



Väylävirasto  
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisu  
26/2022

# ERTMS-järjestelmän kapasiteettianalyysi

## Optimointi ETCS-tasolla 2





Janne-Joonas Mantsinen, Tuomas Toivio, Teppo Hulkko

# **ERTMS-järjestelmän kapasiteettianalyysi**

Optimointi ETCS-tasolla 2

Väyläviraston julkaisuja 26/2022

*Kannen kuva: Aapo Halminen*

Verkkójulkaisu pdf ([www.vayla.fi](http://www.vayla.fi))

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-317-963-9

Väylävirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
puh. 0295 343 000

**Janne-Joonas Mantsinen, Tuomas Toivio, Teppo Hulkko: ERTMS-järjestelmän kapasiteettianalyysi - Optimointi ETCS-tasolla 2.** Väylävirasto Helsinki 2022. Väyläviraston julkaisuja 26/2022. 58 sivua. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-963-9.

**Avainsanat:** ERTMS/ETCS, simulointi, kapasiteetti, optimointi, suorituskyky

## Tiivistelmä

Tämän työn tavoitteena on selvittää miten yleiseurooppalainen junakulunvalvontajärjestelmä ERTMS/ETCS vaikuttaa rautatieliikenteen harjoittamiseen ja ratakapasiteettiin, kun sillä korvataan nykyinen kansallinen junakulunvalvontajärjestelmä JKV, ja minkä tyyppisillä rataosilla turvalaitevarustelun yksi yhteen korvaaminen uudella järjestelmällä voi olla riittävä ja millaisilla ei. Tarkastelussa on mukana kolme erityyppistä rataosaa, joista jokaiselle tehdään operatiivinen simulaatio kolmella eri turvalaitevarustelulla: nykyinen JKV-varustelu, nykyisen yks yhteen korvaaminen ERTMS/ETCS-varustelulla ja optimoitu ERTMS/ETCS-varustelu. Aikataulurakenne pidetään samana rataosakohtaisesti, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään.

ERTMS/ETCS-järjestelmän liikkuvan kaluston jarrukäyrät ovat konservatiivisemmat kuin JKV-järjestelmän. Työssä käydään läpi näiden kahden eri järjestelmän jarrukäyrälaskennan eroavaisuudet, jotka osaltaan vaikuttavat myös järjestelmän suorituskykyyn. ERTMS/ETCS-järjestelmän jarrukäyrien laskentaan on mahdollista vaikuttaa kansallisesti määritettävillä parametreilla, mutta näiden arvojen optimointi ei ole tämän työn tarkastelussa mukana.

Työssä luodaan lyhyt katsaus aikaisempiin Suomen rataverkolle tehtyihin ERTMS/ETCS-järjestelmän vaikutustarkasteluihin sekä selvitetään kyseisen järjestelmän teoreettista vaikutusta kapasiteettiin jarrukäyrälaskennan ohella.

Rautatieliikenteen simulointiin liittyy useita parametreja ja oletuksia, joilla on merkittäviä vaikutuksia simulointitulokseen. Näiden valinta on esitetty huolellisesti, jotta esitetyt tulokset olisivat lukijalle mahdollisimman yksiselitteiset. Pääsääntöisesti simuloinnit puoltavat tarkasteltujen rataosien linjaosuuksien varustelua useammalla osuudella, mutta esimerkiksi kaksiraiteisilla osuuksilla, joilla liikennöi pitkän matkan junia, aikataulurakenne sisältää runsaasti varallisuuksia tai liikkuvia yksiköitä on vähän, ei eri toteutuksien välille synny merkittäviä eroja. Tällaiset pienet erot simuloitavien järjestelmien välillä voi kieliä myös käyttämättömästä kapasiteetista, mitä voidaan tutkia erillisillä kapasiteettitarkasteluilla.

**Janne-Joonas Mantsinen, Tuomas Toivio, Teppo Hulkko: Kapacitetsanalys för ERTMS-systemet - Optimering på ETCS-nivå 2 .** Trafikledsverket. Helsingfors 2022. Trafikledsverkets publikationer 26/2022. 58 sidor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-963-9.

## Sammanfattning

Målsättningen med detta arbete är att klarlägga vilken inverkan det alleuropeiska tågövervakningssystemet ERTMS/ETCS har på driften av järnvägstrafiken och bankapaciteten när det ersätter det befintliga nationella tågövervakningssystemet JKV, och på vilka typer av bandelar ersättande av säkerhetsutrustning med ett nytt system enligt ett-till-ett-principen kan vara tillräckligt och var detta inte är tillräckligt. Undersökningen omfattar tre olika typer av bandelar, för vilka utförs en operativ simulering med tre olika säkerhetsutrustningar: den nuvarande JKV-utrustningen, ersättande av den befintliga utrustningen med ERTMS/ETCS-utrustning enligt ett-till-ett-principen samt en optimerad ERTMS/ETCS-utrustning. Specifikt för bandelen bibehålls tidtabellsstrukturen oförändrad, så att resultaten är inbördes jämförelsedugliga.

Bromskurvorna för ERTMS/ETCS-systemets rullande materiel är mer konservativa än JKV-systemets. I arbetet genomgås skillnaderna mellan bromskurveberäkningarna för dessa två system, vilka för sin del också påverkar systemets prestanda. Det är möjligt att påverka bromskurveberäkningarna i ERTMS/ETCS-systemet med nationellt fastställda parametrar, men optimering av dessa värden omfattas inte av den undersökning som ingår i detta arbete.

I arbetet skapas en kort översikt över tidigare konsekvensbedömningar av ERTMS/ETCS-systemet på det finska bannätet och vid sidan av bromskurveberäkningar undersöks det ifrågavarande systemets teoretiska inverkan på kapaciteten.

Simuleringen av järnvägstrafiken är förknippad med ett flertal parametrar och antaganden som har en betydande inverkan på simuleringsresultatet. Valet av dessa har presenterats noggrant för att göra de presenterade resultaten så entydiga för läsaren som möjligt. Principiellt talar simuleringarna för att de undersökta bandelarnas linjeavsnitt bör utrustas på flera sträckor, men på t.ex. sträckor med dubbelspår som trafikeras av fjärrtåg innehåller tidtabellsstrukturen rikligt med resurser, dvs. att antalet rörliga enheter är litet, och det uppstår inga betydande skillnader mellan olika genomföranden. Sådana små skillnader mellan de simulerade systemen kan också skvallra om outnyttjad kapacitet, vilket kan undersökas genom separata kapacitetsundersökningar.

**Janne-Joonas Mantsinen, Tuomas Toivio, Teppo Hulkko: ERTMS capacity analysis - Optimisation at ETCS Level 2.** Finnish Transport Infrastructure Agency Helsinki 2022. Publications of the FTIA 26/2022. 58 pages. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-963-9.

## Abstract

The aim of this study is to examine the impact of the ERTMS/ETCS pan-European train control system on the operation of rail services and on track capacity when it replaces the existing national train control system, JKV. The aim was also to find the types of track sections on which the replacement of the complete safety equipment with the new system can be sufficient and the track sections where it cannot. The review includes three different types of track sections, each of which will be subject to an operational simulation with three different safety equipment variations: the current JKV equipment, replacement of the existing equipment completely with the ERTMS/ETCS equipment, and the use of optimised ERTMS/ETCS equipment. The timetable structure will be retained as the same on a line-by-line basis, so that the results are comparable.

The brake curves of the rolling stock of the ERTMS/ETCS are more conservative than those of the JKV system. The study examines the differences between the brake curve calculations of these two different systems, which also contribute to the performance of the system. It is possible to influence the calculation of brake curves in ERTMS/ETCS by nationally determined parameters, but the optimisation of these values is not included in the review conducted in this study.

The study will provide a brief overview of previous impact assessments of ERTMS/ETCS on the Finnish rail network, and examine the theoretical impact of this system on capacity in addition to the brake curve calculations.

The simulation of rail transport involves a number of parameters and assumptions that exert a significant impact on the simulation result. The choice of these has been carefully presented in order to make the presented results as unambiguous as possible to the reader. As a rule, simulations are in favour of equipping the track sections of the lines examined on several sections, but, for example, on the double-track sections operating long-distance trains, the timetable structure contains a large number of assets or the mobile units are limited; there are no significant differences between the various implementations. Such small differences between the simulated systems may also indicate unused capacity, which can be examined using separate capacity reviews.

## Esipuhe

Tässä tutkimuksessa vertaillaan eurooppalaisen (ERTMS/ETCS) ja kansallisen (JKV) junakulunvalvontajärjestelmien jarrukäyrälaskentaa keskenään, selvitetään teoreettisella tasolla ETCS-tason 2 vaikutusmahdollisuuksia ratakapasiteettiin sekä tutkitaan simuloinnin avulla ETCS-tason 2 vaikutuksia rataverkon häiriöttömään liikennöitävyyteen ja ratakapasiteettiin.

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa vertailutietoa kolmen eri kulunvalvontatoteutuksen toiminnasta kolmella erityyppisellä linjaosuudella, jotka edustavat Suomen yleisimpiä ratatyyppisiä. Vertailun tuloksena saadaan ehdotuksia ja havaintoja ERTMS/ETCS-järjestelmäsuunnitteluun vaikuttavista seikoista tulevaisuudessa, kun nykyisen junakulunvalvonnan korvaaminen tulee ajankohtaiseksi.

Tutkimukseen osallistuivat:

Aki Härkönen	Väylävirasto
Janne-Joonas Mantsinen	Proxion Plan Oy
Tuomas Toivio	Proxion Plan Oy
Teppo Hulkko	Proxion Plan Oy
Tuukka Varjoranta	Proxion Plan Oy
Aapo Halminen	Proxion Plan Oy
Joonas Neuvonen	Proxion Plan Oy
Madeleine van Hövell	VIA Consulting & Development GmbH
Eike Henning	VIA Consulting & Development GmbH

Helsingissä huhtikuussa 2022

Väylävirasto  
Radanpidon keskitetyt tehtävät



# Sisältö

TERMINOLOGIA.....	8
1 TYÖN TAUSTA JA TAVOITTEET .....	11
2 ERTMS/ETCS-JÄRJESTELMÄ.....	12
2.1 ETCS-tason 2 toiminnallisuus.....	12
2.2 Jarrukäyrät.....	13
3 ERTMS:N TEOREETTINEN VAIKUTUS KAPASITEETTIIN.....	18
3.1 Aikaisempia tutkimuksia ERTMS:n vaikutuksesta kapasiteettiin.....	20
3.1.1 Kaupunkiratojen homogeeninen liikenne.....	20
3.1.2 Kaksiraiteisten ratojen heterogeeninen liikenne.....	21
3.2 Kahdennettu ajolupamerkki.....	23
4 MENETELMÄT .....	24
4.1 Tarkastelun lähtökohdat .....	24
4.1.1 Tyyppi I: Pasila–Pasila .....	24
4.1.2 Tyyppi II: Lielähti–Pori/Rauma.....	26
4.1.3 Tyyppi III: Kouvola–Luumäki.....	28
4.2 Tarkastelumenetelmät .....	29
4.3 Simulointiohjelmisto .....	30
4.4 Simuloinnin lähtötiedot .....	31
4.4.1 Ratainfrastruktuuri ja turvalaitteet.....	31
4.4.2 Junakokoonpanot ja aikataulut .....	31
4.4.3 Häiriösimuloinnissa käytetyt viiveet .....	32
4.4.4 Optimoitu sijoittelu .....	33
4.5 Simulointitarkastelujen oletukset, rajoitukset, etenemisprosessi ja laadunvarmistus.....	33
4.5.1 JKV-mallinnus .....	34
4.5.2 Simulointiaika ja aluerajaukset.....	34
4.5.3 Simuloinnin aikatauluolettaama .....	35
4.5.4 Simulointitarkastelun etenemisen prosessi .....	35
4.5.5 Tulosten laadunvarmistus.....	36
4.6 Simulointitulosten analyysin mittarit.....	37
5 SIMULOINTITARKASTELU JA TULOKSET .....	40
5.1 Pasila–Pasila ETCS ja JKV vertailu .....	40
5.1.1 Kapasiteetin käyttöasteen vertailu.....	42
5.2 Lielähti–Pori/Rauma ETCS ja JKV vertailu .....	42
5.2.1 Lielähti–Kokemäki.....	43
5.2.2 Kapasiteetin käyttöasteen vertailu.....	46
5.2.3 Kokemäki–Pori .....	46
5.2.4 Kapasiteetin käyttöasteen vertailu.....	48
5.2.5 Kokemäki–Rauma.....	49
5.3 Kouvola–Luumäki ETCS ja JKV vertailu.....	51
5.3.1 Kapasiteetin käyttöasteet .....	53
6 YHTEENVETO .....	55
LÄHDELUETTELO .....	57

## Terminologia

Termi/lyhenne	Alkuperäinen termi	Määritelmä
Ajolupa	Movement authority (MA)	Ratalaitteilta veturilaitteelle välitetty lupa ajaa ajoluvan päätekohtaan saakka.
Ajolupamerkki	ETCS stop marker	Ajoluvan alku- ja/tai päätekohtaa osoittava merkki, jota yksikkö ei ilman lupaa saa ohittaa.
Akselipainoluokka	Axle Load Category	Juna kuuluu aina yhteen akselipainoluokkaan, joita ovat A, HS17, B1, B2, C2, C3, C4, D2, D3, D4, D4XL, E4 ja E5
Akselipainoprofiili	Axle Load Speed Profile (ASP)	Akselipainosta riippuva nopeusprofiili
Asemointipiste		Informaatiopiste, jota käytetään ainoastaan asemointitarkoituksessa.
Baliisiryhmä	Balise group	Baliisiryhmä koostuu 1-8 baliisista, joiden viestit muodostavat yhden sanoman.
Baliisisanoma	Balise telegram	Baliisisanomien koostuvat informaatiopaketeista, joilla ETCS-ratalaitteet kommunikoivat ETCS-veturilaitteen kanssa.
Basic SSP	Basic Static Speed Profile	Perusnopeusprofiili
Cant deficiency SSP		Kallistuksen vajauksen nopeusprofiili
DMI	Driver Machine Interface	Kuljettajaneeli
EBD	Emergency Brake Deceleration	Hätäjarrutuksen hidastuvuuskaäyrä
EBI	Emergency Brake Intervention	Hätäjarrutus
EoA	End of Authority	Ajoluvan päätekohta
ERA	European Union Agency for Railways	Euroopan unionin rautatievirasto
ERTMS	European Rail Traffic Management System	Eurooppalainen rautatieliikenteen hallintajärjestelmä. ETCS + GSM-R tai muu tähän käyttöön hyväksytty radiojärjestelmä.
ETCS	European Train Control System	Eurooppalainen junakulunvalvontajärjestelmä
Eurobaliisi		ETCS-järjestelmän baliisi
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System	Tuleva rautateiden matkaviestintäjärjestelmä

<b>Termi/lyhenne</b>	<b>Alkuperäinen termi</b>	<b>Määritelmä</b>
FRS	Functional Requirements Specification	Toiminnallinen vaatimuseritelmä
FS	Full supervision	Täysvalvonta
Gamma-juna	Gamma train	Moottorijuna
GSM-R	Global System for Mobile communications for railways	Eurooppalainen digitaalinen matkaviestinjärjestelmä, jossa on rautatieominaisuudet mukana
GUI-käyrä	Guidance curve	Opastava käyrä, joka ohjaa kuljettajaa ennakoivaan ajoon.
Informaatiopiste		Informaatiopiste on baliisiryhmä, joka välittää informaatiota veturilaitteelle. Informaatiopiste on yleisnimitys, joka kattaa kaikki eri informaatiopistetyypit.
JKV	ATP-VR/RHK, National Train Control System in Finland	Junien kulunvalvonta
Kallistuksen vajaus	Cant deficiency	Kallistuksen vajauksella tarkoitetaan sitä raiteen tasapainokallistuksen ja todellisen kallistuksen välistä puuttuvaa kallistusta, joka aiheuttaa poikittaiskiihtyvyyttä ulkokaarteeseen päin, kun kallistus on tasapainokallistusta pienempi.
Kaltevuusprofiili	Gradient profile	Radalla on kaltevuusprofiili, joka määritellään jakamalla rata pituuskaltevuusosuuksiin
L1, L2, L3	Level 1, 2, 3	ETCS-taso 1, 2 tai 3
Lambda-juna	Lambda train	Veturivetoinen juna
LOA	Limit of Authority	Ajoluvan päätepiste, kun sallittu nopeus päätepisteellä on suurempi kuin nolla.
LRBG	Last Relevant Balise Group	Viimeksi luettu baliisiryhmä, jota voidaan käyttää sijainnin määrittämisen referenssipisteenä veturilaitteen ja radanvarsilaitteiston välillä tasolla 2.
LUKS		Simulointiohjelmisto
Muuttuja	Variable	Viesteissä välitettävien informaatiopakettien osa.
Paikannus	Relocation	Paikannuksella informoidaan veturilaitetta yksikön tarkasta sijainnista
Paketti	Packet	Viesteissä välitettävän informaation osa, joka koostuu muuttujista.

<b>Termi/lyhenne</b>	<b>Alkuperäinen termi</b>	<b>Määritelmä</b>
Parametrit	Parameters	ETCS-järjestelmän kansalliset parametrit määrittävät mm. käytettäviä nopeuksia ja toimintoja kansallisesti määriteltyjen arvojen mukaisesti
Rajoittavin nopeusprofiili	Most Restrictive Speed Profile (MRSP)	Nopeusprofiili, jonka veturilaitte muodostaa yhdistämällä rajoittavimmat osat kaikista käytössä olevista nopeusprofiileista.
RBC	Radio Block Centre	Radiosuojastuskeskus
RMR	Railway Mobile Radio	Rautateiden radioviestintäjärjestelmä
RV	Reversing	Pakeneminen
SBD	Service Brake Deceleration	Käyttäjarrutuksen hidastuvuusikäyrä
SBI	Service Brake Intervention	Käyttäjarrutus
Seis ohi -toiminto	Override	Luvallinen Seis-opasteen ohitus
Subset		Vaatumuseritelmän osa
Suojattava kohta	Danger Point	Kulkutien päätekohtan jälkeinen kohta, jonka yksikön etuosa voi saavuttaa ilman vaaraa, vaikka yksikkö ohittaisi ajoluvan päätekohtan
Tavoitenopeus	Target speed	Suurin sallittu nopeus tavoitepisteessä
TSR	Temporary Speed Restriction	Tilapäinen nopeusrajoitus
Turvattava kohta	Supervised Location (SvL)	Turvattava kohta voi olla ajoluvan päätekohta tai ohiajovaran pääte-piste, rajamerkki tai muu sijainti, johon veturin keula saa ulottua vaarantamatta viereisen raiteen liikennöintiä.
Valvontanopeus	Release speed	Nopeus, jolla ETCS sallii lähestyä Seis-opastetta

# 1 Työn tausta ja tavoitteet

Suomessa ollaan siirtymässä kohti yleiseurooppalaista junakulunvalvontajärjestelmään (ETCS, engl. *European Train Control System*) nykyisen kansallisen järjestelmän (JKV) lähestyessä käyttöikänsä loppua, ja toisaalta EU-sääntelyn kannustamana. On siis väistämätöntä, että Suomen rataverkon turvalaitevarustelu sekä yksiköiden veturilaitevarustelu tulee muuttumaan, ja on nykytavoitteiden mukaan yhteentoimiva eurooppalaisten järjestelmien kanssa vuoteen 2040 mennessä. Modernisoimalla nykyinen rautatiejärjestelmä, pyritään lisäämään rautatieliikenteen houkuttelevuutta, saavutettavuutta, toiminnallisuutta ja siten pysymään vihreän kehityksen ja ilmastotavoitteiden mukana, edesauttaen eri liikennemuotojen siirtymistä raitteille.

Suomessa on paraikaa käynnissä Digirata-hanke [11], jonka tavoitteena on laatia suunnitelmat, miten ja millä nykyinen junakulunvalvontajärjestelmä tullaan tulevaisuudessa korvaamaan. Digiradan selvitys [12] suosittelee nykyjärjestelmän korvaamista vähintään ETCS-tason 2 järjestelmällä, joka on radiopohjainen ja jatkuvatoiminen, mikä mahdollistaa uudenlaisia suunnitteluratkaisuja perinteiseen pistemäiseen tiedonsiirtoon perustuviin järjestelmiin verrattuna.

Tulevaisuuden junakulunvalvontajärjestelmät mahdollistavat teknisesti ja järjestelmäsuunnittelun kannalta uusia keinoja nostaa ratakapasiteetin käyttöastetta ja sujuvoittaa liikennöintiä. Nykyjärjestelmän korvaamisesta kumpuaa useita määrittelytarpeita. ERTMS/ETCS-järjestelmän toimintaan on mahdollista vaikuttaa maakohtaisesti järjestelmän kansallisten arvojen kautta, joiden vaikutusta järjestelmään on mahdollista tarkastella simuloinnin avulla. Tässä työssä käytetään Digirata-hankkeen puitteissa valittuja kansallisia arvoja. Uuden junakulunvalvontajärjestelmän myötä olemassa olevat suunnitteluohjeet tarvitsevat päivitystä ja myös uusille ohjekokonaisuuksille on tunnistettu tarve. Jatkuvatoiminen junakulunvalvontajärjestelmän suunnittelun lähtökohdat ovat monin osin erilaiset pistemäiseen kulunvalvontaan verrattuna.

Työn tavoitteena on laatia suunnittelunlähtökohdat asemavälien ja linjojen suunnitteluun ETCS-tason 2 järjestelmällä ratakapasiteetti huomioiden. Yksinkertaisin lähestymistapa nykyjärjestelmästä ERTMS/ETCS-järjestelmään siirryttäessä olisi radanvarsilaitteiston yksi yhteen korvaaminen. Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa raideosuuksien säilyttämistä sellaisinaan ja korvaamalla opastimet ERTMS/ETCS-järjestelmän mukaisilla ajolupamerkeillä (engl. *ETCS stop marker* [20]) Tässä työssä pyritään simuloinnin avulla osoittamaan, että yksinkertaisin lähestymistapa ei ole kapasiteetin kannalta optimaalisin ratkaisu, sekä tuomaan esiin simuloinnin mahdollisuuksia turvalaitesuunnitteluun uusia järjestelmiä rakennettaessa ja nykyisiä päivitettäessä.

## 2 ERTMS/ETCS-järjestelmä

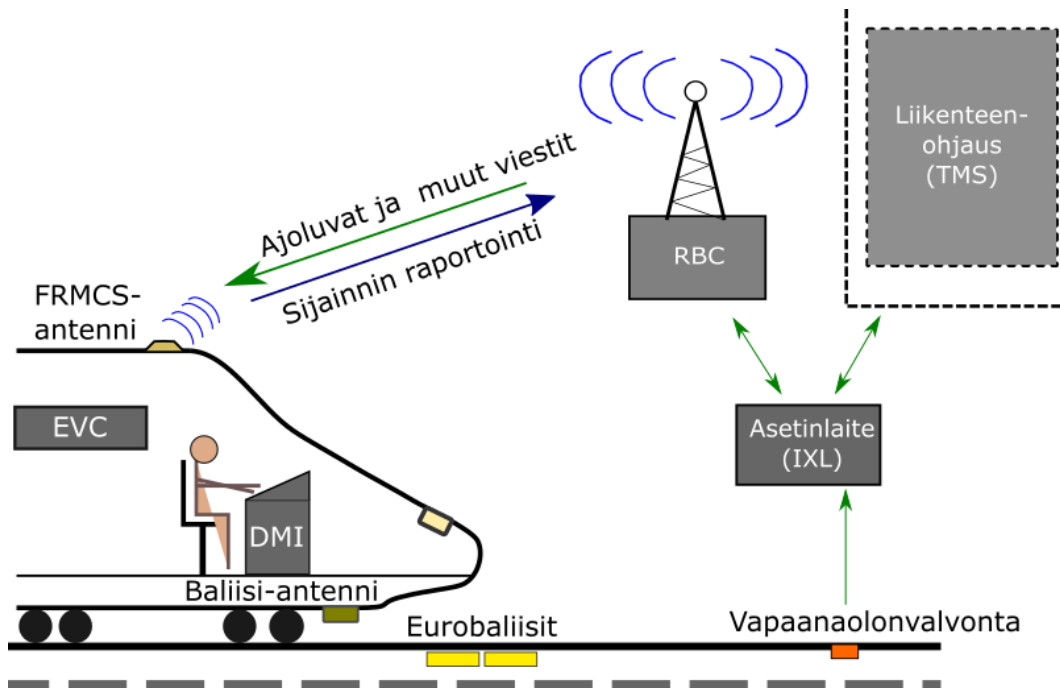
ERTMS/ETCS-järjestelmä eli eurooppalainen rautatieliikenteen hallintajärjestelmä ja sen eurooppalainen junakulunvalvontajärjestelmä (engl. *European Rail Traffic Management System/European Train Control System*) tulee korvaamaan Suomessa nykyisin käytössä olevan JKV-kulunvalvontajärjestelmän. ERTMS/ETCS-järjestelmässä on kolme erilaista toimintatasoa, tasot 1, 2 ja 3. Taso 1 on pistemäinen kulunvalvontajärjestelmä, joka vastaa toiminnallisuudeltaan nykyistä JKV-järjestelmää. Tasot 2 ja 3 ovat jatkuvatoimisia järjestelmiä, joiden toiminta perustuu veturilaitteen ja radiosuojastuskeskuksen (RBC, engl. *Radio Block Centre*) radioverkkossa tapahtuvaan viestintään. Nykyisin radioverkkona Euroopassa käytetään GSM-R verkkoa, mutta Suomessa järjestelmä on tarkoitettu toteuttamaan tulevilla rautateiden matkaviestintäjärjestelmällä FRMCS:llä (engl. *Future Railway Mobile Communication System*), joka perustuu 4G- ja 5G-tekniikoihin [21].

### 2.1 ETCS-tason 2 toiminnallisuus

Tasolla 2 liikkuvat yksiköt ovat jatkuvassa yhteydessä radioverkon kautta RBC:n kanssa. RBC:ltä yksiköt saavat tiedot ajoluvista, kaltevuus- ja nopeusprofiileista ja muista junan kulkuun vaikuttavista asioista. Opastimia ei tasolla 2 ole tarpeen käyttää, vaan ajoluvan päätepestettä voidaan radalla merkitä ajolupamerkillä.

Baliisien pääasiallinen tehtävä tasolla 2 on korjata yksikön matkanmittauksessa syntyvää virhettä ja näin ollen tarkentaa yksikön sijaintia. Baliiseilla voidaan myös varmistaa RBC:n kautta välitettyjen tietojen perille meno esimerkiksi poikkeustilanteissa. Osa ERTMS/ETCS-järjestelmän paketeista on tasolla 2 edelleen toimitettava ainoastaan baliisien välityksellä, mutta suurin osa yksiköille välitettävistä tiedoista välitetään ensisijaisesti RBC:llä. Radioverkon välityksellä yksikkö myös raportoi sijaintiaan ja ilmoittaa mahdollisista toimintatilan vaihdoista sekä pyytää RBC:ltä esimerkiksi lupaa siirtyä vaihtotyö-tilaan.

