto aiheutti kuitenkin kaluston epästabiliin kulun, joten sen käytöstä jouduttiin luopumaan, jotta simuloinnista saataisiin vertailukelpoisia tuloksia. Toisaalta kaarteita tutkittaessa tulisi myös huomioida kuinka kisko kuluu kaarteessa.

Simuloinnin tuloksista on edestakaisen poikittaisliikkeen vuoksi hankalaa löytää merkittäviä eroja eri siirtymäkaarien välillä, vaikkakin klotoidin muotoisella kaarella on nähtävissä muita siirtymäkaaria suurempia huippuja poikittaiskiihtyvyyden suuruudessa sen alkupisteessä. Ohjelmistolla simuloiminen sopineekin ehkä paremmin kaluston ja kiskon vuorovaikutuksen analysointiin kuin pitkien geometriaelementtien ja niistä aiheutuvien voimien ja sitä kautta matkustusmukavuuden ja turvallisuuden analysointiin. Simulointia voisi hyödyntää työkaluna, kun halutaan tarkastella minkälaisia haasteita eri geometriaelementit tuottavat kunnossapidolle radan kulumisen seurauksena.

Simulointiajojen vertaileminen mittausaineistoon ei myöskään ollut mahdollista. Syyinä tähän oli, että mittausaineiston tulokset eivät vaikuttaneet luotettavilta kiih-

tyvyyksien ollen toiseen suuntaan kaartaessa merkittävästi suuremmat kuin toiseen. Tietysti voimat ovat molemmissa tapauksissa samansuuntaiset, ja niistä on erotettavista eri geometriaelementit, mutta voimien tarkasteleminen ja vertailu ei ole mahdollista sillä tarkkuudella mitä siirtymäkaaren optimointi matkustusmukavuuden, -turvallisuuden ja kunnossapidon kannalta olisi vaatinut.

Siirtymäkaaren optimoinnissa kyseinen simulointiohjelmisto oli erittäin haasteellinen käyttää, eikä sen laskentaperiaatteita tai antureiden tuloksia voi analysoida kovin syvällisesti, koska niiden laskutapaa ei ohjelmiston dokumentaatiossa avata. Simuloinnissa tulisi myös tarkastella rataa kohdistuvia voimia, jotta siirtymäkaarien tarkastelussa voitaisiin huomioida myös kunnossapidon tarpeet.

8 Yhteenveto

Siirtymäkaaret ovat merkittävä geometriaelementti niin turvallisen liikennöinnin kuin matkustusmukavuudenkin näkökulmasta. Suomessa pääosin käytössä oleva klotoidi on matemaattisesti melko yksinkertainen ja teoreettisesti tarkasteltuna varsin optimaalinen siirtymäkaaren muoto sen kaarevuuden muuttuessa suoraviivaisesti kohti seuraavan elementin kaarevuutta. Sitä on kuitenkin kritisoitu sen päätepisteissä tapahtuvasta kaarevuuden ja kallistuksen epäjatkuvuudesta ja tästä aiheutuvista lieveilmiöistä. Ilmiö oli myös havaittavissa suurilla nopeuksilla suorite- tuissa simulointiajoissa. Suurilla nopeuksilla ajettaessa olisi tärkeää löytää mahdol- lisimman turvallinen ja ratarakenteita vähän kuluttava siirtymäkaaren muoto.

Tutkimuksessa selvitettiin maailmassa käytössä olevia siirtymäkaaren muotoja, joista tarkemmin päädyttiin tutkimaan muun muassa Saksassa käytössä olevaa Blossin siirtymäkaarta ja japanilaisilla suurnopeusradoilla käytössä olevaa kosi- nikaarta. Kaaret valikoitiin tarkasteluun niiden verrattain yksinkertaisten määrit- tely-yhtälöiden vuoksi. Pois karsittiin esimerkiksi paloittain määriteltäviä siirtymä- kaaria, sekä sellaisia, joissa oli yhdistelty kahta tai useampaa eri siirtymäkaarityyp- piä keskenään. Blossin ja kosinikaaren tapauksessa tulee kuitenkin huomioida nii- den klotoidia huomattavasti suuremmat pituudet ja ympyränkaaren sivusiirtymät, joiden vaikutus tulee huomioida jo hankkeen varhaisessa vaiheessa.

