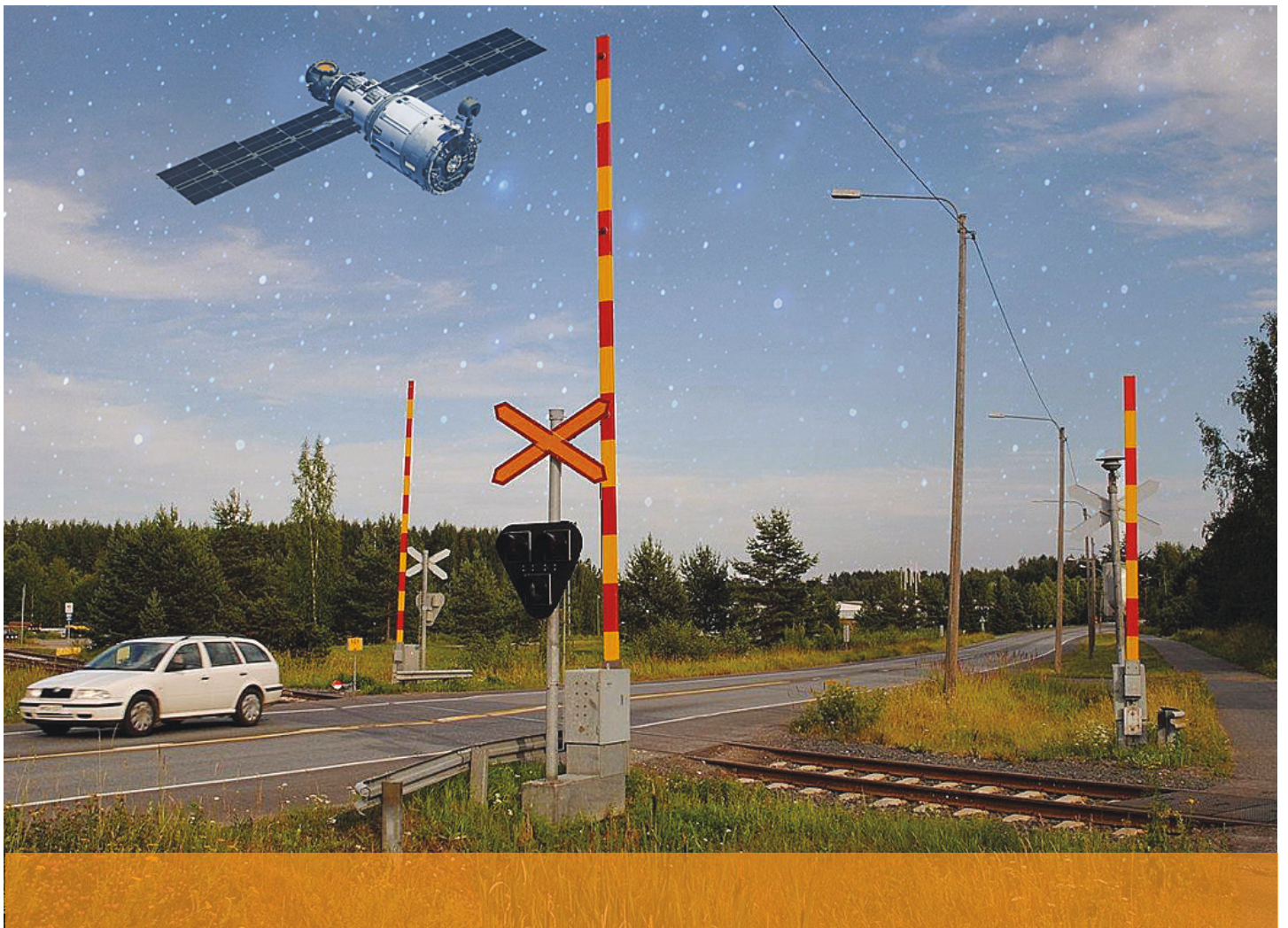


## Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen tasoristeysturvallisuuden parantamisessa





Toni Hytönen, Markku Koro, Pasi Kråknäs, Juuso Matikainen,  
Lassi Matikainen, Juha-Matti Pakka, Matias Tuohino

# Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen tasoristeysturvallisuuden parantamisessa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 34/2018

Liikennevirasto,  
Helsinki 2018

*Kannen kuva: Juhana Leinonen  
([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Level\\_crossing\\_Pirkanmaa.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Level_crossing_Pirkanmaa.jpg)), „Level crossing  
Pirkanmaa“, kuvanmuokkaaja Kristan Halls, Immaculate Innovations,  
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/legalcode>*

Verkkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-570-9

Liikennevirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelin 0295 34 3000

**Toni Hytönen, Markku Koro, Pasi Kråknäs, Juuso Matikainen, Lassi Matikainen, Juha-Matti Pakka ja Matias Tuohino: Satelliittipaikannuksen hyödyntäminen tasoristeysturvallisuuden parantamisessa.** Liikennevirasto, kunnossapito-osasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 34/2018. 69 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-570-9.

**Avainsanat:** tasoristeykset, turvallisuus, satelliittinavigaattorit, navigointilaitteet, varoituslaitteet, huomiovalolaitteet

## Tiivistelmä

Tämän selvityksen tavoitteena on tutkia satelliittipaikannuksen mahdollisuuksia tasoristeysturvallisuuden parantamisessa.

Selvitys on koostettu hyödyntämällä koti- ja ulkomaisia kirjallisuuslähteitä jo toteutetuista kehitysprojekteista, ulkomaisille rataverkon haltijoille osoitetuista kyselyistä saadulla aineistolla ja saksalaisen DB Netz AG:n luona Frankfurt am Mainissa toteutetulla vierailulla. Selvityksessä on hyödynnetty VR Track Oy:n pitkältä ajalta kertynyttä laaja-alaista osaamista tasoristeysturvallisuudesta, tasoristeysvaroituslaitoksista ja satelliittinavigoinnin hyödyntämisestä liiketoiminnassa.

Valta-asemassa olevat satelliittipaikannusjärjestelmät, USA:n GPS ja Venäjän Glonass, ovat täysin kyseisten valtioiden puolustusviranomaisten hallinnassa. Uusi eurooppalainen Galileo-satelliittijärjestelmä on täysin siviilikäyttöön rakennettu ja ylläpidetty satelliittipaikannusjärjestelmä. Sen tarjoama julkisesti säännelty palvelu mahdollistaa paikannuksen myös mahdollisissa signaalien häirintä- ja harhautustilanteissa.

Pääosalla Suomen rataverkkoa satelliittipaikannus onnistuu hyvin, mutta on olemassa kohteita, joissa satelliittipaikannuksen tarkkuus ja luotettavuus heikkenevät. Siksi satelliittipaikannusta ei voi suositella ainoaksi paikannusmetodiksi. Satelliittipaikannusta on tuettava ja täydennettävä muilla tekniikoilla, joita on kehitetty esimerkiksi matkapuhelimien paikannustarkkuuden ja luotettavuuden parantamiseksi. Eri paikannusmetodeja yhdistämällä voidaan paikannussignaalin ja paikannuksen tarkkuutta erilaisissa vaihtelevissa olosuhteissa parantaa. Siltikään ei voida puhua täydellisen luotettavan paikannuksen onnistumisesta kaikissa olosuhteissa. Nykyisillä satelliittipaikannusratkaisuilla ei saada toteutettua voimassa olevia turvallisuusvaatimuksia täyttäviä tasoristeysturvalaitoksia. Mikäli rautatieturvalaitteiden turvallisuutta ja yhteentoimivuutta koskevat kansainväliset normit ja eurooppalainen sääntely muuttuvat tulevaisuudessa, norminannosta johtuvat esteet tämän tekniikan käyttöön voivat madaltua.

Koska junanpaikannuksen osuus tasoristeysten turvalaitoksen kustannuksista nykytekniikalla on vain noin 20 %, satelliittipaikannuksen taloudelliset hyödyt perinteisen laitetekniikan kannalta eivät ole nykyisillä mahdollisilla ratkaisuilla merkittäviä. Todellisten hyötyjen saavuttaminen vaatii kokonaan uusia teknisiä ratkaisuja, kuten esimerkiksi mobiilialustoilla käytettävien navigointijärjestelmien osana toimivia varoitusjärjestelmiä. Järjestelmien avulla voidaan varoittaa suoraan ajoneuvon kuljettajaa tasoristeystä lähestyvistä junista tai pelkästään tasoristeysten lähestymisestä. Tätä kehitystä edistetään mm. Saksassa, ja Suomessa tulee seurata sitä.

**Toni Hytönen, Markku Koro, Pasi Kråknäs, Juuso Matikainen, Lassi Matikainen, Juha-Matti Pakka och Matias Tuohino: Utnyttjande av satellitbaserad positionsbestämning för att förbättra säkerheten i plankorsningar.** Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 34/2018. 69 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-570-9.

## Sammanfattning

Syftet med denna utredning är att studera möjligheter att med satellitbaserad positionsbestämning förbättra säkerheten i plankorsningar.

Utredningen är sammanställd genom att utnyttja inhemska och utländska litteraturkällor om redan genomförda utvecklingsprojekt, material erhållet genom enkäter ställda till utländska innehavare av bannät och ett besök hos tyska DB Netz AG i Frankfurt am Main. I utredningen har man utnyttjat VR Track Oy:s under lång tid ackumulerade omfattande kunskap om säkerhet i plankorsningar, varningssystem för plankorsningar och utnyttjande av satellitnavigering i affärsverksamhet.

De dominerande systemen för satellitbaserad positionsbestämning, USA:s GPS och Rysslands Glonass, kontrolleras helt av ifrågavarande staters militära myndigheter. Det nya europeiska satellitsystemet Galileo är ett system för satellitbaserad positionsbestämning helt konstruerat och underhållet för civilt bruk. Den tjänst som det erbjuder är offentligt reglerad och gör positionsbestämning möjlig också i situationer med eventuell signalstörning och vilseledande signaler.

På största delen av Finlands bannät fungerar satellitbaserad positionering bra, men det finns ställen, där den satellitbaserade positioneringens exakthet och tillförlitlighet försvagas. Därför kan inte satellitbaserad positionering rekommenderas som enda metod för positionering. Den satellitbaserade positioneringen måste stödjas och kompletteras med andra tekniker, som har utvecklats till exempel för att förbättra exaktheten och tillförlitligheten i positioneringen av mobiltelefoner. Genom att kombinera olika positioneringsmetoder kan positioneringssignalens och positioneringens exakthet förbättras under olika varierande förhållanden. Trots detta kan man inte tala om fullständigt tillförlitlig positionering under alla tänkbara förhållanden. Med nuvarande lösningar för satellitbaserad positionering kan man inte förverkliga säkerhetssystem för plankorsningar som uppfyller gällande säkerhetskrav. Om de internationella normerna för och de europeiska bestämmelserna om säkerhet och kompatibilitet hos säkerhetsutrustning för järnvägar ändras i framtiden, kan tröskeln som beror på normerna och som hindrar användningen av denna teknik sänkas.

Eftersom tågpositioneringens andel av kostnaderna för säkerhetsutrustningen vid plankorsningen med nuvarande teknik är bara cirka 20 %, skulle den ekonomiska nyttan av satellitbaserad positionering visavi den traditionella utrustningstekniken inte vara betydande med nuvarande möjliga lösningar. För att uppnå verklig nytta krävs det helt nya tekniska lösningar, som exempelvis navigationssystem på mobilplattformar som en del av fungerande varningssystem. Med hjälp av systemen kan fordonsförare direkt varnas för tåg som närmar sig plankorsningen eller helt enkelt för att föraren nalkas en plankorsning. Den här utvecklingen drivs på bl.a. i Tyskland, och i Finland borde man följa den.

**Toni Hytönen, Markku Koro, Pasi Kråknäs, Juuso Matikainen, Lassi Matikainen, Juha-Matti Pakka and Matias Tuohino: Use of satellite navigation to improve safety at level crossings.** Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 34/2018. 69 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-570-9.

## Summary

The objective of this study was to investigate the possibilities of improving safety at level crossings by means of satellite navigation.

The study was based on Finnish and foreign reports on previous development projects, answers to surveys conducted among foreign railway infrastructure managers and a visit to DB Netz AG in Frankfurt am Main in Germany. The researchers also made use of VR Track Ltd's long and extensive experience of level crossing safety, level crossing warning systems and the use of satellite navigation in business.

The two leading satellite navigation systems – the American GPS and the Russian GLONASS – are fully controlled by the defence authorities of their respective governments. The new European Galileo satellite navigation system is designed specifically for civilian use. Its Public Regulated Service also enables tracking in the event of signal failure or interference.

Satellite navigation works well across most of the Finnish railway network, but there are areas where the accuracy and reliability of satellite navigation are not as good. This is why satellite navigation cannot be recommended as the only tracking solution. It must be supported and complemented by other technologies, such as those developed to improve the accuracy and reliability of mobile telephone tracking. The accuracy of tracking and tracking signals in varying conditions can be improved by combining different tracking methods. However, fully reliable tracking is still not possible in all circumstances. The satellite navigation systems available at the moment are inadequate for building level crossing warning systems that satisfy current safety requirements. Changes to international standards and European regulation on the reliability and compatibility of railway safety devices may lower the regulatory barriers to using this technology in the future.

As train tracking currently only accounts for approximately 20% of the costs of level crossing safety systems, current satellite navigation solutions do not bring significant economic benefits compared to conventional devices. Achieving real benefits requires completely new technological solutions, such as warning systems that are linked to mobile navigation applications. These kinds of systems can be used to warn road users about trains approaching a level crossing or just the fact that there is a level crossing ahead. Scientists in Germany, for example, are working on this kind of technology, and Finland should follow their progress.

## Esipuhe

Liikennevirasto tilasi tämän tutkimuksen VR Track Oy Suunnittelulta, jotta selvitys osaltaan vastaisi liikenne- ja viestintäministeriön joulukuussa 2017 valmistuneen "Satelliittinavigointijärjestelmien tehokas hyödyntäminen Suomessa. Toimenpideohjelma 2017–2020"-julkaisun esittämiin toimenpiteisiin. Satelliittinavigoinnin toimenpideohjelmassa esitettiin 17 konkreettista toimenpidettä, joilla pyritään edistämään satelliittijärjestelmien hyödyntämistä Suomessa. Tämä selvitys koskee rautateille osoitettua toimenpidettä: "Laaditaan selvitys satelliittipaikannuksen hyödyntämisen mahdollisuuksista tasoristeysonnettomuuksia ehkäisevänä tekijänä. Toimista vastaavat Liikennevirasto ja Trafi." Toimenpideohjelma on osa pääministeri Juha Sipilän hallitusohjelman kärkihanketta: "Rakennetaan digitaalisen liiketoiminnan kasvuympäristö."

Tutkimuksen tekemiseen osallistuivat VR Track Oy Suunnittelussa Toni Hytönen, Markku Koro, Pasi Kråknäs, Juuso Matikainen, Juha-Matti Pakka ja Matias Tuohino. Raportin esitarkasti Lassi Matikainen.

Projektin ohjausryhmään kuuluivat Aki Härkönen Liikennevirastosta ja Tomi Anttila Liikenteen turvallisuusvirasto Trafista sekä neuvotteleva virkamies Janne Hauta liikenne- ja viestintäministeriöstä.

Helsingissä toukokuussa 2018

Liikennevirasto  
Kunnossapito-osasto



# Sisällys

LYHENTEET JA KÄSITTEET .....	9
KUVALUETTELO .....	12
1 JOHDANTO .....	13
2 TEKNIKOIDEN PERUSTEISTA .....	14
2.1 Satelliittipaikannus.....	14
2.1.1 Historiallinen tausta .....	14
2.1.2 Galileo-palvelut .....	15
2.1.3 Satelliittipaikannusjärjestelmien nykytila.....	16
2.1.4 Satelliittipaikannuksen toimintaperiaate.....	17
2.1.5 Satelliittipaikannusjärjestelmien tarkkuus .....	18
2.1.6 Satelliittipaikannuksen tarkkuuden parantaminen .....	18
2.1.7 Satelliittipaikannusta haittaavat tekijät .....	19
2.1.8 Tiedonsiirto .....	19
2.2 Tasoristeysten varoituslaitokset .....	20
2.2.1 Varoituslaitostyyppin valinta .....	21
2.2.2 Varoituslaitoksen toiminta .....	21
2.2.3 Tasoristeysturvallisuuden parantamisen kustannuksia .....	22
2.3 Tasoristeystilastoja Suomesta ja Euroopasta.....	22
2.3.1 Tasoristeysturvallisuuden taso Suomessa.....	23
3 SATELLIITTIPAIKANNUS RAUTATEIDEN TURVALAITTEISSA .....	26
3.1 Satelliittitietojen hyödyntäminen tasoristeyssovelluksissa .....	26
3.1.1 ESA, LeCross .....	26
3.1.2 CGI, SAT-LX .....	29
3.1.3 Berner & Mattner, SafeRail.....	30
3.1.4 Cautio Oy:n huomio- ja tasoristeysvalolaitos.....	33
3.1.5 VTT, autossa toimiva junavaroitusjärjestelmä Junavaro .....	36
3.1.6 UIC, SAFER-LC .....	39
3.2 Satelliittitietojen hyödyntäminen liikenteenohjauksessa tai - paikantamisessa.....	39
3.2.1 Alstom, LOCOPROL .....	39
3.2.2 Saksan ilmailu- ja avaruuskeskus (DLR), junien törmäyksen estojärjestelmä (RCAS).....	41
3.2.3 Ansaldo STS, juniin integroitu satelliittiturvallisuusjärjestelmä ja avaruuspohjaiset palvelut rautateiden opastinjärjestelmille.....	44
3.3 Ulkomaisten rautatietoimijoiden käyttämät ratkaisut .....	45
3.3.1 Saksa (Deutsche Bahn, DB) .....	45
3.3.2 Tanska (Banedanmark) .....	46
3.3.3 Japani (JR East) .....	46
3.3.4 Alankomaat (ProRail) .....	47
3.3.5 Australia (Sydney Trains).....	48
3.3.6 Yhdysvallat (Xorail) .....	48
3.4 ETCS ja tasoristeykset.....	49
4 MUUT TEKNOLOGIAT JA RATKAISUT .....	50
4.1 Mobiilit navigointilaitteet ja -sovellukset .....	50
4.1.1 NordicWay ja tasoristeykset .....	51

4.2	Autossa olevien navigointijärjestelmien hyödyntäminen.....	53
4.3	Radanvarren kuituoptiset anturit.....	54
4.4	Muut kevyet ratkaisut.....	55
5	TURVALLISUUSTARKASTELU .....	56
5.1	Rautatiejärjestelmän turvallisuusperiaatteet.....	56
5.1.1	Yleinen periaate turvallisuuden kehittämiseksi ja parantamiseksi .....	56
5.1.2	Yhteiset turvallisuusmenetelmät.....	56
5.1.3	Turvallisuusjohtamisjärjestelmä .....	56
5.1.4	Riskien arviointi.....	57
5.1.5	Rautatieturvalaitteisiin liittyvät standardit.....	57
5.1.6	Tieliikennelaki.....	58
5.1.7	Ankara vastuu ja raideliikennevastuulaki .....	58
5.1.8	SIL-luokitus .....	58
5.2	Häiriölähteet ja tietoturva paikannuksessa .....	60
5.2.1	GNSS ja häiriölähteet.....	60
5.2.2	Muiden paikannusmenetelmien tietoturvallisuus ja yksityisyys.....	61
5.2.3	Paikannuksen turvallisuuden ja yksityisyyden turvaaminen .....	61
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	63
	LÄHDELUETTELO .....	65

## Lyhenteet ja käsitteet

AIS	merenkulussa alusten tunnistamiseen ja sijainnin määrittämiseen käytetty järjestelmä (engl. Automatic Identification System)
ATACS	automaattinen junien hallinta- ja viestintäjärjestelmä (engl. Automatic Train Administration and Communication System)
Beidou	Kiinan kansantasavallan navigaatiosatelliittijärjestelmä (kiin. 北斗卫星导航系统)
C-ITS	yhteentoimivat älykkäät liikennejärjestelmät (engl. Cooperative Intelligent Transport Systems)
COSPAS-SARSAT	maailmanlaajuinen satelliittien välityskapasiteettia käyttävä meripelastuksen organisaatio (COSPAS ven. Космическая Система Поиска Аварийных Судов, SARSAT engl. Search And Rescue Satellite-Aided Tracking)
DGNSS	differentiaalikorjaus (engl. Differential GNSS)
EGNOS	eurooppalainen satelliittipaikannusjärjestelmän tarkkuutta parantava palvelu (engl. European Geostationary Navigation Overlay Service)
ERTMS	eurooppalainen rautatieliikenteen hallintajärjestelmä (engl. European Rail Traffic Management System)
ETCS	eurooppalainen junien kulunvalvonta (engl. European Train Control System)
DLR	Saksan ilmailu- ja avaruuskeskus (saks. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
FOC	Galileo-järjestelmän täyden toiminnan vaihe (engl. Full Operational Capability)
Galileo	eurooppalainen kehitteillä oleva satelliittipaikannusjärjestelmä
Glonass	Venäjän puolustusministeriön satelliittipaikannusjärjestelmä (ven. ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система, ГЛОНАСС)
GMDSS	maailmanlaajuinen merenkulun hätä- ja turvallisuusradiojärjestelmä (engl. Global Maritime Distress Safety System)

GNSS	yleistermi maailmanlaajuiselle satelliittinavigointijärjestelmälle (engl. Global Navigation Satellite System)
GPS	maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä, Yhdysvaltain puolustusministeriön satelliittipaikannusjärjestelmä, (engl. Global Positioning System)
GSM-R	rautatiekäyttöön tarkoitettu matkapuhelintaajuusalue (engl. Global System for Mobile communications – Railway)
IOC	Galileo-järjestelmän ensimmäinen vaihe (engl. Initial Operational Capability)
IoT	esineiden internet (engl. Internet of Things)
Kupla-pääte	veturinkuljettajan päätelaite
LCOS	SafeRail-palvelukonseptin tasoristeysten operaatio-palvelu (engl. Level Crossing Operations Service)
LOCOPROL	Alstom Transportin, ja sen yhteistyökumppaneiden, toteuttama ja Euroopan komission tukema hanke (engl. Low Cost satellite based train location system for signaling and train Protection for low density traffic railway lines)
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
M2M	laitteiden välinen viestintä (engl. Machine-to-Machine)
NBI	tahattomista signaalilähteistä lähtevät kapeakaistaiset häiriösignaalit (engl. Narrow Band Interference)
OS	Galileon avoin palvelu (engl. Open Service)
OS-NMA	Galileo-ohjelman sisältämä avoimen palvelun todentamisominaisuus (engl. Open Service Navigation Message Authentication)
PoC	soveltuvuus selvitys (engl. Proof of Concept)
PRS	Galileo-järjestelmän julkisesti säännelty palvelu, (engl. Public Regulated Service)
PTC	yhdysvaltalainen junien kulunvalvontajärjestelmä (engl. Positive Train Control)
RIMS	satelliittipaikannusjärjestelmän tarkkuutta parantavan palvelun tarkasti mitattu ja sijoitettu maa-asema, (engl. Ranging and Integrity Monitoring Station)

RCAS	junien törmäksenestojärjestelmä (engl. Railway Collision Avoidance System)
SAR	kansainvälinen satelliittiperusteinen hätäsignaalien perusteella tapahtuva etsintä- ja pelastuspalvelu (engl. Search and Rescue)
SIL	turvallisuuden eheystaso (engl. Safety Integrity Level)
TETRA	viranomaisille suunnattu digitaalinen puheradioverkko (engl. Terrestrial Trunked Radio)
TCIS	lentoliikenteessä käytetty törmäksenestojärjestelmä (engl. Traffic Collision Avoidance System)
UIC	Kansainvälinen rautatieliitto (ransk. Union Internationale des Chemins de fer)
VHF	radiotaajuusalue 30–300 MHz (engl. Very High Frequency)
Virve	Suomen maanlaajuinen viranomaisradioverkko
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy (ent. Valtion teknillinen tutkimuskeskus)

## Kuvaluettelo

Kuva 1	Galileon käyttöönoton suunniteltu aikataulu (Lehtilä 2018) .....	15
Kuva 2	Satelliittipaikannuksen toimintaperiaate .....	17
Kuva 3	Tasoristeysten määrä ja jakautuminen EU:n alueella (ERAIL 2016) ..	22
Kuva 4	Tasoristeysten suhteellinen määrä 100 ratakilometriä kohden (ERAIL 2016) .....	23
Kuva 5	Kuolemaan johtaneiden tasoristeystonnettomuuksien syitä (Laapotti 2016) .....	24
Kuva 6	LeCross-palvelukonseptin toiminnot, muokattu lähteestä (Virtanen & Iqbal 2014) .....	27
Kuva 7	LeCross/SAT-LX-järjestelmän vuokaavio, muokattu lähteestä (Virtanen & Iqbal 2014) .....	29
Kuva 8	Junan lähestymispisteet tasoristeykseen nähden SafeRail- järjestelmässä, muokattu lähteestä (Schramm & Weimer 2014) .....	31
Kuva 9	SafeRail LCOS-palvelun toiminnot ja rajapinnat, muokattu lähteestä (Schramm & Weimer 2014) .....	32
Kuva 10	Huomiovalolaitoksen toimintaperiaate .....	33
Kuva 11	Autossa toimivan junavaroitussjärjestelmän toimintaperiaate (Öörni 2014) .....	36
Kuva 12	Junavaro-palvelun sekvenssidiagrammi, muokattu lähteestä (Öörni et al., 2011) .....	37
Kuva 13	LOCOPROL-järjestelmän satelliittiparien paikannusperiaate (Libbrecht & Stuesson 2005) .....	40
Kuva 14	RCAS-junalaitteen lohkoakaavio, muokattu lähteestä (Strang, et al. 2006) .....	43
Kuva 15	Kuvakaappaus VR Track Oy:n Tutka-sovelluksesta .....	51
Kuva 16	NordicWay-palvelukonsepti ja tasoristeystietojen integraatio, muokattu lähteestä (Liikennevirasto 2018) .....	52

# 1 Johdanto

Liikenne- ja viestintäministeriö LVM julkaisi vuoden 2017 lopulla satelliittinavigoinnin kansallisen toimenpideohjelman, jonka tavoitteena on nostaa Suomi yhdeksi satelliittijärjestelmien hyödyntämisen kärkimaaksi. Tämä selvitys koskee yhtä toimenpideohjelman seitsemästätoista toimenpide-ehdotuksesta, jonka tavoitteena on parantaa Suomen rataverkon tasoristeysturvallisuutta. Suomen rataverkolla on 2435 tasoristeystä, joista 1838 on ilman minkäänlaista varoituslaitosta (Liikennevirasto 2017). Tasoristeyskiä poistetaan vähitellen, ja lisäksi joihinkin tasoristeyskiin rakennetaan varoituslaitoksia vuosittain, mutta määrät ovat vähäisiä toimenpiteiden korkeiden kustannusten vuoksi. Näin ollen uudelle kustannustehokkaalle ratkaisulle tasoristeysten turvallisuuden parantamiseen olisi suuri tarve.

Satelliittipaikannusta on perinteisesti hyödynnetty erilaisten kohteiden paikanmäärittämiseen. Tämän lisäksi paikannussatelliittien signaaleja on pystytty hyödyntämään myös viestiliikenteessä. Satelliittipaikannukseen liittyvät markkinat ovat kasvaneet voimakkaasti ja kasvavat edelleen tulevaisuudessa.

Satelliittipaikannus on perinteisesti perustunut suurten sotilasvaltioiden ylläpitämiin järjestelmiin eli Yhdysvaltojen GPS ja Venäjän Glonass. Euroopan Unionin rakentama Galileo-paikannusjärjestelmä on ainoa maailmanlaajuinen siviilikäyttöön tarkoitettu satelliittipaikannusjärjestelmä, joka otettaneen käyttöön kokonaisuudessaan lähivuosien aikana. Galileo-järjestelmän kehittäminen on ollut pitkä ja kallis prosessi. LVM:n mukaan EU:n Galileo-ohjelman budjetti vuosina 2014–2020 on noin 7 miljardia euroa, josta Suomen rahoitusosuus on vuosittain 15 miljoonaa euroa. Jo ennen vuotta 2014 järjestelmän kehittämiseen on käytetty useita miljardeja euroja. On itsestään selvää, että järjestelmän kehittämisessä ja maksamisessa mukana olevat EU:n jäsenmaat haluavat saada rahoilleen myös vastinetta. Galileo-järjestelmästä on tarkoitus tulla merkittävästi aiempia satelliittipaikannusjärjestelmiä tarkempi ja toimintavarmempi, jolloin sitä voidaan mahdollisesti käyttää myös sellaisiin tarkoituksiin, joissa satelliittitietojen käyttäminen ei ole aikaisemmin ollut mahdollista. Tästä syystä LVM on Suomessakin käynnistänyt toimenpideohjelman, jonka tavoitteena on satelliittinavigointijärjestelmien tehokkaampi hyödyntäminen myös Suomessa.