Kulkuteiden varmistaminen ja vaihteiden kääntö on edelleen asetinlaitteen tehtävä. Asetinlaite välittää tiedon varmistetusta kulkutiestä edelleen RBC:lle, joka generoi asetinlaitteen kulkutietiedot ajoluvan ja profiilitietojen muotoon ja välittää ne edelleen yksikön veturilaitteelle (EVC, engl. *European Vital Computer*). Kuvassa 1 on esitetty tason 2 pääasialliset rata- ja veturilaitteet.



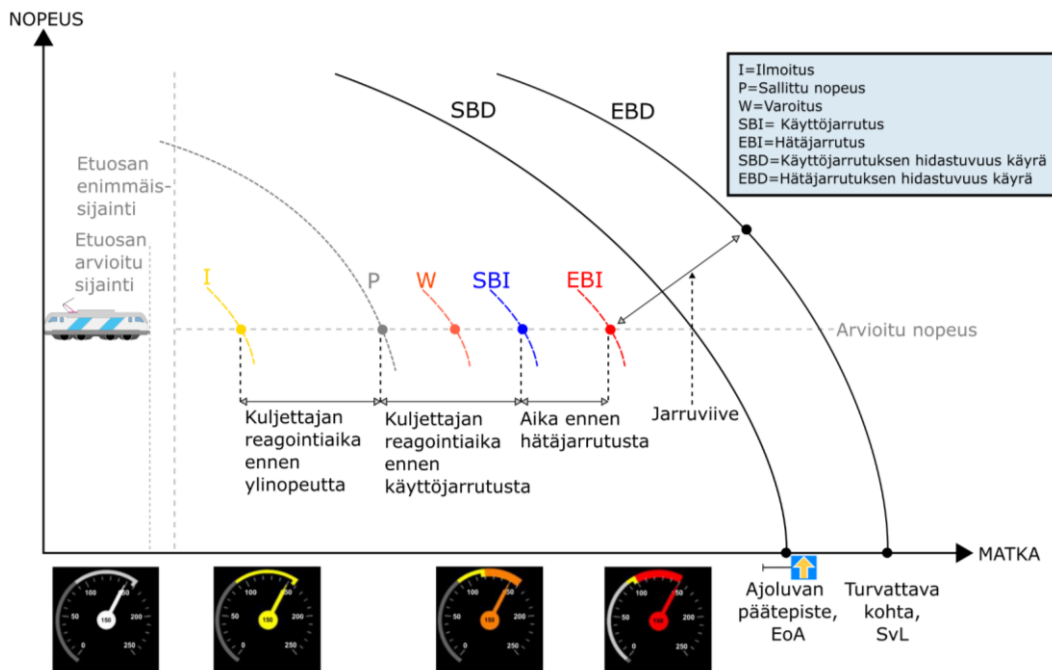
Kuva 1. ETCS-tason 2 komponentit.

Jatkuvatoimista yhteyttä ja sen tuomaa lähes reaaliaikaista ajolupatiedon päivittymistä pidetään tason 2 yhtenä suurimmista eduista verrattuna esimerkiksi tason 1 pistemäiseen kulunvalvontaan. Vaikka yksiköt ja RBC ovatkin keskenään jatkuva-toimisessa yhteydessä ei ajolupien ja muiden tietojen välittäminen ole silti täysin reaaliaikaista. Liikenteenohjausjärjestelmästä lähtevä käsky asetinlaitteelle muodostaa kulkutie paikasta A paikkaan B päättyvä ajolupatietona yksikön kuljettajan näkyville kuljettajapaneelille (DMI, engl. *Driver Machine Interface*) vasta usean sekunnin kuluttua. UIC:n ERTMS/ETCS-järjestelmän kapasiteettivaikutuksia tarkastelevassa julkaisussa järjestelmän viiveeksi asetinlaitteelta DMI:lle on laskettu 3,65 sekuntia. Kyseisessä julkaisussa EVC+DMI-viiveeksi, eli veturilaitteen sisällä tapahtuvan tiedon käsittelyyn ja sen näyttämiseen kuljettajalle, on laskettu 1 sekunti. Esimerkiksi ERTMS/ETCS-vaatimuseritelmässä määritellään enimmäisviiveeksi uuden ajoluvan vastaanottamisen ja sen päivittämiseen kuljettajan näkyville veturilaitteella 1,5 sekuntia. Näin ollen todelliset viiveet voivat järjestelmän muissakin osissa olla suurempia, kuin UIC:n julkaisussa käytetyt. Lisäksi on muistettava, että kyseiseen aikaan ei ole laskettu mukaan viivettä, joka kuluu asetinlaitteella kulkutien asettamiseen ja lukitsemiseen yksikön käyttöön, sekä liikenteenohjausjärjestelmän ja asetinlaitteen välistä viivettä. [5; 6]

## 2.2 Jarrukäyrät

Jarrukäyrien tärkein tehtävä on turvata yksikön kulkua, mikäli kuljettaja ei huomioi tulevaa nopeusrajoitusta tai ajoluvan päätepistettä riittävän ajoissa. Turvallisuuden lisäksi jarrukäyrillä on vaikutusta myös kapasiteettiin. Mikäli jarrukäyrät ovat liian konservatiivisia joutuvat yksiköt jarruttamaan turhan aikaisin todelliseen tarpeeseen nähden. ERTMS/ETCS-järjestelmän kansallisilla arvoilla voidaan vaikuttaa erilaisiin jarrukäyrien laskennassa käytettäviin parametreihin ja näin ollen saavuttaa mahdollisimman optimaalinen jarrutuskäyttäytyminen.

Jarrukäyrät lasketaan veturilaitteessa kuljettajan syöttämien junatietojen, jarrukäyriin vaikuttavien kansallisten arvojen ja RBC:ltä saatujen ajolupa ja profiilitietojen perusteella. Ensimmäisenä ja niin sanottuna määräävänä käyränä lasketaan hätäjarrutuksen hidastuvuuskäyrä (EBD, engl. *Emergency Brake Deceleration*). EBD-käyrä lasketaan aina päättymään turvattavaan kohtaan (SVL, engl. *Supervised Location*). Turvattavana kohta toimii ensisijaisesti ajoluvan jälkeinen ohiajovara, mikäli ohiajovaraa ei ole lasketaan käyrä suojustavaan kohtaan (DP, engl. *Danger Point*). Tilanteissa, joissa ajoluvulle ei ole määritelty ohiajovaraa tai suojustavaa kohtaa EBD-käyrä lasketaan ajoluvan päätepisteeseen. Muut EBD-käyrän pohjalta laskettavat käyrät ovat käyttöjarrutuksen hidastuvuus käyrä (SBD, engl. *Service Brake Deceleration*), hätäjarrutuskäyrä (EBI, engl. *Emergency Brake Intervention*), käyttöjarrutuskäyrä (SBI, engl. *Service Brake Intervention*) sekä varoituskäyrä (W, engl. *Warning*), sallittu nopeus -käyrä (P, engl. *Permitted speed*) ja ilmoituskäyrä (I, engl. *Indication*). Hätä- ja käyttöjarrutuksen hidastuvuuskäyrät kertovat yksikön hidastuvuuden, jossa ei ole huomioitu jarrutuksen viiveitä. Varsinaiset hätä- ja käyttöjarrutus käyrät taas ottavat huomioon mahdolliset viiveet jarrutuksen aloittamisesta täysivoimaiseen jarrutukseen. Käyttöjarrutuksen hidastuvuuskäyrä lasketaan aina ajoluvan päätepisteeseen toisin kuin EBD-käyrä. ERTMS/ETCS-järjestelmä mahdollistaa kansallisten arvojen avulla valinnan käyttääkö käyttöjarrutusta hyväksi ajoluvan päätepisteen ja nopeusrajoitusten valvonnassa. Suomen tämänhetkisten kansallisten arvojen mukaan käyttöjarrutusta tullaan käyttämään. Kuvassa 2 on nähtävissä kaikki järjestelmän laskemat käyrät ja niiden mahdolliset indikaatiot kuljettajapaneelilla. [1; 2; 7]



Kuva 2. ERTMS/ETCS-järjestelmän jarrukäyrien toimintaperiaatteet [19].

JKV:n jarrukäyrien laskenta eroaa huomattavasti ETCS:stä. Siinä missä ETCS:n määräävänä käyränä käytetään hätäjarrun hidastuvuuskäyrää, käyttää JKV käyttöjarrutuksen hidastuvuuskäyrää (D-käyrä). JKV-laskennassa käyttöjarrutus on siis niin sanottu turvallisuuskriittinen jarru ja hätäjarru (E-käyrä) on vain lisäturvana. ETCS puolestaan käyttää hätäjarrua turvallisuuskriittisenä ensisijaisena jarruna ja käyttöjarrua vain, mikäli se kansallisissa arvoissa on otettu käyttöön. Muut JKV-



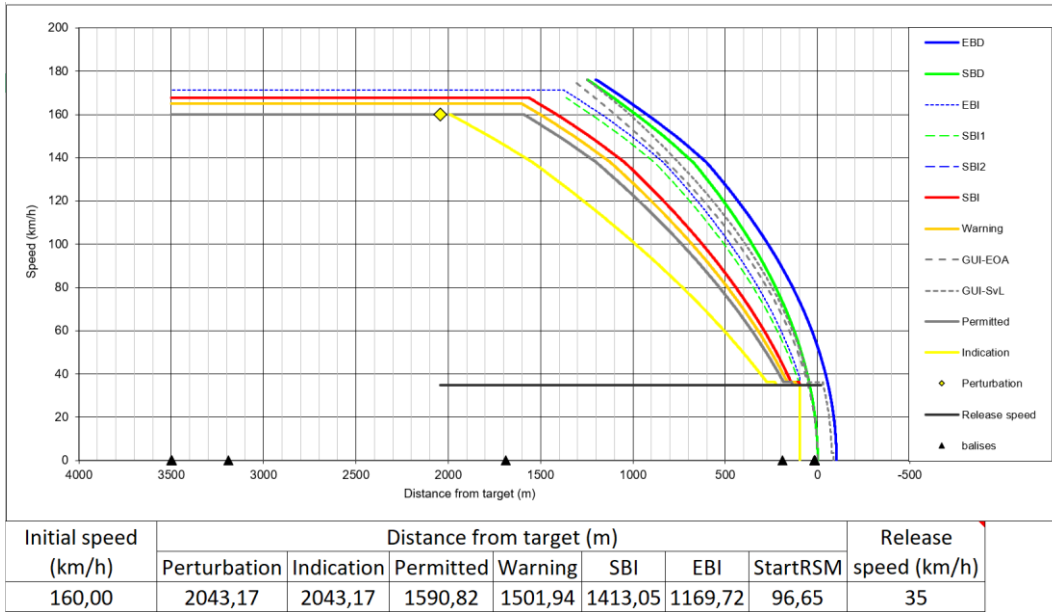
laskennassa käytettävät käyrät ovat A-käyrä eli huomautus-, B-käyrä eli varoitus- ja C-käyrä eli käyttäjarrutuskäyrä.

JKV-jarrukäyrän laskennassa otetaan ETCS:ää paremmin huomioon Suomen vaihteleva keli. JKV:n junatietojen syötön yhteydessä kuljettajan tulee syöttää kelin mukainen keliarvo väliltä 1–3. Keli 1 vastaa hyvää keliä, jolloin laskennassa käytettävä kerroin on 1,000. Arvolla 2 kyseinen kerroin on 0,875 ja arvolla 3 kerroin on 0,750. Kelitietoa on mahdollista muuttaa myös matkan aikana. ETCS:ssä taas kuljettaja voi valita kelin joko normaalin tai liukkaan väliltä, mikäli se kansallisten arvojen mukaan on sallittua. Kelitiedon antaminen on mahdollista myös ratalaitteiden kautta. Mikäli kuljettaja valitsee tai veturilaite saa ratalaitteilta tiedon liukkaasta kelistä, ottaa se jarrukäyrän laskennassa huomioon kansallisesti määritellyn keliarvon. Keliarvo kertoo junan hidastuvuuden, mikäli veturilaitteen itse laskema hidastuvuus kyseiselle junakokoonpanolle on pienempi kuin kansallinen arvo, käyttää veturilaite sitä jarrukäyrälaskennassa. Suomessa tällä hetkellä voimassa oleva keliarvo sekä matkustajajunilla että tavarajunilla on 0,7 m/s<sup>2</sup>. [2]

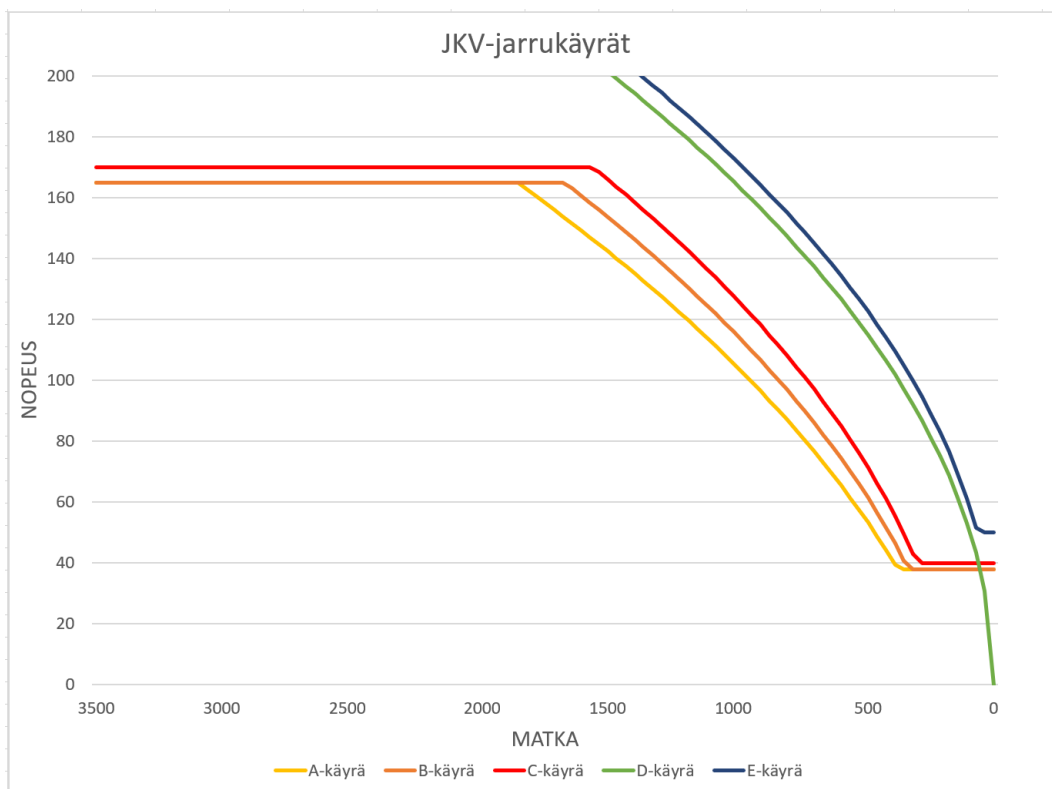
Tällä hetkellä voimassa olevien kansallisten arvojen mukaiset jarrukäyrät ETCS-laskennassa ovat pääsääntöisesti saman suuntaiset tai hieman konservatiivisemmat, kuin JKV-laskennassa. Alla olevissa kuvissa 3 (ETCS) ja 4 (JKV) on esitetty samalle junakokoonpanolle lasketut jarrukäyrät. Käyrät on laskettu 150 m pitkälle matkustajajunalle, jonka jarrupainoprosentti on 135 ja jarrulaji R<sup>1</sup>. Laskenta on tehty 160 km/h maksiminopeudesta ajoluvan päätekohtaan, jossa on 102 m ohiajovara 35 km/h valvontanopeudella. ETCS laskenta on tehty nykyisillä kansallisilla arvoilla. Käyristä voidaan nähdä, vertailemalla esimerkiksi punaisia käyttöjarrutuksen käyriä, että molemmissa käyttöjarrutuksen reagointi tapahtuisi suurin piirtein samaan aikaan noin 1 400 metrin kohdilla. ETCS:n I-käyrä tosin kohdataan huomattavasti aikaisemmin verrattuna JKV:n A-käyrään, joka on kuljettajalle ensimmäinen huomautus jarruttamisesta. Käyrien ero johtuu siitä, että ETCS:n I-käyrän tarkoituksena on ohjata kuljettajaa aloittamaan jarruttaminen hyvissä ajoin ja näin opastaa jarruttamisessa. Kun taas JKV:n A-käyrä on huomautus joko aloittaa jarrutus tai tehostaa jo alkanutta jarrutusta. Ajallisesti esimerkkikuvien mukaisessa tilanteessa jarrutus aloittaen ETCS:n I-käyrän ensimmäisestä kuljettajaa indikoivasta pisteestä kestäisi tasaisella 1 m/s<sup>2</sup> hidastuvuudella noin 64 sekuntia. JKV:n A-käyrän ensimmäisestä pisteestä jarrutukseen käytetty aika taas olisi noin 59 sekuntia.

---

1 Jarrupaino on yksikkö, joka kuvaa vaunun jarrutuskykyä. Jarrupaino on määritelty vaunuille erikseen eri jarrulajeille. G-jarrulajilla jarrutus alkaa hitaammin kuin P-jarrulajilla, joten jarrutuskyky on heikompi. Tavarajunissa käytetään usein G-jarrulajia, jotta jarrutus alkaa riittävän tasaisesti koko junassa. Jarrulaji R vastaa toimintanopeudeltaan jarrulajia P, mutta tietyn nopeuden yläpuolella siinä käytetään korkeampaa painetta jarrusylintereissä. Koko junan jarrupaino saadaan laskemalla vaunujen ja veturien jarrupainot yhteen. Jarrupainoprosentti saadaan jakamalla koko junan jarrupaino junan kokonaismassalla ja kertomalla osamäärä sadalla.



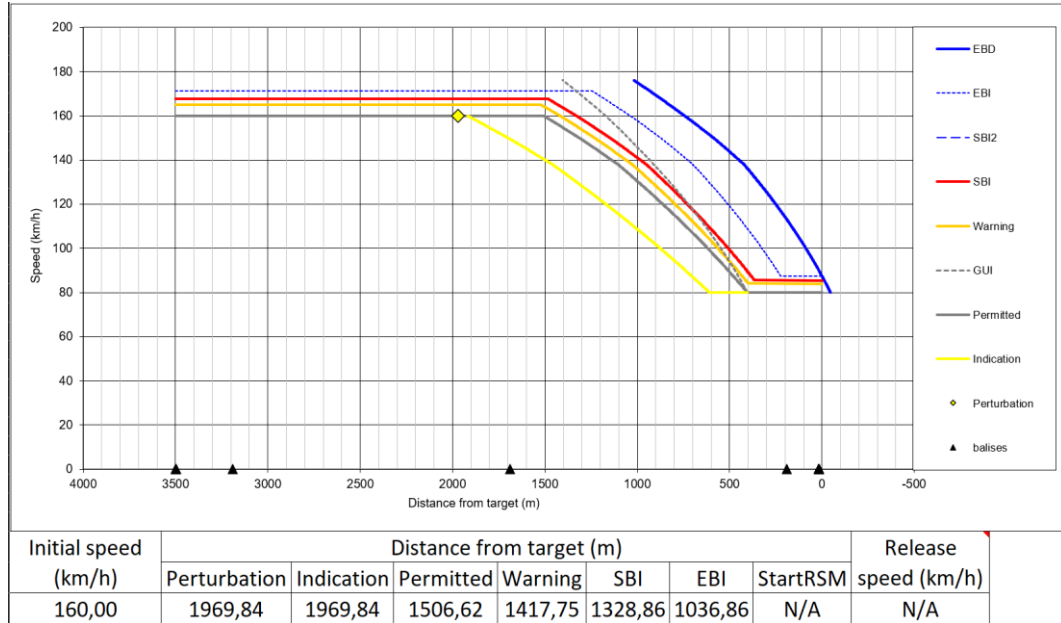
Kuva 3. ETCS-jarrukäyrien laskentaesimerkki.



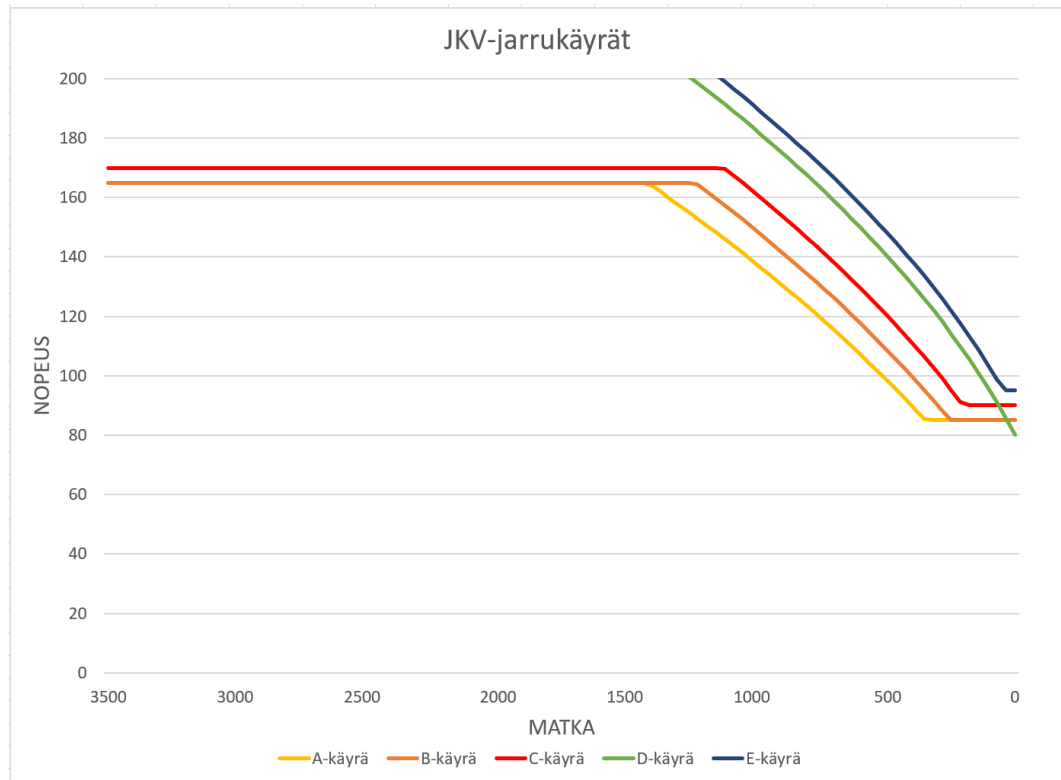
Kuva 4. JKV-jarrukäyrien laskentaesimerkki.

Matkustajajunalla jarrukäyrien erot lähestyttäessä Seis-opastetta eivät ole kovin merkittävät ja kuljettajan ajotapa vaikuttaa huomattavasti siihen, missä kohdin hän todellisuudessa jarrutuksen aloittaa. Suuremmat erot jarrukäyrissä tulevat lähestyttäessä nopeusrajoitusta, jolloin JKV-käyrä on huomattavasti sallivampi johtuen muun muassa laskentatavasta. Seis-opastetta lähestyttäessä JKV ottaa laskennassa huomioon niin sanotun s0-tekijän, minkä takia sen laskemat jarrukäyrät ovat selvästi rajoittavampia Seis-opastetta lähestyttäessä verrattuna nopeusrajoituksen

lähestymiseen. ETCS-laskenta taas on samankaltainen rajoituksen tyypistä riippumatta. Kuvissa 5 ja 6 on esimerkkilaskelmat lähestyttäessä 160 km/h nopeudella 80 km/h nopeusrajoitusta. Kuvista voidaan nähdä, että JKV:n A-käyrä kohdataan vasta noin 1 250 metrin kohdalla, kun taas ETCS:n I-käyrä kohdataan jo lähes 2 000 metrin kohdalla ja W-käyräkin yli 1 400 metrin kohdalla. Näin ollen ETCS-radalla nopeusrajoitukseen jarruttaminen joudutaan aloittamaan huomattavasti aikaisemmin verrattuna JKV-varusteltuun rataan.



Kuva 5. ETCS-jarrukäyrien laskenta nopeusrajoitukseen.



Kuva 6. JKV-jarrukäyrien laskenta nopeusrajoitukseen.

### 3 ERTMS:n teoreettinen vaikutus kapasiteettiin

Ratakapasiteetilla tarkoitetaan yksinkertaistettuna sitä, kuinka monta yksikköä tietyllä rataosalla voi liikennöidä tietyllä aikavälillä. Teoreettisesti ETCS-tason 2 tulisi vaikuttaa kapasiteettiin positiivisesti. Kapasiteettiin positiivisesti vaikuttavia asioita ovat muun muassa:

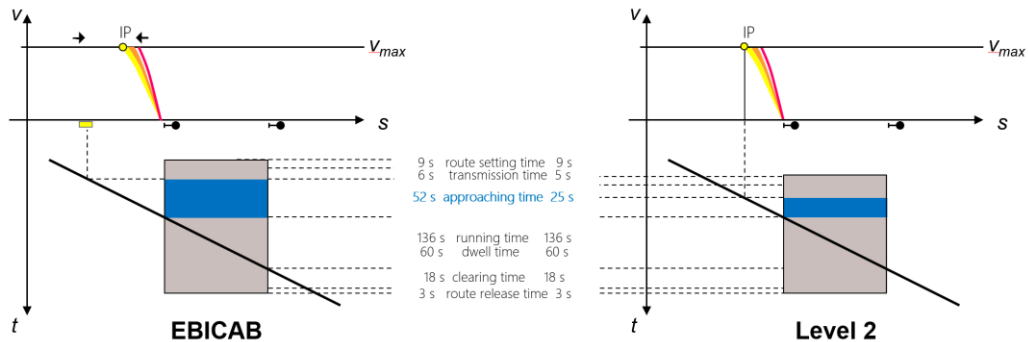
- Jatkuvatoimisuus: kuljettajan ei tarvitse jarruttaa seuraavalle toistopisteelle tai opastinpisteelle asti ajoluvan jatkuessa valvonnan aikana, vaan ajolupatieto päivittyy jatkuvasti radioteitse veturilaitteen ja kuljettajan tietoon.
- Suojavälien optimointi: optimoimalla suojavälit mahdollisimman hyvin liikennorakennetta tukevaksi voidaan kapasiteettia lisätä. Tämä on jossain määrin mahdollista myös JKV- tai ETCS-tason 1 järjestelmissä.
- Näkyvistä opastimista luopuminen: mikäli tasolla 2 luovutaan opastimista ei suunnittelussa tarvitse enää ottaa huomioon opastimen näkemää. Tämä helpottaa suojavälien optimointia kunkin rataosan kapasiteetin kannalta suotuisaksi.

Kaikkein suurimmat kapasiteettihyödyt ETCS-tasosta 2 saadaan, mikäli liikenne on mahdollisimman homogeenistä, eli junien keskinopeudet ja pysähtymiskäyttäytyminen ovat mahdollisimman samankaltaisia sekä liikutaan kaksiraiteisilla rataosilla. Tällöin suojavälien ja aikataulurakenteen optimointi on kaikista helpointa. Käytännössä tällaista liikennettä Suomessa on ainoastaan pääkaupunkiseudun lähiliikenteessä.