Siirtymäkaaria tutkittiin niiden kaarevuuksien yhtälöiden ja simulointiajojen avulla. Kaarevuuksien yhtälöistä muodostettiin poikittaiskiihtyvyyksien yhtälöt siirtymä- kaarella kuljetun matkan suhteen ja näin pystyttiin arvioimaan muun muassa poi- kittaiskiihtyvyyden muutoksia siirtymäkaarella. Simulointiajoissa junan kulkua simu- loitiin niin todellisella rataosuudella kuin suunnitteluohjeiden mukaan muodoste- tuilla suuriin nopeuksiin suunniteluilla raiteilla. Simulointiajoja todellisella rataosalla oli tarkoitus verrata radantarkastusvaunu Meerin tuottamaan aineistoon, mutta mittausdatan luotettavuutta ei kyetty todentamaan.

Myös laskennallisten kiihtyvyyksien vertaileminen mittausaineistoon oli haastavaa. Osin Klingelin liikkeestä johtuvan poikittaiskiihtyvyyden jatkuvan muutoksen takia, osin siitä syystä, että mittausaineistossa oikealle kääntyvissä kaarteissa poikittais- kiihtyvyys vaikutti olevan laskennallista kiihtyvyyttä kertaluokkaa suurempi. Syitä tälle ei voitu selvittää, sillä Meerin mittalaitteista tai niiden toiminnasta ei ole saa- tavilla tietoa yritysalaisuuksien vuoksi.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että klotoidin asemaa vallitsevana siirty- mäkaaren muotona tulee tarkastella uudestaan, mutta tästä antaa viitteitä jo muissa maissa suurnopeusradoilla käytössä olevat siirtymäkaaren muodot. Kirjalli- suuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että klotoidin käyttöä siirtymäkaarena suurnopeusradalla tulee välttää sen kaarevuuden ja kallistusviisteen epäjatkuvuu- den vuoksi.

Simuloinnin vahvuutena on nopeat ratamalliin tehtävät muutokset ja kaluston no- peuden vaivaton varioiminen jopa saman simulointiajokerran sisällä. Joskin ohjel- misto on sen toimintaperiaatteen perusteella luotu simuloimaan ainoastaan lineaar- isesti muuttuvia siirtymäkaaria, jolloin muiden siirtymäkaaren muotojen käyttämi- nen vaatii hieman apuohjelmien käyttämistä. Simulointia tehdessä tulee myös kiin- nittää huomiota ohjelman sisällä tapahtuvaan anturien ja kalustomallin valintaan.

Tässä tutkimuksessa ilmeni jatkotutkimustarpeita parhaan siirtymäkaaren muodon määrittämiseksi. Toivottavaa on, että simuloitua hyödynnettäisiin jatkotutkimuksessa, sekä radan ja kaluston välisten ilmiöiden hahmottamiseen laajemmaltikin. Tulee kuitenkin harkita tulisiko simulointiin käyttää jotakin toista ohjelmistoa ja kalustomallin tulee suurnopeusratoja simuloitaessa olla niillä käytettäväksi suunniteltua kalustoa vastaava. Jatkotutkimuksissa tulisi huomioida miten eri siirtymäkaarien muodot vaikuttavat radan kunnossapidettävyyteen ja kuinka niiden implementointi onnistuu Suomessa käytössä oleviin raidegeometrian suunnitteluohjelmistoihin. Jatkotutkimuksen lisäksi tulee ohje *RATO 2* päivittää suurnopeusradan siirtymäkaarien osalta.

