

Aikataulusuunnittelu ja rautatieliikenteen täsmällisyys



Mikko Mukula



Ratahallintokeskuksen
julkaisu A 1/2008

Aikataulusuunnittelu ja rautatieliikenteen täsmällisyys

Mikko Mukula

Helsinki 2008

Ratahallintokeskus

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2008

ISBN 978-952-445-214-4 (nid.)

ISBN 978-952-445-215-1 (pdf)

ISSN 1455-2604

Julkaisu pdf-muodossa: www.rhk.fi

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Olavi Huotari

Helsinki 2008

Mukula Mikko: Aikataulusuunnittelu ja rautatieliikenteen täsmällisyys. Ratahallintokeskus, Liikennejärjestelmäosasto. Helsinki 2008. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 1/2008. 119 sivua ja 4 liitettä. ISBN 978-952-445-214-4, ISBN 978-952-445-215-1 (pdf), ISSN 1455-2604.

Avainsanat: rautatieliikenne, ratakapasiteetti, aikataulu, aikataulusuunnittelu, aikataulujen analysointi, täsmällisyys

TIIVISTELMÄ

Kansallinen rautatietavaraliikenne avautui kilpailulle Suomessa vuoden 2007 alussa. Ratahallintokeskus vastaa Suomessa ratakapasiteetin jakamisesta ja eri rautatieyritysten kapasiteettihakemusten yhteensovittamisesta. Kilpailun avautumisen ja mahdollisten uusien rautatieyritysten markkinoilletulon myötä RHK:lta edellytetään jatkossa laajempaa aikataulusuunnitteluosaamista. Tämän työn keskeinen tavoite on rautatieliikenteen aikataulusuunnittelun periaatteiden sekä suunnittelussa huomioon otettavien tekijöiden kuvaaminen.

Aikataulusuunnitteluun liittyy olennaisesti liikenteen täsmällisyys. Viime aikoina Suomen rautatieliikenteen täsmällisyysongelmat ovat olleet paljon esillä julkisuudessa. Asiakkaiden kasvaneet vaatimukset matka-ajan ja täsmällisyyden suhteen sekä lisääntyneet liikennemäärät ovat lisänneet aikataulusuunnittelun haasteita. Aikataulusuunnittelun keinoin voidaan vaikuttaa liikenteen täsmällisyyteen ja ennen aikataulujen käyttöönottoa niiden häiriöherkkyys tulisi testata. Työssä esitellään menetelmiä, joiden avulla eri aikatauluvaihtoehtojen luotettavuutta voidaan arvioida ja kerrotaan myös, millä tavalla täsmällisyystietoa voidaan hyödyntää aikataulusuunnittelussa. Lisäksi kuvataan, mistä tekijöistä liikenteen täsmällisyys muodostuu ja selvitetään, miten täsmällisyyttä tulisi mitata. Tutkimuksen luonne on lähinnä kuvaileva ja se perustuu pääasiassa kirjallisuusselvityksiin ja asiantuntijahaastatteluihin.

Selvityksen perusteella rautatieliikenteen aikataulusuunnittelu on hyvin haasteellinen tehtävä, jossa tulee ottaa huomioon monia eri tekijöitä. Lisäksi aikataulusuunnittelun tavoitteet ovat usein ristiriidassa keskenään, jolloin yhden muuttujan parantaminen heikentää toista. Liikenteen täsmällisyyteen vaikuttavat monet eri tekijät. Rautatiejärjestelmä on herkkä erilaisille häiriöille ja rataverkon riippuvuuksien vuoksi yhden junan myöhästyminen saattaa vaikuttaa useiden muiden junien kulkuun. Rautatieliikenteessä korostuvat sekundääriset myöhästymissyöt ja niiden osuus saattaa olla jopa suurempi kuin primääristen myöhästymisten. Simulointia on jo pitkään käytetty aikataulujen analysoinnissa, mutta viime aikoina myös muita analysointityökaluja on kehitetty. Selvityksen perusteella mikrosimulointi on edelleenkin paras vaihtoehto, kun halutaan mahdollisimman luotettavia ja tarkkoja tuloksia. Oikeastaan ainoa simuloinnin heikkous on sen aikaa vievyys, minkä vuoksi se ei sovellu kovin hyvin lyhyen tähtäimen suunnittelun apuvälineeksi.

Mukula Mikko: Tidtabellsplanering och punktlighet inom järnvägstrafiken. Banförvaltningscentralen, Trafiksystemsavdelningen. Helsingfors 2008. Banförvaltningscentralens publikationer A 1/2008. 119 sidor och 4 bilagor. ISBN 978-952-445-214-4, ISBN 978-952-445-215-1 (pdf), ISSN 1455- 2604.

Nyckelord: Järnvägstrafik, bankapacitet, tidtabell, tidtabellsplanering, tidtabellsanalys, punktlighet

SAMMANDRAG

Den nationella godstrafiken på järnvägarna i Finland öppnades för konkurrens i början av 2007. Banförvaltningscentralen (RHK) ansvarar för fördelningen av bankapaciteten i Finland och för samordningen av de olika järnvägsföretagens ansökningar om bankapacitet. Konkurrensutsättningen och eventuella nya järnvägsföretags inträde på marknaden ställer högre krav på RHK:s kompetens i fråga om tidtabellsplanering. Den här utredningens centrala mål är att redogöra för vilka principer som gäller vid tidtabellsplaneringen inom järnvägstrafiken samt vilka faktorer som ska beaktas i planeringen.

Trafikens punktlighet spelar en avgörande roll i tidtabellsplaneringen. På sista tiden har punktlighetsproblemen inom järnvägstrafiken i Finland fått en hel del publicitet. Kundernas växande krav i fråga om restid och punktlighet samt ökade trafikmängder har ökat utmaningarna inom tidtabellsplaneringen. Med hjälp av tidtabellsplanering kan man påverka trafikens punktlighet och innan tidtabellerna tas i bruk ska deras känslighet för störningar testas. I utredningen presenteras metoder med vilka man kan beräkna hur pålitliga olika tidtabellsalternativ är. Vidare redogör man för på vilket sätt punktlighetsinformation kan utnyttjas i tidtabellsplaneringen. Därtill beskrivs vilka faktorer som avgör trafikens punktlighet och utreds hur punktlighet bör mätas. Utredningens natur är närmast beskrivande och den baserar sig huvudsakligen på litteraturstudier och expertintervjuer.

Enligt utredningen innebär tidtabellsplaneringen inom järnvägstrafiken stora utmaningar där flera olika faktorer måste tas i beaktande. Därtill har målen med tidtabellsplaneringen ofta varit motstridiga, varvid förbättringen av en variabel försämrar en annan. Trafikens punktlighet påverkas av många olika faktorer. Järnvägssystemet är känsligt för olika slags störningar och eftersom bannätet är så beroende av olika faktorer kan förseningen av ett tåg påverka trafiken för flera andra tåg. Sekundära förseningsorsaker framhävs inom järnvägstrafiken och deras andel kan till och med överstiga de primära förseningarna. Simulering har länge använts vid analysering av tidtabeller, men på senare tid har man även utvecklat andra analysmetoder. Enligt utredningen är mikrosimulering fortfarande det bästa alternativet för att uppnå pålitliga och exakta resultat. Den enda nackdelen med simulering är att den är tidskrävande, varför den endast lämpar sig för mycket kortsiktig planering.

Mukula Mikko: Timetabling and punctuality of railway operations. Finnish Rail Administration, Traffic System Department. Helsinki 2008. Publications of the Finnish Rail Administration A 2/2008. 119 pages and 4 appendices. ISBN 978-952-445-214-4, ISBN 978-952-445-215-1 (pdf), ISSN 1455- 2604.

Keywords: railway operations, railway capacity, timetable, timetabling, timetable analysis, punctuality

ABSTRACT

Domestic rail freight transport in Finland opened to competition in the beginning of 2007. The Finnish Rail Administration (RHK) is the infrastructure manager in Finland, which processes the capacity requests from railway undertakings. In the capacity allocation process train path requests of various train operators are coordinated by the RHK. Hence, it is obvious that more timetabling know-how is needed in RHK in the future. The main goal of this thesis is to introduce the railway planning process and describe the principles of railway timetabling.

The recent media attention for the unpunctual railway services over the last year mirrors the public interest in high quality public transport. Punctuality seems to be one of the most important features of railway transport to attract more customers. The punctuality of railway services is essentially related to the timetable planning. Evaluating a train network timetable on stability and robustness is an important part of the timetable planning process. A new timetable should be tested on stability and delay sensitivity to assure good punctuality. In this thesis some of the existing timetable evaluation models are introduced. Moreover, the determinants of punctuality and causal relationships are described. Feedback of operational data to the timetable planning process is essential for improving punctuality and reliability of railway operations. Hence, it is also described how realized punctuality and traffic information can be used to identify and improve deficient processes. Furthermore, punctuality and performance measures are discussed. The nature of this thesis is mainly descriptive and it is based on literature review and interviews with the railway experts.

This study indicates how complicated process railway timetabling is. Several constraints should take into account with respect to e.g. safety system, transfer connections and rolling stock circulation. This study shows that the railway punctuality is affected by a large number of different factors and the railway network is very vulnerable to disturbances. Once a train is delayed this may produce severe delay propagation over the network when trains are highly interconnected. Due to the interdependencies in railway systems a large part of the delays consist of secondary delays. According to this study a good alternative to simulation for timetable performance evaluation of large-scale railway networks is still missing. The only drawback of simulation is the required amount of time which limits its use in the short term planning.

ESIPUHE

Tutkimuksessa käsiteltävät aiheet ovat erittäin ajankohtaisia vuonna 2007 esiintyneiden täsmällisyysaasteiden vuoksi. Tässä työssä esitellään täsmällisyyttä ja aikataulu-suunnittelun merkitystä täsmällisyyden tekijänä.

Tutkimuksen on laatinut filosofian maisteri, tekniikan ylioppilas Mikko Mukula. Tutkimus on tekijän diplomityö Tampereen teknillisen yliopiston Liikenne- ja kuljetustekniikan laitokselle. Työtä ovat ohjanneet professori Jorma Mäntynen TTY:sta ja liikenteenhallintayksikön päällikkö Miika Mäkitalo RHK:sta.

Helsingissä, maaliskuussa 2008

Ratahallintokeskus
Liikennejärjestelmäosasto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SAMMANDRAG.....	4
ABSTRACT	5
ESIPUHE.....	6
KUVALUETTELO	9
TAULUKKOLUETTELO.....	11
MÄÄRITELMÄT JA LYHENTEET	12
1 JOHDANTO.....	14
1.1 Työn tausta ja tavoitteet	14
1.2 Tutkimusote ja työssä käytetyt menetelmät	15
1.3 Työn rajaus ja rakenne	16
2 RAUTATIELIIKENNE SUOMESSA	19
2.1 Rautatieliikenteen merkitys Suomen liikennejärjestelmässä	19
2.2 Rautatiesektorin toimijat ja niiden roolit.....	20
2.3 Rautatieliikenteen kilpailukyky ja tulevaisuuden kehitystrendit.....	20
2.4 Kilpailun avautuminen ja aikataulusuunnittelu Suomessa.....	22
3 RAUTATIELIIKENTEEN SUUNNITTELU.....	24
3.1 Ratakapasiteetti	24
3.1.1 Ratakapasiteetin käsite.....	24
3.1.2 Ratakapasiteettiin vaikuttavat tekijät	25
3.1.3 Ratakapasiteetin jakaminen	26
3.2 Rautatieliikenteen suunnitteluprosessi	27
3.3 Aikataulusuunnittelun tasot	28
3.4 Aikataulusuunnittelun haasteet ja erityispiirteet	30
3.5 Aikataulusuunnittelun tavoitteet ja merkitys.....	31
4 RAUTATIELIIKENTEEN AIKATAULUSUUNNITTELU	33
4.1 Aikataulusuunnitteluprosessi.....	33
4.2 Graafinen aikataulu	34
4.3 Aikataulusuunnittelun lähtötietojen hankinta.....	35
4.4 Aikataulurakenne.....	36
4.5 Vakioaikataulu.....	37
4.6 Teoreettinen ajoaika	41
4.6.1 Infrastruktuurin vaikutus ajoaikaan	43
4.6.2 Kaluston vaikutus ajoaikaan	44
4.7 Pelivara.....	45
4.8 Junaturvallisuus	47
4.8.1 Junaväli	47
4.8.2 Junakohtaamiset.....	51
4.9 Aikataulutetut pysähdykset	54
4.9.1 Pysähdysaika.....	54
4.9.2 Vaihtoaika	54
4.9.3 Kääntöaika	55
4.10 Aikataulusuunnittelu ja palvelutaso	56

4.10.1	Vuoroväli ja liikenteen säännöllisyys	56
4.10.2	Vaihtoyhteydet	57
4.10.3	Junavuorojen synkronointi	58
4.10.4	Matka-aika.....	58
4.10.5	Täsmällisyys.....	58
4.11	Psykologiset tekijät.....	59
4.12	Ratatoiden ja kunnossapidon suunnittelu ja liikenteen yhteensovittaminen	59
4.13	Liikennepaikkakohtainen aikataulusuunnittelu	60
4.14	Konfliktin tunnistus.....	62
5	RAUTATIELIIKENTEEN TÄSMÄLLISYYS	63
5.1	Täsmällisyyden määritelmä.....	63
5.2	Häiriöt rataverkolla ja niiden leviäminen.....	64
5.3	Primääriset ja sekundaariset myöhästymiset.....	68
5.4	Täsmällisyyteen vaikuttavat tekijät.....	69
5.5	Täsmällisyyden merkitys laatutekijänä	73
5.6	Epätäsmällisyyskustannukset	74
5.7	Rautatieliikenteen täsmällisyys Suomessa ja muualla	77
5.8	Miksi japanilaiset junat kulkevat ajallaan	80
6	AIKATAULUJEN ANALYSOINTI	83
6.1	Simulointi	83
6.2	Analyttiset menetelmät.....	85
6.3	Aikataulujen optimointimenetelmät	88
6.4	Ratakapasiteetin käyttöasteen soveltaminen täsmällisyysarvioinneissa	89
6.5	Heterogeenisyysmittarit.....	91
7	TÄSMÄLLISYYDEN MITTAAMINEN	93
7.1	Liikenteen toteumatiedon kerääminen	93
7.2	Täsmällisyyden mittaaminen.....	95
7.3	Täsmällisyysmittarit	96
7.4	Täsmällisyysjakaumat	99
7.5	Myöhästymisten syiden kirjaaminen.....	100
7.6	Täsmällisyyden mittaaminen Suomessa.....	102
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	105
8.1	Aikataulusuunnittelu	105
8.2	Aikataulujen analysointi.....	105
8.3	Täsmällisyys ja sen mittaaminen.....	108
8.4	Rautatieliikenteen täsmällisyys Suomessa	108
8.5	Jatkotutkimukset.....	111
8.6	Työn arviointi	111
	LÄHTEET	113

LIITTEET

Liite 1	Yleisimmät myöhästymissyöt Suomen rautatieliikenteessä 2006
Liite 2	JUSEEn kirjattavat syykoodit ja niiden selitykset
Liite 3	Rautatieliikenteen täsmällisyys eri maissa
Liite 4	Infrastruktuurin aiheuttamat myöhästymisminuutit junakilometriä kohden Ruotsissa 2006 (Banverket 2007a)

KUVALUETTELO

Kuva 1. Liiketaloustieteen tutkimusotteet (Neilimo & Näsi 1980).....	16
Kuva 2. Työn rakenne.	18
Kuva 3. Suomen rataverkko (RHK 2006b).	19
Kuva 4. Ratakapasiteetin käyttö.	24
Kuva 5. Rautatieliikenteen suunnitteluprosessi.....	27
Kuva 6. Aikataulut yhdistävät infrastruktuurin, liikenteen ja asiakkaat (Pellandini 2001a).	30
Kuva 7. Rautatieyrityksen aikataulujen suunnitteluprosessi.	33
Kuva 8. Graafinen aikataulu.	35
Kuva 9. Aikataulurakenteen vaikutus ratakapasiteettiin.	36
Kuva 10. Perinteinen aikataulu ja vakioaikataulu.	38
Kuva 11. Vakioaikataulu ja liikenteen symmetrisyys (Mäkitalo 2001).	38
Kuva 12. Vakioaikataulu ja solmupiste (Pachl 2002).	39
Kuva 13. Vakioaikataulujärjestelmän modulaarisuus (Vromans 2005).....	40
Kuva 14. Junan kulku kahden pysähdyksen välillä.	41
Kuva 15. Junan todellinen kulkunopeus ja suurin sallittu nopeus (Kokkonen 2007). ...	42
Kuva 16. Matka-ajan osatekijät.	43
Kuva 17. Radan nopeuskaavio (Tomperi 2007).	44
Kuva 18. Pelivara.	45
Kuva 19. Pelivaran optimaalinen jakaminen kymmenelle liikennepaikkavälille (Vromans 2005).	46
Kuva 20. Kiinteäsuojavälinen suojastus.	48
Kuva 21. Opastinvälin varausaika (Pachl 2002).	49
Kuva 22. Minimijunaväli (Pachl 2002).	50
Kuva 23. Puskuriaika ja ruuhkahuipun jälkeinen puskurijakso.	51
Kuva 24. Raiteen pituuteen liittyvät käsitteet (RHK 2006a).	52
Kuva 25. Mynämäen liikennepaikan raiteistokaavio (RHK liikennepaikkarekisteri)....	53
Kuva 26. Pysähdysajan osatekijät.	54
Kuva 27. Vaihtoyhteydet ja puskuriaika (Landex et al 2006).	55
Kuva 28. Vaihtoyhteydet Pasilan asemalla (Pellandini 2000).	57
Kuva 29. Junavuorojen synkronointi.....	58
Kuva 30. Yhdistetty graafinen aikataulu ja raidevarauskaavio (Pachl 2002).	61
Kuva 31. Raidevarauskaavio.	61
Kuva 32. Häiriöiden leviäminen rataverkolla.....	65
Kuva 33. Junan 2 muuttunut kulku.....	66
Kuva 34. Ratkaisuvaihtoehto 1.....	67
Kuva 35. Ratkaisuvaihtoehto 2.....	67
Kuva 36. Sekundäärysten myöhästymisten riippuvuus kapasiteetin käyttöasteesta.	68
Kuva 37. Rautatieliikenteen täsmällisyyteen vaikuttavat tekijät.....	70

Kuva 38. Kunnossapito- ja epätäsmällisyyskustannusten välinen riippuvuus (Nyström 2005).	76
Kuva 39. Täsmällisyystason ja myöhästymismarginaalien välinen riippuvuus (BEST 2002)	78
Kuva 40. Kriittiset rataosat, PETER (Goverde 2005).	87
Kuva 41. Häiriöiden leviäminen rataverkolla, PETER. (Goverde 2005).	87
Kuva 42. Lisääntynen kysynnän ja kohtaustaikkojen lukumäärän vaikutus ajoaikaan (Ferreira & Higgins. 1996).	89
Kuva 43. Liikennemäärä ja täsmällisyys (Kandels & Gröger 2005).	89
Kuva 44. Kapasiteetin käyttöaste Ruotsissa 2006 (Banverket 2007a).	91
Kuva 45. Junavälien erilainen jakautuminen.	92
Kuva 46. Junan kulku aseman läpi, TNV-Prepare (Goverde 2005).	94
Kuva 47. Junien saapumisaikajakaumat sekunnin tarkkuudella, TNV-Prepare. (Goverde 2005).	95
Kuva 48. Kertyneiden myöhästymisminuuttien keskiarvo ja täsmällisyystason muutokset Helsinki–Turku-välillä. (kuvitteellinen esimerkki).	97
Kuva 49. Junan aikataulunmukaisen saapumisajan poikkeaman jakauma ja todennäköisyysjakauma sekä 87 % persentiili.	100
Kuva 50. Kymmenen merkittävintä infrastruktuurista aiheutuvaa myöhästymissyitä Ruotsissa 2002 (Nyström & Kumar 2003).	101
Kuva 51. Syy-seuraus-ketju rautatieliikenteessä (Nyström 2004).	102

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Ratakapasiteetti raidetta kohti raidemäärän, nopeuden, nopeuserojen ja kohtauspaikan mukaan (-/x, kohtauspaikalla ei vaikutusta ratakapasiteettiin).	26
Taulukko 2. Aikataulusuunnittelun tasot.....	29
Taulukko 3. Tavarajunien suurin sallittu akselipaino ja nopeus rataluokittain.	44
Taulukko 4. Etusijajärjestys (RHK 2006c).....	53
Taulukko 5. Kaikkia liikennemuotoja koskevat ajan arvot vuoden 2005 hintatasossa (Tiehallinto 2005).	77
Taulukko 6. Myöhästymismarginaalit eri maissa.....	78
Taulukko 7. Rautatieliikenteen täsmällisyys Suomessa (VR).....	79
Taulukko 8. Sekundääristen myöhästymisten osuus 2006.	79
Taulukko 9. Rautatieliikenteen täsmällisyys Ruotsissa (Banverket).....	80
Taulukko 10. Rautatieliikenteen täsmällisyys Sveitsissä (SBB).....	80
Taulukko 11. Rautatieliikenteen täsmällisyys Isossa-Britanniassa (Network Rail).....	80
Taulukko 12. Ruotsalaisen simulointitutkimuksen tulokset, RailSys (Wahlborg 2004).85	
Taulukko 13. Kapasiteetin käyttöasteen vaikutus liikenteeseen (UIC 2004, Banverket 2007a).....	90
Taulukko 14. UIC:n ohjearvot ratakapasiteetin käyttöasteista (UIC 2004).	90
Taulukko 15. Syykoodien kirjaaminen JUSEen.....	103
Taulukko 16. Syykoodittomien myöhästymisten osuus Suomessa 2006 (JUSE).	104

MÄÄRITELMÄT JA LYHENTEET

Aikataulu on junan kulkusuunnitelma (RHK 2005a).

Graafinen aikataulu on aikataulu, jossa junien kulku esitetään matka-aika-koordinaatistossa.

Hyötypituus on raiteen pituus, jota voidaan käyttää junaliikenteessä silloin, kun junan on mahdollista pysähtymään kyseiselle raiteelle (RHK 2006a).

Junakilometri on junan kulkema kilometrin matka (RHK 2007).

Kiinteäsuojavälinen suojustus on suojustus, jossa opastinvälit määritellään kiinteiden opastimien avulla (Pachl 2002).

Käyttöpituus on se osa raidetta, jolla liikuvaa kalustoa voidaan pysäköidä sen estämättä liikennöimistä viereisillä raiteilla.

Kääntöaika on junan kääntymiseen varattu aika pääteasemalla.

Liikennepaikka on erikseen määrätty alue, joka on mainittu rautatieliikennepaikkarekisterissä (RHK 2006a).

Liikenteen ja ratatöiden yhteensovittaminen on RHK:n liikennejärjestelmäosaston ja liikennejärjestelmäosastolle palveluja tuottavan toimijan toiminta liikenteen ja ratatöiden yhteensovittamisen suunnittelussa ennen aikataulukauden alkua ja aikataulukaudella.

Liikenteenohjaus on myönnetyn ratakapasiteetin jaon toteuttamista sekä rataverkon liikennöinnin ohjaamista ja hallintaa yksittäisillä rautatiereiteillä ja rataverkon liikennepaikkojen raiteistoilla käytettävissä olevien liikenteenohjausjärjestelmien ja rataverkolla liikennöintiä koskevien säännösten ja määräysten mukaisesti (L 555/2006).

Marginaalikustannus eli rajakustannus on yhden lisäyksikön tuotannosta aiheutuva kokonaiskustannusten muutos.

Pelivara on teoreettiseen ajoaikaan lisättävä aika, jolla varaudutaan mahdollisiin häiriöihin.

Radanpito on radan ja siihen kuuluvien rakenteiden, rakennelmien ja laitteiden sekä radanpidon tarvitseman kiinteän omaisuuden rakentaminen ja ylläpito (L 555/2006).

Radan suurin nopeus on radan poikkileikkauksessa suurin nopeus, jonka RHK sallii vähintään yhdellä raiteella (RHK 2006a).

Ratakapasiteetti on rataverkon ominaisuuksista johtuva aikaan sidottu rautatiereitin junaliikenteen välityskyky (L 555/2006).

Ratakapasiteetin käyttöaste on osuus ajallisesti, joka on varattu liikenteen käyttöön (UIC 2004).

Ratatyö on työtä, joka vaikuttaa radan rakenteisiin, aiheuttaa häiriöitä turvalaitteiden toimintaan tai muuten estää tai haittaa liikennettä (RHK 2005a).

Rataverkko on Ratahallintokeskuksen hallinnassa oleva valtion rataverkko (L 555/2006).

Rautatie on kokonaisuus, johon kuuluvat rata ja liikennöinnin varmistamiseen liittyvät laitteet, rakenteet ja rakennukset. Lisäksi rautatiehen kuuluvat alueet, jotka tarvitaan välittömästi liikennöintiin tai radanpitoon (RHK 2006a).

Rautatieyritys on yksityisoikeudellinen yhtiö tai muu yhteisö, joka Euroopan talousalueella myönnetyn asianomaisen toimiluvan nojalla päätoimenaan harjoittaa rautatie-liikennettä ja jolla on hallinnassaan liikenteen harjoittamiseen tarvittavaa liikkuvaa kalustoa; myös yksinomaan vetovoimapalveluja tarjoava yhteisö (L 555/2006).

Tavaravirta on kahden liikennepaikan välinen yhdensuuntainen kuljetusmäärä aika-yksikköä kohti.

Toimitusaika on tilauksesta tavarankuljetukseen sovittuun paikkaan toimittamiseen käytössä oleva aika.

Tonnikilometri on tavaratonnin kilometrin pituinen kuljetusmatka (RHK 2007).

Verkkoselostus on RHK:n vuosittain julkaisema raportti, jossa kuvataan rataverkolle pääsyn edellytykset, valtion rataverkko, ratakapasiteetin jakamismenettely, rautatie-yrityksille tarjottavat palvelut ja ratamaksu (RHK 2006c).

Ylikuormitettu ratakapasiteetti on rautatiereitti, jolle ei voida osoittaa haettua ratakapasiteettia ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamisesta huolimatta (L 555/2006).

EU	Euroopan Unioni
JKV	Junien kulunvalvonta
Jt	Junaturvallisuussääntö
Jtt	Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet
JUSE	Junien seurantajärjestelmä
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
LM	Liikenneministeriö
ProRail	Hollannin rataverkon haltija
RHK	Ratahallintokeskus
UIC	International Union of Railways

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Rautatieliikenteelle on ominaista pitkälinen suunnitelmallisuus. Liikenteenhoito edellyttää yksityiskohtaista ennakkosuunnittelua sekä hyvää kokonaisuuden hallintaa, jotta rataverkolle sidottu liikenne sujuisi joustavasti ja turvallisesti. Junien nopeudet, etäisyydet, kohtaamiset ja pysähdykset ovat tarkasti suunniteltuja. Mitä laajempi rataverkko ja suuremmat liikennemäärät, sitä suurempia vaatimuksia asetetaan toiminnan suunnitelmallisuudelle. Tämä ei johdu pelkästään liikenneteknisistä syistä, vaan yhä tärkeämpiä ovat myös taloudelliset syyt, toiminnan tehokkuus sekä liikenteen täsmällisyys.

Aikataulut muodostavat rautateillä suunnitelmallisen liikenteen perustan. Asiakkaille ne kuvaavat rautatieyrityksen tuotteen ja ovat lupaus liikennöidä tietyssä aikana tiettyjen liikennepaikkojen välillä. Rautatieyritykselle aikataulusuunnittelu vastaa yrityksen tuotantosuunnitelman laatimista. Rautatieliikenteen suunnittelu-prosessissa aikataulusuunnittelulla on keskeinen rooli. Aikataulut yhdistävät infrastruktuurin, liikenteen ja matkustajat ja vaikuttavat muun muassa ratakapasiteettiin, palvelutasoon, liikenteen täsmällisyyteen sekä asiakastytyväisyyteen.

Vuonna 1862 matka Helsingistä Hämeenlinnaan kesti junalla 4 tuntia 40 minuuttia. Nykyisin vastaava matka taittuu nopeimmillaan alle tunnissa. Aikataulusuunnittelu on jatkuva prosessi, jonka tulee sopeutua yhteiskunnassa ja rautatiesektorilla tapahtuviin muutoksiin. Tällä hetkellä rautatieliikenne on mielenkiintoisessa kehitysvaiheessa niin Suomessa kuin muuallakin Euroopassa. Viime aikoina EU on pyrkinyt voimakkaasti lisäämään ympäristöystävällisen ja turvallisen rautatieliikenteen markkinaosuutta. Yhtenä EU:n liikennepolitiikan keinona on ollut rautatiemarkkinoiden asteittainen avaaminen kilpailulle. Suomessa kansallinen rautatietavaraliikenne avautui kilpailulle vuoden 2007 alussa.

Kilpailun avautuminen tuo omat haasteensa aikataulusuunnitteluun, mikäli rataverkolle tulee useita toimijoita. Lukuisten muiden muuttujien lisäksi rautatieyritysten tulee tällöin ottaa huomioon aikataulusuunnittelussa myös muiden toimijoiden ratakapasiteettitarpeet. Tähän asti rataverkon ainut toimija, VR Osakeyhtiö (VRO), on suunnitellut omat aikataulurakenteensa ja hakenut sen mukaan kapasiteettia Ratahallintokeskukselta (RHK). Vastuu omien aikataulujen ja muun tuotannon suunnittelusta on jatkossakin rautatieyrityksillä RHK:n vastatessa vain rataverkon hallinnoinnista sekä ratakapasiteetin oikeudenmukaisesta jakamisesta. Eri toimijoiden ratakapasiteettihakemusten yhteensovittaminen siirtää vastuuta rautateiden aikataulujärjestelmästä kuitenkin RHK:lle. Varsinaista aikataulusuunnittelua ei RHK:ssa tulla jatkossakaan tekemään, mutta selvää on, että RHK:lta vaaditaan jatkossa laajempaa aikatauluosaamista.

Tästä saadaan työn ensimmäinen tavoite:

Rautatieliikenteen aikataulusuunnitteluprosessin sekä aikataulusuunnittelussa huomioon otettavien tekijöiden kuvaaminen.

Kuluttajien vaatimustason nousu yhteiskunnan yleisen kehittymisen myötä on nostanut asiakkaiden täsmällisyysvaatimuksia. Samaan aikaan, kun rautatieliikenteen markkinaosuutta pyritään nostamaan, junien lisääntynyt määrä, kasvaneet nopeuserot, pyrkimys matka-aikojen lyhentämiseen sekä yhteyksien parantamiseen on tehnyt aikatauluista entistä tiukempia ja lisännyt aikataulusuunnittelun haasteita. Ongelmana on, miten olemassa oleva rajallinen ratakapasiteetti saadaan hyödynnettyä parhaalla mahdollisella tavalla siten, ettei palvelun laatu kärsi ja rautatieliikenteen houkuttelevuus heikkene.

Työn toisena tavoitteena on:

Kuvata, mistä tekijöistä rautatieliikenteen täsmällisyys muodostuu ja selvittää, mikä on erityisesti aikataulusuunnittelun merkitys täsmällisyyden kannalta.

Työn aikana rautatieliikenteen täsmällisyys on ollut paljon esillä tiedotusvälineissä. Liikenteen täsmällisyys ja oikoradan käyttöönoton myötä uudistuneet aikataulut ovat saaneet runsaasti kritiikkiä. Jatkossa kapasiteetin käyttöasteen ja aikataulujen luotettavuuden väliseen riippuvuuteen tulee kiinnittää yhä enemmän huomiota. Mitä enemmän rataverkolla liikkuu junia, sitä haavoittuvaisemmaksi järjestelmä käy erilaisille häiriötekijöille. Aikataulujen analysointimenetelmien avulla voidaan arvioida eri aikatauluvaihtoehtojen häiriönsietokykyä tai investointien vaikutusta liikenteen täsmällisyyteen.

Työn kolmas tavoite on:

Selvittää, minkälaisia aikataulujen ja täsmällisyyden analysointityökaluja ja -menetelmiä on kehitetty. Mitkä ovat eri menetelmien edut, haitat, rajoitukset ja mahdolliset sovellusalueet.

Tarkan ja luotettavan liikennetiedon kerääminen ja analysointi on olennainen osa rautatieliikenteen suunnitteluprosessia ja aikataulusuunnittelua. Yleensä aikataulut perustuvat hyvin pitkälle edellisen kauden aikatauluihin, jolloin tietoa toteutuneesta liikenteestä ja sen täsmällisyydestä voidaan hyödyntää suunniteltaessa uusia aikatauluja. Liikenteen toteumatiedon analysointi lisää aikataulujen rakenteen ja riippuvuuksien ymmärtämystä, jolloin liikenteen pullonkauloja voidaan paikallistaa ja yleisistä häiriötekijöistä ja myöhästymisistä tehdä johtopäätöksiä.

Työn neljäs ja viimeinen tavoite on:

Selvittää, miten rautatieliikenteen täsmällisyyttä tulisi mitata ja miten täsmällisyystietoa voidaan hyödyntää erityisesti aikataulusuunnittelussa ja liikenteen täsmällisyyden parantamisessa.

1.2 Tutkimusote ja työssä käytetyt menetelmät

Suomessa liiketaloustieteessä tutkimusotteiden perusrhmittelyksi on vakiintunut Neilimon ja Näsin (1980) esittämä jako käsiteanalyttiseen, nomoteettiseen, päätöksentekometodologiseen ja konstruktiiiviseen tutkimusotteeseen (kuva 1). Toisinaan käytössä on myös viides, niin sanottu toiminta-analyttinen tutkimusote, joka on hyvin lähellä konstruktiiivista tutkimusotetta. Kaaviossa teoreettinen ja empiirinen kuvaavat erilaisia tiedon hankintatapoja. Empiirisessä tutkimuksessa kerätty havaintoaineisto on keskeisessä osassa. Teoreettinen tutkimus taas perustuu lähinnä päättelyyn ja empiria

voi olla mukana ainoastaan välillisesti esimerkiksi sovellusesimerkkien muodossa. Tämän tutkimuksen luonne on lähinnä teoreettinen.

	Teoreettinen	Empiirinen
Deskriptiivinen	Käsiteanalyttinen tutkimusote	Nomoteettinen tutkimusote
Normatiivinen	Päätöksentekometodologinen tutkimusote	Konstruktiivinen tutkimusote

Kuva 1. Liiketaloustieteen tutkimusotteet (Neilimo & Näsi 1980).

Käsitteiden deskriptiivinen ja normatiivinen pohjana ovat tiedon eri käyttötarkoitukset. Normatiivinen tutkimus on tavoitehakuista ja pyrkii löytämään vastauksia kysymyksiin, ”miten tulisi olla” tai ”miten tulisi toimia”. Deskriptiivisessä eli toteavassa tutkimuksessa pyritään selittämään, miten asiat ovat. Tarkoituksena on jäsenellä jo olemassa olevaa tietoa ymmärrettävällä tavalla. Tutkimustulokset voivat olla joko toteavia tai suosittelevia. Tämä työ on lähinnä toimintaa kuvaava ja analysoiva deskriptiivisluonteinen tutkimus. (Neilimo & Näsi 1980)

Työn tutkimusote on enemmän käsiteanalyttinen kuin päätöksentekometodologinen. Tässä tutkimuksessa teoreettisluontoisella analysoinnilla, päättelyllä ja pohdiskelulla on keskeinen rooli, mutta empirian osuus rajoittuu vain sovellusesimerkkeihin ja empiiriseen tietoon tutkittavasta ilmiöstä. Käsiteanalyttisen tutkimusotteen tarkoitus on ilmiön ymmärtäminen ja taustana sille on joko aiempi käsiteanalyttinen tutkimus tai empiirinen tutkimus. Työ perustuu lähinnä asiantuntijahaastatteluihin, kirjallisuusselvityksiin sekä alan yleiseen tutustumiseen muun muassa kokouksiin osallistumalla. Tutkimuksen päätöksentekometodologinen luonne korostuu aikataulujen analysointia ja täsmällisyyden mittaamista käsittelevissä osioissa. Työssä pyritään myös selvittämään täsmällisyyteen vaikuttavien tekijöiden kausaalisia yhteyksiä, joten siinä on myös piirteitä nomoteettisesta tutkimusotteesta, vaikka varsinaista empiiristä aineistoa ei kerätäkään. (Neilimo & Näsi 1980)

1.3 Työn rajaus ja rakenne

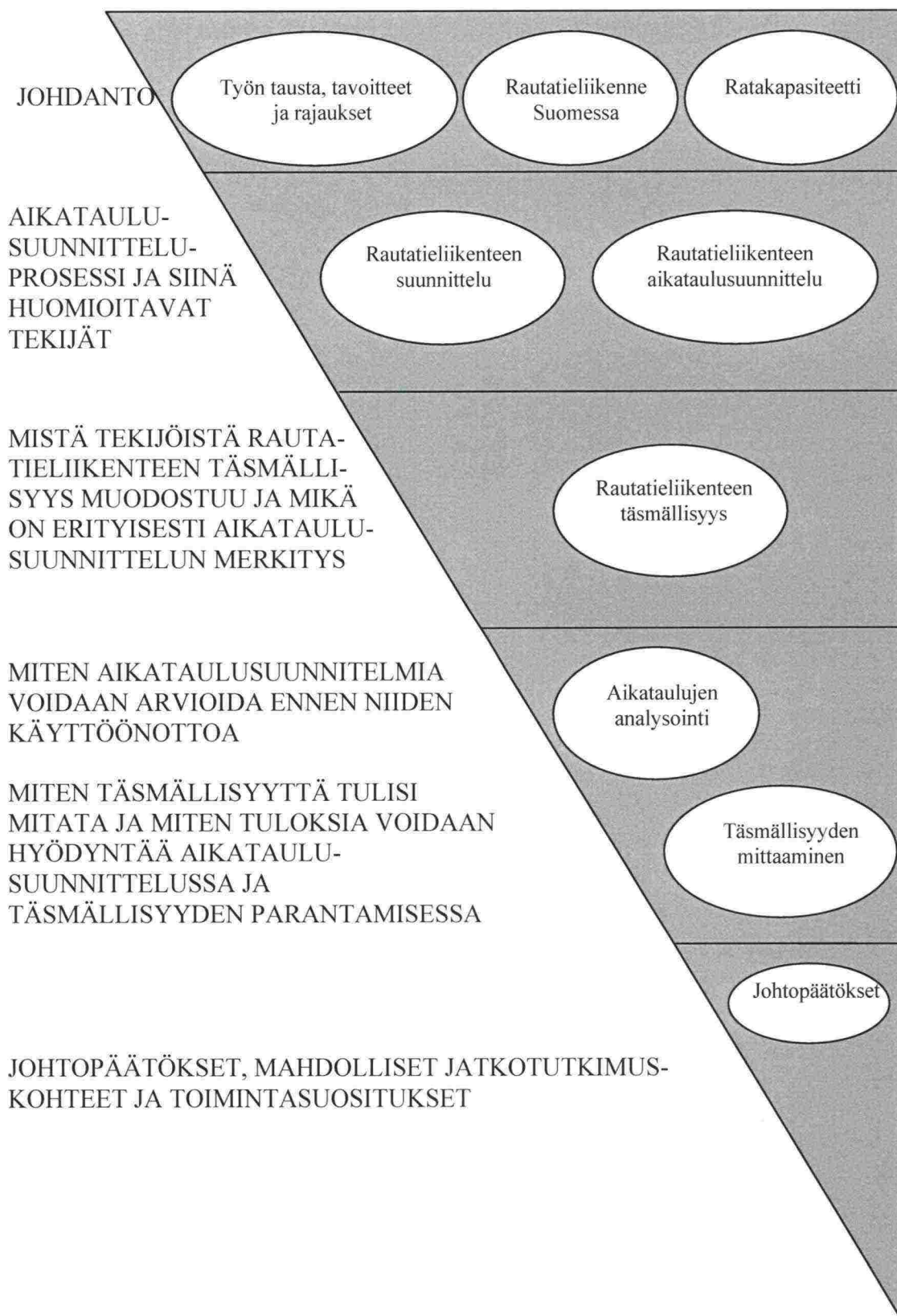
Johdannon lisäksi työ koostuu kahdeksasta muusta luvusta. Luvussa 2 esitellään Suomen rautatiejärjestelmä sekä alan keskeiset toimijat ja heidän tehtävänsä. Luvussa käydään myös läpi tulevaisuuden kehitystrendejä ja niiden vaikutuksia rautatie-liikenteeseen ja sen kilpailukykyyn. Luku 3 käsittelee ratakapasiteettia. Luvussa kuvataan ratakapasiteetin käsite sekä siihen vaikuttavat tekijät ja kerrotaan, millä tavalla ratakapasiteetin käsite liittyy aikataulusuunnitteluun. Lopuksi esitellään EU:n ja

Suomen lainsäädännön vaatimukset kapasiteetin jakamiseksi sekä nykyinen kapasiteetinjakoprosessi.

Luvussa 4 kuvataan rautatieliikenteen aikataulusuunnitteluprosessi ja tuodaan esille aikataulusuunnittelun keskeinen rooli ja merkitys kyseisessä prosessissa. Lisäksi esitellään rautatieliikenteen aikataulusuunnittelun erityispiirteet ja pohditaan, minkälainen on hyvä aikataulu. Luvussa 5 esitellään aikataulusuunnittelussa huomioon otettavat tekijät. Ajatuksena on, että lukija saa hyvän kokonaiskuvan rautatiemaailmasta (liikenne, rata, turvalaiteet, kalusto jne.) ja pystyy sisäistämään aikataulusuunnittelun lainalaisuudet. Työssä aikataulusuunnittelua käsitellään yleisellä tasolla eikä sitä ole rajattu koskemaan esimerkiksi RHK:n yhteensovittamisprosessia tai VR:n aikataulusuunnitteluprosessia. Työssä tarkastellaan sekä henkilö- että tavaraliikennettä.

Luvussa 6 kuvataan, mistä tekijöistä rautatieliikenteen täsmällisyys muodostuu sekä minkälaisia kustannuksia epätäsmällisyys aiheuttaa. Lisäksi esitellään, millä tavalla Suomessa ja eri maissa täsmällisyyttä mitataan ja vertaillaan eri maiden rautatieliikenteen täsmällisyyttä. Lopuksi pohditaan, miksi Japanin rautatieliikenteen täsmällisyys on omaa luokkaansa, vaikka toimintaympäristö on hyvin haastava.

Luvussa 7 esitellään ja vertaillaan eri menetelmiä aikataulujen häiriöherkkyyden ja täsmällisyysinvestointien analysoimiseksi. Menetelmiä ei sovelleta käytännössä, mutta esimerkkejä eri tutkimuksista ja niiden tuloksista annetaan. Tarkoituksena on lähinnä pohtia eri menetelmien etuja, haittoja, rajoituksia ja mahdollisia sovellusalueita. Menetelmien matemaattiset perusteet käsitellään pintapuolisesti. Luvussa 8 kerrotaan, millä tavalla liikenteen täsmällisyyttä voidaan ja tulisi mitata. Lisäksi esitellään, miten tuloksia voidaan hyödyntää aikataulusuunnittelussa ja liikenteen täsmällisyyden parantamisessa. Luvussa esitellään myös, miten rautatieliikenteen täsmällisyyttä mitataan tällä hetkellä Suomessa. Luku 9 sisältää johtopäätökset, jatkotutkimusehdotukset ja työn arvioinnin. Työn rakenne on esitetty kuvassa 2.

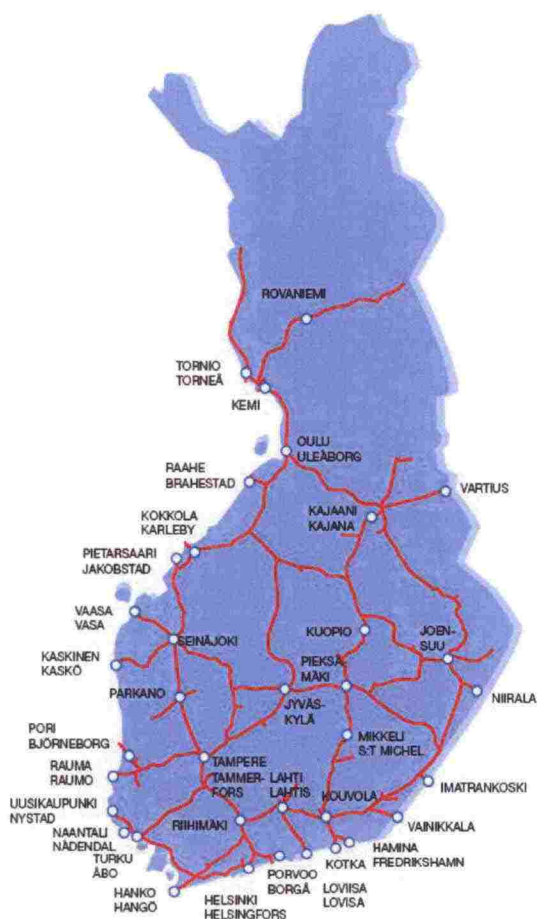


Kuva 2. Työn rakenne.

2 RAUTATIELIIKENNE SUOMESSA

2.1 Rautatieliikenteen merkitys Suomen liikennejärjestelmässä

Suomen 5900 km pitkä rataverkko yhdistää noin 340 liikennepaikkaa toisiinsa (kuva 3). Rataverkosta noin 90 % on yksiraiteista ja 45 % sähköistetty. Päivittäin rataverkolla liikennöi noin 320 kaukojunaa, 850 lähiliikenteen junaa ja 500 tavarajunaa. (RHK 2006b, VR 2007)



Kuva 3. Suomen rataverkko (RHK 2006b).

Suomen liikennejärjestelmässä rautateiden rooli on suurten kaupunkien välisten runko-yhteyksien ja pääkaupunkiseudun lähiliikenteen tarjoaminen. Lähiliikenteen osuus työmatkaliikenteessä on huomattava. Vuonna 2006 tehtiin 65 milj. junamatkaa (3,6 miljardia henkilökilometriä), joista 80 % lähiliikenteessä. Henkilöliikenteessä juna-kilometrejä kertyi 33 miljoonaa, joka on noin kaksi kolmannesta koko rautatieliikenteen liikennesuoritteesta. Henkilöliikenteen markkinaosuus on noin 5 %, mikä on kansainvälisesti tarkasteltuna keskitasoa. (RHK 2006b, RHK 2007)

Teollisuuden kuljetuksissa rautatieliikenne on kilpailukykyisimmillään pitkissä ja raskaissa perusteollisuuden kuljetuksissa ja sen merkitys Suomen elinkeinoelämän kannalta on hyvin suuri. Tavaraliikenteen kuljetussuorite vuonna 2006 oli 11 miljardia tonnikilometriä ja junakilometrejä kertyi 18 miljoonaa, joka on noin kolmannes koko rautatieliikenteestä. Tavaraliikenteen markkinaosuus on noin neljännes Suomen

tavaraliikenteestä, mikä on kansainvälisesti tarkasteltuna korkea. (RHK 2006b, RHK 2007)

2.2 Rautatiesektorin toimijat ja niiden roolit

Suomessa rautatiesektorin keskeiset toimijat ovat:

- Liikenne- ja viestintäministeriö
- Ratahallintokeskus
- Rautatievirasto
- Rautatieyritykset (tällä hetkellä VR Osakeyhtiö ainoa liikennöitsijä)
- Radanpidon suunnittelu-, rakentamis- ja kunnossapitopalveluita tarjoavat yritykset

Liikenne- ja viestintäministeriö (LVM) vastaa valtioneuvostotasolla rautatieasioista (262/2003). LVM toimii rautatieliikenteen toimilupaviranomaisena (555/2006) ja vastaa rautatieinfrastruktuurin ja radanpidon määrärahoista. Radanpitäjänä ja toisena rautatieviranomaisena toimii vuonna 1995 VR:n yhtiöittämisen yhteydessä perustettu Ratahallintokeskus (RHK). RHK on LVM:n alaisuudessa toimiva väylävirasto, joka vastaa rataverkon ylläpidosta, kehittämisestä, ratakapasiteetin jakamisesta sekä liikenteenohjauksesta. RHK hallinnoi rataverkkoa siihen kuuluvine laitteineen, rakenteineen ja maa-alueineen. RHK toimii tilaajavirastona, joka ostaa kunnossapito- ja rakentamistyöt sekä kiinteistönhoidon ja liikenteenohjauksen palvelut ulkopuolisilta yrityksiltä.

Alan turvallisuuteen liittyvät asiat on keskitetty rautatieturvallisuudirektiivin edellyttämään Rautatievirastoon, joka aloitti toimintansa syksyllä 2006. Rautatievirasto myöntää turvallisuustodistukset, rautatiejärjestelmien käyttöönottoluvat ja ylläpitää kalustorekisteriä. Lisäksi virasto toimii rautatiealan sääntelyelimenä ja hoitaa rautatiehenkilöstön kelpoisuus- ja koulutusasioita. Rautatievirasto valvoo rautatiealalla toimijoiden toimintaedellytysten tasapuolisuutta ja syrjimättömyyttä ja ratkaisee mahdollisia ristiriitatilanteita. Rautatievirasto vastaa myös junien lipuntarkastuksista. (Rautatievirasto 2006)

VR Osakeyhtiö (VRO) on tällä hetkellä ainut rautatieliikennettä harjoittava rautatieyritys Suomessa. Kansallinen rautatietavaraliikenne avautui kilpailulle Suomessa vuoden 2007 alussa EU:n toisen rautatiepaketin vaatimusten mukaisesti, jonka jälkeen myös muilla rautatieyrityksillä on ollut oikeus harjoittaa tavaraliikennettä Suomen rataverkolla. Rautatiemarkkinoiden kilpailun valvojana ja edistäjänä toimii kauppa- ja teollisuusministeriön alainen kilpailuvirasto (711/1998). Radanpidon suunnittelu-, rakentamis- ja kunnossapitopalveluja tarjoavista yrityksistä merkittävin on VR-konserniin kuuluva VR-Rata. Muita merkittäviä toimijoita ovat muun muassa Destia sekä Eltel Networks.