Yleensä pistemäisessä kulunvalvonnassa ratakapasiteetin kannalta suojavälit suunnitellaan yksiköiden jarrutusmatkoihin sopiviksi. Rataosilla, joissa liikenne on hyvin monimuotoista eli yksiköillä on erilaisia jarrutusmatkoja, tämän toteuttaminen on hyvin hankalaa. Lisäksi tulee huomioida toistopisteiden sijainti suhteessa jarrutusmatkoihin, mikäli suojaväli on pitkä. Heterogeenisessä liikenteessä toistopisteiden sijoittelu ja opastinvälien optimointi on hankalampaa homogeeniseen liikenteeseen verrattuna yksiköiden erilaisista jarrutuskäyttäytymisistä johtuen. ETCS-tason 2 jatkuvatoiminen kulunvalvonta helpottaa joissain tilanteissa tätä ongelmaa, kun yksiköt saavat uuden ajolupatiedon sijainnista riippumatta, eivätkä näin ollen joudu hiljentämään vauhtiaan esimerkiksi valvontanopeuteen asti, mikäli toistopiste on jo ohitettu.

Edellä kuvattu esiintyy ETCS-tason 2 toiminnassa varautumisajan lyhenemisenä siitä syystä, että jatkuvatoimisessa järjestelmässä lähestymisaika (engl. *approaching time*) on pistemäiseen verrattuna lyhyempi. Kuvassa 7 (vasemmalla) on esitetty varautumisajan laskentamalli nykyisen JKV:n pistemäisessä toimintamallissa ja ETCS-tason 2 jatkuvatoimisessa toimintamallissa (oikealla). Pistemäisessä kulunvalvonnassa lähestymisaajan laskenta alkaa esiopastimella tai ennen sitä sijaitsevalta baliisiryhmältä. Kyseessä on siis minimi tiedonsiirtomatkan etäisyydellä sijaitseva baliisiryhmä, jolta juna voi vielä saada tiedon Seis-opasteesta, ja sitä myöten ehtii pysähtyä ennen opastinta. ETCS-tasolla 2 taas lähestymisaajan laskenta aloitetaan jokaisella junalla jarrutuskyvyn mukaan yksilöllisesti siitä koh-

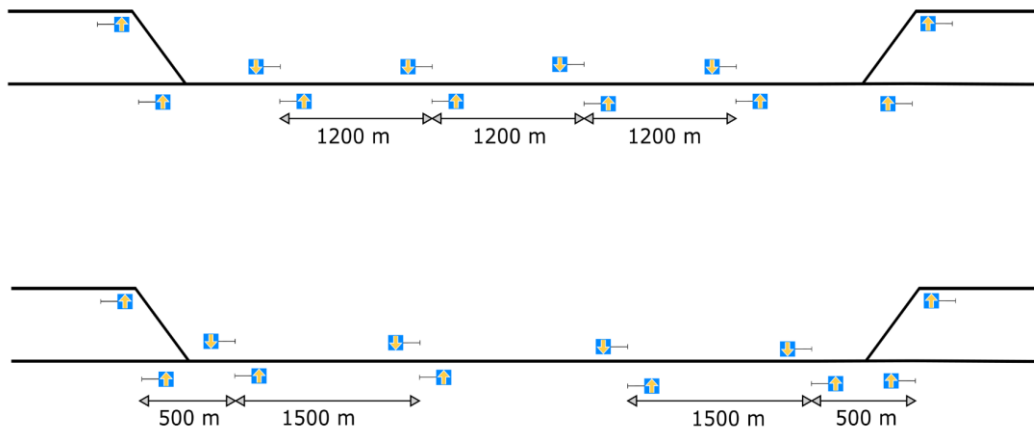
dasta, jossa I-käyrä ensimmäisen kerran kohdataan. Tästä kohdasta voidaan olettaa junan tilanteessa kuin tilanteessa turvallisesti pysähtyvän ennen ajoluvan päätepistettä.



Kuva 7. Varautumisajan laskenta periaatteet pistemäisessä ja jatkuvatoimisessa kulunvalvonnassa.

Tason 2 osalta suuren epävarmuustekijän kapasiteetin parannuksen osalta tekee viiveiden suuruus. Tällä hetkellä kaikki radioverkosta aiheutuvat viiveet ovat GSM-R verkossa todettuja tai arvioituja viiveitä. Suomen tuleva radioverkko on tarkoitus toteuttaa tulevaisuuden FRMCS-verkon avulla, jonka viiveiden oletetaan olevan huomattavasti pienempiä kuin GSM-R verkon. Lisäksi RBC:n, asetinlaitteiden ja muiden rata- ja veturilaitteiden tekniikka kehittyy koko ajan, joten todellisten Suomessa käytössä olevien laitteiden keskinäisiä viiveitä on vaikea vielä arvioida.

Suomessa on paljon yksiraiteisia rataosia, joissa on käytössä asemavälisuojustus tai joissa suojavälit linjalla ovat pitkiä. Muuttamalla nykyiset asemavälisuojustetut osuudet ja muut pitkän suojavälin omaavat rataosat tiheämmin suojastetuiksi voidaan kapasiteettia nostaa huomattavasti. Tason 2 tekniikalla suojaväleistä voidaan tehdä lyhyempiä kuin JKV-tekniikalla, jossa yhden suojavälin minimipituus teoriassa on 1 200 metriä. Tiheät suojavälit eivät suoraan takaa sitä, että yksiköt voisivat ajaa lähempänä toisiaan suurella nopeudella, sillä edelleen yksiköiden välinen etäisyys on kiinni yksikön jarrutusmatkasta. Tiheät suojavälit mahdollistavat ajoluvan pidentämisen ja junan perässä vapautuvan raideosuuden vapauttamisen nopeammin ja useammin verrattuna nykytilanteeseen. Tällä voidaan helpottaa erityisesti eri nopeuksilla peräkkäin kulkevien yksiköiden liikkumista. Kuvassa 8 on esitetty kaksi teoreettista esimerkkiä suojavälien tihentämisestä kahden liikennepaikan välisellä linjaosuudella. Ylemmässä esimerkissä suojavälit on lyhennetty koko linjaosuudelta tasaisesti samanpituisiksi. Alemmassa esimerkissä taas liikennepaikan jälkeinen ensimmäinen suojaväli on selvästi muita lyhyempi. Tällöin hitaampi yksikkö, joka lähtee paikaltaan liikkeelle, pääsee aikaisemmin kiihdyttämään edellä menevän junan perään ja kiihdytyksen aikana edellä menevä yksikkö on jo ehtinyt vapauttamaan myös seuraavan pidemmän suojavälin. [8; 10]



Kuva 8. Suojavälien optimointi liikennepaikkojen välillä.

## 3.1 Aikaisempia tutkimuksia ERTMS:n vaikutuksesta kapasiteettiin

Aikaisemmin ERTMS:n vaikutuksesta kapasiteettiin Suomessa on julkaistu kaksi eri Väyläviraston julkaisua. Toisessa tarkastelu on kohdistettu Pääkaupunkiseudun lähiliikenteeseen ja vertailu on tehty nykyisen JKV-järjestelmän sekä ERTMS tasojen 1 ja 2 väliltä [1]. Lisäksi tason 2 osalta vertailussa on huomioitua myös suojavälien optimointi. Toinen julkaisu keskittyy tason 2 kapasiteettihyötyihin kaksiraiteisilla rataosilla. Tutkimus on toteutettu vertailemalla tason 1 ja tason 2 kapasiteettia [10].

### 3.1.1 Kaupunkiratojen homogeeninen liikenne

Väyläviraston raportissa vuodelta 2019 tutkittiin, minkälainen vaikutus tason 2 ERTMS-toteutuksella on verrattuna JKV:hen pääkaupunkiseudun lähiliikenteessä [1]. Tulosten arviointi raportissa tapahtui vertaamalla minimijunaväliä ja kapasiteetin käyttöä eri kulunvalvontajärjestelmien välillä.

Raportissa todettiin, että tason 2 perusratkaisulla eli olemassa olevia nykyisiä suojavälejä hyödyntämällä ei saavuteta juurikaan hyötyä suhteessa nykyiseen JKV-järjestelmään nykyisillä suojaväleillä. ETCS-järjestelmän vaativampi jarrukäyränlaskenta aiheuttaa sen, että junayksiköstä ja jarrutuksen aloitusnopeudesta riippuen jarrutus saattaa alkaa jonkin verran aikaisemmin kuin JKV:ssä. Näin matkajat ETCS-tasolla 2 nykyisellä suojaväliäratkaisulla pidentyvät suhteessa JKV-ratkaisuun ja samoihin suojaväleihin. Sen sijaan optimoiduilla suojaväleillä kapasiteettia saataisiin selvityksen mukaan nostettua.

Taulukossa 1 on havainnollistettuna arvioidut prosentuaaliset erot kaupunkiratojen kapasiteetin käyttöasteissa käytettäessä 5 minuutin vuoroväliä sekä nykyisillä suojaväleillä, että optimoiduilla suojaväleillä tason 2 osalta. Optimoiduilla suojaväleillä saavutetaan Helsinki–Kerava-kaupunkiradalla suurin hyöty, joka on tehdyn arvion mukaan jopa 17 prosenttiyksikköä. Taulukon prosenttiluku kuvaa kyseisellä liikennemäärällä käytössä olevaa kapasiteettia. Mitä suurempi prosenttimäärä on, sitä suurempi osa kapasiteetista on käytetty. Tutkimuksen mukaan tason 2 käyttöasteella voitaisiin Helsinki–Kerava-rataosalla päästä jopa 3,75 minuutin junaväleihin

Helsingin ja Hiekkaharjun välillä. Tällöin kapasiteetin käyttöaste pysyisi vielä alle suositellun 70 prosentin. [1]

*Taulukko 1. Kapasiteetin käyttöasteet ETCS tasolla 2 ja JKV:tä käytettäessä 5 minuutin vuoroväliä. Mukailtu lähteestä [1].*

Rataosa	Käyttöaste JKV	Käyttöaste ETCS-taso 2
Helsinki–Kerava, nykyiset suojavälit	67 %	65 %
Helsinki–Kerava, optimoidut suojavälit	-	50 %
Helsinki–Leppävaara, nykyiset suojavälit	70 %	68 %
Helsinki–Leppävaara, optimoidut suojavälit	-	61 %

UIC:n suosituksen mukaan kapasiteetin käyttöasteen tulisi kaupunkijunaliikenteessä ruuhka-aikoina olla maksimissaan 85 % ja koko päivän aikana maksimissaan 70 %. Suurnopeusradoilla ja sekajunaliikenteessä kyseiset arvot ovat ruuhka-aikana 75 % ja päivän aikana 60 % [9]. Kapasiteetin käyttöasteen laskentaan käytetään UIC:n laskennoissa seuraavaa kaavaa:

$$\text{Kapasiteetin käyttöaste (\%)} = \frac{\text{Käyttöaika}}{\text{Määritelty ajanjakso}} \times 100$$

### 3.1.2 Kaksiraiteisten ratojen heterogeeninen liikenne

Toisessa julkaisussa vuodelta 2018 tarkastelu kohdistui sekaliikenteisiin kaksiraiteisiin rataosiin [10]. Tarkastelu tehtiin kahdella eri menetelmällä, teoreettisesti laskemalla ja tapaustutkimuksin. Teoreettinen laskenta toteutettiin työtä varten tehdyllä Excel-työkalulla. Työkalussa laskenta toteutettiin erilaisia parametreja muuttamalla. Kapasiteetin kannalta olennaisimmat parametrit olivat jarrutusmatka, nopeusrajoitus, opastinväli ja junatyypit. Laskelmat eivät ottaneet huomioon esimerkiksi junan kiihtyvyyttä ja hidastuvuutta, eli olivat yksinkertaistettuja esimerkkejä todellisuudesta. Tarkastelu tehtiin erilaisilla opastinväleillä 500 – 4 000 metrin väliltä sekä nopeusrajoituksilla 60–200 km/h välillä. Alla olevissa taulukoissa 2 ja 3 on nähtävissä tarkastelun tuloksia eri RBC-viiveillä. Taulukoissa on laskettuna keskimääräinen kapasiteetin parannus prosentteina tasolla 2 suhteessa tasoon 1. Mitä suurempi prosenttiluku, sen parempi kapasiteetti tasolla 2 on. Teoreettisten laskelmien perusteella sekaliikennöidyillä radoilla suurin kapasiteetti-hyöty saataisiin pitkillä suojaväleillä. Myös RBC-viiveen vaikutus on selvästi havaittavissa taulukoista.

Taulukko 2. Tason 2 kapasiteetin parannus 2,65 sekunnin RBC-viiveellä [10].

Keskimääräinen kapasiteettiparannus ERTMS/ETCS-tasolla 2 (IC- ja tavarajunat)										
Nopeus / Opastinvälin pituus	500 m	750 m	1000 m	1200 m	1600 m	2000 m	2500 m	3000 m	4000 m	Keskiarvo
60 km/h	15,2%	6,8%	20,3%	29,3%	21,6%	30,3%	38,7%	45,3%	55,0%	29,2%
70 km/h	13,9%	10,5%	11,2%	20,1%	34,8%	23,2%	32,0%	39,0%	49,4%	26,0%
80 km/h	4,0%	18,4%	3,1%	11,8%	26,4%	16,6%	25,7%	32,9%	43,8%	20,3%
90 km/h	2,4%	19,3%	8,2%	4,3%	18,6%	30,3%	19,6%	27,0%	38,4%	18,7%
100 km/h	10,0%	15,7%	23,5%	1,6%	16,0%	27,7%	17,2%	24,8%	36,4%	19,2%
110 km/h	6,3%	12,4%	19,9%	18,0%	13,4%	25,3%	14,8%	22,5%	34,3%	18,5%
120 km/h	2,9%	9,3%	16,7%	14,6%	11,1%	22,9%	12,5%	20,3%	32,4%	15,9%
130 km/h	8,6%	18,6%	13,6%	11,5%	8,8%	20,7%	10,3%	18,2%	30,4%	15,6%
140 km/h	4,9%	15,0%	10,5%	8,2%	25,6%	18,3%	8,0%	15,9%	28,3%	14,9%
150 km/h	1,3%	11,4%	7,4%	4,9%	22,2%	15,8%	5,6%	13,5%	26,0%	12,0%
160 km/h	5,0%	8,0%	16,8%	1,8%	18,9%	33,3%	3,2%	11,2%	23,8%	13,6%
170 km/h	1,6%	14,2%	13,3%	12,3%	15,8%	30,1%	1,0%	9,0%	21,7%	13,2%
180 km/h	4,5%	10,8%	10,2%	8,8%	13,0%	27,0%	19,3%	6,9%	19,6%	13,3%
190 km/h	1,2%	7,7%	7,2%	5,6%	10,2%	24,2%	16,3%	4,8%	17,5%	10,5%
200 km/h	3,5%	12,4%	14,1%	2,7%	21,5%	21,5%	13,5%	23,6%	15,6%	14,3%
<b>Keskiarvo</b>	<b>5,7%</b>	<b>12,7%</b>	<b>13,1%</b>	<b>10,4%</b>	<b>18,5%</b>	<b>24,5%</b>	<b>15,8%</b>	<b>21,0%</b>	<b>31,5%</b>	<b>17,0%</b>

Taulukko 3. Tason 2 kapasiteetin parannus 7 sekunnin RBC-viiveellä [10].

Keskimääräinen kapasiteettiparannus ERTMS tasolla 2 (IC- ja tavarajunat)										
Nopeus / Opastinvälin pituus	500 m	750 m	1000 m	1200 m	1600 m	2000 m	2500 m	3000 m	4000 m	Keskiarvo
60 km/h	11,1%	3,5%	16,9%	26,0%	18,8%	27,6%	36,3%	43,0%	53,0%	26,2%
70 km/h	9,7%	6,9%	7,9%	16,8%	31,5%	20,5%	29,4%	36,6%	47,2%	22,9%
80 km/h	-0,1%	14,2%	-0,2%	8,5%	23,1%	13,8%	23,0%	30,4%	41,5%	17,1%
90 km/h	-1,6%	15,0%	4,7%	1,0%	15,3%	27,0%	16,8%	24,4%	36,0%	15,4%
100 km/h	5,6%	11,5%	19,2%	-1,6%	12,6%	24,4%	14,4%	22,1%	33,9%	15,8%
110 km/h	2,0%	8,2%	15,7%	14,0%	10,1%	21,9%	12,0%	19,8%	31,8%	15,1%
120 km/h	-1,3%	5,3%	12,5%	10,7%	7,8%	19,6%	9,7%	17,6%	29,8%	12,4%
130 km/h	4,1%	14,1%	9,6%	7,6%	5,5%	17,3%	7,5%	15,4%	27,8%	12,1%
140 km/h	0,6%	10,6%	6,5%	4,4%	21,7%	15,0%	5,1%	13,1%	25,6%	11,4%
150 km/h	-2,8%	7,2%	3,6%	1,3%	18,3%	12,6%	2,8%	10,8%	23,4%	8,6%
160 km/h	0,7%	4,0%	12,6%	-1,7%	15,2%	29,4%	0,5%	8,5%	21,2%	10,0%
170 km/h	-2,5%	9,9%	9,3%	8,3%	12,2%	26,3%	-1,7%	6,3%	19,1%	9,7%
180 km/h	0,3%	6,7%	6,3%	5,0%	9,4%	23,4%	16,0%	4,2%	17,0%	9,8%
190 km/h	-2,8%	3,7%	3,5%	2,0%	6,8%	20,6%	13,1%	2,2%	15,0%	7,1%
200 km/h	-0,6%	8,3%	10,1%	-0,8%	17,6%	18,0%	10,3%	20,4%	13,1%	10,7%
<b>Keskiarvo</b>	<b>1,5%</b>	<b>8,6%</b>	<b>9,2%</b>	<b>6,8%</b>	<b>15,1%</b>	<b>21,2%</b>	<b>13,0%</b>	<b>18,3%</b>	<b>29,0%</b>	<b>13,6%</b>

Tapaustutkimuksissa tutkittiin tason 2 vaikutusta Kerava–Lahti- ja Riihimäki–Tampere-rataosuuksilla. Kyseisille rataosuuksille tehtiin yksinkertaiset laskelmat, joilla pyrittiin selvittämään junaväliä ja kapasiteetin käyttöastetta. Junaväliä laskelmat tehtiin niin sanotun varausaikateorian (engl. *Blocking time method*) pohjalta. Yksinkertaistetut tulokset kapasiteetin käyttöasteesta Kerava–Lahti-väliltä on esitetty taulukossa 4 ja Tampere–Riihimäki-väliltä taulukossa 5. Taulukoissa on esitetty kapasiteetin käyttöaste molempien tasojen osalta sekä muutos niiden välillä. Tapaustutkimuksen perusteella tasojen 1 ja 2 välillä ei juurikaan ole kapasiteetissa eroja. Ainoa merkittävä ero on nähtävissä Parola–Toijala-välillä Riihimäki–Tampere-rataosuudella.

Taulukko 4. Kapasiteetin käyttöaste Kerava–Lahti-rataosuudella. Mukailtu lähteestä [10].

Rataosa	Taso 1	Taso 2	Muutos
Kerava–Lahti	61 %	59 %	2 %
Lahti–Kerava	43 %	42 %	1 %



*Taulukko 5. Kapasiteetin käyttöaste Riihimäki–Tampere-rataosuudella. Mukailtu lähteestä [10].*

Rataosa	Taso 1	Taso 2	Muutos
Riihimäki–Turenki	45 %	44 %	1 %
Turenki–Parola	46 %	43 %	3 %
Parola–Toijala	59 %	49 %	10 %
Toijala–Tampere	50 %	47 %	3 %
Tampere–Toijala	41 %	39 %	2 %
Toijala–Hämeenlinna	56 %	54 %	2 %
Hämeenlinna–Riihimäki	60 %	59 %	1 %

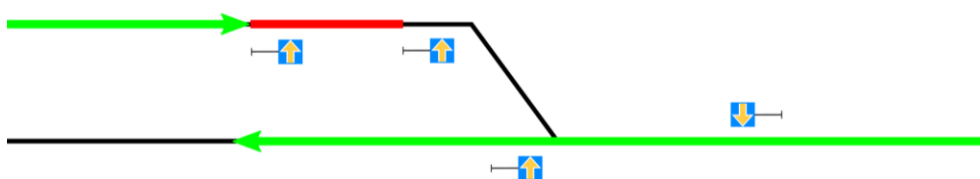
### 3.2 Kahdennettu ajolupamerkki

Liikennepaikkojen kapasiteettiin vaikuttaa muun muassa se, saadaanko sinne saman aikaisesti otettua esimerkiksi vastakkaisista suunnista yksiköitä. Joissain tapauksissa saapuvan yksikön käyttöön varatun kulkutien ohiajovara varaa vastakkaisen suunnan tulovaihteen käyttöönsä ja näin ollen vastakkaisesta suunnasta ei voida ottaa yksiköitä liikennepaikalle ennen kuin kyseinen ohiajovara on purkautunut (kuva 9). Kuvassa vihreät nuolet kuvaavat yksikön kulkutietä ja punainen viiva kulkutien perään varattua ohiajovaraa.



*Kuva 9. Ohiajovara liikennepaikalla.*

Digirata-projektissa esiin on noussut mahdollisuus käyttää niin sanottuja kahdennettuja ajolupamerkkejä liikennepaikoilla, joissa tunnustetaan tarve usein tapahtuville junakohtaamisille. Yksinkertaistettuna liikennepaikalla olisi ajolupamerkit kahdessa kohtaa peräkkäin, jolloin kohtaustilanteissa kulkutie molemmista suunnista saapuville yksiköille voitaisiin muodostaa sisemmille merkeille. Näin toimittaessa ohiajovarana toimisi kahden ajolupamerkin välinen raideosuus, ja näin ollen vastakkaisen suunnan tulovaihteen jäisi sieltä saapuvan yksikön kulkutien käyttöön (kuva 10). Liikennepaikoilla, joilla tapahtuu paljon samanaikaisia kohtaamisia, saatetaan kyseisellä ratkaisulla saada kapasiteettia lisättyä tai ainakin sujuvoitettua liikennöintiä, kun yksiköiden ei tarvitse erikseen hiljentää tai pysähtyä ennen liikennepaikkaa muusta liikenteestä johtuen. Potentiaalisina sovelluskohteina yksiraiteisten osuuksien kohtaamispaikat, haasteena nykyinen infra, riittävät raidepi-tuudet ja asetinlaitteen toiminnallisuus.



*Kuva 10. Ohiajovara kaksoisajolupamerkeillä.*

## 4 Menetelmät

### 4.1 Tarkastelun lähtökohdat

Tässä työssä on tarkoitus tutkia ETCS-tason 2 kuluvalvontajärjestelmän vaikutusta ratakapasiteetin käyttöasteeseen ja liikenteen häiriöttömään kulkuun Suomen rataverkolla. Keskeisin osa analyysiä on vertailla simuloinein nykyaikataulurakenteen mukaisessa junaliikenteessä ETCS-tason 2 kulunvalvontaa ja nykyisin lähes koko maassa käytössä olevaa kansallista junakulunvalvontaa (JKV).

Tutkimusympäristö kattaa Suomessa yleisimmät linjaosuuksien rata- ja liikennöintijärjestelyt. Tarkastelu käsittää kolme toisistaan riippumatonta simulointikokonaisuutta, joiden pohjana ovat seuraavat ratatyypit:

- I. Kaksiraiteinen linjaosuuksien, säännöllinen tiheä matkustajajunaliikenne
- II. Yksiraiteinen linjaosuuksien, sekaliikenne (tavara- ja matkustajakaukoliikenne)
- III. Kaksiraiteinen linjaosuuksien, sekaliikenne (tavara- ja matkustajakaukoliikenne)

Tyyppi I edustaa Suomessa lähinnä pääkaupunkiseudun lähiliikenteen paikallisjunien pääsääntöisesti käyttämiä raidepareja. Nämä junavuorot muodostavat yli puolet koko Suomen päivittäisistä matkustajajunavuoroista. Tässä työssä tarkastelualueeksi on valittu pääkaupunkiseudun reingaslinja välillä Pasila–Lentoasema–Pasila. Sillä kulkee normaalissa liikenteessä vain Helsingin seudun liikenteen (HSL) kaupunkijunia säännöllisin ja tihein vuorovälein.

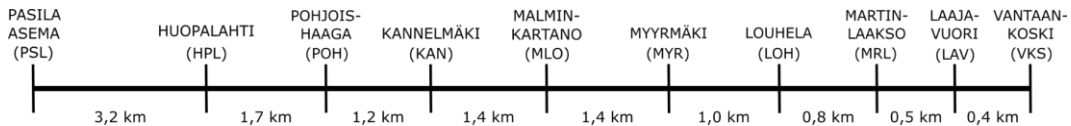
Tyyppin II rataosuuksia on Suomessa raidepituudella mitattuna kaikkein eniten. Tällaisten rataosuuksien liikenne rakenne voi vaihdella alueellisesti hyvinkin paljon. Kapasiteetin riittävyyden ja turvalaitesijoittelun kannalta vilkkaammin liikennöidyt ratat ovat mielenkiintoisia tapauksia. Tähän tarkasteluun tyyppin II edustajaksi on valittu rataosuudet Lielahdesta Kokemäkeen ja Kokemäeltä haarautuen edelleen Poriin ja Raumalle. Näillä rataosuuksilla kulkee monipuolisesti erilaisia matkustaja- ja tavarajunien kokoonpanoja.

Tyyppin III linjaosuuksia on nykyisin erityisesti Etelä-Suomessa, esimerkiksi Helsingistä Tampereelle ja Luumäelle. Myös Kokkolan ja Ylivieskan väli on kokonaan kaksiraiteinen. Kaksoisraiteen rakentamista tarkastellaan tärkeimmillä yhteysväleillä aika ajoin, joten tyyppin III linjaosuuksien määrän voi odottaa pitkällä aikavälillä Suomessa kasvavan. Usein on esitetty, että koko Helsinki–Oulu-rataosuus pitäisi rakentaa kaksiraiteiseksi. Tämän tyyppin tarkastelualueena käytetään väliä Kouvola–Luumäki, jossa on paljon nopeaa kaukoliikennettä ja monentyyppistä tavaraliikennettä.

Seuraavissa alaluvuissa annetaan tarkempi kuvaus tarkasteluväleistä.

#### 4.1.1 Tyyppi I: Pasila–Pasila

Tämä tarkastelurataosuus käsittää välin Pasilasta Pasilaan kehäradan kautta. Mukana tarkastelualueessa on pääradan osuus Pasilasta Havukoskelle, kehärata Havukosken ja Huopalahden välillä sekä rantarata Huopalahden ja Pasilan välillä. Pääradasta ja rantaradasta tarkastellaan ns. kaupunkirataa (kuva 11), ei kaukoliikenteen käyttämiä raiteita. Raiteiden nopeusrajoitus on pääasiassa 120 km/h.