Selvitystyön rakenne on seuraava: luvussa 2 käsitellään lyhyesti satelliittipaikannusjärjestelmien toimintaperiaatetta, tasoristeysten tekniikkaa ja tasoristeystilastoja. Luku 3 käsittelee satelliittipaikannusta rautatiesovelluksissa hyödyntäneitä tutkimus- ja kehityshankkeita maailmalta ja Suomesta. Luku 4 käsittelee innovatiivisempia ratkaisuja ja muita teknologioita tasoristeysten turvalaitetekniikassa. Luku 5 esitetään turvallisuustarkastelu ja riskienarviointi koskien uusien teknologioiden ja etenkin satelliittipaikannuksen käyttöönottoa tasoristeysten varoitusjärjestelmissä. Luku 6 sisältää työn johtopäätökset ja ehdotukset jatkotutkimukselle.

## 2 Tekniikoiden perusteista

### 2.1 Satelliittipaikannus

#### 2.1.1 Historiallinen tausta

Satelliittipaikannus eli GNSS (engl. Global Navigation Satellite System) on saanut alkunsa, kun tiedemiehet pystyivät seuraamaan Neuvostoliiton 4.10.1957 avaruuteen lähettämää ensimmäistä maata kiertävää Sputnik-satelliittia. Satelliitin lähettämien radiosignaalien perusteella voitiin mitata Doppler-siirtymä satelliitin radiosignaalisissa ja määrittää lähettimen (satelliitin) sijainti. Tämän jälkeen Yhdysvaltojen merivoimat alkoivat kehittää omaa satelliittipaikannusjärjestelmäänsä 1960-luvun puolivälissä. 1970-luvun alkupuolella Yhdysvaltojen puolustusministeriö halusi turvata toimintavarmen satelliittipaikannusjärjestelmän kehittämisen ja rakentamisen. Ensimmäiset Navstar-satelliitit laukaistiin 1978. Täysi 24 satelliitin konstellaatio oli valmis 1983. Tämän voidaan sanoa olleen ensimmäisen käyttökelpoisen maailmanlaajuisen satelliittipohjaisen paikannusjärjestelmän, GPS:n (engl. Global Positioning System), alku. GPS-järjestelmä oli täysin valmis 1994. GPS-satelliittipaikannusjärjestelmä on toiminut moitteettomasti siitä lähtien. (NASA 2018)

Neuvostoliiton vastaava satelliittipaikannusjärjestelmä on saanut alkunsa samoin Sputnik-satelliitin aikoina. Maailmanlaajuisen satelliittipaikannusjärjestelmän, Glonass, kehittäminen käynnistyi 1960-luvulla. Päätös Glonass-satelliittipaikannusjärjestelmän rakentamisesta tehtiin kuitenkin vasta 1976, ja ensimmäinen satelliitti laukaistiin 1982. Ennen Neuvostoliiton hajoamista 1991 oli avaruuteen lähetetty 43 Glonass-satelliittia. Glonass-paikannusjärjestelmän julistettiin olevan täysin valmis 1995. 1990-luvun loppupuolella Glonass-kampanja kärsi kuitenkin rahoituksen puutteesta, ja sen vuoksi toimivien satelliittien määrä konstellaatiossa laski rajusti. Vuonna 2002 konstellaatiossa oli enää vain seitsemän toimivaa satelliittia. Tuolloin järjestelmää ei voinut yksistään käyttää paikantamiseen. Tilanne kuitenkin parani vuonna 2002 julkaistun uuden toimenpideohjelman myötä, jossa rahoitus ja järjestelmän tekninen modernisointi turvattiin vuoteen 2011 saakka. Tämän jälkeen satelliittien määrä konstellaatiossa saatiin nostettua, ja järjestelmän on toiminut sen jälkeen moitteettomasti. (Information and analysis center for positioning 2018)

Galileo-satelliittipaikannusjärjestelmän nimi esiintyi ensimmäisen kerran Euroopan komission asiakirjoissa 1999. Varsinainen kehitystyö alkoi vuonna 2003. Siitä lähtien järjestelmä on ollut kehityksen ja rakentamisen kohteena. Alkuperäinen aikataulu on venynyt useaan otteeseen, vaikka ensimmäiset testisatelliitit lähetettiin avaruuteen jo vuonna 2005. Vuodesta 2016 lähtien Galileo-järjestelmän ensimmäinen vaihe eli IOC-vaihe on ollut toimintakunnossa ja käytettävissä. Tällä hetkellä taivaalla on 15 toimivaa satelliittia. Täysin valmiin eli FOC-vaiheen Galileo-satelliittipaikannusjärjestelmän on arvioitu olevan vuonna 2020. Palvelut tulevat asteittain voimaan ja kaikkien palveluiden on tarkoitus olla käytössä vuoden 2021 loppuun mennessä. Valmistuessaan Galileo-järjestelmä on ensimmäinen maailmanlaajuinen siviilikäyttäjien rakentama ja ylläpitämä satelliittipaikannusjärjestelmä. (Euroopan komissio 2018)



### 2.1.2 Galileo-palvelut

Galileo-järjestelmä tarjoaa käyttäjille useita eri palveluita maailmanlaajuisesti.

- Galileon avoin palvelu (engl. Open Service) on täysimääräisesti käytössä vuonna 2020. Galileo-ohjelma sisällyttää avoimeen palveluun todentamisominaisuuden, OS-NMA, jonka avulla käyttäjä voi varmistua, että avoimen palvelun navigointisignaali todella on peräisin Galileo-satelliiteista. Todentaminen vähentää mahdollisuutta tahallisesti harhauttaa satelliittipaikannusvastaanotin näyttämään virheellistä aika- tai paikannustietoa. Todennus tulee käyttöön vuonna 2018, ja se on kaikille avoin ja maksuton.
- Kaupallinen palvelu (engl. Commercial Service) tukee ammatti- tai kaupalliseen käyttöön kehitettäviä sovelluksia, jotka tarjoavat avointa palvelua parempaa ja tarkempaa paikannusta. Kaupallinen palvelu tulee myös asteittain voimaan kuvan 1 aikataulun mukaisesti. Kaupallinen palvelu tarjoaa kaksi merkittävää parannusta verrattuna avoimeen palveluun:
  - Tarkempi maantieteellinen paikanmääritys, CS HA
  - Tehokkaampi todentamiskapasiteetti, "todennettu CS"
- PRS on julkisesti säännelty palvelu. Se on varattu yksinomaan julkishallinnon valtuuttamille käyttäjille. Palvelussa tarjotaan vahvasti salattuja signaaleja sovelluksille, jotka edellyttävät palvelun jatkuvuutta normaalioloissa ja niiden häiriötilanteissa sekä poikkeusoloissa. Palvelu on salattu ja suunniteltu toimimaan luotettavasti häirintä- ja harhauttamisy yrityksistä huolimatta. Palveluun kuuluu häiriöitä suodattavia ratkaisuja, joita koskevat tekniset yksityiskohdat pidetään salassa. Palvelun käyttö edellyttää, että vastaanotin kykenee tulkitsemaan salatun signaalin.
- Galileo SAR on kansainvälinen satelliittiperusteinen hätäsignaalien perusteella tapahtuva etsintä- ja pelastuspalvelu. Galileo SAR on osa kansainvälistä COSPAS-SARSAT-meripelastusorganisaatiota, joka on osa globaalia GMDSS-järjestelmää.

2016	2017	2018	2019	2020	2021
Alustava palvelu avattu		Palvelun parantaminen		FOC	

Kuva 1 Galileon käyttöönoton suunniteltu aikataulu (Lehtilä 2018).

### 2.1.2.1 Galileo PRS

Palvelun saatavuutta ohjaavat Euroopan unionin tasolla määritellyt viranomaiset. Laitteiden jakelusta vastaavat EU:n jäsenvaltioiden viranomaiset. Kansallisesti LVM päättää niistä käyttäjäryhmistä, joilla on oikeus käyttää PRS-palvelua. Käyttöoikeudet myöntää kansallinen PRS-viranomainen, joka Suomessa on Viestintävirasto. Kansallinen PRS-viranomaisen vastuukenttään kuuluvat myös PRS-laitteiden hallinnon ja valvonnan järjestäminen, järjestelmän avaimistohallinto sekä vientivalvonta kotimaisen teollisuuden osalta

Galileon PRS-palvelun toteutusmallia mietitään paraikaa käynnissä olevassa valtioneuvoston periaatepäätöstyössä LVM/601/03/2017. Kirjoitushetkellä ei ole tiedossa periaatepäätöstyön lopputulosta. Sisällöstä kuitenkin tiedetään, että siinä otetaan kantaa rautatieliikenteeseen liittyviin asioihin. Ei ole poissuljettua, että rautatieliikenteen turvallisuutta voitaisiin parantaa PRS-palvelun tarjoaman lisävarmuuden kautta. Kirjoitushetkellä periaatepäätöstyön tekstin laatiminen on käynnissä periaatepäätöstyöryhmässä. Käyttäjäryhmien kartoittamiseksi on tarkoitus pitää kesäkuun 2108 aikana työpaja, jonka tulokset siirretään osaksi liikenne- ja viestintäministeriön päätöstä PRS-käyttäjäryhmistä. Periaatepäätöstyön on tarkoitus valmistua syyskuussa 2018. Periaatepäätöstyön sisältö on luonnosvaiheessa, ja palvelun rahoitusmallista sekä teknisen toteutuksen rakenteesta vallitsee yhteisymmärrys. Periaatepäätöstyössä otetaan kantaa myös rautatieliikenteen turvallisuutta parantaviin asioihin PRS-teknologiaa hyödyntäen. Liikennevirasto on ottanut rautatieliikenteen tarpeet esiin karkealla tasolla syksyllä 2017 operointia ratkovassa työryhmässä Kaisu Heikosen pitämässä esityksessä. (Hänninen 2018)

Salatun PRS-palvelun hyödyntäminen vaatii salauksen purkavan avaimen käyttömahdollisuuden. Tutkinnan alla on useita vaihtoehtoisia malleja siitä, miten näitä avaimia hallitaan ja jaetaan siinä vaiheessa, kun palvelu saadaan operatiiviseen käyttöön. Tämä tapahtunee noin 2021. Toistaiseksi PRS-vastaanottimia on saatavana ainoastaan testikäyttöön. Todennäköistä on, että palvelun käynnistyttyä Viestintävirastolla tulee olemaan käytössä tietty määrä erityisiä PRS-vastaanottimia ja toisaalta näiden rinnalla muita päätelaitteita, jotka sisältävät PRS-palvelun hyödyntämismahdollisuuden. Kuten sanottu, Viestintävirasto vasta tutkii vaihtoehtoisia tekniikoita, jotta erilaisiin käyttötarkoituksiin saataisiin mahdollisimman tarkoituksenmukainen ratkaisu. Näyttää siltä, että käyttöön tulevat vastaanottimet pystyvät vastaanottamaan Galileo-signaalien (OS, CS ja PRS) lisäksi ainakin GPS-signaaleja, mutta todennäköisesti myös Glonass- ja Beidou-signaaleja. Tällaisia laitteita kutsutaan multikonstellaatiiovastaanottimiksi.

Mainittu valtioneuvoston PRS-periaatepäätöstyö valmistuu suunnitelmien mukaan ennen kesälomakautta 2018. (Kesäläinen 2018)

### 2.1.3 Satelliittipaikannusjärjestelmien nykytila

Satelliittipaikannusjärjestelmistä ovat tällä hetkellä täysimääräisesti toiminnassa Yhdysvaltojen GPS ja Venäjän Glonass. Järjestelmiä myös kehitetään ja parannetaan jatkuvasti. Satelliittisignaaleita lisätään, satelliittien lähetystehoa nostetaan ja ohjaussegmenttiä nykyaikaistetaan. Toimenpiteillä saavutetaan parempi luotettavuus ja signaalin läpäisykyky eli luotettavampi paikannustulos peitteisemmissä olosuhteissa. (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing 2018; Information and analysis center for positioning 2018)

Eurooppalaisen Galileo-paikannusjärjestelmän ensimmäinen eli IOC-vaihe on käytössä, mutta se ei sisällä vielä kaikkia järjestelmään suunniteltuja palveluita. Järjestelmän oletetaan olevan täydessä toiminnassa eli FOC-vaiheessa vuonna 2020. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2018)

Myös muita satelliittipaikannusjärjestelmiä on kehitetty tai on kehitteillä. Kiinalainen Beidou-järjestelmä on toiminnassa Kiinassa ja lähialueilla. Intia sekä Japani ovat kehittämässä omia paikallisia satelliittipaikannusjärjestelmiään. (Information and analysis center for positioning, navigation and timing 2018; Indian Space Research Organisation 2018; Cabinet Office 2018)

Yhteisellä nimellä eri satelliittipaikannusjärjestelmiä kutsutaan lyhenteellä GNSS. Termillä satelliittipaikannus tai lyhenteellä GNSS tarkoitetaan jollain (tai useammalla) edellä mainittujen järjestelmien avulla tehtyjä havaintoja, joiden tarkoituksena on määrittää vastaanottimen paikka (Poutanen 1998).

#### 2.1.4 Satelliittipaikannuksen toimintaperiaate

Satelliittipaikannusjärjestelmät ovat kaikki rakennettu samojen yleisten periaatteiden mukaisesti. Järjestelmät koostuvat kolmesta segmentistä:

- Avaruussegmentti (engl. Space Segment) koostuu avaruudessa maata kiertävistä satelliiteista (tyypillisesti 20–30 kappaletta 3–6 ratatasolla jokaisessa satelliittijärjestelmässä), jotka muodostavat satelliittikonstellaation. Satelliitit lähettävät radiosignaaleja paikannustahyödyntäville laitteille.
- Valvontasegmentti (engl. Control Segment) koostuu maapallolla sijaitsevista valvonta-asetista, jotka jatkuvasti monitoroivat satelliittien liikkeitä, niiden lähettämiä radiosignaaleja ja suorituskykyä sekä lähettävät satelliiteille kommentoja, joiden avulla niiden liikkeitä ja radiolähetystyksiä ohjataan.
- Käyttäjäsegmentti (engl. User Segment) koostuu kaikista niistä laitteista, jotka vastaanottavat paikannussignaaleja satelliiteista.



Kuva 2

Satelliittipaikannuksen toimintaperiaate.

Satelliitit lähettävät jatkuvasti radiosignaalia, joka voidaan vastaanottaa tarkoituksenmukaisella satelliittipaikannusvastaanottimella. Vastaanotin mittaa aikaa, joka radiosignaalilta kului sen matkatessa avaruuden halki satelliitista vastaanottimeen. Perustapauksessa (navigointiratkaisu) vastaanottimen vastaanottaman signaalin oletetaan etenevän avaruudessa valonnopeudella. Kun vielä tiedetään lähetyshetkellä olleen satelliitin sijainti, voidaan neljän satelliitin havainnoista laskea vastaanottimen sijainti pseudo- tai vale-etäisyyden laskentakaavasta

$$p = \sqrt{(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2} + c(\Delta t - \Delta T),$$

missä

$X, Y, Z$  on vastaanottimen sijainti kolmiulotteisessa koordinaatistossa,

$x, y, z$  on satelliitin sijainti kiertoradalla (tunnettu, radiosignaalisessa mukana),

$c$  on valon nopeus,

$\Delta t$  on satelliitin kellovirhe (tunnettu, radiosignaalisessa mukana),

$\Delta T$  on vastaanottimen kellovirhe.

Kaavalla vastaanotin saa ratkaistua niin kutsutun vale-etäisyyden (engl. pseudorange) satelliitin ja vastaanottimen välille. Koska yhtälössä on neljä tuntematonta, vastaanottimen sijainti ( $XYZ$ ) ja vastaanottimen kellovirhe  $\Delta T$ , tarvitaan yhtälön ratkaisemiseksi yksiselitteisesti neljän yhtälön yhtälöryhmä eli havainnot neljästä satelliitista.

### 2.1.5 Satelliittipaikannusjärjestelmien tarkkuus

Satelliittipaikannuksen tarkkuuteen vaikuttavat useat eri tekijät. Osa vaikutuksesta tulee itse järjestelmästä, osa avaruudesta, osa paikannukseen käytettävästä vastaanottimesta ja antennista, osa käyttäjästä ja paikannuskohteen ympäristöolosuhteista. Eri tekijöistä johtuen on satelliittipaikannuksen eksaktia tarkkuutta vaikea todeta, koska tarkkuuteen vaikuttavat tekijät ovat kohteesta riippuvaisia. Esimerkiksi GPS-järjestelmän häiriöttömän paikannustarkkuuden luvataan olevan parempi kuin 7,8 metriä 95% todennäköisyydellä. Perussääntönä paikannustarkkuudelle voidaan kuitenkin pitää noin  $\pm 5$  metriä. (National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing 2018)

### 2.1.6 Satelliittipaikannuksen tarkkuuden parantaminen

Satelliittipaikannuksella on parhaimmillaan saavutettavissa jopa millimetritason tarkkuus. Tämä kuitenkin edellyttää pitkiä havaintoaikoja ja havaintojen jälkilaskentaa laskeakeskusolosuhteissa. Reaaliaikaisen satelliittipaikannuksen tarkkuutta voidaan parantaa erilaisilta tukiasemilta saatavien korjaussignaalien avulla tai satelliittien välittämien korjaussignaalien avulla. Käyttämällä hyväksi differentiaalitekniikkaa voidaan vastaanottimen paikannustarkkuutta parantaa  $\pm 1$  metrin tasolle tai jopa sen alle. Tukiaseman laskemat korjaukset voidaan välittää vastaanottimille erilaisina radiolähetyksinä tai internetin välityksellä. (ESA 2018; Trimble 2018)

EGNOS-palvelu tuottaa paikannuksen korjaustiedot 39 RIMS-aseman (tarkasti mitattu ja sijoitettu maa-asema, engl. Ranging and Integrity Monitoring Stations) havaintojen pohjalta. RIMS-asemat mittaavat ja laskevat paikannuksen korjaustietoja ja luotettavuusarvioita, ja tiedot välitetään kolmen geostationäärisen satelliitin (satelliitti pysyy maanpinnan suhteen paikallaan) kautta. Geostationääriset satelliitit näkyvät Suomessa matalilla korkeuskulmilla, mikä aiheuttaa haasteita korjauksen saatavuudessa.

Varsinkin maanpinnalla tapahtuva EGNOS-signaaleiden hyödyntäminen ei onnistu luotettavasti lainkaan, koska satelliitteihin ei saada näkyvyyttä. Esimerkiksi Suomen pohjois- ja koillisosissa riittävä määrä RIMS-asemia ei havaitse idästä nousevia satelliitteja lainkaan, jolloin korjaus ei kata niitä. Myös auringon aktiivisuus vaikuttaa korkeilla leveysasteilla häiritsevämmin paikannustarkkuuteen. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2018)

Suomen ainoa RIMS-asema sijaitsee tällä hetkellä Virolahdella, mutta Euroopan komissio on luvannut toteuttaa neljä uutta RIMS-asemaa, joista yksi tulisi Kuusamoon. Uusi asema parantaisi merkittävästi kokonaispaikannuksen luotettavuutta, etenkin jos se varustetaan uudella EGNOS V3 -teknologialla. Uusi teknologia olisi käytössä arviolta vuonna 2023–2025, ja sen uskotaan ratkaisevan Suomessa satelliittipaikantamiseen liittyvät tarkkuusongelmat. (Liikenne- ja viestintäministeriö 2018)

### **2.1.7 Satelliittipaikannusta häiättävät tekijät**

Satelliittisignaalien kulkuun avaruudessa ja saatavuuteen maanpinnalla vaikuttavat monet eri tekijät. Satelliittisignaali joutuu avaruudessa kulkiessaan alttiiksi mm. ionosfäärin ja troposfäärin vaikutuksille. Häiriöt avaruudessa, kuten esimerkiksi aurinkomyrskyt, aiheuttavat sen, että satelliitin signaali hidastuu ja aiheuttaa vastaanottimen paikannustarkkuuden heikkenemisen. Myös itse järjestelmässä tai vastaanottimessa olevat virheet aiheuttavat paikannustarkkuuden heikkenemistä. Esimerkkejä järjestelmien tai vastaanottimien virheistä ovat satelliittien ratatietovirheet, satelliittien keskinäinen virheellinen sijainti, kellovirheet satelliitissa tai vastaanottimessa, vastaanottimen kohina ja signaalin väärä lähetysteho.

Satelliittisignaalien havaitsemista häiättävät mm. korkeat rakennukset, metsäinen ympäristö ja tunnelit. Nämä saattavat estää satelliittien signaalien vastaanottamisen kokonaan, tai sitten signaali voi tulla vastaanottimeen heijastuneena esimerkiksi ikkunan tms. heijastavan pinnan kautta. Tätä kutsutaan monitieheijastukseksi. Näillä on erittäin suuri vaikutus paikannustarkkuuteen ja luotettavuuteen. Satelliittisignaalit voivat vääristyä myös voimakkaan sähkömagneettisen kentän vaikutuksesta. Esimerkiksi sähköistetty junarata voi aiheuttaa vastaanottimen paikannustarkkuuden ja -luotettavuuden heikkenemistä.

Lähes kaikkia virhelähteiden vaikutuksia voidaan minimoida erilaisilla vastaanottimien teknisillä ratkaisulla, kuten mm. algoritmeilla, antennielementtien suojauksella, differentiaali- eli DGNSS-korjaussignaaleilla (engl. Differential GNSS), mutta täysin niitä ei voida poistaa.

### **2.1.8 Tiedonsiirto**

Tiedonsiirron tarkoituksena on saada tietty sanoma välitettyä lähettäjältä vastaanottajalle viiveettömästi ja virheettömästi. Erilaisten korjaussignaalien välittäminen tukiasemilta vastaanottimille voidaan tehdä monella eri tavalla. Paikalliseen korjaussignaalien välittämiseen käytetään tyypillisesti UHF- tai VHF-radioita. Joskus vastaanottimet ovat GSM-verkkojen peittoalueen ulkopuolella, ja perinteinen radiotie on ainoa vaihtoehto. Tukiasemaverkkojen lähettämien korjaussignaalien tiedonsiirto tapahtuu tyypillisesti internetin välityksellä. Tällöin vastaanottimeen on kytkettävä myös internet-sovitin. Internet-sovitin muodostaa yhteyden 3G-, 4G- tai tulevaisuudessa 5G-mobiiliverkkoon, jonka kautta tiedonsiirto tapahtuu. Eri operaattoreiden GSM-verkkojen peittoalueissa on eroja ja internetiin kytkeytyminen ei välttämättä aina onnistu tai

alueella ei ole tarpeeksi tiedonsiirtokaistaa vapaana, jotta tiedonsiirto onnistuisi. Puhe on aina priorisoitu korkeammalle kuin tiedonsiirto, mikäli kaistaa on vähän.

Myös satelliitteja voidaan käyttää tiedonsiirtoon. Satelliittiperusteisessa tiedonsiirrossa tulevat kuitenkin eteen samat haittaavat tekijät kuin satelliittipaikannuksessa. Nämä tekijät aiheuttavat viivettä ja häiriötä myös tiedonsiirtoon.

## 2.2 Tasoristeysten varoituslaitokset

Tasoristeukset jaotellaan niiden varustelun mukaan varoituslaitteettomiin ja varoituslaittein varustettuihin. Yleensä puhutaan myös vartioimattomista ja vartioiduista sekä passiivisista ja aktiivisista tasoristeyksistä. Vartioimattomissa tasoristeyksissä ei ole mitään teknisiä varoitus- tai huomiolaitteita, vaan tasoristeyksestä varoitetaan tienkäyttäjiä liikennemerkein. Vartioimattomissa tasoristeyksissä on jokin tekninen varoituslaitos, jolla varoitetaan tienkäyttäjiä tai estetään tasoristeuksen ylittäminen fyysisesti. (Katajala, 2014)

Tasoristeuksen turvallisuuteen on määritetty indikaattoreita Euroopan kommission direktiivissä, minkä mukaan tasoristeuksia tilastoidaan (Direktiivi 2014/88/EU). Tasoristeukset jaotellaan viiden eri tyyppin mukaisesti niiden turvallisuustekniikan mukaan

1. varoituslaitteeton tasoristeys
2. varoituslaittein varustettu tasoristeys
  - i. käsin kytkettävä
  - ii. automaattinen ääni- ja/tai valovaroituslaitos
  - iii. automaattiset puomit
  - iv. tasoristeuksen vapaanaolon valvonta.

Käsin kytkettäviä varoituslaitteita ei juurikaan ole Suomessa käytössä. Vilkkaasti liikennöidyillä rataosilla on yleensä käytössä puomivaroituslaitoksia, ja vähemmän liikennöidyillä käytetään yleensä ääni- ja valovaroituslaitoksia tai syrjäisemmillä alueilla ei ole käytössä mitään varoituslaitoksia. Tasoristeuksen vapaanaolon valvontalaitteet ovat laitteita, joilla valvotaan tasoristeuksen kannen tai puomien välisen alueen esteettömyyttä. Näin voidaan varoittaa junaa, jos esimerkiksi puomien väliin on joutunut auto.

Vartioimattoman tasoristeuksen varustaminen tasoristeysvaroituslaitoksella on suhteellisen kallista. Korkeiden kustannusten vuoksi vartioimattomia tasoristeuksia on vieläkin rataverkollamme paljon, erityisesti alemmalla tieverkolla. Tasoristeuksen muuttaminen vartioiduksi vaatii paljon muutakin kuin tasoristeuksen käyttäjälle näkyvän varoituslaitoksen rakentamista. Sen lisäksi joudutaan useimmiten tekemään muutoksia myös kyseisen rataosan muihin turvalaitejärjestelmiin, sillä tasoristeuksen varoituslaitoksilla on usein kytkentöjä muihin turvalaitejärjestelmiin. (Katajala 2014)

Puomeilla varustettu varoituslaitos koostuu seuraavista osakokonaisuuksista:

- tieopastimet
- puomit
  - kokopuomit
  - puolipuomit
  - paripuomit
- varoituskellot
- hälytyksen käynnistys- ja katkaisujärjestelmä, yleensä raidevirtapiiri tai akselinlaskenta-anturit
- logiikkaohjaus
- virransyöttö ja varavoima
- laitetila
- sähköliittymä

### 2.2.1 Varoituslaitostyyppin valinta

Tasoristeyksen varoituslaitoksen tyyppiä valittaessa on olemassa lista ehtoja, joiden täyttyessä tasoristeyksessä on oltava edes jonkinlainen varoituslaitos. Jos yksikin seuraavista ehdoista täyttyy, pitäisi tasoristeyksessä olla varoituslaitos:

- Radan paikallinen nopeus tasoristeyksen kohdalla voi olla yli 120 km/h
- Radan ylittävä tie on yleinen tie
- Tasoristeyksen näkemiä ei kohtuullisesti saa ohjeiden mukaisiksi
- Tieliikenteen määrä on yli 50 moottoriajoneuvoa vuorokaudessa
- Risteyskulma on alle 80°
- Tieliittymä on liian lähellä tasoristeystä tai radan suuntainen tie on liian lähellä rataa.

Lisäksi puomilaitoksia tulisi käyttää pääradoilla ja muilla radoilla yleisen tien tai muuten vilkkaasti liikennöidyn tien tasoristeyksissä. Puomilaitoksia suositellaan myös käytettävän, jos tie johtaa useamman kuin yhden raiteen yli tai radan paikallinen nopeus on yli 120 km/h. (Katajala 2014)

### 2.2.2 Varoituslaitoksen toiminta

Varoituslaitoksen hälytys voi alkaa usean eri ehdon ohjaamana. Hälytys ei saa päättyä, jos yksikin hälytystä edellyttävä ehto on voimassa. Oleellista tasoristeystä rakennettaessa tai sitä päivitetäessä, on sen sijainti. Muuttujia on niin raiteen vapaanolon valvonta kuin sähköliittymän ja kaapeloinnin rakentaminen tasoristeykselle. Nämä muodostavat ison osan tasoristeyksen hinnasta.