2.3 Rautatieliikenteen kilpailukyky ja tulevaisuuden kehitystrendit

Juna on sekä henkilö- että tavaravirtojen kustannustehokas, ympäristöystävällinen ja turvallinen kuljetusmuoto. Rautatiekuljetusten luonnollinen rooli on toimia kustannustehokkaana ja nopeana runkokuljetusmuotona yhteysväleillä, joille voidaan koota vahva, mieluiten kahdensuuntainen tavaravirta. Tavaraliikenteessä rautatieliikenteellä on Suomessa kansainvälisesti korkea, noin 25 %:n markkinaosuus EU-maiden keski-

arvon ollessa 16 %. Tilastojen valossa rautatiekuljetusten kilpailukyvyyn kehitys on ollut hyvä, sillä Suomessa ei ole tapahtunut vastaavaa markkinaosuuden laskua kuin muualla Euroopassa. Suomessa rautatiekuljetusten kysyntä on hyvin riippuvainen suhdanteista ja teollisuustuotannon kehityksestä. (RHK 2006b)

Pääomia sitovien varastojen alasajon sekä toimitusaikavaatimusten kiristymisen vuoksi toimituserät ovat jatkuvasti pienentymässä ja lähetystiheydet kasvamassa. Esimerkiksi teräksen tavanomainen toimitusaika on laskenut 1980-luvulta 12 viikosta 2–3 viikkoon. Nykyisin monet toimitusketjut on viritetty toimimaan tarkasti aikataulutettuna ja ilman varmuusvarastoja, jolloin toimitusketjun haavoittuvuus lisääntyy ja liikenteen täsmällisyysvaatimukset kasvavat. Muutamissa suomalaisissa yrityksissä rautatiekuljetus voidaan katsoa jo osaksi tuotantoprosessia (Rautaruukki, UPM:n Jämsänkosken paperitehtaat). Jatkossakin kuljetuskustannus tulee olemaan selvästi merkittävin kuljetusmuodon valintaan vaikuttava tekijä rautatiekuljetuksissa, mutta sen painoarvo tulee pieneneään ja vastaavasti laadullisten tekijöiden merkitys kasvaa. Esimerkiksi liian pitkillä kuljetusajoilla ei pystytä toimimaan kilpailukykyisesti. (Iikkanen & Siren 2005, RHK 2004a, RHK 2006b)

Yleisesti ottaen edellä mainitut tekijät heijastuvat negatiivisesti rautatiekuljetusten kilpailukykyyn erityisesti vaunukuormaliikenteessä. Kun kyseessä on jatkuva suuri tavaravirta, voi frekvenssin tihentyminen johtaa myös rautatiejärjestelmän tehostumiseen, kun esimerkiksi satamatoiminnot saadaan tehokkaampaan käyttöön tavaravirtojen muuttuessa tasaisemmiksi. Tuotantorakenteen muutokset eivät välttämättä merkitse rautatiekuljetusten osuuden pienenemistä, sillä kehittyvät korkean teknologian alat synnyttävät hyvin vähäisen kuljetustarpeen perusteellisuuteen verrattuna. Raskaan teollisuuden siirtyminen pois Suomesta halvempien tuotantokustannusten maihin lähemmäksi raaka-ainelähteitä ja suuria kuluttajaryhmiä heijastuu suoraan rautatiekuljetuksiin. (Iikkanen & Siren 2005)

Markkinaosuuden säilymisen kannalta tärkein painopistealue on rautatiekuljetusten parhaimpien ominaisuuksien eli perusteellisuuden kokojunakuljetusten kehittäminen. Näissä kuljetuksissa rautatiekuljetusten kilpailukyvyyn oletetaan paranevan, sillä asiakasjunilla ja muilla suorilla junilla pystytään vastaamaan kustannustehokkaasti kiristyviin toimitusaika- ja täsmällisyysvaatimuksiin sekä lähetysfrekvenssien kasvuun. Perusteellisuuden suotuisan kehityksen jatkuminen vuoksi rautatiekuljetusten osuus tulee todennäköisesti pysymään nykyisellä tasolla tai jopa hieman kasvamaan. Suotuisan kysynnän edellytyksenä on kuitenkin rautatieliikenteen kyky vastata logististen kehitystrendien, kuljetusten suuryksiköitymisten ja kilpailun avautumisen asettamiin haasteisiin (Iikkanen & Siren 2005, Permala 2007).

Henkilöliikenteen puolella junan osuus kotimaan henkilöliikenteen matkasuoritteesta on noin 5 %, mikä on eurooppalaista keskitasoa. Viimeaikainen junaliikenteen kasvu on tapahtunut erityisesti pääkaupunkiseudun lähiliikenteessä sekä kaukoliikenteen pääreiteillä. Kotimaan henkilöliikenteessä rautatieliikenteen markkinaosuus on kuitenkin laskenut autoliikenteen kasvun myötä. Henkilöliikenteen puolella toimintaa on pyrittävä tehostamaan, jotta rautatieliikenne pärjäisi yhä tiukkenevassa kilpailutilanteessa ja pystyisi vastaamaan asiakkaiden asettamiin tiukempiin vaatimuksiin koskien kuljetusten nopeutta ja täsmällisyyttä. (RHK 2006b)

Suomen rataverkon keskeisimmät ongelmat ovat ikääntyminen ja ratakapasiteetin puute, sillä rataverkon kunto ja palvelutaso eivät vastaa kysynnän tarpeita. Rataverkolla on pullonkauloja, jotka estävät liikenteen lisäämisen tai hidastavat liikennettä. Osa tavaraliikenteestä joudutaan hoitamaan silloin, kun henkilöliikenne on vähäisintä ja siksi tavarajunien aikatauluja ei aina voida toteuttaa teollisuuden logistisiin tarpeisiin nähden parhaalla mahdollisella tavalla. Välytyskyvyn puute lisää aikataulusuunnittelun haasteita ja vaikuttaa negatiivisesti täsmällisyyteen, kuljetusaikoihin, kaluston käytön tehokkuuteen sekä kuljetuskustannuksiin. (RHK 2006b)

2.4 Kilpailun avautuminen ja aikataulusuunnittelu Suomessa

Kansallinen rautatietavaraliikenne avautui kilpailulle Suomessa 1.1.2007. Taustalla on ajatus, että kilpailun avaaminen ja markkinoilletulon esteiden poistaminen kääntäisi rautatieliikenteen markkinaosuuden nousuun EU:n alueella. Asiakkaat näkevät kilpailun avautumisen merkittävänä mahdollisuutena parantaa rautatiekuljetusten kilpailukykyä kilpaileviin kuljetustapoihin nähden. Kilpailun kiristyessä asiakkaiden vaatimukset kuljetuspalveluiden suhteen kasvavat ja pakottavat liikennöitsijät tarjoamaan entistä nopeampia ja tiheämpiä kuljetusyhteyksiä. Jatkossa rautatieyritysten tulee ottaa huomioon paremmin yksittäisten asiakkaiden toivomukset ja näkökohdat. (Iikkanen & Siren 2005)

Toistaiseksi rataverkon ainut toimija VRO on suunnitellut omat aikataulusuunnitelmansa ja hakenut sen mukaan ratakapasiteettia RHK:lta. VRO:ssa aikataulusuunnittelusta vastaa käyttöosaston junaliikennöintiyksikkö. Myös tulevaisuudessa rautatieyritykset ovat vastuussa aikataulujen ja muun tuotannon suunnittelusta RHK:n vastatessa rataverkon hallinnoinnista sekä ratakapasiteetin oikeudenmukaisesta jakamisesta. Ruotsin väyläviranomaisen Banverket on ottanut aktiivisemmän roolin liikenteen suunnittelussa. Banverket laatii aikatauluehdotukset rautatieyritysten ja radanpidon toiveiden pohjalta (Banverket 2007b, Hovi 2007).

Kilpailun avautuminen tuo omat haasteensa aikataulusuunnitteluun, mikäli rataverkolle tulee useita toimijoita. Lukuisten muiden muuttujien lisäksi aikataulusuunnittelussa tulee tällöin ottaa huomioon myös muiden toimijoiden kapasiteettitarpeet. Kun markkinoille pyrkivä rautatieyritys pyytää RHK:lta tietoja käytettävissä olevasta ratakapasiteetista omaa liikennesuunnitteluun varten, RHK:lla on oltava valmis toimintamalli, jonka mukaan eri rautatieyritysten ratakapasiteettitoiveet kerätään ja viestitään muille rautatieyrityksille. Esillä on ollut ainakin ajatus niin sanotun aikataulufoorumin perustamisesta, missä eri toimijoiden kapasiteettitarpeita voitaisiin kartoittaa ja päällekkäisiä tarpeita sovittaa. (Väänänen 2006)

Väänänen (2006) tekemässä selvityksessä suurin osa kyselyyn osallistuneista toivoi RHK:n osallistuvan aktiivisesti rautatieliikenteen aikataulusuunnitteluun. Jatkossakaan RHK ei tule tekemään varsinaista aikataulusuunnittelua, vaan se ainoastaan yhteensovittaa päällekkäiset hakemukset. Eri toimijoiden ratakapasiteettihakemusten (aikataulujärjestelmien) yhteensovittaminen siirtää vastuun rautateiden aikataulujärjestelmästä kuitenkin RHK:lle. RHK:n on pystyttävä hallitsemaan VRO:n aikataulutietojen lisäksi myös kaikki muu ratakapasiteetin käyttö, kuten museoliikenteen, urakoitsijoiden ja uusien rautatieyritysten tarvitsema kapasiteetti. RHK:lla on oltava kokonaisnäkemys siitä, mitä rataverkolla tapahtuu ja siihen tarvitaan omaa aikataulu- ja

liikennetietokantaa. Tätä varten RHK:ssa on käynnistetty ratakapasiteetin hallinnan tietojärjestelmäprojekti (LIIKE). Tuleva tietojärjestelmä koostuu kaupallisesta aikataulusuunnitteluohjelma Viriatosta (SMA & Partner) ja sen rinnalle rakennettavasta tietojärjestelmästä. (Mäkitalo 2007, Natunen 2007)

Viriatolla tulee olemaan keskeinen rooli tulevassa ratakapasiteetin hallintajärjestelmässä. Viriatoa voidaan käyttää strategisen suunnittelun lisäksi myös koko aikataulukauden pituiseen aikataulusuunnitteluun ja operatiiviseen suunnitteluun. Aikataulusuunnittelun lisäksi ohjelmassa on suunnittelua helpottavia ominaisuuksia, kuten dynaaminen ajoajan laskenta ja konfliktien tunnistus. Lisäksi sen avulla voidaan tehdä liikennepaikkakohtaista raiteiden käyttöanalyysiä sekä suunnitella henkilöstö- ja kalustokiertoja. Ainakaan toistaiseksi ohjelman avulla aikataulusta ei voida etsiä vapaata kapasiteettia, eikä siinä ole ratakapasiteetin jakamiseen ja yhteensovittamiseen liittyvää toiminnallisuutta. (Nyby 2006, Pitkänen 2007)

3 RAUTATIELIIKENTEEN SUUNNITTELU

3.1 Ratakapasiteetti

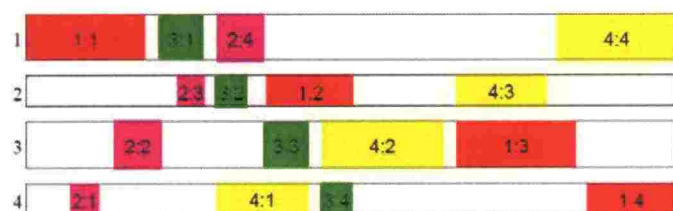
3.1.1 Ratakapasiteetin käsite

Aikataulusuunnitteluun liittyy olennaisesti ratakapasiteetin käsite, sillä periaatteessa aikataulusuunnittelu on ratakapasiteetin jakoa junien kesken. Rautatielain (555/2006) mukaan ratakapasiteetti kuvaa rataverkon ominaisuuksiin perustuvaa rautatiereitin juna-liikenteen välityskykyä aikayksikköä kohti. Jaettavissa oleva ratakapasiteetti kuvaa sitä osaa liikenteenvälityskyvystä, joka jää jäljelle radanpidon jälkeen, vaikka todellisuudessa radanpito käyttää myös ratakapasiteettia. Ratakapasiteetti muodostuu infrastruktuurista, liikkuvan kaluston ominaisuuksista sekä aikataulurakenteesta. Se on suhteellinen käsite, minkä vuoksi sille ei voida määritellä yksiselitteisesti arvoa. (UIC 2004)

Teoreettisella ratakapasiteetilla tarkoitetaan kapasiteetin teoreettista maksimiarvoa. Rataosan liikennemäärä voi ainoastaan hetkellisesti kasvaa teoreettisen ratakapasiteetin suuruiseksi. Käytännön ratakapasiteetti kertoo suurimman mahdollisen liikennesuorituksen arvon siten, että kapasiteetin maksimimäärä on sidottu liikennöinti-aikoihin. Käytännön ratakapasiteetti ottaa huomioon myös radanpidon tarvitseman kapasiteetin. Rautatielaissa (555/2006) mainitulla ylikuormittuneella ratakapasiteetilla tarkoitetaan sellaista rautatiereittiä, jolle ei voida myöntää kapasiteettia yhteensovittamisesta huolimatta. (Viegas et al. 2003)

Liikenteenvälityskyky on vakiintunut ratakapasiteetin mittariksi ja se ilmaisee rataosan läpäisykyvyn junaa aikayksikköä kohti. Tässä yhteydessä juna voi tarkoittaa pelkkää veturia tai mitä tahansa henkilö- tai tavarajunaa. Liikenteenvälityskyky ei siis huomioi kuljetettavien tavaroiden tai henkilöiden määrää, toisin kuin ratakapasiteetin toinen mittari maksimisuorite. Maksimisuorituksen mittayksikkönä käytetään tonni- tai henkilökilometriä aikayksikköä kohti. (Mäkitalo 2000)

Ratakapasiteetin käyttö tarkoittaa rataosalla tapahtuvaa tai sinne suunniteltua liikennettä. Käytännössä tämä tarkoittaa tietylle junalle tai ratatyölle osoitettua aikaa ja paikkaan sidottua käyttöoikeutta (kuva 4). Tätä käyttöoikeuden myöntämistä nimitetään ratakapasiteetin jakamiseksi. Kuvaan 4 on merkitty eri väreillä junien varaamat ratakapasiteetit eri rataosilla. Vaaka-akselilla on aika ja pystyakselilla rataosat 1–4. (Mäkitalo 2000)



Kuva 4. Ratakapasiteetin käyttö.

Kapasiteetin käyttöaste määritellään toteutuneen liikennemäärän suhteena kapasiteettiin. Se kuvaa ajallisesti sitä osuutta, jonka rataosa on varattu liikenteen käyttöön.

Kapasiteetin käyttöaste riippuu tarkasteltavasta ajanjaksosta ja esimerkiksi huipputunnin ja vuorokauden kapasiteetin käyttöasteet poikkeavat toisistaan. Sekaliikenne radan sopivana käyttöasteena pidetään 60 % ja käytännön maksimina 80 %. Jos kapasiteetin käyttöaste on lähellä 100 %, liikenteessä tulee olemaan hyvin todennäköisesti täsmällisyysongelmia, koska tällöin junien väliset marginaalit ovat tiukat ja yhden junan pienikin viivästyminen häiritsee muuta liikennettä hyvin paljon. (UIC 2004, Burkolter 2005)

3.1.2 Ratakapasiteettiin vaikuttavat tekijät

Ratakapasiteetti muodostuu useasta eri tekijästä, joiden yhteisvaikutuksesta maksimivälityskyky muodostuu. Infrastruktuurin osalta suurin yksittäinen kapasiteettiin vaikuttava tekijä on raiteiden lukumäärä. Kapasiteetti ei kuitenkaan kasva samassa suhteessa raiteiden lukumäärän kanssa, sillä kaksiraiteisen radan välityskyky on yli kaksi kertaa suurempi kuin yksiraiteisen. Myös junakohtauspaikkojen määrä, sijainti ja niiden väliset etäisyydet vaikuttavat ratakapasiteettiin. (Pachl 2002).

Yleensä kapasiteetin nosto tarkoittaa investointia infrastruktuuriin. Ratakapasiteetin lisääminen ei kuitenkaan aina tarkoita lisäraiteiden rakentamista. Yleensä turvalaitteet määrittävät, miten lähellä junat voivat kulkea toisiinsa nähden ja siten turvalaittejärjestelmä voi olla kapasiteettia rajoittava tekijä. Kulunvalvontajärjestelmää kehittämällä tai opastinväliä pienentämällä junat voivat ajaa lähempänä toisiaan, mikä lisää ratakapasiteettia. (Pachl 2002, UIC 2004)

Myös ratageometria ja nopeusrajoitukset vaikuttavat junanopeuksien kautta ratakapasiteettiin. Junan kiihtyvyysominaisuudet riippuvat veturin tehosta ja junan painosta. Kallistuvakoriset junat taas pystyvät ajamaan kaarteet nopeammin kuin perinteiset junat. Kiinteäsuojavälisellä suojastuksella varustetuilla radoilla opastinvälit ovat yleensä niin pitkiä, ettei jarruilla ja jarrutusmatkoilla ole vaikutusta kapasiteettiin. Ulkoisista tekijöistä säällä voi olla hyvinkin suuri merkitys ratakapasiteettiin. Esimerkiksi veden ja pudonneiden lehtien liukastamat raiteet heikentävät junan kiihtyvyyden ja jarrutusominaisuuksia. (Pachl 2002, UIC 2004)

Usein tavaraliikenteen, kaukoliikenteen ja lähiliikenteen junat jakavat saman rata-verkon. Rataverkolla liikennöi hyvin erilaisia junia, joiden pysähdyskäyttäytyminen ja nopeudet vaihtelevat paljon. Erilaisten junien sijoittelu aikatauluun eli aikataulurakenne vaikuttaa myös ratakapasiteettiin hyvin paljon (ks. kappale 5.4).

Esimerkki: Miten eri tekijät vaikuttavat ratakapasiteettiin

Kahden liikennepaikan välillä on 50 km pitkä rataosa. Junien keskinopeus tällä välillä on 120 km/h eli junilta kuluu 25 min välin kulkemiseen. Pysähdyksiin varataan aikaa viisi minuuttia, joten kukin juna varaa rataosuutta 25+5 min. Tällöin rataosan teoreettinen kapasiteetti on kaksi junaa tunnissa, jos rataosuus on yksiraiteinen ja junat kulkevat vastakkaisiin suuntiin. Mikäli junien nopeus nostetaan 200 km:iin/h, junien varaama aika on 15+5 min, jolloin teoreettinen kapasiteetti nousee kolmeen junaan tunnissa.

Yksiraiteisen rataosan kapasiteettia voidaan myös nostaa lisäämällä kohtauspaikka liikennepaikkojen välille. Jos junien nopeus on 120 km/h, varaavat junat rataosan nyt 12,5+5 minuutiksi, jolloin teoreettinen kapasiteetti nousee 3,4 junaan tunnissa. Jos junien nopeus on 200 km/h, nousee kapasiteetti 4,8 junaan tunnissa.

Eri suuntiin kulkevat junat voidaan sijoittaa eri raiteille, jos asemien välillä on kaksi-raiteinen rata, jolloin kapasiteettia rajoittavaksi tekijäksi tulee junaväli. Jos junien minimijunaväli on viisi minuuttia, nousee kapasiteetti/raide 12 junaan tunnissa eli yhteensä 24 junaan tunnissa. Junien kulkiessa eri nopeuksilla laskee kapasiteetti selvästi. Jos 120 km/h ja 200 km/h ajavat junat kulkevat vuorotellen, putoaa kapasiteetti/raide 4,8 junaan tunnissa. Mikäli raiteiden lukumäärä nostettaisiin neljään, voitaisiin junat erotella sekä nopeuden että kulkusuunnan mukaan, jolloin raidekohtainen kapasiteetti olisi jälleen 12 junaan/h.

Esimerkki osoittaa hyvin, miten raiteita lisäämällä saavutetaan mittakaavaetua, ts. kapasiteetti ei kasva lineaarisesti raiteiden lukumäärän kasvaessa. Kapasiteetti ei pelkästään riipu infrastruktuurista, vaan myös junien nopeudet vaikuttavat. Esimerkiksi pudottamalla nopeiden junien nopeuksia saadaan kapasiteettia parhaimmillaan nostettua 4,8 junasta 12 junaan. Yhteenveto tuloksista on esitettyä taulukossa 1.

Taulukko 1. Ratakapasiteetti raidetta kohti raidemäärän, nopeuden, nopeuserojen ja kohtauspaikan mukaan (-/x, kohtauspaikalla ei vaikutusta ratakapasiteettiin).

Raiteiden lkm	Nopeus [km/h]	Kohtauspaikka	Kapasiteetti/raide [junaan/h]
1	120	-	2
1	200	-	3
1	120	x	3,4
1	200	x	4,8
2	120	-/x	12
2	200	-/x	12
2	120/200	-	4,8
2	120/200	x	6
4	120/200	-/x	12

3.1.3 Ratakapasiteetin jakaminen

Ratakapasiteettia haetaan RHK:lta kullekin aikataulukaudelle. Aikataulukausi alkaa vuosittain joulukuun toisena viikonvaihteena lauantain ja sunnuntain välisenä yönä ja päättyy seuraavana vuonna vastaavana aikana. Ratakapasiteettia voi hakea aikaisintaan 12 ja viimeistään 8 kuukautta ennen aikataulukauden alkua. Aikataulukauden aikana päätöksiin voidaan hakea muutoksia tiettyinä ajankohtina. Kiireellistä ratakapasiteettia (ns. ad hoc -hakemus) voidaan hakea myös muina kuin säädettyinä ajankohtina. Kapasiteetin hakuaikataulu on hieman ongelmallinen, koska kapasiteettia tulee hakea ennen kuin RHK tietää tarkasti haettavan aikataulukauden ratatöiden määrän ja laajuuden. (RHK 2007, 555/2006, 751/2006)

RHK laatii hakemusten perusteella ratakapasiteetin jakoehdotuksen (laissa aikataulu-ehdotus) viimeistään neljän kuukauden kuluttua hakuajan päättymisestä. Jakoehdotus perustuu ensisijaisesti haetun kapasiteetin myöntämiseen. RHK voi kuitenkin tarjota sellaista ratakapasiteettia, joka ei oleellisesti poikkea haetusta, mikäli samaa rata-

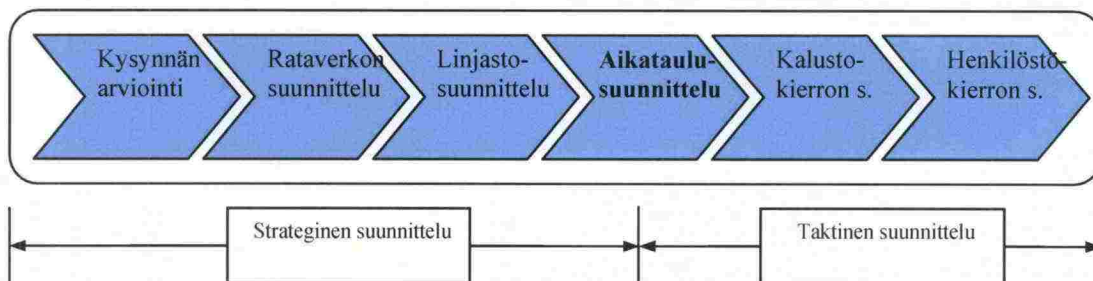
kapasiteettia on hakenut useampi hakija tai muutos tehostaa ratakapasiteetin käyttöä. Jos hakemusten yhteensovittaminen ei onnistu, RHK ratkaisee asian rautatielain etusijaisuusjärjestyksen mukaisesti. Kiireellinen ratakapasiteetti myönnetään, mikäli kapasiteettia on vapaana. RHK:n kapasiteettipäätöksiin voi hakea oikaisua sääntelyelimenä toimivalta Rautatievirastolta. (RHK 2007, 555/2006, 751/2006)

RHK tekee päätöksen liikenteeseen vaikuttavista ratatöistä ennen aikataulukauden alkua. Ratatöistä ja niiden kapasiteettitarpeista ilmoitetaan verkkoselostuksessa. Suunnitelmiin voi tulla muutoksia rahoituksen ja suunnittelun tarkentuessa, minkä vuoksi RHK ylläpitää ajankohtaista tietoa tulevan aikataulukauden työohjelmasta ja tiedottaa tästä kapasiteetin hakijoille säännöllisin väliajoin. (RHK 2006c)

3.2 Rautatieliikenteen suunnitteluprosessi

Rataverkolle sidotun liikenteen hoito vaatii yksityiskohtaista suunnittelua. Mitä laajempi rataverkko ja suuremmat liikennemäärät sitä suurempia vaatimuksia asetetaan toiminnan suunnitelmallisuudelle. Tämä ei aiheudu pelkästään liikenneteknisistä syistä, vaan yhä tärkeämpiä ovat myös taloudelliset syyt sekä toiminnan tehokkuus. Rataverkko ja kalusto sitovat runsaasti pääomia, mikä edellyttää resurssien tehokasta käyttöä. Rataverkolla ei kuitenkaan pyritä mahdollisimman korkeaan ratakapasiteetin käyttöasteeseen, vaan tavoitteena on, että liikenteen määrä ja laatu (täsmällisyys) olisivat tasapainossa.

Kuvassa 5 on esitetty rautatieliikenteen suunnitteluprosessin eteneminen ja aikataulusuunnittelun keskeinen rooli kyseisessä prosessissa. Rautatieliikenteen suunnittelun lähtökohtana on arvio tulevasta matkustus- ja kuljetuskysynnästä. Tämän jälkeen arvioidaan nykyisen rataverkon riittävyys kattamaan tulevaisuuden matkustaja- ja tavaraliikenteen tarpeet. Yleensä henkilöliikenne kuljettaa matkustajia kaupunkien keskustojen välillä, kun taas tavaraliikenteen kuljetukset suuntautuvat enemmän kaupunkien ulkopuolelle. Rataverkon tulee palvella hyvin sekä henkilö- että tavaraliikenteen tarpeita. Rataverkkosuunnittelussa voidaan myös arvioida vähäliikenteisten rataosien tulevaisuutta yhteiskuntataloudellisesta näkökulmasta. (Koolstra 2005, Lindner 2000, RHK 2006b)



Kuva 5. Rautatieliikenteen suunnitteluprosessi.

Henkilöliikenteen linjastosuunnitelma perustuu rataverkkosuunnitelmaan ja liikenteellisten tarpeiden hahmottamiseen. Se määrittelee junien pysähdyspaikat lähtö- ja määräasemien välillä sekä vuorovälit. Yleensä linjastosuunnitelma perustuu niin sanottuun

lähtö-määränpää-matriisiin, joka määrittelee matkustajamäärät minkä tahansa kahden aseman välillä. Linjastosuunnitelman merkitys palvelun houkuttelevuuden kannalta on suuri. Esimerkiksi, jos asiakas joutuu vaihtamaan junaa liian monta kertaa matkan aikana, hän saattaa valita vaihtoehdoisen matkustustavan. Sama pätee myös tavaraliikenteen puolella. Liian pitkillä kuljetusajoilla ei pystytä toimimaan kilpailukykyisesti. (Goossens et al. 2004).

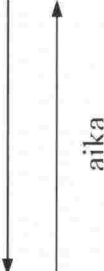
Aikataulut muodostavat rautateillä suunnitelmallisen liikenteenhoidon perustan. Ne kuvaavat liikenteen kulun ja antavat tietoa asiakkaille. Rautatieyritykselle aikataulusuunnittelu vastaa yrityksen tuotantosuunnitelman laatimista, johon muut liikenteenhoidon osasuunnitelmat perustuvat. Rautatieliikenteen aikataulusuunnittelu on ratakapasiteetin jakoa, jota ohjaavat asiakkaiden tarpeet. Aikataulu määrittelee, missä järjestyksessä ja milloin kukin rataosuus on varattu tietyn junan käyttöön. Aikataulusuunnittelussa junille määritellään saapumis- ja lähtöajat asemille. Henkilöstö- ja kalustokierrot laaditaan lopullisten aikataulujen pohjalta (Alfieri et al. 2002, Caprara et al. 1997).

Kysynnän arviointi, resurssi- ja linjastosuunnittelu ovat strategisia pitkän aikavälin päätöksiä. Kalusto- ja henkilöstökierro tehdään yleensä muutaman viikon tai kuukauden päähän aikataulusuunnittelun sijoituessa johonkin välimaastoon. Suunnitteluprosessi etenee melko suoraviivaisesti kysynnän arvioinnista henkilöstösuunnitteluun. Eri vaiheiden välillä on kuitenkin takaisinkytkentä, sillä joskus prosessissa joudutaan palaamaan taaksepäin. Esimerkiksi aikataulusuunnitelmaan voidaan tehdä muutoksia kalustokierron tehostamiseksi. Hierarkkisen suunnitteluprosessin ongelmana on, ettei lopputulos ole välttämättä paras mahdollinen, vaikka kunkin vaiheen yksittäinen lopputulos olisikin optimaalinen. Kokonaisuuden hallinta on haastavaa, koska on vaarana, että osastot optimoivat vain omaa tulostaan ja muutenkin on vaikea nähdä, mikä on kokonaisuuden kannalta paras ratkaisu. (Bussieck et al. 1997, Paasikivi 2003)

3.3 Aikataulusuunnittelun tasot

Rautatieliikenteen suunnittelu voidaan jaotella myös tavoitteiden ja suunnittelun aikajänteen perusteella strategiseen, taktiseen, operatiiviseen sekä lyhyen aikavälin suunnitteluun (taulukko 2). Suunnitelmien tarkkuus kasvaa strategisen suunnittelun karkeista hahmotelmista operatiivisen suunnittelun hyvin yksityiskohtaisiin suunnitelmiin. Mitä laadukkaampaa eri tasojen suunnittelu on, sitä helpompaa ja tehokkaampaa työ on operatiivisella tasolla. (Landex et al. 2006, Hofman & Madsen 2005)

Taulukko 2. Aikataulusuunnittelun tasot.

Strateginen suunnittelu	5-20 v.	Resurssien riittävyys	
Taktinen suunnittelu	1-5 v.	Resurssien jakaminen	
Operatiivinen suunnittelu	1 vrk -1 v.	Päivittäiset suunnitelmat	
Lyhyen aikavälin suunnittelu	alle 24 h	Odottamattomat poikkeukset	

Aikataulusuunnittelu on jatkuva prosessi, jonka tulee sopeutua yhteiskunnassa ja rautatiesektorilla tapahtuviin muutoksiin. *Strategisen aikataulusuunnittelun* aikajänne on useita vuosia, jopa vuosikymmeniä. Se ottaa huomioon muun muassa liikennepolitiikan yleiset suuntaukset ja määrittelee yleisesti pitkän tähtäimen tavoitteet sekä keinot niiden saavuttamiseksi. Aikataulujen suunnittelu vuosiksi eteenpäin voi nostaa esiin erilaisia ongelmia. Strategisen suunnittelun tavoitteena on turvata riittävä kapasiteetti ja selvittää suuret investointitarpeet, jotta tulevaisuudessa voitaisiin tarjota entistä kilpailukykyisempiä kuljetuspalveluita ja vastata kysyntään mahdollisimman hyvin. (Landex et al. 2006, Vromans 2005)

Strategisen aikataulusuunnittelun tuotos on enemmänkin luonnos kuin tarkka suunnitelma, sillä tulevaisuuteen liittyy paljon epävarmuustekijöitä (kysyntä, kalusto, infrastruktuuri jne.). Tulevaisuuden aikataulujen luominen on kuitenkin tärkeää, sillä ilman niitä investointien luotettava arvioiminen olisi hankalaa. Aikataulurakenne vaikuttaa ratakapasiteettiin niin voimakkaasti, että investointeja on vaikea arvioida perinteisellä kustannus-hyöty-analyysillä ilman tulevaisuuden aikataulujen luomista. (Landex et al. 2006)

Joissakin maissa, esimerkiksi Sveitsissä, laaditaan ensiksi tulevaisuuden aikataulut ja vasta tämän jälkeen selvitetään investointitarpeet (lisäraiteet, laiturit jne.) aikataulujen toteuttamiseksi. Suomessa strategisen aikataulusuunnittelun ongelmana on epävarmuus tulevasta investoinneista, sillä suurten investointien rahoitus varmistuu usein vasta huomattavasti myöhemmin. Strategisen suunnittelun merkitys on hyvin suuri, sillä rautatieinvestoinnit ovat kalliita ja niiden elinkaari on pitkä. Lisäksi esimerkiksi kaluston hankinta tai henkilöstön kouluttaminen ovat monivuotisia projekteja, eikä kerran valittua suuntaa ole helppoa muuttaa. (Hovi 2006, Odijk 1998)

Taktinen aikataulusuunnittelu määrittelee aikataulun perusrakenteen. Yleensä suunnittelua ei aloiteta täysin puhtaalta pöydältä vaan lähtökohtana on edellisen kauden aikataulu ja aikajänteenä yksi vuosi. Ensisijaisena tavoitteena on kysynnän tyydyttäminen ja resurssien tehokas käyttö parhaimman mahdollisen suorituskyvyn saavuttamiseksi. (Oksanen 2006)

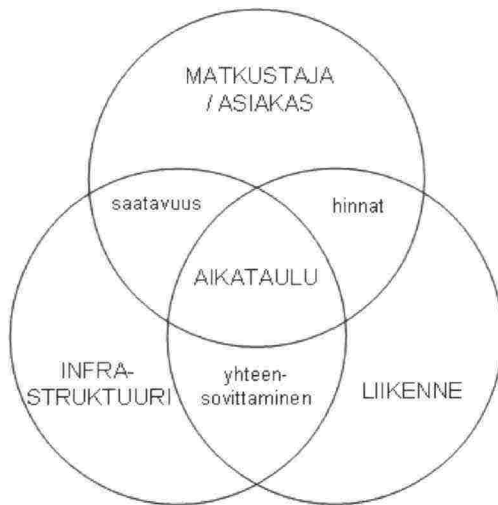
Operatiivisen aikataulusuunnittelun tuloksena syntyvät yksityiskohtaiset junasuunnitelmat ja aikataulut kullekin päivälle. Esimerkiksi ratatöiden ja lisäjuniin vuoksi alkuperäiseen suunnitelmaan on jatkuva tarve tehdä pieniä muutoksia.

Lyhyen aikavälin aikataulusuunnittelu on lähinnä myöhästymisten ja erilaisten häiriötilanteiden hallintaa. Rataverkko on hyvin dynaaminen ympäristö ja aikatauluihin

joudutaan tekemään pieniä muutoksia päivittäin. Esimerkiksi tavaraliikenteen aikataulu-
muutoksista lähes puolet tulee lähtöpäiville, kun esimerkiksi junan jarrut eivät riitä tai
kuljetettavaksi tulee vaarallisia aineita, jolloin nopeutta joudutaan laskemaan
suunnitellusta. Lyhyen aikavälin suunnittelussa ei ole paljon aikaa päätösten tekoon ja
yleensä tavoitteena on vain saavuttaa mahdollisimman hyvä ratkaisu, ei välttämättä
optimaalista. Lopullisen liikenteen kulun päättävät liikenteenohjaajat ja muut
operatiivisen toiminnan toteuttajat.

3.4 Aikataulusuunnittelun haasteet ja erityispiirteet

Aikataulu on rautatieliikenteessä hyvin keskeisessä roolissa (kuva 6). Se yhdistää
infrastruktuurin ja liikenteen, mikä on tärkeää, sillä rautatieliikenteessä infrastruktuurin
käyttö on muihin liikennemuotoihin verrattuna erityisroolissa. Asiakkaille aikataulut
kertovat minkälainen liikenteen palvelutaso on. (Pellandini 2001a).



Kuva 6. Aikataulut yhdistävät infrastruktuurin, liikenteen ja asiakkaat (Pellandini 2001a).

Rautatieliikenne itsessään muodostaa hyvin monimutkaisen liikenteellisen kokonaisuuden. Kun järjestelmään lisätään vielä yhteydet muihin kuljetusmuotoihin, on kyseessä äärimmäisen monisäikeinen liikennejärjestelmä. Rautatieliikenteen aikataulusuunnittelua pidetään hyvin haastavana ja aikaa vievänä optimointiongelmuna erityisesti yksiraiteisella rataverkolla. Suhteellisen yksinkertaisenkin rataverkon optimaalisen aikataulun laatiminen on vaikeaa ja junien lukumäärän ja rataverkon koon kasvaessa ongelma kasvaa nopeasti. (Törnquist 2006b, Pudney & Wardop 2004, Herrmann 2006).

Aikataulusuunnittelussa tulee ottaa huomioon hyvin monia erilaisia tekijöitä ja reunaehtoja. Osaa näistä tekijöistä tulee ehdottomasti noudattaa esimerkiksi junaturvallisuuden kannalta. Osa taas on sellaisia, jotka on hyvä ottaa huomioon esimerkiksi palvelutason tai kustannustehokkuuden vuoksi. Haasteelliseksi aikataulusuunnittelun tekee myös rajallinen ratakapasiteetti sekä monet, osittain ristiriitaiset, tavoitteet. Lisäksi useimmissa maissa rataverkolla liikennöi hyvin monenlaisia junia, joiden preferenssit, nopeudet, reitit ja lasti vaihtelevat paljon.

Rautatieliikenteessä suunnittelun merkitys on paljon suurempi kuin tieliikenteessä. Merkittävä eroavaisuus on ohitus- ja kohtauspaiikkojen sekä vaihtoehtoisten reittien rajallisuus. Mahdollisuudet ohittamiseen riippuvat muun muassa ohitusraiteiden ja vaihteiden sijainnista, turvalaitteista sekä junatyypistä. Rautatieliikenteelle on ominaista aikataulullinen joustamattomuus. Rataverkon suljetusta luonteesta ja junien voimakkaista riippuvuuksista johtuen pienikin muutos aikatauluun vaikuttaa yleensä muiden junien aikatauluihin. Pahimmassa tapauksessa häiriö johtaa rautatieliikenteen täydelliseen pysähtymiseen tietyllä välillä. Junaliikenteessä on myös totuttu aikataulujen pitävyyteen minuuttitasolla, kun taas tieliikenteessä ruuhkista tai häiriöistä johtuvat isommatkin viiveet koetaan helpommin normaaleina tilanteina (Vromans 2005).

3.5 Aikataulusuunnittelun tavoitteet ja merkitys

Minkälainen on hyvä aikataulu? Onko täsmällisyys esimerkiksi tärkeämpää kuin lyhyt matka-aika? Entä onko täsmällisyys tärkeämpää kuin resurssien tehokas käyttö. Ensin esitettyyn kysymykseen ei ole helppo vastata, mutta periaatteessa aikataulusuunnittelijalla tulisi olla jonkinlainen käsitys vastauksesta, jotta hän voi ylipäättään laatia aikataulut. Lisäksi tarkasteltaessa asioita asiakkaan, omistajan tai tuotannon näkökulmasta on varmasti eriäviä näkemyksiä siitä, miltä liikenteen tulisi näyttää. VR:n aikataulusuunnittelija Jarmo Oksasen (2006) mukaan hyvä aikataulusuunnitelma on kaupallisesti hyvä, kustannustehokas ja realistinen.

Aikataulusuunnittelu on tarvittavien palveluiden sovittamista rataverkolle ja sen ensisijainen tavoite on yleisen matkustus- ja kuljetustarpeen kysynnän tyydyttäminen. Liikennejärjestelmän toimivuus ja kilpailukyky edellyttävät rautatieliikenteeltä myös hyvää palvelutasoa. Rautatieliikenne täyttää paikkansa liikennejärjestelmän osana silloin, kun palvelutasoa nostetaan jatkuvasti vastaamaan markkinoiden vaatimuksia.

Asiakkaalle aikataulu on kuin ruokalista, se esittelee tarjonnan. Erityisesti henkilöliikenteen puolella aikataulusuunnittelulla on suuri merkitys siihen, miten houkuttelevaksi asiakas palvelun kokee. Aikataulusuunnittelulla voidaan vaikuttaa moneen palvelutason osatekijään, kuten vuoroväleihin, suoriin yhteyksiin, vaihtoyhteyksien sujuvuuteen, täsmällisyyteen, matka-aikaan ja matkustuskustannuksiin. Esimerkiksi huonosti suunnitellut vaihtoyhteydet pidentävät kokonaismatka-aikaa ja liian tiukaksi suunniteltu aikataulu voi heikentää täsmällisyyttä. Tavaraliikenteen puolella aikataulusuunnittelulla voidaan vaikuttaa kuljetusten toimitusvarmuuteen, kuljetusaikaan sekä aikataulujen sopivuuteen ja joustavuuteen.

Toiminnan tulee olla myös kustannustehokasta, jotta kuljetukset olisivat kilpailukykyisiä. Aikataulusuunnitelma, joka käyttää olemassa olevia resursseja tehokkaasti, on olennainen kustannustehokkaiden, houkuttelevien ja kilpailukykyisten kuljetuspalveluiden tuottamisessa. Merkittävimmät kustannustekijät rautatieliikenteessä ovat infrastruktuurista, kalustosta ja henkilöstöstä aiheutuvat kustannukset. Laadukkaalla aikataulusuunnittelulla voidaan tehostaa ratakapasiteetin käyttöä ja saavuttaa kustannussäästöjä. Esimerkiksi Ruotsissa Green Cargon¹ junat seisovat vuodessa noin

¹ Ruotsin valtiollinen tavaraliikenneoperaattori

40 000 tuntia väistäessään muuta liikennettä ja on arvioitu, että säästöä syntyisi lähes sata miljoonaa kruunua vuodessa, jos luku saataisiin puolitettua (Aronsson et al. 2003). Kalusto- ja henkilöstökiertojen kautta aikataulusuunnittelu vaikuttaa välillisesti edellä mainittuihin kustannustekijöihin ja siksi aikataulusuunnittelussa tulisi pitää mielessä myös nämä tekijät.

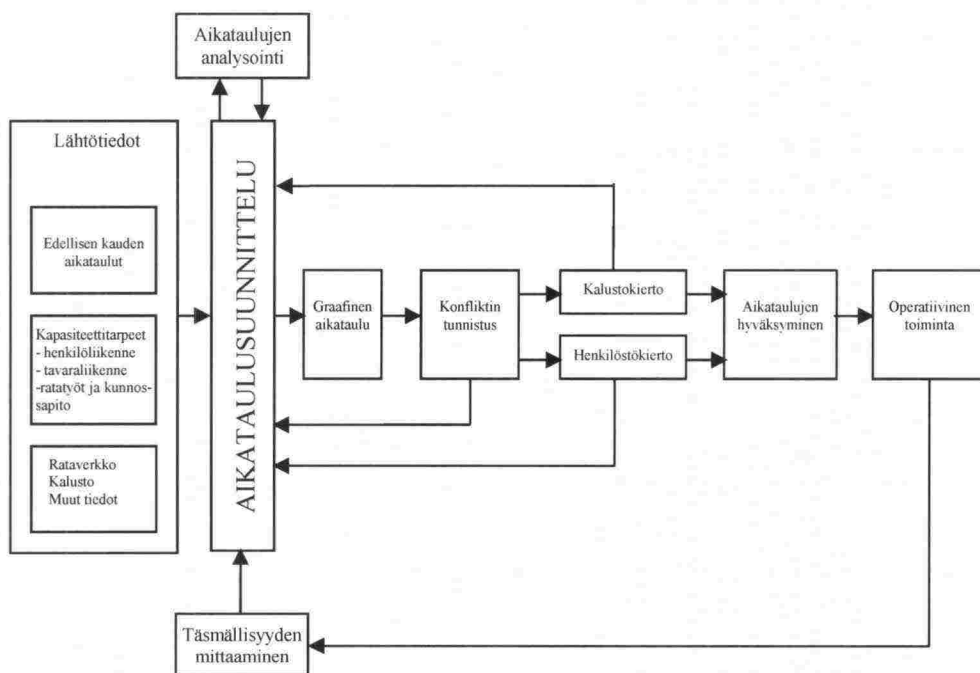
Kalustosta ja rataverkosta aiheutuvien myöhästymisten (primääriset) vähentäminen vaatii usein kalliita investointeja. Rautatieliikenteen luonteesta johtuen niin sanottuja sekundäärisiä myöhästymisiä eli myöhässä kulkevan junan aiheuttamia myöhästymisiä on usein jopa enemmän kuin primäärisiä myöhästymisiä. Laadukkaan aikataulusuunnittelun avulla sekundäärisiä myöhästymisiä voidaan pyrkiä vähentämään ja sitä kautta liikenteen täsmällisyyttä saadaan parannettua selvästi pienemmin kustannuksin. Aikataulusuunnittelu on myös ainoa tekijä, jolla ratakapasiteetin käyttöä voidaan lisätä ilman kalliita ratainvestointeja (Mäkitalo 2001).

Aikataulujen tulee myös olla realistiset, jolloin niiden mukaisesti pystytään liikennöimään muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta (vakavat onnettomuudet, isot järjestelmäviat, poikkeukselliset sääolosuhteet jne.). Aikatauluilta edellytetään myös tietynlaista joustavuutta, jolloin häiriötilanteessa liikenteen uudelleen suunnittelu onnistuu suhteellisen helposti.

4 RAUTATIELIIKENTEN AIKATAULUSUUNNITTELU

4.1 Aikataulusuunnitteluprosessi

Yleensä aikataulusuunnitteluprosessi alkaa henkilö- ja tavaraliikenteen edustajien kuulemisella, jotka kertovat omat kapasiteettitoiveensa (kuva 7). Suomessa henkilöliikenteen junilla on aina ollut keskeinen asema aikataulujen kokonaissuunnittelussa ja niiden aikataulut muodostavat aikataulujen perusrungon. Säännöllisen henkilöliikenteen aikataulut suunnitellaan ensin ja tämän jälkeen tavaraliikenne sovitetaan kulkemaan rataverkolle. Myös ratatöiden ja kunnossapidon kapasiteettitarpeet otetaan huomioon aikataulusuunnitteluprosessissa. Tulevan aikataulukauden suunnittelua ei yleensä aloiteta täysin puhtaalta pöydältä vaan aikataulut perustuvat edellisen kauden aikatauluihin. (Hovi 2007)



Kuva 7. Rautatieyrityksen aikataulujen suunnitteluprosessi.

Aikataulujen häiriöherkkyys tulisi testata ennen niiden käyttöönottoa. Aikatauluja analysoimalla voidaan löytää kriittisiä kohtia aikatauluista ja tehdä tarvittavat korjaukset aikatauluihin. Myös eri aikatauluvaihtoehtoja voidaan vertailla ja testata esimerkiksi simuloimalla. Aikataulusuunnittelun tuloksena saadaan graafiset aikataulut. Konfliktin tunnistuksessa tarkistetaan, ettei aikatauluihin ole jäänyt virheitä. Mikäli virheitä löytyy, palataan prosessissa taaksepäin. Henkilöstö- ja kalustokierrat suunnitellaan aikataulujen pohjalta. Aikataulusuunnittelu ja kalusto- sekä henkilöstökiertojen suunnittelu on vuorovaikutteista toimintaa ja tarvittaessa prosessissa voidaan palata taaksepäin resurssien käytön tehostamiseksi. Toteutuneesta liikenteestä kerätään tietoa, jota verrataan suunniteltoon. Tätä täsmällisyystietoa hyödynnetään suunniteltaessa seuraavan kauden aikatauluja. (Luethi et al. 2005, Paasikivi 2007)

Aikataulusuunnittelu on työlästä ja aikaa vievää ja esimerkiksi Deutsche Bahnilla on satoja ihmisiä tekemässä aikataulusuunnittelua. Ongelman monimutkaisuudesta johtuen

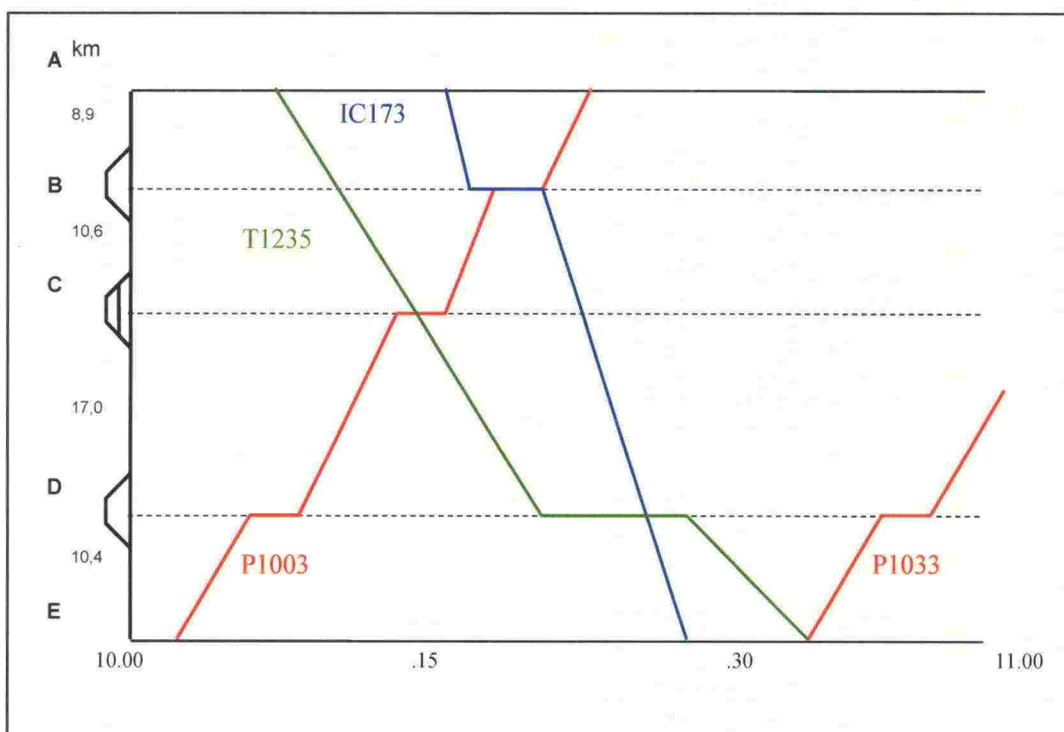
aikataulut laaditaan vielä nykyisinkin lähinnä ”käsin” erilaisia suunnittelutyökaluja ja kokemusta apuna käyttäen. Aikatauluohjelmistot toimivat periaatteessa vain suunnittelun apuvälineinä, mutta tietokoneiden ja ohjelmien kehittymisen myötä monia rutiinitehtäviä, kuten ajoajan laskenta on kuitenkin automatisoitu. Rautatieliikenteen aikataulusuunnitteluun ei ole vielä kehitetty varsinaisia ”push button” ratkaisuja, jotka laatisivat täysin valmiit aikataulut lähtötietojen pohjalta. Erilaisia algoritmeja aikataulujen laatimiseen on kuitenkin kehitetty ja niillä saadaan jo varsin hyviä tuloksia ja ne helpottavat suunnittelijoiden toimintaa. Hollantilainen ohjelma DONS (Designer of Network Schedules) on vakioaikataulujen suunnitteluun kehitetty ohjelma, joka laatii aikatauluehdotuksen lähtötietojen pohjalta ja ilmoittaa aikataulun mahdolliset konfliktit, jos virheetöntä aikataulua ei kyetä laatimaan. Saksassa käytössä olevaan BABSI-simulointiohjelmaan (BAhnBetriebsSimulation) voidaan syöttää kaikki kapasiteettihakemukset, joiden pohjalta ohjelma laatii aikatauluehdotuksen. (Goverde 2005, Gröger 2002, Abril et al. 2006, Liebchen et al. 2004, Beck 2007)

4.2 Graafinen aikataulu

Aikataulusuunnittelua varten tarvitaan sopiva esitystapa aikatauluille. Perinteiset matkustajille tarkoitetut taulukkoaikataulut eivät sovellu hyvin tähän tarkoitukseen ja siksi rautatieliikenteen aikataulusuunnittelussa käytetään niin sanottuja graafisia aikatauluja. Graafinen aikataulu kuvaa havainnollisesti junien kulun tietyllä rataosalla. Vaaka-akselina graafisissa aikatauluissa on yleensä aika ja pystyakselille on merkitty etäisyydet sekä rataosan asemat (kuva 8).

Graafisissa aikatauluissa junan kulku rataosalla yksinkertaistetaan yhdeksi suoraksi viivaksi, vaikka todellisuudessa junan nopeus saattaa tällä välillä vaihdella hyvinkin paljon. Viivan kaltevuus kuvaa junan keskinopeutta kyseisellä rataosalla eli sitä nopeammasta junasta on kyse mitä jyrkempi viiva on. Vaakasuorat viivat esittävät junien pysähdyskäyttäytymistä asemilla. Usein graafisiin aikatauluihin merkitään juna-numerot ja lisäksi erityyppisiä junia voidaan kuvata eri väreillä tai grafiikoilla.

Kuvan esimerkissä on yksiraiteinen rataosa asemien A ja E väliltä. Paikallisjuna P1003 pysähtyy jokaisella asemalla ja kohtaa vastaan tulevan IC-junan asemalla B klo 10.17. Tavarajuna T1235 pysähtyy klo 10.20 asemalle D päästäkseen nopeamman IC-junan ohitseen.



Kuva 8. Graafinen aikataulu.

Graafisista aikatauluista nähdään havainnollisesti junakohtaukset ja ohitukset, junien pysähdyskäyttäytyminen, junatiheys, junavälit sekä junien nopeuserot. Myös selkeät konfliktitilanteet, kuten junakohtaukset yksiraiteisella rataosuudella, pystytään tunnistamaan niistä kätevästi. Graafiset aikataulut ovat myös käyttökelpoisia, kun arvioidaan myöhässä kulkevan junan vaikutusta muuhun liikenteeseen.