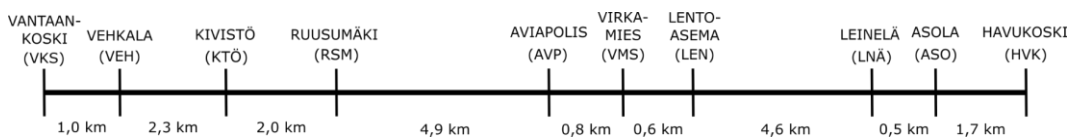


Kuva 11. Pasilan ja Vantaankosken välin asemat ja välimatkat.

Pääradalla kaksi itäisintä raidetta (itäinen keskiraide ja itäisin raide) muodostavat ns. kaupunkiradan, joka on pääosin yksinomaan lähiliikenteen käytössä. Raiteet kulkevat toisen pääradan raideparin (ns. kaukoliikenneraiteet) rinnalla, ja näiden välillä on vaihteytykset Pasila asemalla, Oulunkylässä sekä Tikkurila asemalla. Normaalitylanteessa raiteita käyttävät kuitenkin vain tietyt lähijunat (I-, P-, K-, ja T-junat). Pasilan ja Tikkurilan välissä on kuusi seisaketta tai liikennepaikan osaa, joilla junat pysähtyvät. Liikenne on tiheää: ruuhka-aikoina kaupunkirataa pitkin liikennöi 24 vuoroa tunnissa.

Koska kaupunkirata on normaalitylanteessa toiminnallisesti irrallinen kaukoliikenneraiteista, on tässä selvityksessä mahdollista tutkia vain kaupunkirataa. Helsingin ratapihan liikenne ja raiteistonkäyttö ovat erillinen kokonaisuutensa, ja siksi ne on jätetty tämän selvityksen ulkopuolelle.

Kehärata on vuonna 2015 valmistunut henkilöliikenteen rataosa, joka kulkee Vantaankoskelta Havukoskelle yhdistäen entisen Vantaankosken kaupunkiradan Huopalahdesta Vantaankoskelle pääraataan Havukoskella Leinelän ja Hiekkaharjun asemien välillä. Radan nykyiset 5 asemaa Vehkala, Kivistö, Aviapolis, Lentoasema sekä Leinelä sijaitsevat tällä rataosalla vaihtelevilla etäisyyksillä toisistaan (kuva 12). Radan mahdollisia tulevia väliasemia varten on tehty rakennusvaiheessa asemavaukset, joita ovat Petas, Lapinkylä, Viinikkala ja Ruskeasanta. Kehäradan pisimmät asemavälit ovat Kivistöstä Aviapolikseen 6,9 km ja Lentoasemalta Leinelään 4,6 km. Lyhin väli on nykyisellään Vantaankosken asemalta Vehkalaan. Kuvassa 12 on esitetty radan kulku asemaväleineen. Kehäradan rungon muodostaa kaksiraiteinen 8 230 metriä pitkä tunneli, jonka läntinen suuaukko sijaitsee Viinikkalassa ja itäinen Iolassa hieman ennen Leinelän asemaa. Tunnelissa on kaksi erillistä tunnelia, yksi kumpaakin raidetta varten.



Kuva 12. Kehäradan asemat ja välimatkat.

Radalla on pääosin 120 km/h nopeusrajoitus ja Kivistössä nopeusrajoitus on 100 km/h ja Havukosken sillalla 80 km/h. Tunnelien välillä sijaitsee yksi raiteenvaihtopaikka Virkamiehen liikennepaikalla. Raiteenvaihtopaikan molemmille raiteille on sijoitettu palo-ovet erottamaan tunnelit ilmatiiviisti toisistaan. Nämä ovet ovat normaalisti suljettuina ja suojattuina pääopastimin ja ne avataan liikenteenohjauksesta, mikäli radalla kulkeva yksikkö ohjataan kulkemaan raiteenvaihtopaikan kautta. Radalla on suuria pituuskaltevuuksia tunneliosuudella ja sen molempien suuaukkojen päissä. Radalle suunnitellut jyrkät 40,0 ‰ pituuskaltevuudet mahdollistavat radan joustavan raidegeometrian. Kehäradalla käytettävä kalusto eli Stadlerin valmistamat Sm5 FLIRT-junat ja tulevaisuudessa hankittava tällä rataosalla liikkuva kalusto kykenee liikennöimään näillä suurilla kaltevuuksilla. Radalla voidaan käyttää vain kalustoa, jolla on mahdollista liikennöidä suurista pituuskaltevuuksista huolimatta. [4]

## Liikenne

Kehäradan liikenne on täysin homogeenista ja se muodostuu pelkästään tiheästä matkustajaliikenteestä. Vilkkaimpina päivinä rataosalla kulkee yhteensä 205 juna-vuoroa, joista 104 vuoroa kulkevat Kehärataa myötäpäivään linjatunnuksella P ja 101 vuoroa vastapäivään tunnuksella I, joskin junamäärissä on pieniä vaihteluita. Liikenteen vuoroväli Huopalahti–Havukoski-välillä tällä hetkellä arkisin klo 6–19 on 10 minuuttia ja lauantaisin päivällä klo 10.30–19 se on 10 minuuttia. Lauantai-aamuisin ja -iltaisin liikenne on hieman harvempaa 15–30 min vuorovälillä siten, että aikaisin aamulla liikenne alkaa 30 min vuorovälillä lisääntyen asteittain saavuttaessa kohti klo 10.30 alkavaa päiväliikennettä. Sunnuntaisin ja pyhäpäivinä vuorovälit ovat koko päivän ajan harvemmat vuorovälin ollessa pääsääntöisesti 15 min poikkeuksina aikainen aamuliikenne niin lauantaina kuin pyhäpäivinä klo 5–10 sekä myöhäisillan liikenne klo 22–02, jolloin rataosan liikenteessä käytössä on 30 min vuorovälit. [3]

Rantaradalla Pasilan ja Huopalahden välillä infrastruktuuri ja liikenne ovat melko vastaavat kuin pääradalla. Eteläisin raide ja eteläinen keskiraide muodostavat ns. kaupunkiradan, joka on normaalitilanteessa toiminnallisesti erillinen kokonaisuus ns. kaukoliikenneraiteiden liikenteestä. Kehärataa liikennöivien I- ja P-junien lisäksi kaupunkirataa käyttävät A- ja L-junat. Pasila aseman ja Huopalahden välissä on Ilmala aseman liikennepaikka, jolla junat pysähtyvät. Nopeustaso on pääosin 120 km/h. Liikennettä on ruuhka-aikoina 24 vuoroa tunnissa.

### 4.1.2 Tyypin II: Lielahden–Pori/Rauma

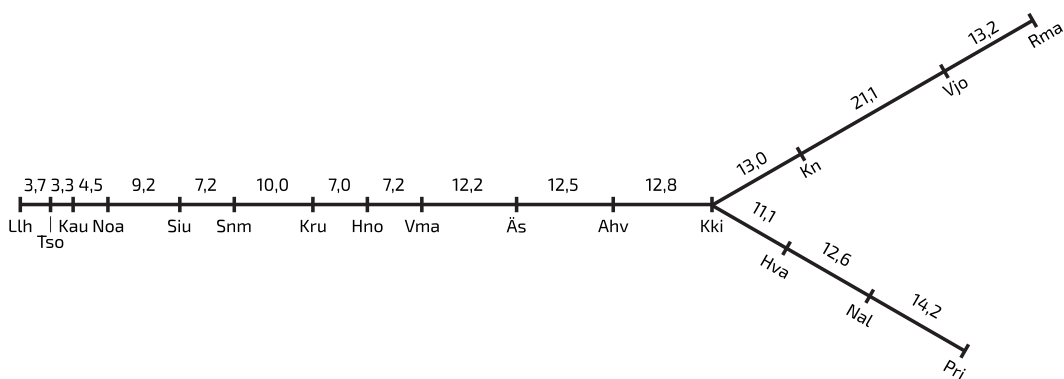
Rata Poriin ja Raumalle erkanee pääradasta Lielahden liikennepaikalla, joka sijaitsee 6 km Tampere aseman pohjoispuolella. Kokemällä Lielahden–Pori-radasta erkaneerahaara Raumalle. Porista rata jatkuu edelleen Mänty- ja Tahkoluotoon, mutta nämä rataosuudet eivät kuulu tarkastelualueeseen. Tarkastelualue on kokonaisuudessaan yksiraiteista ja varustettu JKV:llä. Lielahden ja Kokemäen välillä on yhteensä yhdeksän liikennepaikkaa. Tesoman seisake ei ole mukana tarkasteluissa, sillä se on valmistunut vasta selvitystyön aloittamisen jälkeen. Kokemäen ja Rauman sekä Kokemäen ja Porin väleillä on kummallakin kaksi väliliikennepaikkaa. Rataosuuksien liikennepaikat on esitetty taulukossa 6.

Kaikilla liikennepaikoilla Kalkkua lukuun ottamatta on kohtaumahdollisuus. Muuten kohtausraiteiden määrät ja pituudet vaihtelevat liikennepaikoittain merkittävästi.

Taulukko 6. Lielähti–Kokemäki–Pori- ja Kokemäki–Rauma-rataosuuksien liikennepaikat.

Liikenne- paikka	Kaupallinen	Junakulku- raiteita	Laituriraiteita	HP
Lielähti		2	0	N/A
Kalkku		1	0	-
Nokia	✓	3	1	949–756
Siuro		2	0	703, 760
Suoniemi		2	0	872, 743
Karkku	✓	2	1	943, 856
Heinoo		2	0	851, 734
Vammala	✓	3	3	843–715
Äetsä		3	0	1183–867
Ahvenus		2	0	887, 747
Kokemäki	✓	4	3	904–745
Harjavalta	✓	7	2	804–341
Nakkila		2	0	906, 733
Pori	✓	10	2	730–408
Kiukainen		2	0	768
Vuojoki		2	0	759, 760
Rauma		8	0	916–332

Rataosuudet ovat nykyisin asemavälisuojustettuja. Suojavälien pituudet vaihtelevat merkittävästi ollen lyhimmillään 4,5 km ja pisimmillään 21,1 km. Liikennepaikkavälien pituutta on havainnollistettu kuvassa 13. Asemavälisuojustus ja liikennepaikkavälien pituuksien vaihtelu rajoittavat merkittävästi mahdollisuutta junien peräkkäin ajamiseen.



Kuva 13. Tarkastelualueen liikennepaikkavälit havainnollistettuna.

Suurin sallittu nopeus on Lielähti–Pori-välillä 140 km/h, mutta tätä alhaisempia nopeusrajoituksia on lukuisia. Kokemäki–Rauma-välillä suurin sallittu nopeus on 100 km/h.

Kaikki liikennepaikkojen vaihteet (Lielähtea lukuun ottamatta) ovat lyhyitä, mikä rajoittaa nopeuksia poikkeavaan suuntaan ajettaessa. Suurella osalla junista rajoitus on 35 km/h, mutta itäisen yhdysliikenteen kalusto sisältävissä tai yli 225 kN akselipainoisissa junissa vaihderajoitus on 20 km/h.

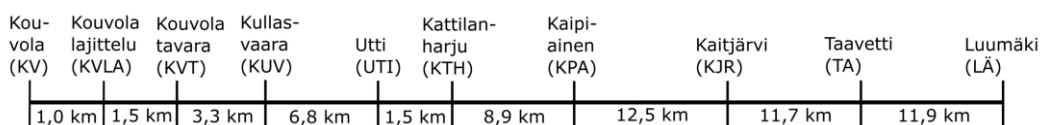
## Liikenne

Alue on liikenteeltään heterogeeninen. Tampere–Pori-välillä kulkee arkipäivinä 8+8 matkustajajunaa, jotka kaikki pysähtyvät Nokialla, Karkussa, Vammalassa, Kokemäellä ja Harjavallassa. Matkustajajunat kulkevat jokseenkin vakioilla aikatauluilla, joissa lähdöt Porista ja Tampereelta sijoittuvat pääosin tasatunnin ja 15 minuuttia yli tasatunnin väliin ja junat kohtaavat Vammalassa. Kokemäki–Rauma-välillä ei kulje matkustajaliikennettä. Nokian ja Lielahden välillä on lisäksi lähiliikennettä 7+7 vuoroa vuorokaudessa.

Tavaraliikenteen osalta junamäärissä on vaihtelua rataosuuksittain ja päivittäin. Tavaraliikenteessä rataosuuden erikoispiirteenä on Lielähti–Pori-välillä kulkevat hiilen transitokuljetukset, jotka kulkevat merkittävästi muuta tavaraliikennettä hitaammin. Näiden määrät ovat kuitenkin olleet epävakaita ja suuri osa liikenteestä on peruttu. Rataosuudella on muutamilla osuuksilla 50 km/h nopeusrajoitus yli 3 000 tonnin junille, mikä hidastaa näiden junien kulkua entisestään. Tavaraliikenteen aikataulut eivät noudata mitään selkeää kaavaa, vaan junat liikkuvat siten, kun ne on aikanaan aikataulurakenteeseen saatu sovitettua.

### 4.1.3 Tyyppi III: Kouvola–Luumäki

Rataosa on pituudeltaan 59 kilometriä ja sen varrella sijaitsee 8 liikennepaikkaa, joista Kouvolan liikennepaikka on jaettu osiin sen sisältäessä 3 eri osaa: Kouvola asema, Kouvola lajittelu ja Kouvola tavara. Rata on kaksiraiteinen Kullasvaaran liikennepaikalta Luumäelle, jossa rata haarautuu Lappeenrannan suuntaan ja toinen raide kohti Vainikkalaa. Kuvassa 14 nähdään Kouvola–Luumäki-välin liikennepaikat välimatkoineen hahmotettuna kaavioon. Rataosan liikennepaikat ovat tyypeiltään hyvin erilaisia siinä missä Kouvolan tavararataapiha sekä lajittelurataapiha ovat Suomen suurimpia tavaraliikenteen solmukohtia, niin samaan aikaan esimerkiksi Utti on vain linjavaihde ja Kattilaharju puolenvaihtopaikka. Kouvolan ja Luumäen linjasuojastus on rakennettu hyvin tiheäksi, jotta rataosan suuret liikennemäärät pääsevät kulkemaan aikataulussaan ilman tarpeettomia hidastuksia tai suojavälien vapautumisen odottelua. Tiheistä suojastusväleistä on hyötyä heterogeenisen liikenteen radalla, sillä tavara- ja henkilöliikenteen junat voivat siten ajaa huomattavasti lähempänä toisiaan.



Kuva 14. Kouvola-Luumäki välin liikennepaikat välimatkoineen.

Radan suurinta sallittua nopeutta 200 km/h käyttävät tällä hetkellä InterCity-, Pendolino- ja Allegro-junat. Radan geometria on hyvin suurilta osin 200 km/h nopeudelle kunnostettu. Kouvolasta Kullasvaaran liikennepaikalle nopeusrajoitukset nousevat asteittain. Kouvolan asema–Kouvola-lajittelu välillä on 90 km/h nopeusrajoitus, josta se nousee 150 km/h ja edelleen 170 km/h Kouvolan tavaraliikennepaikan kohdalla. Kullasvaaran liikennepaikalta alkaen radalla sallitaan 200 km/h nopeus. Utin ja Kattilaharjun asemien välillä sijaitsevassa mutkassa on 170 km/h rajoitus. Toinen merkittävämpi nopeusrajoitus on Taavetin aseman itäpuolella olevassa mutkassa, jossa nopeus on rajoitettu 150 km/h. Luumäen ratapihan itä-

päässä alkaa 140 km/h rajoitus, jonka mukaan myös liikennepaikan itäpään vaihteet on mitoitettu. Radan muilla liikennepaikoilla käytetään pääsääntöisesti 80 km/h vaihteita, joka nopeuttaa junien lähtöä sivuraiteilta ja puolenvaihtoja.

## Liikenne

Rataosan liikenne on heterogeenistä ja se koostuu niin nopeasta henkilöliikenteestä kuin myös hitaammasta tavaraliikenteestä sekä lisäksi kansainvälisestä junaliikenteestä Venäjälle, joka kulkee Kouvolasta Luumäen kautta kohti Vainikkalaa haarautuvalla radalla. Radalla kulkee arkisin riippuen viikopäivästä n. 100–120 junaa ja viikonloppuisin n. 70–90 junaa. Viikoittain kulussa voi olla 700–900 junaa, joista tavaraliikennettä on usein noin kaksi kolmasosaa. Matkustajaliikenne rataosalla on noin kolmasosa liikenteen kokonaismäärästä.

Aikataulusuunnittelulle radan vaihtelevat junatyypit luovat omat haasteensa. Hitaiden tavarajunien sekaan pitää saada mahdutettua nopea henkilöliikenne, joka kulkee parhaimmillaan 200 km/h Kouvolan ja Luumäen väliä. Tämä toteutuu rataosalla siten, että nopea liikenne aikataulutetaan kulkemaan eri aikoina tavaraliikenteeseen nähden. Kaksiraiteisuus mahdollistaa lisäksi hitaamman tavarajunan siirtymisen viereiselle raiteelle, jolloin nopeampi matkustajajuna voi ohittaa sen linjaosuudella. Nykyisin tätä ei tiettävästi tehdä suunnitellusti, mutta liikenteenohjaus voi operatiivisessa toiminnassa ohjata junan ”vastaantulevalle raiteelle”.

## 4.2 Tarkastelumenetelmät

Tarkastelumethodina käytetään simulointia. Jokaisesta yllä kuvatusta tarkastelualueesta on luotu erillinen simulaatiomalli, joka sisältää operatiivisen toiminnan kuvaamisen edellyttämät ratainfrastruktuurin elementit, kuten raiteet, vaihteet, opastimet, raideosuudet ja pysähdyspaikat. Kullekin rataosuudelle mallinnetaan tyypillinen päivittäinen junaliikenne ennalta valitun nykyisen todellisen säännöllisen liikenteen aikataulun mukaan.

Tarkastelujen välisenä muuttujana on kulunvalvontajärjestelmä. Kustakin kuvasta tarkastelualueesta rakennetaan kolme eri skenaariota, kukin erilaisella turvalaiteasettelulla. Nämä asetelut ovat:

- nykyinen Suomen kansallinen junien kulunvalvonta ja nykyiset ratalaitteiden sijainnit (JKV)
- ETCS-tason 2 kulunvalvonta, jossa JKV:n opastimet korvataan ajolupa-merkeillä (ETCS 1:1)
- ETCS-tason 2 kulunvalvonta, jossa kulunvalvonnan rataelementtien sijoittelua optimoidaan kapasiteetin parantamiseksi (Optimoitu ETCS).

Muita muutoksia skenaarioiden välillä pyritään välttämään, koska tarkoitus on vertailla kulunvalvontaratkaisujen vaikutuksia samaan aikataulurakenteeseen. Kulunvalvonnan muutokset kuitenkin voivat vaikuttaa kelvolliseen aikatauluun, joten pienet viilaukset konfliktittoman aikataulun takaamiseksi on sallittava.

Simulointiin käytetään rautatiesimulointiin erikoistunutta tietokoneohjelmistoa. Simulaattoriin mallinnettaville junille määritettävä aikataulurakenne toimii operatiivisen tilanteen pohjana ja liikenteen tavoiteltuna tilana. Varsinaista häiriösietoisuuden analyysiä varten simuloinnissa junille määritetään eri suuruisia aikataulupoik-

keamia. Kaikkien simulointikierrosten synteessinä saadaan tunnuslukuja, joilla voidaan analysoida radan kapasiteettiä ja nykyisen aikataulurakenteen palautumiskykyä häiriötilanteissa eri kulunvalvontaratkaisuilla edellä määritellyillä rataosilla. Rataosat edustavat erilaisia rata- ja liikennöintityyppejä. Analyysin tuloksena voidaan arvioida ETCS-tason 2 kulunvalvonnan ratalaitteiden sijoittelun merkitystä ja vertailla saavutettavaa kapasiteettiä ja häiriöherkkyyttä nykyiseen JKV-järjestelmään tutkituilla rataosilla. Yleisemmin tarkoituksena on muodostaa käsitys ratkaisuiden välisistä eroista aiemmin kuvatuilla ratatyypeillä I, II ja III.

## 4.3 Simulointiohjelmisto

Tarkastelussa simulointityökaluna on rautatieliikenteen mikrosimulointiohjelmisto LUKS [22]. Mallin rakentaminen alkaa junien käyttämän ratainfrastruktuurin luomisella. Jokainen yksittäinen raide, vaihde ja radan muut oleelliset elementit (esim. opastimet, raideosuudet, baliisit) sijoitetaan mallissa suhteessa taustalla olevaan todelliseen ratakilometrijärjestelmään metrin tarkkuudella. Radan kaltevuustiedot määritetään raidekohtaisesti antamalla kaltevuuden muutospisteet ja suuruudet. Radat voivat haarautua vapaasti ja ratakilometrien hyppykohdat voidaan huomioida, mikä mahdollistaa suurienkin rataverkkojen ja ratapihojen mallintamisen tarkasti.

Simulaattorin arkkitehtuuri on kerroksittainen. Ratainfrastruktuurin päälle mallinetaan junien reititysvaihtoehdot ja mahdollinen turvalaitelogiikka. Infrastruktuuri on jaettu asemiin, joille jokaiselle määritellään käytettävissä olevat reititykset. Reiteille voidaan määritellä tarpeen mukaan pysähdyspaikat. Ohjelmassa voidaan erottaa junaliikenteen reitit ja vaihtotyön reitit erikseen. Kulunvalvonta ja varsinaiset kulkutiet opastinten välillä rakentuvat automaattisesti määriteltyjen opastimien (ETCS:n tapauksessa ajoluvan päätekohtien), raideosuuksien vapautuselementtien ja reittivaihtoehtojen mukaan. Ohjelmaan on rakennettu joitakin Keski-Eurooppalaisia kulunvalvontajärjestelmiä ja erityisesti kaikki ETCS-tasot. LUKSin kulunvalvontajärjestelmä tukee kaikkia tärkeimpiä parametrejä jarrukäyrien laskentaan liittyen mukaan lukien kansalliset ETCS-arvot.

Simulointia varten määritetään infrastruktuurin lisäksi kaikki mallissa liikkuvat yksiköt. Vetureiden ja junayksiköiden profiileja säilytetään tietokannassa, jossa voidaan identifioida kaluston dynamiikkaan vaikuttavat tekniset ominaisuudet. Varsinaiset junat määritellään yleisempinä kokoonpanoina, joihin valitaan tietokannasta vetävä yksikkö. Jos vetävä yksikkö on veturi, loput junasta mallinetaan antamalla junapituus, massa ja jarrupainoprosentti. Yksittäisten vaunujen tietoja ei ole määritetty yksityiskohtaisesti. Muodostetuille junakokoonpanoille määritetään niiden ensisijainen reitti pysähtymispaikkoineen ja aikataulu tarkoituksenmukaisella tarkkuudella.

LUKS laskee infrastruktuurin, junatietojen ja reitin perusteella junille asemien väliset vähimmäisajoajat. Nämä toimivat reunaehtoina aikataulujen tarkemmalle määrittämiselle. Junalle ei voi laatia aikataulua, joka alittaa teoreettisen vähimmäisajoajan. LUKSin avulla voi laatia aikataulun kokonaan itse, tai sen voi aluksi tuoda ulkopuolelta. LUKS määrittää aikataulun perusteella ratainfrastruktuurin varautumisajat nojautuen varausaikateoriaan. Ohjelma ilmoittaa laskennan perusteella aikataulussa havaitut konfliktipisteet. Tämä auttaa muodostamaan pätevän ja toteutuskelpoisen aikataulun ratainfrastruktuurin mukaan. Tämä on useimmiten järkevä lähtökohta operatiiviselle simuloinnille, joskaan se ei ole LUKSissa välttämätöntä.



Kun ratainfrastrukturi, reitit ja junat aikatauluineen on määritelty, voidaan aloittaa operatiivinen simulointi. Simuloinnissa junat pyritään ensisijaisesti ajamaan annetun aikataulun mukaisesti sekunti sekunnilta, jos se vain on mahdollista. Operatiivisessa simuloinnissa junien kululle määritellään kuitenkin satunnaisviiveitä, jotka aiheuttavat poikkeamia aikatauluun ja siten usein konflikteja junien välille. Kun LUKS havaitsee aikataulussa konfliktin, se pyrkii ratkaisemaan konfliktin muuttamalla junien ajosuunnitelmaa havainnon jälkeen niin, että konflikti vältetään. Konfliktin ratkaisussa käytettävät menetelmät ja periaatteet määritellään etukäteen. LUKSin konfliktinratkaisumenetelmä mallintaa liikenteenohjauksen mahdollista toimintaa operatiivisessa tilanteessa.

Yksittäisen simuloinnin tuloksena saadaan toteutunut junien kulku edustavan päivän liikenteestä etukäteen annettu viivejakauma huomioiden. Kokonaistuloksien arvioinnissa yhdistetään useamman eri viivein ajetun simulaatiokierroksen tulokset. Lopputulosta voidaan analysoida monin eri tavoin. Vertaamalla ajettua keskimääräistä tulosta junien aikataulun mukaiseen suunnitelmaan voidaan tutkia erityisesti operatiivista häiriönsietokykyä. LUKS tuottaa simuloinnin aikana dataa junien lisäksi infrastruktuurista ja sen käytöstä. Ratakapasiteetin käyttöaste voidaan laskea LUKSissa suoraan UIC 406 -menetelmää soveltaen. Simulaatioiden tuottamaa dataa voidaan analysoida LUKSin omilla toiminnallisuuksilla tai sitä voidaan käsitellä ulkoisilla työkaluilla.

## 4.4 Simuloinnin lähtötiedot

### 4.4.1 Ratainfrastrukturi ja turvalaitteet

Simuloinnin lähtötiedot on koottu pääosin avoimista tietolähteistä. Infrastruktuurin lähteenä tässä työssä käytettiin Fintrafficin tarjoamaa avointa Digitraffic-rajapintaa (Infra-API) [13, 14]. Infrastruktuuritiedot haettiin Digitraffic-rajapinnasta Väyläviraston infra2railml-muunnostyökalulla [15], joka muuttaa rajapinnasta saatavan informaation rautatiesovellusten käyttöön tarkoitettuun railML-formaattiin, jota LUKS pystyy lukemaan. Tällä menetelmällä voitiin LUKSilla muodostaa tutkittavista alueista raiteiston infrastruktuurimalli, jossa on mukana JKV:n turvalaitevarustelun mukaiset rataelementit.

Datan tuonti yo. tavalla tuotti pohjamallin, jonka laatua tarkasteltiin manuaalisesti. Tuontityökalussa ja datassa esiintyvien epäjohdonmukaisuuksien vuoksi malleista piti korjailla muutamia kohtia käsityönä.