Varoituslaitoksen ollessa perustilassaan puomien on oltava ylhäällä, tieopastimien on näytettävä hitaasti vilkkuvaa valkoista valoa ja varoituskellot eivät saa soida. Hälytyksen aikana tieopastimien on näytettävä punaista nopeasti vilkkuvaa valoa, ja hälytyksen päättyessä tieopastimet on ohjattava näyttämään hitaasti vilkkuvaa valkoista valoa. Varoituskellon soitto on aloitettava varoituslaitoksen alkaessa hälyttää, ja sen soitto on katkaistava tieosuuden varautuessa. (Katajala 2014)

### 2.2.3 Tasoristeysturvallisuuden parantamisen kustannuksia

Tämänhetkiset yleisesti hyväksytyt vaihtoehdot tasoristeysten turvallisuuden parantamiseksi ovat:

- Puomilaitoksen rakentaminen
- Alikulun rakentaminen
- Ylikulun rakentaminen

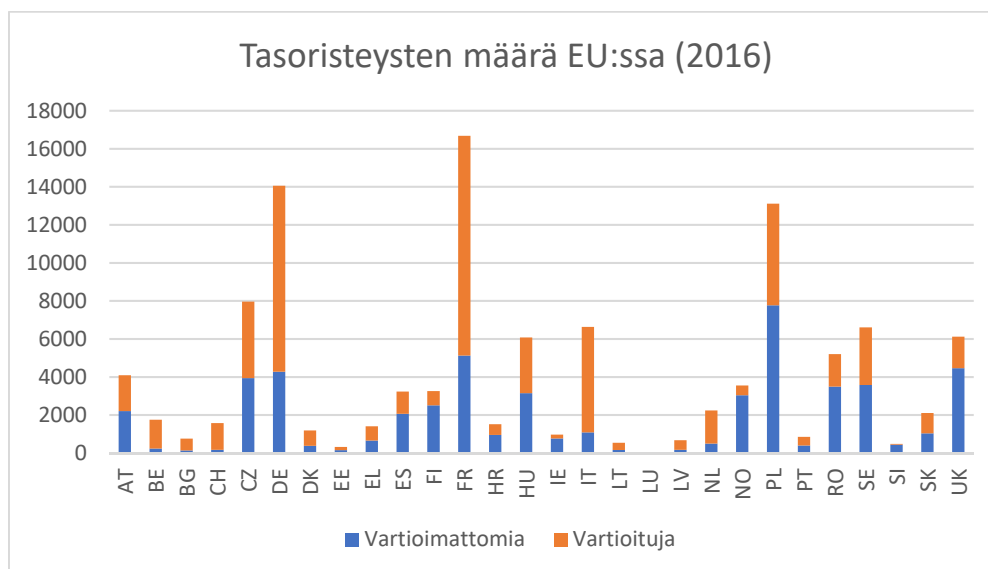
Puomillisen varoituslaitoksen rakentamiskustannuksiin vaikuttaa oleellisesti tasoristeysten paikka, mutta yksiraiteisella rataosalla keskimäärin rakentamisen hintaluokka on noin 150 000 €. Kustannuksia nostavat erityisesti pitkät sähköliittymäetäisyydet syrjäisemmille tasoristeyksille sekä raiteen vapaanaolon valvonnan toteuttaminen. Kustannusjakauma on karkealla tasolla sellainen, että ohjauslogiikka on noin 20 % kokonaiskustannuksista, hälytysosuudet kaapelointineen maksavat noin 25 000–30 000 € eli myös noin 20 %. Junien satelliittipaikannuksella voitaisiin vaikuttaa näihin viimeksi mainittuihin kustannuksiin.

Alikulun rakentamisen kustannukset lähtevät noin 250 000 eurosta ylöspäin ja edullisimmat alikulut ovat tarkoitettu vain kevyelle liikenteelle. Isommat ja moottoriajoneuvoille tarkoitetut alikulut maksavat jopa useita miljoonia euroja.

Ylikulun rakentamisen kustannukset muodostuvat myös hyvin tapauskohtaisesti, mutta tavallisesti radan ylittävän sillan rakentamisen kustannukset ovat miljoonasta eurosta ylöspäin.

## 2.3 Tasoristeystilastoja Suomesta ja Euroopasta

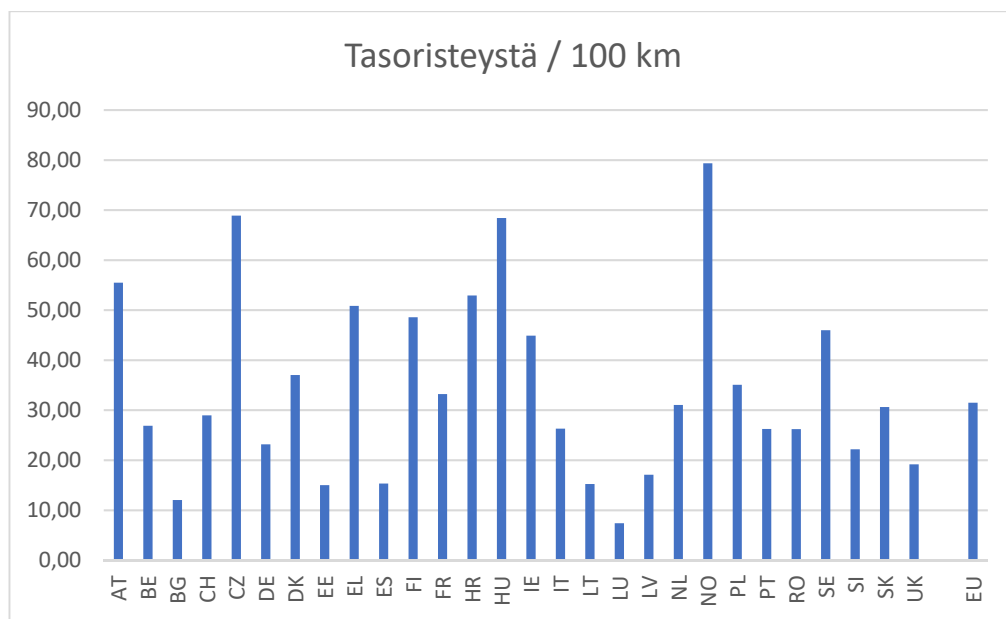
EU:n alueella oli 114 580 tasoristeystä vuonna 2014. Kuvassa 3 on nähtävissä tasoristeysten määrä Euroopan maissa. Näiden määrä on kuitenkin viimeisen viiden vuoden aikana tasaisesti pienentynyt noin 4 % vuosivauhdilla. Tällä vauhdilla tasoristeysten määrä puolittuu vuoteen 2030 mennessä. Suomessa oli vuoden 2016 kesäkuussa 2 463 tasoristeystä, joista 1 862 on vartioimattomia. (Liikennevirasto 2017)



Kuva 3 Tasoristeysten määrä ja jakautuminen EU:n alueella (ERAIL 2016).



Tasoristeys EU:n alueella on keskimäärin 30 kpl / 100 km. Kuvassa 4 on nähtävissä tasoristeysten määrä 100 ratakilometriä kohden Euroopan maissa. Vartioimattomien tasoristeysten osuus kaikista tasoristeyksistä on 47 %. Nämä ovat yleensä varustettu vain rautatien tasoristeys -merkillä, mutta niissä ei ole minkäänlaista varoitusta saapuvasta junasta. Näiden tasoristeysten osuus on vuodesta 2010 pienentynyt yhden prosenttiyksikön vuosivauhdilla. Vartioimattomien tasoristeysten korkea määrä suhteessa vartioituihin tasoristeyskisiin on tyypillistä harvaan asutuissa valtioissa.



Kuva 4 Tasoristeysten suhteellinen määrä 100 ratakilometriä kohden (ERAIL 2016).

Onnettomuustilastoja liittyen tasoristeystyyppiin on saatavilla kahdeksasta maasta. Ne vahvistavat käsityksen siitä, että vartioimaton tasoristeys on turvattomampi kuin vartioitu, joskaan vartioitu tasoristeyskään ei ole täysin turvallinen.

EU:n alueen tasoristeysonnettomuuksissa menehtyy vuositasolla yli 300 ihmistä. Tämä on neljäsosa kaikista rautateillä tapahtuvista kuolemaan johtavista onnettomuuksista ja 1 % kaikista tieliikenteen kuolemaan johtavista onnettomuuksista. Sekä tieliikenteessä että rautateillä tapahtuneet kuolemaan johtaneet onnettomuudet ovat viime vuosina laskeneet EU:ssa, mutta suuret (yli neljä henkeä vaatineet) onnettomuudet ovat määrällisesti pysyneet samana (1990–2009).

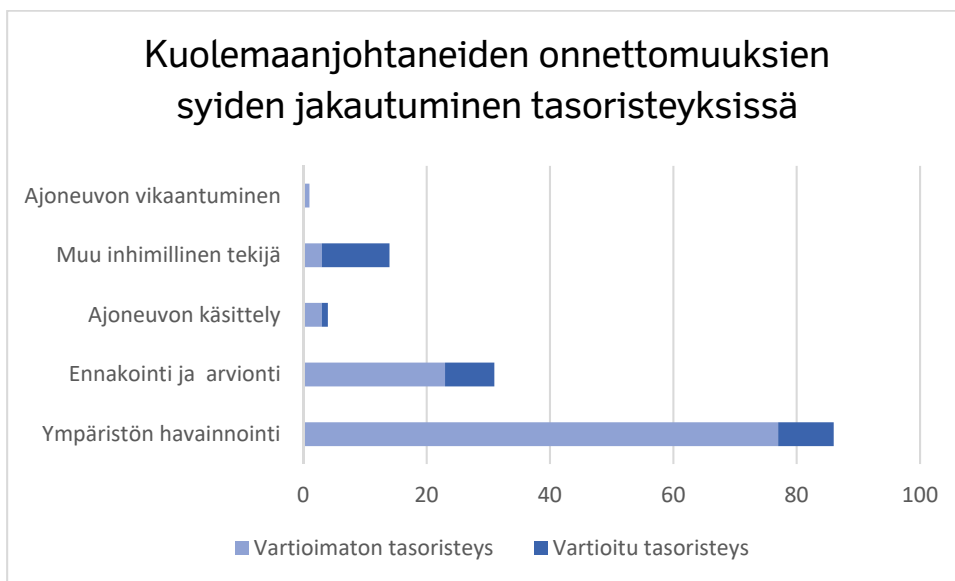
### 2.3.1 Tasoristeysturvallisuuden taso Suomessa

Vuonna 2016 julkaistun tutkimuksen mukaan jakson 1991–2011 aikana tapahtui Suomessa moottoriajoneuvoilla 5408 kuolemaan johtanutta onnettomuutta, joista yhteen törmäyksiä oli 3190. Kaikista kuolemaan johtaneista moottoriajoneuvoilla sattuneista onnettomuuksista tasoristeyksissä tapahtui 2,6 %. Kaikista onnettomuuksista tasoristeystörmäysten osuus oli 4,5 %. (Laapotti 2016)

Kuolemaan johtaneita onnettomuuksia tapahtui tasoristeyksissä 138, ja näistä onnettomuuksista lähes neljä viidesosaa tapahtui vartioimattomassa tasoristeyksessä (78 %), kun taas vastaavasti 22 % tapahtui vartioidussa tasoristeyksessä. Yhtä onnettomuutta lukuun ottamatta kaikki onnettomuudet johtuivat inhimillisestä virheestä. (Laapotti 2016)

Välittömät riskitekijät tasoristeysonnettomuuksissa:

- **Ympäristön havainnointi**
  - Esim. kuljettaja ei huomaa tulevaa junaa tai varoituslaitoksen varoitusta.
- **Ennakointi ja arviointi**
  - Esim. kuljettaja arvioi oman nopeutensa väärin lähestyttäessä tasoristeystä tai tulkitsee saapuvan junan nopeuden väärin.
- **Ajoneuvon käsittely**
  - Esim. kuljettaja ei hallitse ajoneuvoaan täysin tai valitsee vaihteen väärin.
- **Muu inhimillinen tekijä**
  - Esim. kuljettaja ottaa tahallisen tai tietoisin riskin ehtiä junan edestä autolla tai ajaa tahallaan junan alle.
- **Ajoneuvo**
  - Yllättävä tekninen vika kulkuneuvossa.



Kuva 5 Kuolemaan johtaneiden tasoristeysonnettomuuksien syitä (Laapotti 2016).

Kuolemaan johtaneiden onnettomuuksien määrä on laskenut tutkimusjakson aikana. Ensimmäisen puolikkaan aikana niitä oli keskimäärin 8,5 kappaletta vuodessa, kun jälkimmäisellä jaksolla niitä oli keskimäärin 4,4 per vuosi eli 48 % vähemmän. Onnettomuuksien väheneminen ei kuitenkaan ole ollut tasaista, vaan vartioimattomien tasoristeysten onnettomuudet ovat laskeneet 42 %, kun taas vartioitujen tasoristeysten kuolemaan johtaneiden onnettomuuksien osuus on laskenut 84 %. (Laapotti 2016)

Vartioitujen tasoristeysten turvallisuuden tilastollinen parantuminen johtunee Suomen rataverkon kokonaisturvallisuuden parantamisesta, kun joiltakin rataosuuksilta on poistettu kaikki vartioimattomat tasoristeukset. Rataosuuksilla, joilla suurin sallittu nopeus on 140 km/h, ja sitä nopeammilla rataosuuksilla ei saa olla enää tasoristeyskiä lainkaan.

Raportin mukaan onnettomuuksien määriä koskevat määräävät tekijät ovat:

- Junien ja tieliikenteen kulkuneuvojen määrä tasoristeyksellä
- Varoituslaitoksen olemassaolo
- Nopeusrajoitus tiellä ja radalla
- Tienkäyttäjien näkyvyysalue
- Tienpinnan laatu

Huomionarvioisia havaintoja tutkimuksessa oli, että yli 70 % vartioimattomissa tasoristeyksissä tapahtuneista onnettomuuksista johtuu kuljettajan epähuomiosta, kun vartioiduissa tasoristeyksissä osuus on 30 %. Noin 40 % vartioitujen tasoristeysten onnettomuuksista johtui joko vaaran välittämättä jättämisestä tai itsemurha-aikeesta. Vartioiduissa tasoristeyksissä joka neljännessä onnettomuudessa kuljettaja oli alkoholin tai muun laittoman huumeen vaikutuksen alainen ja joka kolmannella ei ollut ajokorttia. Tällaista jakaumaa ei havaittu vartioimattomien tasoristeystsonnettomuuksien tapauksissa.

Suomessa 72 % vartioimattomista tasoristeyksistä on vähäliikenteisillä teillä, joilla kulkee alle 12 kulkuneuvoa vuorokaudessa. Tutkimuksen vartioimattomien tasoristeysten onnettomuuksista 83 % tapahtui tasoristeyksissä, joissa liikennettä on yli 10 autoa vuorokaudessa. (Laapotti 2016)

Johtopäätöksenä edellisestä voi todeta, että tasoristeysturvallisuuden oleellisessa parantamisessa auttaa vain tasoristeysten poisto. Varoituslaitosten rakentamisella ei saada onnettomuuksia kokonaan poistettua.

## 3 Satelliittipaikannus rautateiden turvalaitteissa

### 3.1 Satelliittitietojen hyödyntäminen tasoristeyssovelluksissa

Seuraavassa esitellään tasoristeysten turvallisuuden kehittämiseen liittyviä projekteja tai hankkeita, joiden painopisteenä on satelliittipaikannukseen liittyvien palveluiden hyödyntäminen.

#### 3.1.1 ESA, LeCross

LeCross-tutkimus (Virtanen & Iqbal 2014) on ESAn, VTT:n ja CGI:n yhteistyönä toteutettu selvitystyö satelliittipalveluiden hyödyntämisestä vartioimattomien tasoristeysten turvallisuuden parantamisessa. Tutkimuksen tavoitteena oli arvioida satelliittipalveluiden tuomaa lisäarvoa tasoristeysturvallisuudessa ja määritellä toteuttamiskelpoinen ja kestävä ratkaisu GNSS-palveluiden hyödyntämiseen. Toteuttamiskelpoisuustutkimus (engl. *feasibility study*) alkoi tammikuussa 2013 ja päättyi elokuussa 2014. Järjestelmä perustuu osaksi VTT:n kehittämään palvelinratkaisuun, Junavaro-järjestelmään.

Tutkimuksen aikana kehitetty LeCross-ratkaisu hyödyntää satelliittipalveluiden tarjoamaa laitteiden välistä viestintää ja junanpaikannusdataa. Tämä tarjoaa kustannustehokkaan ratkaisun turvallisuuden parantamiseksi vartioimattomissa ja vähäliikenteisissä tasoristeyksissä. LeCross-konsepti on suunniteltu ja tarkoitettu rataverkon haltijoille maissa, joissa vartioimattomien tasoristeysten turvallisuus on erityisenä huolenaiheena ja onnettomuudet yleisiä.

Tutkimuksessa oli mukana raideliikenteen sidosryhmiä pääasiallisesti kolmesta maasta: Iso-Britanniasta, Suomesta ja Tšekistä. Tutkimukseen osallistuneiden sidosryhmien, rataverkon haltijoiden, rautatieliikenteen harjoittajien ja turvallisuusviranomaisten, välillä vallitsi konsensus tasoristeysturvallisuuden parantamisesta ja tasoristeysten vaikutuksen vähentämisestä rata- ja tieverkon kapasiteettiin. Kuitenkin myös ongelmat tavoitteiden saavuttamisessa koettiin samanlaisiksi: vanhentuneen infrastruktuurin parantaminen, vähäliikenteisten ratalinjojen infran puuttuminen ja tienkäyttäjien käyttäytyminen tasoristeyksissä.

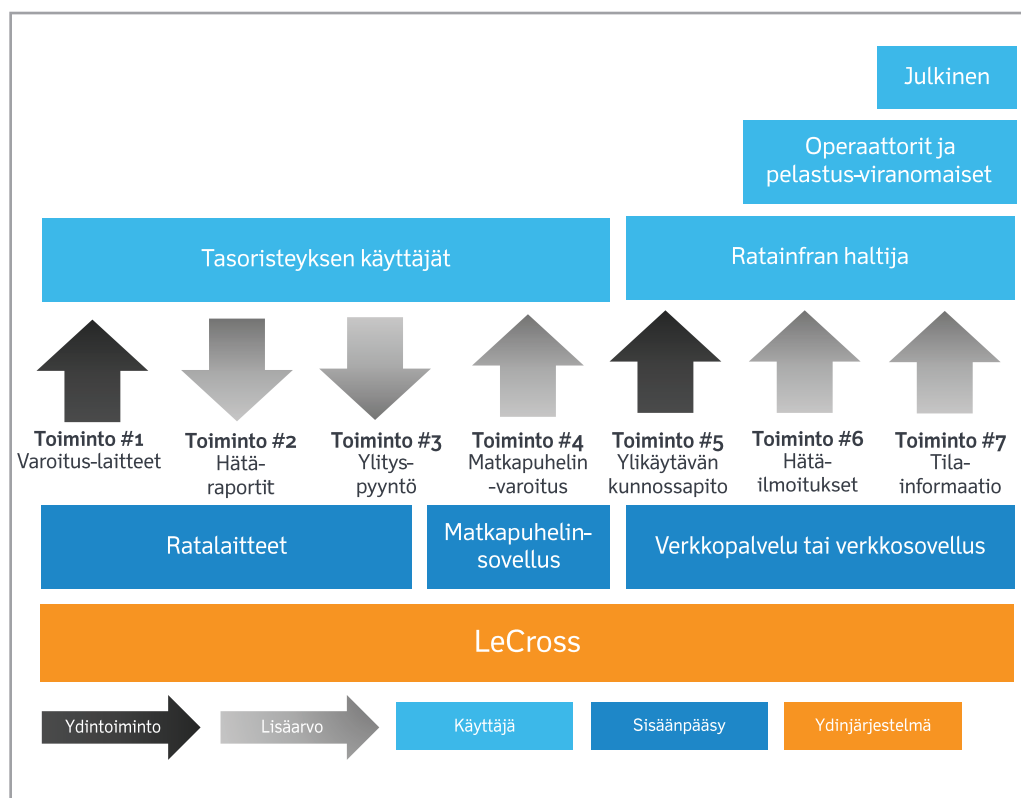
Suurin sidosryhmä ja järjestelmän pääasiallinen kohderyhmä ovat rataverkon haltijat, jotka vastaavat tasoristeysten ja niiden varoituslaitosten kunnossapidosta ja siten turvallisuudesta. Yleisesti rataverkkojen haltijoiden pyrkimyksenä eri maissa on parantaa tasoristeysturvallisuutta, mutta investoitua pääomaa täytyy aina verrata saavutettuun turvallisuushyötyyn, joten kalliiden järjestelmien tulee parantaa merkittävästi turvallisuustasoa.

LeCross-konseptin kehitys keskittyi lähinnä vähän liikennöityjen rataosuuksien tasoristeysturvallisuuden parantamiseen, koska vilkkailla rataosuuksilla suuremmat investoinnit infraan, kuten tasoristeysten poistaminen kokonaan tai täydellisten puomi- ja varoituslaitosten asentaminen, ovat perusteltuja turvallisuuden kannalta. Syrjäisemmillä tasoristeyksillä jopa yksinkertaisten valo- tai äänivaroituslaitosten asentaminen voi olla hankalaa tai kallista, jos olemassa olevaa infrastruktuuria, kuten sähkönsyöttöä ei ole saatavilla. (Virtanen & Iqbal 2014)

### 3.1.1.1 Palvelun ja järjestelmän kuvaus

LeCross-konseptin ydinpalveluina ovat varoituslaitoksen perustoiminnallisuuden toteuttaminen eli tienkäyttäjien varoittaminen tasoristeystä lähestyvistä junista, sekä käyttökustannusten alentaminen monitoroimalla varoituslaitoksen toimintaa ja kunnossapitoa. Varoituslaitoksen ja palvelun toiminnallisuudesta lähetetään reaaliaikaista tietoa rataverkon haltijalle. Rataverkon haltija on siten keskeisessä asemassa palvelun käyttäjänä ja tasoristeyksen turvallisuudesta sekä kunnossapidosta vastaavana tahona.

Perusjärjestelmän lisäksi palveluun voidaan yhdistää lisäosia ja -järjestelmiä palvelemaan tienkäyttäjiä, liikenteenohjausta ja radanpitäjää. Perusjärjestelmän ratalaitteisiin voidaan yhdistää esimerkiksi tasoristeyksen esteiden tunnistus- ja hälytysjärjestelmä ja ylityspyyntöjärjestelmä tienkäyttäjille (esim. puhelin, kutsunappi yms.). Muita sovelluksia ovat esimerkiksi tietoliikenneyhteyksien kautta LeCross-järjestelmään kytketyt mobiilit varoitusjärjestelmät tai informaatiopalvelut junan paikasta ja tasoristeyksen tilasta. Palvelukonseptin kaaviokuva on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6 LeCross-palvelukonseptin toiminnot, muokattu lähteestä (Virtanen & Iqbal 2014).

LeCross-järjestelmäkokonaisuus koostuu viidestä pääkomponentista:

- Junanpaikannuspalvelu: antaa tietoa junan sijainnista, mikä on pakollinen osa järjestelmän toimintaa
- LeCross Operations Server (toimintapalvelin): suorittaa kaiken laskennan ja tuottaa palvelukäyttöliittymät. Työmäärä jaetaan monen tietokoneen kesken modulaarisuuden lisäämiseksi ja kunnossapidon helpottamiseksi.
- M2M palvelun toiminta-alusta: vastaa luotettavasta langattomasta yhteydestä tasoristeyslaitoksen ja pääpalvelimen välillä. Luotettavuutta lisätään käyttämällä matkapuhelinverkkoa sekä satelliittiyhteyksiä.
- Ratalaitteet: asennetaan tasoristeyskseen, ja ne vastaavat ydinpalveluiden toteuttamisesta. Ratalaitteet ovat itsenäisiä kokonaisuuksia eivätkä tarvitse erikoisasennuksia esimerkiksi sähköverkkoon
- Lisäpalvelut: hyödyntävät LeCross-toimintapalvelimen tuottamaa tietoa lisäarvopalveluiden tuottamiseen.

Tutkimukseen kuului soveltuvuus selvitys (engl. *Proof of Concept, PoC*), jossa testattiin yhdessä satelliitti-M2M-viestintäalustaa (laitteiden välistä viestintää, engl. Machine-to-Machine) ja GNSS-junapaikannuspalveluita oikea-aikaisen varoituksen tuottamiseen. Selvityksessä testattiin simulaatioympäristössä avainkriteerejä:

- Oikein ajoitettu varoituslaitoksen tilan muutos on mahdollista tehdä
- Vääriä hälytyksiä ei muodostu
- Järjestelmävirheet johtavat järjestelmän vikasietotilaan.

Simulaatiossa pystyttiin tutkimaan Hanko–Karjaa-rautatielinjan tasoristeysten varoituslaitosten käyttäytymistä ja LeCross-järjestelmän vastetta ohjaamalla M2M- ja GNSS-viestiyhteyksiä ja GNSS-paikannusta manuaalisesti. Tällä testijärjestelmällä pystyttiin simuloimaan kaksi tärkeintä järjestelmän toimintaan vaikuttavaa virhelähdettä:

- GNSS-paikannuksen tarkkuus ja virheet
- viestiyhteyksien luotettavuus, latenssi ja virheet

Simulaatiolla tutkittiin viestiyhteyksien latenssin vaikutusta varoituslaitoksen oikea-aikaisen varoituksen antamiseen junan saapumisesta. Molemmilla viestiyhteyksillä saavutettiin 80 % tapauksista 38 sekunnin tavoitetarkkuuteen ja vaihteluväli on 36–40 sekuntia.

Junapaikannuksen epätarkkuutta tutkittiin indusoimalla järjestelmään ääritapaus GNSS-paikannuksen virheestä ja mittaamalla varoituslaitoksen hälytyksen alkamista ennen junan saapumista varoituslaitokseen. Vertaamalla paikannuksen epätarkkuuden keskihajontaan voidaan järjestelmää pitää robustina satelliittipaikannuksen virheille, mutta hälytysten antamista tulisi tutkia oikeissa tilanteissa, kun juna saapuu tasoristeyskseen.

Simulaatiolla voitiin todentaa LeCross-palvelun kriteerit:

- palvelun saavutettavuus 99,9 %
- junien saapumisennuste pystytään antamaan sekuntien tarkkuudella
- ratalaitteiden hälytykset tapahtuvat vaaditussa aikaikkunassa (>20 s ja <60 s ennen junan saapumista)
- GNSS-paikannuksen tarkkuus (<30 m) on riittävä
- vääriä hälytyksiä ei tapahdu
- tietoliikenneyhteyden ja GNSS-paikannuksen virheet voidaan havaita nopeasti
- kommunikaatioprotokolla kestää satelliittikommunikaation latenssi-ongelmat



SAT-LX-järjestelmän tasoristeykseen asennettava fyysinen varoituslaitos koostuu seuraavista osista:

- Pienitehoinen satelliittipääteyksikkö, jolla muodostetaan kaksisuuntainen yhteys SAT-LX-keskusserveriin
- Näyttö, jolla varoitetaan ja tiedotetaan tienkäyttäjiä. Näytössä on järjestelmän tai virransyötön vikaantuessa turvallinen vikasetotila.
- Itsenäinen virtalähde aurinkopaneelilla ja akulla toteutettuna. Vaihtoehtoisesti polttokenno alueilla, joissa auringonvalon saanti on vähäistä.
- Pienitehoinen ohjausyksikkö virransyötön, näytön ja satelliittiyhteyden viestiliikenteen hallintaan.

Järjestelmän perustilassa tienkäyttäjiä neuvotaan aina pysähtymään ja tarkkailemaan mahdollisesti lähestyviä junia. Oikea-aikainen varoitus kytkeytyy päälle, kun juna on riittävällä etäisyydellä tasoristeyksestä. Jos viestintäyhteydet varoituslaitoksen ja keskuspalvelimen välillä katoavat, järjestelmä pysyy perustilassa.