4.3 Aikataulusuunnittelun lähtötietojen hankinta

Aikataulusuunnittelussa tarvitaan paljon yksityiskohtaista tietoa sekä rataverkosta että liikennöivän kaluston ominaisuuksista. Suunnittelijan on tärkeä tietää, mitä tietoja tarvitaan ja mistä niitä on saatavissa. Suomessa tietoa on saatavissa muun muassa seuraavista lähteistä.

Verkkoselostus (RHK 2006c) on RHK:n rautatieyrityksille julkaisema informaatiopaketti, joka julkaistaan kutakin vuoden mittaista aikataulukautta varten. Verkkoselostus toimii yleisenä rataverkolle pääsyn kuvaajana ja antaa perustiedot rautatie liikenteen toimintatavoista, tarjottavista palveluista, maksuista sekä rataverkosta. Verkkoselostuksessa on muun muassa liikennepaikkarekisteri, jossa on perustiedot kaikista rataverkon liikennepaikoista. Infrastruktuurirekisterissä on kuvattu eri rataosien tiedot. Verkkoselostukseen on lisäksi listattu kaikki tiedossa olevat ratatyöt, jotka vaikuttavat liikennöintiin.

Junaturvallisuussäntö (Jt) sisältää junaturvallisuutta koskevat yleiset määräykset. Radan ja liikkuvan kaluston osalta junaturvallisuutta koskevat rajoitukset (esim. akselipainot, nopeusrajoitukset, jarrupainot jne.) löytyvät **junaturvallisuussäntöön liittyvistä teknisistä määräyksistä ja ohjeista (Jtt)**.

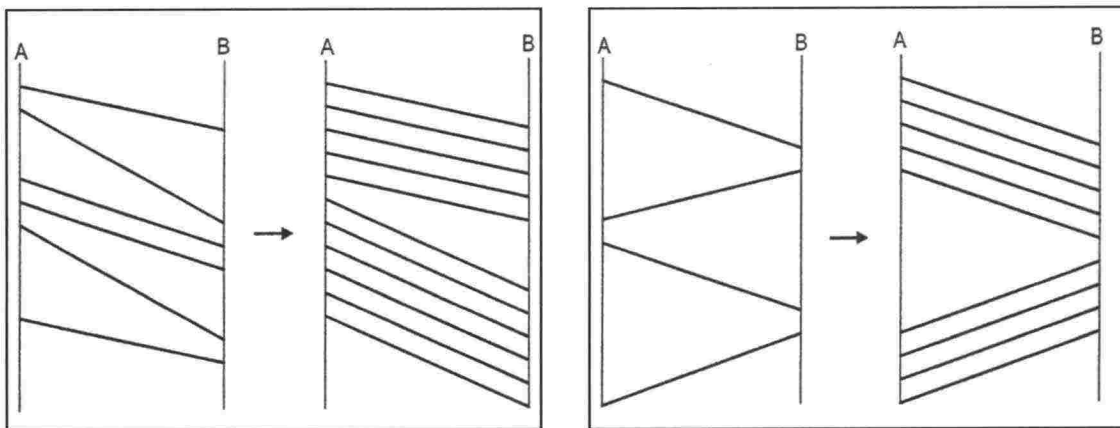
Ratatietokanta on kehitteillä oleva tietojärjestelmä, jonka tarkoituksena on helpottaa tiedonhakuja ja selkeyttää nykyistä tilannetta kokoamalla kaikki ratatieto yhteen sähköiseen tietokantaan. Tällä hetkellä infrastruktuuritieto on hyvin hajallaan, sillä RHK:lla on noin 30 erilaista tietokantaa (esim. liikennepaikkarekisteri, ratageometria-rekisteri, raiteistokaaviot), jotka sisältävät tietoa rataverkosta. Ongelmia on tietojen luotettavuudessa, päällekkäisyydessä, yhteneväisyydessä sekä tiedon haun vaikeudessa. Tarkoituksena on, että ratatietokanta tulisi olemaan ajantasainen ja helppokäyttöinen työkalu, jolla hallitaan rataverkon infrastruktuuritietoja. Järjestelmän ylläpidosta, tietojen luotettavuudesta ja päivittämisestä vastaa RHK. (Mäkitalo et al. 2005)

Osoitteesta www.rhk.fi/tietopalvelu löytyy myös runsaasti tietoa rataverkosta.

4.4 Aikataulurakenne

Valtion Rautatiet 1937–1962 (Rautatiehallitus 1962) kirjassa rautatieliikennettä verrataan savukkeen valmistamiseen. ”Henkilöliikenne on rytmiltään kuin automatisoitu savuketuoanto, kun taas tavaraliikenne muistuttaa sikarin käärimistä käsin. Rautatiejärjestelmältä vaaditaan kykyä näiden kahden tuotteen valmistamisesta samalla koneistolla ja siitä johtuvat koneiston käytössä ilmenevät ongelmat.”

Yleensä radat ovat niin sanottuja sekaliikenne ratoja, joissa kauko-, lähi- ja tavaraliikenteen junat jakavat saman rataverkon. Kuvassa 9 on esitetty havainnollisesti, miten junien nopeus ja järjestys (aikataulurakenne) vaikuttavat ratakapasiteettiin. Aikataulussa, jossa hitaat ja nopeat junat vuorottelevat, radan maksimiläpäisykyky on 6 junaa tunnissa. Sijoittamalla pysähtymiskäyttämisläpäisykyky on 6 junaa tunnissa. Sijoittamalla pysähtymiskäyttämisläpäisykyky on 6 junaa tunnissa. Junien nopeuksia tasaamalla saataisiin kapasiteettia kasvatettua vielä enemmän. Kapasiteetin käyttö on siis tehokkainta, kun kaikki junat ovat pysähtymiskäyttämisläpäisykyky on 6 junaa tunnissa. Junien nopeuksia tasaamalla saataisiin kapasiteettia kasvatettua vielä enemmän. Kapasiteetin käyttö on siis tehokkainta, kun kaikki junat ovat pysähtymiskäyttämisläpäisykyky on 6 junaa tunnissa.



Kuva 9. Aikataulurakenteen vaikutus ratakapasiteettiin.

Yksiraiteisilla rataosilla kapasiteetin riippuvuus aikataulurakenteesta on vieläkin voimakkaampaa erityisesti silloin, kun matka-aika on minijunaväliä selvästi pidempi. Kuvasta 9 näkyy, millä tavalla liikenteen suunnan muutos ja junien rytmittäminen vaikuttavat ratakapasiteettiin yksiraiteisella rataosuudella.

Edellä mainitut esimerkit osoittavat hyvin ratakapasiteetin voimakkaan riippuvuuden aikataulusta. Kyseinen esimerkki on kuitenkin kärjistys todellisuudesta ja käytännössä edellä mainittujen periaatteiden soveltaminen on hankalaa ilman, että palvelutaso kärsisi kohtuuttomasti. Läpäisykyvyn optimointi johtaa helposti tarjontaan, jossa useita samantyyppisiä henkilöjunia kulkee peräkkäin lyhyin vuoroväleihin ennen pidempää taukoa. Henkilöliikenneasiakkaat arvostavat kuitenkin pysähtymiskäyttäytymiseltään erilaisia junia ja tasaista vuoroväliä, minkä vuoksi läpäisykykyä voidaan optimoida vain tietyissä rajoissa. Yleensä lopullinen ratkaisu on jonkinlainen kompromissi edellisten vaihtoehtojen väliltä. (Landex et al. 2006)

Liikenteen heterogeenisuus johtaa usein pienempiin junaväleihin. Pienemmät junavälit lisäävät sekundäärisiä myöhästyksiä ja häiriöiden leviämistä rataverkolla. Vaikka liikenne olisikin heterogeenisuutta, sekundääristen myöhästyksien vuoksi aikataulurakenne tulisi pyrkiä laatimaan siten, että junavälit ovat mahdollisimman tasaisia. (Vromans 2005, Carey 1999)

Nopeiden ja hitaiden junien yhteensovittaminen lisää aikataulusuunnittelun haasteita huomattavasti. Suomessa tämä rytmin eroavuus on aikaa myöten edelleen lisääntynyt, kun henkilöliikenteen junien nopeuksia on kilpailusyistä pyritty jatkuvasti kohottamaan, mutta tavarajunien nopeuksia ei ole kyetty samassa suhteessa nostamaan. Liian suuriksi paisuneet junien nopeuserot ovat alkaneet vaikuttaa entistä haitallisemmin liikenteen sujumiseen ja kapasiteettiongelmiin odotetaan kasvavan, kun nopean junaliikenteen reitistöä laajennetaan ja nopeiden junien tarjontaa lisätään. (Iikkanen & Siren, 2005)

Tavara- ja henkilöliikennettä voidaan sovittaa liikennöimällä tavarajunilla pääasiassa öisin, niputtamalla junia, väistämällä muuta liikennettä tai käyttämällä vaihtoehtoisia reittejä. Jokaisella vaihtoehdolla on omat haittapuolensa. Yökuljetukset voivat häiritä radan kunnossapitoa eivätkä välttämättä sovi asiakkaiden aikatauluihin. Ne heikentävät myös resurssien tehokasta käyttöä luomalla keinotekoisien kuljetushuipun. Tavarajunien väistö ja vaihtoehtoiset reitit taas pidentävät matka-aikoja ja lisäävät operatiivisia kustannuksia. (Harris & Schmidt 2003)

4.5 Vakioaikataulu

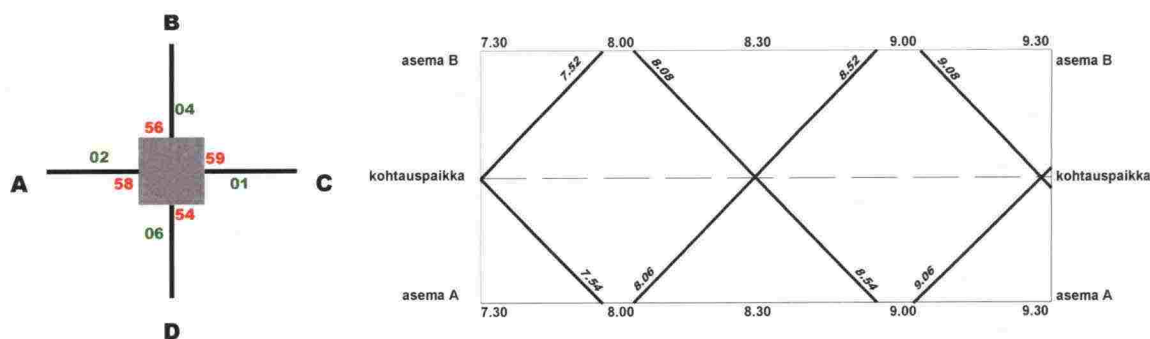
Vakioaikataulujärjestelmä on selkeä ja järjestelmällinen lähestymistapa aikataulusuunnitteluun. Se on viime vuosina vakiinnuttanut asemansa ja on käytössä jo lähes kaikissa Euroopan maissa. Myös Etelä-Suomen vilkkaimmin liikennöidyillä radoilla on käytössä vakioaikataulujärjestelmä. Vakioaikataulujärjestelmässä junien lähdöt ja saapumiset tapahtuvat aina säännöllisin vakiominuutein (kuva 10). Junien vuoroväli voi vaihdella, mutta perustarjonta tietyllä reitillä alkaa aina samalla minuutilla. (Huisman et al. 2005, RHK 2004a).

5	02		
6	04		
7	04	33	
8		09	36
9		07	34
10		09	
...	01		

5	03		
6	03		
7	03	33	
8	03	33	
9	03	33	
10	03		
...	03		

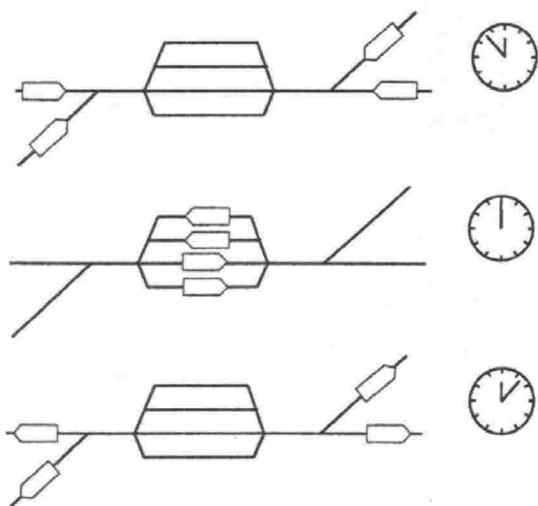
Kuva 10. Perinteinen aikataulu ja vakioaikataulu.

Toinen vakioaikataulujärjestelmälle tyypillinen ominaisuus on liikenteen symmetrisyys eli edestakaisten junien kulku on peilikuva toisiinsa nähden symmetriaminuutin suhteen. Esimerkiksi kuvassa 11 pohjoisesta tuleva juna saapuu asemalle neljää vaille ja vastaavasti pohjoiseen lähtevä juna lähtee neljää yli. Vakioaikataulujärjestelmä edellyttää myös tavaraliikenteen siirtymistä sen käyttäjäksi etenkin Etelä-Suomen vilkasliikenteisillä radoilla. Junille varataan omat vakiominuuttinsa ja aikataulujen muodostamisessa noudatetaan samaa symmetria-ajattelua kuin henkilöliikenteessä. (Peeters 2003, Kroon et al. 2005, Mäkitalo 2001, RHK 2004a)



Kuva 11. Vakioaikataulu ja liikenteen symmetrisyys (Mäkitalo 2001).

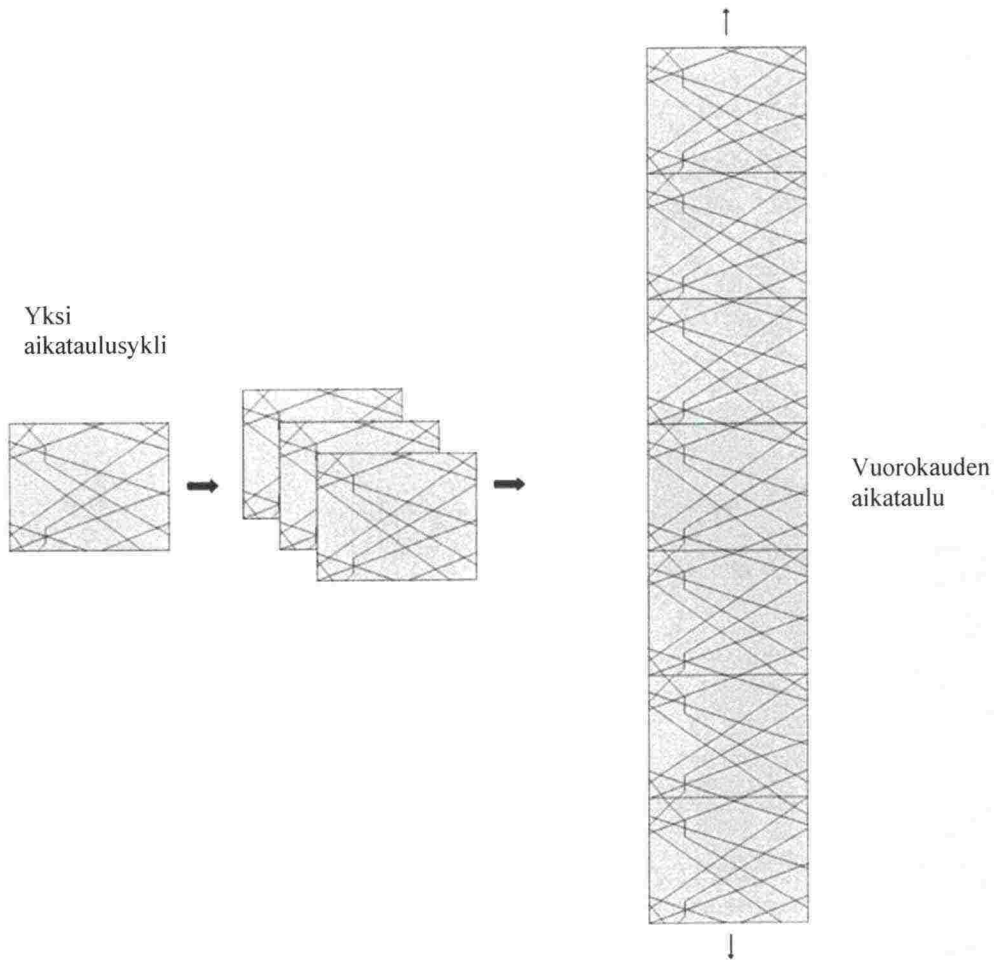
Oleellinen osa vakioaikataulujärjestelmää ovat myös niin sanotut solmupisteet eli asemat, joista on liikennettä useisiin suuntiin (kuva 12). Junat saapuvat solmupisteisiin eri suunnista suunnilleen samanaikaisesti, jolloin vaihdot junista toiseen ovat sujuvia. Solmuasemilla ja niiden aikataulujärjestelyillä on merkittävä vaikutus koko valtakunnalliseen liikennejärjestelmään. Aikataulut on laadittava solmuasemien ehdoilla, jolloin yksittäisiin aikatauluihin ei ole mahdollista tehdä muutoksia ilman tarkasteluja muutosten vaikutuksista kokonaisjärjestelmään. Vakioaikataulujärjestelmä vähentää siten järjestelmän joustavuutta ja lisää junien välisiä riippuvuuksia, jolloin liikenteen häiriöherkkyys saattaa lisääntyä. Vakioaikataulujärjestelmä toimii vain, jos junat ovat täsmällisiä solmupisteissä. Muuten liian moni matkustaja saattaa menettää jatkoyhteyden.



Kuva 12. Vakioaikataulu ja solmupiste (Pachl 2002).

Vakioaikataulujärjestelmä tuo kuitenkin kiistattomia etuja matkustajille ja liikennehenkilökunnalle. Se selkeyttää suunnittelua, tehostaa ratakapasiteetin hallittavuutta ja tuo konkreettisia kustannussäästöjä. Säännölliset lähdöt on helppo muistaa ja hyvät yhteydet eri linjojen ja muiden liikennemuotojen välillä lisäävät rautatieliikenteen houkuttelevuutta. Matkustajaystävällisyytensä lisäksi vakioaikataulujärjestelmä tehostaa liikenteen hoitoa, koska henkilökunta rutinoituu useita kertoja päivässä samanlaisina toistuviin tilanteisiin. Suunnittelun näkökulmasta vakioaikataulujärjestelmä tuo myös monia etuja. Se yksinkertaistaa kalusto- ja henkilöstösuunnittelua sekä tehostaa kaluston ja ratakapasiteetin käyttöä. (Peeters 2003, Mäkitalo 2001, Pellandini 2000)

Vakioaikataulujärjestelmässä myös aikataulusuunnittelu on teknisesti helpompaa. Paluusuunta saadaan automaattisesti symmetriasta, jolloin käytännössä pitää määritellä vain yksi suunta. Vakioaikataulu koostuu yksittäisistä sykleistä (kuva 13), jolloin koko aikataulua varten tarvitsee suunnitella vain yksi sykli ja sovittaa sen loppupää syklin alkupäähän. Mikäli kysyntä edellyttää lisätarjontaa, on esimerkiksi kahden tunnin vuorovälistä helppo siirtyä yhden tunnin vuoroväliin ilman aikataulun uudelleensuunnittelua. Perinteisissä aikatauluissa pienilläkin muutoksilla saattaa olla merkittävä vaikutus aikatauluihin, jolloin jatkoyhteydet muihin juniin ja kulkuvälineisiin saattavat kärsiä, junakohtaamiset vaatia muutoksia ja aikataulujen laatu heikentyä. (Kroon et al. 2005, Pellandini 2001b)



Kuva 13. Vakioaikataulujärjestelmän modulaarisuus (Vromans 2005).

Vakioaikataulujärjestelmä selkeyttää myös strategista suunnittelua, sillä se on luonteeltaan suhteellisen pysyvä rakenne ja tällöin rataverkon pitkäjänteinen kehittäminen on helpompaa. Suunnittelu voidaan tehdä käytännössä ideaalissa järjestyksessä, jolloin ensimmäisenä määritellään junatarjonta ja aikataulut ja tämän jälkeen tehdään tarvittavat investointipäätökset tavoitteena olevien kuluaikojen ja kapasiteetin saavuttamiseksi. Tällöin matka-aikojen alentamiset ja ratakapasiteetin lisäykset voidaan tehdä niin sanotuilla täsmäinvestoinneilla. (Pellandini 2000, Hovi 2006)

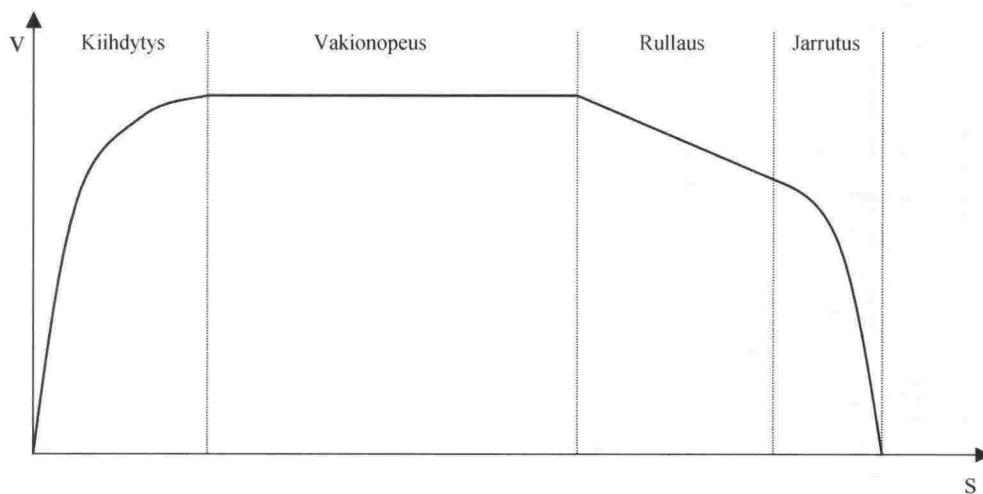
Vakioaikataulustrategia on siis paljon enemmän kuin ”lyhyemmät matka-ajat” tärkeimpien kaupunkien välillä. Vakioaikataulujärjestelmän kautta pyritään mahdollisimman hyvään liikenteelliseen kokonaisratkaisuun, jolloin joidenkin yksittäisten välien palvelutaso saattaa jopa hieman laskea, kun solmupisteiden välisiä matka-aikoja optimoidaan. Edellä mainittua kuvaa hyvin SBB:n kommentti: ”junat Sveitsissä eivät kulje niin nopeasti kuin mahdollista, vaan niin nopeasti kuin tarpeellista”. (Pellandini 2001a, Herrmann 2006).

4.6 Teoreettinen ajoaika

Oleellinen osa aikataulusuunnittelua on junakohtaisten ajoaikojen määrittely. Ajoajan laskemista varten tarvitaan hyvin monenlaista infrastruktuuri- ja kalustotietoa.

- Radan pystygeometria
- Radan vaakageometria ja kallistukset (kaarteista aiheutuvat nopeusrajoitukset)
- Vetokaluston ominaisuudet (vetovoima)
- Junapaino¹
- Junan jarrutuskyky ja jarrulaji²³
- Kuljetettavan tavaran laadusta ja kalustosta aiheutuvat nopeusrajoitukset (VAK, ylliraskaat kuormat, akselipaino, venäläisen standardin mukainen kalusto)
- Infrastruktuurista aiheutuvat nopeusrajoitukset (esim. rataluokka, vaihteet, sillat, tunnelit, JKV, tasoristeykset, ratatyöt)

Ajoajan laskemista varten määritellään junan nopeuskäyrä. Junan kulku kahden pysähdyksen välillä koostuu kiihdyksestä suurimpaan sallittuun nopeuteen, vakionopeudella ajosta, rullausvaiheesta sekä jarrutuksesta (kuva 14). (Pachl 2002)



Kuva 14. Junan kulku kahden pysähdyksen välillä.

Junan nopeuskäyrää ei voida laskea analyttisesti, koska kiihtyvyys ei ole vakio ja rata-geometria vaikuttaa junan nopeuteen (kuva 15). Käytännössä nopeuskäyrä voidaan vain

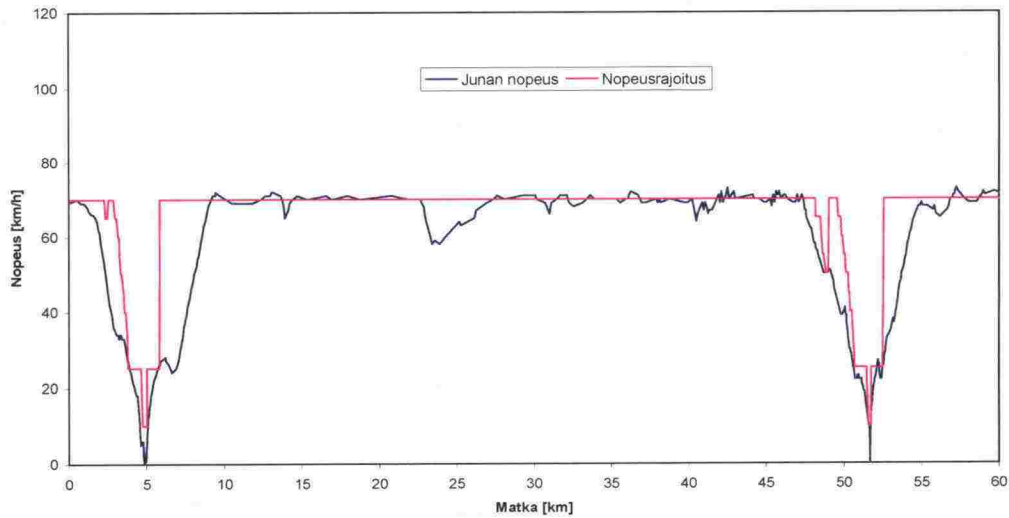
¹ Junapaino lasketaan punnitsemalla vaunut kuormineen tai laskemalla yhteen vaunujen omapainot (taarat) ja kuormien todelliset painot. Veturin painoa ei lasketa junapainoon (otettava kuitenkin huomioon jarrupainoprosentin laskemisessa). Jos kuormatun vaunun painoa ei saada selvitettyä, käytetään suurimman sallitun kuorman mukaista painoa. (Jtt)

² Junan jarrutuskyky määritellään junan jarrupainon ja kokonaispainon avulla. Junan jarrupaino saadaan laskemalla yhteen kaikkien ilmajarrullisten vaunujen ja veturien jarrupainot. Jarrupainot on merkitty liikkuvan kaluston kylkiin ja ne löytyvät myös Jtt:stä

Jarrupainoprosentti = $100 \times \text{junan jarrupaino} / \text{junan kokonaispaino}$

³ Junan suurin sallittu nopeus on riippuvainen jarrupainoprosentista, opastinvälin määräävästä laskusta ja junan jarrulajista. Jtt:n taulukot on laskettu 1200 m:n pysähtymismatkalle hätäjarrutuksessa.

arvioida vaihe vaiheelta ja sen tarkkuus riippuu tarkasteluvälistä. Joillekin junakokoonpanoille ajoaika haetaan koeajoilla. Nykyisin ajoaikojen laskentaan käytetään kuitenkin pääasiassa aikataulu- ja simulointiohjelmistoja, jotka hyödyntävät kaluston ominaisuus- ja infrastruktuuritietokantaa. (Pachl 2002, Nyby 2006, UIC 2002)



Kuva 15. Junan todellinen kulkunopeus ja suurin sallittu nopeus (Kokkonen 2007).

Todellisuudessa junan ajoaika saattaa poiketa melko paljon lasketusta, sillä ajoaikaan vaikuttavat monet eri satunnaistekijät kuten sääolosuhteet, matkustajien määrä ja kuljettajan ajokäyttäytyminen. Yleensä juna kykenee lähes aina saavuttamaan maksiminopeuden ja erot ajoajoissa syntyvät usein kiihtyvyysominaisuuksien muutoksissa. Esimerkiksi jännitteen lasku tai vastatuuli voi lisätä aikaa junan kiihtymiseen 0-140 km/h 15 sekuntia. On huomattava, että aikahäviö tapahtuu jokaisen kiihdytyksen yhteydessä ja lopullinen kertymä esimerkiksi paikallisjunalle voi olla useita minutteja. (Vromans 2005)

Junan lopullinen matka-aika koostuu teoreettisen ajoajan lisäksi monesta muusta tekijästä (kuva 16). Teoreettinen ajoaika on aika, joka junalta kuluu optimiolosuhteissa matkan kulkemiseen ilman pysähdyksiä. Teoreettiseen ajoaikaan lisätään pelivaraa, jotta junalla olisi mahdollisuus pysyä aikataulussa matkalla sattuneista häiriöistä huolimatta (ks. luku 5.6). Poikkeavien olosuhteiden (esim. ratatyöt) vuoksi ajoaikaan voidaan lisätä vielä ylimääräistä pelivaraa. Edellä mainituista tekijöistä muodostuu junan ajoaika. Kun ajoaikaan lisätään pysähdyksiin kuluva aika ja hieman pelivaraa matkustajien aiheuttamia viivästyksiä puskuroimaan, saadaan matka-aika. Vaihtoyhteyksien tai muun liikenteen takia juna voi joutua pysähtymään asemalle normaalia pidemmäksi aikaa. Kun suunniteltuun matka-aikaan lisätään mahdolliset myöhästymisminuutit, saadaan junan lopullinen toteutunut matka-aika.

Teoreettinen ajoaika	Pelivara	Ylimääräinen pelivara	Minimipysähdysaika
Ajoaika		Pysähdysaika	
Matka-aika (1)			Vaihtoaika
Matka-aika (2)			Suunniteltu odotusaika
Suunniteltu matka-aika			Poikkeama aikataulusta
Toteutunut matka-aika			

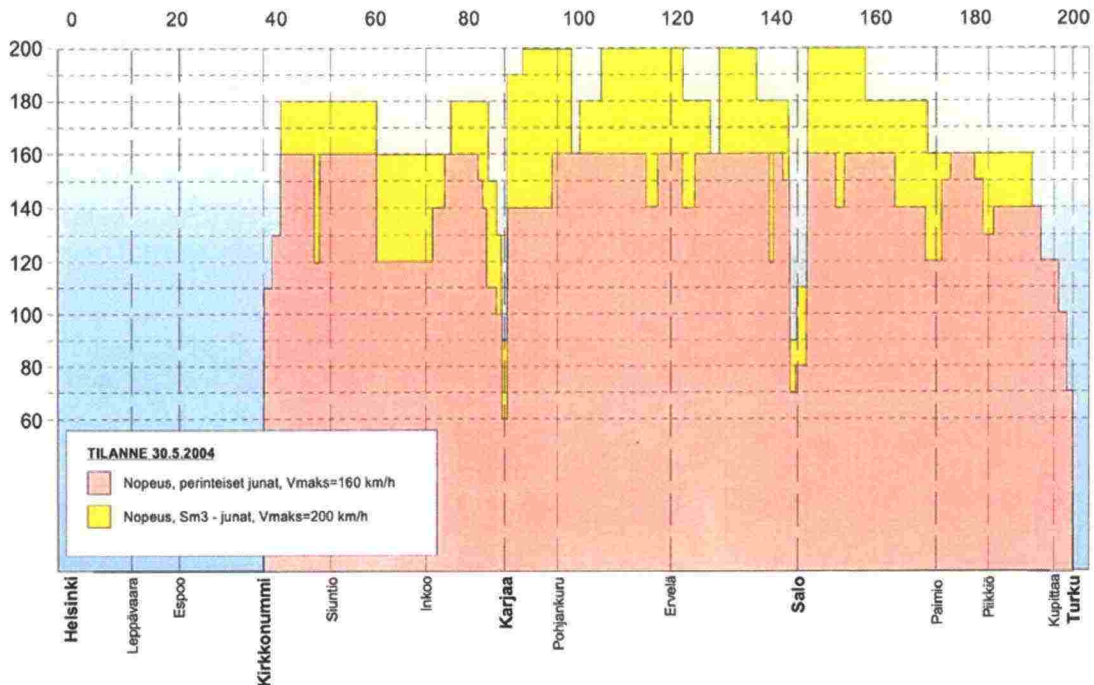
Kuva 16. Matka-ajan osatekijät.

4.6.1 Infrastruktuurin vaikutus ajoaikaan

Infrastruktuurin osalta junien suurimpaan sallittuun nopeuteen vaikuttavat muun muassa vaihteet, sillat, tunnelit, tasoristeykset, kulunvalvontajärjestelmä, ratageometria ja radan rakenne (rataluokat). Rataluokalla ilmaistaan, millaisen liikenteen rata ja sen rakenteet sallivat. Rataluokka määräytyy ratapölkkyjen ja tukikerroksen materiaalin sekä kisko-tyypin perusteella. Esimerkiksi huonoimman rataluokan A rataosilla tavarajunien suurin sallittu nopeus on vain 50 km/h (akselipaino 16 t) ja matkustajajunien 70 km/h. Radalle voidaan asettaa myös tilapäisiä nopeusrajoituksia radan heikon kunnan vuoksi. (RHK 2005b)

Radan geometrian kannalta rajoittavina tekijöinä ovat normaalisti siirtymäkaaret ja kaarteet. Kaarresäteen suurimpaan sallittuun nopeuteen vaikuttavat kaarresäde, raiteen kallistus ja radan pohjamateriaali. Vaihteiston nopeusrajoitukset koskevat sivuraiteelle siirtyviä junia. Suomessa pääasiassa on kahta eri vaihdetyyppiä 35 km/h ja 80 km/h vaihde. (RHK 2005b)

Rataosilla, joilla on tasoristeyksiä, suurin sallittu nopeus on 140 km/h. Suomessa on myös muutamia tunneleista ja silloista aiheutuvia nopeusrajoituksia. Tärinästä aiheutuvat nopeusrajoitukset koskevat pääasiassa yli 3000 tn bruttopainon ylittäviä raskaita junia. Mikäli kulunvalvontalaitteisto ei ole käytössä, on radan suurin sallittu nopeus 80 km/h. Radan nopeuskaavio on esitetty kuvassa 17. (RHK 2005b)



Kuva 17. Radan nopeuskaavio (Tomperi 2007).

4.6.2 Kaluston vaikutus ajoaikaan

Junan jarrutuskyky vaikuttaa junan suurimpaan sallittuun nopeuteen ja se määrittää junan jarrujen ja junan kokonaispainon perusteella. Usein esimerkiksi tavarajunien nopeutta, joudutaan laskemaan aikataulutetusta, koska junakokoonpanon jarrut eivät ole riittävät. Myös junan akselipaino vaikuttaa sen suurimpaan sallittuun nopeuteen (taulukko 3).

Taulukko 3. Tavarajunien suurin sallittu akselipaino ja nopeus rataluokittain.

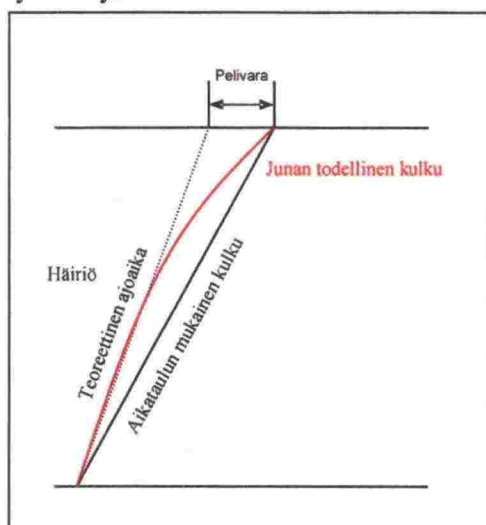
Rataluokka	Akselipaino [t]	Nopeus [km/h]
A	16	50
B ₁	22,5	50
	20	60
	16	100
B ₂	22,5	80
	18	100
	16	120
C ₁ , C ₂	22,5	100
	20	120

Veturin vetovoima vaikuttaa sekä junan maksiminopeuteen että keskinopeuteen. Erityisesti raskaiden tavarajunien nopeudet saattavat pudota hyvinkin alhaisiksi jyrkissä, pitkissä nousuissa. Joskus tavarajunia saattaa jopa jäädä ylämäkiin, kun niiden vetovoima ei riitä. Määräavällä nousulla tarkoitetaan, jyrkintä nousua, joka on määräävä määrittäessä rataosalle suurinta sallittua junapainoa tietylle vetovoimakokoonpanolle. Työkoneilla, erikoisvaunuilla ja kuljetettavilla tuotteilla saattaa olla omia nopeusrajoituksia. Suurin sallittu nopeus venäläisen standardin mukaisilla tavaravaravaunuilla on 80 km/h ja henkilövaunuilla 120 km/h. Jos junarungossa on yksikin vaarallista

ainetta sisältävä vaunu, junan tulee noudattaa vaarallisten aineiden kuljetuksille säädettyjä nopeusrajoituksia. (RHK 2005b)

4.7 Pelivara

Junan teoreettinen ajoaika on aika, joka junalta kuluu matkan kulkemiseen optimiolosuhteissa. Käytännössä ajoajoissa on kuitenkin aina pientä vaihtelua esimerkiksi sään, kuljettajan ajokäyttäytymisen tai pienten häiriöiden vuoksi. Pelivara on junan teoreettiseen ajoaikaan lisättävä aika, jolla varaudutaan pieniin häiriöihin ja ajoajan vaihteluun (kuva 18). Tällöin junilla on mahdollisuus pysyä aikataulussa matkalla sattuneesta häiriöstä huolimatta. Pelivara on tavallaan eräänlainen ”suunniteltu myöhästyminen.”



Kuva 18. Pelivara.

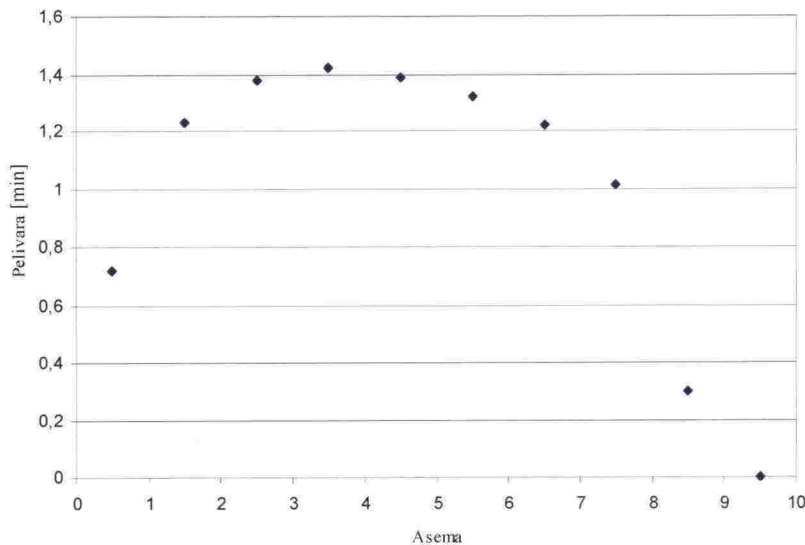
Pelivara on hyvin keskeinen tekijä aikataulusuunnittelussa järjestelmän vakauden sekä täsmällisyyden kannalta. Ajoajan lisäksi pelivaraa voidaan lisätä myös junien pysähdyksiin. Pysähdyksiin lisätty pelivara puskuroi matkustajien aiheuttamia viivästyksiä. Pysähdyspelivaran vuoksi asemalle myöhässä saapunut juna saattaa myös lähteä ajoissa asemalta tai ainakin saavuttaa aikatauluunsa. (Pachl 2002, Vromans 2005)

Pelivaran lisäämisen tavoitteena on, että aikataulutettu ajoaika toteutuisi suurella todennäköisyydellä. Kuten muukin aikataulusuunnittelu, myös pelivaran määrittäminen on jatkuvaa optimointia. Pelivaran lisääminen parantaa matka-aikojen ennustettavuutta sekä koko järjestelmän luotettavuutta ja kykyä palautua mahdollisesta häiriötilanteesta. Toisaalta pelivara pidentää matka-aikoja, kuluttaa ratakapasiteettia ja lisää kalustotarvetta, minkä vuoksi sitä ei voida lisätä rajattomasti. Aina pelivaraa ei ole mahdollista lisätä haluttua määrää. Käyttämätön pelivara voidaan hyödyntää energiansäästönä siten, että juna rullaa pidemmän matkaa ennen pysähdystä. Pelivaran lisääminen voi myös kätkeä taakseen järjestelmän ongelmia. Jos juna kärsii kymmenen minuutin viivästyksen matkan aikana, mutta pelivaran vuoksi myöhästyy määräasemalta vain kaksi minuuttia, juna yleensä kirjataan täsmälliseksi.

Yleensä pelivara on tietty prosenttiosuus ajoajasta. UIC (UIC 2000) suosittelee, että ajoaikaan lisättävä pelivara olisi matkan pituuteen ja teoreettiseen minimiajoaikaan perustuvan pelivaran summa. Nopeilla junilla, raskailla junilla sekä tavarajunilla peli-

varaa tulisi olla suhteellisesti enemmän. Eri maiden käytännöt pelivaran jakamiseksi vaihtelevat kuitenkin paljon. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa pelivara perustuu junien aikaisempaan täsmällisyyteen tietyllä rataosalla. Mikäli täsmällisyys on ollut alle tavoitetason, pelivaraa yksinkertaisesti lisätään kyseiselle vuorolle. Sveitsissä pelivara muodostuu useasta eri osatekijästä. Henkilöliikenteessä pelivaraa lisätään 7 % matkajasta sekä minuutti jokaista 30 minuuttia kohden. Lisäksi vilkkaasti liikennöityihin solmupisteisiin lisätään niin sanottua operatiivista pelivaraa. Tanskassa pelivaran määrä perustuu matkan pituuteen ja junatyyppeihin. Suomessa pelivaraa pyritään lisäämään noin 10 % teoreettiseen ajoaikaan. (Rudolph 2003, Haldeman 2003, Landex et al 2006, Hovi 2007)

Useissa maissa pelivara jaetaan tasaisesti koko matkalle. Vromansin (2005) mukaan pelivaran tasaisella jakamisella ei kuitenkaan saavuteta parasta mahdollista lopputulosta, kun tarkastellaan yksittäisen matkan keskimääräisiä myöhästymisiä. Kyseisen tutkimuksen mukaan kiinnittämällä huomiota pelivaran allokointiin voidaan keskimääräisiä myöhästymisiä saada vähennettyä jopa 30 %. Pelivaraa lisättäessä on nimittäin olemassa riski, että pelivara jää käyttämättä ja kyseinen malli pyrkii pelivaran mahdollisimman tehokkaaseen hyödyntämiseen. Aivan matkan alussa pelivaraa tulisi olla suhteellisen vähän, koska kumuloitunut myöhästyminen on todennäköisesti myös pieni (kuva 19). Pelivaraa tulisi kuitenkin sijoittaa enemmän matkan alkupuolelle, koska tällöin hyödynnetty pelivara heijastuu useampien asemien täsmällisyyteen. Myöhäisempien rataosien pelivarasta on hyötyä vain matkan loppuosan asemilla. Koska aikatauluissa ajat pyöristetään minuutin tarkkuudelle, ei edellä mainittua periaatetta voida varsinkaan lähijunaliikenteessä noudattaa kirjaimellisesti, mutta sitä voidaan soveltaa muun muassa pyöristettäessä asemien välisiä matka-aikoja ylös- tai alaspäin. Vakioaikataulujen symmetrian vuoksi pelivaraa ei voida allokoida täysin edellä mainitulla tavalla.



Kuva 19. Pelivaran optimaalinen jakaminen kymmenelle liikennepaikkavälille (Vromans 2005).

Seuraavaan listaan on kerätty yhteenvetona kirjallisuudessa esille tulleita yleisiä periaatteita, joiden perusteella pelivaraa voidaan jakaa.

Enemmän pelivaraa juuri ennen risteysasemia. Kaikki pelivara sijoitetaan viimeiselle rataosuudelle ennen risteysasemaa. Ajatuksena on, ettei pelivaraa hukata matkan alkupuolella, mikäli häiriöitä ei tapahdu. Tällöin myöhästymisen todennäköisyyttä risteysasemalla saadaan pienennettyä ja vastaavasti sekundääristen myöhästymisten todennäköisyys laskee myös. Haittapuolena on kuitenkin pienempien väliasemien keskimääräisten myöhästymisten kasvu. Kyseistä periaatetta voidaan soveltaa vastaavasti koko linjalle, jos junan saapuminen ajoissa määräasemalle esimerkiksi kriittisen kääntöajan vuoksi koetaan tärkeäksi.

Enemmän pelivaraa pitkille reiteille. Pidemmillä linjoilla myöhästymisten kumuloitumisen todennäköisyys on suurempi. Myöhästymiset osuvat pitkälle matkalle, jolloin useammat muut junat saattavat kärsiä.

Enemmän pelivaraa tiheästi liikennöidylle rataosille. Kapasiteetin käyttöasteeltaan suurilla rataosilla sekundääristen myöhästymisten todennäköisyys on suurempi. Korkea täsmällisyys on tärkeää kyseisillä rataosilla, koska pienempien junavälien takia sekundääristen myöhästymisten riski on suurempi ja yhden junan myöhästymisestä kärsivien junien määrä korkeampi. Samaa periaatetta voidaan myös noudattaa vilkkaasti liikennöidyillä asemilla.

Enemmän pelivaraa ruuhka-aikoina. Ruuhka aikoina junat ovat pidempiä ja painavampia, matkustajien siirtyminen vie enemmän aikaa ja lisäksi liikenteessä on paljon junia, jolloin sekundääristen myöhästymisten todennäköisyys on korkeampi.

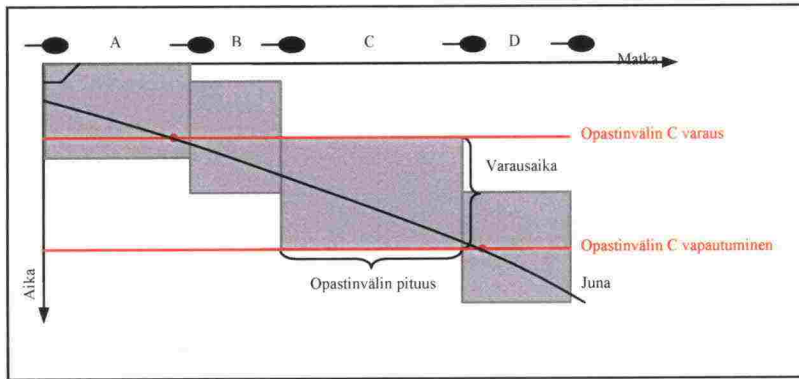
Enemmän pelivaraa rataosille, missä häiriöitä tapahtuu runsaasti. Historiatietojen analysointi voi osoittaa, että joillakin rataosilla tapahtuu keskimääräistä enemmän häiriöitä. Myöhästymisiä voidaan pyrkiä vähentämään lisäämällä pelivaraa näille rataosille puskuroimaan häiriöiden aiheuttamia viivästymisiä.

Enemmän pelivaraa junille, joissa on paljon matkustajia. Useampi matkustaja saapuu ajoissa perille, jos niille junille, joissa on enemmän matkustajia, jaetaan enemmän pelivaraa. Periaate koskee erityisesti tilanteita, joissa jaettava kokonaispelivaraa on rajoitetusti ja tällöin kyseisille junille voidaan allokoida suhteellisesti enemmän pelivaraa.

4.8 Junaturvallisuus

4.8.1 Junaväli

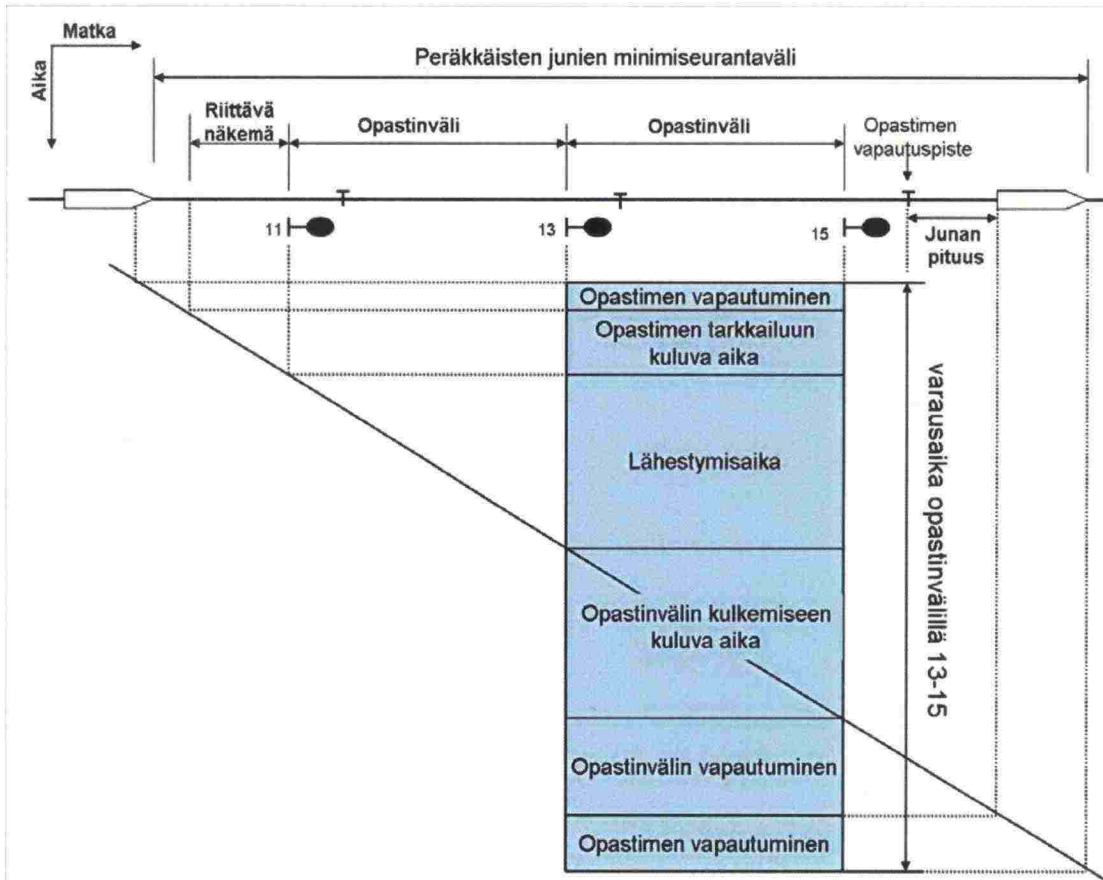
Junaturvallisuus määrittelee, miten lähellä junat voivat kulkea toisiinsa nähden ja se voi siten olla liikennetiheyttä rajoittava tekijä. Junien välillä tulee olla riittävä etäisyys, joka takaa niiden turvallisen kulun rataverkolla. Junaväli on kahden junan väli ajallisesti ja se on riippuvainen rataosan suojastuksesta. Suomessa on käytössä niin sanottu kiinteäsuojavälinen suojastus, joka perustuu opastinvälien varauksiin (kuva 20). Opastinväli voi olla kerrallaan vain yhden junan käytössä. Turvalaitejärjestelmä estää toisen junan pääsyn varatulle opastinvälille, jolloin junien yhteentörmäminen on periaatteessa mahdotonta.



Kuva 20. Kiinteäsuojavälinen suojastus.

Kiinteäsuojavälisellä suojastuksella varustetun rataosan junavälit voidaan määrittellä niin sanotun varausaikateorian avulla. Varausaika on se aika, jonka opastinväli on varattu tietylle junalle ja koostuu seuraavista elementeistä (kuva 21).