ERTMS/ETCS-järjestelmään liittyvien kansallisten parametrien suhteen on simuloinnissa käytetty lähtökohtaisesti määräävänä tekijänä Väyläviraston ratateknisten ohjeiden (RATO) osaa 22. [18]

### 4.4.2 Junakokoonpanot ja aikataulut

Fintraffic tarjoaa myös Rautatieliikenne-rajapinnan [16, 17], jonka kautta se jakaa tietoa muun muassa junien aikatauluista ja kokoonpanoista, mistä myös tämän työn aikataulutiedot ovat peräisin. Tälle työlle tarkasteluajankohdaksi valittiin 28.7.2021 mukainen säännöllisen kapasiteetin liikenne. Valitulla päivällä ei sinällään ole vaikutusta tarkastelulle, sillä jokaiselle tarkastelulle (JKV, ETCS 1:1 ja Optimoitu ETCS) käytetään samaa aikataulua ja työn ytimessä on selvittää järjestelmien välisiä eroja. Ajankohdaksi valittiin keskiviikko ratakapasiteetin tarkasteluun

liittyvistä historiallisista syistä. Säännöllisen kapasiteetin käyttämisen etu on siinä, että ainakin periaatteessa ratakapasiteetin pitäisi riittää säännölliselle kapasiteetille. Junia, etenkin tavarajunia perutaan varsin usein todellisuudessa ja junavuoroja voi tulla myös lisää kiireellisenä kapasiteettina. Toteutuneessa liikenteessä päivittäiset vaihtelut samanlaisen haetun kapasiteetin välillä voivat olla suuria. Edustavan päivän valitseminen voi siten olla työlästä, ja säännöllisen aikataulun mukainen liikenne on tällöin parempi vaihtoehto, koska tarkoitus ei ole vertailla tuloksia toteumatietoihin.

Rautatieliikenne-rajapinta tarjoaa myös matkustajajunista kokoonpanotiedot. Tavarajunien osalta aikataulun mukaisten junien kokoonpanotietoja voi myös jonkin verran löytää säännöllisen kapasiteetin hakemuksista, mutta nämä tiedot ovat varsin yleisiä ja pikemminkin mitoittavia tietoja. Tämä johtuu siitä, että tavarajunien junakokoonpanoja ei useinkaan tiedetä tarkasti etukäteen, mutta säännöllisen kapasiteetin hakemukset tehdään kuukausia ennen junan lähtöpäivää.

Realistisemmän liikennerakenteen saamiseksi tarkastelupäivän tavarajunavuoroille pyrittiin laatimaan edustava veturi- ja vaunukokoonpano. Tämä tapahtui etsimällä havaintotietoja junavuoroista ja niiden lastin laadusta internetlähteistä ja junien tulo- ja lähtöpaikkojen perusteella. Löydöksiä seurauksena määritettiin edustava junakokoonpano jokaiselle tarkastelupäivän junalle. Simulaation kannalta kokoonpanojen oleelliset tiedot (massa, pituus, jarrupaino) määritettiin vaunujen ja vetureiden teknisten tietojen avulla.

Junien pysähtymisajat perustettiin aikatauluihin. Junille määriteltiin aikataulunmukaisen pysähtymisajan lisäksi myös erikseen vähimmäispysähdysajat, jotka arvioitiin junan tyyppin ja pysähdyksen oletetun syyn perusteella. Esimerkiksi kohtaamisille ei lähtökohtaisesti määritelty ollenkaan minimipysähdysten kestoja, jotta liikennetilanteen muuttuessa kohtauksen voi välttää (joitakin poikkeuksia jouduttiin tekemään, jotka selitetään aluekohtaisten tarkastelujen yhteydessä). Kehäradan mallin osalta kaupunkiliikenteen pysähdysajoista saatiin erillinen lähtötietoaineisto HSL:ltä. Tämä antoi aikataulua yksityiskohtaisemman kuvan kaupunkiliikenteen asemapysähdyskäyttäytymisestä.

#### **4.4.3 Häiriösimuloinnissa käytetyt viiveet**

Tarkastelun eri osuuksien junat eivät lähes koskaan kulje koko matkaansa simulaatiomallin alueella. Useissa tapauksissa junien todellisten pääteasemien ja simulaatiomallin lähtö- ja tuloasemien välillä on suuria eroja, jolloin todellisuudessa viiveiden odotusarvo ja vaihteluväli ovat eri junilla hyvin erilaiset tulosuunnasta riippuen. Tämän työn puitteissa ei kuitenkaan ollut tarkoitus tutkia verkollisia vaikutuksia kokonaisuutena, vaan keskittyä tarkastelualueen sisäisiin ilmiöihin. Tämän vuoksi viiveiden mallinnusta ei lähdetty arvioimaan junien todellisten määränpäiden mukaan, vaan työssä päädyttiin käyttämään junatyyppikohtaisia viivejakaumia. Tarkemman rataosakohtaisesti saatavilla olevan tiedon puutteessa käytettiin viiveille saksalaista standardijakaumaa. Jakaumat olivat erilaiset henkilöliikenteen paikallisjunille, kaukojunille ja tavaraliikenteen junille. Simuloinnissa käytetyt viiveet olivat junien alkuviihe ja kaupallisen pysähdysten pysähdysviive. Alkuviihe on todennäköisyysjakaumasta vedettävä satunnaismuuttujan arvo, joka on se aika, jonka verran juna on myöhässä malliin saapumisestaan. Kaupallisen pysähdysten viive on aikataulun mukaisen pysähdysajan suunnitteleman pidennys, joka realisoituu vasta pysähdysten aikana.

#### 4.4.4 Optimoitu sijoittelu

ERTMS/ETCS-järjestelmän raideosuuksien sijoitteluperiaatteille ei ole vielä selkeää kansallista ohjetta tai käytännön kokemusta Suomesta. Tämän työn lähtökohdissa ei siten ollut määriteltynä ennakoasetelmaa tai tavoitetilaa, jonka mukaan Optimoitu ETCS -skenaario toteutettaisiin. Koska tarkastelu on rajattu ETCS:n vaikutuksiin linjaliikenteessä päällimmäisenä tavoitteeksi Lielähti–Pori/Rauma ja Kouvolä–Luumäki-tarkastelujen osalta sijoittelussa otettiin pyrkimys korkeintaan 1 500 metrin suojaväleihin. Sama maksimiväli pyrittiin toteuttamaan myös liikennepaikkojen sisällä linjaraiteita vastaavilla osuuksilla.

Työssä ei kuitenkaan ollut tarkoitus tehdä täysimittaista sijoitus suunnittelua, eikä työssä tarvinnut huomioida sijoittelua suhteessa tekniseen toteutettavuuteen. Tämän vuoksi päädyttiin pyrkimykseen pitää liikennepaikkojen tulo- ja lähtöpastimet mahdollisimman ennallaan nykyisillä paikoillaan ja sijoitella ajolupamerkkejä niiden väliin sopivasti, jotta enintään 1 500 metrin suojavälit toteutuisivat. Usein tämän seurauksena liikennepaikan tulo-opastimen ja tulovaihteen väliin sijoitettiin uusi ajolupamerkki lähelle tulovaihdetta. Tilan ja suojavälin pituuden tarpeen mukaan valittiin tarvittaessa käytettäväksi pienempi valvontanopeus tai nollaohiajovara kyseiselle ajoluvan päätekohtalle. Tämän ratkaisu sujuvoittaa erityisesti ohitustilanteita, joissa sivuraiteelle ajava juna vapauttaa linjaraiteelle ajoluvan alkuperäistä lähemmäksi tulovaihdetta jo ennen, kuin se on kokonaan sivuraiteella. Lyhempi suojaväli ennen tulovaihdetta auttaa pitämään minimijunavälin paikallisesti tasaisempana hidastavan junan ja ohittavan junan välillä. Ero voi olla paikoin merkittävä, koska sivuraiteelle ajaessaan juna ajaa käytännössä aina linjaosuutta hitaammin, ja siten pidentää suojavälien varausaikaa. Optimointisijoittelun aikaiset testit osoittivat, että tällä ratkaisulla alkuperäistä tulo-opastinta edeltävän suojavälin varauksa saa lyhennettyä jopa 30 sekuntia. Vaikutus korostuu etenkin Kouvola–Luumäki-välillä, missä linjaraiteella ajetaan pääsääntöisesti yhteen suuntaan. Tämä sujuvoittaa esimerkiksi tilanteita, joissa ohittava juna on jo lähellä minimietäisyyttä ohitettavasta junasta tai ajaa jo ohitettavan junan perässä ennen ohituspaikkaa.

Kehäradalla asemat saattavat olla lähempänä kuin 1 500 metrin etäisyydellä toisistaan. Myöskään ohitustilanteita ei normaaliliikenteessä ole. Sen sijaan juna pysähtyvät tiheästi, jolloin ajolupamerkkien sijoittelulla on hyvä pyrkiä periaatteessa siihen, että saapuva juna pääsee asemalle mahdollisimman hyvin edellisen junan perästä ja että junan ei tarvitsisi jarruttaa liian konservatiivisesti (jarrukäyrän määrämänä) pysäkillä. Optimoinnin pääpaino Kehäradalla olikin asettaa jokainen asema omalle suojaosuudelleen ja sijoittaa lähtöpastin riittävän kauas pysähtymispaikasta, jotta jarrutukseen ei tarvitse käyttää liikaa aikaa. Tähän auttoi myös se, että liikenteenohjausjärjestelmä varmistaa useammin ajoluvan jo pysäkillä myös eteenpäin junan saapuessa.

### 4.5 Simulointitarkastelujen oletukset, rajoitukset, etenemisprosessi ja laadunvarmistus

Simuloinnin perimmäinen tarkoitus metodina on tarkastella ja analysoida todellisen maailman kysymyksiä mallintamalla jokin systeemi ja toimintaympäristö mahdollisimman tarkasti tietokoneohjelmien avulla, ja suorittaa systeemissä ennalta valikoituja skenaarioita. Kuitenkin simulaatiot sisältävät aina yksinkertaistuksia ja oletuksia johtuen mallinnettavan systeemin monimutkaisuudesta ja usein myös simulointityökalujen rajoitteista. Simuloinnin tulosten analyysissä on tärkeää tiedostaa

simuloinnin rajoitteet ja oletukset, jotta voidaan arvioida niiden merkitys ja vaikutus tarkasteltavaan asiaan. On erityisen tärkeää havainnoida, jääkö jokin systeemiin vaikuttava ilmiö huomiotta simulaatiossa, ja arvioida sen merkitys tulosten kannalta.

#### 4.5.1 JKV-mallinnus

LUKSissa ei ole olemassa valmista JKV-mallia, jolla voitaisiin suoraan parametrit syöttämällä mallintaa suomalainen junakulunvalvontajärjestelmä. JKV:n toimintaa emuloidaan mukauttamalla ETCS-tason 1 mallin jarrukäyriä vastaamaan toiminnallisesti JKV:tä. Tässä lähestymistavassa on kuitenkin kaksi haittapuolta:

1. JKV-järjestelmä pystyy laskemaan tietyissä tapauksissa opastin- ja juna-kohtaisen ns. laskennallisen valvontanopeuden, jota ETCS-järjestelmä ei kuitenkaan tue. Siksi JKV:n mallinnus on sikäli todellisuutta yksinkertaisempi, että valvontanopeudelle on määritelty vain kaksi arvoa, toinen henkilö- ja toinen tavarajunille. Käytettävät arvot laskettiin keskiarvoina simulaatioon laadittujen junakokoonpanojen perusteella rataosittain. Vaihtelut olivat keskenään maltillisia, joten tämä on katsottu riittäväksi approksimaatioksi.
2. JKV laskee jarrutuskäyrän hieman eri tavalla Seis-opasteen ja nopeusrajoituksen aleneman välillä. Seis-opastetta lähestyttäessä JKV-laskenta ottaa huomioon s0-tekijän, mutta kyseistä tekijää ei käytetä lähestyttäessä nopeusrajoitusta. ETCS-järjestelmässä ei ole vastaavanlaista eroa, mutta ETCS-järjestelmän laskennassa on myös hieman eroavaisuuksia nopeusrajoituksen ja ajoluvan päätepisteen laskennassa. Nopeusrajoitusta lähestyttäessä EBD-käyrä lasketaan tavoitepisteen taakse niin sanotun EBD-footarvon verran. Jotta tämä tulisi huomioitua tarpeeksi, Kehäradan mallissa on siirretty radan nopeusrajoitusmerkkejä, jotta jarrukäyrän laskenta ottaa JKV:n vakiopelivaramatkan huomioon. Tämä korjaus katsottiin olennaiseksi tiheästi ja homogeenisesti liikennöidyllä Kehäradalla. Muilla tarkastelluilla rataosuuksilla ei liikenne rakenteen vuoksi oletettu erolla olevan merkitsevää vaikutusta vertailun kannalta.

JKV:n mallinnuksessa ei myöskään voinut käyttää suoraan ETCS-konversiomallia, jossa hidastuvuuden dynamiikka lasketaan jarrupainoprosentin avulla, koska laskentatapa poikkeaa JKV:n käyttämästä jonkin verran. Tämän vuoksi JKV:n alaisten junien kokoonpanoille määritettiin perushidastuvuus valmiiksi JKV:n laskentakavalla, ja ne mallinnettiin LUKSissa ns. gammajunina.

#### 4.5.2 Simulointiaika ja aluerajaukset

Pasila–Pasila-osuuden liikenne on aikataulullisesti erittäin homogeenistä, joten simulaatioajoissa ei ole mukana aivan koko päivän liikennettä. Simuloitu aikaväli Pasila–Pasila-välillä on 6:30–14:30 ruuhka-ajan liikenne rakenteella eli 10 minuutin vuorovälein linjoittain. Tarkastelusta päätettiin jättää Helsinki–Pasila-väli pois, koska työn tarkoitus on keskittyä vaikutuksiin linjalla. Helsinki–Pasila-välillä olisi simulaatiossa huomattavasti enemmän rakenteellista pelivaraa, koska ko. välin liikennöintiin vaikuttaa muukin liikenne ja sen raiteistonkäyttö Helsingin asemalla, jota ei työssä kuitenkaan mallinnetta. Pasilan pohjoispuolella kaupunkiratojen liikenne voidaan perustellusti tarkastella omana kokonaisuutenaan.

Lielähti–Pori/Rauma-välillä simuloidaan koko vuorokauden liikenne, koska aikataulurakenne vaihtelee vuorokauden mittaan. Myös tällä osuudella päätettiin ennakoon jättää Tampere–Lielähti-väli pois tarkastelualueesta, koska tällä välillä kulkee myös muuta junaliikennettä, jota olisi vaikea ottaa täysipainoisesti huomioon. Lisäksi Tampereen asema toisi todennäköisesti ylimääräistä puskuria aikatauluihin, koska aseman liikennettä ei mallinnettaisi kokonaisuudessaan.

Kouvola–Luumäki-väli simuloidaan niin ikään koko vuorokauden osalta vaihtelevan liikennerakenteen vuoksi. Tällä välillä päädyttiin pitämään Kouvolan asema osana mallia, koska muutoin henkilöjunilla ei olisi mallissa yhtään pysähtymisasemaa. Syötetyn aikataulun rakenteen kannalta tätä ratkaisua puolsi myös se, että rata-linja haarautuu Kouvolan liikennepaikan alueella kahteen eri linjasuuntaan. Pitämällä Kouvolan aseman referenssiajat mukana simulaatioissa saatiin luotettavammin huomioitua junien aikataulun mukainen kulku radan haarakohdissa. Kouvola mallinnettiin kuitenkin yksinkertaistetusti, ja tavarajunia varten määriteltiin ennen Kouvolan asemaa linjalta poistumiseen ja linjalle liittymiseen tarkoitettuja raiteita. Tuloksien analysointi keskitettiin kuitenkin Kullasvaaran ja Luumäen välille, jossa kaikki linjaosuutta Kouvola–Luumäki käyttävät junat kulkevat. Vaikka Kouvola–Luumäki-osuus onkin kaksiraiteinen, ja vastakkaisuuntaiset junat eivät linjalla normaalisti häiritse toisiaan, niin radan haarautuvat osuudet sekä Kullasvaarassa että Luumäellä aiheuttavat sen, että vastakkaiseen suuntaan kulkeva juna joutuu ylittämään vaihteen kautta toisen kulkusuunnan käyttämän raiteen. Nämä ylitykset ja risteykset otetaan huomioon kaikissa analyyseissä, koska molempien päiden molemmat haarat ovat vilkkaasti liikennöityjä.

### **4.5.3 Simuloinnin aikatauluolettama**

Operatiivisen liikenteenhoidon aikana tulee usein vastaan tilanteita, joissa yksiköiden on konfliktitilanteen ratkaisemiseksi mahdollista lähteä aikataulua aikaisemmin tai myöhemmin liikkeelle. Simulointitarkasteluissa tavarajunien on sallittu lähteä liikkeelle aikataulussa määriteltä aikaisemminkin, mutta henkilöjunien on luonnollisesti noudatettava asemilla niille annettuja lähtöaikoja. Etuajassa mahdollisesti liikkuvat yksiköt käsitellään analyysivaiheessa aikataulussa ajavina, eli junien laskennassa huomioitava viivearvo on etuajassa ajaessa nolla.

Alkuviiheissä ei kuitenkaan huomioida mahdollisuutta etuajassa ajamiseen: tämän arvioimiseen ei ole hyvää lähtöaineistoa, ja toisaalta on tarkoitus tutkia häiriötilanteista palautumista, joten vain myöhässä ajavat junat ovat kiinnostavia tarkasteluissa.

### **4.5.4 Simulointitarkastelun etenemisen prosessi**

Työssä toteutetaan yhteensä 9 kokonaista tarkasteluprosessia, 3 eri kulunvalvontaratkaisua kolmella eri rataosuudella. Kukin prosessi etenee periaatteessa samalla tavalla. Ensin kunkin skenaarion simulaatiomalliin syötetään junaliikenteen aikataulu. Tähän tehdään tarvittaessa pieniä paikallisia raideosuustason aikakorjauksia, sekä aikataulun mukaisten kulkureittien vaihdoksia (esimerkiksi kohtausraiteiden asettaminen), joilla saavutetaan mallissa aikataulun konfliktittomuus. Samalla ajoaikalaskennan kautta varmistetaan pystyvätkö junat ajamaan annetussa aikataulussa. Jos JKV-järjestelmän alaisuudessa ajoajassa ilmenee ongelmia, on mallin laatu ja todenmukaisuus tarkastettava. Muiden kulunvalvontojen tapauksessa on myös selvitettävä syy sille, ettei aikataulurakenne ole mahdollinen.

## Simulaatiokierrokset

Kaikissa saman rataosan tarkasteluissa käytetään yhtäläistä kokoelmaa toteutuneita viivejakaumia. Mallista riippuen viivejakaumia määritellään 50–120 kappaletta, eli kokonainen analysoitava simulaatiokierros käsittää 50–120 simulaatioajoa skenaariota kohden. Suurella otannalla ja ajomäärällä varmistetaan tulosten tilastollinen laatu, sillä yksittäinen häiriösimulaatioajo on periaatteessa aina erikoistapaus mahdollisesta liikenteestä. Ajamalla suuren joukon saman viivejakauman mukaan luotuja simulaatioita saadaan tulosten keskiarvoista yleinen kuva kyseisen tyyppisen häiriötilanteen vaikutuksista, ja näin tietyn junan tai junaryhmän tulokset voidaan nähdä odotusarvo- tai todennäköisyysmielessä hiukan tarkastelukulmasta riippuen.

## Karsintaprosessi

Kaikki simulaatioajot eivät sovellu otettavaksi mukaan lopulliseen analyysiin. Tähän syynä on se, että osa ajoista keskeytyy, koska simulaatio päättyy ns. umpikujaan tai se kestää selkeästi muita simulaatioajoja kauemmin. Tämä on merkki siitä, että häiriöidenratkaisuun tulee käyttää muita menetelmiä, kuin mihin simulaation konfigurointi kykenee. Samaten mikäli simuloinnin tuloksena esiintyy virhemarginaalin ylittäviä konflikteja, ajo on hylättävä epäkelpona. Kynnysarvon alittavia konflikteja voi syntyä päättyvään ajoon esimerkiksi pyöristysvirheenä, ja niitä ei ole välttämättöntä sivuuttaa. Jäljelle jäävistä simulaatioajoista karsitaan vielä sellaiset, joissa viiveiden kokonaiskertymä on poikkeuksellisen suuri verrattuna muuhun aineistoon. Tämäkin on merkki siitä, että simulointi on ajautunut tilanteeseen, jossa se ei kykene ratkaisemaan konflikteja tarkoituksenmukaisesti loppuun asti. Suuri viivekertymä voi johtua esimerkiksi siitä, että yksittäinen juna on jäänyt seisomaan hyvin pitkäksi aikaa simulaation aikana. Tällainen ratkaisu ei vastaa todellisuutta ja se on siksi syytä sivuuttaa, jotta kokonaistulokset eivät vääristyisi.

Kun kahden eri vertailuskenaarion välillä puhutaan samasta simulaatioajosta, tarkoitetaan, että kyseisissä ajoissa on ollut sama viiveiden toteutuma. Ne simulaatioajot, jotka läpäisevät karsintaprosessin kaikkien vertailuskenaaroiden osalta otetaan mukaan osaksi kokonaistulosten arviointia.

### 4.5.5 Tulosten laadunvarmistus

Simulaatiokierrosten laadunvarmistus alkaa jo simulaatioajojen aikana. Mikäli huomataan, että simulaatioajojen epäonnistumisten osuus on suuri, on syytä tarkastaa simulaation asetukset ja varmistaa, että simulaatiot toimivat tarkoituksenmukaisesti.

Kun simulaatiot itsessään pyörivät menestyksellisesti, voidaan vielä tuloksista arvioida, onko junien absoluuttinen käyttäytyminen odotusten mukaista. Tähän käytetään apuna niin sanottua matka-aikaosamäärää.

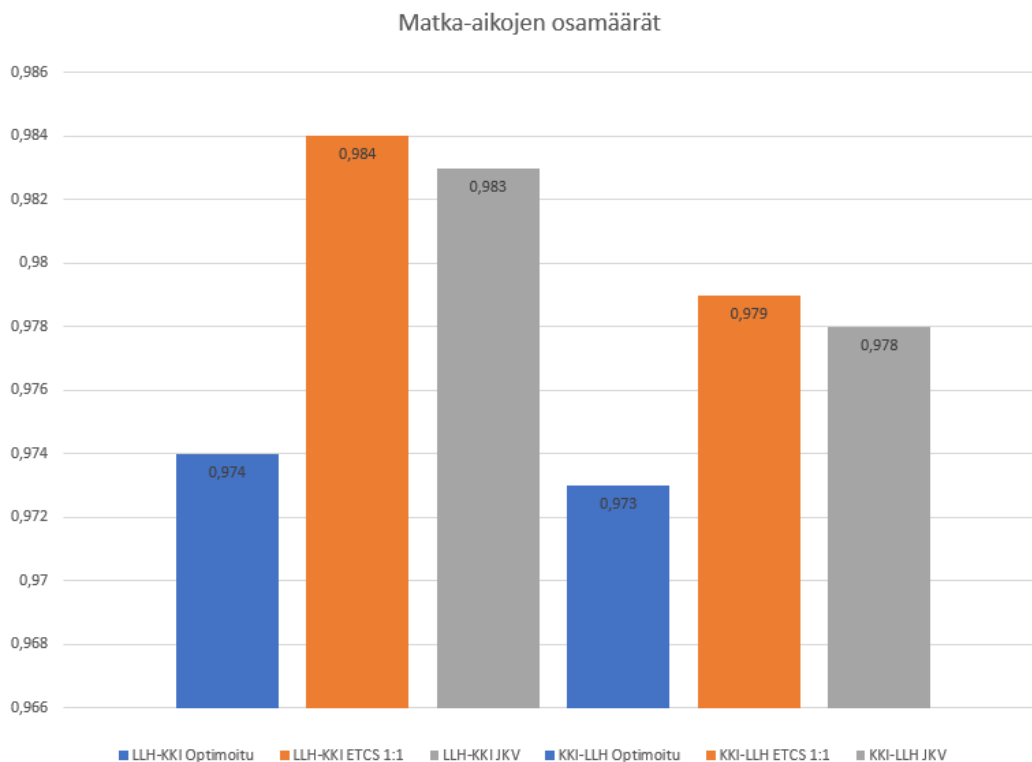
## Matka-aikaosamäärä

Yksi tapa validoida mallinnetun järjestelmän toimivuus on laskea eri järjestelmien matka-aikojen osamäärät. Osamäärät saadaan laskemalla ensin ennen simulaatiota aikataulun mukainen matka-aika, jonka jälkeen simulaatiosta lasketaan todellinen toteutunut matka-aika. Mikäli yksittäisen junan näin saatu matka-aikaosamäärä on:

- < 1: juna kulkee reittinsä nopeammin, kuin suunnitellussa aikataulussa
- = 1: juna kulkee reittinsä aikataulun mukaisessa ajassa
- > 1: juna kulkee suunniteltua aikataulua hitaammin.

On huomioitava, että matka-aikaosamäärä ei suoraan kuvaa sitä, ajaako juna aikataulunsa mukaan, vaan vain kuinka se suoriutuu matkasta verrattuna aikataulumukaiseen absoluuttiseen matka-aikaan minimipysähdysajat huomioiden. Lähtökohtaisesti arvon tulisi häiriötilanteiden simuloinneissa olla keskimäärin alle yksi. Tällöin liikenne kokonaisuudessaan kykenee hyödyntämään aikataulun pelivaroja.

Luvun tarkka tulkinta riippuu siten muusta liikennetilanteesta. Jos arvo on alle yksi, voidaan päätellä, että juna pystyy käyttämään sille määritellyjä pelivaroja hyväkseen. Matka-aikaosamäärä on siten lukuna abstrakti, ja sen tulkinta pitää suhteuttaa liikenteen luonteeseen. Tässä työssä junille määritellään selkeitä alkuviiveitä. Tällöin luku kuvaa yksittäisen junan tai keskiarvotettuna liikenteen kykyä hyödyntää pelivaroja viiveiden vähentämiseen tutkituilla rataosuuksilla. Kuvassa 15 on esitetty esimerkinomaisesti Lielähti–Kokemäki-välin matka-aikojen osamäärät ske-naarioittain.



*Kuva 15. Esimerkki matka-aikaosamääristä Lielähti–Kokemäki- ja Kokemäki–Lielähti-suunnilta.*

## 4.6 Simulointitulosten analyysin mittarit

Tässä luvussa esitetään simulointitulosten analyysissä käytettäviä tunnuslukuja. LUKS sisältää lukuisia työkaluja simuloinnin tulosten tarkasteluun. Tässä luvussa kuvataan mittarit, joita on käytetty työn tulosten vertailuissa luvussa 5.

Työn keskeinen tavoite on verrata kulunvalvontajärjestelmän toteutuksen vaikutuksia aikatauluun perustuvaan liikenteeseen. Aikataulua kuitenkin varioidaan häiriöihin, jolloin olennainen osa analyysiä on havainnoida häiriötilanteiden vaikutusten kehittymistä. Yleisesti mittareiksi on tässä tapauksessa valikoitava sellaisia, jotka kertovat aikataulurakenteen stabiiliudesta ja laadusta eri kuluvalvontaratkaisujen suhteen. Kulunvalvontaratkaisu vaikuttaa suoraan siihen, millaisia osuuksia liikkuvat yksiköt varaavat rataverkolta ja kuinka pitkäksi aikaa.