Lähteet

- Brustad, T.F. and Dalmo, R. (2020). Railway transition curves: A review of the state-of-the-art and future research, Infrastructures, MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/341476435_Railway_Transition_Curves_A_Review_of_the_State-of-the-Art_and_Future_Research
- Ciobanu, C. (2015) Bloss transition - a short design guide, PWI Journal, 133, pp. 14–18. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/282288817_Bloss_transition_-_a_short_design_guide
- DeltaRail Group Limited. (2007). Vampire pro Tutorial Guide, Derby, United Kingdom.
- Esveld, Coenraad. (2001). Modern railway track, MRT-Productions, Zaltbommel. Saatavissa: http://www.esveld.com/Documents/MRT_Selection.pdf
- Fischer, S. (2009). Comparison of railway track transition curves, Pollack Periodica, 4(3). Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/245532740_Comparison_of_railway_track_transition_curves
- Klauder, LT, Jr. (2020). Railroad Spiral Design and Performance, Joint Rail Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, pp. 9-21. Saatavissa: <https://asmedigitalcollection.asme.org/JRC/proceedings-abstract/JRC2012/44656/9/266899>
- Korkeamäki, Samuel (2011). Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa, Liikennevirasto, Helsinki. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-04_rataan_kohdistuva_web.pdf
- Kufver, B. (1997). Mathematical description of railway alignments and some preliminary comparative studies, Swedish National Road and Transport Research Institute. Saatavissa: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:675179/FULLTEXT01.pdf>
- Loponen, T., Salmenperä, P., Sangi, I., Nurmikoulu, A. (2020). Monikappaledynamiikkaan perustuvien kalustomallien verifiointi, Väylävirasto, Helsinki. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-753-6>
- MERMEC. (2016). MERMEC won the inspection contract for Finland's entire rail network. Saatavissa: <https://www.mermecgroup.com/press-room/news/1066/mermec-won-the-inspection-contract-for-finlands-entire-rail-network-.php>
- Pascal, J.-P. (2020). A Solution to Remove Railway Track Discontinuities at Spiral Junctions, International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 8, pp. 95–102. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/344397699_A_Solution_to_Remove_Railway_Track_Discontinuities_at_Spiral_Junctions
- Taimela, R. (2011). Raidegeometrian suunnittelu, Liikennevirasto, Helsinki. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2011-22_raidegeometrian_suunnittelu_web.pdf
- Taimela, R. (2012). Raidegeometria, Liikennevirasto, Helsinki.
- Transtech. (2021). Junavaunut - Perustiedot. Saatavissa: <https://www.trans-tech.fi/index.php?266>
- Viitala, T. (2016). Rautatietekniikka 3/2016, Rautatiealan teknisten liitto RTL RY, s. 22–24. Saatavissa: https://bin.yhdistys-avain.fi/1605615/V0yTljeUbCvOmNuIKByMOVJnmw/Rautatietekniikka_3_2016_pieni.pdf
- Väylävirasto. (2021a). Kiihtyvyyden mittausjärjestelmä. Helsinki.

-
- Väylävirasto. (2021b). Raidegeometrian mittausjärjestelmä. Helsinki.
- Väylävirasto. (2021c). RATO 2, Radan geometria. Helsinki. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2021-22_rato2_web.pdf
- Whitney, B. and McManus, M. (2017). NR/L3/TRK/2049, Level 3 Work Instruction, Track Design Handbook, 14th edition, Network Rail, Lontoo.
- Wikipedia (2021) Ed (vaunusarja). Saatavissa: [https://fi.wikipedia.org/wiki/Ed_\(vaunusarja\)](https://fi.wikipedia.org/wiki/Ed_(vaunusarja))



Väylävirasto
Trafikledsverket

ISSN 2490-1202
ISBN 978-952-405-014-2
www.vayla.fi