SAT-LX-järjestelmä hyödyntää langatonta satelliittiyhteyttä ja sisäänrakennettua virtalähdettä, mikä vähentää tarvittavan infrastruktuurin määrää tasoristeysalueella. Järjestelmään voidaan yhdistää myös muita radan havaintolaitteita, kuten erilaisia anturijärjestelmiä tai kameroita, joiden tiedonsiirtoon voidaan hyödyntää SAT-LX:n satelliittiyhteyttä. Myös muita sovelluksia, kuten kunnossapidon monitorointi (esim. pyörävoima- tai kuumakäynti-ilmaisimet) voidaan yhdistää järjestelmään. (CGI 2014)

Demonstraatioprojektissa toteutuessaan pääurakoitsijana olisi toiminut CGI ja asiantuntijatehtävissä alurakoitsijana VTT. Lisäksi mukaan olisi tarvittu eri laitetoimittajia ja tietoliikennepalveluiden tuottajia. Pilotin oli tarkoitus alkaa vuoden 2015 aikana ja jatkua 18 kuukautta, minkä jälkeen olisi tapahtunut siirtyminen toiminnalliseen käyttöön. (CGI 2014)

Pilottia ei kuitenkaan toteutettu johtuen vähäisestä kiinnostuksesta satelliittitekniikan hyödyntämiseen tasoristeyslaitoksien tekniikassa. Nykyään kiinnostus tasoristeysten turvallisuuden kehittämiseen ja uusiin teknologioihin on kuitenkin kasvanut, joten LeCross-konseptin ja SAT-LX:n testaaminen käytännössä voisi olla perusteltua. Järjestelmän kehitys jatkuu myös osaksi UIC:n SAFER-LC hankkeessa (UIC 2017).

### 3.1.3 Berner & Mattner, SafeRail

SafeRail (Berner & Mattner 2003) on tutkimusprojekti satelliittipohjaisesta junanpaikannusjärjestelmästä, joka mahdollistaa jatkuvan junan seuraamisen ja tasoristeysten turvallisen käytön. SafeRail on ESan rahoittama tutkimus, jonka päätoteuttaja on Berner & Mattner Systemtechnik GmbH. Mukana oli myös useita eurooppalaisia alurakoitsijoita. Toteuttamiskelpoisuustutkimus valmistui vuonna 2015.

SafeRail-palvelukonsepti perustuu tasoristeysten käyttäjien ja ylläpitäjien tarpeisiin. Mahdolliset konseptit ovat *tienkäyttäjien tietoisuuden lisääminen* ja *tasoristeysten kunnossapitotoimenpiteiden tukeminen*:

- Tietoisuuden lisääminen: tasoristeysten käyttäjien tulee saada tietoa reaaliajassa tasoristeysten kautta kulkevista junista. Radanpitäjä voi toimittaa reaaliaikaisia aikatauluja tasoristeyksille, joita tienkäyttäjien käyttämät satelliittipaikannuslaitteet voivat hyödyntää ja antaa varoituksen tasoristeystä lähestyttäessä.



- Kunnossapidon tukeminen: tasoristeysten eri komponentteja pitää tarkastaa tietyin väliajoin kävelytarkastuksin. Esimerkiksi liikennemerkkien ja näkemien tarkastaminen täytyy varmistaa tietyistä pisteistä. Nämä toimenpiteet voidaan tehdä mobiililaitteiden sovelluksilla, jotka voivat hyödyntää laitteen antureita, esim. kameraa, ja tallentaa tietoja suoraan kunnossapitotietokantaan.

SafeRail-järjestelmä hyödyntää satelliittinavigointia yhdessä tarkoituksenmukaisen eheyslaskennan kanssa, mikä tarjoaa kehittyneemmän ja vakaan junan paikannuksen verrattuna nykyisiin GNSS-ratkaisuihin. Satelliittinavigointia pyritään hyödyntämään myös tienkäyttäjien paikannukseen tasoristeysten ympäristöissä ja toimittamaan satelliittiyhteyden avulla tietoa tasoristeysten tilasta lähestyville tienkäyttäjille.

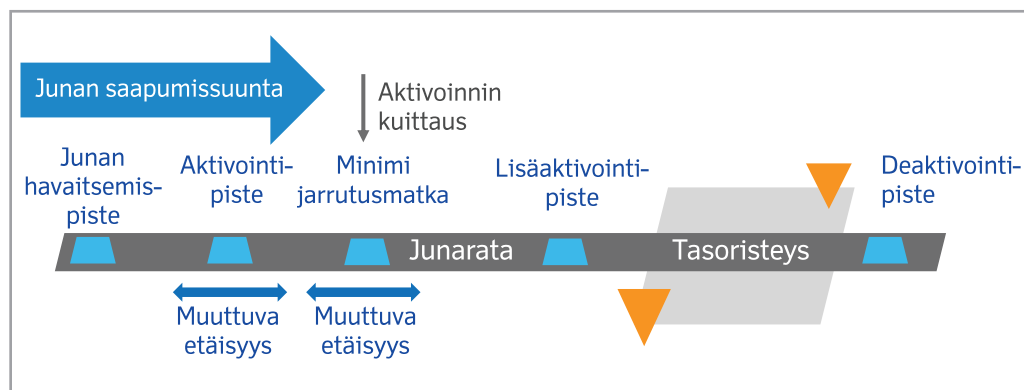
Järjestelmä hyödyntää satelliittiviestintää toisena tietoliikenneyhteytenä keskeyttömään tiedonsiirtoon turvallisuuskriittisissä sovelluksissa. SafeRail-järjestelmä on suunniteltu selviytymään tilanteista, joissa GNSS-signaali katoaa tai häiriintyy, viestiyhteys katoaa tai satelliittitietoliikenne viivästyy. (Berner & Mattner 2003)

### 3.1.3.1 Järjestelmän kuvaus

SafeRail-palvelukonseptin ensimmäinen toteutusvaihe on tasoristeysten operaatio-palvelu, LCOS, jolla on eniten potentiaalia teknisen toteutuksen ja käyttäjien sekä asiakkaiden kiinnostuksen kannalta. LCOS on tarkoitettu radanpitäjille ja pääasiassa operaattoreille sivuradoilla, joissa tekninen infrastruktuuri ei palvele perinteisten tasoristeysvaroituslaitosten asennusta.

Palvelussa on kaksi tasoa, joilla hälytys ja junien paikannus voidaan toteuttaa:

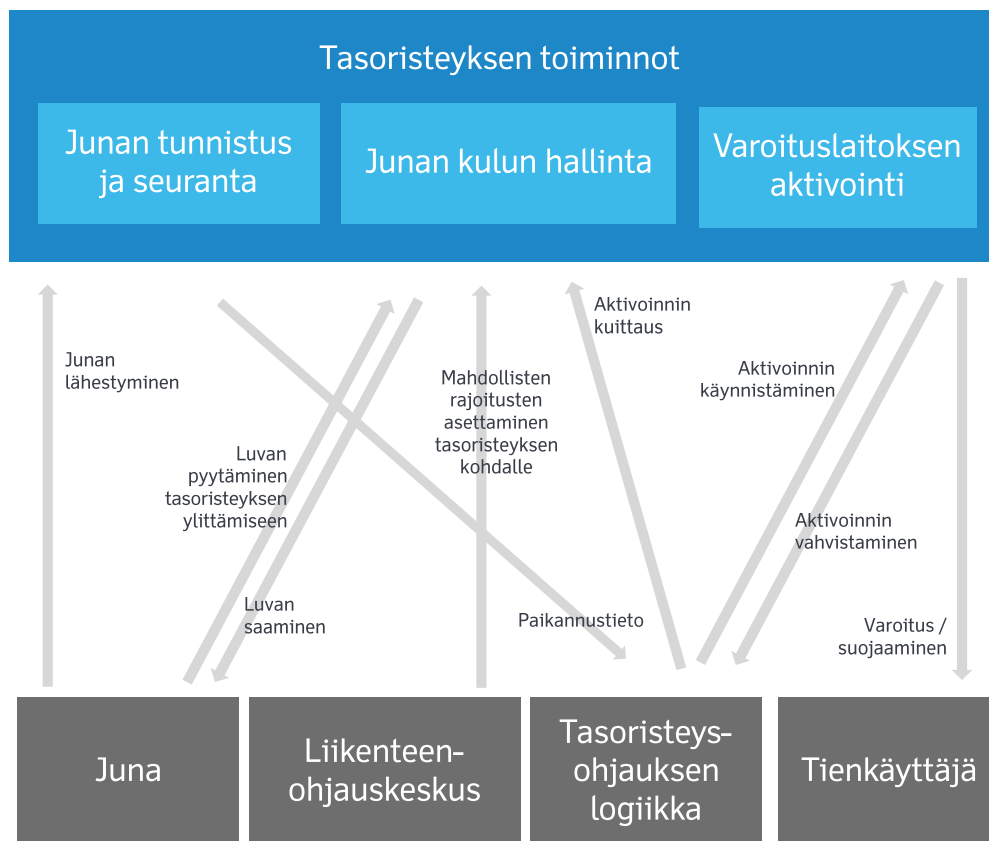
- Taso 1: tasoristeystä lähestyvä juna ylittää kiinteän (virtuaalisen) herätepisteen radalla. Tasoristeyslaitos aktivoituu junan saapuessa herätepisteen kohdalle, ja tienkäyttäjä joutuu odottamaan junan nopeudesta riippuen tietyn ajan tasoristeyksessä
- Taso 2: junan nopeutta monitoroidaan ja herätepiste tasoristeykseen nähden muodostetaan dynaamisesti, jolloin voidaan muodostaa lähes vakio sulku aika tasoristeyslaitokselle. Näin tienkäyttäjän odotusaika tasoristeyksessä ei riipu junan nopeudesta.



Kuva 8 Junan lähestymispisteet tasoristeykseen nähden SafeRail-järjestelmässä, muokattu lähteestä (Schramm & Weimer 2014).

Palveluun kuuluu seuraavat alijärjestelmät ja rajapinnat järjestelmän käyttäjälle:

- Junanpaikannus ja -havaitseminen: junan paikka- ja nopeustiedon lähettäminen järjestelmään tasoristeyksen lähestymisalueella (muutaman kilometrin tarkkuudella).
- Ajolupien hallinta: antaa luvan junalle ajaa tasoristeyksen läpi. Ajoluvan edellytys on onnistunut varoituslaitoksen aktivoituminen.
- Tasoristeysvaroituslaitoksen aktivointi: hallitsee varoituslaitoksen aktivoitumista ja lähettää kuittauksen junalle ja liikenteenohjaajalle. Laskee myös sulkuajan junan paikka- ja nopeustietoihin perustuen.
- Viestiyhteydet: kommunikaatio junan ja ohjauskeskuksen välillä.



Kuva 9 *SafeRail LCOS-palvelun toiminnot ja rajapinnat, muokattu lähteestä (Schramm & Weimer 2014).*

Alijärjestelmistä junanpaikannus käyttää GNSS-signaalia junan paikan ja nopeuden määrittämiseen junaan asennetulla GNSS-laitteistolla. Viestiyhteyksissä satelliittikommunikaatiosignaalia käytetään varayhteytenä valmiiden viestiyhteyksien kanssa. Satelliittisignaalien käyttöön liittyy samat virhelähteet ja riskitekijät kuin aikaisemmin esitellyissä LeCross- ja SAT-LX-järjestelmissä.

SafeRail-järjestelmä on suunniteltu toimimaan turvallisesti ja toimintavarmasti GNSS-signaalin kadotessa tai vääristyessä, viestiyhteyksien kadotessa tai satelliittiviestinnän viivästyessä. Järjestelmään on suunniteltu tietyt vikasietotilanteet eri virhetilanteisiin:

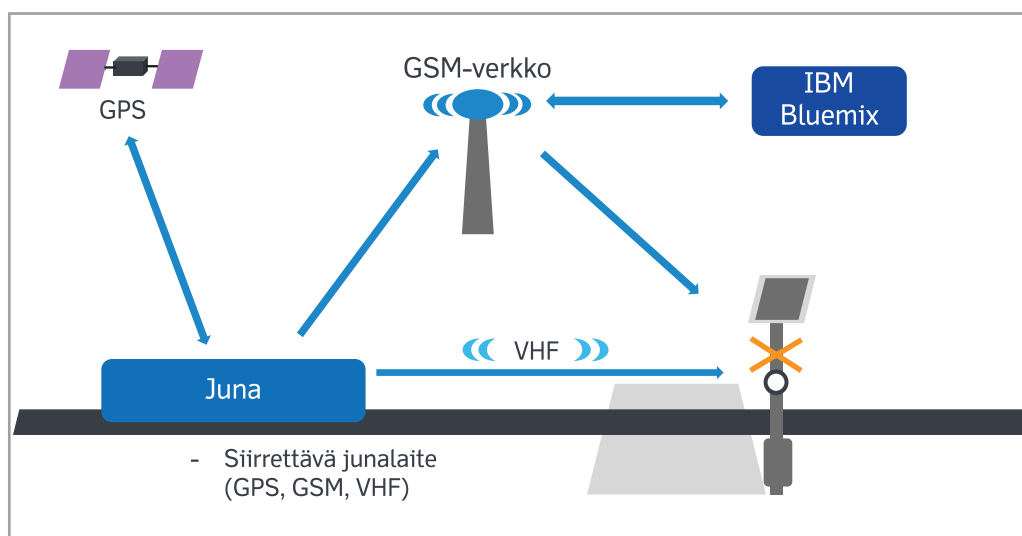
- Junanpaikannusta ei saatavilla: junan kuljettaja voi jatkaa liikenteenohjaajan ohjein, mutta tasoristeyksestä lähestyttäessä vain varoituslaitosta lähinnä olevaan ”lisäaktivoitipisteeseen” ja pysähtyä. Tämän jälkeen tasoristeys aktivoidaan ja juna voi jatkaa. Satelliittiviestiyhteys oletetaan itsenäiseksi, eikä ole häiriintynyt.
- Tasoristeyksen valvontaa ei saatavilla: jos herätepiste ei toimi tai junan lähestymistä ei voi havaita, otetaan käyttöön väliaikainen nopeusrajoitus, ja juna voi jatkaa apuherätepisteeseen ja siitä eteenpäin liikenteenohjaajan tai automaattisen kulunvalvonnan ohjeilla.
- Viestiyhteys katkeaa: Kulkulupia annetaan junille vain väliaikaisten nopeusrajoitusten kanssa tasoristeyksien yli. Jos varayhteys katkeaa, niin nopeusrajoitus on jo käytössä ja vältetään laajemmat vaaratilanteet.

SafeRail-projekti eteni demonstraatioprojektivaiheeseen vuoden 2015 alussa, mutta sen nykytilasta ei ole saatavissa tietoa. (Schramm & Weimer 2014)

### 3.1.4 Cautio Oy:n huomio- ja tasoristeysvalolaitos

Cautio Oy, Etteplan Oyj, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, Liikennevirasto ja VR:n edustajat ovat olleet mukana ohjausryhmässä, joka on seurannut Cautio Oy:n toteuttamaa tasoristeysten huomiovalolaitosjärjestelmän kehitystä. Nykyinen huomiovalolaitosmalli on ollut koekäytössä Toijala–Valkeakoski- sekä Olli–Porvoo-rataosilla. Vuoden 2019 alussa laitteisto tulee käyttöön myös Lahti–Heinola-rataosuudelle. (Anttila 2018; Lehto 2017)

Huomiovalolaitos koostuu valo-opastimesta, jolla tienkäyttäjää varoitetaan, kun tasoristeyksen lähellä on rautatieliikennettä. Hälytyksen aloitus perustuu junan paikkatietoon, joka välitetään pilvipalvelun kautta junalaitteelta ratalaitteelle VHF-radio-signaalia ja GSM-matkapuhelinsignaalia käyttäen. Huomiovalolaitoksen tekniikka on melko julkista tietoa, vaikka se perustuu osittain Cautio Oy:n omaan kaupalliseen tuotekehittelyyn. (Anttila 2018; Lehto 2017)



Kuva 10 Huomiovalolaitoksen toimintaperiaate.

Huomiovalolaitoksen ja tasoristeysvalolaitoksen ero on siinä, että tällä hetkellä huomiovalolaitoksella näytetään keltaista nopeasti vilkkuvaa valoa rautatiekaluston läheisyydessä tasoristeystä. Muulloin ei näytetä mitään valo-opastetta. Keltainen vilkkuva valo tarkoittaa tieliikenneasetuksen mukaan, että tienkäyttäjän on noudatettava erityistä varovaisuutta tasoristeyksessä, mutta opastimen saa ohittaa, jos se voidaan tehdä turvallisesti. Tasoristeysvalolaitoksella näytetään punaista vilkkuvaa valoa, ja muutaman LED-yksikön avulla kevyttä valkoista vilkkuvaa valo-opastetta muuna aikana. (Anttila 2018)

Punaisen valon näyttämiseen liittyy liikenne- ja viestintäministeriön asetus tieliikenteen liikennevaloista (1012/2001) 5. luvun 29 § ”valoaukkojen sijoitus, tasoristeysvalolaitokselle on siksi haettava aina poikkeuslupa, kun punainen ja valkoinen ovat samassa valoyksikössä”. Toinen tärkeä kohta on 5. luvun 33 §, joka kuvaa, että jos yksikössä on punainen valoyksikkö, punaisen valoyksikön ollessa pimeänä, on näytettävä valkoista valoa. Poikkeuslupien myöntämiseen on tähän mennessä suhtauduttu varovaisesti. Hallituksen eräänä kärkihankkeena oleva norminpurkutavoite voisi onnistuessaan helpottaa kehitystyötä ja edistää uusien tekniikoiden käyttöönottoa. (Anttila 2018)

Huomiovalolaitos ei tarvitse sähköliittymää, vaan se toimii kokonaan akulla ja aurinkopaneeleilla ympäri vuoden. Paikkatietoa on toistaiseksi hyödynnetty vain huomiovalolaitoksessa, ei tasoristeysvalolaitoksessa. Ongelmana on valkoisen vilkun vaatima käyttöenergia, koska talviaikaan aurinkopaneeli ei ehdi päivän aikana ladata akkuja riittävästi. (Anttila 2018)

Huomiovalolaitos on tällä hetkellä ainoa paikkatietoon perustuva tasoristeysturvallisuushanke, joka on konkretisoitunut rataverkolla. Tällä hetkellä muilla laitetoimittajilla ei ole valmiita tai lähes valmiita paikkatietoon perustuvia ratkaisuja olemassa tai kehitteillä. Huomiovalolaitoksen SIL 3 -hyväksyntä valmistunee aivan pian, ja se lisää tuotteen mahdollisuuksia ulkomaankauppaan mm. EU:n talousalueella. (Anttila 2018)

Huomiovalolaitoksen ratalaitetta on käytetty myös ohjaamaan perinteisempiä valo- ja äänivaroituslaitosta sekä puolipuumilaitosta. Tällöin puhutaan ns. integraatiovaroituskäytöstä, jonka toimintaperiaate on täysin sama kuin huomiovalolaitoksessa. Tienkäyttäjän on vaikea huomata eroa perinteisen varoituskäytön ja integraatiovaroituskäytön välillä. Integraatiovaroituskäyttö tehdään siten, että rakennetaan perinteinen varoituskäyttö kokonaan käsiohjatuksi ilman raiteenvapaailmaisjärjestelmää ja suunnantunnistuslogiikkaa yms. Integraatiovaroituskäytön hälytysreleen pitopiiriä ohjaa huomiovalolaitoksen radanvarsiyksikkö. Tasoristeysasetetaan tieosuustunnistin (induktiivinen kalustotunnistin), jonka avulla integraatiovaroituskäytön hälytys voidaan katkaista täsmällisesti, kun rautatiekalusto on kokonaisuudessaan ylittänyt tasoristeysalueen (ns. fiktiivinen tieosuus). Tällaisia laitoksia on tällä hetkellä käytössä neljä Olli-Porvoo-rataosalla, joista kaksi valo- ja äänivaroituslaitosta ja kaksi puolipuumilaitosta. (Anttila 2018)

Tällä hetkelläkin pystyttäisiin jo kehittämään laite, joka käyttäisi esim. Kupla-päätteen, avoimen datan, Virven (viranomaisradioverkon) tai GSM-R:n (rautatiekäyttöön tarkoitettu matkapuhelintaajuusalue) tietoja tasoristeyslaitteen ohjaamiseksi. Yhteydet voivat kuitenkin katkeilla. Viestiverkon kenttäkin katkeilee silloin tällöin, ja muitakin hetkellisiä tiedonkulun katkeamisia tapahtuu. Cautio Oy:n huomiovalojärjestelmässä tämä riski on hallittu siten, että paikkatieto veturista radanvarsilaitteelle välitetään VHF-signaalin avulla. VHF-signaali sisältää rautatiekaluston GPS-koordinaatit,

suuntavektorin ja nopeuden. Mikäli GPS-laite ei saa yhteyttä satelliitteihin, lähtee radanvarsilaitteelle kuitenkin tyhjä VHF-kantoaalto. Radanvarsilaitte huomaa tyhjästä VHF-kantoaallosta, että rautatiekaluston paikka ei ole tarkkaan tiedossa, mutta se on kuitenkin 1–5 km päässä tasoristeuksesta VHF-signaalin kantaman sisällä. Tällaisessa tilanteessa radanvarsilaitte aloittaa hälytyksen heti, kun hälytys muutoin alkaisi noin 30 sekuntia ennen tasoristeukseen saapumista. Näin päästään ns. turvalliseen tilaan muuttamalla varmuusvika hetkelliseksi käyttöviaksi. (Anttila 2018)

VHF-alueen signaali on valittu siksi, että se ei edellytä aivan suoraa näkyvyyttä lähetimen ja vastaanottimen välille, kuten esimerkiksi UHF-alueen signaali, vaan se voi siirtua jonkin verran esimerkiksi kalliioleikkauksista ja muista maastoesteistä edeten kuitenkin perille kohteeseen. HF-alueen signaali olisi tässä vielä parempi, mutta HF-alueella on niin paljon häiriöitä, että niiden aiheuttama interferenssi voisi heikentää signaalia, vaikka signaali pystytään avaamaan matemaattisin menetelmin varsin heikonakin. (Anttila 2018)

Siirrettävä junalaitteen käyttöön liittyy riskejä, jotka voivat vaarantaa järjestelmän toimivuuden ja tasoristeysturvallisuuden. Junalaitte siirretään liikkuvaan kalustoon veturinkuljettajan toimenpiteenä, minkä johdosta inhimillinen virhe, kuten junalaitteen päällekytkennän, akun lataamisen tai koko laitteen unohtaminen voi estää oikea-aikaisen hälytyksen antamisen lähestyessä tasoristeystä. Teknisesti ei ole varmistettu, että tasoristeysalueelle saapuvan liikkuvan kaluston yksiköllä on mukanaan toimiva lähetin eli siirrettävä junalaitte. Tavanomaiset tasoristeysvaroituslaitokset perustuvat aktivointipisteessä sijaitsevaan vikaturvalliseen akselinlaskenta-anturiin tai raidevirtapiiriin, jolloin junan havaitseminen on varmistettu täysin veturinkuljettajan toiminnasta riippumattomasti. Niiden toiminta perustuu junan akselin tuloon tasoristeysalueelle.

Riskin muodostaa myös tilanne, jossa radanvarsilaitte on mennyt täysin pimeäksi. Mahdollisia syitä riskin toteutumiseen ovat mm. käyttöenergian katkeaminen, varakäyntiakkujen tyhjentyminen, ukkosvika ja logiikan toimintahäiriö. Jos radanvarsilaitte ei vastaa veturilaitteelle VHF-signaalin kantaman sisällä, yleensä noin 4–5 km ennen tasoristeystä, veturilaitte antaa valo- ja äänimerkin vetokaluston henkilökunnalle varoitukseksi siitä, että lähestytään tasoristeyslaitetta, jossa on mahdollisesti varmuusvika. Tämän riskin hallinta edellyttää ainoastaan sen, että veturilaitteelle syötetään radanvarsilaitteiden paikat manuaalisesti tai tehdään ns. silitysajo, jossa veturilaitte itse oppii radanvarsilaitteiden paikat, kun reitti ajetaan ensimmäisen kerran läpi. Tällöin varmistetaan, että kaikki radanvarsilaitteet ovat toiminnassa. (Anttila, 2018)

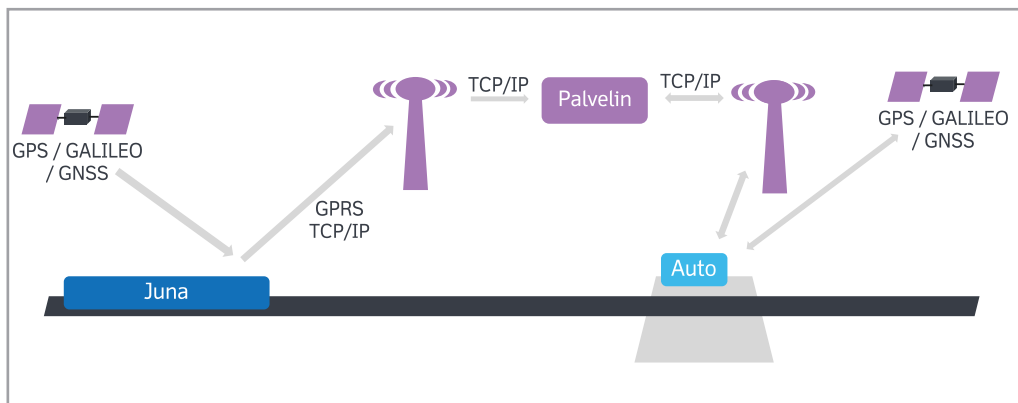
Huomiovalolaittejärjestelmän arvioitu kustannus on 20 000–30 000 euroa yhtä tasoristeystä kohden. Perinteisten puomilaitosten kustannukset alkavat 150 000 eurosta sähkönsyöttöineen ja alikulkujen rakentaminen vähintään 250 000 euroa, joten kustannukset huomiovalolaitteeseen verrattuna ovat noin kymmenkertaiset. (Lehto 2017)

Varoitusvalolaitoksia suositellaan asennettavan lähinnä sivuraiteille ja vähemmän liikennöidyille radoille. Caution huomiovalolaitosta on testattu vain tavaraliikenne-radoilla, joten se voisi toimia turvallisuuden parantamisessa vähän liikennöityjen rataosuuksien tasoristeyksissä alhaisemmilla kustannuksilla. Perinteisen valo- ja äänivaroituslaitoksen hinta on merkittävästi yli 25 000 euroa. Ne tarvitsevat lisäksi yleensä sähkönsyötön ja kaapeloinnit ratalaitteisiin, joilla varoituslaitoksen aktivointi suoritetaan. Caution huomiovalolaitos toimii aurinkokennoilla ja akuilla. Vilkkaasti liikennöidyillä radoilla kuitenkin suositellaan koko- tai puolipuumilaitosten asentamista, jos tasoristeyksen poistaminen ei ole mahdollista. (Silla et al. 2015)

Yhteenvedona paikkatietoon perustuvan tasoristeyksen huomiovalo- ja tasoristeysvalojärjestelmän kehityksen suurimmat haasteet liittyvät varmuusvian riskin hallitsemiseen ja veturinkuljettajan inhimillisen virheen minimoimiseen. Huomiovalolaitteen kehityksen yhteydessä tehtiin pieni kyselytutkimus, johon osallistui lähiseudun asukkaita. Kyselyssä tuli vahvasti esiin se, että tasoristeyksen laitteistojen odotetaan toimivan aina, kun rautatieliikennettä on. Liikenteen turvallisuusviraston kanta on myös ollut se, että tasoristeyslaitteet tulisi suunnitella siten, että ne lähtökohtaisesti toimisivat aina, kun rautatieliikennettä esiintyy tasoristeyksen lähellä. Mikäli näin ei jostakin syystä ole, tilanne ei estä liikennöintiä, mutta edellyttää, että tasoristeystä lähestytään tällöin rautatiekalustolla samoin periaattein kuin jos kyseessä olisi perinteisen varoituslaitoksen toimintahäiriö. (Anttila 2018)

### 3.1.5 VTT, autossa toimiva junavaroitusjärjestelmä Junavaro

Junavaro on VTT:n kehittämä palvelin- ja mobiilisovellusratkaisu autossa toimivalle tasoristeysten junavaroitusjärjestelmälle (Öörni et al. 2011). Järjestelmän tarkoitus on varoittaa tasoristeystä lähestyvän ajoneuvon kuljettajaa tasoristeystä lähestyvistä junista samanaikaisesti. Varoituksen on tarkoitus toimia osana autossa käytettävää mobiilia navigointijärjestelmää.