### **Ratakapasiteetti (UIC 406)**

Yhtenä vertailumittarina tässä työssä on käytetty kansainvälisen rautatieliiton (UIC) määrelehden UIC 406 mukaista ratakapasiteetin käyttöasteetta. Menetelmä perustuu vahvasti sovelluskohteen infrastruktuuriin ja suunniteltuun aikataulurakenteeseen. Koska tämän työn eri skenaarioissa vertaillaan samaa aikataulurakennetta, sopii tämä mittari mainiosti vertailuarvoksi kulunvalvonnan vaikutuksesta rataosan välityskykyyn. Ratakapasiteetin käyttöasteelle on kokemusperäisesti määriteltäviä raja-arvoja, joiden ylittyessä radan välityskyvyn jatkuva ylläpidettävyys varsin todennäköisesti heikkenee liikennehäiriöiden aiheuttamien poikkeamien vuoksi. Tämän työn tulosten kannalta olennaisinta on mahdollisesti havaittava muutos kapasiteetin käyttöasteessa, kun kulunvalvontajärjestelmää muutetaan.

Vuonna 2019 on laadittu Suomessa kansallinen ohjeistus määrelehden UIC 406 soveltamiselle [1]. Tämä ohjeistus rakentuu kuitenkin karkeamman aikataulun määrittelyn varaan, kuin mitä LUKS-ohjelmisto hyödyntää. LUKSin aikataulussa on suoraan saatavilla jokaisen suojaväliosuuden varausajat, mitä taas yo. kansallisessa ohjeessa pyritään liikennepaikan tarkkuudella määrittelyn aikataulun avulla approksimoimaan. Perusidea on kummassakin sama, mutta toteutuksen erojen vuoksi absoluuttiset arvot eivät ole täysin vertailukelpoisia näiden laskentatulosten välillä. Toisaalta UIC 406 -menetelmässä on muutenkin vakioimattomia parametrejä, jotka vaikuttavat tulokseen ja sen tulkintaan. Tämän työn tuloksissa parametrien asettamisessa on huomioitu Suomen kansallisen ohjeistuksen määritelmät niiltä osin kuin ne ovat selkeästi annettu. Suurin ero työssä käytetyn laskennan ja Suomen ohjeistuksen välillä liittyy yksiraiteisen radan tilanteeseen. Suomen ohjeessa lasketaan rataosuudella arvo kullekin liikennepaikkavälille. Tämä työn laskennassa arvo laskettiin hiukan liikennepaikkavälejä laajemmille alueille siten, että arviointialueet olivat osin päällekkäin. LUKSin aikataulun tarkkuudesta johtuen näin saatiin paremmin huomioitua myös tilanteet, joissa linjaosuutta rajaavien kohtauspaikkojen koko asettaa kapasiteetille rajoituksia, jotka eivät tulisi esiin kapeamalla arviointialueella.

### **Junien viivearvot**

Junaliikenteen häiriöisyyden perusmittari on niiden kulkeminen myöhässä aikataulustaan. Kulunvalvontaratkaisun vaikutusta liikenteen kykyyn toipua häiriötilanteista on analysoitu tarkastelemalla liikennepaikkakohtaisia lähtöviiveitä ja niiden keskimääräistä kehitystä kullakin rataosalla ajosuunnittain. Tämän perusteella voidaan tunnistaa myös paikkakohtaisia eroja viiveiden keskimääräisissä kertymisissä. Vertailuasetelman tulosten avulla voidaan arvioida jatkoanalyysinä kulunvalvontaratkaisujen eroja ja parannusten hyötyjä liikennepaikkaväleittäin.

Kaikista tarkastelualueista esitetään graafisesti junien matkan aikaisten viiveiden keskimääräistä kertymää. Viiveiden keskimääräisen kertymän muutos kuvaa eri



---

kulunvalvontajärjestelmien vaikutuksia viiveiden muodostumiseen. Absoluuttiset erot samalla liikennepaikalla eivät ole yksinään tärkeitä vertailussa, koska viivekeritymät simuloitun osuuden ensimmäisellä liikennepaikalla saattavat vaihdella, sillä niihin voi vaikuttaa muiden junien jo toteutunut kulku simulaation aikana. Tämä efekti korostuu etenkin yksiraiteisilla osuuksilla.

Lisäksi kuvataan simulointien perusteella aikataulutettujen junien todennäköisyys olla myöhässä lähtiessään tai ohittaessaan liikennepaikan, tai saapumisaseman tapauksessa niiden saapuessa määräasemalleen.

Kuvaajissa on otettu huomioon tarkastelualueen laajuuden kannalta olennainen ja keskenään vertailukelpoinen liikenne. Yleensä tämä tarkoittaa koko tarkasteluvälin läpi kulkevaa liikennettä, jolloin keskimääräisten viiveiden määrittämisessä käytetyt junat ovat kaikilla tarkasteluvälin liikennepaikoilla samat.

## 5 Simulointitarkastelu ja tulokset

Tässä luvussa esitetään simulointien tulokset tarkastelualueittain ja vertaillaan kolmen eri kulunvalvontaskenaarion suorituskykyä luvussa 4.6 esiteltyjen mittarien kautta.

Rataosat käsitellään omina kokonaisuuksinaan, koska niiden arvoja ei vertailla keskenään. Eri järjestelmien suorituskyky arvioidaan näin kullekin luvun 4.1 ratatyypille erikseen. On kuitenkin huomioitava aikataulurakenteen merkitys tuloksille. Siten yksittäiset tulokset koskevat nimenomaista tarkastelualueita, ja ratatyyppien kannalta tulokset on syytä nähdä suuntaa antavina järjestelmien vaikuttavuudesta eri ratatyypeille.

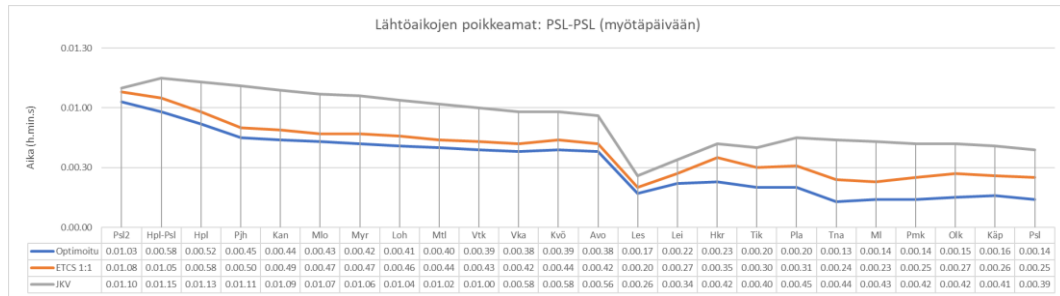
### 5.1 Pasila–Pasila ETCS ja JKV vertailu

Pasila–Lentoasema–Pasila-simulaatioissa oli mukana kaikki kaupunkiratoja käytävä liikenne. Tämän vuoksi aikataulun mukainen liikenne on kaksinkertainen Pasila–Huopalahti ja Pasila–Hiekkaharju-osuuksilla verrattuna Kehäradan osuuteen. Kaikissa simulaatioissa oli siten mukana nykyisin I-, P-, A-, ja K-linjatunnuksia käytävät Helsingin seudun kaupunkiliikenteen junat. Tarkastelun keskiössä on kuitenkin Kehäradan kokonaisuus, eli Kehärataa vastapäivään ajavat I-junat ja myötäpäivään liikennöivät P-junat. Suurin osa alempana esitetyistä tuloksista on laskettu vain näiden junien pohjalta, jotta eri tarkasteluvälit olisivat keskenään vertailukelpoisia. K-, ja A-junia ei simuloitu niiden koko reitin pituudelta, joten niiden kohdalla tulokset ovat muutenkin rajoittuneempia.

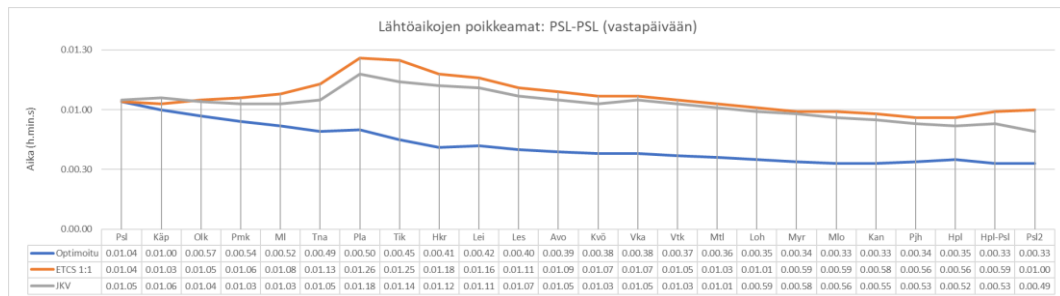
Kuva 16 ja Kuva 17 esittävät simuloinnissa Kehärataa käyttävien junien (I- ja P-linjojen) asemakohtaisia lähtöviiveiden keskiarvoja kaikilla vertailusysteemeillä. Olennainen huomio näissä tuloksissa on kiinnitettävä erityisesti viiveen kehityksen eroihin. Viivetuloksista nähdään, että kumpaankin suuntaa Optimoitu ETCS -toteutus kykenee palautumaan viiveistä kaiken kaikkiaan tehokkaimmin. Vastapäivään ajettaessa Optimoitu ETCS pystyy käytännössä ajamaan aikataulua kiinni lähes jatkuvasti siinä missä JKV ja ETCS 1:1 -toteutuksilla viiveet lähtevät tiheämmän liikenteen osuuksilla kasvamaan, ja siten ne suoriutuvat optimoitua järjestelmää huonommin. Myötäpäivään ajettaessa kehitys on pitkin matkaa saman suuntaista, mutta Optimoitu ETCS on taaskin tehokkain. Tässä suunnassa myös JKV:n ja ETCS 1:1 -toteutuksien välille syntyy selkeämpi ero. Lentoaseman pysähdyksen pidempi tasausaika tasoittaa viiveiden eroa, mutta tämän jälkeen ero viiveiden kertymisen suhteen kasvaa jälleen kuten reitin alkuosalla. ETCS-järjestelmä tuo tulosten perusteella etua liikennehäiriöiden ja -poikkeamien vaikutusten pienentämisessä.

Vastapäivään ajavan liikennesuunnan tuloksissa huomataan erityisesti raideosuuksien sijoittelun optimoinnin merkitys. ETCS-jarrukäyrät ovat konservatiivisempia ja niillä on Suomen kansallisissa arvoissa nykyisellään valittu alempi valvontanopeus JKV-järjestelmään verrattuna. Tässä suunnassa ETCS 1:1 -toteutus suoriutuu JKV:tä hieman heikommin eritoten siksi, että ajoluvan päätekohtan ja junan pysähtymispaikan välisen etäisyyden ollessa pieni ETCS-järjestelmän jarrukäyrä rajoittaa junan nopeutta asemaa lähestyttäessä JKV:tä enemmän. Rajoite oli paikoin niin suuri, ettei juna kyennyt ETCS 1:1 -järjestelmällä suorittamaan koko reittiään edes ihannetilanteessa vastaavassa ajoajassa kuin JKV-järjestelmän valvomana.

Optimoidulla sijoittelusta tästä ongelmasta päästiin vaivatta eroon, ja saatiin rata-  
verkoston häiriöistä palautuminen tehokkaammaksi.

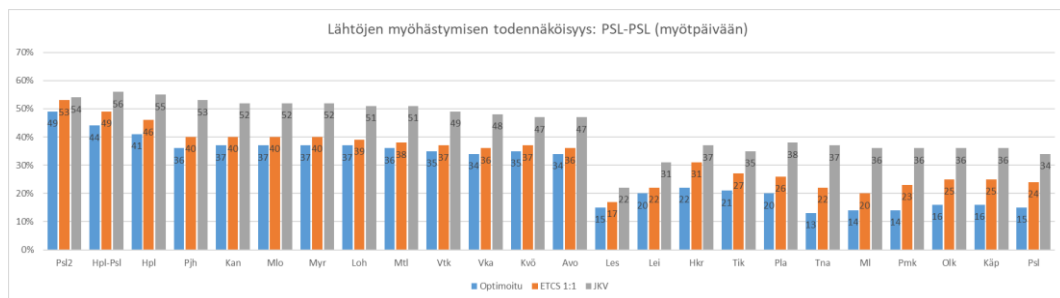


Kuva 16. Pasila–Pasila (myötäpäivään). Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

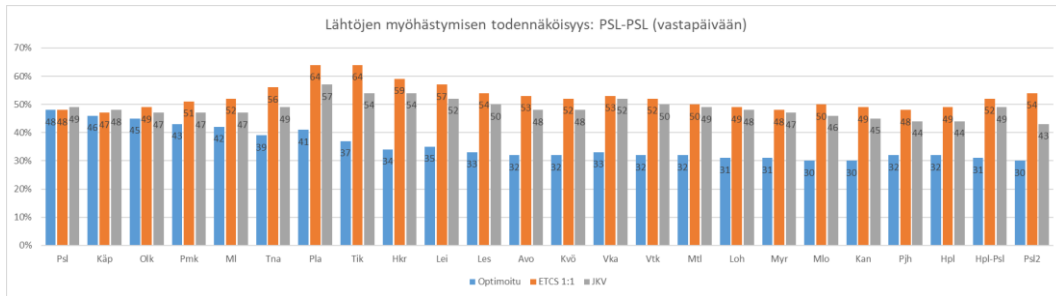


Kuva 17. Pasila–Pasila (vastapäivään). Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

Kuva 18 ja Kuva 19 esittävät simulaatioissa niiden junien keskimääräistä osuutta, jotka lähtevät myöhässä kultakin väliasemalta. Tämän voi simulaatiokierrosten suuren määrän vuoksi tulkita junan myöhässä olon todennäköisyytenä. Nämä tulokset noudattavat samaa linjaa kuin viivekertymät. Tämä on luonnollista, koska Optimoitu ETCS kykenee auttamaan vain vähän myöhässä olevat junat toisia vertailtuja järjestelmiä useammin takaisin aikatauluunsa.



Kuva 18. Pasila–Lentoasema–Pasila (myötäpäivään) asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.



Kuva 19. Pasila–Lentoasema–Pasila (vastapäivään) asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

### 5.1.1 Kapasiteetin käyttöasteen vertailu

Taulukossa 7 esitetään Kehäradalle lasketut kapasiteetin käyttöasteet skenaarioitain. Laskennassa on tarkasteltu suunnittain aikataulun mukaan klo 8–12 lähtevät junat niiden koko reitin osuudelta. Kehäradan toiminta on päivän aloitusta ja lopetusta lukuun ottamatta täysin homogeenistä, vakioaikataulun mukaista liikennettä, joten yksi arvo riittää kuvaamaan kapasiteetin käyttöastetta. Pidemmän aikavälin käyttö analyysissä vähentää mahdollista pyöristysvirhettä, joka aiheutuu Luksin laskentamoduulin tarkkuustasosta.

Tuloksen mukaan ETCS 1:1 ja JKV -toteutukset tuottavat lähes saman kapasiteetin käyttöasteen, mutta Optimoitu ETCS kykenee selkeästi varaamaan vähemmän kapasiteettia. UIC:n ohjearvojen mukaan optimoidulla ETCS kulunvalvontatoteutuksella liikennettä voi jopa lisätä ilman suurempia haittoja häiriöherkkyyteen.

Taulukko 7. Kapasiteetin käyttöasteet Pasila–Lentoasema–Pasila.

Juna	JKV	ETCS 1:1	ETCS Opt
P-junan suunta	79 %	84 %	68 %
I-junan suunta	87 %	87 %	67 %

## 5.2 Lielähti–Pori/Rauma ETCS ja JKV vertailu

Lielähti–Pori/Rauma-osuuden simulointi oli tässä työssä tutkituista osuuksista vaihtelevin ja monipuolin kokonaisuus. Malli sisältää kaksi haaraa, jolloin mallin päästä päähän kulkevilla junilla on kaksi reittiä. Näiden junien yhteinen kulkuosuus on välillä Lielähti–Kokemäki. Mallin alueella on myös kaksi lyhyempää reittiä, joilla on merkittävä päivittäinen liikenne: paikallisjunaparit välillä Lielähti–Nokia ja tavarajunaparit välillä Harjavalta–Pori.

Erialaisten kuormitusten vuoksi rataosan tulosten tarkastelu on jaettu kolmeen osaan: Lielähti–Kokemäki, Kokemäki–Pori ja Kokemäki–Rauma. Simulointi on kuitenkin suoritettu koko rataosalle yhdellä kertaa kaikki päivän liikenne huomioiden. Lisäksi Lielahden ja Nokian sekä Lielahden ja Porin väliset matkustajajunavuorot on mallissa määritelty ajettavan samalla rungolla ja varaavan sitä myöten raiteen myös vuorojen välillä pääteasemalla seisoessaan, mikäli junarunko kääntyy takaisin saman päivän aikana.

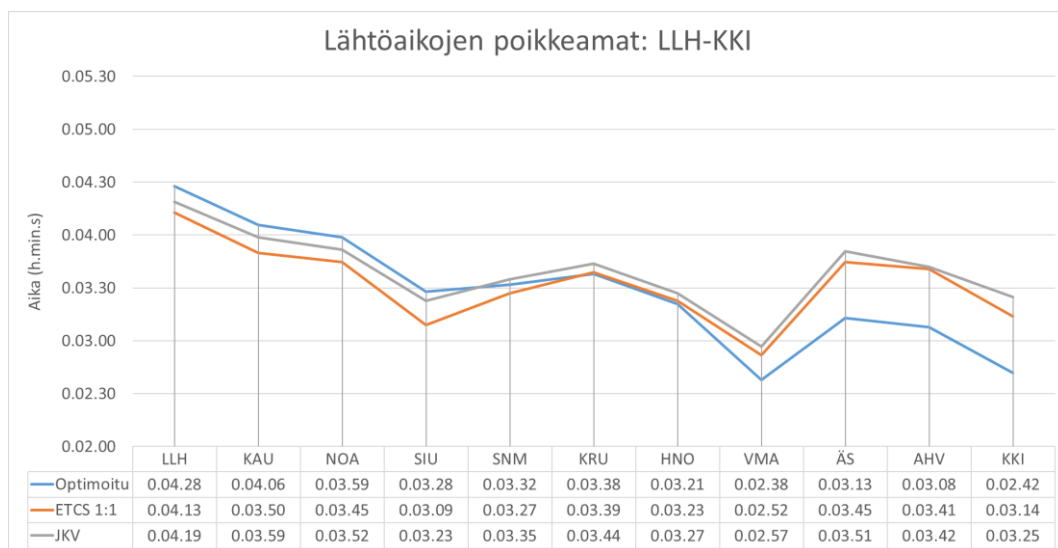
### 5.2.1 Lielähti–Kokemäki

Tämän osuuden tuloksissa pääpaino on pitkän matkan liikenteen suoriutumisessa. Kaikissa tämän alaluvun kuvaajien myöhässä oloa ja lähtöviivettä esittävässä tuloksissa ovat mukana vain koko Lielähti–Kokemäki-välin ajavat junat. Nokian paikallisjunat on siis jätetty arvioinnin ulkopuolelle, vaikka ne ovatkin mukana simulatioajoissa.

Lielähti–Kokemäki-välillä lähes kaikilla mittareilla mitattuna ETCS-tason 2 optimoinnilla saavutetaan suurin hyöty kapasiteetissa. JKV:n ja ETCS 1:1 -toteutusten välillä erot eivät ole merkittäviä ja joissain tilanteissa JKV toimii paremmin, kuin ETCS-taso 2.

Kuvissa 20 ja 21 nähdään junien asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat molempiin kulkusuuntiin. On huomattava, että toteutustapojen välillä on jo lähtöasemalla eroja viiveissä, vaikka käytetyt viivejakaumat ovatkin kaikissa tapauksissa samoja. Lielahden suunnasta lähdettäessä ero johtuu mahdollisesta vastaantulevan liikenteen odotuksesta ennen kuin juna pääsee mallin alueelle mukaan, jolloin sen viive Lielahdessa on jo kasvanut alkuperäisestä. Kokemäen suunnasta syynä on se, että junat ovat jo taittaneet matkaa simulointimallin alueella.

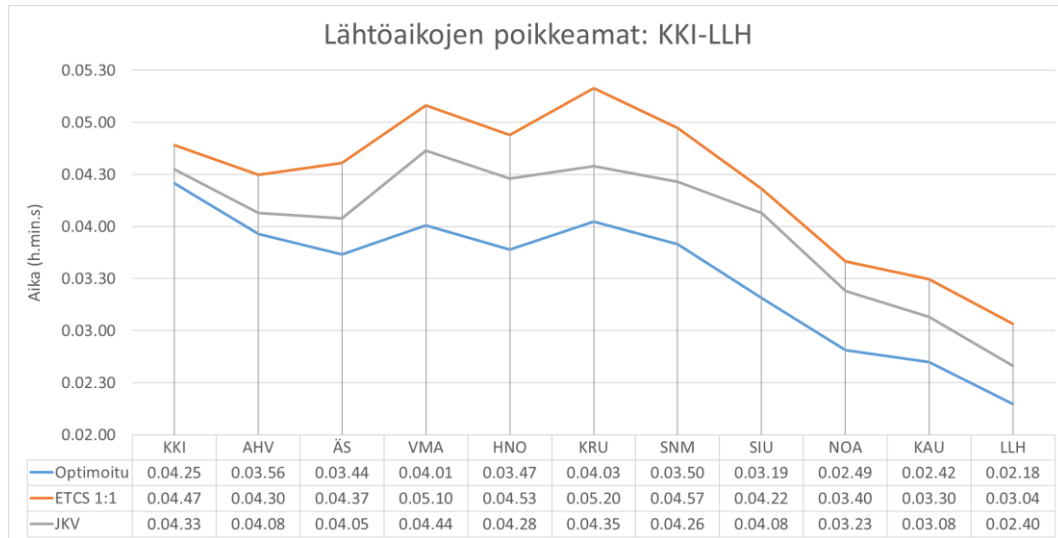
Liikuttaessa Lielahdesta Kokemäen suuntaan vaihtelee ETCS:n eri toteutustapojen välinen paremmuus. Lielahdesta Siuroon asti Optimoitu ETCS -toteutus ei saa kurottua viiveitä sen tehokkaammin kuin JKV tai ETCS 1:1 -toteutukset. Vammala–Kokemäki-välillä Optimoitu ETCS -toteutuksen alaisena aikataulupoikkeamien kehitys on paljon edullisempaa verrattuna JKV- ja ETCS 1:1 -toteutuksiin. Vammala–Äetsä on tulosten perusteella selkeä pullonkaulaväli tutkitulla aikataululla, mutta Optimoitu ETCS -toteutus pidentää tällöin viiveitä selvästi vähemmän kuin muut kulunvalvontaratkaisut.



*Kuva 20. Lielähti–Kokemäki. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.*

Kokemäki–Lielähti-suunnassa kuljettaessa Optimoitu ETCS -toteutus auttaa palautumaan viiveistä kokonaisuutena tehokkaammin, kuin JKV tai ETCS 1:1, kuten kuvasta 21 voidaan havaita. Kuvasta voidaan myös nähdä, että koko matkan JKV toimii selvästi paremmin kuin ETCS 1:1. Vastakkaiseen suuntaan kuljettaessa JKV

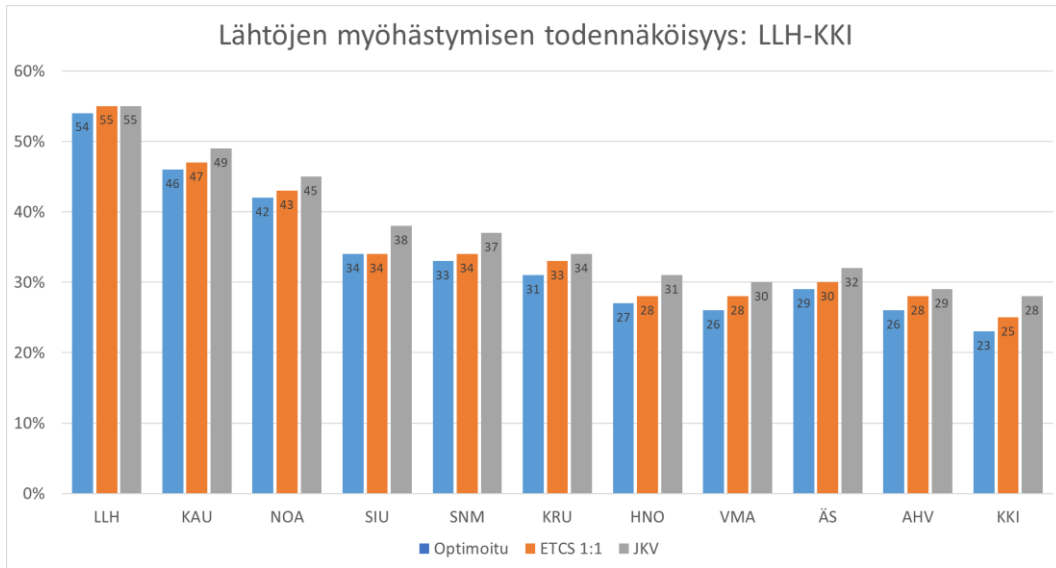
ja ETCS 1:1 toimivat käytännössä lähes yhtä hyvin pitkin matkaa. Tähän suuntaan kuljettaessa vaihtelut poikkeamien muutoksissa ovat asemien välillä suurempia, mutta lopussa erot tasoittuvat, ja JKV on vain aavistuksen tehokkaampi kuin ETCS 1:1. Karkku–Nokia-välillä voi päätellä olevan usein runsaasti käytettävissä olevaa pelivaraa aikataulun kiinni kuromiseen, koska eniten myöhässä olevassa tilanteissa poikkeamat myös vähenevät keskimääräisesti eniten.



*Kuva 21. Kokemäki–Lielähti. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.*

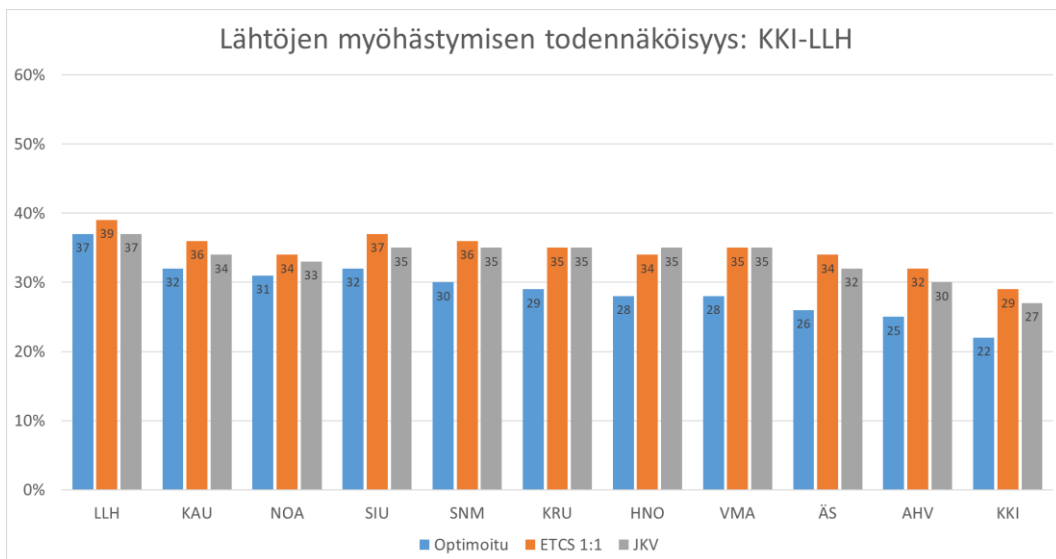
Kuten jo kahdesta edellisestä kuvasta voitiin nähdä ei ETCS 1:1 -toteutus suoraan takaa parempaa kapasiteetti yksiraiteisille rataosille, joissa liikkuu sekä tavara- että matkustajajunia.