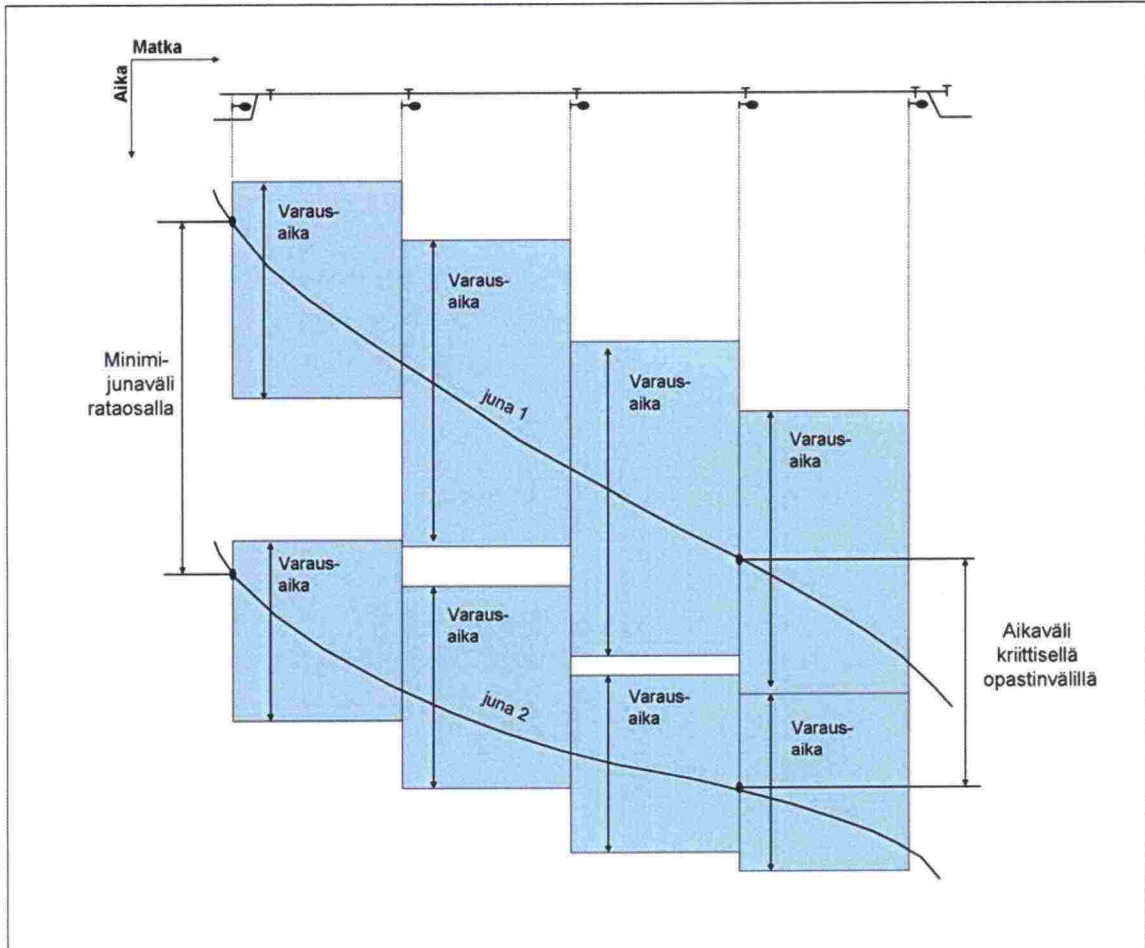
1. Opastimen vapauttamiseen kuluva aika
2. Opastimeen reagoimiseen tarvittava aika. Aika, joka junalta kuluu opastimen miniminäkötäisyydeltä opastimelle.
3. Esiopastimelta pääopastimelle kuluva aika. Yleensä edellisen opastinvälin kulkemiseen kuluva aika
4. Opastinvälin kulkemiseen kuluva ajoaika
5. Opastinvälin vapauttamiseen kuluva aika, eli junan pituutensa mittaisen matkan kulkemiseen tarvittava aika, koko junan tulee olla poistunut opastinväliltä.
6. Opastimen vapauttamiseen kuluva aika



Kuva 21. Opastinvälin varausaika (Pachl 2002).

Tiivistämällä kahden peräkkäisen junan varausaikaportaikot¹ mahdollisimman lähelle toisiaan saadaan selville kahden peräkkäisen junan minimijunavälit tarkasteltavalla rataosalla (kuva 22). Minijunaväli ei koske pelkästään peräkkäin kulkevia junia vaan myös vastaantulevaa ja risteävää liikennettä, joka kulkee saman pisteen kautta.

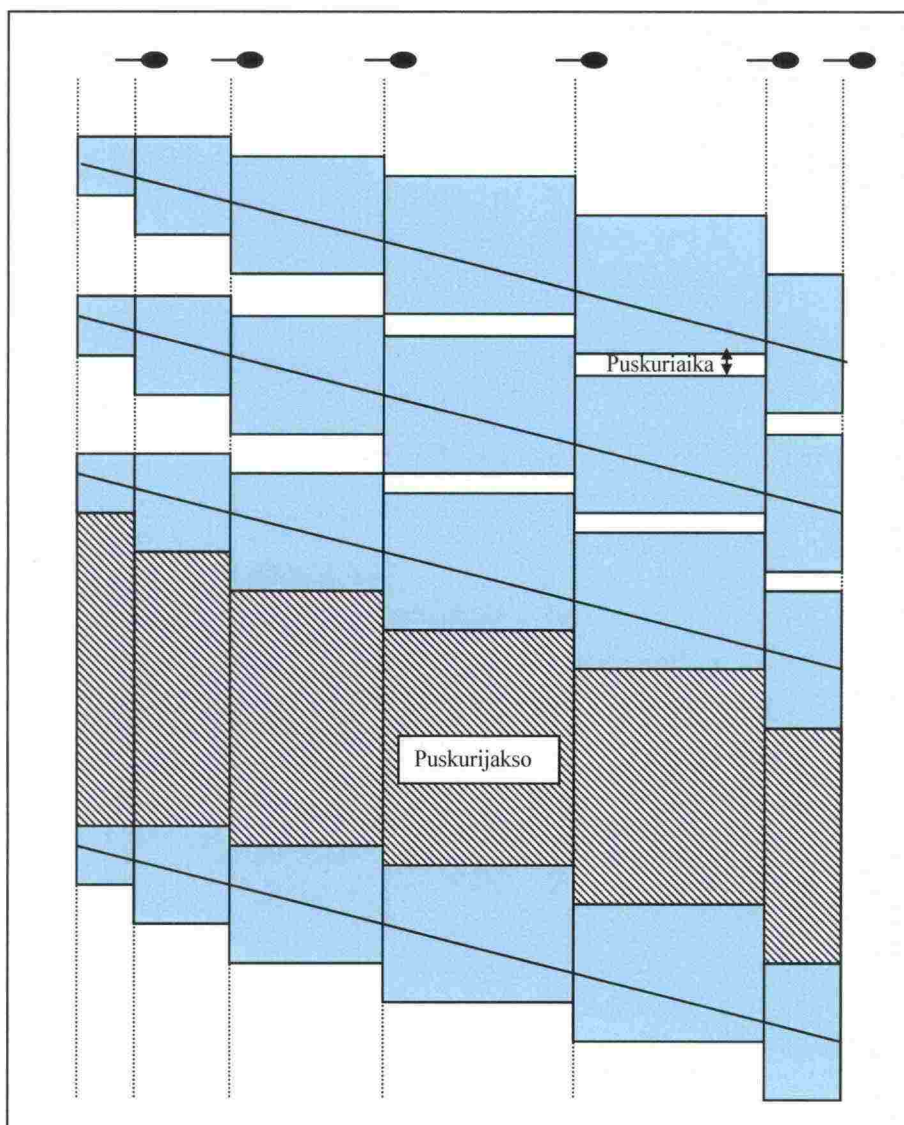
¹ Junan varaama aika rataosalla.



Kuva 22. Minimijunaväli (Pachl 2002).

Rataverkko on suljettu systeemi, missä eri tapahtumat vaikuttavat voimakkaasti toisiinsa. Mikäli samaa rataosaa käyttävien junien väli on minimijunavälin mittainen tai lähellä sitä, aikataulu on hyvin herkkä pienillekin häiriöille. Myöhässä kulkeva juna viivästyttää perässä kulkevaa junaa helposti, jolloin häiriö saattaa levitä hyvin laajalle sekä ajallisesti että paikallisesti. Lisäämällä junien väliin puskuriaikaa pystytään estämään tai pienentämään niin sanottua dominoilmiötä, jolloin häiriö ei kertaudu ja leviä niin helposti rataverkolla. Puskuriaika on pienin väli kahden junan varausaika-portaikojen välillä (kuva 23). Se määrittelee kuinka paljon juna voi poiketa aikataulustaan häiritsemättä toista junaa. Puskuriaikaa ei tule sekoittaa pelivaraan. Pelivara lisätään junan ajoaikaan ja se mahdollistaa aikataulussa pysymisen pienestä häiriöstä huolimatta. Puskuriaika lisätään junien välille ja se vähentää myöhässä olevan junan vaikutusta muuhun liikenteeseen.

Suomen nykyinen aikataulurakenne vaikuttaisi olevan sellainen, että häiriö jää elämään pitkäksi aikaa rataverkolla. Häiriöiden leviämistä ajallisesti voidaan vähentää lisäämällä ruuhkatuntien jälkeen niin sanottu puskurivaihe, jolloin järjestelmällä on paremmat mahdollisuudet toipua häiriöstä. Menetelmä muistuttaa lentoasemien niin sanottuja ”fire breaks -taukoja”, jolloin kentällä on vain muutama lähtö ja laskeutuminen ruuhkaisimpien hetkien jälkeen. (Kosonen 2006, Koolstra 2005)



Kuva 23. Puskuriaika ja ruuhkahuipun jälkeinen puskurijakso.

4.8.2 Junakohtaukset

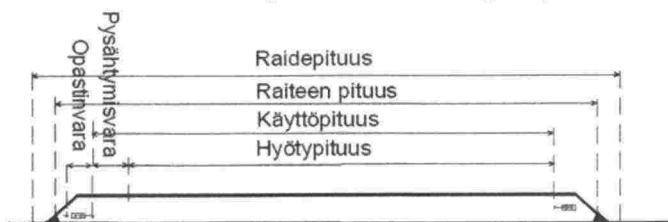
Rataverkko itsessään on hyvin joustamaton järjestelmä. Yksiraiteisella rataosalla junakohtaukset voivat tapahtua vain tietyissä paikoissa eikä kohtauspaikka ole välttämättä siinä kohdassa, missä junat luonnollisesti kohtaisivat. Lisäksi junat voivat vaihtaa puolta vain vaihteiden kohdalla. Suomen rataverkolla junakohtauksia tapahtuu paljon.

Rataverkosta noin 90 % on yksiraiteista ja lisäksi hitaimpien ja nopeimpien junien nopeuserot ovat suuret. Yksiraiteisella rataosalla hitaamman liikenteen ohittaminen tai vastaan tulevan liikenteen kohtaaminen¹ onnistuu vain ohitusraiteilla tai niillä liikennepaikoilla, joilla väistävällä junalla on mahdollisuus ajaa sivuun. Esimerkiksi joidenkin liikennepaikkojen raidepituus ei välttämättä riitä kaikkein pisimmille junille.

¹ Aikataulun mukaisella junakohtauksella tarkoitetaan junien kohtaamista aikatauluun merkityllä liikennepaikalla. Tällöin vähintään toisen junan on oltava pysähdysjuna (Jt).

Rataverkon kapasiteetti kasvaa, mitä useammin junakohtaamisia voidaan järjestää. Kohtaaminen lisää kuitenkin pysähtyvän junan matka-aikaa ja voi heikentää aika-
taulujen luotettavuutta. Junakohtaukset lisäävät junien välisiä riippuvuuksia ja ne sisältävät aina riskin myöhästymisen leviämisestä molempiin suuntiin. Väistävä juna häiritsee nopeampaa junaa, jos se on myöhässä ja päinvastoin. (Vromans 2005)

Jos liikennöidään sähkövetoisella kalustolla, raiteiden sähköistys tulee tarkistaa aika-
taulusuunnittelussa. Myös kohtauspaikan raiteiden painorajoitukset, lukumäärä ja niiden
hyöty¹- ja käyttöpituus² täytyy ottaa huomioon (kuva 24). Toisin sanoen kuinka monta
ja minkä pituista junaa kohtauspaikalle mahtuu kerrallaan. Tavarajunien kasvaneet
pituudet ovat lisänneet suunnittelun haasteita ja heikentäneet järjestelmän joustavuutta,
koska pitkät tavarajunat eivät pysty ajamaan sivuun niin usein. Joillakin liikenne-
paikoilla raskaiden tavarajunien kohdalla myös radan pystygeometria joudutaan
ottamaan huomioon junien liikkeelle pääsyn varmistamiseksi.



Kuva 24. Raiteen pituuteen liittyvät käsitteet (RHK 2006a).

Kuvassa 25 on esitettyä Mynämäen liikennepaikka, jonne mahtuu kerrallaan kaksi
junaa. Sivuraiteelle (002) mahtuu maksimissaan 545 metriä pitkä juna. Kuvasta nähdään
myös akselipainoihin perustuvat nopeusrajoitukset sekä asemalaiturin pituus (124 m).

¹ Hyötypituus ilmoittaa sen pituuden raiteesta, jota voidaan käyttää junaliikenteessä silloin, kun junan on mahdollista pysähtymään kyseiselle raiteelle.

² Käyttöpituus on se osa raidetta, jolla liikkuva kalustoa voidaan pysäköidä sen estämättä liikennöimistä viereisillä raiteilla. Opastinvara on kulkutien päättävän opastimen takana oleva matka, jolle pysähtyvä opastimen ohittava yksikkö ei aiheuta vaaraa viereisten raiteiden liikennöinnille. Pysähtymisvara on raiteen se pituus, joka hyötypituuden lisäksi on osa raiteen käyttöpituutta.

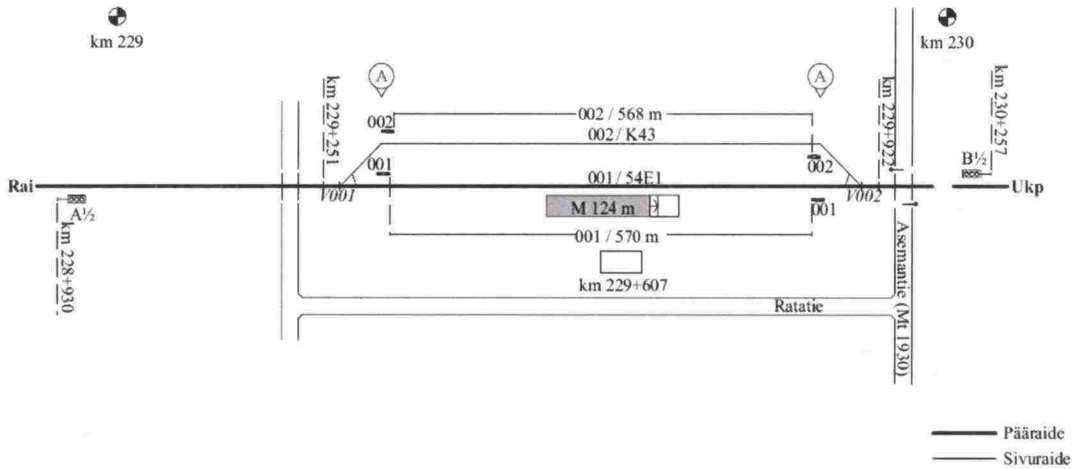
MYNÄMÄKI


km 229+607

Vaihteet:
V001. YV54-200N-1:9-V
V002. YV54-200-1:9-O

Kulkutien ohjeellinen junapituus (m)	
Raide	Pituus
001	550
002	545

Raiteen akselipaino/nopeus (km/h)					
Raide	160 kN	200 kN	225 kN	245 kN	250 kN
001	60	60	50	—	—
002	35	35	35	—	—



A Junakulkutien päätekohtat		05.07.05	JKa	01.08.05	MN
MUUTOS	SELITYS	PVM	TEHNYT	PVM	HYV.
 		RAITEISTOKAAVIO MYNÄMÄKI			
PVM 27.12.2004	RK TARK. —	PIRT 30.09.04	J. Karttunen	RK. N.G	—
HYV. M. Nummelin	TARK. 15.10.04 R. Taimela	HYV. 22.12.04	M. Majjala	PER. NO	4021-030-451-A-1/1

Kuva 25. Mynämäen liikennepaikan raiteistokaavio (RHK liikennepaikkarekisteri).

Mikäli rataverkolla toimii tulevaisuudessa useampia rautatieyrityksiä, liikenne yhteensovitetaan rautatielain (555/2006) etusijajärjestyksen mukaisesti (taulukko 4). Korkeimman prioriteetin liikennetyypinä on henkilöliikenne, jonka voidaan katsoa muodostavan synergisen kokonaisuuden. Synerginen henkilöliikennekokonaisuus tarkoittaa sellaista junien joukkoa, jotka muodostavat asiakkaille selvää lisäarvoa tuottavan liikennejärjestelmän. Vaihtoyhteyksistä riippuen osa nopeista henkilöliikennejunista (Pendolinot) kuuluvat myös edellä mainittuun ryhmään.

Taulukko 4. Etusijajärjestys (RHK 2006c).

Prioriteetti	Liikennetyyppi
1.	Synerginen henkilöliikennekokonaisuus
2a.	Nopea henkilöliikenne
2b.	Teollisuuden prosesseihin sidotut kuljetukset
3a.	Taajamajunaliikenne ja muu henkilöliikenne
3b.	Muu säännöllinen tavaraliikenne
4.	Tavarajunaliikenne, jolla ei ole suurta aikatauluvaatimusta
5.	Muu liikenne ¹

Teollisuuden prosesseihin sidotut kuljetukset liittyvät olennaisesti kokonaislogistiikan hallintaan. Teollisuuden prosesseihin sidottuihin kuljetuksiin kuuluvat mm. Rautaruukin

¹ Muu liikenne voi olla esimerkiksi ratatöihin liittyvää liikennettä tai museoliikennettä (verkkoselostus).

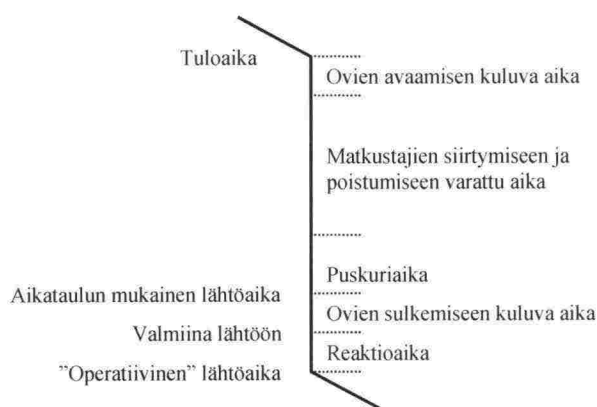
ja Jämsänkosken paperitehtaiden kuljetusten lisäksi kiitotavarajunaliikenne. Tavara-liikenteen osalta kuormasuunnan kuljetuksia pyritään priorisoimaan tyhjävaunusuuntaan nähden ja lisäksi priorisointia tehdään raskaampien junien eduksi. Useampana päivänä kulussa olevalle junalle pyritään antamaan etusija muuten samanarvoisten junien kohtaamisissa. Käytännössä kaikissa tapauksissa edellä mainittuja periaatteita ei voida noudattaa junien kulkuun liittyvien muiden reunaehtojen vuoksi. Esimerkiksi tavara-junien kohtaamisjärjestykseen vaikuttaa monessa tapauksessa liikenteen yleinen sujuvuus. Samoin ratapihojen kohtausraiteiden määrä rajoittaa joissain tapauksissa kohtausten järjestämistä edellä kuvattujen periaatteiden mukaisesti (RHK 2004a, RHK 2006c).

Rautatielain ja verkkoselostuksen mukaan etusijajärjestyksestä voidaan poiketa kansainvälistä liikennettä harjoittavan eduksi tai sellaisen toimijan eduksi, jonka harjoittama liikenne parantaa liikennejärjestelmän toimivuutta. Prioriteettijärjestyksestä voidaan myös poiketa, mikäli rautatieyritykselle tai sen asiakkaan liiketoiminnalle aiheutuu kohtuutonta haittaa. Mikäli kyseessä on saman rautatieyrityksen junat, voidaan etusija-järjestyksestä poiketa yrityksen haluamalla tavalla.

4.9 Aikataulutetut pysähdykset

4.9.1 Pysähdysaika

Junan pysähdysaika koostuu eri osatekijöistä (kuva 26). Minipysähdysaika on aika, joka tarvitaan matkustajien poistumiseen junasta ja siirtymiseen junaan. Minipysähdysaikaan vaikuttavat matkustajamäärän lisäksi junatyyppi (esim. ovien lukumäärä ja leveys) ja infrastruktuuri (esim. laiturin leveys ja poistumistiet). Esimerkiksi tulevalle kehäradalle on Lentokentän asemalle suunniteltu normaalia pidempi pysähdys, koska matkustajien siirtyminen matkatavaroiden kanssa kestää pidempään. Joissakin tapauksissa aikaa joudutaan varaamaan myös junien yhteen tai erilleen kytkemiseen. Yleensä pysähdys-ajat pyöristetään puolen minuutin tarkkuudelle. (Goverde 2005, Sala 2006)

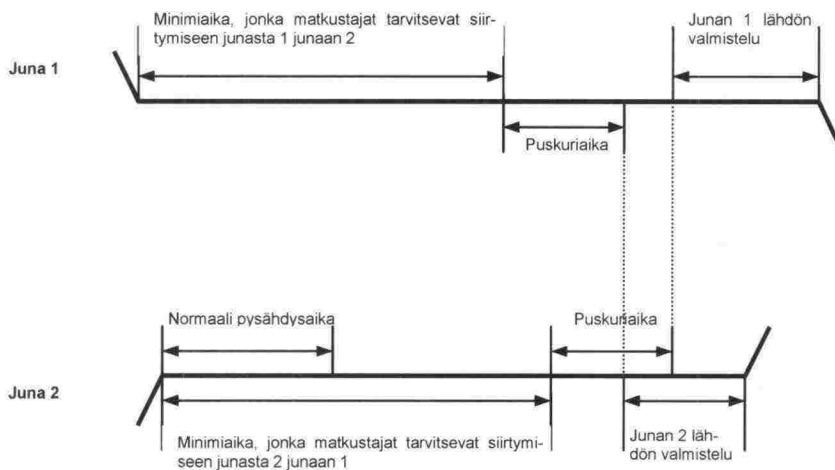


Kuva 26. Pysähdysajan osatekijät.

4.9.2 Vaihtoaika

Junan normaalin pysähdysajan kasvattaminen mahdollistaa vaihtoyhteydet junien välillä. Liian pitkäksi suunniteltu vaihtoväli lisää matkustajien kokonaismatka-aikaa ja

laskee palvelutasoa. Vaihtoaika tulisi kuitenkin olla vähintään niin pitkä, että kaikki matkustajat ehtivät vaihtaa junaa. Liian tiukka vaihtoväli on herkkä junien myöhästymisille ja saattaa siten heikentää aikataulun luotettavuutta. Järjestelmän vakauden kannalta myös vaihtoaikoihin tulisi lisätä jonkin verran puskuriaikaa myöhässä olevan junan häiriöiden lieventämiseksi (kuva 27). Mikäli juna 1 esimerkiksi saapuu asemalle myöhässä, kykenee juna 2 mahdollisesti vielä lähtemään aikataulun mukaisesti liikkeelle. Puskuriajan määrä voi perustua vaihtoyhteyden tärkeyteen tai myöhästymisjakaumaan. Jos junan reitillä on pullonkaula aseman jälkeen (lähtömyöhästyminen ei toivottavaa), voidaan puskuriaikaa lisätä enemmän. Joissakin maissa on tehty periaatepäätös, että junat eivät odota myöhässä olevaa junaa. (Pachl 2002, Landex et al. 2006,)



Kuva 27. Vaihtoyhteydet ja puskuriaika (Landex et al 2006).

Aikataulut tulisi pyrkiä laatimaan siten, että alemman prioriteetin juna saapuu hieman aikaisemmin asemalle, jolloin korkeamman prioriteetin junan pysähdysaika saadaan lyhyemmäksi. Mikäli junilla on sama prioriteetti, niiden tulojärjestys voi perustua esimerkiksi matkustajamääriin, jolloin keskimääräinen matka-aika matkustajaa kohden saadaan mahdollisimman lyhyeksi. (Landex et al. 2006).

4.9.3 Kääntöaika

Kun juna on saapunut pääteasemalle, se yleensä kääntyy ja jatkaa matkaansa vastakkaiseen suuntaan. Pääteasemalta juna ei voi jatkaa matkaansa välittömästi, sillä aikaa täytyy varata esimerkiksi vaihtotyölle, erilaisille tarkastuksille tai junan siivoukselle. Kääntöajalla tarkoitetaan aikaa, jonka juna viettää pääteasemalla ennen kuin jatkaa matkaansa. Minimikääntöaika riippuu junatyypistä ja vaihtotyömahdollisuuksista. Lyhin kääntöaika on junilla, joiden molemmissa päissä on ohjausyksikkö. Kääntöaikoihin on hyvä lisätä hieman pelivaraa häiriöiden leviämisen ehkäisemiseksi. Tällöin myöhässä saapunut juna pääsee todennäköisemmin lähtemään ajoissa vastakkaiseen suuntaan. Hofmanin & Madsenin (2005) mukaan kääntöaikojen pelivaran merkitys liikenteen täsmällisyyden kannalta on hyvin suuri. Kääntöaikojen tulee kuitenkin olla tehokkaat, sillä liian pitkä kääntöaika heikentää kaluston tehokasta käyttöä, kun junat seisovat turhaan asemilla. Junat varaavat myös laiturikapasiteettia,

josta saattaa vilkkaimmin liikennöidyillä asemilla olla pulaa. Liian pitkät kääntöajat lisäävät kalusto- ja henkilöstötarvetta ja nostavat siten liikennöintikustannuksia.

Usein junat kulkevat edestakaisin samalla linjalla, jolloin juna palaa samaa reittiä takaisin. Suomessa resurssien käyttöä on saatu tehostettua kalustokiertoa muuttamalla. Tällöin esimerkiksi Turusta Helsinkiin saapuva juna saattaakin jatkaa Tampereelle eikä takaisin Turkuun. Aikaisemmin Turun juna joutui odottamaan Helsingissä lähes kaksi tuntia, koska junan kääntöä ei ehditty tekemään ennen seuraavan junan lähtöä. Kalustokierron muuttaminen on lisännyt kuitenkin merkittävästi häiriön leviämisen riskiä linjalta toiselle. Esimerkiksi jos rantaradalla on ongelmia, ne leviävät helposti myös pääradalle kalustokierron riippuvuuksien vuoksi. Ohjausvaunujen käyttö IC-junissa pudottaisi junarunkojen ja henkilöstön tarvetta vielä lisää, kun kääntöaika Helsingissä voitaisiin pudottaa noin 10 minuuttiin. Lisäksi säästettäisiin Linnunlaulun niukkaa ratakapasiteettia, koska junien ei tarvitsisi käydä Ilmalan varikolla kääntymässä. (Hovi 2006, RHK 2000)

4.10 Aikataulusuunnittelu ja palvelutaso

Aikataulut määrittelevät rautatieliikenteen peruspalvelutason. Aikataulusuunnittelun kautta voidaan vaikuttaa hyvin moniin liikenteen palvelutasotekijöihin, kuten täsmällisyyteen, matka-aikaan ja toimiviin vaihtoyhteyksiin. Liikennepalvelut kytkevät yhteiskunnan eri toiminnot yhteen ja niiden taso vaikuttaa suoraan yhteiskunnan hyvinvointiin ja talouden kehitykseen. Liian huonotasoiset liikennepalvelut haittaavat perustoimintojen (esim. työssäkäynti, tavarakuljetukset, palvelut jne.) suorittamista ja lisäävät yhteiskunnan kustannuksia. Liian hyvätasoiset palvelut puolestaan lisäävät kansalaisten ja yritysten verorasitusta tai resurssit eivät ole käytettävissä muihin yhteiskunnan tarjoamien palvelujen tuottamiseen. Peruspalvelutaso on erilaista eri alueilla, eri asiakasryhmille, eri aikoina ja eri matkatyypeille. Tarjonta tulee kohdistaa kysynnän mukaan ja tuotantolähtöisestä, palvelujen tarjoajien etujen turvaamisesta tulisi päästä asiakaslähtöiseen palvelujen suunnitteluun. (LVM 2005)

4.10.1 Vuoroväli ja liikenteen säännöllisyys

Vuoroväli on tärkeä palvelutasotekijä erityisesti pääkaupunkiseudun lähijuna-liikenteessä. Vuoroväli vaikuttaa odotusaikoihin ja sitä kautta matkan keston. Vuorovälin tulisi olla mahdollisimman tasainen ja sen tulisi perustua kysyntään. Hiljaisemmillä rataosilla vuoroväliä parempi mittari on vuoromäärä.

Joukkoliikennejärjestelmän helppokäyttöisyyteen vaikuttavat keskeisesti myös aikataulujen säännöllisyys, millä on merkitystä erityisesti satunnaisille matkustajille. Liikennöinti-aika määrittää joukkoliikennepalveluiden käytössä oloajan. Liikennöinti-aika lasketaan vuorokauden ensimmäisestä lähdöstä viimeiseen lähtöön.

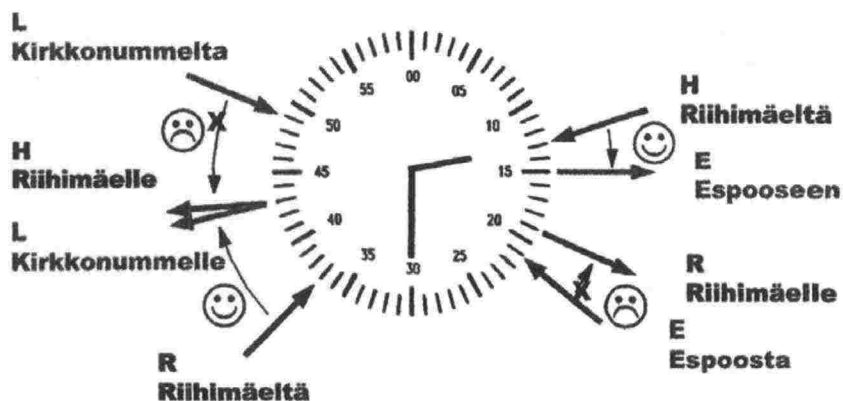
4.10.2 Vaihtoyhteydet

Vaihtojen¹ lukumäärä kuvaa joukkoliikennejärjestelmän helppokäyttöisyyttä. Linjat tulisi periaatteessa laatia siten, että mahdollisimman monelle matkustajalle on tarjolla suora yhteys. Lisäksi eri liikennemuotojen tulisi muodostaa toimiva kokonaisuus niin, että vaihtaminen liikennevälineestä toiseen olisi mahdollisimman sujuvaa. Suunnitelmien pohjana tulisi olla valtakunnallinen liikennejärjestelmä, jossa junat yhdessä muiden liikennevälineiden kanssa muodostavat toimivan kokonaisuuden.

Paljon pitkiä linjoja sisältävän rautatiejärjestelmän etuna on suorien yhteyksien lukumäärä. Toisaalta pitkät linjastot vähentävät järjestelmän vakautta, koska tällöin viivästymiset leviävät laajemmalle sekä ajallisesti että paikallisesti, jolloin junan myöhästyminen voi vaikuttaa moneen junaan ja rataosuuteen pitkän aikaa. Pitkillä linjoilla myös matkustajamäärät voivat vaihdella paljon, mikä voi kapasiteetin käytön kannalta olla tehotonta ja kallista. (Huisman et al. 2005, Goossens et al. 2004)

Esimerkki: Vaihtoyhteyksien merkitys

Kuvaan 28 on merkitty lähijunaliikenteen tulo- ja lähtöajat Pasilan asemalle vuoden 2001 aikataulun mukaan. Tultaessa H-junalla pohjoisesta minuutilla 13 on länteen päin menevällä matkustajalla mahdollisuus vaihtaa E-junaan kätevästi. Vastaavasti matkustaja, joka saapuu E-junalla lännestä minuutilla 21, myöhästyy pari minuuttia pohjoiseen menevästä R-junasta. Seuraava mahdollisuus matkan jatkamisen on vasta 22 minuuttia myöhemmin H-junalla. Sama tilanne on matkustajalla, joka saapuu R-junalla. Hän voi jatkaa matkaa länteen L-junalla kuusi minuuttia myöhemmin, mutta paluumatkalla hänen on odotettava peräti 30 minuuttia Pasilassa.

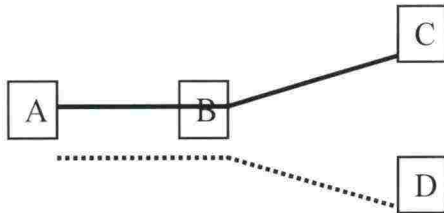


Kuva 28. Vaihtoyhteydet Pasilan asemalla (Pellandini 2000).

¹ Vaihdolla tarkoitetaan tässä yhteydessä toiseen junaan tai muuhun liikennevälineeseen tapahtuvaa vaihtoa.

4.10.3 Junavuorojen synkronointi

Palvelutason ja rajallisen kapasiteetin tehokkaan käytön kannalta osittain tai kokonaan samalla reitillä kulkevat junat ja linjat tulisi pyrkiä synkronoimaan siten, että niiden väli saadaan mahdollisimman tasaiseksi. Kuvassa 29 on esitettyä kerran tunnissa kulkevat linjat A-B-C ja A-B-D. Asemalta A asemalle B on siis kaksi yhteyttä tunnissa. Asiakkaan kannalta paras vaihtoehto on, että linjat liikennöivät tasaisesti puolen tunnin välein eivätkä esimerkiksi 15 ja 45 minuutin välein.



Kuva 29. Junavuorojen synkronointi.

Toinen vaihtoehto olisi yhdistää junat siten, että ne erotettaisiin toisistaan asemalla B ja vastaavasti tullessa yhdistettäisiin yhdeksi yksiköksi samalla asemalla. Tällöin myös asemille C ja D saataisiin liikenneyhteys 2 kertaa tunnissa. Junien yhdistäminen säästäisi sekä ratakapasiteettia että henkilöstöresursseja. Toisaalta yhdistäminen lisää aikataulun rajoituksia ja voi heikentää niiden luotettavuutta, koska junien tulee olla samanaikaisesti asemalla B ja lisäksi junien yhdistäminen ja tarkastukset vievät aikaa (Peeters 2003, s 34).

4.10.4 Matka-aika

Matka-aika¹ on täsmällisyyden ohella merkittävin liikennemuodon valintaan vaikuttava tekijä varsinkin pidemmillä matkoilla (Goverde 1998). Sen merkitys palvelusotekijänä on suhteellinen ja riippuu vaihtoehtoisilla tavoilla toteutetun vastaavan matkan ajoista. Aikataulusuunnittelun mahdollisuudet matka-ajan lyhentämiseen ovat melko rajalliset. Edellä mainituista palvelusotekijöistä vaihtoaika ja niiden lukumäärä sekä vuoroväli vaikuttavat matka-aikaan. Muuttamalla yksittäisen junan pysähdyskäyttäytymistä matka-aikaa voidaan lyhentää. Myös pelivaraa pienentämällä matka-aikaa voidaan jonkin verran lyhentää, mutta tällöin tulee ottaa huomioon sen vaikutus liikenteen täsmällisyyteen. Tavaraliikenteen puolella toimitusajan merkitys yritysten kilpailukyvyn kannalta on kasvanut jatkuvasti.

4.10.5 Täsmällisyys

Aikataulusuunnittelulla on suuri merkitys tarjottavan palvelun täsmällisyyteen ja laatuun. Liikenteen kysyntä laskee, jos palvelujen tarjonta on epäluotettavaa. Jotta rautatieliikenne koettaisiin houkuttelevaksi liikennemuodoksi, täytyy aikataulujen olla

¹ Matka-aika on aika, joka matkustajalta kuluu koko matkan tekemiseen lähtöpaikasta määränpäähän. Ajoaika on aika, jonka matkustaja viettää kulkuneuvossa.

luotettavat ja liikenteen täsmällistä. Goverden (1998b) mukaan junien täsmällisyys on matka-aikaa tärkeämpi palvelutasotekijä. Matkustajat kokevat, että pidempi matka-aika ja parempi täsmällisyys ovat parempi vaihtoehto kuin lyhempi matka-aika ja junien lisääntynyt myöhästely. Erityisen paljon matkustajat arvostavat luotettavuutta vaihtaessaan liikennevälineestä toiseen. Myös tavaraliikenteen puolella asiakkaiden täsmällisyysvaatimukset ovat nousseet jatkuvasti. Täsmällisyyden merkitystä laatu-tekijänä käsitellään enemmän kappaleessa 6.5.

4.11 Psykologiset tekijät

Mielenkiintoinen, mutta ilmeisesti melko vähän tutkittu aihealue ovat psykologiset tekijät aikataulusuunnittelussa. Aronssonin et al. (2003) mukaan matka-aika 2.05 voi tuntua asiakkaasta paljon pidemmältä kuin 1.58. Jos juna taas on perillä 22.04, asiakas saattaa kokea sen huomattavasti myöhäisemmäksi kuin ”ennen kymmentä”, 21.57. Jos taas nopealle junalle on aikataulutettu normaalia pidempi pysähdys, asiakas saattaa ajatella, että juna on (taas) myöhässä.

4.12 Ratatöiden ja kunnossapidon suunnittelu ja liikenteen yhteensovittaminen

Rata muodostuu monista eri tahtiin kuluvista komponenteista, jotka täytyy kunnostaa tai vaihtaa aika ajoin. Liikennemäärän kasvu sekä suuremmat nopeudet ja akselipainot lisäävät rataverkon kulumista, mikä vastaavasti kasvattaa rataverkon kunnossapitotarvetta ja ratatöiden määrää. Ratatyöt voidaan jakaa perusradanpitoon ja rataverkon kehittämiseen. Perusradanpidolla rataverkko pyritään pitämään hyvässä kunnossa ja säilyttämään sen nykyinen palvelutaso. Rataverkon kehittämisellä taas tarkoitetaan laatutason nostamista kehitysinvestoinneilla (LM 1994).

Myös ratatyöt tarvitsevat ratakapasiteettia ja aikataulusuunnitteluun liittykin olennaisesti junaliikenteen yhteensovittaminen ratatöiden ja kunnossapidon kanssa. Osa ratatöistä voidaan tehdä sopivissa työraoissa junien kulun välillä liikenteen ehdoilla, mutta tietyt ratatyöt vaativat pidempiä työrajoja, jolloin aikataulurakenteeseen joudutaan tekemään muutoksia. Tehokkaalla suunnittelulla ja tiiviillä yhteistyöllä eri osapuolten kesken ratatöiden aiheuttama haitta liikenteelle voidaan kuitenkin minimoida. Junaliikenteen ja ratatöiden yhteensovittamisprosessin tavoitteena on säilyttää korkea turvallisuus- ja täsmällisyystaso siten, että ratatyöt voidaan toteuttaa taloudellisesti ja tarkoituksenmukaisesti.

Pääasiassa ratatyöt tehdään öisin, jotta junaliikenne häiriintyisi mahdollisimman vähän. Talvisin perusrannustöitä voidaan tehdä hyvin rajoitetusti. Usein ratatyöt tehdään yksiraiteisella radalla, liikenteen ohessa, mikä tuo omat haasteensa niiden suunnittelulle. Kaksi- tai useampiraiteisilla rataosilla ratatyöt tehdään yleensä raide kerrallaan, jolloin liikenne pystytään hoitamaan kohtuullisin järjestelyin. Yksiraiteisilla rataosilla ratatöiden järjestäminen vaatii suurempia liikennejärjestelyjä, jolloin liikennettä joudutaan rajoittamaan, siirtämään ja joskus perumaan kokonaan. Joidenkin ratatöiden yhteydessä rataosalle voidaan joutua asettamaan nopeus- tai painorajoituksia. Joskus rataosa joudutaan sulkemaan kokonaan pidemmäksi aikaa, jolloin puhutaan niin sanotusta totaaliatkosta. Ensisijaisena tavoitteena tärkeimmät yhteydet pyritään kuitenkin säilyttämään, jolloin vain osa junista joudutaan perumaan. (Natunen 2004, Perkkola 1998)

Työ- ja liikennöintisuunnitelmasta käy ilmi ratatyön eri vaiheet ja niiden aiheuttamat muutokset liikenteeseen. Suunnitelmaan merkitään kaikki nopeusrajoitukset, sähkökatkot sekä raidesulut. Joissakin maissa esim. Saksassa suunnitelmiin merkitään myös junien todennäköiset myöhästymiset ratatyön johdosta. Suomessa ratatyöt pyritään suunnittelemaan ilman aikataulumuutoksia. Työrajoja pidennetään korvaavalla liikenteellä, yhdistelemällä junia ja muuttamalla tavarajunien kulkureittejä. Suomessa ongelmallista on, että nykyisin seuraavan aikataulukauden ratakapasiteettia tulee hakea ennen kuin tulevan vuoden ratatyöt ovat lopullisesti tiedossa. Aikataulusuunnittelun kannalta olisi tärkeää, että ratatyöt ja eri osapuolten tarpeet olisivat mahdollisimman aikaisin selvillä. (Perkkola 1998, Väänänen 2006)

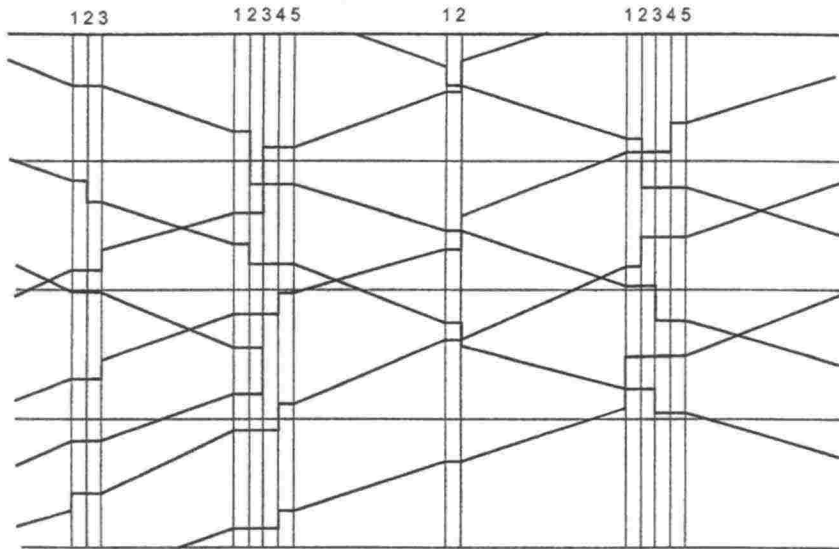
Saksassa ratatyöt suunnitellaan jopa kolme vuotta aikaisemmin, jolloin ne pystytään ottamaan paremmin huomioon aikataulusuunnittelussa. Joissakin maissa aikatauluihin varataan etukäteen päivittäisiä ja viikoittaisia työrajoja kunnossapidon tarpeisiin. Eräissä maissa on käytössä niin sanotut rataosien aukioloajat, joiden ulkopuolella rata on varattu kunnossapidon käyttöön. Suunnitelluilla työrajoilla pyritään siihen, että kunnossapito vaikuttaisi mahdollisimman vähän aikataulurakenteeseen ja täsmällisyyteen. (Perkkola 1998, Väänänen 2006)

Suomessa tulevista ratatöistä ja niiden ratakapasiteettitarpeista ilmoitetaan ensimmäisen kerran verkkoselostuksessa. Ratatyöohjelma tarkentuu verkkoselostuksen julkaisemisen jälkeen ja RHK päivittää ratatyölistaa ja julkaisee päivitetyn version kerran kuussa RHK:n www-sivuilla. Aikataulukauden vaihtuessa RHK tekee päätöksen alkavan aikataulukauden liikenteeseen vaikuttavista ratatöistä. Vielä tämän jälkeenkin työohjelmaan voi tulla erityistapauksissa muutoksia, kuitenkin niin, että työt on sovittu viimeistään kaksi kuukautta ennen niiden alkamista.

4.13 Liikennepaikkakohtainen aikataulusuunnittelu

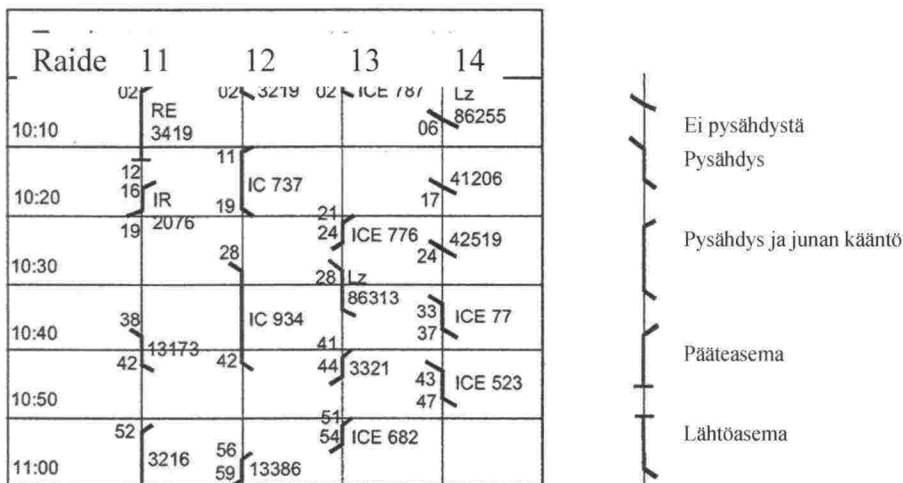
Aikataulusuunnittelu toteutetaan usein kahdessa eri vaiheessa. Ensin laaditaan rata-verkkokohtainen aikataulusuunnitelma ja vasta tämän jälkeen laaditaan yksityiskohtaiset liikennepaikkakohtaiset suunnitelmat, missä määritellään junien kulkutiet liikennepaikoilla sekä raiteiston ja laitureiden käyttö. Varsinaisessa aikataulun suunnitteluvaiheessa liikennepaikat nähdään eräänlaisina mustina laatikkoina, jolloin yksityiskohtaisia liikennepaikkojen raiteistokaavioita ei oteta huomioon. Tämän vuoksi aikatauluihin voidaan joutua tekemään pieniä muutoksia liikennepaikkakohtaisen aikataulusuunnittelun jälkeen, jos esimerkiksi raiteet eivät riitä suunnitellulle liikenteelle tai junien reitit liikennepaikalla ovat konfliktissa keskenään. Usein liikennepaikkakohtainen aikataulusuunnittelu tehdään paikallisesti. (Kroon et al. 2005)

Pienemmillä liikennepaikoilla junien raidevaraukset voidaan liittää graafiseen aikatauluun (kuva 30).



Kuva 30. Yhdistetty graafinen aikataulu ja raidevarauskaavio (Pachl 2002).

Suuremmilla liikennepaikoilla niin sanottu raidevarauskaavio antaa kuitenkin paremman käsityksen liikenteestä (kuva 31). Käyrät kuvaavat junien pysähtymis- käyttäytymistä asemalla ja niihin on merkitty junanumeron lisäksi saapumis- ja lähtöajat. Joissakin tapauksissa junien kohdalle merkitään myös, mistä ne ovat tulossa ja minne jatkavat matkaa. Esimerkiksi juna 13173 saapuu raiteelle 11 kello 10.38 ja jatkaa matkaansa neljä minuuttia myöhemmin.



Kuva 31. Raidevarauskaavio.

Liikennepaikkakohtaisessa suunnittelussa tulee ottaa huomioon, että raidemäärät ja -pituudet ovat riittävät suunnitelluille junille. Ne junat, joiden välille on suunniteltu vaihtoyhteys, on hyvä pyrkiä ohjaamaan samalle laiturille, jolloin matkustajien siirtyminen on sujuvaa ja vaihtoaika saadaan mahdollisimman lyhyeksi. Tavara- liikenteen puolella tulee huomioida satamien ja terminaalien vuorokausirytmit sekä liikennepaikkojen kapasiteettirajoitukset.

4.14 Konfliktin tunnistus

Rautatieliikenteen aikataulut ovat monimutkaisia ja niiden suunnittelussa tulee ottaa huomioon hyvin monia reunaehtoja. Monimutkaisimmissa tapauksissa on hyvin vaikea huomioida kaikkia näitä tekijöitä ja suunniteltuihin aikatauluihin saattaa jäädä virheitä. Graafinen aikataulu on jo itsessään hyvin käyttökelpoinen tarkistettaessa aikatauluja, koska siitä on helposti nähtävissä selkeimmät konfliktitilanteet. Uusissa aikatauluohjelmissa on yleensä konfliktintunnistusominaisuus, joka tarkistaa automaattisesti, että aikataulu täyttää kaikki sille asetetut reunaehdot. Jotkut ohjelmat myös ehdottavat ratkaisua konfliktitilanteen poistamiseksi (Nyby 2006). Alla on esitettynä mahdollisia konfliktitilanteita, joita aikatauluissa voi esiintyä:

- Junien kohtaaminen yksiraiteisella rataosalla
- Laituri- tai raidepituus ei riitä kohtauspaikalla
- Liian monta junaa samanaikaisesti kohtauspaikalla
- Liian pieni junaväli
- Prioriteetit väärin
- Painorajoituksen ylitys
- Sähköjuna sähköistämättömällä rataosuudella
- Junakohtaus tunnelissa
- Liian lyhyt vaihtoaika
- Liian lyhyet kääntöajat
- Saman opastinvälin yhtäaikainen käyttö

5 RAUTATIELIIKENTEEN TÄSMÄLLISYYS

5.1 Täsmällisyyden määritelmä

Suomessa tavoitteena on 90 % täsmällisyys rautatieliikenteessä. Äkkiseltään tavoite tuntuu yksinkertaiselta ja helposti ymmärrettävältä, mutta mitä täsmällisyys itse asiassa tarkoittaa tässä tapauksessa? Täytyykö junan esimerkiksi pysyä koko matkan ajan aikataulussa, jotta sen katsotaan olleen täsmällinen vai riittääkö, että juna saapuu vain määräasemalle aikataulunmukaisesti? Sallitaanko junalle tietyn suuruinen myöhästyminen, jolloin se vielä lasketaan täsmälliseksi? Entä, millä tavalla peruttuja junia käsitellään?

Suomen rautatieliikenteen täsmällisyydestä tavoitteen mukaan täsmällisyys tarkoittaa todennäköisyyttä, että juna saapuu määräasemalle vähemmän kuin x minuuttia myöhässä. Rudnick (1997) määrittelee liikenteen täsmällisyyden seuraavasti:

”Punctuality is a feature consisting in that a predefined vehicle arrives, departs or passes at a predefined point at a predefined time”

Edellä olevan määritelmän perusteella rautatieliikenteessä täsmällisyys viittaa (yleensä negatiiviseen) poikkeamaan aikataulusta, jota yleensä seurataan minuutin tarkkuudella.

Poikkeamaa suunnitellusta voidaan tarkastella

- **paikallisesti** esimerkiksi juna, jonka tulisi kulkea aikataulun mukaan tietyn pisteen kautta (ei välttämättä pysähtyä siinä) klo 15:37, ohittaa sen 15:39, jolloin ero suunniteltuun on 2 minuuttia
- **yleisesti** esimerkiksi, jos 10 km:n matka on tarkoitus ajaa 100 km/h ja ajetaan 80 km/h, on poikkeama suunnitellusta 20 km/h (ajallisesti noin 2 minuuttia).

Yleensä junille hyväksytään tietyn suuruinen poikkeama, jolloin sen vielä katsotaan olleen täsmällinen. Täsmällisyys voidaan määritellä monella eri tavalla. Voidaan esimerkiksi laskea junien lähtö- tai saapumistäsmällisyys tai täsmällisyys kaikilla asemilla. Täsmällisyys voidaan ilmoittaa täsmällisten junien osuutena, myöhästymisminuuttien summana tai todennäköisyytenä, että juna ei ole enempää kuin x minuuttia myöhässä.