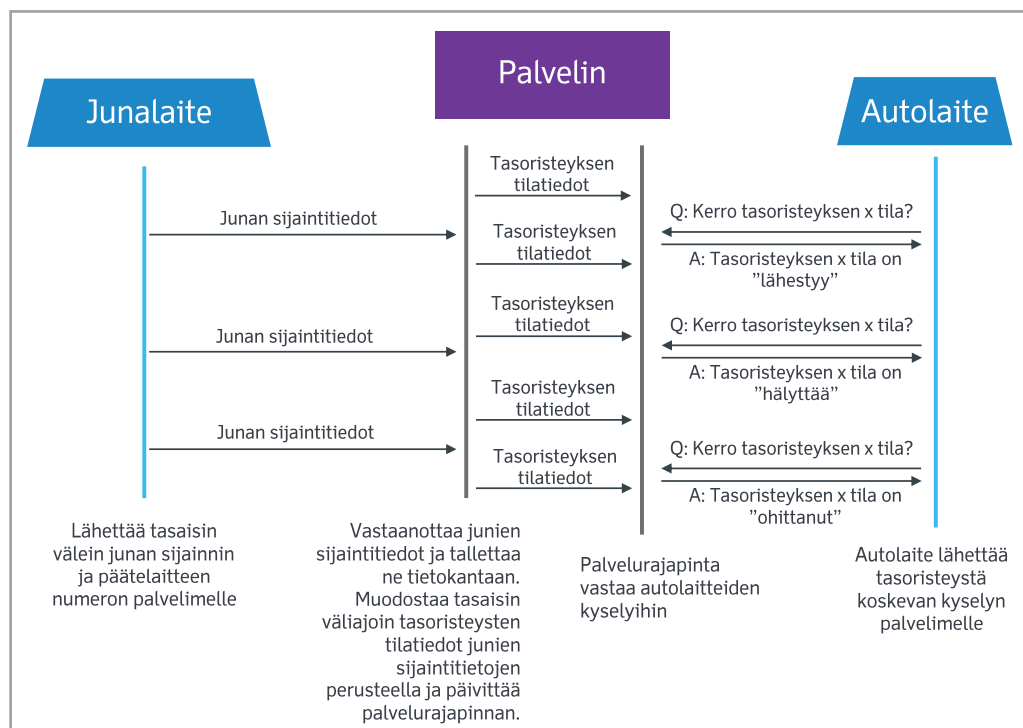
Kuva 11 Autossa toimivan junavaroitusjärjestelmän toimintaperiaate (Öörni 2014).

### 3.1.5.1 Järjestelmäkuvaus

Järjestelmän perustoiminnallisuus on antaa varoitus tasoristeystä lähestyvistä junasta auton tai ajoneuvon kuljettajalle ajoneuvon navigointijärjestelmän kautta. Varoituksen oikea-aikaisuus perustuu staattisiin paikkatietoihin (tasoristeukset) ja satelliittipaikannukseen perustuviin tietoihin. Järjestelmän pääkomponentit ovat:

- Autolaite (mobiili navigointijärjestelmä)
- Junavaro-palvelin (ylläpitää junan sijaintitietoja ja tasoristeysten tilatietoja)
- Junalaite (välittää junan sijaintitiedot palvelimelle)

Ajoneuvolaitteisto tietää tasoristeysten koordinaatit taulukkomuodossa ja laskee jatkuvasti satelliittipaikannustietojen perusteella ajoneuvon etäisyyttä lähimpään tasoristeukseen. Etäisyyden alittaessa ennalta määritetyn raja-arvon ajoneuvolaitteisto lähettää automaattisesti pyynnön Junavaro-palvelimelle. Pyyntö sisältää tasoristeuksen koordinaatit tai numeron, jonka avulla palvelin selvittää tasoristeuksen tilan. Palvelin saa satelliittipaikannustietojen kautta jokaisen junan sijainnin rataverkolla, minkä perusteella se laskee tasoristeuksen tilan ja lähettää vastaavan kuljettajalle välitettävän viestin tai hälytyksen ajoneuvolaitteistolle. (Öörni 2014)



Kuva 12 Junavaro-palvelun sekvenssidiagrammi, muokattu lähteestä (Öörni, et al. 2011).

Mahdollisia kuljettajalle välitettäviä viestejä tai hälytyksiä ovat:

- "Lähestyy"
- "Hälytys"
- "Ohittanut"
- "Tietoa ei saatavilla".

Junan ja auton ollessa riittävän etäällä tasoristeuksesta autolaite saa palvelimelta viestin "lähestyy", jolloin kuljettajaa kehoitetaan varovaisuuteen, mutta vaaraa ei vielä ole. Jos juna lähestyy tasoristeystä ja auto on riittävän lähellä tasoristeystä (alle 200 m), järjestelmä lähettää viestin "hälytys", joka varoittaa kuljettajaa äänimerkillä ja visuaalisesti. Kun juna on turvallisesti ohittanut tasoristeuksen, annetaan kuljettajalle viesti "ohittanut".

Jos junalaite ei pysty lähettämään junan paikkatietoa palvelimelle paikannuksen häiriön tai tietoliikenneyhteyden katkeamisen takia, lähetetään viesti ”tietoa ei saatavilla”. Palvelin tunnistaa silloin paikannustiedon epätarkkuuden ja määrittää mahdolliset rataosat, joilla paikantamattomia yksiköitä voi liikkua. Autolaite varoittaa kuljettajaa, että paikannus on epätarkkaa ja tasoristeyksen tilaa ei voida varmistaa. Järjestelmän eheys on siten varmistettu ja järjestelmän perustoiminnallisuus, eli kuljettajan varoittaminen toteutuu. (Öörni et al. 2011)

### **3.1.5.2 Järjestelmän käytettävyys ja luotettavuus**

Autossa toimivan junavaroitusjärjestelmän on tarkoitus antaa ajantasainen varoitus kuljettajalle, mutta se ei puutu ajotoimintoihin tai liikenteenohjaukseen. Järjestelmä on suunniteltu avustavaksi järjestelmäksi etenkin passiivisissa tasoristeyksissä, joissa ei ole minkäänlaisia turvalaitteita. Järjestelmän ei ole tarkoitus korvata jo asennettuja varoituslaitoksia, vaan toimia kuljettajaa avustavana sovelluksena mahdollisesti vaarallisissa tilanteissa.

Kuljettajaa avustavan järjestelmän luotettavuutta arvioitaessa kiinnitetään huomiota väärrien hälytysten ja toteutumattomien hälytysten määrään, koska nämä voivat vaarantaa järjestelmän turvallisuuden. Mikään järjestelmä ei kuitenkaan toimi täydellisesti, ja myös epätäydellinen järjestelmä voi johtaa turvallisempaan liikennekäyttäytymiseen. Suuri väärrien hälytysten määrä voi kuitenkin johtaa käyttäjän epäluottamukseen järjestelmää kohtaan. (Öörni 2014)

Testeissä vuonna 2011 järjestelmä onnistui saavuttamaan vain 38 % onnistumisen oikea-aikaisille hälytyksille, kun tavoite kuljettajaa avustaville ajoneuvojärjestelmille on 90 %. Väärrien hälytysten määrä sen sijaan oli vain 39,4 %, mikä on selvästi sallitun rajan, 60 % vääriä hälytyksiä, alapuolella. Väärrien hälytysten luokittelu ja sallitun rajan tarkempi estimointi voi vaikuttaa kuitenkin tuloksen luotettavuuteen.

Tietoliikenne Junavaro-palvelimen ja juna- sekä autolaitteiden välillä oli testijärjestelmässä toteutettu vanhoilla GSM- ja GPRS-palveluilla. Uudemmat 3G- ja 4G-tietoverkot eivät vielä olleet käytössä, joten niiden toimintaa järjestelmässä ei ole kokeiltu. Junavaro-palvelinkonseptia on kuitenkin hyödynnetty ESan LeCross-hankkeessa, jota käsiteltiin kappaleessa 3.1.1 VTT:n tavoitteena on laajentaa Junavaro-palvelun käyttöä automaattisiin ajoneuvoihin, jolloin palvelimen tuottama tieto välitetään ajoneuvoille ITS-G5- tai 5G-teknologioilla. Automaattisten ajoneuvojen anturit eivät pysty havaitsemaan vartioimattomissa tasoristeyksissä saapuvaa junaa tarpeeksi etäältä, joten tarvitaan paikannustietoa junien liikkeistä. (Virtanen 2018)

Ajoneuvossa toimivien varoituslaitteiden käytöstä tarvitaan myös empiiristä tutkimusta kuljettajien käyttäytymisestä, koska kyseessä on erityisesti autonkuljettajille ja tienkäyttäjille suunniteltu järjestelmä. Tutkimustiedosta varoitusjärjestelmän vaikutuksesta tienkäyttäjän käyttäytymiseen voitaisiin tehdä tarkempia päätelmiä käyttäjien tarpeista, säätää parametrien arvoja ja parantaa järjestelmän turvallisuutta ja luotettavuutta. (Öörni 2014)



### 3.1.6 UIC, SAFER-LC

SAFER-LC on UIC:n koordinoima selvitys tasoristeysten turvallisuuden parantamisesta. Selvityksessä on mukana UIC:n lisäksi Euroopasta 16 eri yhteistyökumppania, joista Suomesta on mukana VTT. Tutkimus on alkanut toukokuussa 2017, ja sen kesto on 36 kuukautta. (UIC 2017)

Selvitystyön tavoitteena on tutkia uusimpia valvontateknologioita ja mobiileja viestintäteknologioita innovatiivisten teknologisten ratkaisuiden löytämiseksi. Teknologisten ratkaisuiden lisäksi keskitytään myös inhimillisten tekijöiden rooliin tasoristeystonnettomuuksissa tienkäyttäjän näkökulmasta. SAFER-LC-selvitys kokoaa yhteen suosituksia ja ohjeita tasoristeysten suunnitteluun ja hallintaan.

Selvitystyön lopputuotteena on julkinen SAFER-LC ”työkalupakki”, joka sisältää kaikki ohjeet, spesifikaatiot ja suositukset helpon käyttöliittymän alla. Työkalupakki on tarkoitettu rataverkon haltijoille ja tienpitäjille tasoristeysten turvallisuuden suunnitteluun ja parantamiseen.

## 3.2 Satelliittitietojen hyödyntäminen liikenteenohjauksessa tai -paikantamisessa

Seuraavissa kappaleissa käsitellään satelliittipaikannuksen ja -kommunikaation hyödyntämistä yleisesti junaliikenteen ohjauksessa tai raideliikenteen turvallisuuden parantamisessa.

### 3.2.1 Alstom, LOCOPROL

LOCOPROL-projekti (engl. LOw COst satellite based train location system for signaling and train PROtection for low density traffic railway Lines) on Alstom Transportin, ja sen yhteistyökumppaneiden, toteuttama ja Euroopan komission tukema hanke, joka päättyi vuonna 2005 (Rousseau & Cadet 2006). Projektin tuote on innovatiivinen ja edulliseksi tarkoitettu satelliittipalveluihin perustuva turvalaitejärjestelmä, joka täyttää keskimääräisesti liikennöityjen ratalinjojen toiminnalliset käyttötarpeet ja turvallisuusvaatimukset. Taustalla on päälinjoilla käyttöönotettavaa ERTMS-järjestelmää vastaavan kevyemmän ja edullisemmän järjestelmän tarve vähemmän liikennöidyillä linjoilla. Tavoite on saman turvallisuustason saavuttaminen. (Rousseau & Cadet 2006)

LOCOPROL-järjestelmä perustuu aikansa kaikkein kehittyneimpien paikannusalgoritmien soveltamiseen rautatiejärjestelmässä. Turvallinen, SIL 4 -tason vaatimukset täyttävä paikannus, on mahdollista käyttäen signaaleja GPS-satelliittien konstellaatiosta sekä Glonass- ja paikannusta tarkentavasta EGNOS-järjestelmistä. Paikkatietoja näistä järjestelmistä käytetään positiiviseen junaohjaukseen eli PTC:hen (engl. *Positive Train Control*), jossa jokainen juna tietää oman sijaintinsa ja lähettää sen liikennekeskukseen. (Rousseau & Cadet 2006)

LOCOPROL-turvalaitejärjestelmään voidaan liittää lisäosia mm. tasoristeysten hallintaan, ratatyön suojaamiseen ja kunnossapidon valvontaan. (Rousseau & Cadet 2006)

### 3.2.1.1 1D-paikannusalgoritmi

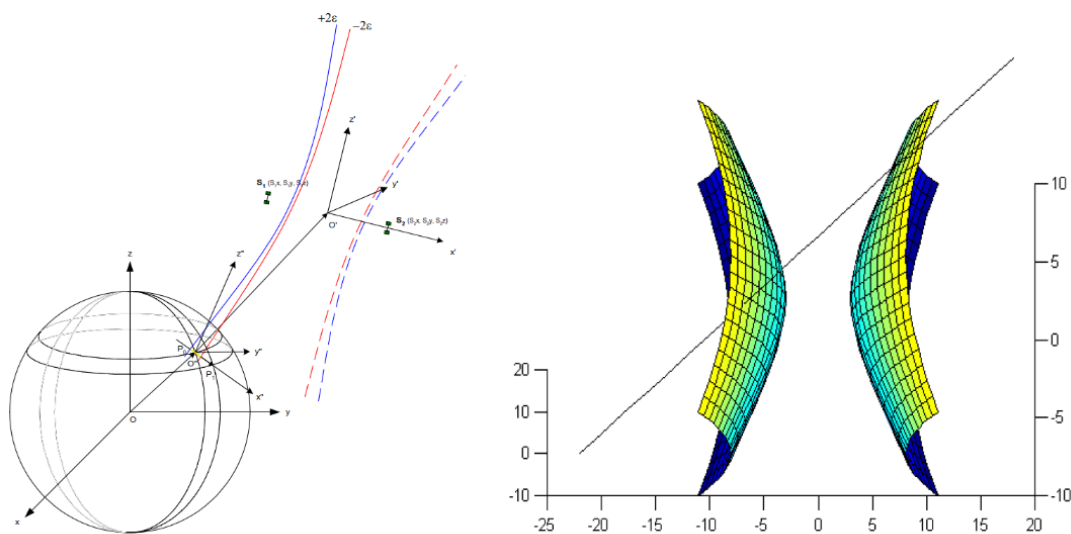
LOCOPROL-projekti pyrki raiteen vapaanaolon valvontaan ja junien paikannukseen perinteisesti käytettyjen ratalaitteiden vähentämiseen satelliittipaikannusta hyödyntäen. Vähän liikennöidyillä rataosilla voidaan näin saavuttaa kustannussäästöjä vähemmän infrastruktuurin ja turvalaitejärjestelmäkomponenttien osalta.

Sovelluksessa käytettävä algoritmi eroaa tavallisesta GPS-paikannuksessa käytettävästä paikannusalgoritmista. Täyttääkseen rautateiden tiukat turvallisuusvaatimukset, järjestelmän ja paikannuksen laskentaa kevennetään yksinkertaistamalla paikannusjunien yhteen liikkuvuuden vapausasteeseen. Junan liikkuminen on rajoitettu raiteen mukaisesti, ja sen paikka määräytyy etäisyyden mukaan radan suunnassa. Järjestelmän laskenta rajoittuu silloin yksiulotteiseen tilanteeseen. (Rousseau & Cadet 2006)

Järjestelmän algoritmi käyttää usean satelliittiparin kombinaatioita. Yksi satelliittipari pystyy määrittämään paikannuksen pistejoukon hyperboloidina avaruudessa. Tämän hyperboloidin ja radan määrittelemän yhtälön leikkauspiste määrittää välin, jolla juna voi sijaita. Kuuden leikkauspisteen yhdistelmä (4 satelliittia ja 6 paria) antaa luotettavan arvion junan sijainnille. Paikannuksen tulos on väli, jolla junan perä ja keula voivat varmasti sijaita.

Algoritmin kehityksessä painopisteenä on ollut raideliikenteen turvallisuusmääräysten ja SIL 4 -tason vaatimusten täyttäminen. Siten LOCOPROL-järjestelmän paikannuksen tarkkuus ja saatavuus poikkeavat klassisten GPS-järjestelmien arvoista.

Järjestelmän toimintaa voidaan parantaa pelkän yksiulotteisen paikannuksen lisäksi ottamalla huomioon junan maksimikihtyvyys ja viimeksi laskettu nopeus. Tällöin paikannuksen väliä voidaan ekstrapoloida, kun paikannuksen tarkkuus ei ole riittävä esimerkiksi peittoalueilla. Satelliittipaikannus on saatavilla vain, kun riittävä määrä satelliitteja on saavutettavissa. Muuten ottamalla junan liike huomioon voidaan määrittää turvallinen väli junan sijainnille peittoalueilla. (Libbrecht & Stuesson 2005)



Kuva 13 LOCOPROL-järjestelmän satelliittiparien paikannusperiaate (Libbrecht & Stuesson 2005).

### 3.2.1.2 Järjestelmä ja testikäytöt

LOCOPROL-järjestelmän pilottisovellus keskittyy vähäliikenteisille rataosuuksille, joilla junavälit eivät ole kriittisiä. Järjestelmän ideana on vähentää kalliiden ulkolaite-elementtien määrää ja samalla saavuttaa riittävä turvallisuustaso koko järjestelmälle. Tavoitteiden saavuttamiseksi järjestelmä rakentuu seuraaviin komponentteihin ja viestintäyhteyksiin:

- Satelliittipaikannukseen perustuva positiivinen junaohjaus
- ”Suojastuskapula”-periaatteella toimivat asetinlaite- ja JKV-toiminnot
- Epäjatkuva ja avoimen verkon radiolinkki veturilaitteiden ja ratalaitteiden välillä
- Järjestelmän eri moduulien välisten turvallisuusviestien vähennetty määrä ja koko

Järjestelmän viestintäyhteytenä on käytetty julkisia mobiiliviestiyhteyksiä, kuten GSM- tai GPRS-yhteyksiä. Käyttämällä avointa verkkoa, eikä tarkoitukseen kehitettyä suljettua verkkoa, kuten GSM-R:ää on saatu merkittäviä kustannushyötyjä. Testikäytöissä on tutkittu myös LOCOPROL-järjestelmän ja ERTMS/ETCS-järjestelmien yhteensopiavuutta, ja pienillä muutoksilla on mahdollista operoida ERTMS-junaa LOCOPROL-radalla. (Rousseau & Cadet 2006)

Järjestelmän turvallisuusanalyysissä on todettu LOCOPROL-opastinjärjestelmän tarvitsevan vähintään fyysisiä, passiivisia eurobaliiseja asemien lähistöllä korvaamaan satelliittipaikannuksen puutteita ja epävarmuutta (Lemaire 2005). Järjestelmän nykyisestä tilasta ei ole tietoa, pystytäänkö vähäliikenteisillä radoilla hoitamaan suojastus kokonaan satelliittipaikannuksella tai ”virtuaalisilla baliiseilla”.

LOCOPROL-projekti päättyi vuonna 2005, mutta sen tuloksia on hyödynnetty muissa tutkimuksissa ja sovelluksissa sen jälkeen.

### 3.2.2 Saksan ilmailu- ja avaruuskeskus (DLR), junien törmäyksen estojärjestelmä (RCAS)

RCAS (engl. Railway Collision Avoidance System) on Saksan ilmailu- ja avaruuskeskuksessa (DLR, saks. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) vuosina 2007–2009 kehitetty junien törmäyksen estojärjestelmä. RCAS hyödyntää junien paikan ja nopeuden määrittämiseen satelliittipaikannussignaalia ja veturiin asennettavaa anturijärjestelmää, josta saadaan tietoa junan ympäristöstä. Järjestelmä koostuu vain mobiileista juniin asennettavista komponenteista, eikä rатаinfrastruktuuriin tarvitse tehdä muutoksia. (Strang et al. 2006)

Järjestelmän perustoiminta perustuu merenkulussa ja lentoliikenteessä käytettyihin apujärjestelmiin (TCIS ja AIS). Liikkuvien yksiköiden paikasta, nopeudesta ja kiihtyvyydestä välitetään tietoa reaaliaikaisesti järjestelmään ja muille yksiköille, jolloin ajoneuvolaitteet voivat määrittää paikkansa muihin yksiköihin nähden. Raideliikenteessä RCAS-järjestelmän törmäysuhan laskenta on kuitenkin yksinkertaisempaa kiskojen määrittämisen junien liikkeen ansiosta. Yksiulotteisessa tasossa väistöliikkeitä ei ole mahdollista tehdä, paitsi kohtauspaikoilla, ja jarrutus on ainoa mahdollinen keino välttää törmäys.

RCAS-järjestelmään voidaan lisätä junien törmäyksen ja sivusuojien valvonnan lisäksi taseisteysten tilan ja vapaanolon valvonta, radan esteiden havaitsemisjärjestelmä, rautatyön turvaamisen järjestelmä ja tavarajunien kuorman ulottuman valvontajärjestelmä. (Strang et al. 2006)

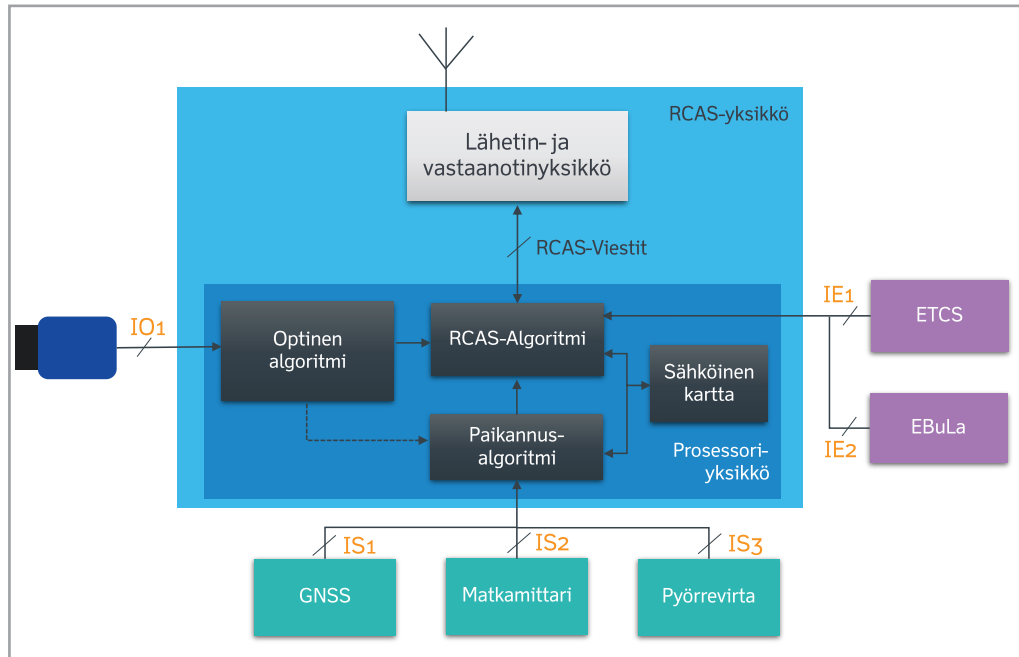
### **3.2.2.1 Järjestelmän kuvaus**

Törmäyksenestojärjestelmään liitetyillä rataosilla liikkuva yksiköt varustetaan RCAS-laitteella. Yksiköt voivat olla junia, kiskoilla liikkuvia työkoneita tai teillä liikkuvia ajoneuvoja. RCAS-laitteella varustettu yksikkö lähettää tietoa paikastaan, nopeudestaan ja kulkusuunnastaan, sekä vastaanottaa muiden yksiköiden lähettämää tietoa. RCAS-prosessori vertaa siten vastaanotettua tietoa ja paikannussignaalia ja potentiaalisia törmäys- ja uhkatilanteita.

Paikannukseen on suunniteltu käytettävien GNSS-palveluita, etenkin GALILEO:ta, jota voidaan tehostaa paikallisilla tai globaaleilla peittopalveluilla riittävän paikannustarkkuuden saavuttamiseksi. Myös muiden paikannusmenetelmien kuten mobiiliverkkojen (5G) hyödyntämisellä pystytään turvaamaan paikannuksen saavutettavuus myös tunneleissa ja peitteisillä alueilla. Junan kulkeman raiteen tunnistaminen kaksitai useampiraiteisilla radoilla vaatii senttimetrin paikannustarkkuutta, mikä on satelliittitietoa hyödyntämällä vaikeaa. Turvallisuuden parantamiseksi raideinformaatio voidaan ottaa ratalaitteista kuten baliiseista. (Strang et al. 2006)

Satelliittipaikannuksen tueksi järjestelmään voidaan liittää sähköinen reittikartta ja aikataulu, kuten saksalainen EBU (saks. Elektronischer Buchfahrplan und Langsamfahrstellen), jolloin junan reitti voidaan arvioida turvalliseksi pitkälle eteenpäin. Reittikartan mukaan junan kulkema matka voidaan määrittää myös pyöräsensoreilla, odometrillä (matkamittarilla). Kulunvalvontajärjestelmästä, kuten ETCS-järjestelmästä, voidaan saada myös lisäinformaatiota junan reitiltä, kuten baliisien sijainteja ja sallittuja nopeuksia. Junan reittitieto lähetetään myös muille RCAS-laitteille, ja ne voivat määrittää reitin turvallisuuden reittitiedon mukaan.

RCAS-laite monitoroi myös edessä olevaa rataa reaaliaikaisesti junan keulaan asennetun kameran avulla. Automaattinen hahmontunnistusalgoritmi tunnistaa potentiaalisia uhkia radalla ja välittää tietoa RCAS-prosessorille. Videokuvan kantama on kuitenkin rajattu, joten todellisissa törmäystilanteissa reaktioaika on hyvin lyhyt, koska jarrutusmatkat ovat pitkiä. Kameralla voidaan kuitenkin tunnistaa radan tai ympäristön normaalista poikkeavia tilanteita ja välittää näin tietoa muille RCAS-laitteilla varustetuille junille, jotka voivat käyttää tietoa uhka-arvion laskemiseen. (Strang et al. 2006)



Kuva 14 RCAS-junalaitteen lohko-kaavio, muokattu lähteestä (Strang, et al. 2006).