Kuvassa 22 on esitetty asemakohtaisesti lähtevien junien myöhästymisen todennäköisyys eri toteutuksilla Lielähti–Kokemäki-suuntaan kuljettaessa. Myös tällä tavoin tarkasteltuna Optimoitu ETCS -toteutus on kokonaisuutena toimivin, sillä myöhästymistodennäköisyys pienenee eniten suhteessa muihin. ETCS 1:1 -toteutus on myös tuloksen perusteella paremmin toimiva, kuin JKV. Erot järjestelmien välillä eivät kuitenkaan ole merkittäviä.



Kuva 22. Lielähti–Kokemäki. Asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

Kuva 23 kuvaa myös asemakohtaisesti lähtevien junien myöhästymisen todennäköisyyttä, mutta Kokemäki–Lielähti-suuntaan kuljettaessa. Myös tässä kulkusuunnassa Optimoitu ETCS -toteutus on toimivin ratkaisu. Kuten keskimääräisissä aikataulupoikkeamissa myös tässä tarkastelussa Kokemäki–Lielähti-suunnassa saavutetaan optimoinnilla selkeämpi ero muihin järjestelmiin. JKV ja ETCS 1:1 -toteutukset toimivat hyvin samankaltaisesti myöhästymistodennäköisyyksien kehityksessä.



Kuva 23. Kokemäki–Lielähti. Asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

Yleisesti Lielähti–Kokemäki-välin tarkasteluista voidaan todeta, että Optimoitu ETCS toimii parhaiten läpi rataosan molempiin kulkusuuntiin. Pelkkä ETCS 1:1 -toteutus ei välttämättä tuo kapasiteettiin parannusta yksiraiteisilla rataosilla vaan vaatii aina liikenne rakenteen mukaista optimointia parhaan mahdollisen hyödyn saavuttamiseksi.

## 5.2.2 Kapasiteetin käyttöasteen vertailu

Taulukossa 8 esitetään laskennallinen kapasiteetin käyttöaste eri aikajaksoilla mo-lemmat kulkusuunnat huomioiden. JKV ja ETCS 1:1 -toteutukset tuottavat käytän-nessä saman tuloksen. Optimoitu ETCS -toteutus tuottaa pienemmän käyttöas-teen, mikä näkyy erityisesti iltapäivän liikenteessä. Suurin syy erolle on se, että optimoiduilla suojaväleillä saavutetaan eniten etua käyttöasteessa silloin, kun junia ajetaan aikataulussa enemmän peräkkäin. Tämän vuoksi aikataulurakennetta kan-nattaa myös yksiraiteisilla osuuksilla suunnitella uudelleen, jotta tiheimmän suo-jastuksen hyödyt saadaan paremmin esille kokonaiskapasiteetin käytössä.

*Taulukko 8. Kapasiteetin käyttöasteet aikajaksoittain Lielähti–Kokemäki- osuudella.*

Ajankohta	JKV	ETCS 1:1	ETCS Opt
0–6	35 %	35 %	32 %
6–12	42 %	41 %	40 %
12–18	54 %	53 %	47 %
18–24	55 %	56 %	53 %

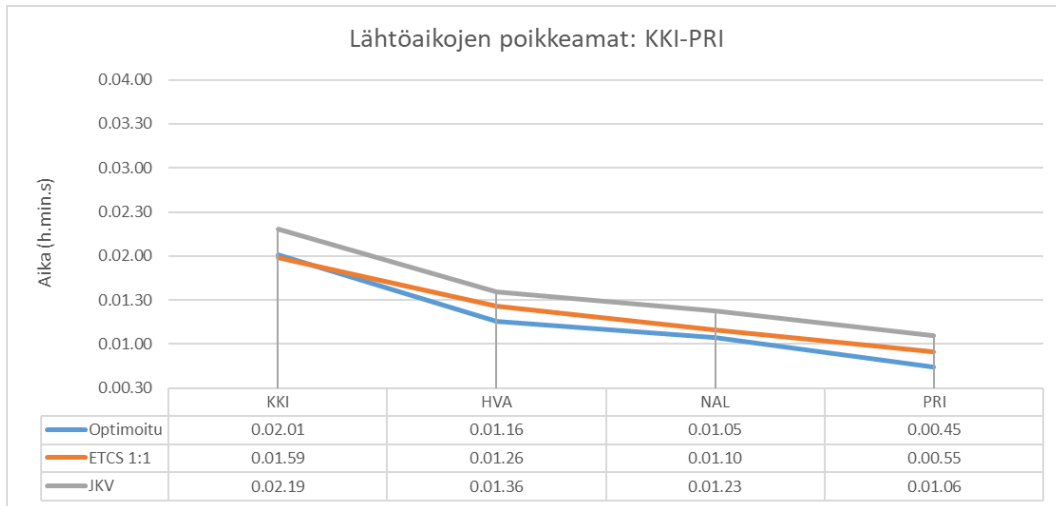
## 5.2.3 Kokemäki–Pori

Tällä tarkasteluvälillä on edellisen tapaan kuvattu myöhästymisten suhteen kehi-tystä koko rataosan läpi ajavalla liikenteellä. Harjavalta–Pori-väliset vuorot vaikut-tavat siis liikenteeseen ja toisten junien tuloksiin, mutta ne eivät sisälly viiveiden ja myöhästymistodennäköisyyden keskimääriin kuvauksiin.

Kokemäki–Pori-välillä Optimoitu ETCS -toteutuksella saavutetaan pääsääntöisesti järjestelmän parempi toimivuus. Tarkastelun suunnalla on tällä tarkasteluvälillä ai-lahtelua varsinkin verrattaessa JKV:tä ja ETCS 1:1 -toteutusta keskenään.

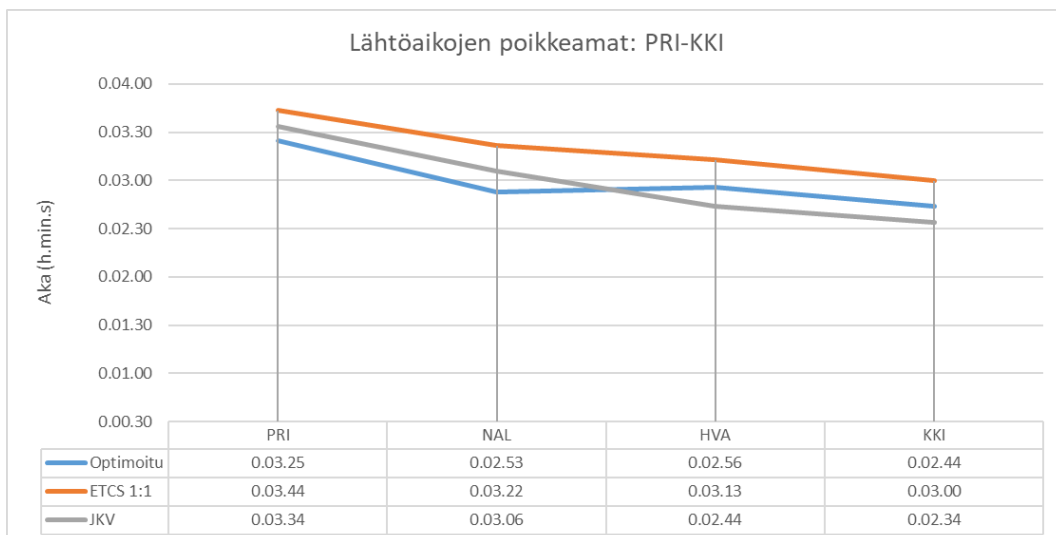
Tarkasteltaessa aluetta Kokemäki–Pori-suunnassa (kuva 24), Optimoitu ETCS toi-mii hienoisesti JKV:tä paremmin, mutta ETCS 1:1 -toteutuksen suorituskyky on hieman heikompi muihin verrattuna. Lähtötilanteessa JKV:llä päästään verrattaviin toteutuksiin nähden myöhemmin liikkeelle. Tämä on odotettavissa, koska Kokemä-elle saavuttaessa JKV:n alaisilla junilla on ollut suurimmat loppuviiveet vertailuista järjestelmistä.





Kuva 24. Kokemäki–Pori. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

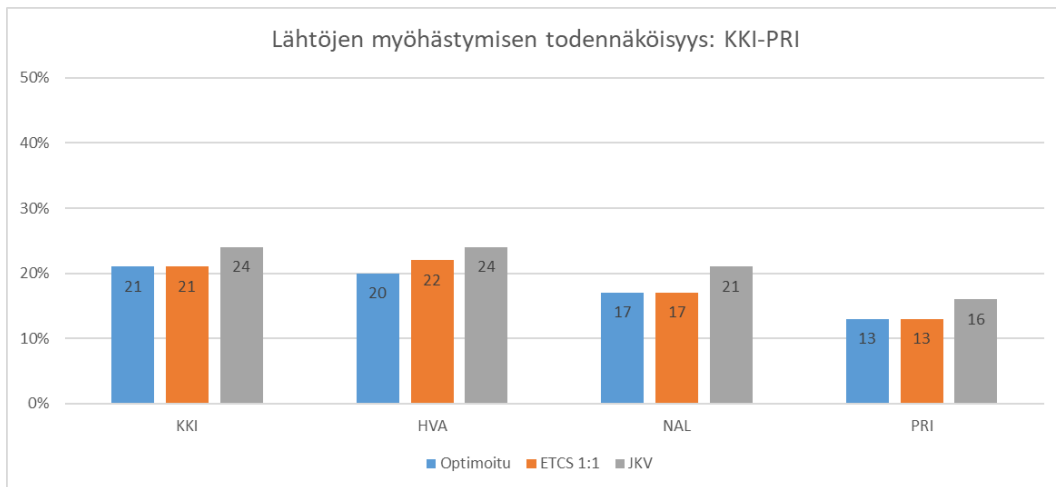
Pori–Kokemäki-suunnassa JKV-toteutus selviytyy häiriöiden palautumisesta kaikkein parhaiten (kuva 25). Optimoitu ETCS suoriutuu ensimmäisellä liikennepaikkavälillä tehokkaimmin, mutta hieman yllättäenkin Harjavallan kohdalla sen keskimääräinen myöhästymisen kasvaa, vaikka muilla järjestelmillä se vähenee. Tarkempi katsaus Optimoidun ETCS -toteutuksen simulaatioihin paljastaa, että junien keskiviive Harjavallassa kasvaa pysähtymisten seurauksena. Tämä on merkki siitä, että Harjavallassa häiriötilanteet aiheuttavat enemmän ei-aikataulutettuja juna-kohtaamisia ja että kohtausaikoja joudutaan häiriöiden vuoksi siellä pidentämään tässä järjestelmässä muihin verrattuna. Tämä havainto on hyvä esimerkki siitä, että yksiraiteisilla osuuksilla suojavälien ja liikenteenohjauksellisilla ratkaisuilla on monimutkaisempi keskinäinen yhteys kuin useampiraiteisten linjaosuuksien tapauksessa.



Kuva 25. Pori–Kokemäki. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

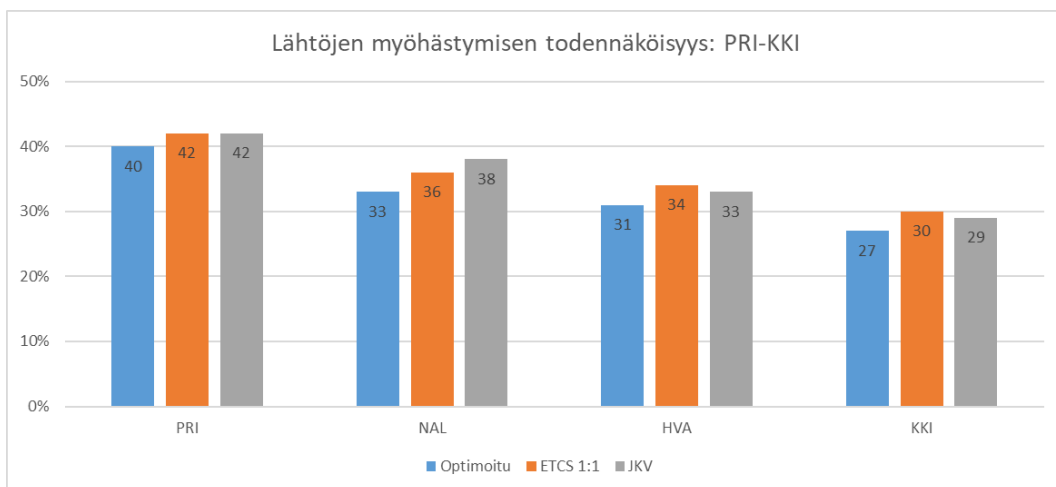
Lähtöjen myöhästymisien todennäköisyyksiä tarkasteltaessa (kuva 26), Optimoitu ETCS -toteutus on kauttaaltaan muutaman prosenttiyksikön todennäköisyydellä paremmin aikataulussa JKV:hen verrattuna, kun tarkastelusuunta on Kokemäeltä

Poriin. ETCS 1:1 -toteutusta verrattaessa optimoituun versioon, kokonaiskuvassa nämä toteutukset pärjäävät yhtäläisesti.



Kuva 26. Kokemäki–Pori asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

Vastakkaisessa Pori–Kokemäki-suunnassa myöhästymisien todennäköisyys on toteutukseen katsomatta 10–20 prosenttiyksikköä suurempi. Tällä mittarilla ja tarkastelusuunnalla toteutuksien välillä ei ole merkittäviä eroja, mutta jokainen toteutus on yhä paremmin aikataulussa asemalta toiselle edettäessä.



Kuva 27. Pori–Kokemäki asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

## 5.2.4 Kapasiteetin käyttöasteen vertailu

Käyttöasteen vertailussa tulos on samansuuntainen kuin Lielähti–Kokemäki-välillä. JKV ja ETCS 1:1 -toteutuksilla kapasiteetin käyttöaste on käytännössä yhtäläinen. Optimoitu ETCS antaa pienemmän käyttöasteen aikoina, jolloin junia ajetaan enemmän peräkkäin samaan suuntaan.

Koko Lielähti–Pori-välin kapasiteetin käyttöastetta arvioitaessa riippuu ajanjaksoista, onko kapasiteettia enemmän käytössä Kokemäen itä- vai länsipuolella. Koko välin kokonaiskäyttöaste määritellään maksimina osavälien käyttöasteista. Iltapäivällä Kokemäki–Pori-liikenteellä on korkeampi käyttöaste, muina aikoina Lielahden ja Kokemäen välillä kapasiteettia on enemmän käytössä.

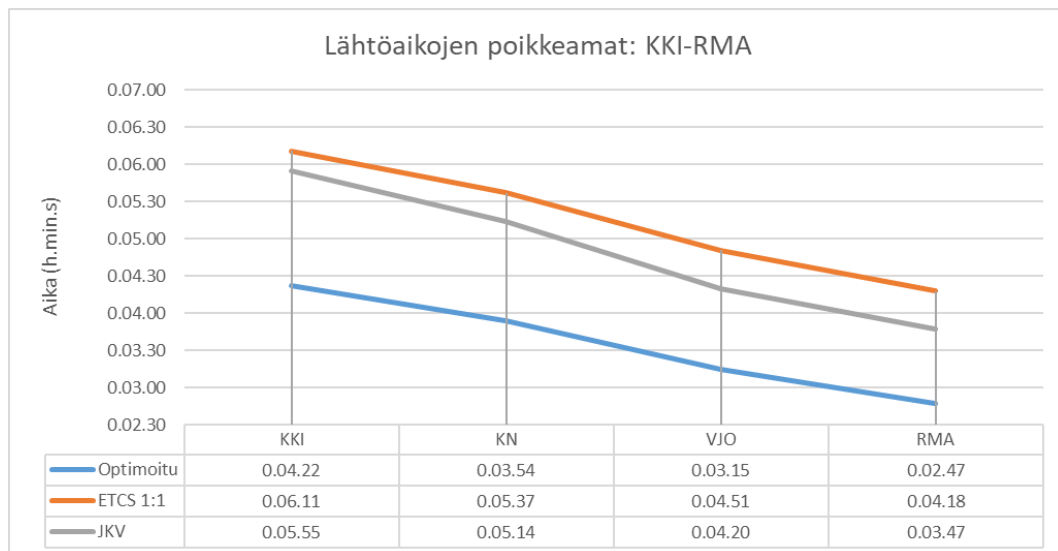
Taulukko 9. Kapasiteetin käyttöasteet aikajaksoittain Kokemäki–Pori-rataosuudella.

Ajankohta	JKV	ETCS 1:1	ETCS Opt
0–6	24 %	23 %	22 %
6–12	47 %	46 %	39 %
12–18	67 %	66 %	61 %
18–24	42 %	42 %	48 %

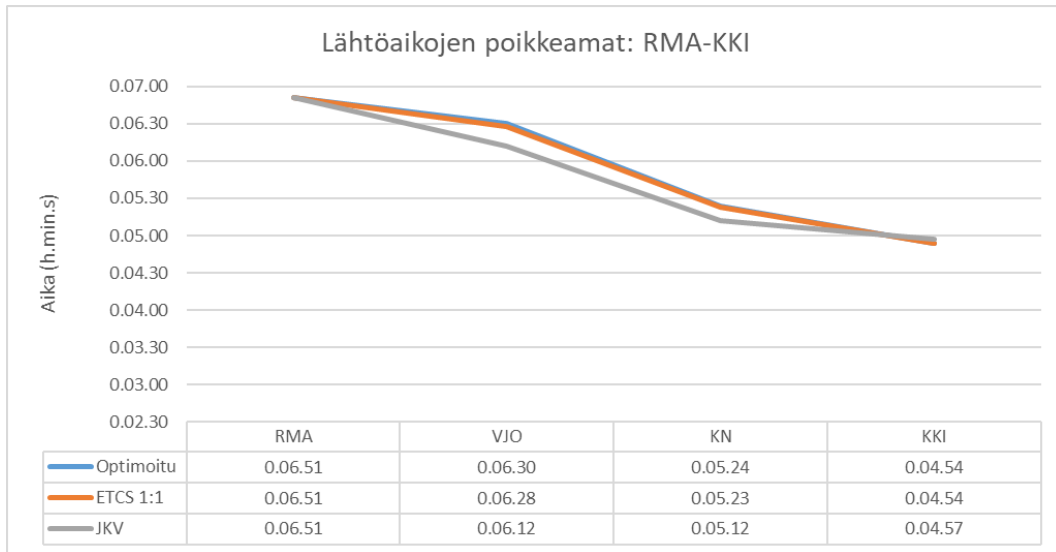
### 5.2.5 Kokemäki–Rauma

Kokemäki–Rauma-välillä JKV ja Optimoitu ETCS -toteutuksien absoluuttisilla myöhästymisarvoilla on huomattavat erot riippuen liikesuunnasta. Liikuttaessa Kokemäeltä Raumalle, kokonaisluvussa Optimoidulla ETCS -toteutuksella päästään yli minuutin aikaisemmin liikkeelle verrattuna kilpaileviin toteutuksiin (kuva 28). Kuitenkin JKV- ja ETCS 1:1 -toteutukset kykenevät vähentämään myöhästymismäärää tehokkaammin. Alkuperäisen eron ollessa näinkin suuri on vaikea arvioida tällä yhteysvälillä saavutettujen erojen merkitystä. Kokemäki–Rauma-välillä junia on kullussa simulaatiossa vain muutama. Eri järjestelmien alla tyypillisemmin myöhästävät junat voivat olla eri yksiköt, johon tässä vaikuttaa se, että ne ovat ajaneet Kokemäelle jo Lielahdesta asti. Yhdessä pelivarojen erilaisuuden kanssa tämä voi olla myös suuri syy havaittujen erojen taustalla.

Vastakkaiseen suuntaan liikuttaessa kaikki järjestelmät suoriutuvat käytännössä yhtä hyvin (kuva 29). Tämä on myös odotettava seuraus tässä tilanteessa, jossa junaliikenne on niin harvaa, että junakohtauksia ei käytetyssä aikataulussa ole lainkaan tällä alueella. Niinpä junilla on lähes aina mahdollisuus käyttää koko pelivarsa myöhästyessään lähtöajastaan riippumatta tarkasteltavasta toteutuksesta.

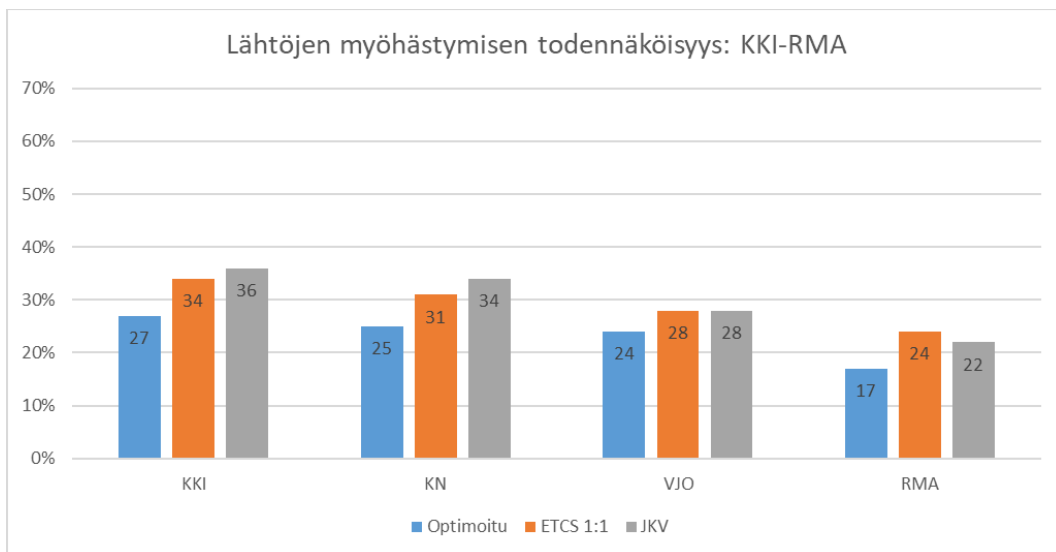


Kuva 28. Kokemäki–Rauma. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.



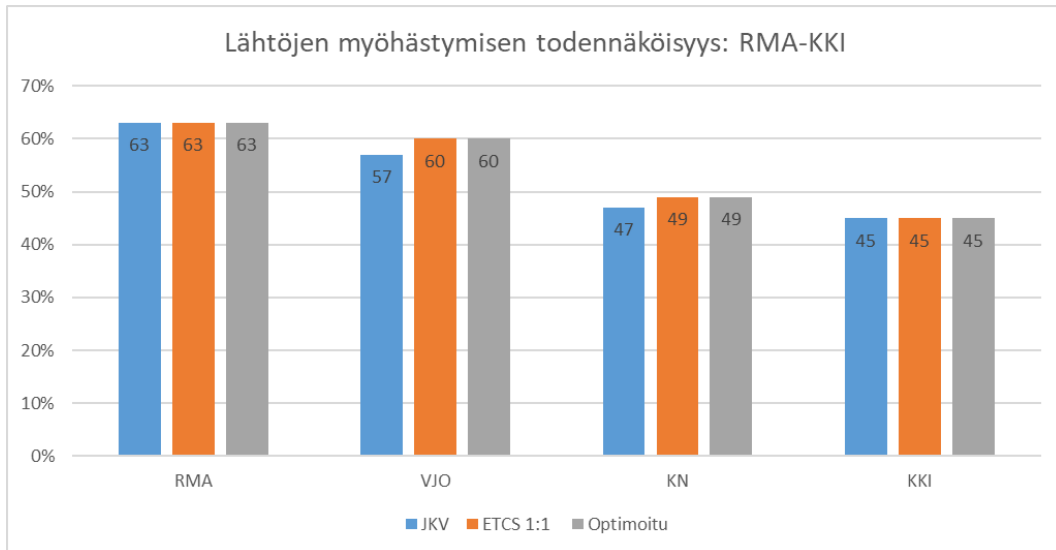
Kuva 29. Rauma–Kokemäki. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

Lähtöjen myöhästymisen todennäköisyyden muutokset Optimoitu ETCS -toteutuksella noudattelevat varsin samanlaista kaavaa kuin myöhästymiskertymäkin (kuva 30).



Kuva 30. Kokemäki–Rauma. Asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

Raumalta Kokemäen suuntaan lähtöjen myöhästymisten todennäköisyyksiä tarkasteltaessa eri toteutukset ovat keskenään erittäin tasavertaisia (kuva 31), mikä vastaa aiemmin todettua tilannetta, että kulunvalvontaratkaisu ei juuri vaikuta harvakuiseen liikenteeseen, jossa on vähän vuorovaikutusta junien välillä. Kuten Kokemäki–Pori-välillä, myös Kokemäki–Rauma-välillä liikuttaessa Kokemäen suuntaan myöhästymisten todennäköisyys on merkittävästi suurempi verrattuna vastakkaiseen suuntaan, mikä johtuu siitä, että Rauman suuntaan junat ovat jo ajaneet mallissa pitkään ja saaneet otettua myöhästymisiään kiinni Kokemäelle saapuessaan.



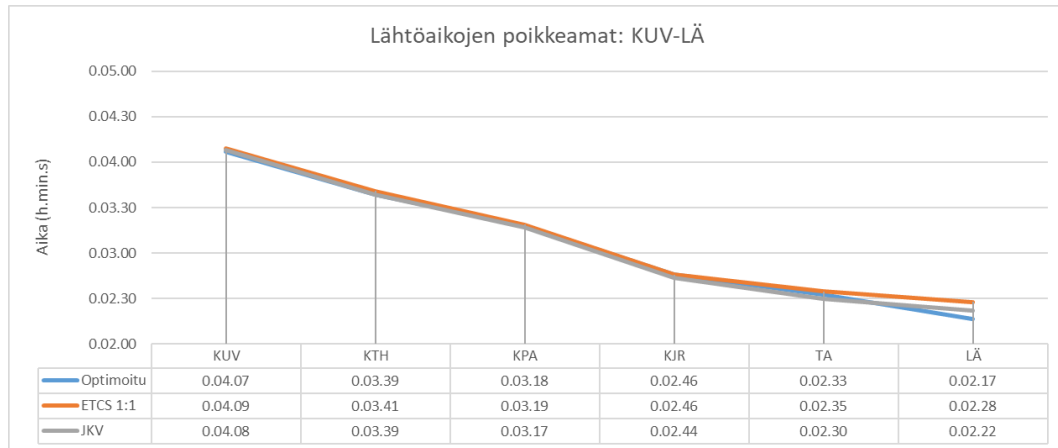
Kuva 31. Rauma–Kokemäki. Asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

Rauma–Kokemäki-väliltä ei esitetä kapasiteettilukuja vähäisen liikenteen vuoksi. Tämän rataosan kapasiteetin käyttö on merkittävästi alhaisempaa kuin Lielähti–Kokemäki välillä. Nykyisessä liikennerakenteessa Lielähti–Kokemäki-välin kapasiteetin käyttöaste määrittää myös nykyiselle Rauman suunnan liikenteelle tarjolla olevaa kapasiteetin käyttöä, koska kaikki Rauman junat tulevat Lielahdesta asti.

### 5.3 Kouvola–Luumäki ETCS ja JKV vertailu

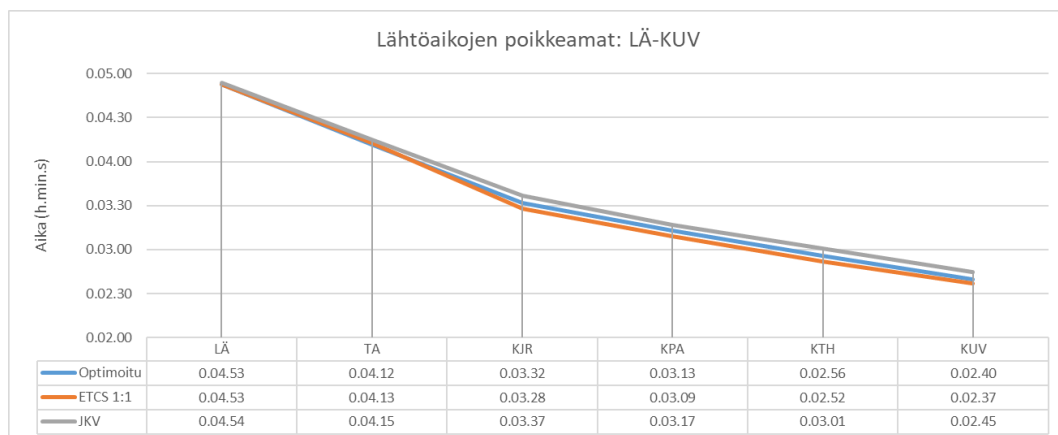
Kouvola–Luumäki-välillä verrattavat kulunvalvontajärjestelmätoteutukset suoriutuivat lähes identtisesti. Tämän on mitä todennäköisimmin seurasta aikataulurakenteen väljyydestä, kaksiraiteisuudesta ja nykyiselle liikennemallille riittävästä suojastuksesta.

Kouvola–Luumäki-suunnassa tarkasteltaessa järjestelmätoteutuksien välillä (kuva 32) ei ole juurikaan eroja. Junat pystyvät kaikissa kulunvalvontajärjestelmissä yhtä tehokkaasti hyödyntämään aikataulun pelivaroja myöhästymisten kiinni kuromiseen, joskin Luumäellä Optimoitu ETCS antaa tuloksen mukaan hienoisesti paremman tuloksen. Teoriassa tämä voi johtua mahdollisesti siitä, että Luumäellä tapahtuu odotuksia yksiraiteiselle osuudelle kahteen eri suuntaan, ja optimoitu järjestelmä pystyy vapauttamaan sivulle ajettaessa linjan hieman varhemmin kuin muut järjestelmät, jolloin voi syntyä pientä ajansäästöä kohtauksen myöhästymistilanteessa. Ero on kuitenkin sen verran pieni, että tätä syy-yhteyttä ei voida varmuudella sanoa simuloidun aineiston nojalla.



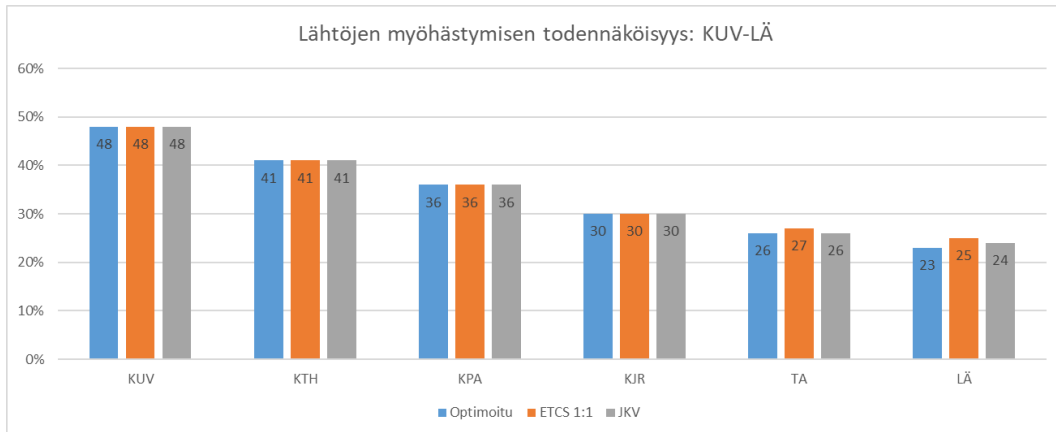
Kuva 32. Kouvola–Luumäki. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

Luumäki–Kouvola-suunnan tarkastelusta (kuva 33) mainittakoon ETCS 1:1 -toteutuksen puolesta hiuksen hieno ero muihin toteutuksiin koko tarkastelualueella. Tämä ero syntyy Taavetin ja Kaitjärven välillä ja voi liittyä Kaitjärven optimoidun sijoittelun ratkaisuihin. Kaitjärvellä tapahtuu mallin liikenteessä joitakin junaohituk-sia. Ero on kuitenkin suhteellisen pieni, ja loppupäätelmänä voi todeta, ettei kulunvalvontaratkaisulla ole rataosalla juurikaan vaikutusta viiveiden muutoksiin nykyisellä liikennepaikoilla kokonaisuutena.

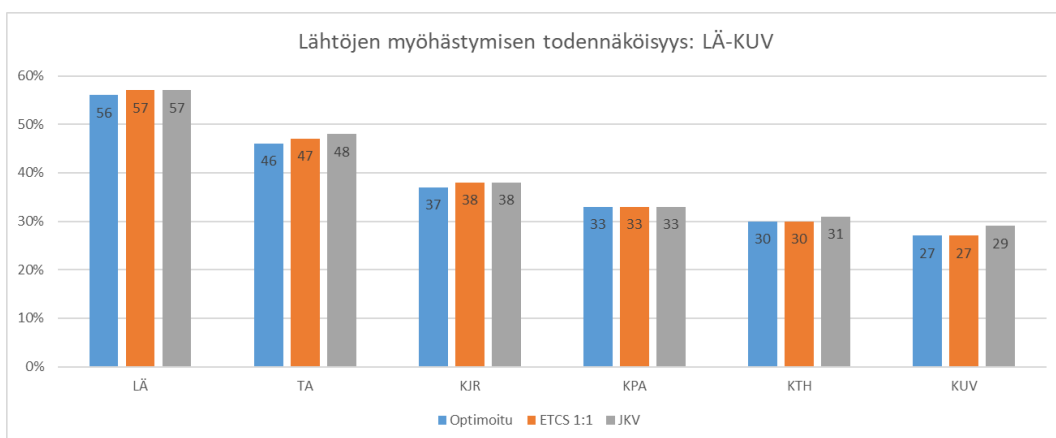


Kuva 33. Luumäki–Kouvola. Asemakohtaiset keskimääräiset aikataulupoikkeamat kaikille junille.

Lähtöaikojen myöhästymisissä ei vertailtavien toteutuksien kesken ole juurikaan eroja kumpaankaan liikesuuntaan tarkasteltaessa (kuvat 34 ja 35). Kaikilla liikennepaikoilla todennäköisyydet myöhästyä ovat yhtäläiset, mutta Optimoitu ETCS -toteutus on joko yhtä hyvä tai pari prosenttiyksikköä parempi kuin verrokkitoteutukset. Jokainen toteutus on määränpäättä lähestyttäessä yhä todennäköisemmin aikataulun mukaisesti lähdessä liikkeelle, joten kulunvalvontajärjestelmä ei juurikaan vaikuta hyödynnettävissä olevaan pelivaraan. Tähän vaikuttaa osaltaan se, että verraten harva juna pysähtyy tarkastelualueen väliliikennepaikoilla.



Kuva 34. Kouvola–Luumäki. Asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.



Kuva 35. Luumäki–Kouvola. Asemakohtainen myöhästymisen todennäköisyys.

Vastaavanlaisella liikenne- ja aikataulurakenteella kaksiraiteisilla osuuksilla ETCS 1:1 -toteutuksella päästään JKV:tä vastaavaan ja paikoitellen hieman parempaan suorituskyykyyn. Suojavälien tihentämisellä Optimoitu ETCS-skenaariossa ei simuloitulla liikennelähtökäytöksellä ole merkittävää vaikutusta suorituskyykyyn. Suuremmilla liikennemäärillä simuloitaessa järjestelmätoteutuksien välille saataisiin todennäköisesti eroavaisuuksia junien välisten vuorovaikutusten määrän kasvaessa, mutta tällainen tarkastelu ja aikatauluperusteinen optimointi eivät kuulu tämän työn tarkasteluun.

### 5.3.1 Kapasiteetin käyttöasteet

Taulukossa 10 listataan kulunvalvonnan vaikutus kapasiteetin käyttöasteelaskennan tuloksiin. Kapasiteetin käyttöaste on laskettu kolmen tunnin jaksoissa läpi vuorokauden kumpaankin suuntaan. Arviointialue huomioi risteävän vastaantulevan liikenteen vaikutuksen käyttöasteeseen Luumäen ja Kullasvaaran vaihteissa, joista reitit Vainikkalan ja Kotkan suuntaan erkanevat toisen linjaraitteen poikki. Arviointialue on myös Luumäellä rajattu päättymään heti 2-raiteisen osuuden päätyttyä Luumäen ratapihan itäpuolella.

*Taulukko 10. UIC 406 mukaiset kapasiteetin käyttöasteet prosentteina 3 tunnin välein suunnittain.*

<b>Ajankohta</b>	<b>JKV</b>	<b>ETCS 1:1</b>	<b>ETCS Opt</b>
Itään 0–3	19 %	20 %	19 %
Itään 3–6	36 %	37 %	34 %
Itään 6–9	29 %	29 %	28 %
Itään 9–12	32 %	33 %	32 %
Itään 12–15	55 %	56 %	55 %
Itään 15–18	37 %	37 %	36 %
Itään 18–21	51 %	51 %	50 %
Itään 21–24	50 %	51 %	49 %
Länteen 0–3	24 %	24 %	22 %
Länteen 3–6	36 %	35 %	35 %
Länteen 6–9	35 %	34 %	34 %
Länteen 9–12	42 %	41 %	41 %
Länteen 12–15	37 %	37 %	38 %
Länteen 15–18	54 %	54 %	53 %
Länteen 18–21	56 %	55 %	54 %
Länteen 21–24	46 %	45 %	44 %

Tulosten perusteella Optimoidun ETCS -toteutuksen merkitys käyttöasteen pienemiseen kokonaisuutena on marginaalisesti havaittavissa. Ero on kuitenkin niin pieni, ettei tuloksesta voi vetää johtopäätöstä käytännön hyödyn saavuttamisesta kapasiteetin käyttöasteen aleneman johdosta.

Kouvola–Luumäki-välillä ei saavutettu kovin suuria tihennyksiä optimoidulla opas-tinsijoittelulla, koska osuus on nykyäänkin varsin tiheästi linjasuojastettu. Koska myös junamäärä on harvalukuinen, ei aikataulussa ole kuin pieni määrä junavälejä, joita sijoittelun tihentäminen voi pienentää. Näin käyttöasteella ei ollut tarkaste-lussa rakenteellisestikaan paljoa kasvun varaa nykyisellä liikenteellä.



## 6 Yhteenveto

Tässä työssä verrattiin ERTMS/ETCS-järjestelmän jarrukäyriä ja toiminnallisuutta Suomen kansalliseen junakulunvalvontajärjestelmään sekä selvitettiin simuloinnin keinoin näiden kahden eri järjestelmän eroja operatiivisen toiminnan näkökulmasta. Simuloinnissa vertailtiin keskenään JKV:tä, ETCS-tasoa 2 JKV:tä vastaavin ratalaittein ja ETCS-tason 2 turvalaiteoptimoitua versiota, jossa linjoille lisättiin osuuksia ja ajolupamerkkejä kaavamaisesti tai aikatauluperusteisesti. Mukana on myös katsaus aikaisempiin ERTMS/ETCS-järjestelmän kapasiteettivaikutusarvioihin ja ko. järjestelmän mahdollistamiin liikennöinnin kannalta positiivisiin ratkaisuihin.

ETCS- ja JKV-jarrukäyrät käyttäytyvät Seis-opastetta lähestyttäessä samankaltaisesti, mutta lähestyttäessä nopeusrajoitusta JKV-jarrukäyrä ETCS:ää sallivampi tarkoittaen sitä, että ETCS:llä jarruttaminen aloitetaan näissä tapauksissa JKV:tä aikaisemmin. ETCS:n jarrukäyttämiseen voidaan vaikuttaa useilla kansallisilla arvoilla. Tämän työn simuloinneissa muodostettiin ETCS tason 2 profiili, jossa käytettiin ratateknisten ohjeiden (RATO) osan 22 ERTMS/ETCS mukaisia arvoja eikä näitä parametreja varioitu.

Vaikka JKV on jarrukäyrien näkökulmasta tehokkaampi verrattuna ETCS:ään, ERTMS/ETCS-järjestelmä on suojavälien määrittelyjen suhteen joustavampi (mm. ei opastimien näkemävaatimuksia) ja edukkaampi perusturvalaitesuunnittelun kannalta (mm. ei tarvetta opastinsijoittelulle ja siten myös vähemmän kaapelireitit-suunnittelua). Tämä hyöty realisoituu toisaalta vasta mittavien alkuihastointien jälkeen (esimerkiksi radiosuojastuskeskukset ja veturilaitteet). ERTMS/ETCS-järjestelmän tason 2 jatkuvatoiminen ajolupien päivittyminen on etu verrattuna pistemäiseen junakulunvalvontaan. Tästä hyötyy varsinkin heterogeeninen liikenne, jossa eri yksiköillä on erilainen jarrutusikäytyminen. Pistemäisessä junakulunvalvonnassa ajoluvan päivittävien balliisien sijoittelu joudutaan suunnittelemaan turvallisuuden vuoksi pisimmän jarrutusmatkan omaavan kaluston lähtökohdista.

ETCS-tasolla 2 tieto ajoluvasta välitetään radiosuojastuskeskukselta yksikön veturilaitteelle radioteitse. Tähän viestimisen muotoon liittyy vielä epävarmuuksia, kuten verkon kuuluvuus, kattavuus ja mitä verkkoja viestintään on käytettävissä. Esimerkiksi radioverkon aiheuttamien viiveiden vaikutusta on hankala arvioida mm. keskeneräisestä FRMCS-määrittelystä johtuen. Verkkotekniikkaan liittyvät viiveet olivat simuloinnissa vakioituneet.

Tämän työn simulointituloksien vertaaminen aikaisemmissä selvityksissä esitettyihin tuloksiin on haastavaa, sillä operatiivisen toiminnan simulaattoreissa on erittäin runsas määrä erilaisia parametreja, joilla jokaisella on vaikutus tuloksiin. Lisäksi simulointitulokset liittyvät aina kulloisenkin tarkasteluajankohdan aikataulurakenteeseen. Tämän työn tarkasteluiden keskinäinen vertaaminen on tässä käytetyillä mittareilla yhteismitallista, sillä jokaiseen alueellisen tarkasteluskenaarion sisällä aikataulurakenne pidettiin samana.

Tiheästi liikennöidyillä kaksiraiteisella homogeenisen liikenteen alueella eri kulunvalvonnan toteutuksien välille muodostui kaikkein selkeimmät erot. Optimoitu ETCS -toteutus toimi tässä tapauksessa parhaiten, sillä järjestelmä pystyi kuromaan viivästystilanteissa aikataulua tehokkaimmin kiinni ja lähdöt asemilta olivat

verrokkitoteutuksiin nähden todennäköisemmin aikataulun mukaisia. Tiheästi liikennöidyillä osuuksilta on mahdollista paikantaa simuloinnilla helposti pullonkaula- paikkoja ja ratkaista näitä ongelmakohtia turvalaitesijoittelulla.

Yksiraiteisten osuuksien tarkasteluissa havaittiin, että kulunvalvonnan toteutuksella ei ole merkittävää vaikutusta harvaan liikennöityjen alueiden järjestelmien suorituskykyä vertailtaessa. Tämä selittyy junien vähälukuisilla vuorovaikutustilanteilla. Tiheämmin liikennöidyillä osuuksilla Optimoitu ETCS -toteutus suoriutui tehokkaammin (erityisesti pitkillä matkoilla) kahteen verrokkitoteutukseen nähden, jotka keskenään vertautuivat keskenään lähes yhtäläisesti. Pitkillä matkoilla kolmesta järjestelmätoteutuksesta Optimoitu ETCS -toteutus palautui syntyneistä viiveistä tehokkaimmin sekä pullonkaulakohdissa kykeni pitämään viiveiden kertymisen parhaiten kurissa. Erityisesti yksiraiteisten osuuksien junakulunvalvonnan päivittämistä JKV:sta ERMTS/ETCS-järjestelmään suunniteltaessa on syytä tarkastella riittävän turvalaitevarustelun taso erityisesti heterogeenisen liikenteen tapauksissa. Lielähti–Pori/Rauma-osuuden simulointituloksien perusteella yksiraiteiset osuudet vaativat erityistä huomioita turvalaitesuunnittelun ja liikennerakenteen yhteensovituksessa, ja näin ollen ETCS 1:1 -toteutuksen lähestymistä seuraavassa ERTMS/ETCS-järjestelmän edut jäävät hyödyntämättä.

Kaksiraiteisella heterogeenisellä osuudella, jossa liikenne on lähinnä pitkän matkan tavara- ja henkilöliikennettä, ei järjestelmien välille syntynyt suuria eroja. Kaikista kolmesta eri tarkastelualueesta ja ratatyypistä tässä ETCS 1:1 -toteutus pärjasi molemmissa tarkastelusuunnissa hyvin yhtäläisesti Optimoitu ETCS -toteutukseen verrattuna. Tämä tulos kertoo alueen nykyliikenteen rakenteelle riittävästä turvalaitevarustelusta (riittävän lyhyet suojavälit). Alueella kapasiteetin käyttöaste ei ole korkea, jolloin optimoidulla sijoittelulla saavutetaan hyötyjä vain erikoistilanteissa.

Kaiken kaikkiaan simuloinnin tulosten perusteella ERTMS/ETCS-järjestelmän joustavuuden mahdollistama kapasiteetin kasvaminen tulee Suomessa merkittävämmiin esiin tiheästi liikennöidyillä ratatyypin I radoilla. Ratatyypin III harvempaan liikennöidyt kaksiraiteiset osuudet hyötyvät pikemminkin ERTMS/ETCS-järjestelmän tuomasta liikenteen sujuvuudesta ja paikallisemmista liikenteenhoidollisista eduista kuin kokonaisvaltaisesta kapasiteetin lisäyksestä. Toisaalta liikenteen kasvaessa on mahdollista ERTMS/ETCS-järjestelmän ollessa käytössä nykyistä järjestelmää vaivattomampaa ja halvempaa kiinnittää tarpeen vaatiessa huomioita mahdollisuuksiin nostaa kapasiteettia ratalaitesijoitteluin. Tyypin II yksiraiteiset osuudet, eritoten nykyisin asemavälisuojustetut osuudet, hyötyvät helposta tavasta luoda ETCS-tason 2 toteutuksella verraten edullisesti tiheät ja siten potentiaalisesti tehokkaammin toimivat linjaosuudet. Liikenteellinen kokonaisuus riippuu kuitenkin myös vahvasti liikennerakenteesta ja liikenteenohjauksen vaihtoehdoista. ERTMS/ETCS-järjestelmän sijoittelun optimointi onkin tässä tapauksessa monimutkaisemmassa yhteydessä liikennerakenteen suunnitteluun kuin useampi- raiteisten ratatyypin tapauksessa. Tällöin järjestelmien paikalliset vaikutukset voivat olla suuriakin ja toisinaan vaikeasti ennustettavia.

## Lähdeluettelo

- [1] ERTMS/ETCS LEVEL 2 CAPACITY BENEFITS ON THE CITY LINES OF THE HELSINKI REGION. Väylävirasto 2019. [Viitattu 18.5.2021]. Saatavilla: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj\\_2019-43\\_ertms\\_etcs\\_level2\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2019-43_ertms_etcs_level2_web.pdf)
- [2] Suomen kansalliset ERTMS/ETCS-parametrit, Yleisohjeistus, Liikenneviraston ohjeita 20/2015, Liikennevirasto 2015. [Viitattu 18.5.2021]. Saatavilla: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2015-20\\_suomen\\_kansalliset\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2015-20_suomen_kansalliset_web.pdf)
- [3] Junaliikenteen havaintojärjestelmä. Graafiset aikataulut, Huopalahti – Tikurila, viikon 21 aikataulut. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.5.2021]. Saatavilla: <https://juliadata.fi/timetables/graphical?d=25.5.2021&s=hpltkl>
- [4] Rautateiden verkkoselostus 2021. Väylävirasto 2021. [Viitattu 26.5.2021]. Saatavilla: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj\\_2019-46\\_vs2021\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2019-46_vs2021_web.pdf)
- [5] Influence of ETCS on the line capacity. UIC 2008. Saatavilla: [https://webinfo.uk/webdocssl/irse-kbase/ref-viewer.aspx?Refno=-1457373802&document=Influence%20of%20ETCS%20on%20line%20capacity%20-%20Generic%20study%20\(Aachen%20University%202008\).pdf](https://webinfo.uk/webdocssl/irse-kbase/ref-viewer.aspx?Refno=-1457373802&document=Influence%20of%20ETCS%20on%20line%20capacity%20-%20Generic%20study%20(Aachen%20University%202008).pdf)
- [6] Subset-041-3.2.0 Performance Requirements for Interoperability. ERA 2015. Saatavilla: [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/filesystem/ertms/ccs\\_tsi\\_annex\\_a\\_-\\_mandatory\\_specifications/set\\_of\\_specifications\\_3\\_etcs\\_b3\\_r2\\_gsm-r\\_b1/index014\\_-\\_subset-041\\_v320.pdf](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/filesystem/ertms/ccs_tsi_annex_a_-_mandatory_specifications/set_of_specifications_3_etcs_b3_r2_gsm-r_b1/index014_-_subset-041_v320.pdf)
- [7] INTRODUCTION TO ETCS BRAKING CURVES. ERA 2020. Saatavilla: [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/introduction\\_to\\_etcs\\_braking\\_curves\\_en.pdf](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/introduction_to_etcs_braking_curves_en.pdf)
- [8] ETCS ja vaikutus kapasiteettiin. Sirkkiä 2020. Saatavilla: [https://digirata.fi/wp-content/uploads/2021/03/Sirkkia\\_temu\\_ETCS\\_-ja\\_kapasiteetti.pdf](https://digirata.fi/wp-content/uploads/2021/03/Sirkkia_temu_ETCS_-ja_kapasiteetti.pdf)
- [9] UIC leaflet 406 2nd edition. UIC 2013. Saatavilla: [https://tamannaiei.iut.ac.ir/sites/tamannaiei.iut.ac.ir/files/files\\_course/uic406\\_2013.pdf](https://tamannaiei.iut.ac.ir/sites/tamannaiei.iut.ac.ir/files/files_course/uic406_2013.pdf)
- [10] ERTMS/ETCS-tason 2 kapasiteettihyödyt kaksiraiteisilla radoilla. Väylä 2018. Saatavilla: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2018-41\\_ertms\\_etcs-tason\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2018-41_ertms_etcs-tason_web.pdf)
- [11] Edellytykset tulevaisuuden rautatieliikenteelle rakennetaan nyt. Digirata. Väylä 2018. [Verkkoaineisto]. Saatavilla: <https://digirata.fi/>
- [12] Kohti digitaalista ja älykästä rautatieliikennettä. LVM 2021. Saatavilla: [https://digirata.fi/wp-content/uploads/2021/07/Digirata-valmisteluvaiheen-loppuraportti\\_FINAL.pdf](https://digirata.fi/wp-content/uploads/2021/07/Digirata-valmisteluvaiheen-loppuraportti_FINAL.pdf)
- [13] Rautateiden infrastruktuuritietojen katselusovellus. Fintraffic / Digitraffic 2021. Saatavilla: <https://rata.digitraffic.fi/infra-api/>
- [14] Rautateiden infrastruktuuritietojen lähde. Fintraffic /Digitraffic 2021. CC 4.0 BY. [Rajapinta]. Saatavilla: <https://rata.digitraffic.fi/infra-api/0.6/swagger-ui.html>
- [15] Komentorivityökalu, Infra-API transformation to railML v2.2. Väylävirasto 2021. EUPL-1.2 License. [Lähdekoodi]. Saatavilla: <https://github.com/finnishtransportagency/infra2railml>
- [16] Liikennetietojen kuvaus. Fintraffic /Digitraffic 2021. Saatavilla: <https://www.digitraffic.fi/rautatieliikenne/>
- [17] Liikennetietojen lähden. Fintraffic / Digitraffic 2021. CC 4.0 BY. [Rajapinta]. Saatavilla: <https://rata.digitraffic.fi/swagger/>

- 
- [18] Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 22, ERTMS/ETCS. Väylävirasto 2021. Saatavilla: [https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo\\_2022-8\\_rato22\\_iteraatio2\\_web.pdf](https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-8_rato22_iteraatio2_web.pdf)
- [19] ETCS-jarrukäyrien kansalliset arvot Lambda-junille. Hulkko 2022. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/handle/10024/507685>
- [20] Harmonised ERTMS Marker Boards. ERA 2018. Saatavilla: [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/harmonised\\_ertms\\_marker\\_boards\\_en.pdf](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/harmonised_ertms_marker_boards_en.pdf)
- [21] Komission täytäntöönpanopäätös (EU) 2021/1730 paritettujen taajuusalueiden 874,4–880,0 MHz ja 919,4–925,0 MHz ja parittamattoman taajuusalueen 1 900–1 910 MHz yhdenmukaistetusta käytöstä rautateiden radioviestintäjärjestelmässä. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32021D1730&qid=1647594651570&from=FI>
- [22] LUKS. VIA Consulting & Development GmbH. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 31.3.2022]. Saatavilla: <https://www.via-con.de/en/development/luks/>





Väylävirasto  
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745  
ISBN 978-952-317-963-9  
[www.vayla.fi](http://www.vayla.fi)