Asiakkaan näkökulmasta täsmällisyys on subjektiivinen käsite. Esimerkiksi Hollannissa, missä täsmällisyystaso on 85 %, vain 17 % matkustajista on tyytymättömiä rautatieliikenteen täsmällisyyteen. Japanissa Kyoshun saarella junien täsmällisyys vuonna 2003 oli 98 % ja junat olivat keskimäärin 36 sekuntia myöhässä. Vaikka täsmällisyys oli huippuluokkaa, viidennes matkustajista antoi täsmällisyydelle arvosanaksi vain keskinkertainen. Yleensä asiakkaat arvioivat täsmällisyyden heikommaksi, mitä se todellisuudessa on. Säännöllisesti matkustavien vaatimukset täsmällisyyden suhteen ovat suuremmat kuin satunnaisesti matkustavien. (Harris 1994, Rudnicki 1997)

Kirjallisuudessa esiintyy paljon eri termejä, jotka kuvaavat järjestelmän toimivuutta ja suorituskykyä, kun puhutaan liikenteestä ja aikatauluista. Luotettavuus, vakaus ja tasapainoisuus ja vakaus ovat termejä, jotka liittyvät hyvin läheisesti liikenteen täsmällisyyteen.

Luotettavuus (*reliability*): Järjestelmän kyky suoriutua vaadituista tehtävistä vallitsevissa olosuhteissa määritellyn ajanjakson aikana. Rautatieliikenteessä tämä tarkoittaa rautatieyrityksen kykyä kuljettaa matkustajia tai tavaroita aikataulun mukaisesti. Luotettavuuden käsite on hyvin lähellä täsmällisyyttä, sillä se on yksittäisen junan myöhästymisen todennäköisyys. Kun järjestelmä on luotettava, junien keskimääräinen myöhästymisaika sekä matka-ajan vaihtelu on pientä ja vain pieni osa junista on myöhässä. (Ferreira & Higgins 1996, Huisman et al. 2005)

Vakaus (*robustness*) Järjestelmän kyky sietää häiriöitä. Vakaa järjestelmä toimii vaikeissakin olosuhteissa hyvin. Jos järjestelmän häiriönsietokyky on huono, pienikin häiriö aiheuttaa suuria myöhästymisiä, jotka leviävät nopeasti ja laajalle alueelle. (Vromans 2005)

Tasapainoisuus (*stability*): Järjestelmän kyky palautua normaaliin tilaan häiriön jälkeen. Kun rautatiejärjestelmä ei ole tasapainoinen, häiriö jää elämään rataverkolla pitkäksi aikaa ja liikenteen palautuminen normaaliksi kestää pitkään. (Vromans 2005)

Esimerkki: Muiden liikennemuotojen täsmällisyys (lentoliikenne)

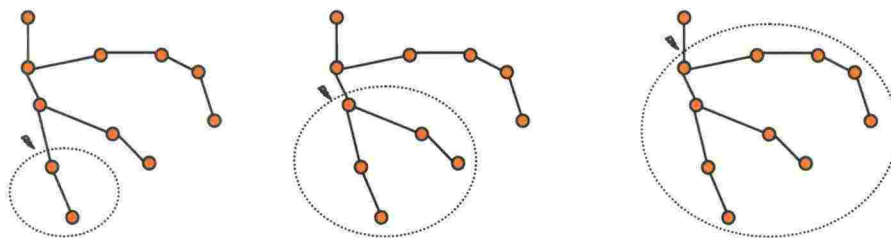
Rautatieliikenteessä junan lähtö- ja saapumisajan määrittely on suhteellisen yksinkertaista. Junan katsotaan saapuneen asemalle, kun se on pysähtynyt laiturille ja vastaavasti lähtöaika on ajanhetki, jolloin juna lähtee liikkeelle. Lentoliikenteen puolella tilanne ei ole näin yksiselitteinen. Onko lähtöaika se hetki, jolloin kone lähtee rullaamaan kiitotielle, aloittaa lähtökiihdytyksen vai silloin, kun kone nousee ilmaan. Vastaavasti saapuuko kone määräpaikkaan, kun pyörät koskettavat maata vai silloin, kun kone on täysin pysähtynyt. Entäpä, jos kone saapuu ajallaan, mutta passintarkastuksessa on ruuhkaa. Matkustajan näkökulmasta paras vaihtoehto olisi määritellä saapumisajaksi hetki, jolloin matkustaja saa matkatavaransa. Tällöinkään saapumisaikaa ei voida määritellä yksiselitteisesti. Esimerkiksi merkitäänkö saapumisajaksi aika, jolloin ensimmäinen vai viimeinen saa laukkunsa. Entä matkustajat, joilla ei ole matkatavaroita.

5.2 Häiriöt rataverkolla ja niiden leviäminen

Rautatieliikenteen täsmällisyys muodostuu normaalista matka-ajan hajonnasta ja häiriöistä. Junaliikenteessä normaali matka-ajan hajonta on pientä, mutta kun häiriöitä sattuu, ne ovat yleensä merkittäviä. Rataverkolla tapahtuu jatkuvasti odottamattomia häiriötilanteita, jotka vaikuttavat junien suunniteltuun kulkuun. Häiriön lähteitä on useita, kuten junakaluston rikkoutuminen ja radan rakenteiden tai teknisten laitteiden vioittuminen. Häiriöitä aiheuttavat myös muut kuin tekniset puutteet, kuten poikkeukselliset sääolosuhteet, liikenneonnettomuudet ja puhtaasti inhimilliset tekijät. Häiriöt vaikuttavat järjestelmän vakauteen. Vakauden muutos riippuu häiriön suuruudesta, laajuudesta, sijainnista, lukumäärästä ja itse järjestelmän vakaudesta. Jos järjestelmä on vakaa, pienillä häiriöillä ei ole juuri vaikutusta liikenteeseen.

Rataverkolla on myös monia eri syitä häiriöiden leviämiseksi. Häiriöt leviävät liikenteellisten riippuvuuksien vuoksi, joita ovat muun muassa junakohtaukset, ohitukset, vaihtoyhteydet sekä kalusto- ja henkilöstökierto. Vilkkaimmin liikennöidyt radat ovat kapasiteetin ylärajoilla ja pienikin häiriö voi vaikuttaa usean junan kulkuun.

Häiriö rataverkolla saattaa myöhästyttää junia aivan toisella puolella Suomea useiden tuntien kuluttua alkuperäisestä häiriöstä (kuva 32). Lisäksi häiriön leviämistä ajallisesti ja alueellisesti on vaikea ennustaa.



Kuva 32. Häiriöiden leviäminen rataverkolla.

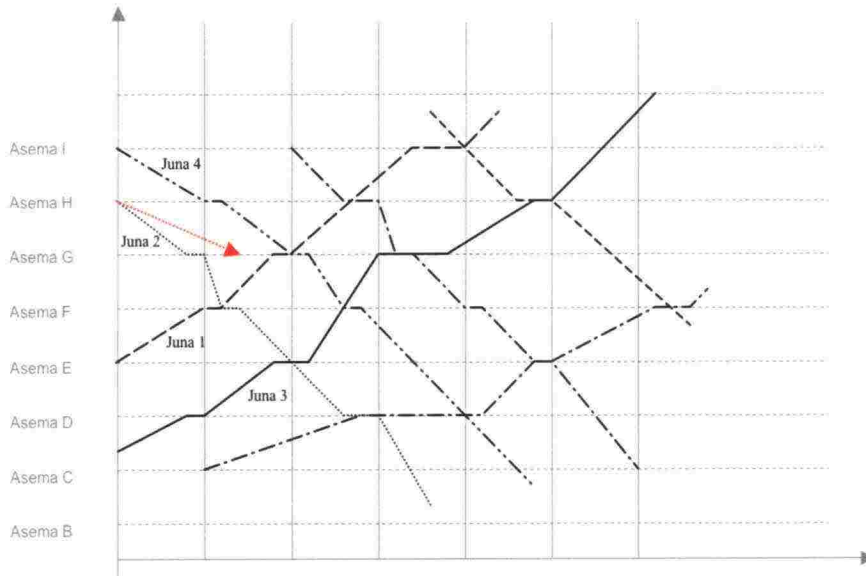
Rautatieliikenteessä on tärkeää pyrkiä välttämään häiriöitä, koska pienetkin viivästymiset voivat saada aikaan dominoefektin, joka loppujen lopuksi aiheuttaa usean junan myöhästymisen. Junien peruminen tai suurempi myöhästymisen voi myös sotkea kalustokierron, jos junayksiköt ja veturit ovat täysin eri paikassa kuin on suunniteltu. Kalustokierron häiriintyminen aiheuttaa lisäongelmia liikenteeseen, jolloin liikenteen täsmällisyys kärsii entisestään. (Goverde 2005)

Esimerkki: Aikataulusuunnittelu häiriötilanteessa

Yksiraiteisella radalla pienikin muutos aikataulusta voi vaikuttaa usean junan kulkuun ja merkitä kohtauspisteiden siirtymistä. Häiriötilanteessa alkuperäistä aikataulua joudutaan yleensä muokkaamaan ja joskus yksittäisiä junia joudutaan perumaan kokonaan. Tehtävä on haastava, koska aikaa on vain rajoitetusti ja huomioon otettavia muuttujia on paljon. Lisäksi moni sellainen tekijä, jota vielä aikataulusuunnittelu- vaiheessa oli mahdollista muuttaa, on tässä vaiheessa jo kiinnitetty. Uudelleen suunnittelun tavoitteena on minimoida häiriön vaikutukset ja rajata ne mahdollisimman suppealle alueelle. Tavoitteena voi olla esimerkiksi myöhästyneiden junien lukumäärän, kokonaismyöhästymisajan, myöhästymiskustannusten tai matkustajille aiheutuvan häiriön minimointi. (Törnquist 2005, Törnquist 2006a)

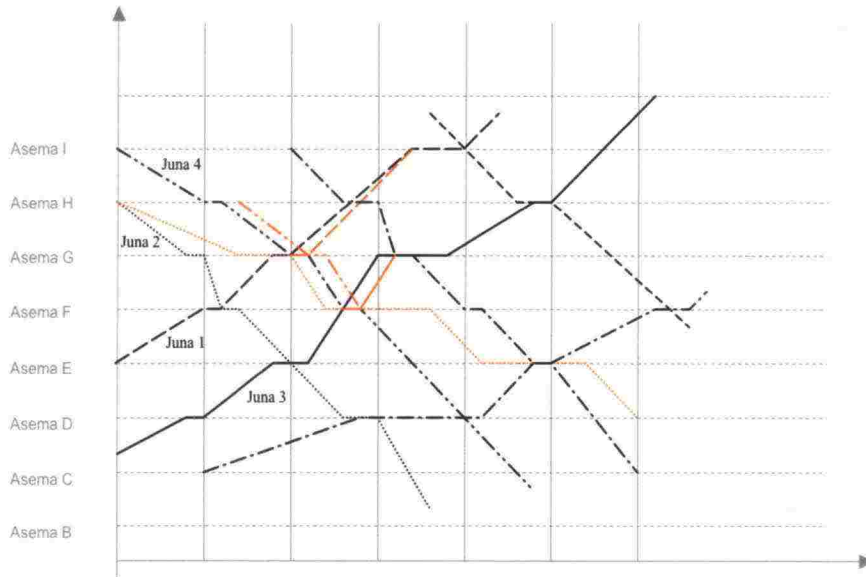
Aikataulujen uudelleen suunnittelussa junille voidaan arvioida uudet ajoajat. Ne perustuvat alkuperäisiin ajoaikoihin ja junien sijaintiin. Yleensä junien tarkkaa sijaintia ei ole mahdollista saada, vaan tiedetään ainoastaan, millä opastinvälillä juna on. Junille määritellään uudet lähtö- ja saapumisajat sekä uudet kohtaus- ja ohituspaikat. Uusi suunnitelma sisältää yleensä jonkin verran oletuksia. Esimerkiksi aina ei ole tiedossa, milloin rikkoutunut laite saadaan korjattua. (Nyström 2005)

Kuvan 33 graafinen aikataulu osoittaa havainnollisesti, kuinka yhden junan kulun muuttuminen suunnitellusta leviää rataverkolla ja vaikuttaa muiden junien kulkuun. Kuvassa on esitettyinä junien kulku yksiraiteisella rataosuudella asemien A ja I välillä. Junan 2 veturiin tulee vika, joka laskee sen suunniteltua nopeutta. Koska kyseinen juna varaa asemien H ja G välin suunniteltua pidempään, juna 4 ei pääse lähtemään asemalta aikataulun mukaisesti. Vastaavalla tavalla häiriö vaikuttaa myös tavarajunan 1 kulkuun, joka edelleen vaikuttaa muihin juniin.

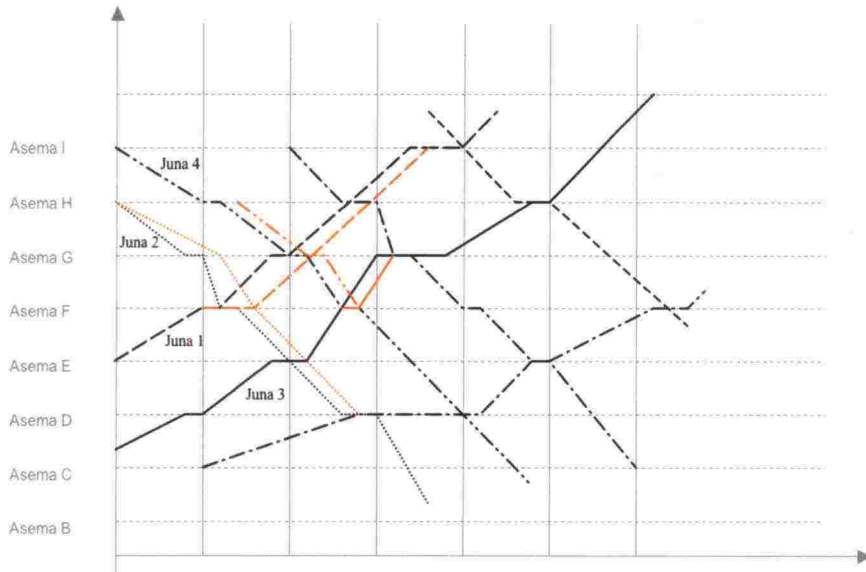


Kuva 33. Junan 2 muuttunut kulku.

Yksi mahdollinen ratkaisu olisi siirtää junien 1 ja 2 kohtaaminen asemalle G aseman F sijaan (kuva 34) tai vaihtoehtoisesti säilyttää alkuperäinen kohtaussuunnitelma (kuva 35). Ensimmäinen ratkaisu priorisoi junan 1, koska tällöin se saapuisi ajoissa perille, kun taas jälkimmäinen ratkaisu pyrkii minimoimaan muutokset alkuperäiseen suunnitelmaan. Valitsemalla jälkimmäisen ratkaisun aikataulu palautuu entiselleen hetken kuluttua, mutta ensimmäinen ratkaisu vaikuttaa junien kulkuun pysyvästi ja myöhästyttää junaa 2 lisää.



Kuva 34. Ratkaisuvaihtoehto 1.



Kuva 35. Ratkaisuvaihtoehto 2.

Aikataulujen uudelleen suunnittelussa ei yleensä ole yksinkertaista ratkaisua. Edellinen esimerkki kuvaa suhteellisen yksinkertaista tilannetta, jossa van yksi juna jää aikataulustaan jälkeen. Poikkeuksellisissa olosuhteissa, esimerkiksi lumipyryn aiheuttaessa useiden junien yhtäaikaisen myöhästymisen, on liikenteen ohjaaminen todella haastavaa.

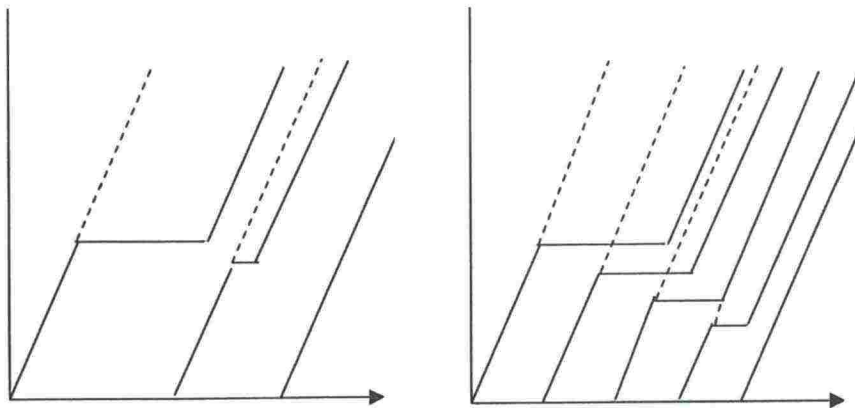
Kyseinen esimerkki osoittaa havainnollisesti rataverkon riippuvuuksia ja sitä, kuinka uudelleen suunnittelussa tulee ottaa huomioon monia eri tekijöitä. Esimerkiksi ehditäänkö junan 1 kontit lastata laivaan, jos henkilöjunia 2 ja 4 priorisoidaan, mikä vaikutus tavarajunan priorisoinnilla on junien 2 ja 4 vaihtoyhteyksiin tai mahtuuko asemalle G kaksi junien 1 ja 2 pituista junaa samanaikaisesti. Myös liikenteenohjausalueen ulkopuolinen liikenne tulee ottaa huomioon. Esimerkiksi millä tavalla asemalta B asemalle C saapuvat junat vaikuttavat uuteen suunnitelmaan ja päinvastoin.

5.3 Primääriset ja sekundaariset myöhästymiset

Kun tarkastellaan rautatieliikenteen täsmällisyyttä, on tärkeää tehdä ero primääristen ja sekundaaristen myöhästymisten välille. Rautatieliikenne on alttiina erilaisille häiriötekijöille, jotka johtavat primäärisiin myöhästymisiin. Kun häiriö vaikuttaa suoraan junan kulkuun, on kyseessä primäärinen myöhästymisen. Rataverkolla primääriset myöhästymiset vaikuttavat usein muihin juniin ja aiheuttavat sekundaarisia myöhästymisiä. Sekundaariset myöhästymiset ovat aina myöhässä olevien junien aiheuttamia. Esimerkiksi junan myöhästymisen veturivian takia on primäärinen myöhästymisen. Kun perässä tuleva juna joutuu odottamaan laiturin vapautumista myöhästyneen junan vuoksi, kyseessä on sekundaarinen myöhästymisen. (esim. Hofman & Madsen 2005)

Rautatiejärjestelmä on monimutkainen kokonaisuus ja huomattavasti herkempi erilaisille häiriöille kuin tieliikenne. Jotta tällainen järjestelmä käytännössä toimisi, on tärkeää pyrkiä pitämään häiriötaso mahdollisimman alhaalla. Primääristen myöhästymisten vähentäminen on yleensä kallista eikä niitä ole aina mahdollista välttää. Yksittäisten häiriöiden lisäksi on otettava huomioon häiriöiden pyrkimykset ketjuuntua ja sekundääriset myöhästymiset. Rautatiejärjestelmän luonteesta ja junien välisistä riippuvuuksista johtuen sekundäärisiä myöhästymisiä voi olla jopa enemmän kuin primäärisiä myöhästymisiä. Sekundäärisiä myöhästymisiä aiheutuu infrastruktuurin yhteiskäytöstä ja junien välisistä riippuvuuksista. Niiden määrä on voimakkaasti riippuvainen aikatauluista, kapasiteetin käyttöasteesta ja rataverkolla tapahtuvista vuorovaikutuksista. (Vromans 2005, BEST 2002)

Nykyisin ongelmana on, miten kasvavista liikennemääristä selvittää olemassa olevalla infrastruktuurilla. Kapasiteetin käyttöasteen kasvu lisää sekundääristen myöhästymisten todennäköisyyttä. Mitä tiukempi aikataulu ja pienemmät junavälit sitä helpommin myöhässä oleva juna viivästyttää muita junia (kuva 36).



Kuva 36. Sekundääristen myöhästymisten riippuvuus kapasiteetin käyttöasteesta.

Käyttöasteen kasvu pienentää junien välisiä marginaaleja, jolloin myöhästymiset leviävät rataverkolla helpommin ja laajemmalle. Aikatauluissa tulisi olla riittävästi pelivaraa ja puskuriaikaa, jotta järjestelmällä olisi kyky sietää pienempiä häiriöitä ja palautua suuremmista. Sekundäärisiä myöhästymisiä voidaan pyrkiä vähentämään aikataulusuunnittelun keinoin. Laadukas aikataulusuunnittelu on kustannustehokas tapa

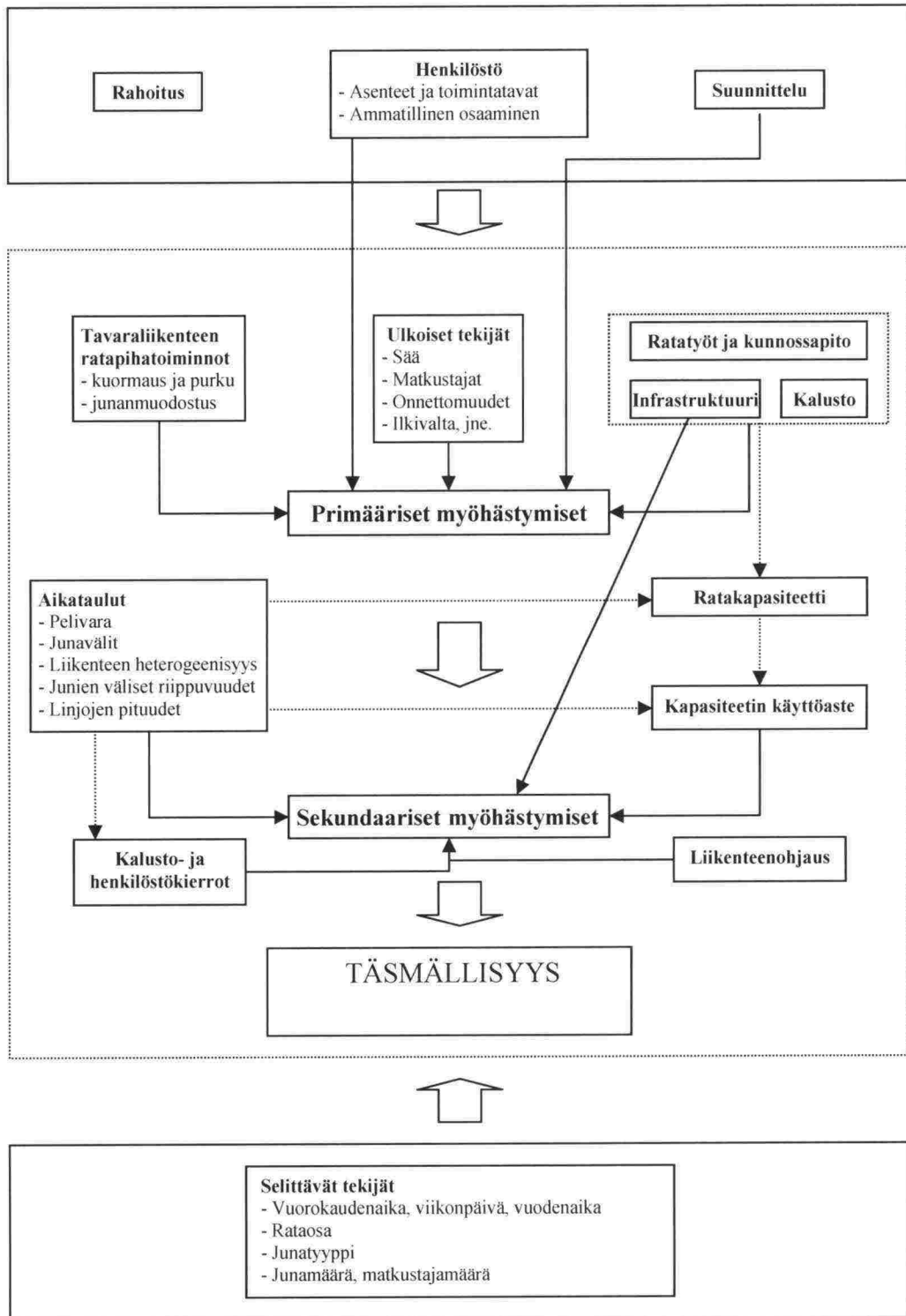
vähentää sekundäärisiä myöhästymisiä. Muut ratkaisut liittyvät ratakapasiteetin nostamiseen (lisäraiteet, puolenvaihtopaikat, jne.) ja ovat yleensä kalliita ja pitkäkestoisia projekteja. (Vromans 2005)

5.4 Täsmällisyyteen vaikuttavat tekijät

Rautatieliikenteen täsmällisyys on usean eri tekijän summa. Muun muassa infrastruktuurin ja kaluston luotettavuus, liikennemäärät, junien nopeuserot sekä pelivara ovat kaikki vaikuttavia tekijöitä. On tärkeää ymmärtää näiden tekijöiden vaikutus ja merkitys liikenteen täsmällisyyden kannalta. Kuvassa 37 on esitetty merkittävimmät täsmällisyyteen vaikuttavat tekijät ja niiden väliset riippuvuussuhteet. Mallista nähdään, mihin asioihin vaikuttamalla täsmällisyyttä voidaan pyrkiä parantamaan. Mallissa on myös kuvattu, mitkä eri tekijät aiheuttavat primäärisiä myöhästymisiä ja mitkä tekijät vaikuttavat sekundääristen myöhästymisten määrään. Malli perustuu eri lähteissä esille tulleisiin tekijöihin ja riippuvuuksiin sekä yleisesti hyväksytyihin syy-seuraussuhteisiin.

Ylimpänä mallissa on kuvattu välillisesti liikenteen täsmällisyyteen vaikuttavia tekijöitä. Radanpitoon varattu rahoitus vaikuttaa luonnollisesti infrastruktuurin luotettavuuteen ja ratakapasiteettiin. Jos rataverkon kuntoa ei ole mahdollista pitää liikenteen edellyttämällä tasolla, järjestelmän luotettavuus laskee. Mikäli tarvittavia investointeja kapasiteetin nostamiseksi ei voida toteuttaa, liikenteen ongelmat tulevat lisääntymään. Liikennemäärien kasvaessa järjestelmä toimii yhä lähempänä kapasiteetin ylärajaa ja on siten entistä herkempi häiriöille. Henkilökunnan ja erityisesti johdon sitoutuminen täsmällisyyden parantamiseen on myös tärkeää. Laadukas suunnittelu muodostaa perustan täsmälliselle liikenteelle.

Rautatieliikenteen täsmällisyyteen vaikuttavat paljon resurssien luotettavuus (infrastruktuuri, kalusto, henkilöstö). Infrastruktuurin vikaantuminen aiheuttaa yleensä suuria myöhästymisiä. Näitä ovat mm. ajojohtimen katkeaminen, vaihteiden toimintahäiriöt, turvalaiteviat tai sähkökatkot. Infrastruktuuriviit vaikuttavat kaikkiin juniin, joiden on suunniteltu ajavan kyseisen kohdan ohi. Varajärjestelmillä, laadukkailla materiaaleilla ja laitteilla voidaan parantaa järjestelmän luotettavuutta. Kunnossapidon määrä ja laatu vaikuttavat luonnollisesti myös rataverkon ja kaluston luotettavuuteen. Ratatyöt ja kunnossapito pyritään suunnittelemaan siten, että niiden liikenteelliset vaikutukset olisivat mahdollisimman pienet. Toisinaan ne voivat esimerkiksi kestää suunniteltua pidempään ja aiheuttaa siten primäärisiä myöhästymisiä liikenteeseen.



Kuva 37. Rautatieliikenteen täsmällisyyteen vaikuttavat tekijät.

Kaluston vikaantuminen voi tukkia osan asemaa tai yksittäisen rataosan. Yleensä kalustoviat aiheuttavat kuitenkin suhteellisen pieniä häiriöitä liikenteeseen. Esimerkiksi nopean junan kallistusjärjestelmän vikaantuessa juna joutuu vain alentamaan nopeuttaan ja pelivarasta riippuen juna saattaa jopa saapua aikataulunmukaisesti asemalle. Muita

kalustoon liittyviä vikoja ovat muun muassa junien kytkemiseen ja irrotukseen liittyvät ongelmat, ovien lukkiutuminen sekä jarru- ja moottoriviat.

Monet ulkoiset tekijät kuten liikenneonnettomuudet, ihmisten ja eläinten allejäänti, radalla liikkuvat ihmiset ja ilkivalta aiheuttavat myös primäärisiä myöhästymisiä. Sään aiheuttamat yksittäisen junan viivästykset ovat usein melko pieniä, mutta ne vaikuttavat yleensä laajalle alueelle ja pitkän aikaa, jolloin järjestelmän toiminta voi häiriintyä pahasti. Hyvin nopeat lämpötilanmuutokset voivat aiheuttaa kiskomurtumia tai kiskojen taipumista. Erityisesti syksyllä lehdet ja märät kiskot tekevät raiteet hyvin liukkaiksi, mikä pidentää jarrutusmatkoja ja heikentää junien kiihtyvyyssominaisuuksia. Ukkonen saattaa rikkoa sähkölaitteita ja lumisade estää vaihteiden toiminnan.

Henkilökunnan myöhästyminen aiheuttaa suoraan primäärisiä myöhästymisiä. Puhtaasti inhimilliset tekijät kuten kuljettajan ajokäyttäytyminen tai liikenteenohjauksen virheet voivat myös myöhästyttää junia. Myös suunnittelu voi toimia häiriölähteenä. Esimerkiksi aikatauluihin on saattanut jäädä virheitä, pysähdysajat asemilla on suunniteltu liian lyhyiksi tai uuden kaluston suorituskyky on yliarvioitu. Myös suunniteltua pidempien ja raskaampien junien vuoksi juna ei välttämättä pysy aikataulussaan. Lisäksi matkustajaruuhka, aggressiivisesti käyttäytyvät matkustajat tai tahallinen hätäjarrusta vetäminen voivat aiheuttaa primäärisiä myöhästymisiä. Tavara-liikenteen puolella normaalia pidemmät lastin käsittelyajat ja muut terminaalitoiminnot voivat viivästyttää junia. Toisinaan tavarajunat saatetaan myös laittaa etuajassa kulkuun, mikä voi aiheuttaa häiriöitä liikenteeseen.

Rautatiejärjestelmä muodostuu monista toisiinsa liittyvistä järjestelmistä. Yhdenkin järjestelmän vioittuminen heikentää sen toimintakykyä, mikä tekee rautatiejärjestelmästä äärimmäisen haavoittuvasen. Esimerkiksi turvalaitejärjestelmän vioittuessa junat voivat parhaimmillaan ajaa alennettua nopeutta. Pahimmassa tapauksessa koko liikenne pysähtyy. Myöhässä kulkevat junat saattavat viivästyttää muita junia ja aiheuttaa sekundäärisiä myöhästymisiä. Infrastruktuurin toiminnallisuus eli esimerkiksi sen rakenne, etäisyydet (linjojen pituudet) ja yksiraiteisuus vaikuttavat myöhästymisten leviämiseen rataverkolla.

Kuten aiemmin jo todettiin aikataulurakenne, kalusto ja infrastruktuuri vaikuttavat ratakapasiteettiin. Myös kunnossapito ja ratatyöt tarvitsevat kapasiteettia. Aikataulut kuvaavat liikenteen ja siten ne yhdessä kapasiteetin kanssa määrittelevät kapasiteetin käyttöasteen. Kapasiteetin käyttöastetta pidetään merkittävimpänä tekijänä liikenteen täsmällisyyden kannalta (Yuan 2002). Mitä vähemmän junia rataverkolla liikkuu, sitä väljemmät marginaalit junien välillä on ja sitä vakaampi aikataulu on. Koska ratakapasiteettia on rajallisesti, korkea kapasiteetin käyttöaste johtaa pieniin junaväleihin. Ruuhkaisimmilla rataosilla junavälit ovat hyvin lähellä minimijunaväliä ja pienikin viivästyminen aiheuttaa häiriöitä usean junan kulkuun. Tilanne on melko identtinen tieliikenteen kanssa. Mitä enemmän autoja, sitä enemmän ne vaikuttavat toisten kulkuun ja sitä vaikeampaa halutun nopeuden ylläpitäminen on.

Liikennemäärä vaikuttaa hieman myös primäärisiin myöhästymisiin. Mitä enemmän rataverkolla liikkuu junia, sitä kovemmalle rasitukselle rataverkko joutuu ja siten myös primääristen myöhästymisten todennäköisyys kasvaa liikennemäärien lisääntyessä. Junamäärän kasvu lisää myös kaluston vikaantumisen todennäköisyyttä.

Ratakapasiteettia lisäämällä voidaan pienentää sekundääristen myöhästymisten riskiä ja siten parantaa aikataulun luotettavuutta. Primääristen myöhästymisten määrään voidaan vaikuttaa puuttamalla niiden alkuperään. Aikataulusuunnittelun keinoin ei voida vähentää primäärisiä myöhästymisiä, mutta voidaan pyrkiä vähentämään niiden vaikutuksia esimerkiksi junien välisiä riippuvuuksia vähentämällä (junien yhdistäminen, vaihtoyhteydet, ohitukset, junakohtaamiset). Aikatauluteknisillä toimenpiteillä on yleensä myös kääntöpuolensa. Esimerkiksi pelivaran lisääminen parantaa täsmällisyyttä, mutta pidentää matka-aikaa ja heikentää kapasiteetin käyttöä.

Junien yhdistämisen ja erottamisen tarkoituksena on tarjota suorat yhteydet mahdollisimman monelle matkustajalle. Sen sijaan, että kaksi juna varaisi omat aikatauluviivansa, ajetaan vain yksi pitkä juna. Tämä säästää ratakapasiteettia ja periaatteessa sillä on myös positiivinen vaikutus täsmällisyyteen. Toisaalta junien yhdistäminen tai irrottaminen voi kestää suunniteltua pidempään ja joskus yhdistäminen ei onnistu ollenkaan teknisten ongelmien vuoksi, mikä toisaalta heikentää täsmällisyyttä.

Erityisesti yksiraiteisella radalla hitaamman liikenteen väistö- ja ohitusmahdollisuudet nostavat ratakapasiteettia merkittävästi. Ohitukset ja junakohtaamiset lisäävät kuitenkin riskiä myöhästymisen leviämiseen molempiin suuntiin. Hitaampi juna kärsii, jos nopeampi juna on myöhässä ja päinvastoin. Pitkät linjat taas tarjoavat suoran yhteyden mahdollisimman monelle matkustajalle, mutta pitävät sisällään riskin myöhästymisen leviämisestä laajalle alueelle. Jos juna jää aikataulustaan jälkeen matkan alussa eikä onnistu kuromaan aikataulua kiinni, voi juna vaikuttaa useisiin muihin juniin matkan aikana. Mitä suuremmat nopeuserot, sitä helpommin myöhästymiset yleensä leviävät rataverkolla. Junavälejä ja junien nopeuksia tasaamalla voidaan täsmällisyyttä parantaa tietyissä rajoissa.

Vakioaikataulujärjestelmässä junien aikataulut on rakennettava solmuasemien ehdoilla, jolloin yksittäisten junien aikatauluihin ei ole mahdollista tehdä muutoksia ilman tarkasteluja muutosten vaikutuksista kokonaisjärjestelmään. Järjestelmä perustuu junien saapumiseen solmuasemille suunnilleen samanaikaisesti. Vakioaikataulut lisäävät junien välisiä riippuvuuksia ja lisäävät järjestelmän häiriöherkkyyttä. (RHK 2004a)

Kalusto- ja henkilöstökierrot perustuvat hyvin pitkälle suunniteltuihin aikatauluihin. Erityisesti kalustokierron suunnittelulla voidaan vaikuttaa sekundäärisiin myöhästymisiin ja niiden leviämiseen. Jos pääteasemalle saapuva juna on myöhässä enemmän kuin junan kääntöaika, paluujunan lähtö myöhästyy. Jos saapuvasta junasta käytetään kalustoa useampaan kuin yhteen junaan, leviää myöhästymisen vielä laajemmalle. Mikäli kalustokierto on suunniteltu siten, että junayksiköt vaihtavat eri linjojen välillä, siirtyvät häiriöt linjalta toiselle huomattavasti helpommin. Vaihtotyö asemilla riippuu kalustokierrosta. Vaihtotyöliikkeet tulisi minimoida ja suunnitella siten, että vilkkaimmin liikennöidyillä raiteilla liikutaan mahdollisimman vähän. Pitkät kääntöajat parantavat liikenteen täsmällisyyttä, mutta heikentävät resurssien tehokasta käyttöä. Asemalla turhaan seisovat junat ruuhkauttavat asemia ja varaavat laiturikapasiteettia, josta saattaa olla pulaa vilkkaasti liikennöidyillä asemilla. Erityisesti suurempiin myöhästymisiin ja peruttujen junien aiheuttamiin kalustokierron häiriöihin

voidaan varautua ylimääräisellä kalustolla. Kaluston pääomakustannukset ovat kuitenkin merkittävät, minkä vuoksi tulisi löytää sopiva tasapaino varakaluston suhteen.

Myös henkilöstökierron suunnittelulla voidaan pienentää sekundääristen myöhästymisten riskiä. Junahenkilökunta saattaa vaihtaa junaan useita kertoja päivän aikana. Mahdollisuuksien mukaan henkilökunta tulisi pyrkiä pitämään samassa junassa ja siten minimoida henkilökunnan vaihdot junien välillä. Jokainen henkilökunnan siirto on potentiaalinen mahdollisuus myöhästymisen leviämiseen junasta toiseen, jos henkilökunnan tuova juna on myöhässä. Jos vaihtoja joudutaan tekemään, vaihtoajan tulisi olla riittävän pitkä, jotta pienet myöhästymiset eivät aiheuttaisi häiriöitä. Siirtyvä henkilökunta tulisi pyrkiä pitämään yhdessä (ns. henkilökuntatiimi). Jos henkilökunta tulee eri junista, syntyy heti kaksi potentiaalista häiriölähdettä. Suurempien myöhästymisten ja peruttujen junien varalle olisi hyvä olla jonkin verran vara-henkilökuntaa.

Kun rataverkolla tapahtuu häiriöitä, joidenkin junien kulkua voidaan joutua muuttamaan, ja junakohtauksia siirtämään. Joskus yksittäisiä junia voidaan joutua perumaan kokonaan, jolloin myös kalusto- ja henkilöstökierto pitää ottaa huomioon. Uudelleen suunnittelun tavoitteena on minimoida häiriön vaikutukset ja rajata ne mahdollisimman suppealle alueelle. Periaatteessa tavoitteena on siis sekundääristen myöhästymisten minimointi. Junien ohjaus häiriötilanteessa edellyttää liikenteen-ohjaajalta kokemusta ja näkemystä päätösten vaikutuksista muuhun liikenteeseen.

Alimpana täsmällisyysmallissa ovat niin sanotut täsmällisyyttä selittävät tekijät. Ne eivät varsinaisesti kerro alkuperäistä syytä huonoon täsmällisyyteen, mutta niiden perusteella voidaan arvioida, millainen täsmällisyys todennäköisesti tulee olemaan. Esimerkiksi ruuhka-aika kertoo, että todennäköisyys junan myöhästymiseen on suurempi, mutta se ei kerro, miksi näin on.

5.5 Täsmällisyyden merkitys laatutekijänä

Rautatieliikenteen laatu koostuu muun muassa matkustajainformaatiosta, turvallisuudesta, liikenteen säännöllisyydestä, täsmällisyydestä ja matka-ajasta. Henkilöliikenteen puolella asiakkaat pitävät täsmällisyyttä lähes kaikissa maissa merkittävimpänä laatutekijänä. Esimerkiksi Ruotsissa matkustajat kokevat myöhästymisen kolme kertaa negatiivisempänä asiana kuin matka-ajan pitenemisen. (Skagestad 2002, BEST 2002 s 87)

Myöhästynyt juna aiheuttaa resurssihäviöitä, lisää henkilöstökustannuksia ja laskee asiakastyytyväisyyttä. Liikenteen kysyntä laskee, jos palvelujen tarjonta on epäluotettavaa. Jotta rautatieliikenne koettaisiin houkuttelevaksi liikennemuodoksi, täytyy aikataulujen olla luotettavat ja liikenteen täsmällistä. Erityisen tärkeää liikenteen täsmällisyys on asiakkaiden vaihtaessa liikennevälineestä toiseen. Nykyisin monet matka- ja kuljetusketjut muodostuvat useammasta kuin yhdestä liikennemuodosta tai välineestä, minkä vuoksi liikenteen täsmällisyys on entistä tärkeämpää. Viiden minuutin myöhästymisen ketjun ensimmäisessä osassa voi muuttua 30 minuutin myöhästymiseksi, kun matkustaja menettää jatkoyhteyden. Myös vakioaikataulujärjestelmän toimiminen edellyttää hyvää täsmällisyytensä solmuasemilla. (Skagestad 2002, Rietveld et al. 2001)

Tavaraliikenteen puolella kuljetuskustannus on edelleenkin merkittävin kuljetusmuodon valintaan vaikuttava tekijä, mutta täsmällisyyden merkitys on kasvanut jatkuvasti rautatiekuljetuksissa. Saksassa rautatieyritykset on velvoitettu maksamaan rahdin alennusta jo viiden minuutin myöhästymisestä. Toimiva kuljetusjärjestelmä on tärkeä erityisesti maissa kuten Suomi ja Ruotsi, joiden teollisuus on hyvin riippuvainen kuljetuksista. Nykyisin monet toimitusketjut on viritetty toimimaan tarkasti aikataulutettuna ja ilman varmuusvarastoja, jolloin toimitusketjun haavoittuvuus lisääntyy ja liikenteen täsmällisyysvaatimukset kasvavat. (Iikkanen & Siren 2005, Permala 2007)

5.6 Epätäsmällisyyskustannukset

Epätäsmällisyydestä aiheutuu kustannuksia asiakkaille, mutta korvausten ja imago-tappioiden muodossa myös rautatieyrityksille ja rataverkon haltijalle. Vuonna 2006 RHK maksoi VR:lle noin 1,5 miljoonaa euroa korvauksia ratatöiden tai ratalaitteiden häiriöiden aiheuttamista myöhästymisistä. Ennakkoon sovitusta ratatöiden aiheuttamista liikennerajoituksista ei makseta korvauksia. Korvaukset perustuvat rautatielain (555/2006) mukaiseen rataverkon käyttösopimukseen ja niiden tavoitteena on kannustaa RHK:ta pitämään rataverkko mahdollisimman hyvässä kunnossa. (Mäkitalo 2007)

Rautatieyritykselle epätäsmällisyydestä aiheutuu kolmenlaisia kustannuksia (NSB 1996).

1. **Henkilöstö- ja kalustokustannukset:** Pidentyneet matka-ajat vaikuttavat suoraan kalusto- ja henkilöstökustannuksiin. Heikon täsmällisyydystason vuoksi voidaan joutua hankkimaan ylimääräistä kalustoa ja henkilöstöä kalusto- ja henkilöstökiertojen turvaamiseksi.
2. **Korvaukset asiakkaille:** Suomessa korvauksia maksetaan, jos asiakkaalle aiheutuu ylimääräisiä taloudellisia kustannuksia myöhästymisestä. Maksimikorvaus on 5000 €. Vuonna 2006 VR maksoi asiakkailleen noin 75 000 euroa. (VR 2007)
3. **Menetetyistä asiakkaista johtuvat kustannukset:** Osa asiakkaista saattaa valita jatkossa vaihtoehtoisen matkustus- tai kuljetustavan. Menettyjen asiakkaiden aiheuttamia kustannuksia on vaikea arvioida, mutta se on todennäköisesti suurin kustannuserä edellä mainituista.

Epätäsmällisyyden aiheuttamien yhteiskuntataloudellisten kustannusten laskeminen on hankalaa, koska myöhästymisen vaikutukset ovat asiakaskohtaisia eivätkä kustannukset nouse yleensä lineaarisesti. Erityisesti tavaraliikenteen puolella kustannukset nousevat yleensä hyvin selkeästi portaittain. Esimerkiksi myöhässä satamaan saapuvan junan aiheuttamat kustannukset kasvavat merkittävästi, kun tuotteita ei enää ehditä lastata laivaan ja ne pilaantuvat. Tavaraliikenteen puolella myös asiakkaan puskurivaraston koko tai tuotantoprosessin vaihe voi vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka suurta haittaa myöhästymisestä asiakkaalle aiheutuu. (Nyström 2004)

Täsmällisyyskustannusten laskeminen on huomattavasti hankalampaa kuin pelkkien myöhästymisten tai myöhästymisminuuttien laskeminen. Jotta täsmällisyyden

parantamiseen tähtäävien hankkeiden hyötyjä voitaisiin arvioida ja vertailla eri hankkeita, tulisi epätasällisyyden aiheuttamista kustannuksista olla kuitenkin jonkinlainen käsitys. Kun tiedetään kertyneet myöhästymisminuutit ja kuinka paljon yksi myöhästymisminuutti keskimäärin maksaa, saadaan käsitys myös epätasällisyyden aiheuttamista kustannuksista vuositasona.

Liikennevälinevalinnoista nähdään, millä tavalla asiakkaat arvostavat aikaa valitessaan nopeamman ja kalliimman vaihtoehdon hitaan ja halvemmän sijaan. Matka-aikasäästön arvo riippuu asiakkaasta (työmatka, vapaa-aika, jne.) ja kuvaa matkojen ajallisen lyhentymisen tuottamaa hyötyä. Aikasäästön arvo perustuu siihen, että matkaan kuluvalle ajalle on aina vaihtoehtoinen käyttötarkoitus työskentelyn, asioinnin ja vapaa-ajan toimintojen muodossa. Hankkeet, jotka lyhentävät matka-aikaa sallivat vaihtoehdoisen hyödyn toteutumisen. Rietveldin et al. (2001) tutkimuksessa saatiin seuraavat arvot matka-ajan lyhenemiselle ja myöhästymisen riskin pienenemiselle.

- Yhden minuutin matka-ajan lyheneminen 0,13 €
- Kahden minuutin myöhästymisen todennäköisyyden lasku 50 %:sta nolnaan 0,32 €

Mielenkiintoista tutkimustuloksissa on, että matkustajat arvostavat ”epävarmuus minuutin” 2,4 kertaa niin arvokkaaksi kuin myöhästymisminuutin (0,13/0,32). Tämä kertoo miten tärkeää on, että asiakkaat voivat luottaa aikatauluihin ja miten negatiivisena asiana epäluotettava liikenne koetaan.

Ruotsalaisessa tutkimuksessa (Lindh & Widlert 1989) pyrittiin arvottamaan rautatie-liikenteen laatutekijöitä mittaamalla kaukoliikenteen matkustajien maksuhalukkuutta näiden tekijöiden parantamiseen. Tutkimuksessa saatiin seuraavanlaisia tuloksia täsmällisyyden osalta¹:

- 5 minuutin myöhästymisen 0,9 €
- 15 minuutin myöhästymisen 3,1 €
- Täsmällisyyden parantaminen viidellä prosenttiyksiköllä vähentämällä lyhyitä (6–15 min) myöhästymisiä 0,45 €/matka
- Täsmällisyyden parantaminen viidellä prosenttiyksiköllä vähentämällä pitkiä (16–30 min) myöhästymisiä 1,3 €/matka

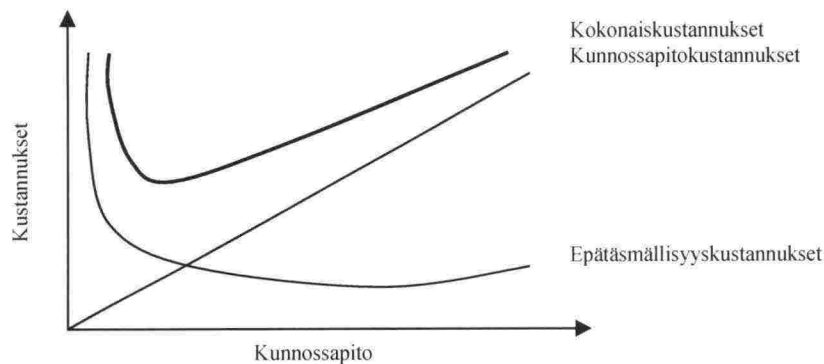
Kun tiedetään asiakkaiden maksuhalukkuus, junan myöhästymiselle voidaan laskea arvo (Jernbanelverket 2001).

Myöhästymisen arvo = Myöhästymisminuutit * Matkustajien lukumäärä * Maksuhalukkuus (€/min)

Tunnusluku on helposti ymmärrettävissä ja sitä voidaan käyttää priorisoitaessa eri hankkeita ja arvioitaessa niiden kannattavuutta. Suomessa ei ole toistaiseksi otettu huomioon epätasällisyyskustannuksia hyöty–kustannus-laskelmissa (Lahelma 2007).

¹ Arvot on muutettu euroiksi vuoden 2002 tasoon suhteutetuista arvoista.

Epätasällisyyskustannusten minimointi ei välttämättä merkitse kokonaiskustannusten minimointia. Kuvassa 38 on esitetty kunnossapitokustannusten ja epätasällisyyskustannusten välinen riippuvuus. Alussa epätasällisyyskustannukset laskevat voimakkaasti, kun kunnossapitoa lisätään. Myöhemmin kunnossapidolla ei ole enää niin suurta vaikutusta täsmällisyyteen ja lopulta kunnossapito alkaa häiritä liikennettä niin paljon, että epätasällisyyskustannukset alkavat jälleen nousta. Kunnossapitoa suunniteltaessa tulisi pyrkiä löytämään taso, jolla kokonaiskustannukset saadaan minimoitua. Voidaan esimerkiksi pohtia, kannattaako voimakkaiden lumisateiden aikaan jokaiselle merkittävälle vaihteelle asettaa henkilö pitämään vaihde puhtaana ja varmistamaan sen toimintakunto vai onko kokonaiskustannusten kannalta kannattavampaa hyväksyä tilapäisesti heikompi täsmällisyystaso. (Nyström 2005)



Kuva 38. Kunnossapito- ja epätasällisyyskustannusten välinen riippuvuus (Nyström 2005).

Mielenkiintoinen lähestymistapa epätasällisyyskustannuksiin on Gibsonin et al. (2002) työssä. Tutkimuksessa selvitettiin, voitaisiinko myöhästymisriskin ja epätasällisyyskustannusten kasvua korkeamman kapasiteetin käyttöasteen myötä käyttää ratamaksun perusteena. Työssä selvitettiin myöhästymiskustannusten riippuvuutta liikennemäärästä ja kehitettiin laskentakaava, jolla junan marginaalikustannukset (ns. ”ruuhkamaksu”) saadaan laskettua. Mallin avulla voidaan myös arvioida aikatauluun lisäävän junan vaikutuksia täsmällisyyteen.

Esimerkki: Suomen rautatieliikenteen epätasällisyyskustannukset

Suomessa kaikkien kulkutapojen aikakustannukset määritetään vahvistettuja tieliikenteen arvoja käyttäen¹. Yksikköarvon suuruus riippuu matkan tarkoituksesta (taulukko 5). (RHK 2004b)

¹ Voidaan pohtia, pitäisikö junaliikenteessä käyttää pienempiä arvoja. Ihmisillä on kuitenkin parempi mahdollisuus esimerkiksi töiden tekemiseen kuin tieliikenteessä.

Taulukko 5. Kaikkia liikennemuotoja koskevat ajan arvot vuoden 2005 hintatasossa (Tiehallinto 2005).

Matkan tarkoitus	Matkustajan ajan arvo (€/h)
Työajan matka	25,59
Työ- tai asiointimatka	7,22
Vapaa-ajan matka	7,22

Junamatkoista työajan sisäisiä matkoja on 15 % ja muita matkoja 85 % (RHK 2004b). Keskimääräinen junamatkustajan ajan arvo on siten noin 9,9 €/h. VR:n (2007) tilastojen mukaan vuonna 2006 tehtiin 65 miljoonaa henkilöliikenteen matkaa. Jos ajatellaan, että keskimäärin matkustaja on 3 minuuttia myöhässä (arvio, tarkkaa arvoa ei ole saatavissa) saadaan henkilöliikenteen epätasällisyyskustannuksiksi noin 32 miljoonaa euroa vuodessa. Kun lukuun lisätään palvelun tuottajalle aiheutuneet kustannukset (kysynnän lasku, korvaukset asiakkaille, henkilöstö- ja kalustokustannukset) voidaan henkilöliikenteen epätasällisyyskustannuksiksi arvioida noin 40 miljoonaa euroa vuodessa. Jos ajatellaan, että tavaraliikenteen epätasällisyyskustannukset olisivat noin neljänneksen henkilöliikenteen kustannuksista, ovat vuotuiset epätasällisyyskustannukset noin 50 miljoonaa euroa vuodessa. Esimerkki on hyvin yksinkertainen ja tulos on todella karkea arvio epätasällisyyskustannuksista. Se antaa kuitenkin jonkunlaisen käsityksen epätasällisyuden aiheuttamista kustannuksista. Vuositasolla puhutaan kymmenistä miljoonista euroista.

5.7 Rautatieliikenteen täsmällisyys Suomessa ja muualla

Suomessa täsmällisyys ilmoitetaan aikataulunmukaisesti määräasemalle saapuneiden junien osuutena. Lähiliikenteessä otetaan huomioon myös junien täsmällisyys lähtöasemilla (ks. kappale 8.7). Junien sallitaan olevan tietyn verran myöhässä, jolloin niiden katsotaan vielä saapuneen aikataulunmukaisesti asemalle. Rajat perustuvat arvioihin, ettei asiakkaalle todennäköisesti aiheudu tällöin vielä kohtuutonta haittaa myöhästymisestä. Suomessa on käytössä seuraavat kynnyksarvot.

- Lähiliikenne: 3 minuuttia
- Kaukoliikenne: 5 minuuttia
- Tavaraliikenne: 15 minuuttia

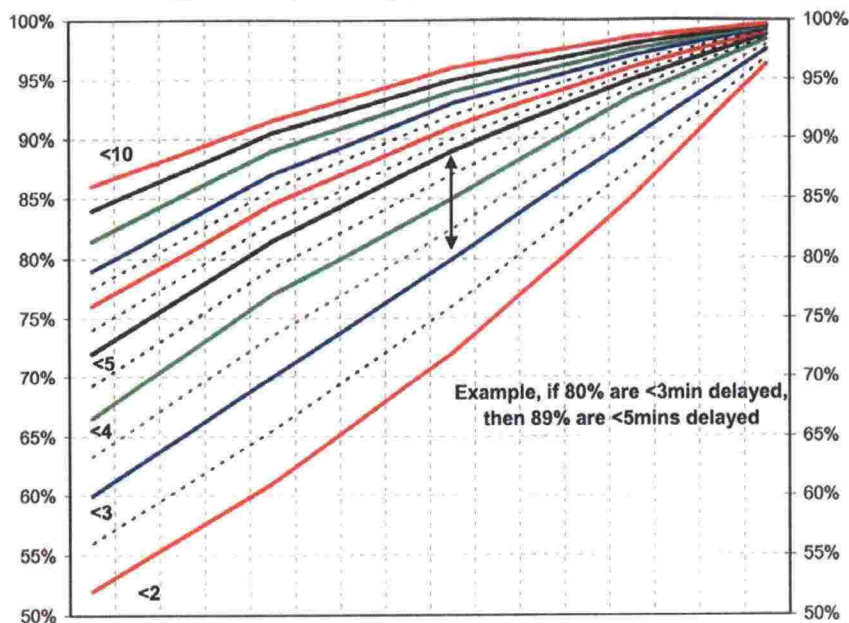
Eurooppalaista standardia täsmällisyyden mittaamiseksi ei ole ja eri maiden rautatieliikenteen täsmällisyyden mittauskäytännöt vaihtelevat jonkin verran. Eroja on muun muassa tiedon keräystavoissa, tiedon laadussa ja kattavuudessa sekä täsmällisyys-tilastojen julkaisukäytännöissä ja varsinaisissa mittareissa. Esimerkiksi Ruotsissa ja Norjassa täsmällisyys mitataan vain määräasemilla, Ranskassa täsmällisyys mitataan koko matkalta ja Tanskassa huomioidaan merkittävimmät asemat. Japanissa täsmällisyys ilmoitetaan junien keskimääräisenä myöhästymisaikana. Taulukossa 6 on esitetty eri maiden raja-arvoja, jolloin junan katsotaan saapuneen asemalle myöhässä. (BEST 2002, 86, Nyström 2005, Veiseth 2002)

Taulukko 6. Myöhästymismarginaalit eri maissa.

Marginaali [min]	
1	Japani
2	Saksa (lähiliikenne)
3	Ruotsi ja Itävalta (lähiliikenne), Hollanti (henkilöliikenne)
5	Iso-Britannia (lähiliikenne), Sveitsi (henkilöliikenne)
10	Iso-Britannia (kaukoliikenne)
11	Tanska (tavaraliikenne)
15/30	Australia (tavaraliikenne)
30	Sveitsi (tavaraliikenne)
10/15/20/25/30	Yhdysvallat

riippuen matkan pituudesta

Koska täsmällisyyden mittauskäytännöt vaihtelevat, eri maiden täsmällisyystilastot eivät ole kovin vertailukelpoisia. Esimerkiksi Hollannissa henkilöjunien täsmällisyydeksi ilmoitettiin vuonna 2006 86 % (< 3 minuuttia myöhässä). Jos mittauksissa olisi sovellettu yleisesti Euroopassa käytössä olevaa viiden minuutin marginaalia, täsmällisyys olisi ollut 93 %. Kuvassa 39 on esitetty täsmällisyystason riippuvuus rajoista, jolloin junan katsotaan vielä saapuneen aikataulunmukaisesti asemalle. Esimerkiksi, jos täsmällisyys on kolmen minuutin marginaalilla 80 %, se on viiden minuutin marginaalilla 89 %. (NS 2007, BEST 2002).



Kuva 39. Täsmällisyystason ja myöhästymismarginaalien välinen riippuvuus (BEST 2002)

Myös maantieteelliset (esim. linjojen pituudet) sekä käytännön erot kuten peruttujen junien käsittely vaikuttavat tuloksiin. Esimerkiksi Isossa-Britanniassa juna, joka kulkee yli puolet matkasta, mutta ei koko matkaa, kirjataan 20 minuuttia myöhästyneeksi. Suomessa osittain tai kokonaan perutut junat katsotaan saapuneen ajallaan asemalle.

Taulukosta 7 näkyy Suomen rautatieliikenteen täsmällisyys viime vuosina. Kauko- ja tavaraliikenteessä tavoitteena on 90 % täsmällisyys ja lähiliikenteessä 97,5 % täsmällisyys. Lähiliikenteen täsmällisyys on ollut huippuluokkaa viime vuosina.

Tavara- ja kaukoliikenteen tavoitteisiin ei ole kaikkina vuosina päästy, mutta siitä huolimatta täsmällisyystasoa voidaan pitää hyvänä eurooppalaisesta näkökulmasta tarkasteltuna. Liitteessä 1 on kuvattu henkilö- ja tavaraliikenteen merkittävimmät myöhästymissyöt Suomessa vuonna 2006. Kaikissa tapauksissa sekundäärinen syy ”junakohtaus, edellä kulkeva juna ja toisen junan sivuutus” aiheuttaa selvästi eniten myöhästymisiä.

Taulukko 7. Rautatieliikenteen täsmällisyys Suomessa (VR).

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Lähijunaliikenne	99	98	98	98	98	98	98	98	98	97
Kaukoliikenne	87	82	84	93	91	89	88	92	90	89
Tavaraliikenne								94	89	86

Suomen rautatieliikenteessä huomionarvoista on sekundääristen myöhästymisten suuri osuus (taulukko 8). Todellisuudessa luvut olisivat vielä suuremmat, koska sekundääriseksi myöhästymiseksi kirjataan vain syyt (liite 2) L1 (yhteysliikenteen odotus), L2 (junakohtaus) ja L7 (tulojuna myöhässä), vaikka myös syyt L3 (ahtaus ratapihalla) ja L4 (risteävät kulkutiet) johtuvat sekundäärisistä myöhästymisistä. Esimerkiksi kaukoliikenteen sekundääristen myöhästymisten korjattu osuus on 56 % (min). Sekundääristen myöhästymisten suuri osuus kertoo kapasiteetin korkeasta käyttöasteesta, rataverkon yksiraiteisuudesta ja tiettyjen rataosien puutteellisesta ratakapasiteetista.

Taulukko 8. Sekundääristen myöhästymisten osuus 2006.

Lähiliikenne		Kaukoliikenne		Tavaraliikenne	
min %	kpl %	min %	kpl %	min %	kpl %
44	39	52	44	29	38

Tietoa eri maiden rautatieliikenteen täsmällisyydestä on huonosti saatavilla. Jos täsmällisyystilastoja löytyy, niissä on hyvin harvoin mainittu, millä tavalla täsmällisyys on määritelty ja minkä junien täsmällisyydestä on kyse. Taulukoissa 9–11 on Ruotsin, Sveitsin ja Ison-Britannian rautatieliikenteen täsmällisyystilastoja viime vuosilta. Liitteessä 3 on UIC:n tilasto eri maiden rautatieliikenteen täsmällisyydestä vuodelta 2005.

Taulukko 9. Rautatieliikenteen täsmällisyys Ruotsissa (Banverket).

	2004	2005	2006
Lähijunaliikenne ¹	93	92	91
Kaukoliikenne ²	87	84	81
Tavaraliikenne ³	78	79	78

Taulukko 10. Rautatieliikenteen täsmällisyys Sveitsissä (SBB).

	2004	2005	2006
Henkilöliikenne ⁴	95	96	96
Tavaraliikenne ⁵	92	90	89

Taulukko 11. Rautatieliikenteen täsmällisyys Isossa-Britanniassa (Network Rail).

	2004	2005	2006
Henkilöliikenne ⁶	72	80	82

*Vuonna 2000 kaukoliikenteen täsmällisyys oli 69,1 %

5.8 Miksi japanilaiset junat kulkevat ajallaan

Japanilainen laatu on käsite ja tullut tutuksi monilta eri teollisuudenaloilta. Myös Japanin rautatieliikenne on tunnettu hyvin korkeasta täsmällisyystasostaan, vaikka matkustajamäärät ovat valtavia, kapasiteetin käyttöaste todella suuri ja lisäksi ympäristöolot ovat vaativat (rankkasateet, maanvyörymät, maanjäristykset, lumi). Viime vuonna Shinkansen junat olivat keskimäärin 0,1 minuuttia myöhässä⁷ (Matsubayashi 2007).

Seuraava esimerkki kuvaa hyvin Japanin täsmällisyyskulttuuria. ”Kun matkustaa junalla Japanissa, konduktööri saattaa tulla pahoittelemaan, jos juna on minuutin tai kaksi myöhässä. Mikäli juna on 15 minuuttia myöhässä, siitä uutisoidaan jo lehdissä. Junan ollessa yli tunnin myöhässä normaalit televisiolähettykset keskeytetään ja tärkeimmiltä asemilta aletaan lähettää reaaliaikaista kuvaa, kunnes tilanne on palautunut normaaliksi.”

Euroopassa termi ”myöhässä” ymmärretään hieman eri tavalla. Joissakin maissa tällä tarkoitetaan, että juna on vähintään 10–15 minuuttia aikataulusta jäljessä. Toisin sanoen juna, joka saapuu asemalle 14 minuuttia myöhässä, voidaan vielä kirjata ajallaan saapuneeksi. Hieman kärjistäen voidaan sanoa, että tämä on eurooppalainen tapa

¹ Max 3 min myöhässä

² Max 5 min myöhässä

³ Max 15 min myöhässä

⁴ Max 5 min myöhässä, Henkilöliikenteessä tavoitteena, että 95 % junista korkeintaan 5 min myöhässä 75 % junista korkeintaan 1 min myöhässä

⁵ Max 30 min myöhässä

⁶ Max 5/10 min myöhässä

⁷ Täsmällisyysmittari huomioi kaikki yli 1 min myöhässä olleet junat

saavuttaa tyydyttävä täsmällisyystaso. Miksi sitten Japanin rautatieliikenne on selvästi täsmällisempää kuin Euroopassa ja voitaisiinko täällä päästä vastaaviin täsmällisyystasoihin omaksumalla japanilaiset menetelmät? Esimerkiksi Hollannin ja Kyushun saaren rautatieliikenne muistuttavat hyvin paljon toisiaan. JR Kyushun täsmällisyystaso on keskimäärin 98 %, kun se Hollannissa on vain 85 % (Hatch 2000).

Kulttuurieroja on pidetty yhtenä suurimpana syynä Euroopan ja Japanin rautatieliikenteen välisiin täsmällisyyseroihin. Japanissa jokaiselle kansalaiselle on kunnia-asia, että junat kulkevat ajallaan. Sen lisäksi, että jokainen rautatiealan työntekijä on sitoutunut hyvän täsmällisyystason ylläpitämiseen ja kehittämiseen myös matkustajat pyrkivät välttämään turhia viivytyksiä asemilla. Kulttuurierot ovat kuitenkin vain yksi syy täsmällisyyseroihin. Japanissa on panostettu todella paljon epätäsmällisyyttä aiheuttavien tekijöiden poistamiseen ja suurin osa myöhästymisistä on ulkoisten tekijöiden aiheuttamia kuten sää, maanjäristykset ja itsemurhat. Näissäkin tapauksissa järjestelmä palautuu ennalleen selvästi nopeammin kuin Euroopassa.

Euroopan unionin BOB-tutkimusprojektissa vertailtiin eri maiden rautatieliikennettä, ja päädyttiin muun muassa seuraaviin johtopäätöksiin Japanin hyvästä täsmällisyystasosta. Japanissa on kiinnitetty todella paljon huomiota henkilöstöstä (1 %), kalustosta (1 %) ja infrastruktuurista ("vähän") aiheutuvien myöhästymisten eliminoimiseen. Kalusto on selvästi luotettavampaa kuin Euroopassa. Tätä ei ole saavutettu investoimalla moderniin huipputekniikkaan vaan luottamalla yksinkertaisiin, hyviksi koettuihin teknisiin ratkaisuihin. Merkittävimpien komponenttien huolto ja ennaltaehkäisevä vaihto riittävän usein sekä tuplatut tai mahdollisesti jopa kolminkertaistetut varajärjestelmät parantavat luotettavuutta. Lisäksi seuranta ja tarkastukset tehdään todella huolellisesti. (BEST 2002)

Myös infrastruktuuri on yksinkertaista ja luotettavaa. Ennaltaehkäisevässä kunnossapidossa panostetaan erityisesti luotettavuuden kannalta merkittäviin kohteisiin kuten vaihteisiin ja turvalaitteisiin. Kunnossapito tehdään pääasiassa liikenteen ulkopuolella ja tiukasti aikataulun mukaisesti, jolloin viivästyneet kunnostustoimet eivät aiheuta häiriöitä liikenteeseen. Henkilökunta on täsmällistä ja todella sitoutunut hyvään täsmällisyystason ylläpitämiseen. Kalusto- ja henkilöstökierrot ovat yksinkertaiset. Esimerkiksi henkilöstö ja junat pysyvät hyvin pitkälle samalla linjalla, jolloin häiriöt eivät siirry linjalta toiselle niin helposti. Mikäli häiriöitä aiheutuu, ennalta suunnitellut tehokkaat järjestelmät ja toimintamallit minimoivat häiriöiden aiheuttamat vaikutukset liikenteeseen. (BEST 2002)

Japan Railin tuottamassa videossa "Why do Japanese trains run on time" esitetään seuraavia syitä hyvään täsmällisyystasoon:

- Laadukas suunnittelu kaiken perustana
- Toiminnot suunnitellaan 15 sekunnin tarkkuudella
- Junakuljettajilla ja asemahenkilökunnalla suuri vastuu täsmällisestä liikenteestä
- Uuden henkilöstön motivointi ja koulutus
- Henkilöstön täydennys- ja kertauskoulutus (esim. kaikilla kuljettajilla on kerran kuukaudessa koulutus, joka keskittyy erityisesti täsmällisyyteen, joka toinen vuosi harjoittelua simulaattorilla)
- Matkustajien siirtyminen junaan ja pois junasta organisoitua ja sujuvaa, tiedotuskampanjat

- Standardoitu, hyvin perusteellinen kaluston ja infrastruktuurin kunnossapito
- Tiivis yhteydenpito liikenteenohjauksen ja veturinkuljettajien välillä

Äkkiseltään voisi kuvitella, että hyvän täsmällisyystason saavuttamiseksi Japanin aikatauluissa olisi paljon pelivaraa, junien väliset riippuvuudet olisi pyritty minimoimaan ja aikataulut pitämään yksinkertaisina. Japanissa pelivaraa on kuitenkin selvästi vähemmän kuin Euroopassa. Esimerkiksi Hakata–Oita-välillä (n. 200 km) pelivaraa on 1 min/1 h eli alle 2 % matka-ajasta. Suomessa pelivaraa on lisätty yleensä noin 10 %. (Hovi 2007, Hatch 2000)

Japanissa on periaatteessa täysin käänteinen ajattelutapa kuin Euroopassa, missä ajatellaan, että hyvän täsmällisyystason saavuttamiseksi junien ajoaikoihin tulee lisätä riittävästi pelivaraa. Japanissa ajatellaan, että korkea täsmällisyystaso mahdollistaa pienet pelivarat, korkean kapasiteetin käyttöasteen ja aikataulurakenteen, joka Euroopan maissa tekisi rautatieliikenteestä todella haavoittuvaisen pienillekin häiriötekijöille. Aikatauluissa on esimerkiksi hitaampien junien ohituksia, joiden marginaalit ovat todella pienet. Japanissa matkustajamäärät ovat aina olleet suuria, mutta kapasiteetti on ollut rajallista. Tällöin on ajateltu, että kapasiteetista on periaatteessa saatava kaikki hyöty irti, mikä on mahdollista vain, jos liikenteen täsmällisyys on huippuluokkaa. Japanissa on ymmärretty, että rautatiejärjestelmä on yksinkertainen, turvallisin ja halvin, kun junat kulkevat täsmälleen aikataulun mukaisesti. (Hatch 2000, Matsubayashi 2007)

6 AIKATAULUJEN ANALYSOINTI

Aikataulu, joka vaikuttaa toimivalta, kun junaliikenteen oletetaan kulkevan aikataulun mukaisesti, voi silti olla hyvin herkkä pysähdys- ja ajoaikojen muutoksille. Uuden aikataulun vakaus ja häiriöherkkyys tulisi arvioida ennen käyttöönottoa. Erityisen mielenkiinnon kohteena on myöhästymisten leviäminen ja aikataulun kyky lieventää häiriöiden vaikutuksia pelivaran ja puskuriaikojen avulla. Kuten aikataulusuunnittelu, myös aikataulujen analysointi on haasteellista, mutta sen tulisi kuitenkin aina olla osa aikataulusuunnitteluprosessia. Analysoinnin avulla voidaan myös arvioida täsmällisyysinvestointien kykyä vähentää junan myöhästymisriskiä ja aikataulun häiriöherkkyttä. Koska rahaa on rajallisesti, on tärkeää, että eri investointihankkeet voidaan asettaa järjestykseen.

Yksi tapa parantaa rautatieliikenteen täsmällisyyttä on laatia eri aikatauluvaihtoehtoja ja analysoida, mikä vaihtoehtoista on todennäköisesti paras. Tässä yhteydessä eri vaihtoehtoilla ei tarkoiteta täysin erilaisia aikatauluja, vaan muutokset voivat olla hyvinkin pieniä. Rautatieliikenteessä muutaman minuutin muutoksellakin voi olla suuri merkitys. Kiinnostuksen kohteena ei ole ainoastaan myöhästymisten määrä, vaan myös se, miten nopeasti järjestelmä palautuu normaaliksi häiriön jälkeen ja millä tavalla häiriöt leviävät rataverkolla.

Tässä luvussa esitellään erilaisia menetelmiä aikataulujen analysoimiseksi. Aluksi käsitellään rautatieliikenteen simulointia, jota on jo pitkään käytetty aikataulujen analysoinnissa. Koska simuloinnin käytöllä on omat rajoituksensa, luvussa esitellään myös mahdollisia vaihtoehtoja simuloinnille ja arvioidaan menetelmien hyötyjä, haittoja ja sovellusmahdollisuuksia.

6.1 Simulointi

Simulointi on todellisten ilmiöiden jäljittelemistä ohjelmoidulla mallilla ja sen avulla systeemin toimintaa pyritään mallintamaan mahdollisimman tarkasti ja totuudenmukaisesti. Rautatieliikenteen simulointi on yleistynyt viime vuosina paljon ja syynä ovat mm. tietokoneiden ja ohjelmointikielen kehittyminen sekä yhteiskunnalliset tarpeet saada tarkempaa tietoa suunnitelluista liikenneratkaisuista. Liikenteen simulointia käytetään yleensä apuvälineenä analyyseissä, joiden tutkiminen empiirisillä ja analyyttisillä malleilla on hyvin vaikeaa, ja kun niistä saatava pelkkä keskiarvotieto ei riitä. Menetelmien kehittymisen vuoksi tänä päivänä on mahdollista saada yhä monipuolisempia ja tarkempia tuloksia simuloinnista. Simuloinnista ei saada suoraan matemaattista ratkaisua, vaan analyysi tapahtuu seuraamalla mallin toimintaa ja tilastoimalla tuloksia. (Hofman & Madsen 2005, Pursula 1999)

Simuloinnissa tutkittava järjestelmä mallinnetaan ja sen toimintaa tarkastellaan ikään kuin käytännössä. Simulointimallit jaetaan niiden tarkkuuden perusteella mikroskooppisiin ja makroskooppisiin malleihin. Simulointiohjelmat olivat aiemmin melko suurpiirteisiä ja yleistäviä, koska tarkempaan tarkasteluun ei ollut yksinkertaisesti resursseja tietokoneiden tehon ollessa vain murto-osa siitä, mitä se on tänä päivänä. Useimmat liikenteen tapahtumat ovat kuitenkin luonteeltaan mikroskooppisia eikä niitä voida yksinkertaistaa kovin paljoa hävittämättä olennaista osaa kokonaisuudesta. Simuloinnissa lähtötietojen tarkkuus vaikuttaa paljon tulosten

tarkkuuteen ja luotettavuuteen. Rautatieliikenteen simulointimallin rakentamiseen tarvitaan yleensä yksityiskohtaista ja luotettavaa tietoa seuraavista liikennejärjestelmän osa-alueista. (Pursula 1999, Kosonen 2006)

- Infrastrukturi
 - ratageometria
 - vaihteet
 - opastimet
 - opastinvälit
 - nopeusrajoitukset
- Kalusto
 - kiihdytys- ja jarrutusominaisuudet
 - junapainot
 - prioriteetit
- Liikenne (aikataulut)

Simulointi soveltuu hyvin mm. eri aikatauluvaihtoehtojen toimivuuden arviointiin ja mahdollistaa aikataulujen testaamisen ja analysoinnin ennen niiden käyttöönottoa. Simuloimalla voidaan testata erilaisia hypoteeseja ja hyödyntää tuloksia uusien aikataulujen suunnittelussa. Sen avulla voidaan tutkia, millä tavalla aikataulurakenne sietää erilaisia häiriöitä tai miten nopeasti liikenne palautuu normaaliksi häiriön jälkeen. Simuloinnilla voidaan myös tarkastella investointihankkeiden toimivuutta, mahdollisia ongelmia sekä niiden vaikutuksia liikenteeseen. Simuloinnin luonteesta johtuen rautatieliikenteen simuloinnissa joudutaan usein keskittymään vain tietyn rataosan tai suuremman liikennepaikan tarkasteluun, mikä rajoittaa simuloinnin käyttöä laajojen rataverkkojen tutkimisessa. Tällöin ei pystytä arvioimaan koko rataverkon laajuisia vaikutuksia. (Carey & Carville 1998, Hallowell & Harker 1998, Kosonen 2006)

Aina tulee muistaa, että simulointimalli on vain kuvaus todellisuudesta. Käyttäjän tulee ymmärtää mallin ominaisuudet ja reunaehdot ja pystyä perustelemaan, mistä mallin antamat tulokset syntyvät ja ovatko ne järkeviä. Yleensä suurin osa simuloinneista tapahtuu ideaalimaailmassa, missä junat liikkuvat maksiminopeudella ja kiihdytykset sekä jarrutukset tapahtuvat maksimiarvoilla. Esimerkiksi mallissa junakohtaamiset ja ohitukset voivat toimia moitteettomasti, mutta aikataulumarginaalien ollessa pieniä saattaa pienikin häiriötekijä sotkea liikennettä hyvin paljon.

Suomessa on ollut viime aikoina käytössä kaksi rautateiden simulointiohjelmaa. Muutama vuosi sitten ruotsalainen SIMON-simulointiohjelma korvattiin modernimmalla sveitsiläisellä OpenTrack-simulointiohjelmalla. Suomessa OpenTrack-ohjelman lisenssin omistavat RHK ja Oy VR-Rata Ab. Simulointia on käytetty Suomessa ratapihojen toimivuustarkasteluissa sekä yksittäisten rataosien liikennöinti-tarkasteluissa. Aikataulusuunnittelussa ja aikataulujen analysoinnissa simulointia ei ole käytetty (Hovi 2007, Kosonen 2006)

Esimerkki: Kapasiteetin käyttöasteen vaikutus täsmällisyyteen (RailSys)

Tutkimuksessa simuloitiin Tukholman ja Västeråsin väliltä 24 km pitkää kaksiraiteista rataosaa kolmella eri liikennemäärällä (31, 35, 37 junaa). Työssä tarkasteltiin lähinnä sitä, millä tavalla pienet viivästykset tai ”normaalit” häiriöt vaikuttavat liikenteen

täsmällisyyteen liikennemäärien kasvaessa. Primäärisiä myöhästymisiä lisättiin malliin kahdella eri tavalla. Rataosalle saapuvia junia viivästettiin satunnaisesti empiiriseen dataan perustuvan jakauman mukaan maksimissaan kuusi minuuttia. Lisäksi junien pysähdyksiä pidennettiin. Pysähdysaikojen jakauma perustui pysähdysaikojen tilastointiin yhdellä yksittäisellä asemalla. Tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 12. Tuloksista nähdään mm., että suunniteltu pelivara pystyi kompensoimaan kapasiteetin kasvun myötä lisääntyneen myöhästymisriskin, kun junien myöhästymiset ovat pieniä. (Wahlborg 2004)

Taulukko 12. Ruotsalaisen simulointitutkimuksen tulokset, RailSys (Wahlborg 2004).

Vaihtoehto	Vaihtoehto		
	1	2	3
Junien määrä	31	35	37
Kapasiteetin käyttöaste (%)	62	72	76
Keskimääräisen myöhästymisajan lisääntyminen välillä Kungsängen-Karlberg (min)	0,22	0,23	0,18
Myöhästymisajan lisääntyminen, ei pelivaraa (min)	0,52	0,83	1,04
Myöhästyneiden junien keskiarvo 15 min primäärisen myöhästymisen jälkeen	4,8	7,0	8,0
Järjestelmän palautumisaika 15 min primäärisen myöhästymisen jälkeen (min)	41,4	47,9	51,3

Esimerkki: Koko rataverkon simulointia Hollannissa (SIMONE)

Tietokoneiden tehon kasvun myötä myös koko rataverkon kattavia simulointiohjelmaa ja -malleja on kehitetty. Hollannin rataverkon haltija ProRail käyttää makrosimulointiohjelmaa SIMONEa koko rataverkon liikenteen simulointiin. Ohjelma on kehitetty lähinnä aikataulujen vakauden ja häiriöherkkyyden analysointiin. Sen avulla voidaan myös tunnistaa rataverkon pullonkauloja. SIMONE on yhteensopiva käytössä olevan aikataulusuunnitteluohjelman (DONS) kanssa ja simulointimallit saadaan luotua automaattisesti valmiiden aikataulujen ja infrastruktuuritietokannan pohjalta. Pysähdys- ja ajoaikoihin voidaan lisätä stokastista vaihtelua ja liikenteenohjauksen toimintaa voidaan mallintaa erilaisilla konfliktitilanteiden suunnittelusäännöillä. SIMONE on osoittautunut hyväksi työkaluksi useissa eri tutkimuksissa. Suurimmassa osassa tutkimuksia on vertailtu eri aikatauluvaihtoehtoja, mutta ohjelmalla on myös testattu eri suunnitteluperiaatteiden vaikutusta täsmällisyyteen. (Middelkoop & Bowman 2001, Middelkoop & Bowman 2002)

Ohjelma laskee kertyneet myöhästymiset, täsmällisyysprosentin sekä sekundääristen ja primääristen myöhästymisten suhteen. Koko rataverkon lisäksi tuloksia voidaan tarkastella rataosa-, asema-, junatyypin- tai junakohtaisesti. Vaikka mallin rakentamiseen ei kulu aikaa, koko rataverkon aikataulujen testaaminen on todella hidasta. Yhteen simulointikertaan kuluu aikaa noin 20 tuntia ja siihen tulee vielä lisätä simulointiajon valmisteluun kuluva aika, joka on useita tunteja. Luotettavien tulosten saamiseksi tarvitaan vähintään 50 simulointikertaa. (Middelkoop & Bowman 2001)

6.2 Analyttiset menetelmät

Aikataulusuunnittelun keinoin voidaan vähentää sekundäärisiä myöhästymisiä, mutta ei primäärisiä. Näin ollen täsmällisyyden kannalta paras aikataulu on se, missä sekundääristen myöhästymisten määrä on todennäköisesti pienin. Monet aikataulujen analysointimenetelmät laskevat sekundääristen myöhästymisten odotusarvon ja

perustuvat usein junien määrään, junaväleihin ja jonoteoriaan. Jonoteorian avulla pyritään määrittelemään järjestelmän suorituskyky. Se on erittäin laaja ja haastava ala, jossa päädytään helposti monimutkaisiin ja vaikeisiin mallintamisongelmiin. Yleensä rautatieliikenteessä jonoteorian avulla arvioidaan junien odotusaikoja eli myöhästymisiä ja rataverkon pullonkauloja. (Mattsson 2004, Goverde 2005)

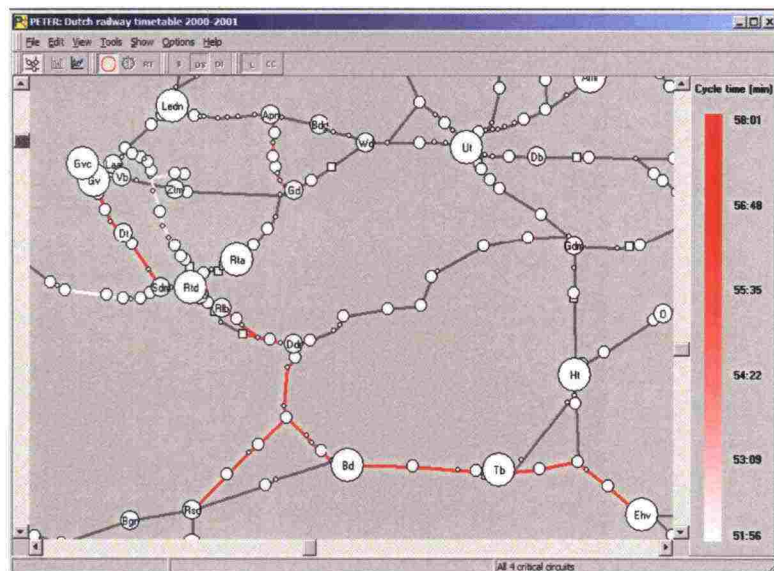
Careyn (1999) malli laskee aikatauluista sekundääristen myöhästymisten todennäköisyysjakauman, mistä nähdään sekundääristen myöhästymisten odotusarvo. Malli perustuu junaväleihin ja todennäköisyyteen, että juna pysyy minimijunavälin etäisyydellä muista junista. Vaikka malli on tarkoitettu käytettäväksi ennen aikataulujen käyttöönottoa, tarvitaan lähtötietona primääristen myöhästymisten todennäköisyysjakauma, joka saadaan historiatiedoista. Carey esittelee myös menetelmän, jossa ei tarvita lähtötietona primäärisiä myöhästymisiä. Mallien avulla voidaan vertailla eri aikatauluvaihtoehtoja tai arvioida, millä tavalla liikenteen lisääminen tulee vaikuttamaan täsmällisyyteen. Tarkastelun kohteena voi olla joko yksittäinen juna tai koko aikataulu.

Yleensä malleihin aiheutetaan primäärisiä myöhästymisiä junien prosessiaikoja muuttamalla. Usein ajoaikojen vaihtelut perustuvat tilastollisiin jakaumiin. Probabilistisissa malleissa muuttujien arvot ilmaistaan todennäköisyysjakaumien avulla. Käytännön sovelluksissa tällainen lähestymistapa on mielekäs, sillä todennäköisyysteoriaan perustuva lähestymistapa tarjoaa hyvän pohjan epätasmoisten arvioiden yhdistelyyn. Yleensä asiantuntijan on helppo ymmärtää, millä tavalla junan myöhästymisen vaikuttaa perässä tulevan junan kulkuun. Junien väliset vuoro-vaikutukset ovat kuitenkin monimutkaisia ja tällöin laajojen yhteistodennäköisyysjakaumien hahmottaminen on vaikeaa. Probabilistiset menetelmät tarjoavat hyvän työkalun tällaisten ongelmien tarkasteluun ja niiden avulla voidaan mallintaa rataverkon toimintaa ja eri muuttujien välisiä riippuvuussuhteita. (Herrmann 2006, Mukula 2005)

Herrmann (2006) esittelee työssään probabilistisia menetelmiä aikataulujen arvioimiseksi. Konfliktien odotusarvo -tunnusluku kertoo aikataulujen vakaudesta. Jos junat kulkevat ajallaan ja aikataulu on virheetön, odotusarvo on nolla. Malliin voidaan syöttää myöhästymisiä n kappaletta, jolloin malli laskee aikataulun konfliktitilanteet, jolloin sen avulla voidaan arvioida eri aikatauluvaihtoehtojen häiriöherkkyyttä. Mitä vähemmän konflikteja myöhästymiset aiheuttavat, sitä paremmin aikataulu sietää häiriöitä ja sitä vakaampi aikataulu on. Yleensä aikatauluissa on junia, joiden myöhästymisen ei juuri häiritse muita junia ja taas junia, joiden myöhästymisen aiheuttaa vakavia häiriöitä liikenteeseen. Samassa työssä esitellään myös menetelmä, joka etsii aikatauluista niin sanotun kriittisimmän junan, jonka viivästyminen tulee aiheuttamaan todennäköisesti eniten ongelmia muiden junien kulkuun.

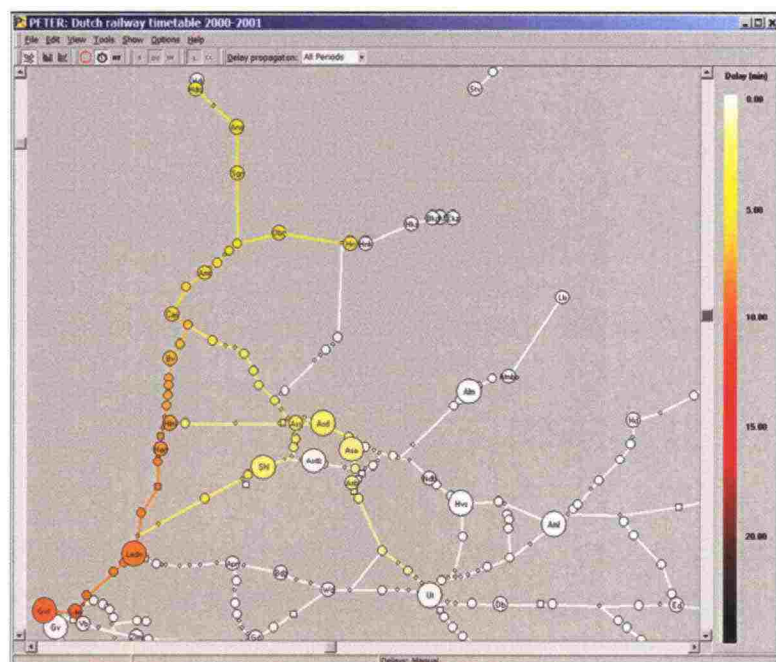
Max-plus algebra on viime aikoina paljon huomiota saanut ja paljon tutkittu analyttinen lähestymistapa aikataulujen vakauden arviointiin (esim. Goverde 1998a, Van Den Boom & Schutter 2004, Vromans 2005). Se on yksi harvoista analysointimenetelmistä, joka soveltuu koko rataverkon laajuisten aikataulujen analysointiin. Menetelmä perustuu junien välisiin puskuriaikoihin ja pelivaroihin (ajoaika, pysähdykset, kääntöaika). Vakioaikataulujärjestelmässä junien väliset riippuvuudet ovat suuret ja häiriöt leviävät rataverkolla hyvin laajalle, jos pelivaraa ja puskuriaikaa ei ole riittävästi. Max-plus algebran avulla voidaan arvioida järjestelmän

vakautta ja kykyä palautua häiriön jälkeen. PETER on Max-plus algebraan perustuva ohjelma vakioaikataulujen analysointiin. Ohjelma hakee aikatauluista niin sanotut kriittiset rataosat eli ne rataosat, joiden palautuminen häiriöstä kestää pisimpään (kuva 40).



Kuva 40. Kriittiset rataosat, PETER (Goverde 2005).

Ohjelman avulla voidaan tarkastella myös häiriöiden leviämistä rataverkolla (kuva 41).



Kuva 41. Häiriöiden leviäminen rataverkolla, PETER. (Goverde 2005).

Toinen mielenkiintoinen Max-plus algebraan sovellettu sovellus on rataosan kapasiteetin määrittely tietyllä infrastruktuuriratkaisulla (de Kort et al. 2003). Työssä on esitelty menetelmä, joka laskee maksimijunamäärän rataosalla tietyllä täsmällisyystasolla. Menetelmän avulla voidaan esimerkiksi arvioida, onko rataosan kapasiteetti

riittävä suunnitellulla liikennemäärällä, kun otetaan huomioon haluttu täsmällisyystavoite. Lähtötietona ei tarvita tarkkaa aikataulua.

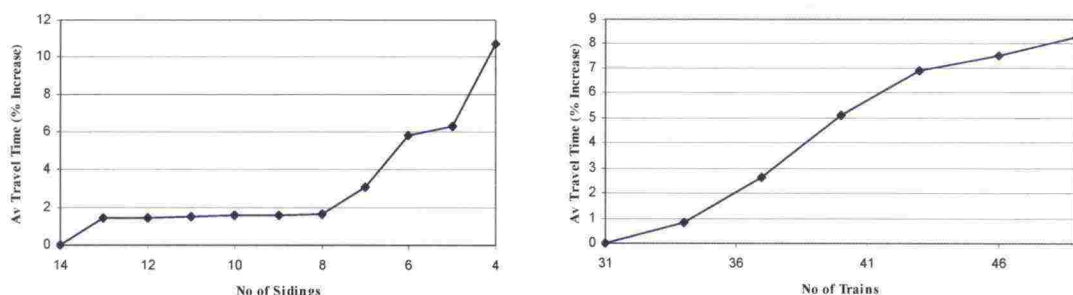
Tutkijat sovelsivat menetelmää 100 km:n pituisella kaksiraiteisella suurnopeusrataosalla, missä on kolme tunnelia, joista pisin on seitsemän kilometriä pitkä. Junaturvallisuuden vuoksi tunneleissa voi olla kerrallaan vain yksi juna, joten tunnelit toimivat ikään kuin yksiraiteisina pullonkauloina kaksiraiteisella rataosalla. Liikennemäärän oli arvioitu kasvavan 8:sta 16:een junaan tunnissa/suunta vuoteen 2015 mennessä. Selvityksen mukaan rataosan täsmällisyystaso tulisi laskemaan todella merkittävästi eli lisäkapasiteettia tarvitaan, mikäli liikennemäärä halutaan nostaa suunnitellulle tasolle.

6.3 Aikataulujen optimointimenetelmät

Aikataulujen arviointimenetelmien, kuten simuloinnin, avulla eri aikatauluvaihtoehdot voidaan asettaa järjestykseen, mutta ne eivät kerro mitään aikataulujen optimaalisuudesta. Aikataulusuunnittelun tavoitteet ovat osittain ristiriitaisia, jolloin yhden tekijän parantaminen heikentää yleensä toista. Suurin osa aikataulujen optimointitutkimuksesta on liittynyt junien pysähdysaikojen ja matkustajien matka-aikojen minimointiin (esim. Migom & Valaert 1981, Forsman & Liljebloom 1996). Tämä tavoite tuottaa lyhimmat matka-ajat korkean prioriteetin yhteyksille, kun liikenne on täsmällistä. Häiriötilanteessa tällainen aikataulu on kuitenkin kaukana optimaalisesta. Tällaisessa aikataulussa vaihdot ovat hyvin tiukkoja, mikä johtaa siihen, että suuret matkustajamäärät menettävät vaihtoyhteyden tai sekundäärisiä myöhästymisiä tapahtuu paljon, kun junat odottavat tärkeitä yhteysjunia. Goverde (1998b) kehitti aikakustannusfunktioon perustuvan optimointimenetelmän, joka ottaa huomioon vaihtoaikojen vaikutuksen täsmällisyyteen. Malli arvottaa puskuriajan vaikutuksen matka-aikaan ja ottaa huomioon saapumismyöhästymisen vaikutuksen täsmällisyyteen.

Aikataulujen täsmällisyyden ja vakauden optimointimenetelmiä ei ole juurikaan kehitetty, vaikka liikenteen täsmällisyyden merkitys asiakastytyväisyyden kannalta on hyvin tiedossa. Vromans (2005) pyrki optimoimaan täsmällisyyttä tasaamalla junien nopeuksia ja pysähtymiskäyttäytymistä. Liikenteen heterogeenisyys johtaa usein pienempiin junaväleihin ja siten heikompaan täsmällisyyteen. Simulointitutkimuksessa täsmällisyyttä saatiin merkittävästi parannettua. Työssä ei kuitenkaan otettu kantaa esimerkiksi nopeiden junien matka-aikojen pitenemiseen ja asiakaspalvelun heikkenemiseen.

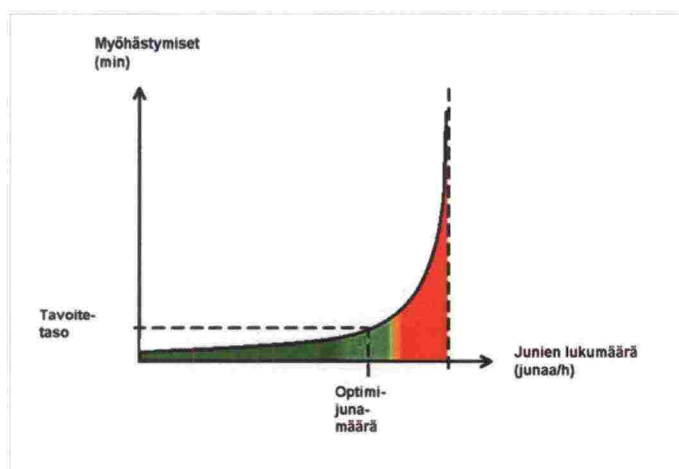
Ferreira ja Higgins (1996) sovelsivat niin sanottua haaraudu ja rajoita (branch and bound) -menetelmää yksiraiteiselle rataosalle, missä ongelman ratkaisua etsitään kaikkien ratkaisujen joukosta. Menetelmän avulla voidaan arvioida rataosan optimaalinen junamäärä. Kuvasta 42 nähdään, millä tavalla optimaalisen aikataulun (31 junaa) junien keskimääräinen ajo-aika kasvaa, kun junamäärää lisätään. Toisesta kuvasta nähdään, millä tavalla optimaalisen aikataulun junien ajoaika kasvaa, kun kohtaupaikkojen määrää vähennetään.



Kuva 42. Lisääntyneen kysynnän ja kohtauspaikkojen lukumäärän vaikutus ajoaikaan (Ferreira & Higgins. 1996)

6.4 Ratakapasiteetin käyttöasteen soveltaminen täsmällisyysarvioinneissa

Rataosilla, joilla liikennemäärät ovat suuria ja kapasiteetin käyttöaste korkea, on havaittavissa selvästi junamäärien ja täsmällisyyden välinen riippuvuus (kuva 43). Mitä enemmän rataosalla liikkuu junia, sitä pienemmät junien väliset marginaalit ovat ja sitä todennäköisemmin myöhästynyt juna vaikuttaa muiden junien kulkuun. Sekundääristen myöhästymisten määrä riippuu siis voimakkaasti käytettävissä olevasta tilasta, toisin sanoen kapasiteetin käyttöasteesta. Käyttöasteen kasvaessa liikenteen häiriöherkkyys kasvaa ja sen toipumiskyky heikkenee. Häiriöt jäävät elämään rataverkolle pidemmäksi aikaa. (Kandels & Kröger 2005)



Kuva 43. Liikennemäärä ja täsmällisyys (Kandels & Gröger 2005).

Kapasiteetin käyttöasteen ja täsmällisyyden riippuvuutta voidaan käyttää aikataulujen analysoinneissa. UIC (2004) esittelee suhteellisen yksinkertaisen kapasiteetin käyttöasteen laskentakaavan. Menetelmä ottaa huomioon liikennöintiin varatun ajan lisäksi junien välille varatut puskuriajat sekä kunnossapidon tarvitseman ajan. Laskemista varten tarvitaan olemassa oleva aikataulu. Menetelmän avulla rataosan toimivuutta ja mahdollisia täsmällisyys- ja kapasiteettiongelmia voidaan ennustaa. Kun ratakapasiteetin käyttöaste on lähellä 80 %, joudutaan tekemään valintoja junien lukumäärän ja liikenteen laadun välillä. Tällöin junien lukumäärän lisääminen heikentää hyvin todennäköisesti liikenteen täsmällisyyttä (taulukko 13).

Taulukko 13. Kapasiteetin käyttöasteen vaikutus liikenteeseen (UIC 2004, Banverket 2007a).

0–40 %	Rataosalla on runsaasti käyttämätöntä kapasiteettia.
41–60 %	Liikenteen määrä ja laatu ovat tasapainossa.
61–80 %	Ongelmia voi syntyä ja liikenteen kyky palautua häiriötilanteissa on rajoittunut, kapasiteetista on ajoittaista pulaa. Joudutaan tekemään valinta liikenteen laadun ja lisäjunien välillä.
81–100 %	Rataosalla on pulaa kapasiteetista ja lisäjunille tai kunnossapidolle on hyvin vaikea löytää vapaata kapasiteettia. Aikataulu on hyvin herkkä häiriöille ja liikenteessä on odotettavissa vakavia ongelmia.

Ratainvestointeihin sitoutuu runsaasti pääomaa, mikä edellyttää kapasiteetin tehokasta käyttöä. Rataverkolla ei kuitenkaan pyritä mahdollisimman korkeaan ratakapasiteetin käyttöasteeseen, vaan tavoitteena on, että liikenteen määrä ja laatu (täsmällisyys) olisivat tasapainossa. Liikennemäärien kasvaessa ja asiakkaiden laatuvaatimusten noustessa on tärkeää arvioida eri rataosien kapasiteetin käyttöaste. Periaatteessa lähes aina on mahdollista lisätä junia aikatauluun, mutta rajat täytyy kuitenkin asettaa tietyille tasolle liikenteen täsmällisyysvaatimusten vuoksi. Arvioitaessa korkeinta mahdollista käyttöastetta tulee ottaa huomioon muun muassa infrastruktuurin ja kaluston luotettavuus, eri rataosien välinen riippuvuus sekä tarkasteltavan rataosan pituus. UIC:n (2004) mukaan tämän vuoksi on mahdotonta antaa tarkkoja käyttöasteen raja-arvoja, mutta tutkimuksissa on kuitenkin päädytty taulukon 14 mukaisiin suositusarvoihin.

Taulukko 14. UIC:n ohjearvot ratakapasiteetin käyttöasteista (UIC 2004).

Ratatyyppe	Huipputunti	Vuorokausi
Lähiliikenteen rata	85 %	70 %
Sekaliikenteen rata ¹	75 %	60 %

Esimerkiksi Ruotsissa on saatu erittäin positiivisia kokemuksia UIC-menetelmän käytöstä kapasiteetin käyttöasteen laskennassa. Banverketin tavoitteena on, että laskentamenetelmä saataisiin sisällytettyä mahdollisimman pian myös kaikkiin Ruotsissa käytössä oleviin aikataulusuunnittelu- ja simulointiohjelmiin. Kuvassa 44 on esitetty kapasiteetin käyttöaste Ruotsissa vuonna 2006. Kuvasta nähdään havainnollisesti, millä alueilla kapasiteetipula todennäköisesti aiheuttaa ongelmia liikenteeseen. Vertaamalla tuloksia rataosien myöhästymistilastoihin saadaan selville, millä alueilla kapasiteetin nostolla saataisiin täsmällisyyttä parannettua. (Banverket 2007a)

¹ Arvot voivat olla suurempia, jos junamäärät todella pienet (alle 5 junaa tunnissa) liikenteen suuresta heterogeenisyydestä johtuen.

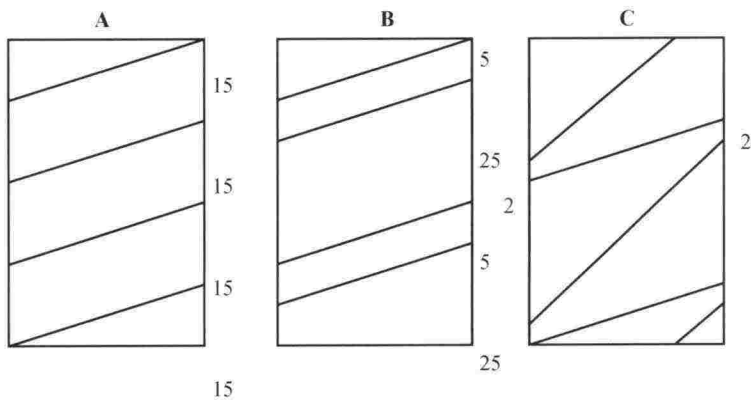


Kuva 44. Kapasiteetin käyttöaste Ruotsissa 2006 (Banverket 2007a).

Kapasiteetin käyttöasteen laskemisen mahdolliseksi sovellusalueeksi voidaan ajatella ratakapasiteetin riittävyyden arviointia tulevilla liikennemäärillä. Ongelmana on, että lähtötietona tarvitaan aikataulut, joista ei välttämättä ole vielä tarkkaa tietoa. Radan välityskyvyn (ratakapasiteetin) laskentaan on kehitetty eri menetelmiä, joiden lähtötietona ei tarvita tarkkaa tietoa aikatauluista. Periaatteessa voitaisiin siis ajatella, että kyseiseen lähestymistapaan sovellettaisiinkin ratakapasiteetilaskelmia. Jos radan maksimivälityskyky on lähellä arvioitua liikennemäärää, on todennäköistä, että ongelmia liikenteen täsmällisyyden kanssa tulee ilmenemään. Eri laskentamenetelmät antavat kuitenkin vain suuntaa antavia ja hyvin erilaisia tuloksia, minkä vuoksi niiden soveltaminen investointien ja täsmällisyyden arviointiin ei ole kovin perusteltua. (Mattsson 2004, Pitkänen 2006, Pitkänen 2007)

6.5 Heterogeenisyysmittarit

UIC:n kapasiteetin käyttöasteen laskentamenetelmän haittapuolena on, että se ottaa huomioon vain junavälien summan, ei yksittäisiä junavälejä. Esimerkiksi kuvan 45 aikataulujen A ja B kapasiteetin käyttöaste on sama. Aikataulusuunnittelun keinoin voidaan vaikuttaa vain sekundäärisiin myöhästymisiin. Sekundääristen myöhästymisten määrä riippuu hyvin paljon junaväleistä. Mitä tasaisemmat junavälit, sitä vakaampi aikataulu on. Näin ollen vaihtoehto A:n täsmällisyys on todennäköisesti parempi. Tämän vuoksi junavälien suuruutta ja niiden epätasaisuutta voidaan pitää heterogeenisuuden ja luotettavuuden mittarina. (Carey 1999)



Kuva 45. Junavälien erilainen jakautuminen.

Carey (1999) esittelee työssään seuraavat heterogeenisyyden mittarit:

- Tietyn raja-arvon alittavien junavälien prosenttiosuus
- Junavälijakauman persentiilit
- Junavälien varianssi, vaihteluväli ja keskihajonta

Edellä mainittujen mittarien haittapuolena on, että niitä ei voida soveltaa kuin tietyssä pisteessä, esimerkiksi asemalla. Vromans (2005) esittelee työssään heterogeenisuuden mittareita, joita voidaan soveltaa, kun tarkastellaan aikataulun luotettavuutta kahden pisteen välillä. Kuvan 45 esimerkissä sekä aikataulun A että B junavälien summa on 60. Niin sanottu SSHR-mittari (Sum of Shortest Headway Reciprocals) perustuu kuitenkin pienimpien junavälien käänteislukujen summaan, jolloin kuvan 45 aikatauluille saadaan arvot $4/15$ (0,27), $12/25$ (0,48) ja 2. Mitä suurempi luku on, sitä heterogeenisempi ja siten häiriöherkempi aikataulu todennäköisesti on.

7 TÄSMÄLLISYYDEN MITTAAMINEN

7.1 Liikenteen toteumatiedon kerääminen

Toiminnan kehittämisen kannalta on tärkeää verrata suunniteltua toteutuneeseen. Tällöin voidaan tarkastella mikä olisi ollut optimaalinen ratkaisu, kun tiedetään, mitä tapahtui. Tarkan ja luotettavan liikennetiedon kerääminen ja analysointi on olennainen osa rautatieliikenteen suunnitteluprosessia ja aikataulusuunnittelua. Yleensä aikataulut perustuvat hyvin pitkälle edellisen kauden aikatauluihin, jolloin tietoa toteutuneesta liikenteestä ja sen täsmällisyydestä voidaan hyödyntää suunnitellessa uusia aikatauluja. Tällöin voidaan tunnistaa rataverkon pullonkaulat sekä ongelmalliset prosessit ja suunnitella tarvittavat korjaustoimenpiteet.

Liikennetietojen tilastollisella analysoinnilla saadaan palautetta operatiivisesta toiminnasta suunnitteluprosessiin. Vaikka liikennesuunnittelijoilla on yleensä melko hyvä käsitys rataverkon pullonkauloista ja aikatauluongelmista, tarvitaan tietoa liikenteestä aikataulujen toimivuuden ja liikenteen täsmällisyyden parantamiseksi. Liikenteen analysointi lisää myös rautatiejärjestelmän stokastisten prosessien ymmärtämystä. Tietoa voidaan lisäksi hyödyntää simulointimallien rakentamisessa ja kalibroinnissa. Käyttämällä empiiristä dataa simuloinnissa on helpompi sulkea pois näiden tekijöiden merkitys tulosten luotettavuuden kannalta. (Hansen 2002)

Rautatieliikenteessä pienikin poikkeama aikataulutetusta ajasta voi aiheuttaa suuren myöhästymisen, jos juna joutuu esimerkiksi pysähtymään opastimelle. Pienien primääristen ja sekundääristen myöhästymisten tunnistaminen on tärkeää aikataulujen ja toiminnan kehittämisen kannalta. Rakenteelliset ongelmat aiheuttavat usein pieniä myöhästymisiä, mutta niiden kumuloituminen aiheuttaa suurempia viiveitä etäämmällä, jolloin myöhästymisen syy on vaikea selvittää. (Goverde 2005)

Suomessa, kuten useimmissa muissakin maissa, on katsottu riittäväksi liikenteen toteumatiedon kerääminen minuutin tarkkuudella (BEST 2002). Yleensä tietyn rajan alittavia myöhästymisiä ei tilastoida lainkaan, jolloin data on informatiivista vasta, kun myöhästymisen on useita minuutteja. Goverden (2005) mukaan minuutin tarkkuus ei kuitenkaan ole riittävä ja yksityiskohtainen täsmällisyysanalyysi edellyttää tietoa vähintään kymmenen sekunnin tarkkuudella. Tieteellisestä näkökulmasta yksittäisten junien ja junien välisten vuorovaikutusten tilastollinen analyysi edellyttää sekunnin tarkkuutta.

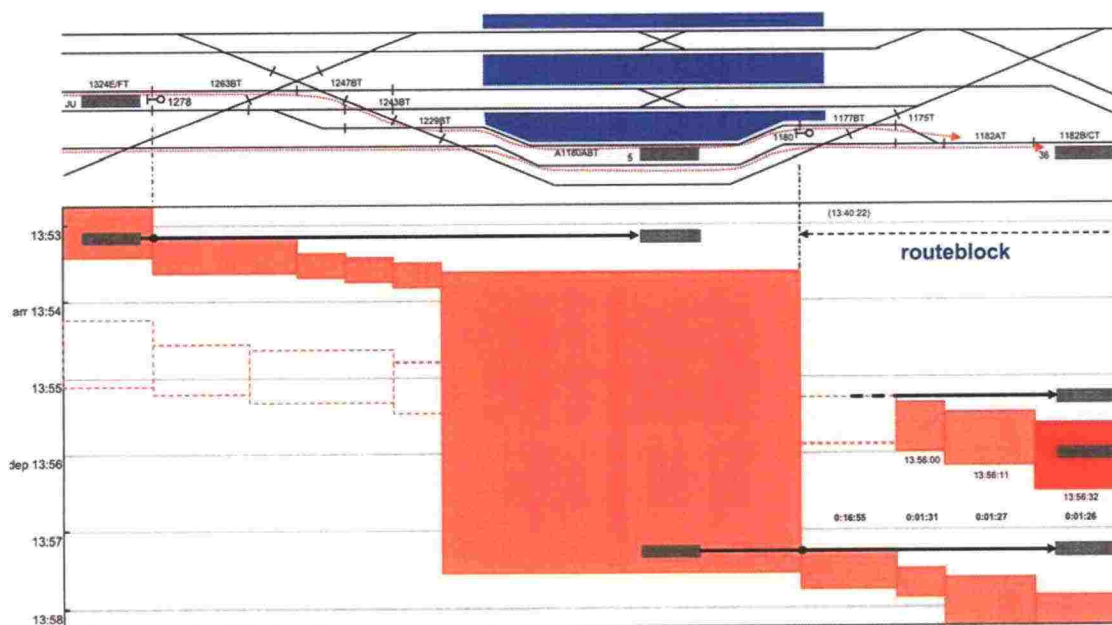
Esimerkki: Liikenteen toteumatiedon kerääminen Hollannissa (TNV-Prepare)

Aikaisemmin junien saapumisajat perustuivat Hollannissa tulo-opastimiin ja korjauskertoimiin, joka arvioi junalta kuluvan ajan opastimelta pysähdykseen. Korjauskertoimet eivät kuitenkaan ottaneet huomioon junan nopeutta, vetovoimaa, pituutta, pysähdyspaikkaa ja reittiä. Tulo-opastin saattoi olla hyvinkin kaukana junan pysähdyspaikasta, jolloin saapumisajan virhe oli pahimmillaan useita minuutteja. TNV-Prepare-ohjelman käyttöönoton myötä liikenteen toteumatiedon tarkkuus on parantunut merkittävästi. Ohjelma perustuu junanumeroiden kytkemiseen infrastruktuurista saataviin tietoihin, mikä mahdollistaa junien kulun selvittämisen muutaman sekunnin

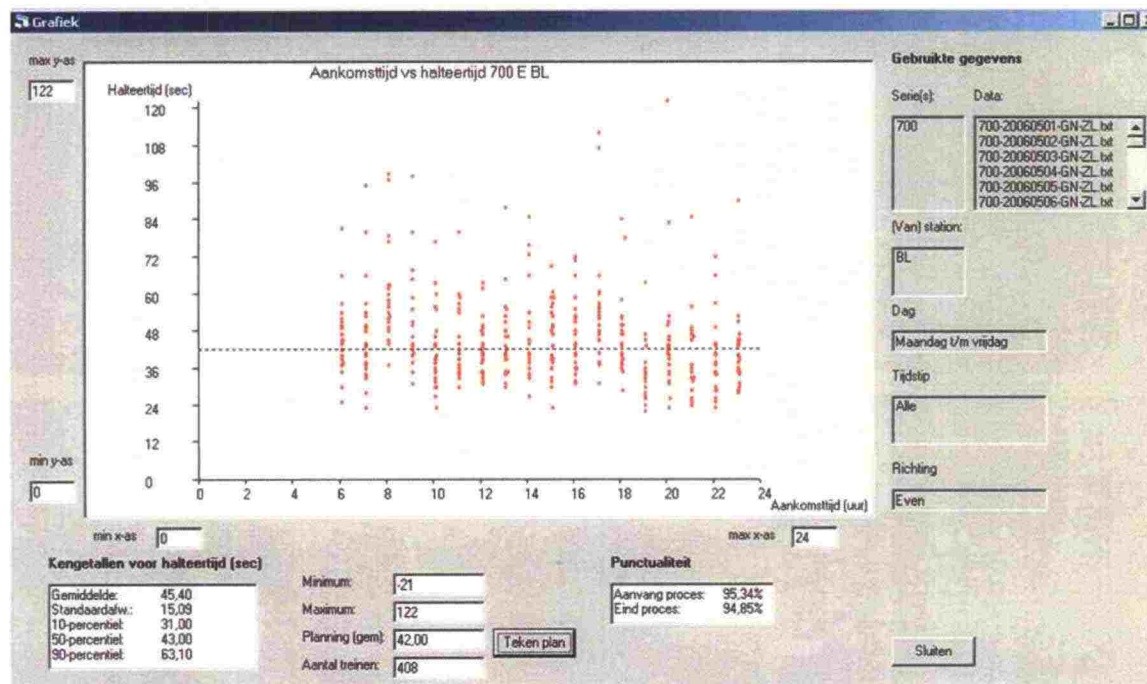
tarkkuudella (kuva 46). Infrastruktuuritieto on ollut aina saatavilla, mutta aikaisemmin tietoa ei ole pystytty liittämään yksittäisiin juniin. (Goverde 2005)

Yleensä aikataulusuunnittelussa ajo-ajat, pysähdysajat, vaihtoajat, junavälit ja pelivara ovat perustuneet usein historiallisiin peukalosääntöihin. Toimintaympäristö on kuitenkin muuttunut esimerkiksi liikennemäärien kasvun myötä. Tarkkojen prosessi-aikojen kerääminen on mahdollistanut aikataulujen hienosäädön, jolloin edellä mainitut ajat on voitu optimoida. TNV-Prepare on osoittautunut tärkeäksi työkaluksi toiminnan kehittämisessä ja täsmällisyyden parantamisessa. Ohjelman avulla on esimerkiksi voitu tunnistaa kriittisiä junavälejä, jotka ovat aikataulussa näyttäneet paljon väljemmiltä. TNV-Prepare tuottaa myös arvokasta dataa rautatieliikenteen tieteelliselle tutkimukselle, jota Hollannissa tehdään paljon. (Goverde 2005)

Kuvan 46 tapauksessa näkyy, minkä vuoksi asemalle pysähtyvä juna ei ole läheskään aina päässyt heti jatkamaan matkaansa ohittavan junan vuoksi, vaan pysähdys on kestänyt suunniteltua pidempään. Karkeammalla seurannalla tämä ei olisi välttämättä tullut ilmi. Kuvassa 47 taas näkyy eri junien saapumisaikojen poikkeamien jakauma sekunnin tarkkuudella TNV-Prepare ohjelmassa.



Kuva 46. Junan kulku aseman läpi, TNV-Prepare (Goverde 2005).



Kuva 47. Junien saapumisaikajakaumat sekunnin tarkkuudella, TNV-Prepare. (Goverde 2005).

7.2 Täsmällisyden mittaaminen

Täsmällisyysmittareita käytetään liikenteen täsmällisyystason seurantaan, täsmällisyyden kehittämiseen sekä informointiin. Tavoitteena on kuvata täsmällisyyden muutokset sekä siihen johtaneet syyt ja antaa asiakkaille informaatiota liikenteen täsmällisyystasosta. Rautatieyrityksille täsmällisyys on tärkein suorituskyvyn mittari. Täsmällisyyttä ei voida mitata yksiselitteisesti ja samastakin aineistosta voidaan saada melko erilainen käsitys liikenteen täsmällisyydestä. (BEST 2002 s 87, Skagestad 2004)

Kun täsmällisyyttä mitataan, tulisi aluksi määritellä, mihin tarkoitukseen tietoa tarvitaan ja ketkä tietoa tarvitsevat. Esimerkiksi matkustajat tarvitsevat hyvin erilaista tietoa täsmällisyydestä kuin päivittäin täsmällisyysasioiden parissa työskentelevät henkilöt. Skagestad (2004) jakaa tietoa tarvitsevat ja täsmällisyysmittarit kolmeen ryhmään.

- **Informointi:** Tähän ryhmään kuuluvat matkustajat ja työntekijät, jotka eivät työskentele täsmällisyysasioiden parissa. He eivät tarvitse yksityiskohtaista tietoa esimerkiksi yksittäisen junan täsmällisyydestä tai epätäsmällisyyden syistä. Nämä yksinkertaiset mittarit eivät anna kovin yksityiskohtaista kuvaa täsmällisyydestä, mutta ne antavat kuitenkin käsityksen rautatieliikenteen ja eri linjojen täsmällisyystasosta. Mittareiden tulee olla yksinkertaisia ja helposti ymmärrettäviä.
- **Täsmällisyysseuranta ja päätöksenteko:** Toisen ryhmän mittarit on tarkoitettu työntekijöille, jotka tekevät päätöksiä täsmällisyystulosten pohjalta. Mittarit kertovat, miten esimerkiksi yksittäiset junat ja asemat ovat saavuttaneet täsmällisyystavoitteensa.

- **Täsmällisyyden parantaminen ja täsmällisyysprojektit:** Viimeiseen ryhmään kuuluvat indikaattorit antavat todella yksityiskohtaista tietoa täsmällisyydestä ja niiden avulla voidaan esimerkiksi seurata, miten täsmällisyyden parantamiseen tähtäävässä hankkeessa on onnistuttu. Mittareita käyttävät työskentelevät päivittäin täsmällisyysasioiden parissa.

Mitattaessa täsmällisyyttä täytyy myös määritellä, minkä täsmällisyydestä halutaan tietoa. Rautatieliikenteessä voidaan tarkastella esimerkiksi

- yksittäisen junan täsmällisyyttä tietyllä reitillä
- tietyn rataosan täsmällisyyttä
- tietyn junatyypin/lajin täsmällisyyttä
- koko liikennejärjestelmän täsmällisyyttä
- junien, matkustajien tai tavaroiden täsmällisyyttä
- täsmällisyyttä eri kuukausina, viikonpäivinä, vuorokaudenaikoina

Yleensä mitataan vain junien täsmällisyyttä, vaikka matkustajien ja tavaroiden täsmällisyyden mittaaminen olisi myös tärkeää. Mittaamalla matkustajien täsmällisyyttä saadaan käsitys, millä tavalla nimenomaan asiakkaat kokevat junien myöhästymiset. Pelkkien junien täsmällisyyden tarkasteleminen voi antaa vääristyneen kuvan todellisesta tilanteesta. Esimerkiksi ruuhkajunien täsmällisyys on usein heikompi (enemmän junia ja matkustajia) ja junissa on matkustajia enemmän. Tällöin voi olla mahdollista, että junien täsmällisyys on 90 %, mutta vain 70 % matkustajista saapuu ajoissa asemalle. Toisaalta juna saattaa saapua asemalle ajoissa, mutta teknisen vian vuoksi ovet saadaan auki vasta myöhemmin. Toiminnan kehittämisen kannalta on myös tärkeää seurata eri rataosien ja junatyypin täsmällisyyttä. (BEST 2002 s 87, Skagestad 2004)

7.3 Täsmällisyysmittarit

Yleensä rautatieliikenteen täsmällisyys ilmoitetaan aikataulunmukaisesti määräasemalle saapuneiden junien osuutena eli täsmällisyysprosenttina (BEST 2002).

Σ Alle x min määräasemalle myöhässä saapuneet junat

Σ Määräasemalle saapuneet junat

Mittari on yksinkertainen ja helppo mitata, mutta toisaalta se ei kerro mitään myöhästymisten syistä, kuinka suuri osuus matkustajista on ollut myöhässä, kuinka paljon junat ovat olleet myöhässä tai miten täsmällisiä junat ovat olleet matkan aikana. Esimerkiksi juna, joka kulkee aikataulunmukaisesti koko matkan lukuun ottamatta viimeistä asemaväliä, kirjataan myöhästyneeksi. Toisaalta juna, joka on ollut myöhässä useimmilla asemilla, kirjataan ajallaan saapuneeksi, jos se saa aikataulunsa kiinni matkan loppupuolella. Matkustajien kannalta mittari huomioi vain määräasemalle kulkevat matkustajat. Esimerkiksi Turku–Pieksämäki-junassa saattaa vain pieni osa matkustajista olla menossa Pieksämäelle. Jotta rautatieliikenteen täsmällisyydestä saataisiin mahdollisimman kattava kuva, tarvitaan myös muita täsmällisyysmittareita, jotka täydentävät toisiaan. Tällöin voidaan myös paremmin vertailla eri maiden, rataosien ja junatyypin täsmällisyyttä.

Määräasemien täsmällisyyden lisäksi vastaava tunnusluku voidaan laskea myös lähtöasemille, jolloin saadaan aikataulunmukaisesti lähteneiden junien osuus lähtöasemilla.

Σ Alle x min myöhässä lähteneet junat

Σ Lähteneet junat

Huono täsmällisyystaso lähtöasemilla saattaa esimerkiksi johtua liian tiukaksi suunnitellusta kalustokierrosta, jolloin junien kääntämiseen ei ole varattu tarpeeksi aikaa. Tavaraliikenteen puolella kyseinen tunnusluku voi tuoda esiin ongelmat junamuodostuksessa tai muissa logistisissa toiminnoissa.

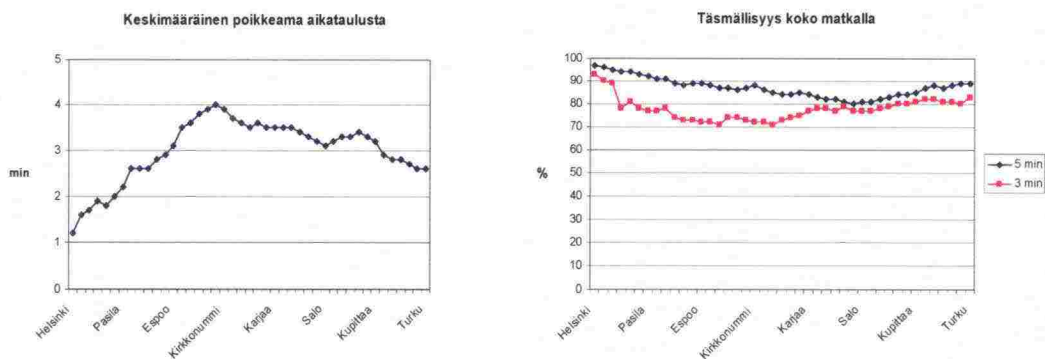
Edellä mainitut mittarit kuvaavat, minkälainen täsmällisyys on lähtö- ja määräasemilla, mutta eivät kerro täsmällisyydestä näiden asemien välillä. Mittaamalla myöhästyneiden junien osuus kaikilla asemilla saadaan käsitys junan täsmällisyydestä koko matkalla.

Σ Alle x min myöhässä saapumiset

Σ Saapumiset

Tämän mittarin arvoon vaikuttaa hyvin paljon, miten myöhästymisrajat asetetaan eli milloin junan katsotaan olevan myöhässä. Mittaria voidaan myös soveltaa laskemalla junien osuus, jotka ovat täsmällisiä useimmilla asemilla. Juna voidaan esimerkiksi määritellä täsmälliseksi, jos se on saapunut aikataulun mukaisesti yli 80 % asemista.

Vertaamalla suunniteltua toteutuneeseen ja tarkastelemalla junien täsmällisyyttä koko matkalta saadaan hyvä käsitys täsmällisyystason muutoksista matkan aikana (kuva 48). Tällä tavalla voidaan paikallistaa mahdollisia ongelmakohtia rataverkolta ja nähdään, millä tavalla ongelmat muodostuvat. Kuvaajista voidaan myös arvioida, onko aikataulu liian tiukka tai onko jollakin välillä mahdollisesti liikaa pelivaraa. Tarkasteluun voidaan ottaa esimerkiksi yksittäisiä ongelmajunia tai tarkastella useampien junien keskiarvoja.



Kuva 48. Kertyneiden myöhästymisminuuttien keskiarvo ja täsmällisyystason muutokset Helsinki–Turku-välillä. (kuvitteellinen esimerkki).

Edellä esitellyistä mittareista yksikään ei kerro, kuinka epätasällisiä junat todellisuudessa ovat, ts. kuinka paljon junat ovat myöhässä. Sen vuoksi on myös hyvä määrittellä keskimääräinen myöhästymisen junaan kohti¹.

Σ Kertyneet myöhästymisminuutit määräasemalla

Σ Määräasemalle saapuneet junat

Tai keskimääräinen myöhästymisen myöhästynyttä junaan kohti¹.

Σ Kertyneet myöhästymisminuutit määräasemalla

Σ Yli x min määräasemalle myöhässä saapuneet junat

Tai todennäköisyys, että juna ei ole enemmän kuin x minuuttia myöhässä¹.

Σ Alle x min myöhässä määräasemalle saapuneet junat

Σ Määräasemalle saapuneet junat

Keskimääräinen myöhästymisaika on hyvin informatiivinen asiakkaille ja esimerkiksi Japanissa liikenteen täsmällisyys ilmoitetaan juuri kyseisen tunnusluvun avulla. Tarkasteltaessa esimerkiksi tiettyjä junia ja pieniä otoksia tulee ottaa huomioon, että yksittäinen paljon myöhässä ollut juna voi vääristää tulosta merkittävästi.

Useimmat edellä esitellyistä mittareista ovat absoluuttisia eli ne eivät niin sanotusti huomioi yrityksen tuotantoa. Esimerkiksi pelkkien kertyneiden myöhästymisminuuttien ilmoittaminen on vähän sama kuin puhuttaisiin yrityksen tuloksesta suhteuttamatta sitä lainkaan liikevaihtoon. Tällöin voidaan laskea esimerkiksi kertyneet myöhästymisminuutit matka-aikaa kohden.

Σ Myöhästymisminuutit määräasemalla

Σ Matka-aika

Koska suurnopeusjunilla on lyhyempi matka-aika, mittari antaa niille huomattavasti huonomman täsmällisyyden kuin hitaammille junille, jotka ovat saman verran myöhässä. Tämä voidaan välttää laskemalla kertyneet myöhästymisminuutit junakilometriä kohden.

Σ Kertyneet myöhästymisminuutit määräasemalla

Σ Junakilometrit

Yllä oleva mittari arvottaa hitaan ja nopean junan samalla tavalla. Asiakkaalle, joka on valinnut kalliimman ja nopeamman junan, myös myöhästymisminuutit ovat kalliimpia. Mittari ei myöskään ota huomioon, että eri junille suunnitellut pelivarat voivat

¹ Tunnusluku voidaan määrittellä myös kaikkien asemien suhteen

vaihdella. Nyström (2005) ehdottaa, että pelivara voitaisiin ottaa huomioon täsmällisyyslaskelmissa laskemalla täsmällisyys seuraavalla tavalla

$$\frac{\text{Pelivara} + k \cdot \text{Myöhästymisaika}}{\Sigma \text{Junakilometrit}}$$

Missä

k on vakio, joka määrittelee, kuinka paljon huonommaksi myöhästymisen asiakkaat kokevat kuin pidentyneen matka-ajan.

Ruotsissa käytetään täsmällisyyden mittaamisessa ja aikataulujen vakauden arvioinnissa ns. järjestelmän palautumiskykymittaria. Kyseistä mittaria on käytetty erityisesti täsmällisyyden ja aikataulujen simulointitarkasteluissa. (Landex et al. 2006)

$$\frac{T_{D,In} - T_{D,Out}}{T_{D,Out}}$$

Missä

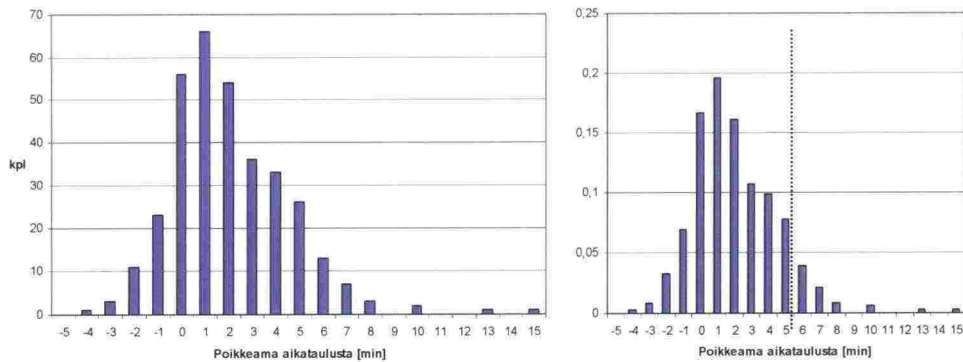
$T_{D,In}$ on aika, jonka juna on myöhässä saapuessaan tarkasteltavalle alueelle

$T_{D,Out}$ on aika, jonka juna on myöhässä lähtiessään asemalta.

Suomessa tavarajunat saatetaan usein laittaa etuajassa kulkuun, minkä vuoksi saapumismyöhästymisen sijaan olisi parempi mitata poikkeamaa suunnitellusta matka-ajasta. Tutkivat ruotsalaisten pellettijunien täsmällisyyttä ja heidän mukaansa kuljetusaikojen hajonta tai täsmällisyyskustannukset ovat joissakin tapauksissa parempi täsmällisyyden mittari kuin niin sanotut perinteiset täsmällisyysmittarit. Tavara-liikenteen puolella junien lähtö- tai saapumisaika ei ole aina niin kriittinen tekijä ja esimerkiksi Ruotsin pellettijunien kohdalla sataman malmivarasto puskuroi tehokkaasti myöhästymisiä. Pellettijunien kohdalla kalustokierron toimiminen on paljon tärkeämpää kuin muutaman minuutin myöhästymisen. Kuljetusaikojen suuri vaihtelu heikentää resurssien tehokasta käyttöä, jolloin rautatieyritys joutuu hankkimaan enemmän kalustoa kuin olisi tarpeen. (Blomqvist 2007, Nyström & Kumar 2003)

7.4 Täsmällisyysjakaumat

Pelkän keskiarvon tarkastelu hävittää informaatiota, minkä vuoksi matka-aikojen ja myöhästymisten jakaumia ja hajontaa tulisi myös tarkastella. Yleensä junien aikataulu-poikkeamat noudattavat normaalijakaumaa (kuva 49). Jakauman painopiste on oikealla, koska junat voivat olla käytännössä myöhässä hyvinkin paljon, mutta etuajassa saapumista rajoittaa junien teoreettinen ajoaika. (Skagestad 2004)



Kuva 49. Junan aikataulunmukaisen saapumisajan poikkeaman jakauma ja todennäköisyysjakauma sekä 87 % persenttiili.

Täsmällisyysjakaumia voidaan hyödyntää täsmällisyyden parantamisessa sekä aikataulusuunnittelussa. Esimerkiksi kuvan 49 tiheysfunktioista nähdään, että junista 87 % saapuu korkeintaan viisi minuuttia myöhässä. Jos tavoitteena on 90 % täsmällisyystaso, tulisi pohtia, millä tavalla tavoite saavutettaisiin. Tulisiko seuraavan kauden aikatauluihin lisätä mahdollisesti pelivaraa kyseiselle junalle vai pyrkiä muilla keinoilla parantamaan junan täsmällisyyttä. Jos junalle lisätään pelivaraa, nähdään tiheysfunktioista helposti, kuinka paljon pelivaraa tulisi lisätä, jotta haluttu täsmällisyystaso todennäköisesti saavutettaisiin. Jakaumia voidaan myös hyödyntää junien vaihtoaikojen arvioinnissa. Esimerkiksi kuinka pitkä vaihtoaika tarvitaan, jotta vaihtoyhteys toteutuisi 95 % todennäköisyydellä.

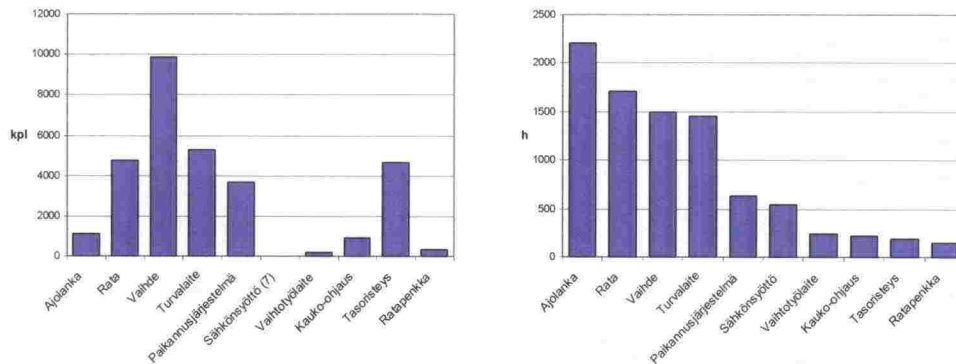
Myös jakauman muodosta voidaan tehdä johtopäätöksiä. Skagestadin (2004) mukaan yleensä suuremmat myöhästymiset ovat sellaisten tekijöiden aiheuttamia, joihin ei voida juuri vaikuttaa. Jos junalla taas on paljon pieniä myöhästymisiä, on myöhästymisen syy yleensä helpommin selvitettävissä ja korjattavissa. Ajoajan hajonta taas kertoo, kuinka hankala väli on ajaa. (Nyström 2005)

7.5 Myöhästymisten syiden kirjaaminen

Ensimmäinen askel täsmällisyyden parantamisessa on myöhästymisten syiden selvittäminen ja ymmärtäminen. Täsmällisyyden parantaminen edellyttää syiden systemaattista tilastointia ja analysointia, jotta merkittävimmistä epätäsmällisyyttä aiheuttavista tekijöistä saataisiin käsitys ja toimenpiteet täsmällisyyden parantamiseksi voitaisiin kohdentaa oikein. Tällöin voidaan myös seurata, minkälaisia tuloksia täsmällisyyden parantamistoimenpiteillä saavutetaan ja asettaa yksityiskohtaisempia täsmällisyystavoitteita. Esimerkiksi, kuinka paljon jokin yksittäinen syy saa maksimissaan aiheuttaa myöhästymisiä.

Rautatieliikenteessä on tärkeämpää mitata seurauksia kuin virheiden lukumäärää. Toisin sanoen häiriöiden lukumäärien lisäksi on tärkeää seurata, kuinka paljon ajallisesti eri syyt aiheuttavat myöhästymisiä. Kuvassa 50 on kirjattuna vuoden aikana infrastruktuurista aiheutuneet myöhästymiset Ruotsissa (2002). Vaihdevioista aiheutuneita myöhästymisiä on eniten (9866 kpl) ja ajallisesti ne ovat aiheuttaneet 10 % kaikista myöhästymisistä. Sähkönsyöttöhäiriöitä on ollut vuodessa vain seitsemän kappaletta ja äkkiseltään voisi ajatella, että niillä ei ole juuri vaikutusta liikenteen täsmällisyyteen. Ajallisesti sähkönsyöttöongelmat ovat kuitenkin aiheuttaneet 3 % kaikista

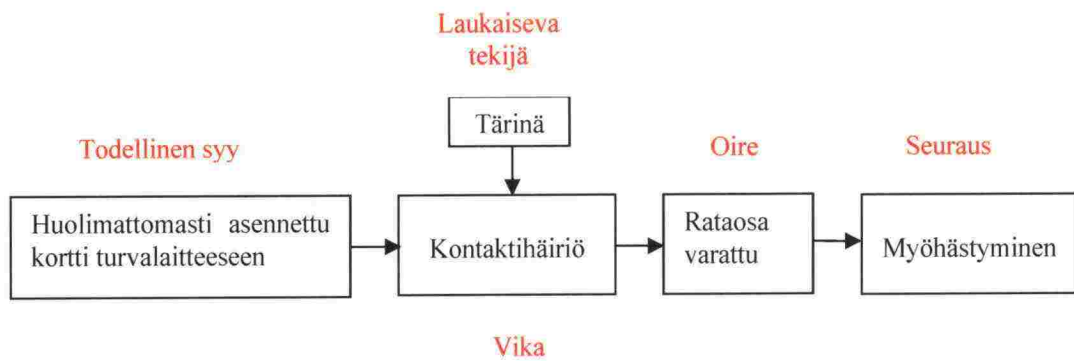
myöhästymisistä eli lähes yhtä paljon kuin paikannusjärjestelmäviat, joita on ollut huomattavasti enemmän (3669 kpl).



Kuva 50. Kymmenen merkittävintä infrastruktuurista aiheutuvaa myöhästymissyitä Ruotsissa 2002 (Nyström & Kumar 2003).

Toisinaan myöhästymisen syytä voi olla vaikea selvittää ja lisäksi junan kulkuun saattaa vaikuttaa samanaikaisesti useampikin tekijä. Syykoodien kirjaamisessa on tärkeää sopia yhdenmukaisista kirjaamiskäytännöistä, koska osa syistä voidaan periaatteessa sijoittaa useampaan eri luokkaan. Virheellinen ja epätarkka kirjaus voi olla harhaanjohtavaa ja siirtää fokuksen mahdollisesti epäolennaisiin tekijöihin. Täytyy myös kriittisesti tarkastella, mikä on myöhästymisen todellinen syy. Esimerkiksi kun lumisade aiheuttaa häiriöitä liikenteeseen voidaan pohtia, onko juuri lumisade myöhästymisen syy (ulkoinen tekijä), järjestelmän tekninen puutteellisuus (esim. vaihteen lämmitin), suunnitteluvirhe (esim. liian vähän pelivaraa) tai matkustajaruuhka (esim. useampi autoilija jättää auton kotiin).

Nyströmin (2004) mukaan on myös tärkeää pyrkiä selvittämään myöhästymisen syy mahdollisimman tarkasti. Kuvassa 51 on esitettyä tilanne, jossa järjestelmä ilmoittaa rataosan olevan varattu, vaikka siellä ei pitäisi olla junaa sillä hetkellä. Yleensä tällaisessa tapauksessa myöhästymisen syyksi kirjataan pelkkä turvalaitevika. Vian todellisen syyn selvittäminen ei aina ole helppoa, mutta on huomattavasti informatiivisempaa, jos myöhästymisen todellinen syy saadaan selvitettyä. Tällä tavalla saadaan arvokasta informaatiota esimerkiksi kunnossapidon tarpeisiin ja täsmällisyyden parantamistoimenpiteisiin.



Kuva 51. Syy-seuraus-ketju rautatieliikenteessä (Nyström 2004).

Ruotsissa seurantajärjestelmään kirjataan myös sekundäärisen myöhästymisen aiheuttanut juna, jolloin myöhästymisen alkuperäinen aiheuttaja pystytään jäljittämään seuraamalla myöhästymisketjua. Tällöin pystytään laskemaan, kuinka paljon primäärinen syy kaiken kaikkiaan aiheuttaa myöhästymisiä. (Banverket 2007a)

7.6 Täsmällisyyden mittaaminen Suomessa

Suomessa kauko- ja tavaraliikenteen täsmällisyys mitataan määräasemalle aikataulunmukaisesti saapuneiden junien osuutena. Lähiliikenteessä kaavassa otetaan huomioon myös lähtömyöhästymisen. Jos juna lähtee ja saapuu aikataulunmukaisesti, sen katsotaan kulkeneen aikataulunmukaisesti. Jos juna lähtee aikataulunmukaisesti, mutta saapuu määräasemalle myöhässä, kirjataan junalle vain ”puolikas” myöhästymisen. Kauko- ja tavaraliikenteessä tavoitteena on 90 % täsmällisyys ja lähiliikenteessä 97,5 % täsmällisyys. RHK:lla on myös LVM:n asettama täsmällisyystavoite. Maksimissaan 5 % junista saa olla myöhässä määräasemalla radanpidollisista syistä¹. (Blomqvist 2007, Mäkitalo 2007)

Suomessa on vuodesta 2004 lähtien ollut käytössä JUSE-tietojärjestelmä liikenteen toteumatiedon keräämiseen ja täsmällisyyden seuraamiseen. Järjestelmästä näkee reaaliaikaisen liikennetilanteen ja sitä käytetään myös operatiivisessa liikenteenohjauksessa. Tiedot junien lähtö- ja saapumisajoista tulevat JUSEen joko kauko-ohjausjärjestelmistä tai kauko-ohjaajilta. Eri myöhästymisille on laadittu syykoodit, jotka liikenteenohjaajat syöttävät manuaalisesti järjestelmään (liite 2). JUSEen perustuvat rautatieliikenteen täsmällisyysraportit julkaistaan kerran kuukaudessa. JUSE-järjestelmästä on saatavissa seuraavat tiedot. (Blomqvist 2007)

- Yksittäisten junien kulkutiedot
- Peruutetut junat
- Täsmällisyys seuranta-aseilla
- Täsmällisyys junatyypeittäin/junalajeittain (lähtö- ja määräasemilla)
- Lähtö- ja saapumisaikojen karkeat jakaumat

¹ Periaatteessa kyseistä tunnuslukua ei voida laskea, koska yleensä matkan aikana junalle kirjataan useita myöhästymisyytiä. Näin ollen harvoin voidaan sanoa, että juna myöhästyi juuri radanpidollisen syyn takia.

- Pääkaupunkiseudun lähiliikenteen linjojen täsmällisyys
- Junien myöhästyminen syykoodeittain (myöhästymisminuutit ja kappalemäärät)

Osa käytettävistä syykoodeista on epäselviä ja päällekkäisiä, mikä on Blomqvistin (2007) mukaan aiheuttanut jonkin verran ongelmia. Esimerkiksi tilapäisistä nopeusrajoituksista ja ratatöistä aiheutuneita myöhästymisiä ei ole aina kirjattu johdonmukaisesti. Toisinaan myöhästymisen syytä on vaikea selvittää, mutta tuloksia voidaan kuitenkin pitää suhteellisen luotettavina. Myöhästymisten syiden kirjaamistapa on hieman epälooginen. Pienten myöhästymisten syitä ei kirjata ollenkaan, jos juna kulkee marginaalin (3, 5, 15 min) sisällä aikataulunmukaisesti. Jos juna kulkee myöhässä ja jää aikataulustaan jälkeen, kirjataan kuitenkin jo yhdenkin minuutin myöhästymisen syy. Syykoodien kirjaamistapaa on havainnollistettu taulukossa 15.

Taulukko 15. Syykoodien kirjaaminen JUSEen.

Asema	Aikataulu aika	Aika	+/- min	Syy
Oulu asema	11:30	11:30	0	
Ylivieska	12:38	12:38	0	
Ylivieska	12:40	12:44	4	
Kokkola	13:29	13:29	0	
Kokkola	13:33	13:33	0	
Seinäjoen asema	14:40	14:46	6	P1
Seinäjoen asema	14:43	14:49	6	
Parkano	15:19	15:26	7	K5
Parkano	15:19	15:26	7	
Tampere asema	15:55	15:59	4	
Tampere asema	16:02	16:02	0	
Toijala	16:18	16:18	0	
Toijala	16:18	16:18	0	
Hämeenlinna	16:32	16:32	0	
Hämeenlinna	16:32	16:32	0	
Riihimäki asema	16:46	16:46	0	
Riihimäki asema	16:46	16:56	10	L1
Tikkurila	17:11	17:21	10	
Tikkurila	17:12	17:22	10	
Helsinki asema	17:27	17:37	11	

alle 5 min, myöhästymisen syytä ei kirjata

6 min, syy kirjataan

juna myöhässä yli 5 min, 1min syy kirjataan

Kirjaamistavasta johtuen tilastoissa on todella paljon syykoodittomia myöhästymisiä erityisesti lähiliikenteen puolella (86 %), missä suurin osa myöhästymisistä on lyhyitä, noin parin minuutin mittaisia myöhästymisiä (taulukko 16). Informaation laatu ja luotettavuus laskee, koska kaikkia myöhästymissyitä ei kirjata. Goverden (2005) mukaan pienien primääristen ja sekundääristen myöhästymisten kirjaaminen on tärkeää erityisesti rakenteellisten ongelmien tunnistamisessa. Myös peruttujen junien käsittely vääristää tilastoja, koska ne lasketaan saapuneen ajallaan määräasemalle. Jos lähiliikenteen juna jää matkalle veturivian vuoksi, lasketaan se ”puolittain” täsmälliseksi, jos juna on lähtenyt aikataulunmukaisesti asemalta.

Taulukko 16. Syykoodittomien myöhästymisten osuus Suomessa 2006 (JUSE).

Lähiliikenne		Kaukoliikenne		Tavaraliikenne	
min %	kpl %	min %	kpl %	min %	kpl %
60	86	24	57	20	58

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Aikataulusuunnittelu

Työssä kuvattiin aikataulusuunnittelun periaatteet ja suunnittelussa huomioon otettavat tekijät. Aikataulusuunnittelun keskeinen rooli rautatieliikenteen suunnitteluprosessissa sekä aikataulusuunnittelun merkitys liikenteen täsmällisyyden kannalta tuli työssä hyvin esille. Kun aikataulusuunnittelua tarkastellaan osissa, siihen liittyvät asiat ovat helposti ymmärrettävissä. Käytännössä aikataulusuunnittelu on kuitenkin hyvin haastavaa ja aikaa vievää. Yksittäisen junan aikataulun laatiminen on vielä melko yksinkertaista, mutta junien määrän kasvaessa on kyseessä äärimmäisen monimutkainen kokonaisuus. Huomioon otettavia tekijöitä on paljon, kuten vaihtoyhteydet, junaturvallisuus, juna-kohtaamiset, kalustokierto, kustannukset ja liikenteen täsmällisyys. Työssä tuli hyvin esille myös se, miten ”kaikki vaikuttaa kaikkeen” rataverkolla.

Jos palataan työn aikana esitettyyn kysymykseen hyvästä aikataulusta, voidaan vetää seuraavat johtopäätökset. Aikataulusuunnittelu on jatkuvaa kompromissien tekoa ja optimaalisen aikataulun luominen on periaatteessa mahdotonta. Yleensä suunnittelun tavoitteena onkin luoda aikataulu, joka on ”riittävän hyvä”. Optimoitavia muuttujia sekä erilaisia reunaehtoja on paljon ja monet niistä ovat ristiriidassa keskenään. Esimerkiksi pelivaran lisääminen parantaa liikenteen täsmällisyyttä, mutta pidentää matka-aikaa ja heikentää resurssien tehokasta käyttöä. Mitä enemmän ehtoja aikataulusuunnittelulle asetetaan, sitä vaikeampaa kaikki vaatimukset täyttävän aikataulun suunnittelu on. On esimerkiksi helppo todeta, että täsmällisyyttä voidaan parantaa tasaamalla junien nopeuksia, vähentämällä junien välisiä riippuvuuksia tai lisäämällä pelivaraa. Täytyy kuitenkin muistaa, että aikatauluteknisin keinoin täsmällisyyteen voidaan vaikuttaa vain tietyissä rajoissa.

Aikataulusuunnittelu vaatii kokemusta ja rautatieliikenteen luonteen ymmärrystä. Junan aikataulun laadintaan ei oikein voida antaa selkeitä järjestelmällisiä ohjeita. On tärkeää saada mahdollisimman kattava kokonaiskuva rautatiemaailmasta (liikenne, rata, turvalaitteet, kalusto jne.), jotta pystyy sisäistämään aikataulusuunnitteluun liittyvät lainalaisuudet. VR:n aikataulusuunnittelija Jarmo Oksasen sanoin: ”Kiitoksia aikataulusuunnittelija saa harvoin. Jos moitteita ei tule, on onnistunut työssään melko hyvin.”

8.2 Aikataulujen analysointi

Työssä tutkittiin, minkälaisia menetelmiä aikataulujen analysoimiseksi on kehitetty. Simulointia on pitkään hyödynnetty rautatieliikenteen aikataulusuunnittelussa ja aikataulujen analysoinnissa. Se on monipuolinen tutkimusmenetelmä, jolla on useita hyötyjä. Simulointi on edullinen tapa testata ja arvioida vaihtoehtoisia ratkaisuja ja kerätä suuret määrät yksityiskohtaista tietoa sekä olemassa olevasta että suunnitteluvaiheessa olevasta järjestelmästä. Yleisesti ottaen simuloinnilla voidaan mallintaa laajempia kokonaisuuksia kuin analyttisillä menetelmillä ja sen avulla saadaan myös selvästi tarkempi kuva vallitsevasta tilanteesta. Analyttisiin menetelmiin verrattuna simulointi ei kuitenkaan anna valmista ratkaisua ongelmaan eikä kerro aikataulujen optimaalisuudesta mitään.

Rautatieliikenteen monimutkaisten prosessien tutkimiseen simulointi soveltuu erinomaisesti. Liikenteen täsmällisyys on riippuvainen useasta eri muuttujasta ja koko rataverkosta. Lisäksi rataverkko on hyvin dynaaminen järjestelmä ja on hyvin vaikea ennustaa häiriöiden vaikutuksia liikenteeseen. Simuloinnin avulla saadaan tarkka kuva siitä, miten esimerkiksi primäärinen myöhästymisen vaikuttaa muihin juniin aiheuttaen sekundaarisia myöhästymisiä. Visuaalisuutensa vuoksi simulointi on myös havainnollinen esitystapa, koska asiat voidaan esittää myös muuten kuin pelkkien lukujen avulla.

Oikeastaan ainoa simuloinnin heikkous on sen aikaa vievyys, minkä vuoksi se ei sovellu kovin hyvin lyhyen tähtäimen suunnittelun apuvälineeksi. Ennen simulointia tulee myös pohtia, onko simuloinnista saatava tieto vaaditun työ määrän arvoista ja onko simulointi varmastiärkevin menetelmä ongelman ratkaisuun. Simulointi on kuitenkin paras työkalu, kun tarvitaan mahdollisimman luotettavia tuloksia. Jos simulointimallin rakentamis- ja analysointikustannuksia verrataan esimerkiksi ratahankkeiden investointikustannuksiin, voidaan simulointikustannuksia pitää varsin edullisina.

Simulointia varten tarvitaan hyvin yksityiskohtaista tietoa kalustosta, rataverkosta ja aikataulusta. Kun arvioidaan tulevaisuuden investointeja, tietoa tarkoista aikatauluista ei vielä ole. Esimerkiksi junamääristä tai hitaiden ja nopeiden junien järjestyksestä ei yleensä tässä vaiheessa ole vielä tietoa. Tällöin joudutaan tekemään tiettyjä oletuksia, mikä saattaa heikentää tulosten luotettavuutta. Simulointimallien parempi tarkkuus saattaa ainakin joissakin tapauksissa olla näennäistä. Koska simulointiohjelmat ovat kaupallisia tuotteita, niiden takana olevat oletukset eivät välttämättä ole kovin läpinäkyviä. Usein simulointiohjelmat on kehitetty lähinnä aikataulusuunnittelun tarpeisiin ja siksi joillakin ohjelmilla häiriöiden vaikutusten arviointi voi olla hankalaa.

Simuloinnin soveltamisella on omat rajoituksensa ja aikataulujen sekä täsmällisyyden analysointiin on kehitetty muitakin vaihtoehtoja kuin simulointi. Työssä käytiin läpi useita eri analyttisiä menetelmiä, joista esiteltiin muutama ja kerrottiin, mitä oli tutkittu ja minkälaisia tuloksia saatu. Menetelmiä ei testattu käytännössä, mikä hankaloitti niiden käyttökelpoisuuden ja luotettavuuden arviointia. Analyttisessä mallintamisessa joudutaan usein tekemään paljon yksinkertaistuksia, koska kaikkien täsmällisyyden ja junien liikkeisiin vaikuttavien muuttujien huomioon ottaminen matemaattisissa mallissa ei ole mahdollista. Joidenkin tutkijoiden mukaan simulointi on ainoaärkevä tapa mallintaa junien välisiä vuorovaikutuksia rataverkolla. (Hofman & Madsen 2005, Mattsson 2004, White 2007)

Analyttiset menetelmät eivät yleensä vaadi kovin paljon lähtötietoa, kuten tarkkaa aikataulua, ja lisäksi ne ovat nopeita verrattuna simulointiin. Tämän vuoksi analyttiset menetelmät soveltuvat paremmin pitkän tähtäimen strategiseen suunnitteluun, kun arvioidaan eri aikataulu- tai investointivaihtoehtoja ja tulevaan liikenteeseen liittyviä paljon epävarmuustekijöitä (kalusto, kysyntä, infrastruktuuri). Koska lähtötieto on usein niukkaa tai ei niin luotettavaa, menetelmät tekevät paljon oletuksia, mikä johtaa vähemmän luotettaviin tuloksiin. Usein analyttiset menetelmät olettavat myöhästymiset itsenäisiksi. Ne eivät siis ota huomioon rataverkon riippuvuuksia, mikä on merkittävä puute analysoitaessa rautatieliikennettä. Tämänkään vuoksi tulokset eivät välttämättä ole kovin luotettavia, mutta niiden suuruusjärjestys on kuitenkin yleensä oikea. Niiden avulla voidaan esimerkiksi arvioida, mikä aikatauluvaihtoehtoista on

vakain. Joissakin tutkimuksissa analyttisten menetelmien tuloksia ja luotettavuutta on arvioitu simuloinnin avulla. Vertailujen perusteella analyttisten menetelmien tulokset ovat yleensä olleet yllättävän luotettavia. Esimerkiksi Higgins ja Kozan (1998) mallinsivat kaupunkijunien myöhästymisiä ja heidän tutkimuksessaan analyttisen mallin suhteellinen virhe verrattuna simulointiin oli 8 %.

Aikataulujen optimointimenetelmien heikkoutena on, että ne optimoivat vain yhden muuttujan suhteen eivätkä yleensä ota huomioon vaikutuksia muihin tekijöihin. Rautatieliikenteen voimakkaiden riippuvuuksien vuoksi yksittäisen tekijän optimointi heikentää yleensä muita tekijöitä, jolloin ei periaatteessa voida puhua koko aikataulujen optimoinnista. Esimerkiksi matka-aikojen optimointi johtaa helposti aikatauluihin, jotka ovat hyvin herkkiä myöhästymisille.

Analyttisiä menetelmiä on tarkasteltava hyvin kriittisesti, vaikka valtaosa niistä on esitelty ennakoarvioinnin läpikäyneessä tieteellisessä artikkelissa. Monia menetelmiä kehitettiin perusteettomasti, vaikka niiden merkitys käytännön suunnittelussa on mitätön. Osittain tämä saattaa johtua siitä, että monilla tieteellistä tutkimusta tekevillä ei ole käytännön kokemusta rautatiealalta. Joissakin tapauksissa tutkimuksen lähtökohtana tuntui olleen enemmän matemaattisen menetelmän testaaminen kuin tarve kehittää käyttökelpoinen analysointityökalu rautatieliikenteen suunnitteluun. Joissakin tapauksissa taas asiantuntija olisi varmasti pystynyt sanomaan tutkimuksen tuloksen ilman analysointiakin. Esimerkiksi de Kortin et al. (2003) tutkimuksessa tulevaisuuden arvioitu junaliikenne oli 16 junaa tunnissa ja malli arvioi täsmällisyydeksi 70 % jo 10 junalla. Voisi kuvitella, että tällaisessa tapauksessa on ilman analysointiakin varmasti aika selvää, että investointeja kapasiteetin nostamiseksi tarvitaan joka tapauksessa.

Monia erilaisia analyttisiä menetelmiä aikataulujen ja täsmällisyyden analysoimiseksi on kehitetty, mutta ilmeisesti vain hyvin harvoja niistä on sovellettu käytännön suunnittelussa. Analyttiset menetelmät ovat usein matemaattisesti hyvin haastavia, mikä voi rajoittaa niiden käyttöä. Menetelmien tueksi tulisikin pyrkiä rakentamaan graafinen käyttöliittymä, jolloin mahdollisimman moni kykenisi käyttämään näitä menetelmiä. Hyvä esimerkki tästä on työssä esitelty aikataulujen analysointiohjelma PETER, joka perustuu Max-plus algebraan. Osittain käytännön sovellusten vähyys saattaa johtua myös monesti valtio-omisteisten, hieman vanhoillisten rautatieyritysten tavasta toimia. Halukkuutta uusien menetelmien soveltamiseen ei välttämättä ole vaan asiat suunnitellaan pitkälti ”niin kuin aina ennenkin”. Monet menetelmistä soveltuivat vain vakioaikatauluille, mikä johtuneee varmasti osittain siitä, että paljon alan tutkimusta on tehty Hollannissa ja Sveitsissä, missä vakioaikataulujärjestelmä on ollut jo pitkään käytössä. Selvityksessä ei löytynyt menetelmää, jota voitaisiin suoraan suositella testattavaksi ja sovellettavaksi Suomessa.

Yhteenvedon voidaan sanoa, että eri menetelmillä on selvästi hyvät ja huonot puolensa. Analyttiset menetelmät ovat yleensä käytännöllisiä suhteellisten yksinkertaisten ongelmien ratkaisussa. Ne ovat nopeita verrattuna simulointiin ja sopivat sen vuoksi tilanteisiin, jossa tarvitaan nopeasti tuloksia. Lisäksi monia eri ratkaisuja, esimerkiksi suuri määrä eri aikatauluvaihtoehtoja, voidaan arvioida lyhyessä ajassa. Analyttisten menetelmien edut tulevat kuitenkin paremmin esille, kun tarkastellaan yksinkertaisempia järjestelmiä kuin rautatiejärjestelmä. Kun halutaan mahdollisimman luotettavia tuloksia, mikrosimulointi vaikuttaisi olevan ainoa oikea vaihtoehto.

Simulointi ei kuitenkaan kerro mitään aikataulujen optimaalisuudesta, puhumattakaan siitä, että se antaisi vaihtoehtoja.

8.3 Täsmällisyys ja sen mittaaminen

Työssä selvitettiin rautatieliikenteen täsmällisyyteen vaikuttavia tekijöitä ja kuvattiin niiden välisiä riippuvuuksia. Rautatieliikenteen täsmällisyyteen vaikuttavat hyvin monet eri tekijät. Rataverkon riippuvuuksista johtuen häiriöillä on taipumus ketjuuntua, minkä vuoksi rautatieliikenteessä tapahtuu myös paljon sekundäärisiä myöhästymisiä. Jotta tämä monimutkainen ja alueellisesti laaja järjestelmä toimisi mahdollisimman hyvin, on kaiken edellytyksenä ja myös kaikkein tärkeimpänä tavoitteena junien kulku aikataulujensa mukaisesti. Se on sekä kaupallisten että tuotannollisten näkökohtien muodostama tavoite.

Täsmällisyyttä ei voida määritellä yksiselitteisesti. Jotta liikenteen täsmällisyydestä saataisiin mahdollisimman kattava kuva, tarvitaan eri mittareita täsmällisyyden määrittelemiseksi. Liikennetiedon keräämisen ja analysoinnin tulisi olla olennainen osa rautatieliikenteen suunnitteluprosessia ja aikataulusuunnittelua. Toteumatietoa voidaan hyödyntää uusien aikataulujen suunnittelussa. Tällöin voidaan myös tunnistaa rata-
verkon pullonkauloja ja suunnitella tarvittavat korjaustoimenpiteet tilanteen parantamiseksi.

8.4 Rautatieliikenteen täsmällisyys Suomessa

Rautatieliikenteen täsmällisyysongelmat ovat olleet viime aikoina paljon esillä julkisuudessa. Sekä vuoden 2006 lopulla että syksyllä 2007 hallitus pyysi RHK:lta ja VR:ltä lausuntoa täsmällisyyden laskun syistä ja parantamistoimenpiteistä. Julkisuudessa puhutaan yleensä VR:n junien myöhästelystä, kun rautatieliikenteessä on ongelmia. Myös käsite liikenteen täsmällisyys on hieman harhaanjohtava ja parempi olisi ehkä puhua rautatiejärjestelmän luotettavuudesta. Rautatiejärjestelmän luonteeseen kuuluu myös infrastruktuurin aiheuttamat myöhästymiset. Kaukoliikenteessä ratatyöt ja infrastruktuuri aiheuttivat viime vuonna 38 % myöhästymisistä (min). Jos mukaan otetaan edellä mainittujen tekijöiden aiheuttamat sekundääriset myöhästymiset, on luku lähellä 50 %. RHK on siis vastuussa noin puolista henkilöliikenteen myöhästymisistä. Kyse on siis paljon muustakin kuin Pendolinojen luotettavuusongelmista.

Viime vuonna rautatieliikenteessä tehtiin matkoja ennätysmäärä. Täsmällisyysongelmista huolimatta asiakkaita on ollut hyvin, minkä vuoksi täsmällisyyteen ei välttämättä ole kiinnitetty riittävästi huomiota. Myös RHK:sta on puuttunut selkeä motivoiva tekijä täsmällisyyden parantamiseen. Jatkossa RHK:n tulee ottaa suurempi vastuu täsmällisyysasioista. Täytyy hahmottaa kokonaisuus ja ymmärtää, mitkä tekijät vaikuttavat täsmällisyyteen. Enää ei voida puolustautua pelkällä rahapulalla, rataverkon yksiraiteisuudella tai poikkeuksellisilla sääolosuhteilla. Täytyy sopeutua toimimaan siinä toimintaympäristössä, missä toimitaan. Asenteita ja toimintatapoja täytyy muuttaa ja kantaa paremmin vastuu asioista. Tulevaisuudessa tilanne ei varmasti tule ainakaan helpottumaan, jos liikennemäärät kasvavat ja uusia rautatieyrityksiä tulee markkinoille.

Tällä hetkellä RHK:lla ja VR:llä on yksi yhteinen täsmällisyystavoite, joka ei ota huomioon kokonaisuutta tarpeeksi hyvin. Kauko- ja tavaraliikenteessä tavoitteena on

90 % täsmällisyys määräasemilla ja lähiliikenteessä 97,5 % täsmällisyys. Tavoite ei kuitenkaan huomioi myöhästymisten syitä, kuinka suuri osuus matkustajista on ollut myöhässä, kuinka paljon junat ovat olleet myöhässä tai miten täsmällisiä junat ovat olleet matkan aikana. Jos toimintaa optimoitaisiin kyseisen tavoitteen mukaan, esimerkiksi kaikki pelivara kannattaisi sijoittaa viimeiselle asemavälille. Täsmällisyyttä ei voida määritellä yksikäsitteisesti. Jotta liikenteen täsmällisyydestä saataisiin mahdollisimman kattava kuva, tarvitaan muita mittareita nykyisten rinnalle. RHK:n tulisi integroida täsmällisyysasiat osaksi kaikkia prosesseja, laatia täsmällisyystavoitteet ja suunnitelma (täsmällisyysstrategia) miten tavoitteisiin päästään.

Yrityksen vision, tavoitteiden ja strategian tulisi tukea toisiaan. Mittarit tulisi suunnitella edellä mainittujen tekijöiden perusteella. Nykyisin mitataan vain junien täsmällisyyttä. Jos ajatellaan, että visiona on ”enemmän matkustajia raiteilla”, olisi tärkeämpää kuitenkin tietää, millä tavalla asiakkaat kokevat täsmällisyyden eli kuinka moni matkustaja saapuu ajoissa asemalle. Todellisuudessa tilanne voi olla, että junien täsmällisyys on 85 % ja matkustajien 70 %. Matkalippujärjestelmää ollaan uudistamassa ja sen tuomat mahdollisuudet matkustajien täsmällisyyden tarkkaan mittaamiseen tulisi selvittää. Täsmällisyystavoitteena on jo pitkään ollut 90 %. On tavallaan hyväksytty, että yksi juna kymmenestä saa olla myöhässä. Rautatiejärjestelmän luonteeseen toki kuuluu, että häiriötä tapahtuu aika ajoin. Silti pitäisi omaksua niin sanotun jatkuvan parantamisen periaatteet, missä edetään pienin askelin eteenpäin ja pyritään parantamaan liikenteen täsmällisyystasoa pikku hiljaa.

Viime vuonna lähiliikenteessä oli 86 % syykoodittomia myöhästymisiä, mikä laskee paljon informaation laatua. Jotta merkittävimmistä epätäsmällisyyttä aiheuttavista tekijöistä saataisiin käsitys ja toimenpiteet täsmällisyyden parantamiseksi voitaisiin kohdentaa oikein, tulisi jokainen myöhästymisen syy kirjata ylös. Tällöin voidaan myös seurata, minkälaisia tuloksia täsmällisyyden parantamistoimenpiteillä saavutetaan ja asettaa yksityiskohtaisempia täsmällisyystavoitteita. Myös pienten myöhästymisten kirjaaminen on tärkeää. Ne voivat kumuloitua pitkässä juoksussa ja aiheuttaa suurempia myöhästymisiä toisaalla. Pienempien myöhästymisten analysointi voi paljastaa myös rakenteellisia ongelmia. Mahdollisuuksien mukaan häiriön syy-seuraus-ketju ja häiriön todellinen syy tulisi pyrkiä selvittämään (esim. turvalaitevika-sulakevika-kontaktihäiriö-veden pääsy turvalaiteeseen). Tämä helpottaa huomattavasti täsmällisyyden parantamishankkeiden ja kunnossapidon suunnittelua, kun tiedetään tarkemmin, mihin asioihin tulisi puuttua.

Nykyisissä täsmällisyysmittareissa on epäloogisuuksia, jotka tulisi korjata. Esimerkiksi lähiliikenteen täsmällisyysmittari pitää sisällään myös lähtötäsmällisyyden. Tämä parantaa lähiliikenteen täsmällisyyttä näennäisesti, koska lähtömyöhästymisiä on vähemmän. Esimerkiksi vuoden 2007 elokuun loppuun mennessä lähiliikenteen täsmällisyys on ollut 96 %. Jos lähtömyöhästymisiä on ollut esimerkiksi noin 15 %, lähiliikenteen määräasematäsmällisyys on tällöin noin 93 %.

Suomessa on vuodesta 2004 lähtien ollut käytössä JUSE-tietojärjestelmä liikenteen toteumatiedon keräämiseen ja täsmällisyyden seuraamiseen. Järjestelmä on hyvin jäykkä ja liikenteen täsmällisyydestä on saatavissa tietoa vain rajoitetusti ja hankalasti. Kaikki tieto pitää hakea järjestelmästä käsin ja grafiikat piirtää erikseen, jolloin myös virheiden riski kasvaa. JUSEsta ei näe suoraan edes yksinkertaisia täsmällisyyden

tunnuslukuja. JUSE-järjestelmän jäykkyys saattaa olla yksi syy siihen, etteivät esimerkiksi aikataulusuunnittelijat juurikaan hyödynnä liikennetietoa. Nykyistä seurantajärjestelmää tulisi kehittää tai uusia järjestelmä kokonaan. Kannattaisi myös selvittää, voisiko tuleva ratakapasiteetin hallintajärjestelmä (LIIKE) ratkaista tulevaisuudessa täsmällisyysseurannan puutteita. Periaatteessahan järjestelmään tulee kaikki liikennetieto, minkä vuoksi täsmällisyyden seurantajärjestelmä olisi luonteva osa kapasiteetin hallintajärjestelmää.

Rautatieliikenteen suunnittelussa on tärkeää verrata suunniteltua toteutuneeseen. VR:n aikataulusuunnittelijat eivät juuri hyödynnä liikenteen toteumatietoa aikataulusuunnittelussa. Aikataulut perustuvat kuitenkin hyvin pitkälle edellisen kauden aikatauluihin ja liikennetieto sisältää arvokasta dataa, jota tulisi hyödyntää aikataulusuunnittelussa ja aikataulujen kehittämisessä. Pahimmat liikenteen pullonkaulat ovat varmasti melko hyvin suunnittelijoiden tiedossa, mutta toimintaa tulisi kuitenkin mitata tosiasiatiedon eikä näppituntuman perusteella. Analysoimalla liikennettä voidaan rataverkon pullonkauloja tunnistaa ja toimintaa kehittää. Myös aikataulujen häiriöherkkyyden analysointi tulisi integroida osaksi aikataulusuunnittelua.

Ei riitä pelkästään, että todetaan radanpitoon tarvittavan lisärahoitusta. Tarvitaan myös hyviä perusteluja. Vaikka Suomen rataverkon ongelmat ovat melko hyvin tiedossa, asiat tulisi pyrkiä esittämään päättäjille mahdollisimman havainnollisesti ja ymmärrettävästi. Esimerkiksi rataverkon kartta, mistä näkyvät myöhästymisminuutit junakilometriä kohden (liite 4) tai kapasiteetin käyttöaste, ovat havainnollisia esitystapoja. Kuvista näkee selvästi, missä ja miten merkittäviä ongelmia rataverkolla esiintyy. Olisi hyvä myös korostaa sekundääristen myöhästymisten korkeaa osuutta. Ne heijastavat rataverkon yksiraiteisuuteen liittyviä ongelmia ja kapasiteetin korkeaa käyttöastetta, mikä on päättäjille vahva viesti.

Kuinka paljon yksi myöhästymisminuutti maksaa? Minkälaisia kustannuksia epätäsmällisyys aiheuttaa vuositasolla? Kuinka paljon täsmällisyyden parantamiseen kannattaisi panostaa? Nämä ovat kysymyksiä, joihin olisi mielenkiintoista saada vastaus tai edes jonkinlainen arvio. Kun rahaa on rajallisesti käytössä, investointien priorisointi on tärkeää. Jos epätäsmällisyyden aiheuttamat kustannukset olisivat tiedossa, voitaisiin eri hankkeiden vaikutuksia arvioida tarkemmin. Esimerkiksi olisiko yhteiskuntataloudellisesti ollut kannattavampaa laittaa rantaradan turvalaitteet kuntoon ennen kalliita tunneleiden korjaushankkeita?

Tällä hetkellä RHK:ssa ei ole täysipäiväisesti täsmällisyysasioista vastaavaa henkilöä. VR:llä on täsmällisyyskoordinaattori, joka vastaa lähinnä kuukausittaisista täsmällisyysraporteista (pitäisi saada automaattisesti JUSEsta). Työssäni laskin hyvin karkean arvion vuosittaisista täsmällisyyskustannuksista ja sain tulokseksi 50 milj. euroa. Tulos on vain suuntaa antava ja tarkempi selvitys kannattaisi ehdottomasti laatia. Vuositasolla puhutaan kuitenkin miljoonien eurojen kustannuksista. Jos ajatellaan, että RHK:hon palkattaisiin yksi henkilö vastaamaan täsmällisyysasioista, hänen ei tarvitsisi periaatteessa saada aikaan kuin noin 0,1 % parannus täsmällisyydessä vuositasolla, kun hän jo maksaisi itse itsensä takaisin.

Tiedottaminen on osa-alue, jossa olisi myös parannettavaa. Epätäsmällisyys aiheuttaa kiusallista julkisuutta ja imago tappioita sekä rataverkon haltijalle että rautatieyrityksille.

On ymmärrettävää, että rautatieyritys ei halua korostaa, että tuotteessa on vikaa. Siitä huolimatta täsmällisyysongelmista kannattaisi tiedottaa mahdollisimman avoimesti. Tällöin myös VR ja RHK joutuvat kiinnittämään enemmän huomiota liikenteen täsmällisyyteen. sekä työntekijät että asiakkaat saavat tietoa täsmällisyydestä ja myöhästymisten syistä, mikä lisää asiakkaiden ymmärtämystä järjestelmää kohtaan. Tutkimusten mukaan asiakkaat odottavat rautatieliikenteeltä parempaa täsmällisyyttä kuin tie- ja lentoliikenteeltä – se ei välttämättä ole huono asia.

8.5 Jatkotutkimukset

Työn aikana tulivat esille seuraavat jatkotutkimustarpeet ja -ideat:

Simuloinnin soveltaminen aikataulujen analysoinnissa

Suomessa aikatauluja ei testata ennen niiden käyttöönottoa. Tulisi selvittää, miten nykyinen simulointiohjelma OpenTrack soveltuu aikataulujen analysointiin ja minkälaiset mahdollisuudet Suomessa on aikataulujen testaamisen ennen niiden käyttöönottoa. Myös makrosimuloinnin soveltamisen mahdollisuudet ja hyödyt Suomen rautatieliikenteessä tulisi selvittää.

Analysointimenetelmien testaus käytännössä

Työssä ei testattu käytännössä aikataulujen analysointimenetelmiä, minkä vuoksi niiden arviointi oli hieman hankalaa. Joissakin tilanteissa analyttisillä menetelmillä on kuitenkin puolensa, minkä vuoksi olisi mielenkiintoista valita muutama menetelmä ja verrata tuloksia esimerkiksi simuloinnin antamiin tuloksiin. Työssä kävi ilmi, että analyttiset menetelmät ovat matemaattisesti hyvin haastavia, minkä vuoksi tutkimuksen tekijällä tulisi olla erittäin hyvät matemaattiset valmiudet.

Epätäsmällisyyskustannukset

Työssä laskettiin hyvin karkea arvio vuotuisista epätäsmällisyyskustannuksista. Olisi mielenkiintoista saada kuitenkin tarkempi ja luotettavampi arvio näistä kustannuksista. Tämä olisi arvokasta tietoa eri investointihankkeiden priorisointiin. Tällöin myös hyötykustannuslaskelmiin voitaisiin tulevaisuudessa sisällyttää täsmällisyyden parantumisesta aiheutuvat hyödyt.

Täsmällisyyden seurannan kehittäminen

JUSE ei palvele tarkoitustaan riittävän hyvin. Tulisi selvittää, voidaanko JUSE-järjestelmää kehittää vai onko järkevämpää hankkia täysin uusi järjestelmä. Tulisi selvittää, minkälaista täsmällisyystietoa tarvitaan. Myös tulevan ratakapasiteetin hallintajärjestelmän mahdollisuudet ja rooli täsmällisyyden seurannassa tulisi selvittää.

Täsmällisyysstrategia

RHK:ssa täsmällisyysasiat tulisi integroida osaksi kaikkia prosesseja, mikä edellyttää täsmällisyysstrategiaa. Lisäksi tarkemmat täsmällisyystavoitteet tulisi määritellä ja kehittää kattava mittaristo määriteltyjen tavoitteiden seurantaan.

8.6 Työn arviointi

Tämän työn tekeminen on ollut erittäin mielenkiintoista. Aihepiiri oli todella ajankohtainen ja tarjosi erinomaisen mahdollisuuden tutustua rautatiemaailmaan. Työn

aihe oli hyvin laaja ja joihinkin asioihin olisi ollut mukava paneutua hieman syvällisemmin. Periaatteessa jokaisesta osa-alueesta olisi voinut laatia melkein oman työnsä (aikataulusuunnittelu, aikataulujen analysointi, täsmällisyyden mittaaminen). Toisaalta työstä muodostui hyvä ja mielekäs kokonaisuus.

Työtä voidaan pitää varsin onnistuneena, sillä tavoitteisiin onnistuttiin vastaamaan hyvin. Ainoastaan aikataulujen analysointimenetelmien arviointi osoittautui varsin hankalaksi, koska menetelmiä ei sovellettu käytännössä ja monet niistä olivat matemaattisesti hyvin haastavia. Siitä huolimatta eri menetelmien käyttökelpoisuudesta saatiin suhteellisen hyvä käsitys ja selvityksen perusteella voidaan todeta, että simulointi on toistaiseksi käyttökelpoinen työkalu aikataulujen ja täsmällisyyden analysoimiseksi.

Kilpailun avautumisen myötä Suomen rataverkolle tulevat mahdolliset uudet toimijat joutuvat suunnittelemaan aikataulunsa itse. Uusilla rautatieyrityksillä ei välttämättä ole kovin paljon kokemusta rautatieliikenteestä, minkä vuoksi työn pohjalta laadittiin aikataulusuunnitteluopas uusille toimijoille. Rautatieliikenteen täsmällisyys on myös ollut työn aikana paljon esillä ja jatkossa RHK:ssa joudutaan tarkastelemaan kriittisesti toimintaa ja pohtimaan, mitä täsmällisyyden parantamiseksi voitaisiin tehdä RHK:n osalta. Toivottavasti tämä työ herättää joitain ajatuksia myös tällä saralla.

LÄHTEET

Kirjallisuuslähteet

1. Abril, M., Salido, M., Barber, F., Ingolotti, L., Tormos, P., Lova, A. 2006. Distributed constraint satisfaction problems to model railway scheduling problems. The international conference of planning and scheduling 2005. s. 54-61.
2. Alfieri, A., Groot, R., Kroon, L., Schrijver, A. 2002. Efficient circulation of railway rolling stock. Technical Report ERS-2002-110-LIS. Erasmus Research Institute of Management (ERIM). Erasmus University Rotterdam. 29 s.
3. Aronson, M., Ekman, J., Kreuger, P. 2003. Coordination of planning processes for traffic operators on rail networks. Technical report 2003:13. Banverket. 51 s.
4. Banverket 2007a. Punktlighet och förseningar med koppling till trafikbelastning och kapacitetsutnyttjande. Rapport 2007-06-01. Banverket. 25 s.
5. Banverket 2007b. Network statement 2008. 87 s.
6. BEST 2002: International railway benchmarking. Report of the railway working group 5 June 2002.
7. van den Boom, T., Schutter, 2004. Model predictive control for perturbed max-plus-linear systems: a stochastic approach. International Journal of Control 77 (3). s. 302-309.
8. Burkolter, D. 2005. Capacity of railways in station areas using Petri nets. Swiss Federal Institute of Technology. Zyrich. 27 s.
9. Bussieck, M., Lubbecke, M., Winter, T., Zimmermann, U. 1997. Discrete optimization in rail transport. 16th international symposium on mathematical programming. Lausanne. s. 415-444
10. Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D., Guida P. 1997. Algorithms for railway crew management. Mathematical Programming 79. s. 125-141.
11. Carey, M., Carville, S. 1998. Testing schedule performance and reliability for train stations. Faculty of Business and Management. University of Ulster.
12. Carey, M. 1999. Ex ante heuristic measures of schedule reliability. Transportation Research 33 (7). 473-494.
13. Ferreira, L., Higgins, A. 1996. Modelling reliability of train arrival times. Journal of transportation engineering 122. s. 414-420.
14. Forsman, J, Liljebloom, J-P. 1996. Periodic network optimization with different arc frequencies. Discrete Applied Mathematics 69. s. 1-17.
15. Gibson, S., Cooper, G., Ball, B. 2002. Developments in transport policy. The evolution of capacity charges on the UK railway network. Journal of Transport Economics and Policy. s. 341-354.
16. Goossens, J.-W., Hoesl, S., Kroon, L. 2004. On solving multi-type railway line planning problems. European Journal of Operational Research 36 (4).
17. Goverde, R. 1998a. Max-plus algebra approach to railway timetable design. 6th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in

- the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems. Lissabon. Portugali. s. 339-350.
18. Goverde, R. 1998b. Synchronization control of scheduled train services to minimize passenger waiting times. Technical report, Transportation Planning and Traffic Engineering Section, Faculty of Civil Engineering and Geo Sciences, Delft University of Technology.
 19. Goverde, R. 2005. Punctuality of railway operations and timetable stability analysis. Technische Universiteit Delft. 293 s.
 20. Gröger, T. 2002. Simulation der fahrplanerstellung auf der basis eines hierarchischen trassenmanagements und nachweis der stabilität der betriebsabwicklung. Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule. Aachen. 181 s.
 21. Haldeman, L. 2003. Automatische analyse von IST-Fahrplänen. Opinnäytetyö. ETH Zurich.
 22. Hallowell, S., Harker, P. 1998. Predicting on-time performance in scheduled railroad operations: methodology and application to train scheduling. Transportation research 32A (4), s. 279-295.
 23. Hansen, I. 2002. A new tool for the analysis of train punctuality based on train detection data. (julkaisematon artikkeli)
 24. Harris, N., Ramsey, B. 1994. Assessing the effects of railway infrastructure failure. Journal of Operational Research Society 45 (6). s. 635-640.
 25. Harris, N., Schmid, F. 2003. Planning freight railways. A & N Harris. Lontoo. 245 s.
 26. Hatch, D. 2000. Cooperative benchmarking between the Dutch and Japanese railways. Japan Railway & Transport Review 7. s. 18-25.
 27. Herrmann, T. 2006. Stability of timetables and train routings through station regions. Swiss federal institute of technology. Zyrich. 157 s.
 28. Higgins, A., Kozan, E. 1998. Modelling train delays in urban networks. Transportation Science 32 (4). s. 346-357
 29. Hofman, M., Madsen L. 2005. Robustness in train scheduling. Projekt number 72. Danmarks Tekniske Universitet. Lyngby. 156 s.
 30. Huisman, D., Kroon, L., Lentink, R., Vromans, M. 2005. Operations research in passenger railway transportation. Econometric Institute Report EI2005-16. 33 s.
 31. Iikkanen, P., Siren, J. 2005. Rautatiekuljetusten kilpailukyky Suomessa. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 44/2005. 64 s.
 32. Jernbaneverket 2001. Samfunnsøkonomisk analyser for jernbanen. Metodehåndbok JD 205.
 33. Kandels, C., Gröger, T. 2005. Declaration of congested infrastructure in the network statement of the infrastrurcture manager Deutsche Bahn. Proceedings of the 1st International Seminar on Railway Operations. Delft, Alankomaat.
 34. Kokkonen, M. 2007. Junakaluston ajodynamiikan mallintaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos.

35. Koolstra, K. 2005. Transport infrastructure slot allocation. TRAIL series 2005/6. Netherlands TRAIL research school. 282 s.
36. de Kort, A., Heidergott, B., Ayhan, H. 2003. A probabilistic (max, +) approach for determining railway infrastructure capacity. *European Journal of Operational Research* 148. s. 644-661.
37. Kroon, L., Dekker, R., Vromans, M. 2005. Cyclic railway timetabling: A Stochastic optimization approach. RSM Erasmus University, Rotterdam. 26 s.
38. Landex, A., Kaas, A., Hansen, S. 2006. Railway operation. Report 2006-4. Technical University of Denmark, Centre for Traffic and Transport. 155 s.
39. Liebchen, C., Proksch, M., Wagner, F. 2004. Performance of algorithms of periodic timetable optimization. 9th international conference of computer-aided scheduling of public transport. San Diego, California. 33 s.
40. Lindh, C., Widlert, S. 1989. SJ - Resenärens kvalitetsvärdering med avseende på information, punktlighet, restid, styv tidtabell och turtäthet. Institut för Trafikplanering, KTH.
41. Lindner, T. 2000. Train schedule optimization in public rail transport. *Der Technischen Universität Braunschweig*. 126 s.
42. LM 1994. Radanpito ja rataverkon kehittäminen pitkällä aikavälillä. Liikenneministeriön julkaisuja 9/94. Helsinki. 90 s.
43. Luethi, M., Huerlimann, D., Nash, A. 2005. Understanding the timetable planning process as a closed control loop. Swiss Federal Institute of Technology. Institute for Transportation Planning and Systems. 12 s.
44. LVM 2005. Julkisen liikenteen peruspalvelutaso. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 7/2005. 102 s.
45. LVM 2006. Rautateiden liikenteenohjauksen järjestäminen. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 44/2006. 49 s.
46. Mattsson L.-G. 2004. Train service reliability, A survey of methods for deriving relationships for train delays. Kungliga Tekniska Högskolan, Royal Institute of Technology, Department of Infrastructure, Unit for Transport and Location Analysis. Tukholma. 30 s.
47. Middelkoop, D., Bouwman, M. 2001. SIMONE: Large scale train network simulations. *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference*. New Jersey. s. 1042-1047
48. Middelkoop, D., Bouwman, M. 2002. Testing the stability of the rail network. Teoksessa: Allan, J., Hill, R., Brebbia, C., Sciutto, G., Sone, S. (toim.) 2002. *Computers in railways VIII*. WIT Press, Southampton. s. 995–1002.
49. Migom, A., Valaert, W. 1981. The optimization of a rhythmic intercity train network. *Rail International* 12. s. 71–91.
50. Mukula, M. 2005. Kasviplankton ja Bayes-verkot järvien ekologisen tilan arvioinnissa. Pro gradu –työ. Helsingin yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. 72 s.

51. Mäkitalo, M. 2000. Ratakapasiteetin perusteet. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 9/2000. Ratahallintokeskus. Helsinki. 66 s.
52. Mäkitalo, M. 2001. Vakioaikataulu junaliikenteen ja rautatieinfrastruktuurin kehittämiseksi. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 9/2001. 117 s.
53. Mäkitalo, M., Väänänen, H., Tuominen, M. 2005. Rautatietekniikka 4. s. 18-19.
54. Natunen, M. 2004. Ratainvestointien optimaalinen ajoitus. Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos. Diplomityö. 111 s.
55. Neilimo, K., Näsi, J. 1980. Nomoteettinen tutkimusote ja suomalaisen yrityksen taloustiede: Tutkimus positivismiin soveltamisesta. Tampereen yliopiston julkaisu A 2:12.
56. NS (Netherlands Railways) 2007. Vuosiraportti 2006.
57. NSB 1996. Effect 600: An introduction to statistical process control (SPC) – Result from the pilot at NSB.
58. Nyby, M. 2006. Ratakapasiteetin jakamisen tietojärjestelmät. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos. 141 s.
59. Nyström, B. & Kumar, U. 2003. Analysis of train delay information. World Congress on Railway Research, Edinburgh. s. 253-261.
60. Nyström, B. 2004. Punctuality and railway maintenance. Luleå University of Tecnology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. 76 s.
61. Nyström, B. 2005. Punktlighet. Luleå University of Tecnology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering. 46 s.
62. Odijk, M 1998. Railway timetable generation. Väitöskirja. Technische Universiteit Delft. 175 s.
63. Paasikivi, J. 2003. Liikenteen suunnitteluprosessin kehittäminen VR-Osakeyhtiössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos.
64. Pachel, J. 2002. Railway Operation and Control. VTD Rail Publishing. Mountlake Terrace WA. 239 s.
65. Peeters, L.W.P. 2003. Cyclic railway timetable optimization. Erasmus Universiteit Rotterdam. 190 s.
66. Pellandini, G. 2000. Uutta ajattelua aikataulusuunnitteluun. Rautatietekniikka 4/2000. s. 54-57.
67. Pellandini, G. 2001a. Perusaikataulu (PAT): Soveltaminen Suomessa. Rautatietekniikka 1/2001. s. 50-53.
68. Pellandini, G. 2001b. Radan ja liikenteen erottaminen kilpailulle avatulla rataverkolla – rautateiden tulevaisuus. Rautatietekniikka 1/2001. s. 26-28.
69. Perkkola, J. 1998. Ratatöiden ja rautatieliikenteen yhteensovittaminen. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos. 77 s.
70. Pitkänen, J.-P. 2006. Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen. Ratahallintokeskuksen julkaisu A4. 145 s.

71. Pudney, P., Wardop, A. 2004. Generating train plans with problem space search. 9th international conference of computer-aided scheduling of public transport. San Diego, California. 13 s.
72. Pursula, M. 1999. Simulation of traffic systems – an overview. Journal of Geographic information and decision analysis 3 (1). s. 1-8.
73. Rautatiehallitus 1962. Valtion Rautatiet 1937–1962. Valtioneuvoston kirjapaino. Helsinki. 854 s.
74. RHK 2000. Liikenne rataosilla Pasila-Tampere ja Turku-Toijala vuonna 2005, simulointitutkimus. (julkaisematon artikkeli) 11 s.
75. RHK 2004a. Pääreittiselvitys. (julkaisematon artikkeli) 33 s.
76. RHK 2004b. Ratainvestointien hankearviointiohje. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B12/2004. 44 s.
77. RHK 2005a. Junaturvallisuussäntö. 104 s.
78. RHK 2005b. Junaturvallisuussäntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet. 148 s.
79. RHK 2006a. Ratatekniset määräykset ja ohjeet 7, rautatieliikennepaikat. 84 s.
80. RHK 2006b. Rautatieliikenne 2030. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A7/2006. 62s.
81. RHK 2006c. Verkkoselostus 2008. Ratahallintokeskuksen julkaisuja F1/2006. 119 s.
82. RHK 2007. Suomen rautatietilasto 2007. 51 s.
83. Rietveld, P., Bruinsma, F., van Vuuren, D. 1999. Coping with unreliability in public transport chains. Transportation Research part 35. s. 539-559.
84. Rudnicki, A. 1997. Measures of regularity and punctuality in public transport operation. Transportation systems 2. s. 661-666.
85. Rudolph, R. 2003. Allowances and margins in railway scheduling. Proceedings of WCRR 2003. Edinburgh. s. 230-238.
86. Skagestad, R. 2004. Kritiske prestasjonsindikatorer i jernbanedrift. Norwegian University of Science and Technology. 84 s.
87. Tiehallinto 2005. Tieliikenteen ajokustannusten yksikköarvot. Tiehallinto. Helsinki. 15 s.
88. Törnquist, J. 2005. N-tracked railway traffic re-scheduling during disturbances: Theoretical and practical implications. Esitetty 13.11. Rail Applications Special Interest Group, the Institute For Operations Research and Management Sciences. San Francisco, USA. 36 s.
89. Törnquist, J. 2006a. Objectives, constraints and context-dependent considerations in the disturbance management of Swedish railway traffic. Julkaisematon artikkeli. Blekinge Institute of Technology, Department of Software Engineering, Sweden. 19 s.
90. Törnquist, J. 2006b. Railway traffic disturbance management. Blekinge Institute of Technology, Department of Software Engineering, Sweden. 188 s.
91. UIC 2000. Timetable recovery margins to guarantee timekeeping – Recovery margins. Leaflet 451-1.

92. UIC 2002. Specification of criteria for the computer-aided production of passenger and freight train timetables. UIC Code 919.
93. UIC 2004. Capacity. UIC Code 406 Pariisi. 22 s.
94. Wahborg, M. 2004. Capacity calculations Sweden: UIC Capacity management 3. draft final report. Banverket.
95. Veiseth, M. 2002. Punktlighet i jernbanedrift. Institutt for produksjons- og kvalitetsteknikk, NTNU. Trondheim. 130 s.
96. Viegas, J., Macário, R., Marques, C., van der Hoofd, M., Moreira, N., Rivier, R., Putallaz, Y., Dekker, R., den Hertog, D., Kuijpers, C., Hooymans, M., Trompet, M., Bouf, D., Montfort, J., Akermann, H-R., Danzer, P. 2003. IMPROVERAIL – 143 Deliverable 6 – Methods for capacity and resource management. Lissabon. 225 s.
97. Vromans, M. 2005. Reliability of railway system. Ph.D series research in management 62. Erasmus University Rotterdam. Erasmus Research Institute of Management. Hollnti. 244 s.
98. VR-Yhtymä Oy 2007. VR Vuosikertomus 2006. 68 s.
99. Väänänen, H. 2006. Rautatietavaraliikenteen kilpailun avautuminen ja rataverkon haltijan palvelutuotanto. Diplomityö. TTY, Liikenne- ja kuljetustekniikan laitos. 91 s.
100. Yuan, J., Goverde, R., Hansen, I. 2002. Propagation of train delays in stations. Teoksessa Computers in railways VIII. Allan, J., Hill, R., Brebbia, C. Sciutto, G., Sone, S. (toim.) WIT Press. 1200 s.

Internet-lähteet

Network Rail 2007. www.networkrail.co.uk (24.9.2007)
 Rautatievirasto 2006. www.rautatievirasto.fi (11.12.2006)

Haastattelut

Beck Katja, German Aerospace Center, Institute of Transportation systems, 29.3.2007,
 2nd International Seminar on Railway Operations Research, Hannover
 Blomqvist Egon, täsmällisyyskoordinaattori, VR, 1.6.2007
 Hovi Sami, aikataulusuunnittelija VR, 10.8.2007
 Kosonen Tero, suunnittelija VR-Rata, 16.11.2006
 Lahelma Harri, ylitarkastaja, RHK. 28.8.2007
 Mäkitalo Miika, Liikenteenhallintayksikön päällikkö RHK, 10.8.2007
 Matsubayashi Nobuko, Japan Railways Group, sähköpostihaastattelu 13.4.2007
 Paasikivi Jari, Liikennesuunnittelupäällikkö VR, 10.8.2007
 Pitkänen Jukka-Pekka, suunnittelija Ramboll 4.6.2007
 White Thomas, Senior Operations Specialist, Transit Safety Management Inc.
 29.3.2007 2nd International Seminar on Railway Operations Research, Hannover

Videot

Japan Rail, Why do Japanese trains run on time?

Esitykset

Hovi Sami, Aikataulusuunnittelu kaukoliikenteessä. VR 19.10.2006

Oksanen Jarmo, Lähiliikenteen aikataulusuunnittelu. VR 19.10.2006

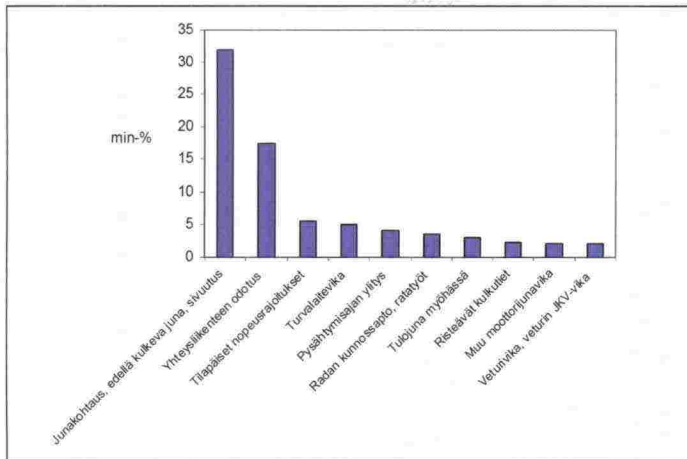
Permala Antti, Logistiikkakeskukset – Intermodaalikuljetukset ja rautatieterminaalit.

Rautatiesuunnittelun erikoisopintopaketti 9.5.2007

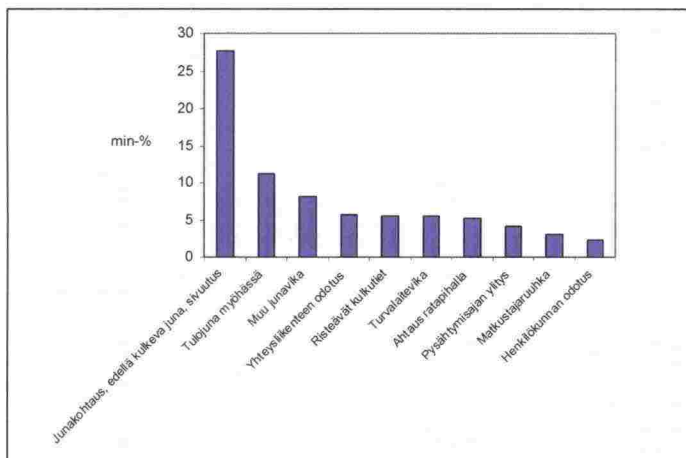
Sala Elina, Kehäradan simulointi. Kapasiteettityöryhmän kokous RHK 21.11.2006

Tomperi Jarmo, Radan geometrinen suunnittelu. Rautatiesuunnittelun erikoisopintopaketti 7.3.2007

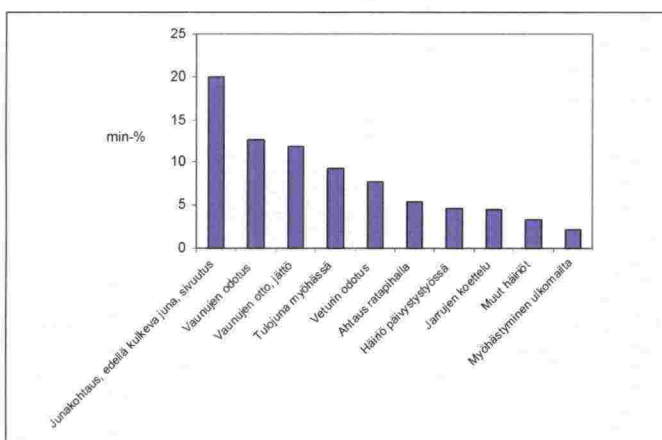
YLEISIMMÄT MYÖHÄSTYMISSYIT SUOMEN RAUTATIELIIKENTEESSÄ 2006



Kaukoliikenteen kymmenen merkittävintä myöhästymissyitä 2006 (JUSE).



Pääkaupunkiseudun lähiliikenteen kymmenen merkittävintä myöhästymissyitä 2006 (JUSE).



Tavaraliikenteen kymmenen merkittävintä myöhästymissyitä 2006 (JUSE).

JUSEEN KIRJATTAVAT SYYKOODIT JA NIIDEN SELITYKSET



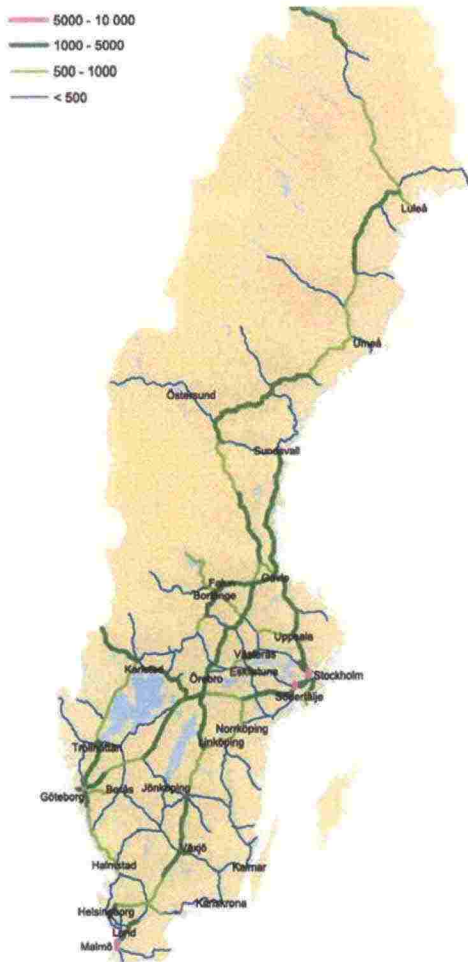
AIKATAULUPOIKKEAMISSA KÄYTETTÄVÄT SYYKOODIT

Liikenneonnettomuudet	Henkilökunta	Rata
O1 ALLEJÄÄNTI (IHMINEN)	H1 HENKILÖKUNNAN VAIHTO	R1 TILAPAISET NOPEUSRAJOITUKSET
O2 ALLEJÄÄNTI (ELÄIN)	H2 HENKILÖKUNNAN ODOTUS	R2 ESTE RADALLA
O3 TASORISTEYSONNETTOMUUS	H3 MUUT SYYT	R3 RADAN KUNNOSSAPITO- JA RAKENNUSTYÖT
O4 MUUT ONNETTOMUUKSET JA VAURIOIT		R4 VARAUKSEEN SOVITUN AJAN YLITYS
Matkustajapalvelu	Junankokoonpano	Sähköistys
M1 MATKUSTAJARUUHKA	J1 VAUNUJEN OTTO TAI JÄTTÖ	S1 JÄNNITEKATKO
M2 MATKUSTAJIEN AIHEUTTAMIA HÄIRIÖITÄ	J2 VAUNUJEN TAI VAUNURYHMIEN ODOTUS	S2 TEKNISET VIAT
M3 AIKATAULUSTA POIKKEAVA PYSÄHDYS	J3 JARRUJEN KOETTELU	S3 SÄHKÖRADAN KUNNOSSAPITO- JA RAKENNUSTYÖT
M4 PASSI- JA TULLITARKASTUS	J4 ERIKOISKULJETUS	S4 HÄIRIÖ VALTAKUNNAN VERKOSSA
M5 VANKIEN KUORMAUS JA PURKU	J5 ALENNETTU SN	
M6 PYSÄHTYMISAJAN YLITYS		Turva-, valvonta- ja viestilaitteet
Tavarapalvelu	Veturit	P1 TURVALAITEVIKA
T1 TAVARAN KUORMAUS JA PURKU	V1 VETURIN ODOTUS	P2 OPASTINVIKA
T2 POSTIN KUORMAUS JA PURKU	V2 VETURIVIKA JA JKV-VIKA VETURILAITTEESSA	P3 VAHDEVIIKA
T3 RAVINTOLAVAINUN KUORMAUS	V3 VETOVOIMAN PUUTE	P4 JKV-VIKA RATALAITTEISSA
T4 AIKATAULUSTA POIKKEAVA PYSÄHDYS	V4 VETURIN VAIHTO, LISÄYS TAI POISTO	P5 LINJA- TAI RATAPIIHARADIOVIKA TAI PUHELINVIKA
Liikennetekniset syyt	Moottorijunat ja vaunut	P6 GSM-R -VIKA
L1 YHTEYSLIIKENTEEN ODOTUS	K1 JARRUVIIKA	P7 VALVONTALAITEVIKA TAI AIHEETON HÄLYTYS
L2 JUNAKOHTAUS, EDELLÄ KULKEVA JUNA TAI SIVUUTUS	K2 LAAKERIVIKA	
L3 AHTAUS RATAPIHALLA	K3 JUNAN KATKEAMINEN	Muut syyt
L4 RISTEÄVÄT KULKUTIET	K4 KYTKENTÄ TAI IRROITUS (Sm / Dm)	I1 SAA (SUM, HUONO KELI, TMS)
L5 MYÖHÄSTYMINEN ULKOMAILTA	K5 KALLISTUSVIKA (Sm3)	I2 LUMIESTEET
L6 HÄIRIÖ PÄIVYSTYSTYÖSSÄ	K6 LOVIPYÖRÄ	I3 ASIATTOMAT RADALLA LIIKKUJAT TAI ILKIVALTA
L7 TULOJUNA MYÖHÄSSÄ	K7 MUU VIKA	I4 MUUT HÄIRIÖT
L8 LIIKENTEENHOITO VIRHE		
	Etuajassakulku (vain tavaraliikenteessä)	
	E1 TULOJUNA ETUJASSA	E5 VETURINA KULKU
	E2 VAIHTOTOITTA VÄHÄN TAI EI OLLENKAAN	E6 AJOAJAN ALITUS / LIIKENNETEKNISET SYYT
	E3 PIENI JUNAKOKO	E7 MUU SYY
	E4 KAAANTOAJAN ALITUS	

RAUTATIELIIKENTEEN TÄSMÄLLISYYS ERI MAISSA

A92 - Punctuality of passenger trains							
A92 - Ponctualité des trains de voyageurs							
A92 - Punctualität der Personenverkehrzüge							
2005							
1	2	3	4	5	6	7	8
Country code	Railway company Compagnie ferroviaire Bahngesellschaft	Local and regional trains Trains locaux et régionaux Nah- und Regionalverkehrzüge		Long distance trains Trains à longue distance Fernverkehrzüge			
				Total Summe		of which HS Trains dont trains GV davon HGV-Züge	
		Cancelled trains	Trains on time (delay = 5 min)	Cancelled trains	Trains on time (delay = 15 min)	Cancelled trains	Trains on time (delay = 15 min)
		Trains supprimés	Trains à l'heure (retard = 5 mn)	Trains supprimés	Trains à l'heure (retard = 15 mn)	Trains supprimés	Trains à l'heure (retard = 15 mn)
		Annullierte Züge	Pünktliche Züge (Verspätung = 5 Min.)	Annullierte Züge	Pünktliche Züge (Verspätung = 15 Min.)	Annullierte Züge	Pünktliche Züge (Verspätung = 15 Min.)
		in percentage		en pourcentage		in Prozentsatz	
Europe Europa							
EU UE							
AT	GKB	0,10	95,0	...	...	...	...
BE	SNCB/NMBS	0,54	94,8	0,09	91,3	0,06	91,6
BG	BDZ	0,14	93,2	0,18	89,0	...	...
CZ	CD	0,27	94,7	0,20	91,0	...	...
DK	DSB	4,00	95,0	3,00	92,3	...	...
ES	ADIF	2,20	98,5	2,30	97,0	0,00	99,7
	FEVE	0,90	90,4	...	...	...	...
	FGC	0,10	99,7	...	...	...	...
FI	VR	0,19	99,0	0,61	90,0	0,90	86,4
FR	SNCF	...	91,7	...	92,3	...	92,6
GB	EUROSTAR UK	...	...	...	91,5	...	91,5
GR	OSE	0,00	70,0	0,00	85,0	...	...
HU	GySEV/ROEE	...	93,6	...	84,8	...	...
HU	MAV	0,05	95,7	0,42	91,2	...	...
IT	FS	2,10	87,0	2,30	85,0	2,40	86,0
PL	PKP	0,48	90,8	0,41	82,8	...	...
PT	CP	0,60	89,4	0,00	70,1	0,00	72,0
PT	REFER	0,00	97,0	0,00	96,7	...	...
RO	CFR-SA	0,00	99,5	0,00	85,0	...	...
SE	BV	...	93,0	...	94,0	...	89,0
SK	ZSSK	...	97,3	...	92,1	...	...
EFTA AELE							
CH	SBB CFF FFS	...	95,7	...	95,7	...	...
NO	JBV	...	90,0	...	90,0	...	97,0
NO	NSB	...	96,0	...	91,7	...	...
Central and Eastern Europe Europe centrale et orientale Mittel- und Osteuropa							
BA	ZRS	0,00	99,8	0,00	99,9	...	...
HR	HZ (2006)	...	71,0	...	87,0	...	...
Asia / Oceania Asie / Océanie Asien / Ozeanien							
KR	KORAIL	0,00	99,7	0,00	95,0	0,00	93,7
MY	KTM	0,04	78,4	0,05	53,2	0,00	0,0

INFRASTRUKTUURI AIHEUTTAMAT MYÖHÄSTYMINENMINUUTIT RATAOSAN PITUUDELLA JAETTUNA RUOTSISSA 2006 (Banverket 2007a)



RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2004 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025
2/2004 Rautateiden kaukoliikenteen asemien palvelutaso ja kehittämistarpeet
3/2004 Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset
4/2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa
5/2004 Radan kulumisen rajakustannukset vuosina 1997–2002
6/2004 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2002
7/2004 Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun tila
8/2004 Stabiiliteetiltaan kriittiset ratapenkereet, esitutkimus
9/2004 Ratapenkereitten leveys ja luiskakaltevuus, esitutkimus
10/2004 Lähtökohtia ratapihojen kapasiteetin mittaamiseen
1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen selvitys
3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla
4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading
6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus
9/2006 Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys
10/2006 Radan stabiiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet
Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto
11/2006 Rautatieinfrastruktuurin kehitystarpeet suuryksikkökuljetusten yleistyessä
12/2006 Pasilan aseman esteettömyyskartoitus ja toimenpideohjelma
1/2007 Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen Luumäki–Imatra-rataosuudelle
2/2007 Radan kulumisen rajakustannukset 1997–2005
3/2007 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2005
4/2007 Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiiliteettitarkasteluihin
5/2007 Pohjois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
6/2007 Suomen rataverkon tärinäselvitys
Kirjallisuuskatsaus ja tärinäkohteet vuosina 2000–2006
7/2007 Luvattomien radanylitysten välttäminen
8/2007 Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnon arvioinnissa
9/2007 Markkinoilletulo ja rautatiemarkkinoiden muutos kotimaisen tavaraliikenteen avautuessa kilpailulle Suomessa
10/2007 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman liikenne-ennusteet
11/2007 Logistiikkakeskusten tie- ja ratayhteydet



**RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:
Ratahallintokeskus
Keskuskatu 8, PL 185, 00101 Helsinki
puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100
www.rhk.fi

ISBN 978-952-445-214-4 (nid.)
ISBN 978-952-445-215-1 (pdf)
ISSN 1455-2604