Tasoristeyssovelluksissa pelkkä RCAS-laitteen keräämä tieto ei riitä, vaan sen täytyy saada tietoa reitillä olevan tasoristeyksen mahdollisen varoituslaitoksen tilasta ja vaara-alueen (tieosuuden, puomien välisen alueen) vapaanaolosta. Tämä voidaan todentaa tutkatekniikalla, induktiosilmukoilla, paikallisilla valvontakameroilla tai satelliittipaikannuksella. Ideaalitulanteessa tasoristeystä käyttävät ajoneuvot on myös varustettu RCAS-ajoneuvolaitteella, jolloin ne voivat suoraan keskustella junien RCAS-laitteiden kanssa. (Strang et al. 2006)

### 3.2.2.2 Intelligence on Wheels

Onnistuneen RCAS-tutkimusprojektin jälkeen DLR kehitti RCAS-järjestelmästä teollisen tuoteratkaisun ja palvelun. DLR:ssä työskennelleet ilmailu- ja avaruusteknologian asiantuntijat perustivat sivuyhtiön erillään DLR:stä RCAS-tekniikan kehittämiseksi ja tuotteistamiseksi. Yhtiön nimi on nykyään ”Intelligence on Wheels” (IoW). (Intelligence on Wheels 2018)

Yhtiön päätuote on RCAS eli junien törmäyksenestojärjestelmä pienille ja keski-suurille rautatieliikenteen harjoittajille. Törmäyksenestojärjestelmä ei vaadi muutoksia ratojen tai turvalaitteiden infrastruktuuriin, vaan kaikki komponentit asennetaan vetureissa kulkeviin moduuleihin. Järjestelmän tarkoitus on nostaa liikennöitävän radan turvallisuustasoa, mutta ei korvata nykyisiä turva- tai junaohjausjärjestelmiä. Järjestelmällä voidaan estää junien yhteentörmäykset, mutta myös ratatyön turvaaminen on mahdollinen lisäsovellus. Tasoristeyskiä turvaavaa laitteistoa ei ole vielä kehitetty. (Intelligence on Wheels 2018)

### 3.2.3 Ansaldo STS, juniin integroitu satelliittiturvallisuusjärjestelmä ja avaruus-pohjaiset palvelut rautateiden opastinjärjestelmille

Vuonna 2014 italialainen Ansaldo STS -rautatieturvalaitevalmistaja käynnisti ESAn tukemana 3InSat-projektin uuden satelliittipohjaisen junaohjausjärjestelmän kehittämiseen ja sen toiminnan varmistamiseen. Kehitysprojektin taustalla oli eurooppalaisen junaliikenteen hallintajärjestelmän (ERTMS) käyttöönotto ja siihen liittyvät korkeat investointikustannukset johtuen investoinneista rataanfrastruktuurin ja vetokaluston turvalaitteisiin. Tarkoituksena oli kehittää järjestelmä, joka hyödyntää satelliittipaikannusta ja -kommunikaatiota junien ohjauksessa ja liikenteenhallinnassa. Juniin asennettavilla satelliittivastaanottimilla ja -lähettimillä pyritään korvaamaan perinteisiä raiteen vapaanaolon valvonnassa ja junien kulunvalvonnassa käytettyjä ratalaitteita, kuten raidevirtapiirejä, akselinlaskijoita ja baliiseja. (ESA 2016)

Kehitetty järjestelmä koostuu junaan asennettavasta sijainnin määrittäjäjärjestelmästä LDS (engl. Location Detection System), satelliittipaikannus- sekä satelliittikommunikaatioantenneista. Lisäksi junassa sijaitsee telekommunikaatiomoduli, joka hyödyntää 3G- tai 4G-verkkoja ja TETRA-viranomaisverkkoa. Tutkimusprojektissa kehitetty järjestelmä täyttää CENELEC:in rautateiden turvallisuusnormit ja paikannusjärjestelmän sallittu varmuusvikataajuus THR (engl. Tolerable Hazard Rate) on johdettu ERTMS/ETCS-tason 2 riskianalyysin mukaisesti. Junien sijainnin määrittäjäjärjestelmä LDS (engl. Location Detection System) toteuttaa SIL 4 -tason mukaisen paikannuksen käyttämällä useita satelliittivastaanottimia ja junalaitteilta saatavaa informaatiota (esim. matkamittari). Paikannustarkkuuden ja luotettavuuden varmistamiseksi käytetään täydentäviä järjestelmiä (esim. EGNOS) ja paikannusjärjestelmän integriteetin monitorointia. Junalaitteen vastaanotin tarkkailee myös junassa sijaitsevan järjestelmän integriteettiä edelleen paikannusvirheiden poistamiseksi. 3InSat-järjestelmää on testattu onnistuneesti Italiassa, Sardiassa helmikuussa 2016. (ESA 2016)

ESAn tukema SBS-Rails-projekti (ESA 2017) oli lokakuussa 2017 päättynyt käytettävyyttutkimus satelliittipaikannuksen hyödyntämisestä ERTMS-järjestelmien täydentämisessä ja kehittämisessä. Tutkimuksen pääkohde on tutkia *virtuaalisten baliisien* toteuttamista satelliittipaikannusjärjestelmien avulla. ERTMS-periaatteiden mukaisesti junan paikan määrittäminen ja ohjaus tehdään edelleen baliisien ja niihin liitettyjen toimintojen mukaisesti, mutta fyysiset baliisit voidaan korvata virtuaalisten baliisien lukulaitteella. Lukulaite paikantaa junan käyttäen satelliittipaikannusjärjestelmiä ja vertaa saatua paikkatietoa ennalta määrättyihin virtuaalisten baliisien sijainteihin. Kun juna ajaa paikan yli, jossa virtuaalinen baliisi sijaitsee, lähetetään junalaitteistolle sijaintia vastaavan baliisin sanoma.

Ylläolevaan tarkoitukseen ei riitä kuitenkaan pelkkä GNSS-satelliittivastaanotin, jolla voidaan hyödyntää jotain yleistä GNSS-järjestelmää. Tarkkuuden, paikkatiedon eheyden ja paikannuksen saatavuuden kannalta on tärkeää käyttää myös jotain satelliittipaikannusta täydentävää järjestelmää, joko alueellista satelliittipohjaista parannusjärjestelmää (SBAS, engl. satellite based augmentation system), kuten EGNOS:ta, tai paikallisia maassa sijaitsevia parannusjärjestelmiä. (Brunetti & Ravera 2017)

## 3.3 Ulkomaisten rautatietoimijoiden käyttämät ratkaisut

### 3.3.1 Saksa (Deutsche Bahn, DB)

Saksan rataverkolla ei käytetä lainkaan satelliittipaikannusta tasoristeyssovelluksissa, koska satelliittipaikannus mielletään epäluotettavaksi ja turvallisuustasoltaan riittämättömäksi turvallisuuskriittisissä sovelluksissa. Saksassa on tiukat hyväksyntämenettelyt ja turvallisuustason vaatimukset tasoristeysten varoituslaitosten käyttöön-otolle, joten satelliittipaikannukseen perustuvia järjestelmiä ei ole lähdetty edes kehittämään. Ideatasolla Saksan rautateiden Deutsche Bahn AG:n infrastruktuuriyhtiön DB Netz AG:n asiantuntijoiden mukaan voisi käyttää GPS-paikannukseen perustuvaa mobiilisovellusta, jolla tienkäyttäjät voivat ilmoittaa sijaintinsa ja pyytää ”ylityslupaa” tai tietoa lähestyvistä junista tasoristeyksessä. Toinen vaihtoehto voisi olla lähettää suoraan asetinlaitteelta saatua tietoa junien sijainnista mobiiliverkon kautta. (Schubert et al. 2018)

DB Netz AG käyttää kuitenkin erästä Siemensin AG:n valmistamaa tasoristeysvaroituslaitosjärjestelmää, joka hyödyntää akselinlaskijoita tai induktiosilmukoita tasoristeuksen herätepisteessä junan havaitsemiseen. Järjestelmän toimintaperiaate on hyvin samanlainen CGI:n kehittämän SAT-LX-järjestelmän kanssa. Herätepisteen akselinlaskentapiste tai induktiosilmukka on yhdistetty aurinkovoimalla tai vara-akulla toimivaan ratalaitteeseen, joka lähettää tiedon junan saapumisesta tasoristeuksen puomitai valovaroituslaitokselle. Siemens käyttää ratalaitteen ja varoituslaitoksen väliseen viestintään radiosignaalia, mikä on luotettavampi yhteys verrattuna SAT-LX:n satelliittikommunikaatiolinkkiin. Kaapelointia ei tarvita kummassakaan järjestelmässä hälytyksen käynnistyspisteelle, jos hälytyspisteen toiminta voidaan toteuttaa akkukäyttöisenä aurinkokennosyötöllä. Järjestelmä myös optimoi tasoristeuksen varoitusaikaa laskemalla junan nopeuden perusteella ajan, jonka jälkeen tasoristeyslaitos alkaa hälyttää. DB:n rataverkolla on näitä Siemensin toteuttamia järjestelmiä käytössä n. 50 kappaletta. (Schubert et al. 2018)

Autossa toimivan junavaroitusjärjestelmän käyttöä on myös tutkittu DB Netz AG:llä. Saksalainen autoteollisuuskonserni Daimler AG on kehittänyt auton navigointijärjestelmään kytketyn junavaroitusjärjestelmän, jonka toimintaperiaate on samanlainen kuin VTT:n kehittämällä Junavaro-sovelluksella. Järjestelmä laskee etäisyyttä lähimpään tasoristeykseen ja hakee lähistöllä ajavien junien paikkatietoja. Varoitus annetaan oikea-aikaisesti kuljettajalle junan ja auton nopeuden mukaan. Järjestelmässä on myös mahdollisuus V2X-kommunikaatioon (auton ja minkä tahansa järjestelmän välisen viestinnän, engl. Vehicle-to-Everything) auton ja radan tai tasoristeuksen järjestelmien välillä.

Autossa toimivaa varoitusjärjestelmää ei ole kuitenkaan otettu virallisesti käyttöön, koska DB Netz AG:n käsityksen mukaan navigointijärjestelmän seuraaminen vie kuljettajan huomion pois tiestä ja radasta. Kuljettaja saattaa luottaa sokeasti varoitusjärjestelmään eikä havainnoi itse junia, mikä johtaa vastaavasti onnettomuuksiin. Autonvalmistajilla on kuitenkin intressejä toteuttaa tasoristeysten varoitusjärjestelmä osana auton integroitua navigointijärjestelmää (VW, Audi, BMW, MB, käytössä on NAVISYSin karttapohjat). Tämä on tarkoitus toteuttaa siten, että auton lähestyessä tasoristeystä antaa navigaattori varoituksen tasoristeyksestä kuten useimmat

navigaattorit antavat hälytyksen nopeusvalvontakameroista. Navigaattori ei kuitenkaan varoita mahdollisista junista, joten tähytysvelvollisuus on auton kuljettajalla. Lisäksi esille tuli sovellus, jossa autosta lähtisi hälytys lähestyvään junaan, jos auto olisi jäänyt tasoristeyksen päälle. (Schubert et al. 2018)

Uusinta tasoristeystekniikkaa DB Netz AG:llä on markkinoille tulossa oleva Siemensin kehittämä Wayguard DLX -järjestelmä. Järjestelmässä koko tasoristeyksen tekniikka ja logiikka ovat sisäänrakennettu varoituslaitoksen toiseen puomikäntölaitteen koteloon, jossa on myös puomien ja valojen ohjaus. Kaapelointikustannukset ovat siten vähäiset sekä akku- ja valokennotoiminta on ilmeisesti mahdollista hälytyksen käynnistyspisteessä. Laitteiston virransyöttö ja akut ovat toisessa puominkäntölaitteen kotelossa. Tuotteella on akkukäytössä 4 h varakäyntiaika. (Schubert et al. 2018)

### 3.3.2 Tanska (Banedanmark)

Tanskan rautateillä on käynnissä koko rataverkon laajuinen asetinlaitteiden uusiminen ja junien kulunvalvontajärjestelmän päivittäminen ERTMS/ETCS-järjestelmään (taso 2, perusversio 3). Tasoristeysten ohjaus ja hälytysten antaminen on suunniteltu myös tapahtuvan pelkästään ETCS-kulunvalvonnan, paikkatiedon ja asetinlaitteelta saatavan tiedon mukaan. Tasoristeyksen hälytyksen herätepisteinä ei ole enää siten akselinlaskijoita tai raidevirtapiirejä. (RailEngineer 2016)

Liikenteenohjausjärjestelmä tarkistaa onko reitillä tasoristeystä, kun juna pyytää ajolupaa. Jos junan reitillä on tasoristeys, liikenteenohjausjärjestelmä aktivoi tasoristeyksen ja antaa junalle ajoluvan pisteeseen hieman ennen tasoristeystä. Ajolupaa jatketaan, kun tasoristeyksen aktivointi on päättynyt ja puomit ovat varmistetusti alhaalla.

Järjestelmän täytyy myös ottaa huomioon mahdollisen toisen junan saapuminen tasoristeykseen ja tieosuuden vapaanaolon valvonta. Myös pimeät radioalueet ja odottamattomat tilanteet, kuten junan kiihdyttäminen ennen tasoristeystä täytyy huomioida. Järjestelmä ei ole vielä käytössä, mutta testikäytöt osoittavat miten tasoristeyskäyttöä voidaan ohjata ERTMS-järjestelmissä. (RailEngineer 2016)

### 3.3.3 Japani (JR East)

Itäisen Japanin rautatieyhtiön JR Eastin (engl. East Japan Railway Company, jap. 東日本旅客鉄道株式会社) hallinnoimalla rataverkolla on tasoristeyskäyttöä 6987 kappaletta. Kaikki tasoristeyskäytöt sijaitsevat konventionaalisella radalla, jota JR Eastin alueella on 6339 km. Lisäksi JR East hallinnoi 1134 km *Shinkansen*-suurnopeusrataa, mutta näillä linjoilla ei ole tasoristeyskäyttöä junien huippunopeuden ollessa 320 km/h. (JR East 2016)

Kaikki JR Eastin tasoristeysten turvalaitteet toimivat nykyisin automatiikalla. Tasoristeysten varoituslaitosten tekniikka jakautuu seuraavasti:

- Puomivaroituslaitoksia 6279 kpl
- Valovaroituslaitoksia 208 kpl
- Ei mitään turvalaitteita 500 kpl.



Puomivaroituslaitoksissa hälytysaika on 36 sekuntia. Neljän sekunnin jälkeen puomit alkavat laskeutua, ja laskeutuminen kestää kuusi sekuntia. Pienin täydellinen sulkuaika puomeille on 20 sekuntia ennen junan saapumista tasoristeykseen. Laajoilla ratapihoilla hälytysaikaa säädetään baliisityyppisillä ratkaisuilla, jolloin ylimääräisiä suojaopastimia ei tarvita laitureiden ja tasoristeysten välissä. Useissa tasoristeyksissä on myös tien käyttäjille tarkoitettu painike, jolla voi ilmoittaa tasoristeyksen varatuksi. (JR East 2016)

Erilaisia valvontalaiteratkaisuja käytetään myös varoituslaitosten yhteydessä. Puomilaitoksissa puomien välisen alueen vapaanoilo valvotaan tutkatekniikalla. Rataosuuden lisäksi valvotaan myös aina tasoristeykseen kuuluva tieosuus. Tieosuuden vapaanaolon valvontaan käytetään erilaisia ratkaisuja:

- Induktiosilmukat maassa tieosuudella (500 kHz taajuudella)
- Laservalokennot koko alueella. Etuina laseria käytettäessä huono sää ei estä näkyvyyttä kuten perinteisillä valokennoilla.
- Kolmedimensionaalinen lasertutka.

Kolmedimensionaalinen lasertutka on yleistynyt viime vuosina, koska sen avulla voidaan havaita myös henkilöt puomien välissä ajoneuvojen lisäksi. Lisäksi sen etuja ovat myös helppo asennus ja kunnossapito. Lumen ei pitäisi haitata toimintaa. Tutka skannaa koko tasoristeyksen 0,5 sekunnissa, jonka aikana otetaan 50 näytettä radansuuntaisesti ”viipalekuvauksena”.

Japanissa on käytössä radiokommunikaatioon perustuva junien kulunvalvontajärjestelmä ATACS, joka vastaa ETCS-tasoa 3. ATACS-pohjaisesti voidaan ohjata myös tasoristeyksiä, jolloin hälytyksen aloituspyyntö, hälytys ja hälytyksen katkaisu tapahtuvat ATACS-järjestelmän ohjaamana. Varoitusaika on ATACS-ohjatuissa tasoristeyksissä noin 22 % pienempi verrattuna perinteisiin tasoristeyksiin johtuen optimoidusta hälytysajan laskennasta. (JR East 2016)

Tasoristeysten määrä Japanissa on vähentynyt 16 % vuosien 1988–2014 välillä, jolloin onnettomuudet ovat vähentyneet samaan aikaan 82 %. Vuonna 1987 sattui 247 onnettomuutta ja 2014 vain 44 onnettomuutta tasoristeyksissä. (JR East 2016)

Japanilaisen tutkimuksen mukaan tasoristeysonnettomuuksien syistä 60 % johtui autoilijoiden pyrkimyksistä ehtiä ylittää tasoristeys, vaikka hälytys on jo käynnissä. Onnettomuuksista 20 % johtui ajoneuvojen pysähtymisistä tasoristeysalueelle joko liikenneuhkan, tasoristeyskannelta putoamisen tai moottorivian johdosta. Loppuihin 20 % olisi ollut mahdollista vaikuttaa paremmalla tasoristeysturvalaitetekniikalla. Tasoristeysten tieosuuden tai puomien välisen alueen vapaanaolon valvonnalla (tutkat, laservalokennot yms.) voidaan vaikuttaa em. tilaston mukaan onnettomuuksista 80 %:iin. Ajoneuvon ollessa jäänyt tasoristeyksen puomien väliin juna pyritään pysäyttämään ennen tasoristeystä. (Hirao 2006)

### 3.3.4 Alankomaat (ProRail)

Alankomaiden ratainfrayhtiölle ProRail bv (holl. besloten vennootschap met beperkte aansprakelijkheid, suom. rajavastuuyhtiö) tätä selvitystä varten tehdyn kyselyn mukaan Alankomaiden rataverkolla ei käytetä satelliittipaikannukseen perustuvia tasoristeysvaroituslaitoksia tai -järjestelmiä. Suunnitelmissa ei ole myöskään ottaa käyttöön kyseisiä järjestelmiä lähitulevaisuudessa.

Ainoa ei-perinteinen tasoristeyslaitteisto, jota ProRail käyttää vain radan turvalaitteilla varustamattomilla ratalinjoilla, on BUES 2000 -järjestelmä Scheidt & Bachmann-yhtiöltä. Laitteisto on käytössä vain tavaraliikennereadoilla, joilla maksiminopeus on 40 km/h, kuten satamaradoilla. BUES 2000 -järjestelmän toiminta perustuu induktiosilmukan käyttöön. Junat pysähtyvät aina ennen tasoristeystä silmukan kohdalla, mikä aktivoi tasoristeuksen.

### 3.3.5 Australia (Sydney Trains)

Australian rataverkolla GNSS-paikannusta ei myöskään ole tutkittu laajasti aktiivisten tasoristeysten korvaajana. Pääsyy tähän on GNSS-signaalin katoaminen joillakin alueilla kokonaan, jos käytettävän paikannusjärjestelmän peitto ei riitä ja joillakin Australian alueilla ei ole esimerkiksi GPS-peittoa ollenkaan.

GPS-paikannussignaalia käytetään kuitenkin vähäliikenteisten ratojen liikenteenohjauksessa (engl. Train Order Working). Watchdogilla varustettua GPS-paikannusta käytetään junan paikantamiseen sen liikkumislupa-alueella perusteella. Watchdog hälyttää, jos GPS-signaali katoaa tai juna ylittää liikkumislupansa. Väärien hälytysten vähentämiseksi watchdogin pitää tietää alueet, joilla ei ole GPS-peittoa ja odottaa tietty aika, että juna saa taas yhteyden GPS-satelliittiin. Paikannuksessa huomioidaan oletettu ajoaika virhemarginaaleineen.

### 3.3.6 Yhdysvallat (Xorail)

Yhdysvalloissa on noin 212 000 tasoristeystä, joista 36 % (yli 76 000) on ilman minikäänlaista teknistä turvalaitteistoa. Tasoristeysonnettomuudet käsittävät 67 % kaikista rautatieonnettomuuksista. Useilla alueilla rautatiet on rakennettu ennen tieverkon rakentamista, jolloin tiet seuraavat rautateitä ja risteävät rautatieverkon kanssa useassa kohtaa. Tämä muodostaa ongelman yhdessä välinpitämättömien ajajien kanssa, kun tienkäyttäjät joutuvat ylittämään toistuvasti rautateitä. (RailEngineer 2016)

Tasoristeukset sijaitsevat yleensä syrjäisemmillä alueilla, joilla kulkee pääasiassa pitkiä tavarajunia pitkällä vuorovälillä. Pitkillä tavarajunilla tasoristeuksen ohittaminen kestää myös pidempään kuin tiheästi liikennöidyillä matkustajajunilla. Konttitavarajunat voivat olla yli kolme kilometriä pitkiä, jolloin tasoristeuksen ohittaminen kestää kolmekin minuuttia. Junan pysähtyminen tapahtuu linjanopeudesta vasta 1,6 kilometrin päässä. Tienkäyttäjillä on siten erityinen houkutus ehtiä ylittämään tasoristeys ennen junaa.

Tasoristeysturvallisuutta on Yhdysvalloissa pyritty parantamaan ensisijaisesti valistustoiminnalla, parantamalla tiemerkitöjä ja parantamalla yhteistyötä rautatie- ja tieviranomaisten kesken. Tasoristeuksiin on myös erityisen vaarallisiin risteuksiin asennettu teille esiopastimia tieopastimia ennen. Nykyään tasoristeyksille on asetettu rajoituksia radan suurimman sallitun nopeuden mukaan:

- alle 177 km/h: tasoristeukset ovat sallittuja
- 177–201 km/h: tasoristeukset ovat sallittuja erikoistapauksissa, ja varustettuina käyttöön sopivilla varoituslaitoksilla
- yli 201 km/h: tasoristeukset eivät ole sallittuja.

Varoituslaitoksen tekniikka on moninaista ja aktivointi suoritetaan monella eri tavalla, kuten raidevirtapiireillä, akselinlaskijoilla ja tärinäilmaisimilla. Langattomia teknologioita tutkitaan myös varoituslaitosten aktivoinnissa, jolloin järjestelmä ottaa huomioon junan nopeuden ja nopeuden muutokset rataosuudella. Useita esteentunnistusjärjestelmiä on myös kokeiltu, mutta niitä ei ole todettu täysin käyttökelpoisiksi. Nykyiset varoituslaitokset perustuvat edullisiin, modulaarisiin järjestelmiin, joille voidaan suorittaa käyttöönottestaus tehtaalla ja koota suoraan maastossa käyttöön. Näiden hinnaksi on ilmoitettu keskimääräisesti noin 160 000 dollaria järjestelmältä, mikä suuruusluokaltaan vastaa suomalaista kustannustasoa. (RailEngineer 2016)

### 3.4 ETCS ja tasoristeykset

Tasoristeysten varoituslaitokset ovat Suomessa tyypillisesti erillisiä linjalaitoksia ilman kytkentää junien kulunvalvontajärjestelmään, eikä eurooppalainen rautatieliikenteen hallintajärjestelmä ERTMS (engl. European Rail Traffic Management System) tai sen eurooppalainen junien kulunvalvonta ETCS (engl. European Train Control System) tuo tähän muutosta. ERTMS/ETCS kykenee valvomaan tasoristeysten varoituslaitosten toimintaa, mutta tasoristeysten hälytys käynnistyy kuitenkin asetinlaitteen ohjaamana, eli ERTMS/ETCS-järjestelmä ei osallistu hälytyksen käynnistykseen. ERTMS/ETCS-tasolla 2 asetinlaiteriippuvaisen tasoristeyksen varoituslaitoksen hälytyksen käynnistymisestä saadaan tieto junaan radiosuojastuskeskuksen ja GSM-R-dataradioverkon välittämällä. Tällöin juna voi ylittää tasoristeyksen tasoristeysalueelle määriteltyä nopeusrajoitusta noudattaen. ERTMS/ETCS-järjestelmän vaatimuseritelmissä on määritelty sanomapaketit tähän toimintaan tarvittavaan tiedonsiirtoon.

Radiosuojastuskeskuksen vetokalustoon välittämä hälytyksen käynnissäolotieto sisältää yleensä tiedon myös tasoristeysalueen vapaanaolosta. Tämä on tärkeä tieto, jos junien sallittu nopeus tasoristeyksen kohdalla on suuri, eli esimerkiksi yli 140 km/h. Suomessa suurin nopeus rataosilla, joilla on tasoristeys, on 140 km/h. Suomessa ei ole käytössä tasoristeysalueen vapaanaolon valvontaa tasoristeysten varoituslaitoksissa, joten edes ERTMS/ETCS-taso 2 ei tarjoa varsinaisesti uusia mahdollisuuksia tasoristeyksen turvalaitoksen ohjaukseen ja valvontaan. ERTMS/ETCS-taso 2 saattaa ainoastaan parantaa turvallisuutta tarjoamalla luotettavan keinon ilmoittaa junalle tasoristeyslaitoksen oikeasta ja turvallisesta toiminnasta, mutta se edellyttää tiedon kytkemistä asetinlaitteelle.

ERTMS/ETCS-taso 1 ei tarjoa oleellisia keinoja parantaa tasoristeysturvallisuutta ilman merkittäviä lisäinvestointeja lisäämällä tasoristeysten varoituslaitoksiin junille tarkoitetut suojaopastimet, kuten esim. Ruotsissa on tehty nykyisessä kansallisessa junien kulunvalvontajärjestelmässä.

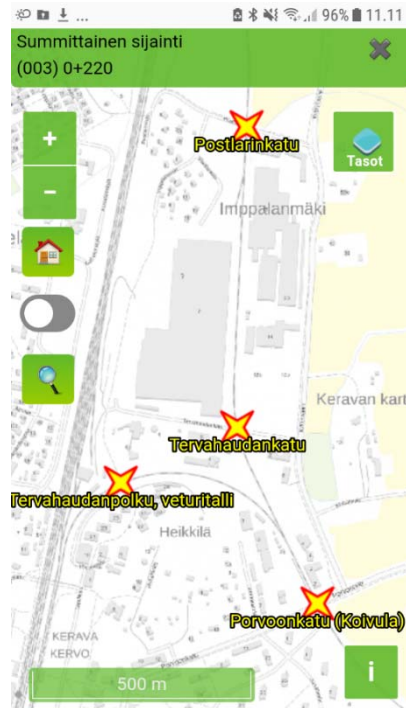
## 4 Muut teknologiat ja ratkaisut

### 4.1 Mobiilit navigointilaitteet ja -sovellukset

Tällä hetkelläkin pystyttäisiin jo kehittämään laite tai esimerkiksi mobiilisovellus, joka käyttäisi Liikenneviraston tarjoaman avointa dataa tasoristeyksiä lähestyvistä junista varoittavien laitteiden tai sovellusten ohjaamiseksi. Avoimena datana on saatavilla mm. junien paikkatiedot, joissa tietojen lähteenä toimii lähes kaikissa junissa käytössä oleva kuljettajan päätelaite. Lisäksi avoimesta datasta selviää myös, milloin juna on saapunut tietylle asemalle ja millä raideosuudella juna kulkee. Junien kulkutiedoissa on kuitenkin puutteita, sillä noin kymmenen prosenttia päivittäisin kulkevista junista ei tuota laadukasta sijaintitietoa. Yhteydet eivät myöskään toimi aina viiveettä, jolloin nopeasti liikkuva juna voi kulkea jopa satoja metrejä, ja tiedon jakeluketjussa on useita mahdollisesti vikaantuvia osia, jolloin tieto tasoristeystä lähestyvistä junista jää kokonaan välittymättä. Näistä puutteista johtuen Liikennevirasto on myös varoittanut avoimen datan käyttöön perustuvista mobiilisovelluksista, joiden tarkoitus on varoittaa tasoristeyksiä lähestyvistä junista. (Repo 2017)

Turvallisuuskriittisien paikkatietoratkaisujen riskienhallintaprosessissa törmätään aina kysymykseen, mitä tehdään, jos rautatiekaluston paikkatietoa ei pysty hetkellisesti vastaanottamaan tai jos se on virheellinen. Monet laitetoimittajat, jotka ovat aluksi olleet kiinnostuneita paikkatiedon käyttämisestä, eivät ole pystyneet hallitsemaan paikkatiedon luotettavuuteen liittyvää riskiarvioinnissa sietämättömäksi luokiteltua riskiä, joten kehitystyö on lopetettu. Lisäksi mobiilिनavigointi- tai varoitusjärjestelmät voivat heikentää kuljettajan omaa ympäristön havainnointia.

Mobiilipohjaisimmat käyttökelpoisimmat ratkaisut perustunevat staattiseen dataan eli tasoristeysten paikasta annetaan varoitus tasoristeystä lähestyvän auton kuljettajalle. Kuvassa 14 on esimerkki sovelluksesta, jossa tasoristeykset näkyvät tähdellä navigaattorin näytöllä. Tällainen kaupallinenkin sovellus, ProX, on jo tarjolla Suomen rataverkolle (Lehto 2017).



Kuva 15 Kuvakaappaus VR Track Oy:n Tutka-sovelluksesta.

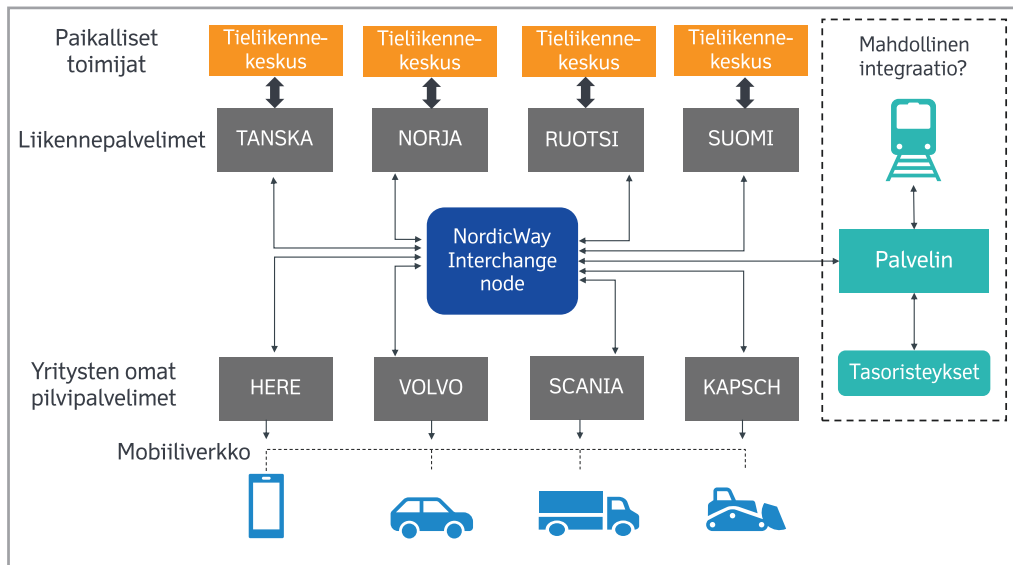
Yksittäinen sovellus, jolla ei ole muuta käyttötarkoitusta kuin tasoristeyksistä varoittaminen, ei kuitenkaan levinne laajaan käyttöön. Tällainen toiminnallisuus on saatava integroitua laajempaan jatkuvasti käytettyyn kokonaisuuteen. Esimerkki tällaisesta mahdollisesta sovelluksesta esitetään seuraavassa kappaleessa.

#### 4.1.1 NordicWay ja tasoristeykset

NordicWay oli vuosina 2015–2017 toteutettu hanke, jonka tavoitteena oli parantaa liikenneturvallisuutta lähettämällä matkaviestiverkon välityksellä kuljettajille tieliikenteen häiriöviestejä. Projektin rahoitusta EU:n Verkkojen Eurooppa (CEF) -kokonaisuudesta 2015-2017 ja toteutettiin pohjoismaisten julkisten ja yksityisten toimijoiden yhteistyönä. Hanke sai jatkoa ja käynnissä olevassa NordicWay2-hankkeessa tutkitaan erityisesti tieliikenteen automaatiota arktisissa olosuhteissa Arctic Challenge -nimisen tutkimuskokonaisuuden puitteissa. (Vejdirektoratet 2018; Liikennevirasto 2018)

NordicWay-palvelu on suunniteltu toimimaan yli brändien, maiden rajojen, palvelun tuottajien sekä alustojen. Mukana hankkeessa on mm. autonvalmistajat Volvo ja Scania, karttapalveluyhtiö HERE, verkkoyhtiö Ericsson sekä pohjoismaiset liikennevirastot Suomesta, Ruotsista, Norjasta ja Tanskasta. Projektin suurin saavutus on NordicWay-pilvipalvelukokonaisuus (engl. interchange node), joka on kaikkien toimijoiden tiedot yhteen paikkaan kokoava pilvipalvelin. Palvelun konsepti on esitetty kuvassa 16.

Tietoa palveluun tuottavat sekä kansalliset tieliikennekeskukset, että käyttäjät itse. Palvelimella tieto on avointa ja kaikkien osapuolten käytössä. Tieto liikkuu käyttäjien ja palvelimen välillä matkapuhelinverkkojen välityksellä. Palvelu on standardoitu, eikä se ole suunnattu millekään erityiselle ohjelmalle, laitteelle tai brändille.



Kuva 16 *NordicWay-palvelukonsepti ja tasoristeystietojen integraatio, muokattu lähteestä (Liikennevirasto 2018).*

Ensimmäinen NordicWay-hanke oli PoC-selvitys (soveltuvuusselvitys) matkapuhelinverkkoja hyödyntävien yhteentoimivien, älykkäiden liikennejärjestelmien eli C-ITS-järjestelmien (engl. Cooperative Intelligent Transport Systems) käytöstä tieliikenteessä. Esimerkiksi vanhalla henkilöautolla ajava henkilö voi antaa älypuhelimellaan asennetulla HERE:n sovelluksella ilmoituksen esimerkiksi tietyöstä, onnettomuudesta tai tien olevan poikki. Tieto siirtyy pilvipalveluun, josta muut palvelun käyttäjät saavat tiedon. Tieto voi välittyä esimerkiksi palvelua tukevan autovalmistajan omaan päätteeseen tai eri valmistajien matkapuhelinten mobiilisovelluksiin. Palvelu toimii uudemmilla autoilla myös automaattisesti siten, että esimerkiksi Volvon antureiden havaitessa tien olevan vaarallisen liukas, lähettää auto tiedon teiden liukkaudesta palvelimelle, josta tieto vaarasta välittyy muille tienkäyttäjille reaaliaikaisesti. (Liikennevirasto 2018)

Tulevaisuuden visio on, että NordicWay-palvelin olisi yhteydessä myös muihin vastaaviin palvelimiin Euroopassa, ja nämä palvelimet keskustelevat keskenään mahdollistaen laajan ja rajat ylittävän tiedonvälityksen kaikille tien käyttäjille. Häiriöviestien yhteentoimivuutta edistetään eurooppalaisena yhteistyönä C-Roads Platform -hankkeessa. (C-Roads 2018)

NordicWay-palvelussa ei ole mukana tasoristeysturvallisuutta parantavia ominaisuuksia. Kuvassa 16 on jo hahmoteltu mahdollinen laajennus tähän tarkoitukseen. Ensimmäinen askel olisi tasoristeysten sijaintitiedon välittäminen auton kuljettajalle. Toisessa vaiheessa, kun junien paikannustieto siirtoketjuineen on riittävän luotettavalla tasolla, reaaliaikainen junien sijaintitieto välittyisi palvelimelle, joka prosessoi tasoristeysten hälytystilatietoa. Tasoristeysten hälytystilatietoja käsittelevältä palvelimelta tiedot välittyisivät NordicWay-pilvipalvelimelle, josta tieto välittyisi tasoristeysten lähellä liikkuvalla kuljettajalle auton tai älypuhelimien navigointijärjestelmään.

## 4.2 Autossa olevien navigointijärjestelmien hyödyntäminen

Autojen omat kiinteät navigointijärjestelmät yleistyvät niiden hintojen laskiessa. Kiinteiden laitteiden etuna on, että ne ovat aina käytettävissä ja helpommin päälle kytkettävissä kuin vastaavat mobiilit navigointijärjestelmät. Paikannusta käyttävien mobiilivirrankulutusten virrankulutus on myös suuri ja siten joskus rajoitteena niiden käytölle. Autoon kiinteästi asennetuissa laitteissa virrankulutus ei ole ongelma. Kiinteissä navigointijärjestelmissä on etuna myös oman paikannuksen parempi luotettavuus verrattuna mobiileihin järjestelmiin. Kiinteän järjestelmän kattoantenni yhdistettynä mahdollisiin muihin lisävarmistuksiin, mm. gyroskooppi, takaa paremman toimintavarmuuden satelliittipaikannuksen katvealueilla. Kiinteiden järjestelmien näytöt ovat yhä suurempia ja yleensä paremmin kuljettajan näkökentässä kuin irrallisissa järjestelmissä. Tämäkin on turvallisuuden varmistamisen kannalta tärkeä etu. Kuvassa 17 on esimerkki Teslan tasokkaasta keskikonsolin näytöstä.



Kuva 17 Esimerkki auton kiinteästä navigointijärjestelmästä (Krisher 2015).

Saksalaiset autovalmistajat ovat olleet DB Netzin kanssa yhteistyössä ja ovat osoittaneet kiinnostusta lisätä tasoristeysturvallisuutta lisääviä ominaisuuksia autojen kiinteisiin navigointijärjestelmiinsä. Staattinen tasoristeysten paikkatieto lisätään vakiokarttoihin. Suunnitelmissa ei ollut välittää navigaattoreihin tietoja junista tai tasoristeysten varoituslaitosten hälytystiloista. (Schubert et al. 2018)

Kehittyneissä saksalaisissa navigointijärjestelmissä on vakiona liikennetietopalvelu, joka mahdollistaisi monenlaisen tiedon välittämisen auton kuljettajalle reaaliajassa. Palvelua ei ole tarkoitus hyödyntää rautatiesovelluksiin. Vastaava Suomessa kiinteissä navigointijärjestelmissä toimiva liikennetietopalvelu on V-Traffic. Navigointijärjestelmien tekniikka mahdollistaisi tarvittavien tietojen välittämisen, mutta junien kulusta saatavan tiedon luotettavuus ei ole vielä nykyään riittävä, jotta tasoristeysten varoituspalvelun käyttöönottoa edes harkittaisiin.

Ohjelmistojen päivityksellä riittävän tiheään on varmistettava karttatiedon ajantasaisuus.

## 4.3 Radanvarren kuituoptiset anturit

Viimeisen kymmenen vuoden aikana kuituoptiset anturit ovat herättäneet kiinnostusta rautatietekniikassa. Niitä on hyödynnetty rautatietunneleiden ja -siltojen rakennusteknisessä monitoroinnissa, mutta kuituoptiikkaa on tutkittu edelleen erilaisissa rautatiejärjestelmissä korvaamaan tai täydentämään nykyistä tekniikkaa. Erityistä mielenkiintoa on herättänyt akustisten ilmiöiden havainnointiin ja tunnistamiseen perustuva DAS-teknologia (engl. Distributed Acoustic Sensing). DAS-teknologialla on mahdollista havaita junan kulkua reaaliajassa, kisko- ja kalustovikoja, radalle pudonneita esteitä, luvatonta kulkemista radalla, rakenteiden runkomelua- ja tärinää sekä muita ääneen perustuvia ilmiöitä. (Tuohino 2017)

Rautatieteollisuudessa DAS-teknologiasta käytetään myös yleisesti nimitystä FOS (engl. Fiber Optic Sensing), joka on DB Netz AG:n käyttämä termi. DB Netz AG on voimakkaimmin ollut tuomassa ja kehittämässä kuituoptiikkaa ja FOS-järjestelmää rautatiesovelluksiin. FOS-järjestelmä koostuu yksinkertaisimmillaan ilmaisinalitteesta, valonlähteestä ja tavallisesta tietoliikennekuitukaapelista. Ilmaisinalitteen valonlähde lähettää kuitukaapelin yhteen kuituun valopulssin, joka siroaa ja heijastuu takaisin kuidun epäpuhtauksista. Pulssin kulkuajasta voidaan määrittää äänilähteen paikka kuidulla, kun kuituun kohdistuu tärinää tai ääntä. Tekniikka toimii tällä hetkellä maksimissaan 40–50 km:n kuidulle, vaikkakin tarkkuus on parempi lyhyemmillä kuiduilla. (Tuohino 2017)

Tasoristeyssovelluksissa FOS-teknologiaa ei ole suoraan kokeiltu, mutta sen jo verifioidut käyttökohteet voivat toimia myös varoituslaitoksissa. FOS-järjestelmällä voidaan monitoroida junan paikkaa reaaliajassa n. 10 metrin tarkkuudella sekä saada selville junan kulkusuunta ja nopeus. Tasoristeyksen läheisyyteen voitaisiin määrittää aktiivointipisteet, joiden kohdalla järjestelmä alkaa hälyttää junan saapuessa. Junan nopeus on helppo määrittää ja arvioida saapumisaika tasoristeykselle.

Toinen yleinen sovellus on radalla liikkuvien henkilöiden havaitseminen askeläänien perusteella. Tämä on yleisesti käytössä myös rautatieteollisuuden ulkopuolella esim. rajavalvonnassa, jossa rajoilla luvatta liikkuvia henkilöitä ja ajoneuvoja voidaan valvoa automaattisesti. Tasoristeyksessä tällä voitaisiin valvoa tieosuuden ja risteuksen kannen välistä aluetta. FOS-järjestelmä voi tunnistaa ajoneuvon sen moottorin äänen perusteella, mutta henkilön, tai eläimen, täytyy olla liikkeessä.

Junan seuraaminen kuituoptiikan avulla on hyvin luotettava keino, jos ilmaisinalite ja viestiyhteys toimivat. Juna ei voi kadota kuidun läheisyydestä, koska junan pyöristä lähtee voimakas ääni verrattuna taustameluun. Junan paikannus ei ole siis ongelma, mutta tiedon muokkaaminen ja käyttäminen tasoristeysten käyttäjiä hyödyntävään muotoon vaatii lisäselvitystä.



## 4.4 Muut kevyet ratkaisut

Pelkän STOP-merkin asentamista pidetään tehokkaana keinona vaikuttaa tasoristeysten turvallisuuteen, jos perinteiset tekniset ratkaisut eivät ole mahdollisia (Silla, et al., 2015). Nykyisillä halvoilla energianlähde ja valoratkaisuilla (esim. aurinkokennot ja ledit, yms.) voitaisiin muuttaa passiivinen liikennemerkki myös aktiiviseksi huomio- ja varoituslaitokseksi. Liikennemerkkiin voitaisiin lisätä näyttötaulu, joka neuvoo ja opastaa auton kuljettajaa ylittämään tasoristeuksen oikein. Tasoristeystä lähestyvä ajoneuvo voidaan tunnistaa esimerkiksi maahan sijoitetulla induktiosilmukalla tai tutkatekniikalla. Näyttötaulu aktivoituu ja tasoristeys alkaa hälyttämään, kun auto havaitaan. Näyttötaululla voidaan kertoa myös esimerkiksi radalla kulkevien junien nopeus ja jarrutusmatka. Vika- tai passiivisessa tilanteessa näyttötaulu käskää aina kuljettajaa pysähtymään ja tarkkailemaan junaliikennettä. Huomiolaitokseen voidaan mahdollisesti myös lisätä älyä junien paikkatietojen mukaan, jos ne voidaan helposti liittää järjestelmään esimerkiksi junaliikenteen avoimesta datasta.

Tasoristeystä lähestyvät junat voitaisiin havaita myös erilaisilla joko kiskoon tai sähköpylväisiin sijoitettavilla tunnistimilla, joista tieto lähestyvistä junasta välitetään radioteitse, esimerkiksi UHF- tai GSM-signaalilla, tasoristeyksessä olevalle varoituslaitteelle. Norjassa on käytössä Wavetrain Systems -yhtiön kehittämä akustinen anturijärjestelmä. Sillä voidaan korvata hälytyksen käynnistyksen raidevirtapiirit tai akselinlaskijat. Tekniikalla voidaan alentaa tasoristeuksen rakentamiskustannuksia arviolta noin 10 %. Anturijärjestelmällä on SIL 4 -tason hyväksyntä. (Wavetrain Systems 2018)

## 5 Turvallisuustarkastelu

### 5.1 Rautatiejärjestelmän turvallisuusperiaatteet

#### 5.1.1 Yleinen periaate turvallisuuden kehittämiseksi ja parantamiseksi

Rautatieturvallisuudirektiivi (EU) 2016/798 mukaisesti jäsenvaltioiden on rautateiden turvallisuuden kehittämiseksi ja parantamiseksi toimivaltuuksiensa rajoissa varmistettava, että rautateiden turvallisuustaso pystytään yleisesti säilyttämään ja että sitä parannetaan jatkuvasti, jos se on kohtuudella mahdollista, ottaen huomioon unionin oikeuden ja kansainvälisten sääntöjen kehittyminen sekä tekniikan ja tieteen kehitys ja antaen etusija onnettomuuksien ehkäisemiselle. (Direktiivi 2012/27/EU)

#### 5.1.2 Yhteiset turvallisuusmenetelmät

Rautatieturvallisuudirektiivissä on määritelty yhteiset turvallisuusmenetelmät, joissa kuvataan, miten turvallisuuden tasoa ja turvallisuustavoitteiden saavuttamista ja muiden turvallisuutta koskevien vaatimusten noudattamista arvioidaan tarvittaessa myös riippumattoman arviointielimen avulla.

Näitä yhteisiä turvallisuusmenetelmiä ovat riskienarviointi, myönnettyjen turvallisuustodistusten ja -lupien arviointi, kansallisen turvallisuusviranomaisen soveltamat valvontamenetelmät sekä omavalvonta, turvallisuustason arviointimenetelmät, turvallisuustavoitteiden saavuttamisen arviointimenetelmät ja muut menetelmät, jotka kattavat turvallisuusjohtamisjärjestelmän sellaiset menettelyt, jotka ovat tarpeen yhdenmukaistaa unionin tasolla. (Direktiivi 2012/27/EU)

#### 5.1.3 Turvallisuusjohtamisjärjestelmä

Toiminta rautatiejärjestelmässä on hyvin tiukasti säännelty. Saadakseen hallita ja käyttää rautatieinfrastruktuuria rataverkon haltijan on saatava turvallisuuslupa sen jäsenvaltion kansalliselta turvallisuusviranomaiselta, jossa rautatieinfrastruktuuri sijaitsee. Vastaavasti rautatieinfrastruktuurin käyttöoikeuden saa myöntää vain rautatieyritykselle, jolla on turvallisuustodistus. (Direktiivi 2012/27/EU)

Rataverkon haltijalla ja rautatieyrityksellä on oltava turvallisuusjohtamisjärjestelmään, jossa tarkoitetaan rataverkon haltijan tai rautatieyrityksen organisaatiota, järjestelyjä ja menettelyjä, joilla varmistetaan sen toimintojen turvallinen hallinnointi. Turvallisuusjohtamisjärjestelmä on turvallisuusluvan ja -todistuksen edellytys. (Direktiivi 2012/27/EU)

Turvallisuusjohtamisjärjestelmän tarkoitus on varmistaa, että rautatiejärjestelmä voi saavuttaa vähintään yhteiset turvallisuustavoitteet, että se on YTEissä (Yhteentoimivuuden tekniset eritelmät) vahvistettujen turvallisuusvaatimusten mukainen ja että siinä sovelletaan yhteisten turvallisuusmenetelmien asiaan kuuluvia osia ja 8 artiklan mukaisesti ilmoitettuja kansallisia sääntöjä. YTEllä tarkoitetaan kutakin osajärjestelmää tai osajärjestelmän osaa koskevaa, direktiivin (EU) 2016/797 mukaisesti hyväksyttyä eritelmää, jolla mahdollistetaan olennaisten vaatimusten noudattaminen ja varmistetaan unionin rautatiejärjestelmän yhteen toimivuus.

#### 5.1.4 Riskien arviointi

Riskien arviointia koskevassa yhteisessä turvallisuusmenetelmässä on esitetty perusvaatimukset riskien arvioinnille muutostilanteissa. Asetuksessa on esitetty vaatimukseksi, että turvallisuusjohtamisjärjestelmän perusosiin on kuuluttava menettelyjä ja menetelmiä, jotka koskevat riskien arvioinnin suorittamista ja riskinhallintatoimenpiteiden toteuttamista aina, kun toimintaolosuhteiden muutoksesta tai uudesta materiaalista aiheutuu uusia riskejä infrastruktuurille tai toiminnalle. Nämä vaatimukset on esitetty Komission täytäntöönpanoasetuksessa (EU) N:o 402/2013 riskien arviointia koskevasta yhteisestä turvallisuusmenetelmästä. (Täytäntöönpanoasetus (EU) 402/2013)

Muutoksen toteutuksesta vastaavan yrityksen tai organisaation (ehdottaja) on tarkastettava kyseisen muutoksen mahdollista vaikutusta rautatiejärjestelmän turvallisuuteen. Jos ehdotetulla muutoksella on vaikutusta turvallisuuteen, ehdottajan on asiantuntija-arvion pohjalta arvioitava muutoksen merkittävyyttä asetuksessa vahvistettujen perusteiden mukaan. Muutoksen merkittävyyden arviointi määrää tarvittavat riskienarviointitoimenpiteet. Jos muutosta ei pidetä merkittävänä, ehdottajan on toteutettava muutos soveltamalla omaa turvallisuusmenetelmäänsä. Jos muutos on merkittävä, riskien arviointi on tehtävä soveltamalla asetuksessa esitetty riskinhallintaprosessia. (Täytäntöönpanoasetus (EU) 402/2013)

Satelliittipaikannuksen sovellutukset todennäköisesti ovat merkittäviä muutoksia rautatiejärjestelmään ja siten vaativat riskienarviointia koskevan yhteisen turvallisuusmenetelmän mukaisen riskienarvioinnin. Riskienarviointiin kuuluu lisäksi riippumattoman turvallisuusarviointilaitoksen (ISA) ulkopuolinen arviointi asetuksen soveltamisesta ja sen tulosten soveltuvuudesta.

Satelliittipaikannustekniikan riittävä turvallisuustaso määritellään rataverkon haltijan toimesta riskienarvioinnin avulla. Suoraa arviota riittävästä turvallisuustasosta ei voi antaa ilman riskien arviointia.

#### 5.1.5 Rautatieturvalaitteisiin liittyvät standardit

Keskeisimmät rautatiejärjestelmien turvalaitteisiin liittyvät standardit ovat eurooppalaisen sähköalan standardisoimisjärjestön, CENELEC:n (ransk. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique), laatimat standardit:

- EN 50126: Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS)
- EN 50128: Railway applications – Communications, signaling and processing systems – Software for railway control and protection systems
- EN 50129: Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling.

Standardit sisältävät määritykset turvallisuuteen liittyvän rautatiejärjestelmän elinkaaresta ja siihen liittyvistä prosesseista, sekä aineistoista liittyen prosessien suunnitteluun ja tuloksiin. Standardit määrittävät myös turvallisuusasioita mm. turvallisuuden eheystasojen eli SIL-tasojen määritelmät.

### 5.1.6 Tieliikennelaki

Tieliikennelain näkökulmasta tienkäyttäjän on annettava rautatiellä kulkevalle yksikölle esteetön kulku. Tienkäyttäjällä on myös velvollisuus noudattaa erityistä varovaisuutta ja suojalaitteista huolimatta tarkkailtava rautatieliikennettä. Ajoneuvo on tarvittaessa pystyttävä pysäyttämään ennen rataa. Rautatien ylittäminen on kielletty, jos yksikkö lähestyy, valo-opaste velvoittaa pysähtymään, erityinen ääniopaste kuuluu tai puomi on alhaalla tai liikkuu. (Tieliikennelaki 267/1981)

Satelliittipaikantamisen tuomat apuvälineet eivät poista tienkäyttäjän velvollisuuksia tai rautatieliikenteen etuuksia tasoristeyksessä.

### 5.1.7 Ankaru vastuu ja raideliikennevastuulaki

Ankaralla vastuulla tarkoitetaan vastuuta, jossa vahingonaiheuttajalta ei edellytetä huolimattomuutta tai tahallisuutta vahingon aiheuttamisessa. Toisin sanoen ankaru vastuun perusteella vahingonaiheuttajalle syntyy vastuu, vaikka hänen toimintansa on moitteetonta. Ankaru vastuu on lainsäädännössä kohdistettu tiettyihin toimijoihin. (MINILEX 2018)

Raideliikennevastuulaki ottaa ankaru vastuu -periaatteen huomioon pykälässä kolme, jossa on kuvattu korvausvelvollisuudet. Raideliikennevastuulain mukaan rataverkon haltija on velvollinen korvaamaan vahingon, joka on aiheutunut raideliikenteeseen käytettävästä viallisesta tai puutteellisesta kunnossa olevasta väylästä, raiteesta tai laitteesta taikka virheestä rautatieliikenteenohjauksessa. Satelliittipaikannukseen perustuvissa sovelluksissa raideliikennevastuulain tarkoittamat viat ja puutteet laitteissa ovat ainakin osittain rautatiejärjestelmän ulottumattomissa. Liikenneviraston ankaru vastuu kattaa kuitenkin kokonaisuuden, joten riskialttiiden osajärjestelmien käyttö on Liikenneviraston kannalta kyseenalaista. (Raideliikennevastuulaki 113/1999)

### 5.1.8 SIL-luokitus

SIL-tasolla, eli turvallisuuden eheystasolla, tarkoitetaan neliportaista (SIL 1–4) asteikkoa, joka kertoo tuotteen tai prosessin turvallisuustason. SIL-luokituksessa muuttujia ovat mm.

- riski (ei-toivotun tapahtuman seurausten ja niiden todennäköisyyden funktio)
- seuraukset (luokitellaan niiden vakavuuden mukaan)
- seurausten todennäköisyys
- mahdollisuus välttää tai rajoittaa vahinkoja

Taulukko 1 Turvalaitejärjestelmissä pakolliset standardit.

Nro	Viite	Asiakirjan nimi ja lisätietoja	Versio
A1	EN 50126	Rautatiesovellukset – Toimintavarmuuden, käyttövarmuuden, kunnossapidettävyyden ja turvallisuuden (RAMS) määrittely ja esittäminen	1999
A2	EN 50128	Rautatiesovellukset – Tietoliikenne-, merkinanto- ja tietojenkäsittelyjärjestelmät – rautateiden ohjaus- ja turvajärjestelmien ohjelmistot	2001 tai 2011
A3	EN 50129	Rautatiesovellukset – Tietoliikenne-, merkinanto- ja tietojenkäsittelyjärjestelmät – turvallisuuteen liittyvät elektroniset merkinantojärjestelmät	2003
A4	EN 50159	Rautatiesovellukset – Tietoliikenne-, merkinanto- ja tietojenkäsittelyjärjestelmät	2010

SIL-vaatimukset koskevat koko turvalaitejärjestelmää siten, että jokainen järjestelmän itsenäinen osa tai toiminto täyttää myös SIL-vaatimukset. Jokaisella SIL-tasolla on erilaisia teknisiä ja ei-teknisiä vaatimuksia, esimerkiksi dokumentaatio siitä, miten asiat kuuluvat tehdä.

Mitä korkeampi SIL-taso on, sitä tiukemmat ovat vaatimukset. Korkea SIL-taso tarkoittaa sitä, että turvallisuusjärjestelmä pettää harvemmin. Rautatiejärjestelmissä määritetään yleensä turvallisuuden eheyden taso tarkastelemalla järjestelmän vaarallisten vikojen määrää tuntia ja toimintoa kohden. Tällöin puhutaan laitteen *varmuusvika-taajuudesta*, THR (engl. Tolerable Hazard Rate), jolle on määritetty raja-arvot eri turvallisuustasojen eli SIL-luokkien mukaan. Raja-arvot on listattu taulukkoon 2.

Taulukko 2 SIL-tasojen määritelmät.

SIL	Vikaantumisen todennäköisyys	THR
4	0,0001 - 0,00001	$10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$
3	0,001 - 0,0001	$10^{-8} \leq THR < 10^{-7}$
2	0,01 - 0,001	$10^{-7} \leq THR < 10^{-6}$
1	0,1 - 0,01	$10^{-6} \leq THR < 10^{-5}$

SIL-tasoille on näiden lisäksi kuitenkin paljon myös muita vaatimuksia. SIL-taso määrittelee vaatimuksia mm.

- Järjestelmän omistajalle – Mitä turvallisuustoimintoja ja miten korkean SIL-luokituksen tarvitsen?
- Insinööritoimistoille ja tuotteen tai järjestelmän kehittäjille – Kuinka rakennan SIL-yhteensopivan tuotteen, toiminnon tai järjestelmän?
- Järjestelmän käyttäjille – Miten toimin, ylläpidän ja huollan turvallisuusjärjestelmiä säilyttääkseni SIL-tason?

Liikennevirasto vaatii SIL 3 -tasoa tasoristeysvaroituslaitokselle (Liikennevirasto 2012).

## 5.2 Häiriölähteet ja tietoturva paikannuksessa

Satelliitti- ja muihin paikannustapoihin liittyy myös kyberturvallisuuden riskejä, kuten paikannussignaalien tahallista tai tahatonta häirintää tai tietojen vuotoja kolmansille osapuolille. Tässä kappaleessa esitetyjä aiheita paikannustiedon tietoturvallisuuden kannalta.

INSURE-projekti (engl. INSURE: Cybersecurity in Localization) on Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskuksen (FGI), Turun teknillisen yliopiston (TUT) ja Helsingin yliopiston yhteistyöprojekti paikannusjärjestelmien turvallisuudesta ja luotettavuudesta. Tavoitteena on kehittää GNSS- ja ei-GNSS-paikannusjärjestelmien turvallisuutta, paikannustietojen yksityisyyden suojaa ja lakeja paikannuksessa välitettyjen tietojen käyttämisestä. (INSURE 2018)

### 5.2.1 GNSS ja häiriölähteet

Satelliitti- ja mobiiliyhteyksien yhdistäminen (5G ja GNSS) on tulevaisuuden tehokas paikannusteknologia, mutta sen luotettavaan ja turvalliseen käyttöön vaaditaan aktiivista tietoliikenteen häiriösignaalien havaitsemista ja paikantamista. Jos GNSS-signaalia käytetään turvallisuuskriittisiin sovelluksiin, jatkuva tuntemattomien signaalien monitorointi on tärkeää niiden tunnistamiseksi ja laitteiston ulkopuolisen lähteen varmistamiseksi. Yhteistyö ja ilmoittaminen eri viranomaistahojen kesken on myös tärkeää. (Pikkarainen 2018)

GNSS-paikannuksen tarkkuuteen ja turvallisuuteen vaikuttavat tekijät luokitellaan tahallisiin ja tahattomiin, joissa tahalliset ovat yleensä ihmisten tekemiä häirintäkeinoja ja tahattomat aiheutuvat ympäristöstä tai muista vastaanotinta lähellä sijaitsevista laitteista. Esimerkiksi ilmastointilaitteet invertteri-elektronikalla saattavat aiheuttaa häiriöitä paikannussignaaliin. (Bhuiyuan 2018)

Esimerkkejä tahallisista paikannukseen vaikuttavista tekijöistä:

- häirintä (engl. jamming)
- harhauttaminen, tekeytyminen tukiasemaksi tai väärin signaalien lähettäminen (engl. spoofing)
- kyberhyökkäykset (muut kuin radiotaajuiset)

Esimerkkejä tahattomista tekijöistä:

- heijastukset rakennuksista tai luonnonmuodostelmista ns. monitievirhe (engl. multipath error)
- ilmakehän vaikutukset
- avaruussää, auringon aktiivisuus
- muiden laitteiden aiheuttamat tahattomat häiriösignaalit

Yleensä ihmisen tuottamat havaitut häirintäsignaalit liittyvät yksityisyyden suojan turvaamiseen eli oman paikkatiedon piilottamiseen satelliiteilta. Tällainen on mahdollista mobiileilla häirintälaitteilla tai sovelluksilla. Eurooppalainen satelliittipaikannuksen mm. tietoturva-asioita selvittävä STRIKE3-projekti havaitsee ja tunnistaa erilaisia GNSS-häirintäsignaaleja ympäri maailmaa. Noin viisi kertaa kuukaudessa havaitaan selvästi ihmisen aiheuttamia tahallisia häirintäsignaaleja. (Bhuiyuan 2018)

Häirintälaitte (engl. jammer) lähettää häirintäsignaalia, jonka tarkoituksena on peittää GNSS-hyötysignaali. Häirintälaitte ei tarvitse älykkyyttä, vaan se lähettää häirintäsignaalia toistuvasti. Harhauttavaa tai virheellistä signaalia lähettävä tai tukiasemaksi tekeytyvä laite (engl. spoofer) lähettää virheellisiä GNSS-signaaleja, jotka vastaanotin tunnistaa oikeiksi. Laite voi myös lähettää GNSS-signaalit uudelleen eri paikassa tai eri aikaan, jolloin paikannus ei onnistu oikein. Jos virheellisiä signaaleja ei voida erottaa helposti oikeista tai paikannuksen tarkkuus on sovellukseen nähden tarpeeksi lähellä oikeaa, käyttäjä ei pysty erottamaan huijausta ja luottaa sokeasti vääriin paikannustietoihin.

Tahallisia häirintä- ja huijausyrityksiä vastaan voidaan käyttää useammalla taajuudella toimivia vastaanottimia tai erilaisia signaaleja eri satelliittien konstellatioista (GPS, Galileo, Glonass, Beidou). Vastaanottimessa voidaan käyttää myös kehittyneitä digitaalista signaalinkäsittelytekniikkaa, joka tunnistaa automaattisesti häirintäsignaalin hyötysignaalista. Huijaus- ja kyberhyökkäysyrityksiä vastaan on tehokasta käyttää salattua GNSS-signaalia, kuten Galileon julkista säänneltyä palvelua (PRS). Salattu paikannussignaali ei kuitenkaan auta häirintäsignaaleja vastaan. (Bhuiyuan 2018)

Tahattomista signaalilähteistä kapeakaistaiset häiriö- eli NBI-signaalit ovat suurin uhka häiriöttömälle GNSS-paikannukselle. Kapeakaistaisia häiriösignaaleita tuottavat yleensä radiotaajuiset laitteet, jotka toimivat lähellä GNSS-taajuuksia tai niiden harmonisia. Näiden signaalien käyttäytyminen on vaikea ennustaa, ja ne voivat aiheutua monenlaisista lähteistä. Piikit voidaan kuitenkin tunnistaa tarkoitukseen kehitetyllä vastaanottimella ja suodattaa pois kaistanestosuodattimella. (Ferrara 2018)

### 5.2.2 Muiden paikannusmenetelmien tietoturvaluus ja yksityisyys

Paikannus voidaan toteuttaa myös muilla kuin satelliittisignaaleilla. Nykyisin käytössä on yleisesti mobiiliverkkojen (3G/4G) ja langattomien lähiverkkojen välityksellä tapahtuva paikannus. Muita keinoja ovat Bluetooth-likiverkkojen käyttö tai esineiden internet-sovelluksissa eli IoT-sovelluksissa käytettävät anturit. Näitä paikannustapoja käytetään yleensä sisätiloissa, missä GNSS-paikannus on epäluotettavaa. Tarkkuus voi olla usein myös parempi kuin GNSS-palveluilla, alle metrin etenkin mobiiliverkoilla. (Simona Lohan 2018)

Tiedonsiirtoverkoissa tapahtuvassa paikannuksessa käyttäjän henkilötietojen ja yksityisyyden tietoturva on heikompi, koska paikannus rajoittuu yleensä pieneen alueeseen, ja paikannustietoja on helppo seurata. Tutkimusten perusteella yksilö on helppo tunnistaa vain neljän aika-paikka-pisteen avulla paikannusalueesta. Paikannustiedon tarkkuuden kasvaessa myös yksityisyyden suoja heikkenee ja uhkien vakavuus lisääntyy, jolloin paikkatiedon käyttöä tulee rajoittaa. (Simona Lohan 2018)

### 5.2.3 Paikannuksen turvallisuuden ja yksityisyyden turvaaminen

Paikannuksen turvallisuus tarkoittaa ensisijaisesti paikkatiedon häiriöttömyyttä ja luotettavuutta. Turvallisuuden varmistaminen keskittyy ensisijaisesti estämään ulkopuolisten tekijöiden aiheuttamat häiriösignaalit paikannuksessa. Tämä tarkoittaa tahallista tai tahatonta häirintää. Yksityisyyden turvaaminen tarkoittaa paikannus- tai muiden tietojen suojaamista tietoliikenteessä kolmansilta osapuolilta. Kyberhyökkäyksissä on tavallista yrittää saada kaivettua esimerkiksi henkilötietoja tietoliikenteestä. (Järvinen 2018)

Paikannusjärjestelmän eheys, eli integriteetti, tarkoittaa järjestelmän kykyä tunnistaa oma paikannustarkkuus tai yhteyksien epäluotettavuus. Järjestelmän pitää myös pysyä antamaan oikea-aikainen varoitus käyttäjälle, kun paikannustarkkuus ei ole riittävä. Reaaliaikainen integriteetin monitorointi on tärkeää paikannuksen tarkkuuden luotettavuuden automaattisen arvioinnin kannalta. Integriteetin käsite on peräisin lentoliikenteestä, jossa lasketaan jatkuvasti riskiä paikannusjärjestelmän integriteetin eli eheyden heikkenemiselle. (Leppäkoski 2018)

Satelliittipaikannuksessa yksityisyys ei ole pääsääntöisesti ongelma, ja se voidaan turvata helposti käyttämällä kryptograafisia menetelmiä signaalin salaukseen. Salatulla signaalilla voidaan myös eliminoida suuri osa harhautusyrityksistä. Häirintäyritykset ja tahattomat häiriösignaalit ovat suurempi uhka satelliittipaikannuksen integriteetille. (Järvinen 2018)

Suurin yksittäinen satelliittipaikannusta häirinnyt tekijä oli Yhdysvaltojen puolustusministeriön GPS-järjestelmään tahallisesti aiheutettu häirintä. Tuolloin absoluuttinen paikannustarkkuus oli noin 100 metrin luokkaa. Tahallinen häirintä poistettiin toukuussa 2000.

Rautatiesovelluksissa suurimmat tietoturvauhkot liittyvät paikannustarkkuuden alenemiseen tai paikannuspalvelun häiriintymiseen. Tasoristeyssovelluksissa tämä voi johtaa väriin hälytyksiin ja arvioihin junan saapumisesta risteykseen, millä voi olla vakavat seuraukset, jos tienkäyttäjä luottaa sokeasti varoituslaitoksen paikannustietoon. Mahdollisia häirintälähteitä voivat olla tahalliset häirintäyritykset rautatiejärjestelmiin tai tienkäyttäjien itsensä käyttämät mobiilit häirintälaitteet. Laitteita on saatavilla eri tasoisia ja halvimpia saa muutamilla kymmenillä euroilla. Niiden häirintäsäde ei tosin ole kuin joitain satoja metrejä, kun taas kalliimpien häirintälaitteiden häirintäsäde on useita satoja kilometrejä

Galileon julkisesti säännelty palvelu, Galileo PRS, antaa hyvän pohjan toteutuessaan GNSS-signaalin turvallisuuden, ja erityisesti yksityisyyden, turvaamiseen. Harhauttamis- ja huijausyrityksiä ja paikannussignaalien uudelleenohjauksia voidaan myös torjua tehokkaasti Galileon varmennuspalvelun avulla. Täysin turvallisen satelliittipaikannustiedon hyödyntämiseen turvallisuuskriittisissä sovelluksissa tarvitaan kuitenkin ulkoisten häiriösignaalien monitorointia ja suodatusta.



## 6 Johtopäätökset

Valta-asemassa olevat satelliittipaikannusjärjestelmät, Yhdysvaltain GPS ja Venäjän Glonass, ovat täysin kyseisten maiden puolustusviranomaisten hallinnassa. Kriisitilanteen aikana järjestelmien lähettämien signaalien vastaanotto voidaan sulkea täysin ulkopuolisilta, kuten oli tilanne GPS-paikannuksen kanssa ennen toukokuuta vuonna 2000. Satelliittipaikannusjärjestelmän toimivuus voi myös vaarantua esimerkiksi valtion sisäisen kriisin johdosta. Neuvostoliiton hajoaminen lähes aiheutti Glonass-järjestelmän kaatumisen varojen puutteeseen. Eurooppalainen Galileo-järjestelmä on ensimmäinen täysin siviilikäyttöön rakennettu ja ylläpidetty satelliittipaikannusjärjestelmä. Erittäin suurella todennäköisyydellä järjestelmä tulee toimimaan siviilitarkoituksessa myös mahdollisen kriisitilanteen aikana, vaikka teknisesti senkin sulkeminen on mahdollista. Näin ollen Galileo-järjestelmä PRS-palvelulla täydennettynä on rautatieympäristön kehityshankkeiden navigointialustana ainoa vaihtoehto. PRS-palvelu mahdollistaa paikannuksen myös signaalien häirintä- ja harhautustilanteissa.

Vaikka satelliittipaikannustekniikat kehittyvät ja signaaleihin saadaan modernisoinnin myötä lisää lähetystehoa, ei satelliittipaikannus sovellu kovin hyvin maasto-olosuhteitaan metsäisiin kohteisiin. Valtaosalla Suomen rataverkkoa satelliittipaikannus onnistuu hyvin, mutta on olemassa kohteita, joissa satelliittipaikannuksen tarkkuus ja luotettavuus heikkenevät. Myöskään tunneleissa ei satelliittipaikannus toimi, joten satelliittipaikannusta ei voi suositella ainoaksi paikannusmetodiksi. Satelliittipaikannusta on tuettava ja täydennettävä muilla tekniikoilla, joita on kehitetty esimerkiksi matkapuhelimien paikannustarkkuuden ja luotettavuuden parantamiseksi. Eri paikannusmetodeja yhdistämällä voidaan paikannuksen saatavuutta erilaisissa vaihtelevissa olosuhteissa parantaa. Siltikään ei voida puhua täydellisen luotettavan paikannuksen onnistumisesta kaikissa olosuhteissa. Nykyisillä satelliittipaikannusratkaisuilla ei saada toteutettua nykyisiä turvallisuusvaatimuksia täyttäviä tasoristeysturvalaitoksia. Vaatimuksista vastaavat Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi ja Liikennevirasto. Euroopan rautatievirasto ei toistaiseksi aseta vaatimuksia tasoristeyslaitosten toteutukseen. Liikenne- ja viestintäministeriön asetukset määrittävät tasoristeyslaitoksissakin sallittujen valojen värit. Tähän mennessä asetuksiin ei ole juuri myönnetty poikkeuslupia, joten hallituksen eräänä kärkihankkeena oleva norminpurkutavoite voisi onnistuessaan edistää kokeiluita uusien tekniikoiden kehittämiseksi.

Koska junapaikannuksen osuus tasoristeysten turvalaitoksen kustannuksista nykytekniikalla on vain noin 20 %, satelliittipaikannuksen taloudelliset hyödyt perinteisen laitetekniikan kannalta eivät ole nykyisillä mahdollisilla ratkaisuilla merkittäviä. Todellisten hyötyjen saavuttaminen vaatii kokonaan uusia teknisiä ratkaisuja.

Lisäksi täytyy pohtia olemassa olevan teknologian mahdollistamia toteutusvaihtoehtoja. Kalliisiin vetokalustoon tehtäviin muutostöihin ja laiteasennuksiin on suhtauduttava varauksella ennen kuin lopulliset ratkaisut ERTMS:n suhteen on saatu päätökseen. Vasta sen jälkeen voidaan varmuudella todeta, mitä vetokalustoon tarvittavat laitteistot ovat ja mitä ominaisuuksia niissä on.

Teknologian kehittyessä yksi vaihtoehto olisi tuoda esimerkiksi Liikenneviraston avoimesta tietokannasta tasoristeystä lähestyvän junan sijainti älypuhelimien navigointisovellukseen tai auton navigaattoriin esimerkiksi V-Traffic-liikennetietopalvelun tai muun vastaavan järjestelmän kautta. Nykyiset junista saatavat paikannustiedot eivät ole riittävän tarkkoja ja toimintavarmoja, että niitä voisi käyttää tasoristeysturvallisuuden parantamiseksi. Pelkästään tasoristeysten sijaintien ilmoittaminen ja niistä hälyttäminen mobiileissa tai ajoneuvojen kiinteissä navigointijärjestelmissä voi myös parantaa turvallisuutta, jos sitä kautta tienkäyttäjät saadaan huomioimaan tasoristeykset paremmin. Enemmän lisäarvoa saataisiin kuitenkin liittämällä tasoristeysten tai junien paikkatietoja johonkin laajempaan navigointijärjestelmäkokonaisuuteen kuin yksittäisiin sovelluksiin.

Huomioitava on, että vaikka kuinka kehitettäisiin toinen toistaan hienompia tasoristeyskseen sijoitettavia varoituslaitteita, suurin osa tasoristeysonnettomuuksista johtuu ajoneuvon kuljettajan laiminlyönneistä tai virheistä. Usein samaa tasoristeystä käyttävä autoilija voi myös joutua onnettomuuteen keskittymiskyvyn herpaantuessa tai vain välinpitämättömyyden seurauksena. Mobiileista varoitus- tai huomiosovelluksistaakaan ei ole apua, jos käyttäjät eivät käytä niitä oikein tai säännöllisesti. Pahimmillaan ne voivat johtaa huomiokyvyn heikkenemiseen, jos tienkäyttäjä luottaa sokeasti sovelluksen viesteihin tai keskittyy liikaa laitteen toimintaan. Ensisijaisesti rautateiden tasoristeysturvallisuuden parantamisessa pitäisi panostaa asennekasvatukseen inhimillisten virheiden eliminoimiseksi.

Satelliittipaikannuksen luotettavuuden ja tarkkuuden parantuessa se tulee olemaan eräs tärkeä tekninen keino tasoristeysturvallisuuden kehittämisessä. Se aika ei enää ole kaukana.

## Lähdeluettelo

Anttila, T., 2018. *Kysymys Trafín tasoristeysturvaluusuustutkimuksista/kehitystyöhön osallistumisesta* [sähköpostiviesti]. 25.1.2018.

Berner & Mattner, 2003. *SafeRail - Improving Safety at Railway Level Crossings*. Darmstadt, IAP Workshop: Für die Erde ins All - Transport & Logistik.

Bhuiyuan, Z., 2018. *Solutions for GNSS Vulnerabilities*. Helsinki: INSURE – Cyber-security in Localization seminar.

Brunetti, B. & Ravera, G., 2017. *An ERTMS System Integrated with the Location Determination System based on Satellite Positioning and Public Mobile Radio Networks (Land and/or Satellite)*. Wien: Wheel Detection Forum 2017.

Cabinet Office, 2018. *Quasi-Zenith Satellite System* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://qzss.go.jp/en/>. [Viitattu 9.2.2018].

CGI, 2014. *SAT-LX: Improving Safety at Level Crossings* [verkkoaineisto]. Saatavissa: [https://www.cgi-group.co.uk/sites/default/files/files\\_uk/brochures/sat-lx\\_fact\\_sheet\\_final.pdf](https://www.cgi-group.co.uk/sites/default/files/files_uk/brochures/sat-lx_fact_sheet_final.pdf). [Viitattu 8.5.2018]

C-Roads, 2018. *C-Roads Platform* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.c-roads.eu/platform.html>. [Viitattu 30.4.2018].

Direktiivi 2014/88/EU. *Euroopan komission direktiivi Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2004/49/EY muuttamisesta yhteisten turvallisuusindikaattorien ja onnettomuuskustannusten yhteisten laskentamenetelmien osalta*. Euroopan unionin virallinen lehti 10.7.2014. Luettu 24.4.2018. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32014L0088>.

Direktiivi, 2012/27/EU. *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2016/798 (02016L0798) rautateiden turvallisuudesta*. Euroopan unionin virallinen lehti 26.5.2016. Luettu 20.4.2018. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:02016L0798-20160526&qid=1501066327176&from=FI>.

ERAIL, 2016. *European Railway Accident Information Links: Common Safety Indicators* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://erail.era.europa.eu/safety-indicators.aspx> [Viitattu 30.4.2018].

ESA, 2016. *3INSAT - Train Integrated Safety Satellite System - Ansaldo STS* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://business.esa.int/projects/3insat> [Viitattu 13.4.2018].

ESA, 2017. *SBS-Rails - Space Based Services for Railway Signalling* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://business.esa.int/projects/sbs-rails> [Viitattu 13.4.2018].

ESA, 2018. *SISNeT* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <http://www.egnos-pro.esa.int/sisnet/> [viitattu 9.2.2018].

Euroopan komissio, 2018. *Euroopan komissio*. [verkkoaineisto]

Saatavissa: [https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history_en). [Viitattu 9. 2. 2018].

Ferrara, G., 2018. *Narrowband Interference Detection, Characterization and Mitigation*. Helsinki: INSURE - Cybersecurity in Localization seminar.

Geotrim Oy, 2018. *Geotrim*. [verkkoaineisto]

Saatavissa: <http://www.geotrim.fi/palvelut/trimnet-vrs> [Viitattu 9.2.2018].

Group of Experts on improving Safety at Level Crossings , 2016. *Assessment of safety at level crossings in UNECE membercountries and other selected countries and strategic framework for improving safety at level crossings*, Geneve, Sveitsi: UNECE.

Hirao, D. Y., 2006. *Improving Safety at Level Crossings - Japanese Developments*. Tokio: JR East.

Hänninen, J., 2018. *Ficora* [Sähköpostiviesti]. 5.3.2018.

Information and analysis center for positioning, navigation and timing, 2018. *Beidou Global Navigation Satellite System* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php#web> [Viitattu 9.2.2018].

Information and analysis center for positioning, navigation and timing, 2018. *Glonass* [verkkoaineisto] Saatavissa: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/> [Viitattu 19.2.2018].

INSURE, 2018. *INSURE-project* [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://insure-project.org/> [Viitattu 27.3.2018].

Intelligence on Wheels, 2018. *Products* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <http://www.intelligence-on-wheels.de/products/> [Viitattu 21.3.2018].

JR East, 2016. *IRSE-ITC ja JR East: tekninen seminaari*. Tokio.

Järvinen, K., 2018. *Design of Security and privacy protocols and technologies in localization*. Helsinki: INSURE - Cybersecurity in Localization.

Katajala, M., 2014. *Varoituskäytökset*. Teoksessa L. Järvinen, J. Viitanen (toim.) Rautatieturvallisuus. s. 148-155. Helsinki: Liikennevirasto. 148 – 155. ISBN 978-952-255-369-0.

Kesäläinen, M., 2018. *Galileo dokumentaatiosta* [Sähköpostiviesti]. 16.2.2018.

Krisher, T., 2015. *The Berkshire Eagle* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <http://www.berkshireeagle.com/stories/automobiles-tesla-boosts-range-power-and-price-of-new-model,329814> [Viitattu 9.5.2018].

Laapotti, S., 2016. Comparison of fatal motor vehicle accidents at passive and active railway level crossings in Finland. *IATSS Research*, 40(1), s. 1-6.

Lehtilä, O., 2018. [Sähköpostiviesti]. 20.2.2018.

Lehto, T., 2017. Huomiolaite varoittaa 30 sekuntia ennen junaa - uusi tekniikka yrittää vähentää tasoristeysonnettomuuksia. *Tekniikka & Talous*, 26. 4.

Lehto, T., 2017. *Tekniikka & Talous* [verkkoaineisto].

Saatavissa: [https://www.tekniikkatalous.fi/talous\\_uutiset/liikenne/maksuton-kannyykkaohjelma-varoitaa-suomen-tasoristeyksista-turvallisuuden-ei-aina-tarvitse-maksaa-maltaita-6688683](https://www.tekniikkatalous.fi/talous_uutiset/liikenne/maksuton-kannyykkaohjelma-varoitaa-suomen-tasoristeyksista-turvallisuuden-ei-aina-tarvitse-maksaa-maltaita-6688683) [Viitattu 2.5.2018].

Leica Geosystems Oy, 2018. *Leica Geosystems Oy* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <https://leica-geosystems.com/fi-fi/services-and-support/hxgn-smartnet-satellite-positioning-service> [Viitattu 9.2.2018].

Lemaire, E., 2005. *LOCOPROL - Deliverable D5.1 - System Safety Report*. LOCOPROL & Information Society Technologies (IST).

Leppäkoski, H., 2018. *Security, Robustness and privacy in non-GNSS localization: Integrity*. Helsinki: INSURE - Cybersecurity in Localization seminar.

Libbrecht, R. & Stureson, H., 2005. *LOCOPROL - Deliverable D1.1 - Final Report*, s.l.: LOCOPROL & Information Society Technologies (IST).

Liikenne- ja viestintäministeriö, 2018. *Satelliittinavigointijärjestelmien hyödyntäminen Suomessa; Toimenpideohjelma 2017-2020*. Helsinki: LVM. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-530-9> [Viitattu 15.2.2018].

Liikennevirasto, 2012. *Varoituslaitosten tekniset toimitusehdot* [verkkoaineisto], Helsinki: Liikennevirasto.

Saatavissa: [https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/ohje\\_2012\\_varoituslaitosten\\_tekniset\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/ohje_2012_varoituslaitosten_tekniset_web.pdf) [Viitattu 8.5.2018].

Liikennevirasto, 2017. *Rautatietilasto 2016* [verkkoaineisto]. Helsinki: Liikennevirasto.

Saatavissa: [https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lti\\_2017-09\\_rautatietilasto\\_2016\\_web.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lti_2017-09_rautatietilasto_2016_web.pdf) [Viitattu 8.5.2018].

Liikennevirasto, 2018. *NordicWay2* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <https://www.liikennevirasto.fi/hankkeet/kokeilut/nordicway2#.WubSx2dlKUK> [Viitattu 30.4.2018].

Maanmittauslaitos, 2018. *Maanmittauslaitos* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <http://maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/paikannuspalvelu/paikannuspalvelun-periaate> viitattu 20.2.2018 [Viitattu 20.2.2018].

MINILEX, 2018. *MINILEX Lakia helpommin* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <https://www.minilex.fi/a/ankara-vastuu-ei-edellyt%C3%A4-huolimattomuutta> [Viitattu 20.4.2018].

NASA, 2018 [verkkoaineisto]. Saatavissa: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS\\_History.html](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html) [Viitattu 9.2.2018].

National Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation and Timing, 2018. *GPS: The Global Positioning System* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/> [Viitattu 9.5.2018].

Pikkarainen, K., 2018. *Reliable GNSS – not only interference free radio spectrum*. Helsinki: INSURE - Cybersecurity in Localization seminar.

Poutanen, M., 1998. *GPS-paikanmääritys*. Helsinki:Tähtitieteellinen yhdistys URSA.

Raideliikennevastuulaki 113/1999. Annettu 1.9.1999.

Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990113>

[Viitattu 20.4.2018].

RailEngineer, 2016. *Level Crossing Practises Worldwide* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <https://www.railengineer.uk/2016/06/14/level-crossing-practises-worldwide/>

[Viitattu 13.4.2018].

Repo, H., 2017. *Tekniikka & Talous* [verkkoaineisto].

Saatavissa: [https://www.tekniikkatalous.fi/talous\\_uutiset/liikenne/liikennevirasto-varoittaa-tasoristeyssovelluksista-junan-tarkkaa-sijaintia-mahdoton-tietaa-6691701](https://www.tekniikkatalous.fi/talous_uutiset/liikenne/liikennevirasto-varoittaa-tasoristeyssovelluksista-junan-tarkkaa-sijaintia-mahdoton-tietaa-6691701)

[Viitattu 30. 4.2018].

Rousseau, M. & Cadet, D. L., 2006. *The LOCOPROL Project (LOW COst Satellite Based Train Location System for Signalling and Train PROtection for Low Density Railway Lines)*. Montreal, Kanada, 7th World Congress on Railway Research (WCRR).

Schramm, F. & Weimer, L., 2014. *SafeRail Final Report*, s.l.: ESA.

Schubert, M., Klinkmüller, R. & Gebele, T., 2018. *Innovatiiviset ratkaisut ja satelliittipaikannuksen hyödyntäminen tasoristeysten turvallisuuden parantamisessa DB Netzellä* [Haastattelu]. 1.3.2018.

Silla, A., Seise, A. & Kallberg, V.-P., 2015. *Tasoristeysten turvallisuustoimenpiteiden kartoittaminen ja arviointi* [verkkoaineisto], Helsinki: Liikennevirasto. Saatavissa:

<https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/>

lts\_2015-07\_tasoristeysten\_turvallisuustoimenpiteiden\_web.pdf [Viitattu 2.5.2018].

Simona Lohan, E., 2018. *Security, Robustness and privacy in non-GNSS localization*. Helsinki: INSURE - Cybersecurity in Localization.

Strang, T., Meyer zu Hörste, M. & Gu, X., 2006. *A railway collision avoidance system exploiting ad-hoc inter-vehicle communications and galileo*, Köln: German Aerospace Center.

Tieliikennelaki 267/1981. Annettu Helsingissä 1.4.1982.

Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1981/19810267>

[Viitattu 29.4.2018].

Trimble Inc., 2018. *Trimble* [verkkoaineisto].

Saatavissa: [http://www.trimble.com/gps\\_tutorial/dgps-how.aspx](http://www.trimble.com/gps_tutorial/dgps-how.aspx) [Viitattu 9.2.2018].

Tuohino, M., 2017. *Suomen raideliikenteen ja rataverkon kunnan akustinen valvonta kuituoptiikan avulla*. Espoo: Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu.

Täytäntöönpanoasetus (EU), 402/2013. *Euroopan komission täytäntöönpanoasetus riskien arviointia koskevasta yhteisestä turvallisuusmenetelmästä ja asetuksen (EY) N:o*

352/2009 kumoamisesta. *Euroopan unionin virallinen lehti* 3.5.2013 [verkkoaineisto].

Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/>

?qid=1463036245047&uri=CELEX:02013R0402-20150803 [Viitattu 20.4.2018].

UIC, 2017. *SAFER-LC: Safer level crossing by integrating and optimizing road-rail infrastructure management and design* [verkkoaineisto].

Saatavissa: [http://safer-lc.eu/IMG/pdf/safer-lc-safer\\_level-crossing-brochure.pdf](http://safer-lc.eu/IMG/pdf/safer-lc-safer_level-crossing-brochure.pdf)

[Viitattu 27.3.2018].

Wavetrain Systems, 2018. *Level crossing warning system* [verkkoaineisto].

Saatavissa: <http://wavetrain.no/product> [Viitattu 3.5.2018].

Vejdirektoratet, 2018. *NordicWay* [verkkoaineisto].

Saatavissa: [www.nordicway.net](http://www.nordicway.net) [Viitattu 30.4.2018].

Virtanen, A., 2018. *LeCross-tutkimus* [Sähköpostiviesti]. 2.2.2018.

Virtanen, A. & Iqbal, O., 2014. *LeCross Final Report*, Espoo: VTT.

Öörni, R., 2014. *Reliability of an in-vehicle warning system*, Espoo: VTT.

Öörni, R. ym., 2011. *Autossa toimiva junavaroitusjärjestelmä – kokeilu Hanko–Hyvinkää-rataosalla*, Espoo: VTT.







ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-570-9  
[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto

