



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KAI MYLLYMÄKI
ROBOTTIAUTOJEN TÖRMÄYKSENESTOJÄRJESTELMIIN SAA-
TAVAT OPIT ILMAILUN ACAS/TCAS -TÖRMÄYKSENESTO-
JÄRJESTELMISTÄ

Diplomityö

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
28.2.2018

TIIVISTELMÄ

Kai Myllymäki: Robottiautojen törmäksenestojärjestelmiin saatavat opit ilmailun ACAS/TCAS -törmäksenestojärjestelmistä
Tampereen teknillinen yliopisto
Diplomityö, 45 sivua
Joulukuu 2018
Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat
Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: robottiauto, automaattiauto, autonominen auto, törmäksenestojärjestelmä, ACAS, Airborne Collision Avoidance System, TCAS, Traffic Collision Avoidance System,

Tämä työ on tehty Liikenteen turvallisuusvirasto Trafissa osana sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkintoa. Diplomityön tarkoituksena oli tutkia, onko toisen liikennemuodon periaatteellisesti samantyyppisistä järjestelmistä ja niiden kehityksestä opittavaa siten, että myöhemmin kehitettävässä tekniikassa saavutettaisiin nopeammin ja siten ehkä edullisemminkin korkea turvallisuustaso. Ilmailussa on ollut ilma-alusten nopeuden vuoksi pidempään tarve erilaisille turvatekniikoille ja törmäksenehkäisyydelle. Tieliikenteen nähtävissä oleva automatisoituminen tuo samat haasteet autoille. Kummassakin liikennemuodossa virheet näkyvät henkilöonnettomuuksina eli ovat hyvin sensitiivinen aihe, joten jo pienilläkin opinkappaleilla turvallisuuden parantumiseen voi olla suuret inhimilliset vaikutukset sekä ratkaiseva askel uuden tekniikan yleiseen hyväksyttävyyteen.

Ennakkokäsityksestä (teesi) poiketen tärkeimmäksi havainnoksi eivät nousseet sittenkään tekniset ratkaisut, vaan tarve selkeyttää UNECE:n rooli ja resurssit uusien järjestelmien kehittämisessä. Samalla sen suurempi medianäkyvyys järjestelmien esittelijänä tukisi kuljettajien ymmärrystä niiden toiminnasta ja rajoitteista.

Toinen oleellinen havainto oli, että korkean tason automaattiajamisen tasoilla on runsaasti mahdollisuuksia hyödyntää ilmailun kokemuksista. Toisaalta tieliikenteessä on paljon haasteita, joihin ilmailussa ei ole tarvinnut vastata.

Teknisiä näkökulmia oli useita. Robottiautoilun hyväksyttävyyden ja niiden yleistymisen keskeisin ominaisuus on turvallisuus. Järjestelmissä vikaan varautuminen voi edellyttää, että rinnakkain on käytössä jopa kolme erillistä järjestelmää tai järjestelmän osaa, jotta viallinen tulos voidaan ”äänestää” pois. Toisekseen eri automaatiotasojen ajoneuvojen liikkuminen samassa ympäristössä vaatii poliittista periaateratkaisua; rakennetaanko tai rajataanko robottiautoille oma suljettu liikenneinfransa vai kulkevatko ne muun liikenteen seassa?

Nopeasti robottiajoneuvolta ihmiselle siirtyvien yllätystilanteiden hallinnan varalle pitää olla selkeät ja usein toistetut toimintamenetelmät. Parametrien tallennin ja niissä olevien tietojen analysointi onnettomuuksien jälkeen voi ehkäistä joko toimintatavoista tai teknisistä järjestelmistä johtuneiden onnettomuuksien toistumisen. Suojaavaksi tarkoitettu laitekin voi aiheuttaa alkuperäistä vakavampia uhkia, jos uhkia ei suunnitteluvaiheessa ole osattu huolellisella riskianalyysillä tunnistaa.

ABSTRACT

Kai Myllymäki: Lessons learned for collision avoidance of robotic cars from aviation Airborne/Traffic Collision Avoidance Systems ACAS/TCAS

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 45 pages

December 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Renewable Electrical Energy Technologies

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: robotic car, autonomous car, collision prevention system, ACAS, Airborne Collision Avoidance System, TCAS, Traffic Collision Avoidance System

The work presented in this thesis has been carried out at the Finnish Transport Safety Agency (Trafi) as part of a master's degree in electrical engineering. This thesis examines whether similar systems created for one traffic form can be utilised in the development of technology for another traffic form so that a high level of safety could be reached faster and perhaps more economically. In aviation, different types of safety technology and collision avoidance systems have been necessary for a long time because of the high speed of aircraft. The automation of road transport is creating similar challenges for cars. In both traffic forms, errors may cause accidents involving persons. Thus, the topic is highly sensitive, and even the smallest lessons learned may have a major human impact and may constitute a decisive step towards the general acceptance of new technology.

Contrary to the hypothesis, the key findings did not concern technical solutions but the role and human resources of UNECE when new inventions are developed. Also UNECE's more prominent existence on media by demonstrating these new inventions would support the drivers to understand systems' capability and limitations.

The second essential finding was that in case of high level automated driving systems there are lots of opportunities to take advantage of experiences gained in aviation. Contrary to that, on road transport there are many challenges that needed not to be solved in aviation.

The topic has been examined from multiple technical viewpoints. Safety plays a key role in the acceptability and wider uptake of robotic cars. At system level, preparing for defects may require the simultaneous use of up to three different systems so that incorrect results can be "voted out". Moreover, the movement of vehicles with different levels of automation in the same environment requires political decisions on whether to create a separate and closed transport infrastructure for robotic cars or allow them among other vehicles.

In surprising events, control transfers quickly from the robotic vehicle to the driver. The successful handling of these situations requires clear and frequently repeated operating methods. Using parameter recorders and analysing their data after accidents may prevent the reoccurrence of accidents caused by operating methods or technical systems.

ALKUSANAT

Olen ollut etuoikeutetussa asemassa saadessani asua maailman onnellisimmassa ja yhdessä maailman turvallisimmista maista, jossa olen valtion tukemana voinut hankkia kaksi ammatillista koulutusta. Ihmiskunnalla on ollut halu lentää vuosisatoja ja itselleni se on ollut todellinen unelma. Siihen saatu koulutus vei vuosikymmeniksi muihin töihin, mutta vahvasti käsityksen, että tieteellis–tekninen koulutus ja käytännönläheinen turvallisuushakuinen työ ovat yllättävän lähellä toisiaan. Termit voivat olla erilaiset, mutta optimaalinen turvallisuuden ja talouden tasapaino ovat molemmissa keskiössä. Koin tarpeen jatkaa näitä pitkään keskeytyksissä olleita opintojani eteenpäin.

Esitän kiitokseni koko TTY:n opettavalle henkilökunnalle sekä opintoneuvojille sekä opintosihiteereille. Melkein–ikiteekkarin opintojen jatkamiselle merkittävän sysäyksen antoi tapa, jolla pitkään toisessa ammatissa toimineen ja melkoisesti muusta ikäryhmästä poikkeavan otitte vastaan. Ryhmähengen muodostumiseen oppilaiden kesken vaikuttaa merkittävästi se, että opettajat ovat kuin tiimissä yhtenä meistä.

Erityisen lämpimät kiitokset esitän työni tarkastajana ja myös tieteelliseen esittämiseen kannustavasti ja rakentavasti opastaneelle Risto Mikkoselle. Trafissa työtäni ohjanneen Eetu Pilli-Sihvolan opastus oli tieliikenteen ammatillisissa kysymyksissä välttämätön niin oikean näkökulman löytämiseksi kuin työn mielekkääseen rajaamiseen.

Läheisilleni lämmin kiitos myös. Nämä opintojen jatkamiset ovat edellyttäneet teiltä ymmärrystä ja joustavuutta. Olen ollut fyysisesti läsnä, mutta henkisesti poissa monet kerrat.

Akaassa, 14.12.2018

Kai Myllymäki

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	ROBOTTIAUTOT / AUTOJEN AUTOMAATIO.....	4
2.1	Lukkiutumattomien jarrujen lyhyt historia	4
2.2	Avustava järjestelmä vai automaatiota?.....	5
2.3	Autojen automaatiotasot ja käsitteitä	6
2.4	Automaatiotaso 0.....	8
2.4.1	ABS-jarru	9
2.4.2	ESC-järjestelmä	9
2.4.3	BAS-järjestelmä.....	9
2.4.4	Etäisyysvaroitussjärjestelmä.....	10
2.4.5	Minimiriski.....	10
2.5	Automaatiotaso 1.....	11
2.5.1	Adaptiivinen vakionopeudensäädin	11
2.5.2	Kaistavahti	11
2.5.3	Törmäyksenestojärjestelmä.....	11
2.5.4	Minimiriski.....	12
2.6	Automaatiotaso 2.....	12
2.6.1	Minimiriski.....	12
2.7	Automaatiotaso 3.....	12
2.7.1	Minimiriski.....	13
2.8	Automaatiotaso 4.....	13
2.8.1	Ovatko liikennelentokoneet automaatiotasoa 4?.....	13
2.8.2	Minimiriski.....	14
2.8.3	Minimiriski ilmailussa	14
2.9	Automaatiotaso 5.....	15
2.9.1	Minimiriski.....	15
3.	ILMAILUN AUTOMAATIO JA TÖRMÄYKSENESTOJÄRJESTELMÄT	16
3.1	Autopilotti	18
3.2	Transponderi.....	20
3.3	GPWS.....	21
3.4	Lennonjohto	22
3.5	ACAS/TCAS.....	22
3.6	ACAS:iin liittyviä onnettomuuksia SHELL-mallilla analysoituna.....	25
3.6.1	Überlingen.....	25
4.	LIIKENNEYMPÄRISTÖSTÄ LYHYESTI.....	27
4.1	Tie.....	27
4.2	Ilmailu	28
5.	YHTENEVYYTTÄ TIELIIKENTEESSÄ JA ILMAILUSSA	29

6. ILMAILUSSA HAVAITUT HAASTEET, JOTKA TIELIIKENTEESSÄ ON OTETTAVA HUOMIOON	33
6.1 Järjestelmien toimivuuden varmistus	34
6.2 Tiedon tallennus poikkeamatilanteiden jälkiselvittelyä varten	36
7. TIELIIKENTEEN LISÄHAASTEET, JOITA ILMALIIKENTEESSÄ EI OLE TARVINNUT OTTAA HUOMIOON.....	37
7.1 Priorisointi.....	37
7.2 Paikkatiedon tarkkuus	38
7.3 Liikennöivien kohteiden tiheys (kpl/pinta-ala)	39
7.4 Vakuutusten ja vakuutusyhtiöiden näkökulma	40
7.5 Regulaation kehittymättömyys.....	40
7.5.1 UNECE	41
8. YHTEENVETO	44
LÄHTEET.....	46

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABS	Lukkiutumaton jarrujärjestelmä Anti-lock Braking System / Anti Blocking System
ACAS /TCAS	Törmäksenestojärjestelmä Airborne / Traffic Collision Avoidance System
ACC	Mukautuva vakionopeuden säädin Adaptive Cruise Control
ADS	Automaattiajamisen järjestelmä Automated driving system
AEBS	Kehittynyt hätäjarrujärjestelmä Advanced Emergency Braking Systems
AIP	Ilmailukäsikirja Aeronautical Information Publication
AIS	Ilmailutiedotuspalvelu Aeronautical Information Service
ASR	Acceleration Slip Regulator ASR
CC	Vakionopeuden säädin Cruise Control
CVR	Ohjaamoäänentallennin Cockpit Voice Recorder
DSC	Ajovakauden hallintajärjestelmä Dynamic Stability Control (BMW)
DIN	Saksalainen normilaitos Deutsches Institut fur Normung
EASA	Euroopan lentoturvallisuusvirasto European Aviation Safety Agency
EASA Part OPS	EASA:n lentotoimintamääräykset EASA Part Operations
EBS	Automaattinen hätäjarrutusjärjestelmä Automated Emergency Braking System
EC	Euroopan komissio European Commission
ECOSOC	Yhdistyneiden kansakuntien talous- ja sosiaalineuvosto The United Nations Economic and Social Council
ERA	Euroopan rautatievirasto European Railway Agency
ESC	Ajovakauden hallintajärjestelmä Electronic Stability Control
ESP	Ajovakauden hallintajärjestelmä Electronic Stability Program (Mercedes-Benz)
EU	Euroopan Unioni European Union
FDR	Lentoarvojen tallennin Flight Data Recorder
FMS	Lennohallintajärjestelmä Flight Management System
GPS	Maailmanlaajuinen paikallistamisjärjestelmä Global Positioning System
GPWS	Maanpinnan läheisyydestä varoittava järjestelmä Ground Proximity Warning System
ILS	Mittarilähestymisjärjestelmä Instrument Landing System
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö International Maritime Organisation
ISO	Kansainvälinen standardisointijärjestö International Organization for Standardization
LDWS	Kaistavahti Lane Departure Warning Systems
MaaS	Liikkumispalvelu Mobility as a Service
NM	Merimaili Nautical Mile
ODD	(Automaattiajamisen) suunniteltu toimintaympäristö Operational Design Domain
OEDR	Kohteiden ja tapahtumien tunnistaminen ja niihin reagoiminen Object and Event Detection and Response

PBN	Suorituskykyperusteinen suunnistaminen Performance Based Navigation
PSM	Ajovakauden hallintajärjestelmä Porsche Stability Management (Porsche)
SAE	Ajoneuvoinsinöörien yhteisö Society of Automotive Engineers
SHELL	Inhimillisten tekijöiden käsitelmä Software–Hardware–Environment–Liveware–Liveware
TC	Traction Control TC
TCAS	(katso ACAS)
TMZ	Pakollinen transponderialue Transponder Mandatory Zone
UNECE	YK:n alainen Euroopan talouskomissio The United Nations Economic Commission for Europe
VDL	VHF taajuudella toimiva datalinkki VHF Data Link (tai VHF Digital link)
WP	Työryhmä Working Party

1. JOHDANTO

Ihmisen aivot on suunniteltu kävelyvauhdilla tapahtuvaan banaanien poimintaan ja käärmeiden väistelyyn. Evoluutiotamme ajatellen on hämmästyttävää, kuinka olemme oppineet liikkumaan ajoneuvoilla ja hallitsemaan niitä. Rajallisuutemme vuoksi tekninen kehitys on tuonut avustavia järjestelmiä parantamaan turvallisuutta.

Erilaisen automaation tarve on ollut suurin nopeimmassa liikennemuodossa eli ilmailussa. Automaation kehitys alkoi hidastuvuuden kontrollilla eli lukkiutumattomilla jarrujärjestelmillä, koska suihkukoneiden aikakaudella laskeutumisnopeudet kasvoivat ja koneiden lisääntyneet massat edellyttivät jarrujen tehostusta. Jarrutehostus kadotti ohjaajien jarrupoljintuntumaa, jonka puute lyhyillä kiitoteilla johti renkaiden lukkiutumiseen ja tuhoutumiseen.

Liikenteen lisääntyessä automaatiota täytyi kehittää myös yhteentörmäysten välttämiseen. Ilmassa olevat koneet onnistuivat välttelemään toisiaan paljon ennen kun silmällä voi muuta liikennettä havaita. Automaation avustuksella oli näin saatu vähennettyä kahdesta onnettomuustyyppistä merkittävä osa. Nyt onnettomuustyyppinä törmäykset maanpintaan näyttivät korostetuilta. Jälleen automaatiolla oli löydettävä ratkaisu. Lentokoneisiin kehitettiin maanpinnan läheisyydestä ennakoivasti varoitettava järjestelmä. Lentoliikenteestä on tällaisen asteittaisen kehityksen myötä muodostunut turvallisin liikkumisen muoto. Ohjaajien työkuorman helpottamiseksi automaatioon lisättiin autopilotti, joka kykenee hoitamaan ennalta ohjelmoidulla reitillä suunnistuksen sekä korkeuden ja nopeuden säilyttämisen.

Tieliikenteen haasteet eivät ilmailusta juurikaan poikenneet. Lukkojarrutuksen vuoksi tapahtuneet ajoneuvojen hallinnan menetykset aiheuttivat inhimillistä ja taloudellista kärsimystä. Tieliikenteessäkin hidastuvuuden kontrolli oli ensimmäinen laajasti käytetty automaation muoto. Kaistavahdit, kamerat ja etäisyystutkat toteuttavat samaa yhteentörmäysriskiä vähentävää automaatiota kuin mikä lentoliikenteessä koettiin välttämättömäksi.

Seuraava tieliikenteen mullistus tulee olemaan automaattiautot. Suomessa näistä yleisemmin käytetään termiä robottiauto. Niiden mahdollistumisen ehdoton edellytys on autojen kyky luotettavasti estää törmäykset toisiin ajoneuvoihin, esineisiin sekä ihmisiin. Lisäksi niiden on kyettävä suunnistamaan. Törmäyksenesto ajoneuvojen välisellä kommunikaatiolla ja tieliikenteen autopilotti ovat ajatuksena identtisiä lentoliikenteessä jo olevien laitteiden kanssa. Tieliikenteessä on tärkeänä lähietäisyyksien törmäyksenestona myös kameratekniikka hahmontunnistuksella sekä törmäystutkatekniikka. Tässä

työssä tarkoituksena oli tunnistaa, mitä opittavaa jo samankaltaisesta tekniikasta toisessa liikennemuodossa on ja toisaalta millaisia virheitä tai toimintapuutteita ei kannata enää toistaa. Kamera- ja törmäystutkatekniikalle ei ilmailussa ole vastinetta, joten nämä sinällään tärkeät ja edistykselliset järjestelmät on tässä työssä rajattu pois.

Työssä esiteltävien ilmailussa jo olemassa olevien komponenttien ominaisuuksien tutkimus on perustunut kirjallisuustarkasteluun. Niiden sovellettavuudesta tieliikenteeseen on käytetty sekä kirjallisuustarkastelua, päivä- ja viikkolehtien teknisesti kevyitä artikkeleita sekä ennen kaikkea ajatusleikkejä (brain storming). Osallistuminen liikkumispalveluiden (Mobility as a Service MaaS) seminaareihin sekä näihin osallistuvien ammattilaisten kanssa keskustelut antoivat perspektiiviä kokonaisuuteen.

Tärkein havainto ei yllättäen ollut tekninen. Työn tekemisen aikana yhä vahvemmin muotoutui käsitys, että kansainvälisen tason standardoija tai teknisen kehityksen suuntaa ja termistöä sekä laitteiden yhteensopivuutta harmonisoiva toimielin ei ole saanut sitä asemaa ja tunnustusta, mikä sille kuuluisi, Robottiautoilu muodostaa täysin uudenlaisen tekniikan ja liikkumis- tai oikeastaan elämäntavan, joten resurssien oikean kohdentamisen, kustannussäästöjen ja laitteiden yhteensopivuuden kautta avoimen teknisen kilpailun edellytyksenä on vahva ohjaus. Kansainvälinen merenkulkujärjestö International Maritime Organisation IMO ja ilmailussa Kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö International Civil Aviation Organization ICAO ovat laajasti tunnettuja, mutta tieliikenteen kansainvälinen toimija YK:n alainen Euroopan talouskomissio The United Nations Economic Commission for Europe UNECE ja sen työryhmät ovat ammattipiirien ulkopuolella tuntemattomia. Tämä on globaalien tason ratkaisua vaativa ongelma. Toinen ilmailusta linkitettävissä oleva strateginen valinta on primääristen turvallisuuskriittisten järjestelmien kahdentaminen tai jopa kahden rinnakkaisjärjestelmän käyttäminen. Mikäli ihmisille ei voida osoittaa järjestelmien luotettavuutta ja järjestelmien vikaantumiseen varautumista, on robottiautojen yleistymiselle merkittäviä esteitä. Robottiautossa ihminen luovuttaa kontrollin koneelle. Tällöin hänelle ei riitä sama turvallisuustaso kuin mikä itse ohjaten on saavutettu. Turvallisuuden varmistamiseksi tehtävällä työllä ratkaistaan hyvin pitkälti koko robottiautoilun hyväksyttävyyden käyttäjien näkökulmasta. Kolmas keskeisimmistä tuloksista oli, että yhteiskunnan tasolla, poliittisesti, on ratkaistava, miten eri automaatiotasosukupolvijoneuvojen vuosikymmeniä jatkuva rinnakkaiselo ratkaistaan. Ääri vaihtoehtoina ovat joko robottiautoille yksinomaan varattavat liikennealueet eristettynä muusta liikenteestä tai sekaliikenne sellaisten ajoneuvojen kanssa, jotka eivät kommunikoi lainkaan ja joiden liikkuminen on robottiautolle täysin ennakoimaton. Tällä päätöksellä on paitsi poliittinen merkitys myös tieinfrastruktuurin kustannuksiin jo Suomessa miljardiluokan vaikutus.

Työssä on kaksi merkittävää epävarmuustekijää tai virhelähdettä. Tulevaisuudessa mahdollisesti keksittävien täysin uusien teknisten ratkaisuiden mahdollisuus on merkittävä. Kenties mitään tässä työssä esiteltävää teknistä ratkaisua ei ole käytössä vuoden 2050 robottiautossa, vaan jokin uusi radikaali innovaatio on korvannut täysin asteittain

kehittyneet aiemmat järjestelmät. Toisena oleellisena epävarmuustekijänä on autoteollisuuden kaltaisissa suurissa tuotantomäärissä kustannusvaikutus. Merkittävä kustannussäästö voi vaikuttaa käyttöön otettavaan tai kehitettävään tekniikkaan. Esimerkiksi mikäli ratkaisumalleissa valitaan keskeiseksi törmäyksenestoksi tässä työssä käsittelemättä jätettävä tekoäly yhdistettynä konenäköön ja kameratekniikkaan, tulee vaikkapa risteyksissä etuajo- ja väistämismuorot ratkaista aivan eri tavalla. Koska toimiva arkipäiväinen robottiautoilu on vielä kaukaista tulevaisuutta, vain ilmailusta opittavissa olevat näkemykset ovat luotettavaa olemassa olevaa konkreettista tietoa. Tulevaisuuden teknologian ennakoinnissa on paljon epävarmuutta, mutta myös paljon mielenkiintoista ja uusia näkökulmia avaavaa.

2. ROBOTIAUTOT / AUTOJEN AUTOMAATIO

Periaatteessa vielä koko 1970-luvun autot pohjautuivat puhtaasti mekaaniseen kontrolliin ja toimilaitetta (esimerkiksi jarru) käytettiin suoraan hallintalaitteella. Jarrupolkimella liikutettiin jarrupoljinsylinterissä olevaa mäntää, jolloin jarruputkia pitkin neste-paine kulkeutui jarrutyösylintereille, jotka työnsivät joko levyjarrun jarrupalojen tai rumpujarrujen jarrukenkien kitkapintoja renkaan mukana pyöriviin vastinpintoihin (levy/rumpu). Hidastuvuuden kontrolli perustui ihmisen näköhavaintoon tarpeesta, jonka aivot prosessoivat kokemuksen myötä kehittyneeseen lihasvoiman tarpeeseen. Jo autoilun alkuaikoina tunnistettiin, että ihmisen ajattelukyky kapenee paniikkitalanteissa kuten oletettavissa olevan törmäyksen yhteydessä. Ihmisen keho alkaa tuottaa ”pakene tai taistele -hormonia” eli adrenaliinia [1] ja esimerkiksi jarruttaminen muuttuu paniikkijarrutukseksi. Lukkojarrutuksessa luisto- eli liukukitkalla ei ole suuntaohjauskykyä, vaan massa jatkaa alkuperäiseen suuntaansa. Vaikka jarruttamisen keskeyttäminen ja pyörivällä renkaalla (lepo- eli tartuntakitkalla) ohjaaminen voisi mahdollistaa onnettomuuden välttämisen, tavallinen autoilija ei kyennyt loogista päätelmää tekemään. [2] Tästä alkoi ajamista avustavien järjestelmien kehitys, jonka jatkumona ilmeisimmin tulee olemaan täysin itsenäiseen ajamiseen kehitetyt ajoneuvot, joiden hallintaan ei matkustaja ehkä voi enää mitenkään puuttua eli perinteisellä termistöllä autossa ei ole enää kuljettajaa lainkaan.

2.1 Lukkiutumattomien jarrujen lyhyt historia

Lukkiutumattomien jarrujen laajamittainen kehitys ja hyödyntäminen ei kuitenkaan lähtenyt autoista, vaan lentokoneista. Erityisesti suihkukoneiden suuret nopeudet sekä painot ja varsin rajalliset kiitotiepituuudet pakottivat kehittämään järjestelmiä, joilla voitiin estää renkaan lukkiutuminen ja siitä varsin nopeasti seuraava renkaan kulumisen puhkeamiseen saakka. Suuret liike-energiat ja tarve säästää painoa ja jarrujen fyysistä kokoa pakottivat käyttämään tehostimia, joiden ansiosta ohjaajien tuntuma jarrupaineen säätöön ja ennen kaikkea palaute renkaalta polkimiin päin heikkeni. Ongelmaa mutkisti lisäksi se, että renkaita saattoi yhdessä laskutelineessä olla neljä kappaletta. Fysiikan lait pahensivat tilannetta entisestään, sillä liukukitka on tartuntakitkaa pienempi eli kerran lukkiintunut rengas ei luontaisesti pyri palaamaan pyörimään; ovathan jarrujen kitkapinnat vastaavasti vaihtaneet liukukitkan tartuntakitkaan. Käytännössä fyysikaalisesti tilanne on vielä monimutkaisempi, sillä kitkan vaikutuksesta kumi pehmenee ja sen kitkaominaisuudet ovat esimerkiksi alustan kitkan, lentokoneen nopeuden ja ympäristön lämpötilan vuoksi erittäin monen parametrin summa. Flight-lehdessä 1953 julkaistussa artikkelissa esiteltiin Dunlop Aviation Divisionin kehittämä automatic brake control

Maxaret [3, s. 587], joka pyrki vastaamaan näihin haasteisiin. Artikkelin mukaan jarrutusmatkat testeissä ilman Maxaretia ja sen avustamana osoitti, että jarrutusmatkat lyhenivät jopa 30 %. Suuren eron selityksenä oli oleelliselta osaltaan se, että ohjaajat pelkäsivät – syystäkin – kuvan 1 [55] tapaista renkaan vaurioitumista, josta irtoavat kuminpalat saattoivat vahingoittaa koneen rakenteita ja moottoreita.



Kuva 1. Turussa 25.10.2017 tapahtuneen lento-onnettomuuskoneen päätelineen rengas

Koska tämän työn keskeisenä sisältönä eivät ole lukkiutumattomat jarrujärjestelmät, joita nykyään kutsutaan yleisimmin Anti-blocking systems ABS:ksi, järjestelmän teknisiin yksityiskohtiin ei tässä puututa. Edellä oleva on esimerkkinä siitä, että ilmailulla ja maantieliikenteellä on usein toisilleen annettavaa, vaikka ne saattaisivat tuntua ensi ajatuksena olevan kaukana toisistaan. Tällaista toisiltaan oppimista työssä käsitellään eri näkökulmista. Keskeisenä on automaation lisääntyvä rooli ensin päätöksenteon tukena ja myöhemmin ihmisen puolesta päätöksiä tekevinä keskenään kommunikoivina laitteina.

2.2 Avustava järjestelmä vai automaatiota?

Luistonestojärjestelmät eivät havainnoineet ympäristöä ja toimineet mitenkään automaattisesti. Ne vain estivät ihmisen virheellisen toiminnan aiheuttamaa jarrutuskyvyn heikkenemistä. Ajoneuvoautomaation kannalta ne olivat siis täysin merkityksettömät. Autoihin alkoi vuosien saatossa tulla lisää toimintoja, jotka ensin pitkälti hyödynsivät ABS-järjestelmän kertomaa renkaiden pyörimisnopeutta. Autoihin alkoi tulla liikkeellelähtöä avustavia luistonestojärjestelmiä, jotka moottorin tehoa ja nopeasti pyörivää eli ruopivaa rengasta jarruttamalla siirsivät tehoa toiselle renkaalle. Kun järjestelmiin lisättiin kiihtyvyyssantureita ja ohjauspyörän asennon tunnistavia indikaattoreita, saavutettiin taso, jossa auto puuttui ohjaajan suoritukseen useissa ajovirhetilanteissa. Kamera-, infrapuna- ja tutkatekniikka mahdollistavat jo kaistalla pysymisen hyvissä olosuhteissa sekä automaattijarrutuksen esteistä, jotka ovat jopa kuljettajan näkemän ulkopuolella. Automaatio varoittaa ja rattia täristämällä huomauttaa kuljettajaa, mikäli hän ei sivupeilin kuolleesta kulmasta huomaa viereistä autoa tai adaptiivinen vakionopeudensäädin muokuttaa ajoneuvon nopeuden muuhun liikennevirtaan. Osin automaatio on tällä hetkellä

siis vain varoittavaa ja jättää päätöksenteon kuljettajalle; osin toiminto on itsenäinen ja ohittaa kuljettajan. Visionäärit näkevät tulevaisuudessa autoja, joissa ei ohjauspyörääkään ole välttämättä lainkaan; ainakaan sitä ei tarvita muutoin kuin poikkeustilanteissa kuten kotipihaan parkkeerattaessa. Jotta liikenneautomaatiota voidaan suunnitella jäsennellysti, on ollut tarpeen määritellä automaatiotasot. Tunnetuimpia standardeja lienevät kansainvälisen standardoimisjärjestön International Organization for Standardization ISO:n [4] kansainväliset standardit, mutta autoalalla ajoneuvosinöörien yhteisö SAE Society of Automotive Engineers [5] on organisaatio, joka tuottaa standardeja autoalalle ja nykyisin myös ilmailuun. Organisaation tunnistettavin luokiteltu tuote lienee öljy. Jokainen on varmastikin huomannut öljypurkin kyljessä esim. SAE 5W30-tekstin. SAE-organisaatio on katsonut merkittäväksi kehityssuunnaksi automaatti- ja robottiautot. Se on nähnyt selkeän automaatiotasojen luokittelun niin oleelliseksi, että se tarjoaa vapaasti ladattavaksi internetsivuillaan suosituksen ” SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE, J3016, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles” [6]. Suositus on alun perin julkaistu tammi-kuussa 2014, mutta sen nykyinen versio on syyskuulta 2016 eli on varsin hyvin ajan-tasainen. Seuraavissa kappaleissa tieliikenteen ajoneuvojen automaatiotasoja määritellään SAE:n suosituksen mukaisesti. Eurooppalainen DIN eli saksalainen normilaitos Deutsches Institut für Normung on sellaisenaan hyväksynyt SAE:n standardin tiedot-teellaan ” SAE International, DIN Announce Agreement to Publish SAE Autonomous Vehicle Definition Standard in German” [7, s. 1].

SAE:n standardissa varoitetaan usein väärinkäytettävistä termeistä sivulla 26. Englanninkielisistä termeistä Autonomous, Self-Driving, Driverless, Unmanned, Robotic olen oman työni nimessä käyttänyt tarkoituksellisesti tällaista väärää termiä ”robottiauto”, sillä oikea termi automaattiauto nähdäkseni helposti ymmärrettäisiin automaattivaihtei-sena autona. Suomenkielisissä teksteissä robottiauto -termi on toistaiseksi laajasti käy-tetty.

2.3 Autojen automaatiotasot ja käsitteitä

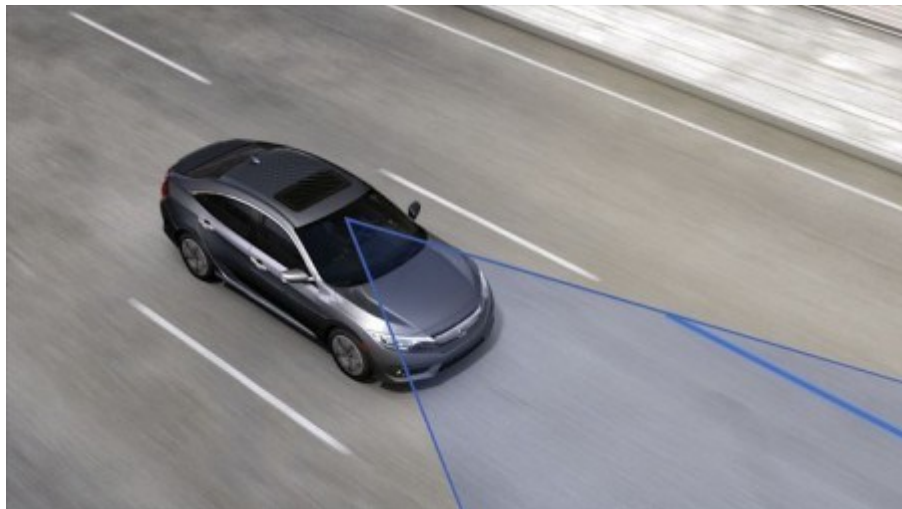
Automaatioiden päätöksenteon tasoja voidaan SAE:n mukaan jaotella – ehkä yllättäen kuten teollisuuden strateginen johtaminen – strategiseksi, taktiseksi ja operatiiviseksi. Suppein näistä on operatiivinen sisältäen ajoneuvon liikkumisen kaksiulotteisesti eli sivusuunnassa (lateral) sekä pitkittäin (longitudinal). Taktinen taso tuo näihin lisäele-menttinä kohteiden ja tapahtumien tunnistamisen ja niihin reagoimisen (object and event detection and response OEDR). Korkeimmalla eli strategisella tasolla on määrän-pääkohteeseen tehtävät reittivalinnat ja matka-ajat (destination and waypoint planning). [6, s. 5]

Sivusuunnan (lateral) hallinta tarkoittaa, että ajoneuvo osaa säilyttää asemansa suhteessa kaistaviivoihin tai vastaaviin ohjaamalla ajoneuvon liikerataa. Pitkittäinen (longitudinal)

hallinta pitää sisällään nopeudenhallinnan, edeltävän ajoneuvon tunnistamisen, turvavälin pitämisen siihen sekä näihin liittyen kiihdyttämisen ja jarruttamisen. [6, s. 8]

Kaikki tekniset laitteet rikkoutuvat joskus. Siten autojen automaatiiossakin yksi keskeinen käsite ja suunnitteluperuste on minimiriskitilanne. Se tarkoittaa tilannetta, jossa ajo on keskeytynyt ja ajoneuvo pyritään onnettomuutta aiheuttamatta tai sellaiseen joutumatta saamaan turvalliseen paikkaan ja tilaan. [6, s. 9] Nykyliikenteessä asia on huomioitu tieliikennelain 37§ ja 60–61§ [8, s. 12–13 ja 19], jonka mukaan esim. taajaman ulkopuolella on pyrittävä siirtämään / ajamaan auto tien sivuun ajoradan ulkopuolelle, syyttämään hätävilkut, viemään varoituskolmio tulosuunnassa riittävän etäälle sekä pimeässä myös jättämään vähintään pysäköintivalot päälle. Automaatiotason lisääntyessä toiminta ei ole näin suoraviivaista ja siten myös käsitettä minimiriski käsitellään eri automaatiotasojen yhteydessä. Jokaiseen tasoon tietysti liittyy myös ajoneuvon täydellinen mekaaninen ja/tai sähköinen rikkoutuminen siten, että kyseistä ajoneuvoa ei voi siirtää sen hajoamisen jälkeen mitenkään omin voimin. Tätä ei erikseen minimiriskikappaleissa käsitellä, koska muut väistön tekevät tai pysähtyvät ajoneuvot toteuttavat omaa törmäyksenestoaan toimivan järjestelmänsä perusteella; eivät esimerkiksi rikkoutuneen ajoneuvon kanssa tekemänsä kommunikoinnin perusteella.

Vikatilanne ei useimmiten ole edellä kuvatun kaltaisesti dramaattinen, vaan esimerkiksi tuulilasin yläreunassa oleva kuvan 2 kaltainen kaistaviivoja lukeva kamera ei löydä vaikkapa lumen tai viivan kuluneisuuden vuoksi oikeaa ajolinjaa [6, s. 10]. Tällöin automaatiotasosta riippuen toiminto tällaisessa suorituskykyperusteisessa järjestelmäviassa (performance -relevant) on erilainen.



Kuva 2. Hondan tuulilasikameraan perustuva kaistavahti

Käyttäjän / kuljettajan rooli eri tason automaatiojärjestelmien käyttäjänä näyttäytyy erilaisena. Vielä tasolla 1 kuljettaja on selkeästi toimija eli täysin kuljettaa ajoneuvoaan. Tasoilla 2 ja 3 kuljettajasta tulee hieman enemmän järjestelmän suorituskyvyn tilan seuraaja (monitor / supervise). Tasoilla 4 ja 5 automaatiojärjestelmään rakennettu minimi-

riskin toiminto ottaa aktiivisen roolin myös järjestelmän suorituskyvyn heiketessä. Käyttäjän ei edellytetä vaihtavan nopeasti (tai lainkaan) kuljettajan rooliin. [6, s. 11–12]

Diplomityöni aiheen mukainen yhtymäkohta ilmailun ja tieliikenteen ajoneuvoautomaation kanssa ilmenee hyvin alla automaatiotason kohdassa 4. Kahdennetun erillisen järjestelmän periaate on yhtenevä molemmissa liikennemuodoissa, mutta sen tarve ja etu on ensin tunnistettu ilmailussa. Lentokoneissa kaikki primääriset ohjaimet ja laitteet ovat vähintään kahdennetut. Esimerkiksi lentokoneen ohjaimet ovat normaalisti yhteen kytketyt [9] ja ohjaimien liikkeellä käskytetään molempia kanavia, jotka voivat olla vaijereita ja työntötankoja, hydraulikan painetta tai sähköisiä impulsseja. Yhden kanavan juuttuessa se voidaan erottaa ja jatkaa jäljellä olevalla tai olevilla järjestelmillä. Samoin avioniiikka on kahdennettua ja itse asiassa lentokoneen kaksi moottoriakin perustuvat turvallisen vikaantumisen (fail safe) mahdollistamiseen. [10, s. 23–27]

Suomessa kuten muissakin Euroopan Unionin jäsenmaissa ovat voimassa yhteiseuroopalaiset ilmailumääräykset. Ne ovat käytännössä Euroopan lentoturvallisuusviraston European Aviation Safety Agency EASA:n tekemiä yhdessä kansallisten ilmailuviranomaisten ja ilmailuteollisuuden sekä ilmailun edusjärjestöjen (mukaan lukien harrasteilmailu) ammattilaisten kera. Muodollisesti Euroopan Komissio säätää ne voimaan EU:n virallisessa lehdessä julkaisemalla, mutta ymmärrettävästi komission asiantuntemus ei ilmailun yksityiskohtiin puuttumiseen oikein riitä. Tästä syystä julkaistut määräykset tunnetaan paremmin EASA:n määräyksinä. Niitä on mm. lentopaikkojen pitämisestä, huoltotoiminnasta, ilmailukouluttamisesta ja lentotoiminnasta. Tässä työssä oleellisimpia ovat Euroopan lentoturvallisuusviraston ja Euroopan komission lentotoimintaa koskevat eli operatiiviset määräykset, jotka tunnetaan parhaiten nimellä EASA Part OPS [11].

2.4 Automaatiotaso 0

Automaatiotaso 0 tarkoittaa, että ajoneuvossa ei ole ajamisen automaatiota. Nykyisiä kuljettajaa avustavia järjestelmiä se kyllä voi sisältää. Yhteistä näille tason 0 avustaville järjestelmille on, että ne enintään hetkittäin puuttuvat ajosuoritteeseen tai ainoastaan antavat indikaation. Niitä ei ole tarkoitettu eivätkä ne kykene pysyvään ajosuoritteeseen. [6, s. 13, 17, 19 ja 22]

Esimerkkinä tasoon 0 luettaviin järjestelmiin kuuluvista ovat lukkiutumattomat jarrut (ABS-jarrut), elektroninen ajovakauden hallintajärjestelmä (Electronic Stability Control ESC sisältäen Acceleration Slip Regulator ASR tai toisella termillä Traction Control TC), hätäjarrusavustin (Braking Assistant BAS) tai ajamiseen mitenkään puuttumaton varoitusvalo liian lyhyestä etäisyydestä edeltävään. Myös perinteinen vakionopeuden säädin (Cruise Control CC) katsotaan kuuluvan automaatiotasolle 0, sillä se ei vastaa ulkoisiin tapahtumiin kuten hidastuvaan liikenteeseen [6, s. 13 ja 19].

2.4.1 ABS-jarru

ABS-jarruissa on kaikkien pyörien pyörimisnopeuden mittaus. Tietokone vertaa pyörien keskinäistä pyörimisnopeutta. Mikäli rengas alkaa luistaa, sen pyörimisnopeus hidastuu muihin renkaisiin nähden. Järjestelmä laskee kyseisen piirin jarrupainetta eli vapauttaa jarrua, kunnes sen nopeus vastaa muiden renkaiden pyörimisnopeutta ja hidastuvuutta. Jarrupaineen korjaus on niin nopeaa ja terävää, että kuljettaja tuntee selvästi tärinän jarrupolkimessa. Heti tilanteen tasaannuttua eli jarrutustarpeen vähentyessä tai auton pysähtyttyä ABS siirtyy jälleen vain valvomaan taustalle. [11, s. 3–5 ja 18]

2.4.2 ESC-järjestelmä

ESC-järjestelmä (eri valmistajilla tosin lukuisia eri termejä) käyttää osin ABS-järjestelmästä renkaiden pyörimisnopeustietoa. Lisäksi siihen on kytketty kiihtyvyyssantureita sekä ohjauspyörän asentokulman mittaus. Jos sivuttaisohjaus ei tuota sivuttaiskiihtyvyyttä, järjestelmä avustaa kääntymistä jarruttamalla sisäkaarteeseen puoleista takarengasta. Tällöin siis jarrupainetta ohjataan lisää eli toisin kuin ABS-jarrulla. Jos ESC toteaa, että auton perä lähtee kaarteessa luisuun (niin sanotusti yliohjaa), järjestelmä alkaa ulkokaarteeseen puoleista eturengasta jarruttamalla aiheuttaa etupään luistoa, jolloin auton pysty akselin suuntainen kiertoliike pysähtyy. Samalla ESC myös vähentää moottorista tehoa hidastaakseen vauhtia ja siten mahdollistaen kaarteessa pysymisen. Pelkkä etupään luiston lisääminenhan lisäksi kaartosädettä eli auto ajautuisi ulkokaarteesta ojaan. ESC:n väliintulo näkyy sekä mittariston varoitusvalona että tuntuu kuljettajalle sekä tehon menetyksenä että kuuluu automaattisten jarrutustoimintojen terävänä nakuksena. Järjestelmään on myös kytketty vetävien pyörien luistonesto ASR, joka suoraan ajettaessakin mittaa ABS-anturien avulla vapaasti pyörivän ja vetävien pyörien nopeuseroa. Eron havaittuaan ESC vähentää moottorin tehoa sekä epäsymmetrisen luistamisen yhteydessä käyttää enemmän luistavan pyörän jarrua, jolla siirtää tasauspyörästön välityksellä tehoa pitävämmälle renkaalle [12, s. 23]. Kaikki nämä toiminnot aktivoituvat vain poikkeamatilanteissa, mutta normaali ajossa sen olemassaoloa kuljettaja ei tunnista ajon aikana mitenkään [13].

2.4.3 BAS-järjestelmä

Automaattinen hätäjarrutusavustin BAS kytkee maksimaalisen jarrutustehon tunnistettuaan jarrupolkimen äkäisen painamisen. Hirvosen mukaan tutkimukset ovat osoittaneet, että ihminen ei käytä ajoneuvon jarruja maksimaalisesti, vaan jarrutus alkaa liian varovaisesti ja poljinvoima on riittämätön. BAS-järjestelmä aktivoituessaan lisää jarrupainetta, jota sitten ABS-järjestelmä voi alkaa säädellä. Kuljettajan rooli on siis jarrutuksen tehokkaassa aloittamisessa keskeinen. [12, s. 24–27][14]

2.4.4 Etäisyysvaroitussjärjestelmä

Edellisiä vielä passiivisempi kuljettajan huomiota herättävä järjestelmä on etäisyyttä edellä ajavaan tai esteeseen valvova järjestelmä. Se perustuu yleensä tutkatekniikkaan eli laite lähettää radiosignaalin eteen ja mittaa mahdollisesti takaisin heijastuvan signaalin kulkuaikaa. Signaalin nopeus on valon nopeus, joten lähtevä pulssi on lyhyt, jotta vastaanotin voi kulkuajan laskea. Tuloksena on etäisyys. Tietokone kuitenkin laskee törmäysriskiä, johon oleellisesti liittyy ajoneuvon nopeus. Kuvassa 3 on autonvalmistajan toteutus auton ohjaajalleen antamasta törmäysriskivaroituksesta edellä olevaan liikenteeseen.



Kuva 3. BMW:n toteuttama yhteentörmäysvaaran hälytys

Varoitussjärjestelmä ei siis mittaa vakiomatkaa eikä edes ajoneuvojen välisen etäisyyden mukaista kulkuaikaa, vaan suhteuttaa aikamittauksen vielä törmäysriskiin. Edellä ajavan ajoneuvon suhteellinen nopeus omaan ajoneuvoon on yksi laskentaparametri. [15]

2.4.5 Minimiriski

Minimiriskin toteutuminen on täysin kuljettajan (ihmisen) varassa. Oleellista on muun liikenteen varoittaminen visuaalisin merkein eli hätävilkuin, pysäköintivaloin ja varoituskolmiolla, kuten jo johdannossa kuvattiin. Seuraavaksi tärkeintä on saada häiriötä tuottava ajoneuvo pois joko korjaamalla vika – kuten vaihtamalla rikkoutunut rengas – tai hankkimalla hinausauto kuljettamaan ajoneuvo turvalliseen paikkaan. Mitä nopeampiliikenteinen tieosuus on kyseessä, sitä tärkeämpää on vikaantuneen ajoneuvon näkyvyys. [6, s. 9]

2.5 Automaatiotaso 1

Automaatiotasolla 1 säilyy täysi vastuu ajosuoritteesta kuljettajalla. Automaatio voi kuitenkin pystyä rajallisesti säätämään joko ohjaamalla sivuttain (lateral) tai jarruttamalla ja kiihdyttämällä (longitudinal) ajoneuvoa itsenäisesti, mutta ei molempia. Esimerkkeinä tällaisista järjestelmistä ovat mukautuva vakionopeuden säädin (Adaptive Cruise Control ACC) tai kaistavahti. Nämä eivät kuitenkaan kykene pysyvään ajotilanteen hallintaan. Järjestelmän ajattelu ei pysty tunnistamaan esimerkiksi kiinteää estettä siten, että se kaistaa tai ajolinjaa vaihtamalla ohittaisi sen. Automaattiseen pysäyttämiseen se sen sijaan kykenee. Järjestelmää voi ajatella olemassa olevan tilan säilyttäjänä, mutta ei siihen mukautuvana. [6, s. 17–19 ja 22]

2.5.1 Adaptiivinen vakionopeudensäädin

Mukautuva vakionopeudensäädin (ACC) käyttää aiemmin automaatiotasoon 0 yhteydessä kuvattua etäisyydenhallintajärjestelmää. ACC:n erona perusvakionopeudensäätimeen on sen mukautuvuus eli kyky hidastaa tarvittaessa ja luopua vakionopeudesta. Prioriteettina on siis turvallisen etäisyyden säilyttäminen ja vasta edessä olevalla riittävän vaapalla tilalla asetettu nopeudenrajoitus vähentää moottorin tehoa. Järjestelmä sekä hidastaa että kiihdyttää ajoneuvoa. Jos toinen ajoneuvo vaihtaa kaistaa siten, että ACC:n käsityksen mukaan sen eteen ilmestyi este, se jarruttaa voimakkaasti. Jos risteävästä suunasta tulee ajoneuvo, joka ei vielä ole tutkan keilan leveyden sektorissa, ACC ei osaa hidastaa ja vasta viime hetkellä alla kohdassa 2.5.3 kuvattava hätäjarrutustoiminto EBS vähentää onnettomuuden vakavuutta tai estää sen. [15][16, s. 5]

2.5.2 Kaistavahti

Kaistavahti perustuu useimmiten ajoneuvon tuulilasissa tai sivupeileissä oleviin kameeroihin, jotka tunnistavat tien reunaviivat. Samoin ne voivat seurata ohittavia tai ohitettavia ajoneuvoja ja laskea, milloin kaistan vaihto omalla ajoneuvolla voisi aiheuttaa törmäysriskin tämän toisen ajoneuvon kanssa. Kuljettajaa järjestelmä varoittaa merkkivalolla ja täristämällä rattia, jos auto on ajautumassa väärälle ajolinjalle. Kaistanvaihdosta varoitus on sivupeilissä ja vilkun kytkeminen järjestelmän tunnistaman vaaran aikana antaa äänivaroituksen ja ravistaa myös rattia. [17, s. 11]

2.5.3 Törmäyksenestojärjestelmä

Törmäyksenestojärjestelmä (Pre Collision Assistant) ja automaattinen hätäjarrutus (Automated Emergency Braking System EBS) [15] käyttävät edellä esiteltyä etäisyydentunnistusjärjestelmää sekä hahmon tunnistavaa kameraa, joiden avulla se pystyy havaitsemaan esteen sekä laskemaan, että onnettomuuden uhka on todennäköinen. Useimmat järjestelmät on suunniteltu siten, että kaupunkinopeuksissa sulalla tiellä ajo-

neuvo pysähtyy ennen törmäystä esimerkiksi tietä ylittävään jalankulkijaan. Maantienopeuksissa järjestelmä vähintään pienentää törmäysenergiaa; uusimmat järjestelmät tosin voivat pysäyttää jopa moottoritienopeudesta. Järjestelmän puutteena on, että se ei pysty huomioimaan heikkoa kitkaa tai käyttämään väistöä sivulle.

2.5.4 Minimiriski

Minimiriski toteutuu kuten automaatiotasolla 0. Kuljettajan toiminta ratkaisee toteutuvan riskin tason. Suorituskykyperusteinen systeemivika voidaan ilmentää kuljettajalle mittaristoon syttyvällä varoitusvalolla ja järjestelmän poiskykeytyminenä. Esimerkiksi omalla ajokaistalla ajoneuvon pitäen järjestelmän kytkeytyminen pois tarkoittaa välittömästi, että kuljettajan on otettava ohjaaminen hallintaansa. Ajoneuvon toinen automaattiajamisen osajärjestelmä eli nopeuden ja edellä ajavaan etäisyyden pitävä adaptiivinen vakionopeudensäädin (AAC) sen sijaan voi jatkaa toimintaansa. [6, s. 10 ja 16]

2.6 Automaatiotaso 2

Täysi vastuu ajosuoritteesta on edelleen kuljettajalla. Automaatiotaso 1:stä poiketen ajoneuvo kykenee rajatusti hallitsemaan ajoneuvon liikerataa sekä sivusuunnassa että nopeutena. Esteiden väistämiseen tai ennakointiin (OEDR) tai yllättävien liikennetilanteiden hallintaan järjestelmä ei kykene vastaamaan kattavasti tarvittavilla toimilla. On tilanteita, joita järjestelmä ei tunnista eikä siten reagoi, vaan tehtävä jää kuljettajalle. [6, s. 12, 17–19 ja 23]

2.6.1 Minimiriski

Minimiriski toteutuu siis kuten automaatiotasolla 1. Kuljettajan toiminta ratkaisee toteutuvan riskin tason. Myös suorituskyvyn heikentymisen (systeemivian) ilmetessä kuljettaja vastaa ohjaamisesta vian jälkeen.

2.7 Automaatiotaso 3

Auto suoriutuu itsenäisesti moottoritien kaltaisesta selkeästä rajatusta liikenneympäristöstä eli automaattiajamisen suunnitellusta toimintaympäristöstä (Operational Design Domain ODD). Kuljettaja voi tehdä esimerkiksi työasioitaan ja olla kiinnittämättä huomiota liikenteeseen. Järjestelmän suorituskyvyn äkillisesti laskiessa tai rajatun ODD-alueen rajalla ajoneuvo pyytää kuljettajaa ottamaan ajosuoritteen hallintaansa. Karrikoiden voidaan kuvata, että ajoneuvossa on ohjaimet ja kuljettajan paikka, mutta rajatuilla alueilla ohjaimiin ei tarvitse koskea. Rajatulla ODD-alueella ajoneuvo kykenee myös esteiden väistämiseen tai ennakointiin (OEDR) ja yllättävien liikennetilanteiden hallintaan. Tällainen roolin toistuva vaihtuminen aiheuttaa väistämättä epäselvyyttä siitä, onko aktiivisen ohjaamisen tehtävä automatiikalla vai kuljettajalla. Jatkuva valmius puut-

tua poikkeus- tai ongelmatilanteissa ohjaamiseen välittömästi ei vielä merkittävästi vapautta kuljettajan roolia ja vastuuta ajoneuvon hallinnasta. [6, s. 12, 16–18, 20 ja 23]

2.7.1 Minimiriski

Minimiriski toteutuu edelleen kuljettajan toiminnan perusteella. Automaatiolla on kuitenkin ollut vikaantumiseen asti aktiivisen ajamisen tehtävä, joten matkustajalle tulee yllätysmomenttina vaihtaminen kuljettajan rooliin ja ajaa ajoneuvo mahdollisimman turvalliseen paikkaan. SAE:n julkaisussa esitettiin hahmotelma etäisyyttä edeltävään ajoneuvoon tai esteisiin mittaavan tutkasensorin vioittumisesta. Tällaisessa tapauksessa automaattiajamisen järjestelmä (Automated driving systems ADS) lähettää kuljettajalle pyynnön puuttua ohjaamiseen. Järjestelmä ei edellisistä poiketen kuitenkaan kytkeydy tässä vaiheessa pois, vaan riskiä minimoidakseen hidastaa nopeutta ja jatkaa ohjaamista useita sekunteja, jotta kuljettaja voi orientoitua tehtävänsä. Vakavassa hallittavuuteen oleellisesti vaikuttavassa viassa kuljettajan olisi ymmärrettävästi pystyttävä reagoimaan nopeammin ja pyrittävä varoittamaan muuta liikennettä ja ohjaamaan ajoneuvo tien pientareelle. [6, s. 9–10]

2.8 Automaatiotaso 4

Auto suoriutuu täysin itsenäisesti väistöistä, hätäjarrutuksista, ohituksista jne. Edellytyksenä on, että toiminta-alueen infrastruktuuri ODD on kehitetty automaattiajamista varten. Käytännössä tämä tarkoittaa kaupunkeja. Jälleen hieman karrikoiden kuljettaja/matkustaja voi matkan aikana olla selkä menosuuntaan, mutta ”mökkitiellä” kuljettajana ajaen itse. [6, s. 17–18, 20–21 ja 23–24] Ajoneuvo saattaa sisustukseltaan jo poiketa oleellisesti nykyisestä esimerkiksi siten, että selkeää ”kuljettajan paikkaa” ohjauspyörineen, polkimineen ja vaihdevalitsimineen ei enää ole [6, s. 14]. Automaatiotasojen 3 ja 4 välillä on siten merkittävä siirtymä kuljettajasta matkustajaksi. Tällä tasolla on myös automaatiotasoa 3 selkeämpää, milloin kuljettaja on yksiselitteisesti vastuussa ajosuoritteesta ja milloin ei. Edellytyksenä ovat suunnitellun toiminta-alueen (ODD) selkeät rajat.

2.8.1 Ovatko liikennelentokoneet automaatiotasoa 4?

Automaatiotaso 4:ssä on selvä yhtymäkohta nykyaikaisiin liikennelentokoneisiin. Eurooppalainen Airbus eroaa ohjaamisperiaatteeltaan oleellisesti amerikkalaisesta Boeingista. Esimerkiksi kaarta tehtäessä eli koneen ollessa kallellaan Boeingia täytyy vakiokaarrossa korkeuden säilyttämiseksi ohjata pitämällä ohjaimet poikkeutettuna neutraaliasennosta ja vedettävä hieman nokkaa eli lisättävä kohtauskulmaa ja siten nostovoimaa kumoamaan kaartamiseen kuluva energiaa. Turbulenssin heittäessä ohjaaja korjaa antamalla ohjaimilla muuttuvia käskyjä. Vaikka niissäkin on tietokone ohjaimen ja ohjainpinnan välissä, voidaan sanoa lentäjän aidosti lentävän Boeingia. Sen sijaan Airbus

on suunniteltu siten, että ohjaajan sivupaneelissa olevalla joystick-ohjaimen poikkeuksella tietokoneelta pyydetään kallistus ja kaartoa vastaava g-voima (kiihtyvyys suhteessa maan vetovoimaan). Halutun kallistuksen saavuttamisen jälkeen tietokoneen antamat käskyt ohjainpinnoille pitävät koneen samassa kallistuksessa puuskissa ja nostoissa siihen asti, kunnes ohjaaja pyytää kallistuksen oikaisua joystickillään. [18] Toisaalta kuitenkin seuraavassa luvussa tarkemmin kuvattavan mukaisesti äkkitilanteissa kuten yhteentörmäysuhassa ohjaajien odotetaan välittömästi suorittavan käsiohjauksella väistöt. Tässä yhtymäkohtaa on enemmän vain automaatiotasoon 3.

2.8.2 Minimiriski

Minimiriski perustuu automaation logiikkaan. Vikatyypistä riippuen toiminta voi olla joko aktiiviselta ajokaistalta poistuminen ennen pysähtymistä tai siirtyminen automaattiajamisen suunnitellusta toimintaympäristöstä (ODD) pois, jolloin matkustajan tulee vaihtaa kuljettajan rooliin. Automaattiajaminen ei suostu kuitenkaan kytkeytymään pois ennen kun se on siirtänyt ajoneuvon turvalliseen paikkaan tai kuljettaja ottaa ajotehtävän itselleen [6, s. 21]. Jos vikana on esimerkiksi ajoautomaatin virtalähteen vioittuminen, voi järjestelmä ottaa käyttöön varavaravirtalähteen. [6, s. 10]

2.8.3 Minimiriski ilmailussa

Minimiriskiajattelussa automaatiotasolla 4 on selkeä sama ajattelu toimintavarmuuden parantamiseksi niin ilmailussa kuin tieliikenteessäkin. Kahdennetun järjestelmän filosofia on todettu ilmailussa tarpeelliseksi. EASA Part OPS [11, kohta CAT.IDE.A.345(b)] edellyttää mm. kahta puheradiota. Käytännössä myös suunnistuslaitteet on oltava kahdennettuna, sillä määrälentopaikan tai reittiosuuden maalaiteet eivät sisällä eri järjestelmän varalaitetta ja edellytyksenä on, että yhden laitteen rikkoutuessa voidaan lentoa jatkaa varalaitteella [11, kohta CAT.IDE.A.345(d)].

Tietokoneen avulla lennettävien ns. fly-by-wire -lentokoneiden suunnittelussa on otettu lisäksi huomioon se, että tietokone ei voi varmistua tiedon oikeellisuudesta siten kuin esimerkiksi vanhojen lentokoneiden ohjaajat vain katsomalla ikkunasta ulos todetakseen vaikkapa jonkin ohjaimen viallisen toiminnan; joko itse ohjainpinnasta tai ohjainpoikkeutuksen vaikutuksen perusteella. Kaksi tietokonetta ei keskenään pystyisi päättämään, kumman saama tai lähettämä tieto on virheellistä, joten näissä koneissa on kolme lentoarvoja laskevaa tietokonetta, joiden pyritään vielä saavan lähtötietonsa eri lähteistä kuten erillisistä ja eri puolille lentokonetta asennetuista nopeutta mittaavista niin sanotuisista pitot-putkista [19]. Vikatilanteessa tietokoneet ”äänestävät” ja kahdesta muusta poikkeavan tietokoneen arvot katsotaan virheelliseksi. [20]

2.9 Automaatiotaso 5

Korkeimmalla automaatiotasolla ajoneuvo on käytännössä itsenäinen. Se pystyy suunnittelemaan reitin haluttuun kohteeseen ja liikkuu lähes rajattomalla alueella. Enää ei kuljettajasta voi käsitteenä puhua lainkaan, sillä myös systeemivikatilanteissa tai muissa vikatilanteissa matkustajan ei oleteta vaihtavan kuljettajaksi. [6, s. 17–19, 21 ja 24] Ehkä autoa voidaan esimerkiksi kännykkäsovelluksen tai nykyisten leluautojen kaltaisten ohjaimien avulla siirtää täysin tieverkon ulkopuolisella alueella kuten pihassa hyvin rajatusti, mutta tielle päästyään ajoneuvon oletetaan kulkevan automaatiolla. Ihminen tosin päättää, milloin automaatio kytketään päälle. Kirkkaan mielikuvan luomiseksi jälleen hieman karrikoiden voitaisiin olettaa, että ratti löytyy matkatavaratilasta poikkeus-tilanteita varten, jos edes sieltäkään. CNET Magazine on kuvaan 4 luonut varsin maltillisen skenaarion tällaisesta ajoneuvosta, sillä matkustajat mm. vielä istuisivat menosuuntaan ja tuulilasista ulos nähden kuten nykyisissäkin autoissa.



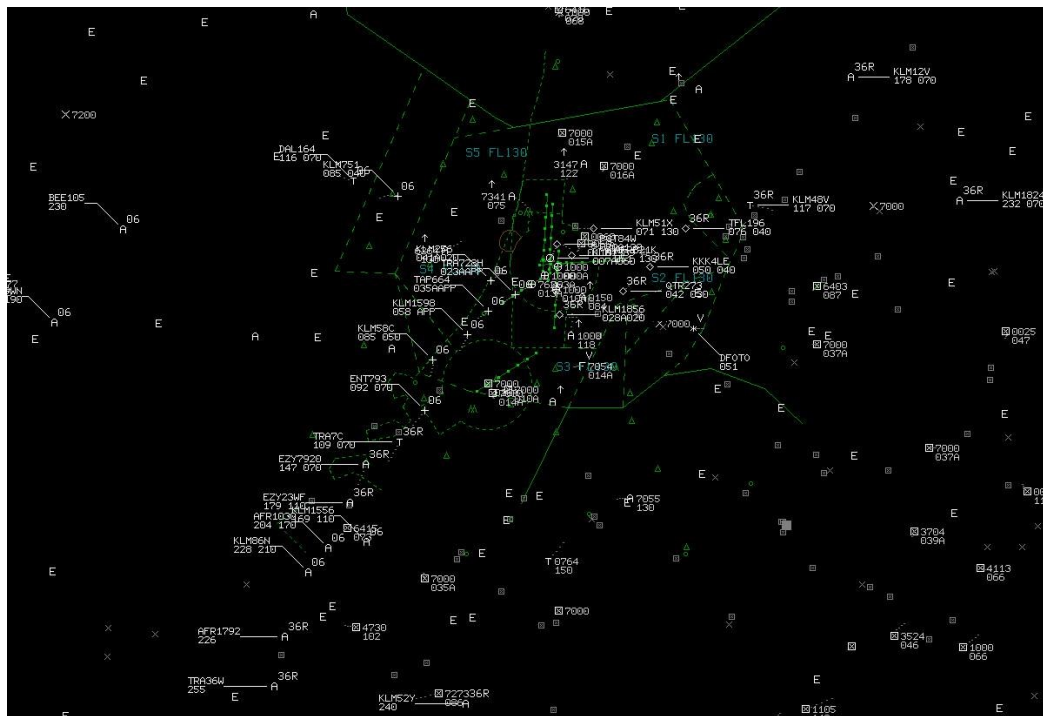
Kuva 4. CNET Magazinessa esitetty visio automaatiotason 5 ajoneuvon ohjaamosta

2.9.1 Minimiriski

Minimiriskin toteuttamiseen pätee automaatiotaso 4 muutoin, mutta suunniteltu toimintaympäristö (ODD) on oleellisesti laajempi, joten siltä poistuminen käytännössä tarkoittaisi pihaan tai metsäautotielle ohjaamista. Automaation haasteet ovat merkittävästi vaativammat, sillä ajoneuvon toimintaympäristö kattaa nopealiikenteisen taajamien välisen liikkumisen – ajatuksellisesti syöttöliikenteen – sekä asuintaajamien hitaamman, mutta nopeasti muuttuvan liikenneympäristön – sitä voisi kutsua jakeluliikenteeksi.

3. ILMAILUN AUTOMAATIO JA TÖRMÄYKSENESTOJÄRJESTELMÄT

Ilmailussa tarve teknisille apuratkaisuille toisten ilma-alusten havaitsemiseen ja väistämiseen tai sota-aikoina päinvastoin jäljittämiseen on todettu jo ilmailun alkuaikoina. Visuaalinen havainnointi on ollut täysin mahdotonta mittarisääolosuhteissa pilvessä tai yöllä lisähaasteenaan koneiden suuret kohtaamisnopeudet eli lyhyt reagointiaika. Vaikka taivaalla periaatteessa voisi ajatella tilaa olevan riittämiin, lentokoneiden määrä lentokenttien lähestymisalueilla voi olla melkoinen. Kuvassa 5 on Amsterdamin Schipholin kentän liikennetilannetta kentän lähestymisalueella. Lähtevää ja tulevaa liikennettä on yhtä aikaa ja toiset ovat nousussa toisten ollessa liu'ussa. Reittivälejä koneet lentävät samoja lentoväyliä pitkin vastakkaisesti suuntiin. Nykyisin reititys on vapaata [21] ja siten risteäviä reittejä voi koneiden välille tulla missä hyvänsä.



Kuva 5. Schipholin lentokentän lähestymisalueen liikennetilannetta

Vielä muutama vuosikymmen sitten koneiden pitäminen erossa toisistaan eli niin sanottu porrastus [22] perustui lentokoneiden antamiin paikkailmoituksiin. Lennonjohto oli saanut ennen lentoa ilma-aluksesta tiedot lentosuunnitelmassa [23], jonka yhtiö tai ohjaajat antoivat. Siinä kuvattiin mm. ilma-aluksen kutsumerkki (eli tunnus), lentoreitti, haluttu korkeus ja koneen nopeus. Lennonjohtajan tehtävänä oli muodostaa mielessään

liikennetilanteesta kolmiulotteinen kuva ja eri nopeudet huomioiden ottaa myös aika neljäntenä ulottuvuutena huomioon. Tätä lennonjohtotapaa kutsuttiin menetelmälennonjohdoksi [24, s. 180]. Koneille annettiin reitti maassa oleviin nimettyihin lähetysasemiin perustuen. Menetelmälennonjohtamisen helpottamiseksi otettiin käyttöön tutkia, joiden lähettämä radiotaajuussignaali heijastui ilma-aluksesta takaisin. Tällainen ensiötutka [25 kpl 5.4] ei kuitenkaan pystynyt erottelemaan kohteita mitenkään. Heijaste tuli yhtä hyvin niin lentokoneesta kuin parvesta lintuja tai myös esim. korkeasta maastosta. Vain tutkan pyörimisen piirtämien täplien kulkunopeudesta pystyi arvioimaan kohdetta.

Seuraavana vaiheena olivat toisiotutkat [24 s. 183–184] [25 kpl 5.4], jotka lähettivät kyselyn lentokoneen tutkavastaajalle. Tutkavastaaja eli transponderi vastasi ensivaiheessa vain koodillaan, myöhemmin antoi myös lentokorkeuden. Transpondereiden kehitysasaitteita kuvataan tarkemmin myöhemmin kappaleessa 3.2. Lennonjohto pystyi nyt yksilöimään eri lentokoneyksilöt ja tutkalennonjohdolla voitiin lyhentää koneiden välisiä porrastusminimejä sekä antaa lentokoneille oikaistuja lyhyempiä reitityksiä. Lentokoneiden ei enää tarvinnut kulkea maalaitteelta toiselle.

Liikenteen vilkastuessa uhka läheltä-piti -tapauksille tai jopa yhteentörmäyksille kasvoi ja ilmailussa tarvittiin uutta ajattelua ja uusia tekniikoita. Sekä lennonjohtajien tutkiin että ilma-alusten laitteisiin lisättiin konfliktiriskistä varoittavia järjestelmiä. Niiden periaate on oikeastaan hyvin yksinkertainen; aiemmin laitteet piirsivät ruudulle tai muistiinsa toteutunutta reittiä. Järjestelmiin lisättiin ennakoiva laskenta, joka päätteli, että sen hetkisillä arvoilla nopeudesta, pystynopeudesta (eli noususta tai laskusta) ja korkeudesta laskien lentokone on tietyn ajan päästä tietyssä pisteessä. Kun kaikkien ilma-alusten lasketut paikat ”lähitulevaisuuteen” oli selvillä, tietokone vain varmisti, että ne reittiviiivat eivät ajautuneet liian lähelle tai sitten antoivat varoituksen porrastusalitusuhasta. Lentokoneiden törmäysvaroitussjärjestelmää kehitettiin vielä pidemmälle; laitteet neuvottelivat väistön tekemisestä keskenään. Jälleen käytännössä todettiin aukko laitteen turvallisuudessa; esimerkiksi korkean vuoriston kohdalla väistöneuvo olisi saattanut johtaa toisen väistävän koneen törmäykseen maahan, vaikka alun perin lentokoneet olisivat voineet ehkä vain mennä määräysten edellyttämiin etäisyyksiin nähden liian läheltä toisiaan. Uuden uhan välttämiseksi lentokoneisiin kehitettiin maanpinnan läheisyydestä varoittava järjestelmä ja sen tieto yhdistettiin törmäyksestä varoittavaan järjestelmään. Kuvaus näistä laitteista ja niihin kytketyistä muista varoituslaitteista esitellään seuraavissa kappaleissa tarkemmin.

Automaattiohjaaminen eli autopilotti on ilmailussa ollut arkipäivää jo vuosikymmeniä. Laitteet ovat kehittyneet, mutta mitään merkittävää nopeasti käyttöön otettua uutta innovaatiota niihin ei ole tullut; edelleen ohjaajien aktiivinen tehtävä on valvoa niiden toimintaa. Ilmailusta on autojen automaattiajamiseen tunnistettavissa yksi oleellinen näkökulma. Ihmisen tarkkaavaisuus heikkenee, mikäli hän toimii suorituskykykapasiteettiinsa nähden alisuorittajana [26]. Suorituskyvyn toisessa ääripäässä eli voimakkaassa

stressissä ajattelu myös kapenee, mutta se on ilmiönä varmasti tunnetumpi ja se ei siksi ilmeisimmin vaadi erityisen huomion kohdistamista.

3.1 Autopilotti

Ilma-alusten automaattiohjausta kutsutaan siis autopilotiksi. Pääosa reittilentojen lentotajasta on autopilotin ohjaamaa. Jopa laskeutuminen loppuloivennuksineen ja kiitotiellä jarruttamisineen on korkeimpien vaatimustasojen maalaatteiden ja lentokoneen autopilotin perusteella mahdollista [11, kohta GM1 SPA.LVO.100(c),(e)].

Autopilottien kehitys lähti liikkeelle vuonna 1913 pitkittäisakselin eli kallistuksen stabiloimisesta [27, kpl 3], jonka kehittäjä Lawrence Sperry käytti nopeasti pyörivien hyrrien taipumusta säilyttää asentonsa avaruuteen nähden [28, s. 15–16]. Hyrrä käytännössä tunnisti, kun lentokone sen ympärillä kallistui. Tämä tieto vietiin ohjaimille, jotka korjasivat poikkeaman.

Seuraavan sukupolven laite oli kahdella hyrrällä eli gyroskoopilla varustettu ja kykeni edellisen lisäksi hallitsemaan myös poikittaisakselin ympäri tapahtuvan eli nokan ylös–alas -liikkeen. Lentokoneiden koon kasvaessa ja edullisten aerodynaamisten muotojen vuoksi pitkärunkoisien ja erityisesti nuolikulmasiipisten lentokoneiden koelentoilla havaittiin koneen muutaman sekunnin syklillä vaappuvan pysty- ja pituusakselinsa ympäri. Autopilottiin oli tarpeen yhdistää vielä kolmaskin akseli.

Autopilotti alkuaikoina vain säilytti sen hetkisen asennon. Jälleen käyttökokemukset toivat esiin uuden tarpeen. Ohjauspaneeliin lisättiin ohjausrullia tai -nuppeja, joilla voitiin esimerkiksi pyytää uusi ohjaussuunta (heading) tai pystynopeus (vertical speed). Näin autopilottia ei tarvinnutkaan enää kytkeä pois ja ohjaajan ajaa käsiohjauksella konetta uuteen suuntaan kytkeäkseen uudelleen autopilotin säilyttämään tämän uuden arvon.

Ohjaaja vapautui koneensa manuaalisesta ohjaamisesta, mutta joutui edelleen suunnistamaan täysin itse. Suunnistaminen perustui lentämisen alkuaikoina näköhavaintona tehtävään karttasuunnistukseen tai myös tähtisuunnistamiseen yöllä. Laskelmasuunnistus eli laskettu lentoaika kartalta laskettuun magneettiseen suuntaan käännepisteiden välillä oli rinnakkaisena metodina käytössä. Radiosuunnistuksen kehittyminen eli maassa olevien lähetimien ja lentokoneen vastaanottimien asentaminen oli säävarmuuden vuoksi välttämätöntä. Nykyisin satelliittipohjainen paikannus on korvaamassa maalaatteet ja reittipisteet ovat nyt tiettyjä koordinaatteja. Samoin mekaaniset ja kuluvat hyrrät ovat vaihtuneet ensin valonsäteen taipumiseen perustuviin laserhyrriin ja myöhemmin elektroniin kiihtyvyyssantureihin. [28, s. 20][29, s. G-16]

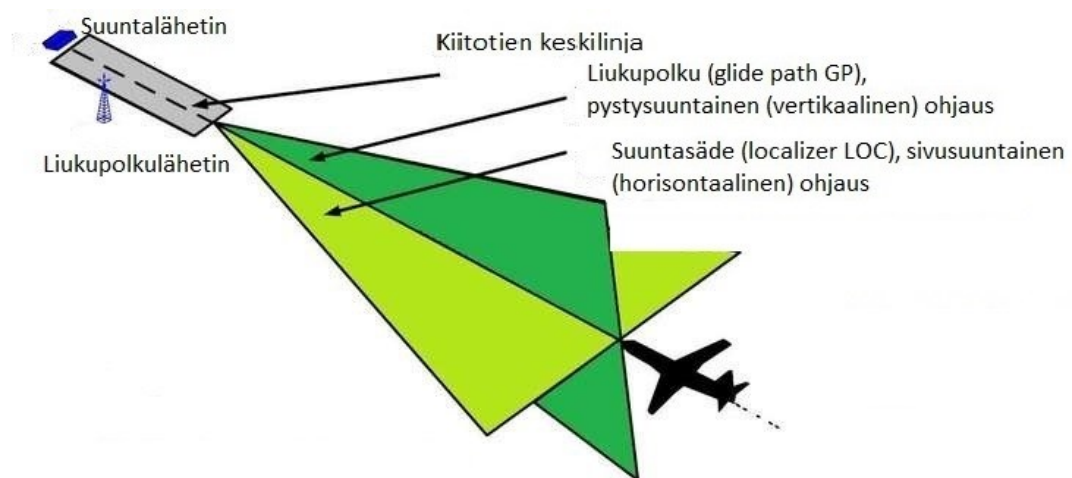
Seuraava merkittävä kehitysaskel oli, kun autopilotteihin lisättiin kyky seurata reittiä radiomajakoiden perusteella. Koneen rungon suuntahan voi sivutuulikomponentin

vuoksi olla vinossa maahan projisoituun reittiviivaan nähden aivan kuin soudettaessa veneellä virtaavan joen poikki. Radiosuunnistuslaitteeseen hakeutuvana lentokone käytti sen hetkiseen sivutuuleen sopivaa tuulikorjauskulmaa automaattisesti; yrittihän se pysytellä keskiviivalla koko ajan. Lennonhallintajärjestelmien (Flight Management System FMS) avulla ohjaajat pystyivät tietokoneen muistista valitsemaan reittipisteet kuten kuvassa 6 (sekä myös tarvittaessa luomaan lisäpisteitä) ja ohjelmoimaan koko reitin määränpäähän asti ennakkoon. Autopilotti vaihtaa reittipisteen saavutettuaan seuraavan edessä olevan reittipisteen kohteekseen. [30, s. 2–3, 11 ja 15]



Kuva 6. Lennonhallintajärjestelmän reitin tai reittipisteen valinta

Autopilottin tarkkuus ja väsymätön valppaus pieniinkin poikkeamiin teki siitä tarpeellisen lentämään myös lennon kriittisin vaihe eli lähestyminen. Autopilottiin tarvittiin lisää ominaisuuksia. Reittiviivalla pysyminen ja korkeuden säilyttäminen tai muuttaminen ohjausrullalla tiettyyn vakiopystynopeuteen ei riittänyt mittarilähestymiseen ILS (Instrument Landing System), jossa kuvassa 7 esitetyn mukaisesti maalähetin lähettää lähestinantennia kohti kapenevana keilana sekä sivusuuntaopastuksen että liukupolkuopastuksen. [31, s. 12–13]



Kuva 7. Mittarilähestymisjärjestelmä ILS:n suunta- ja liukupolkuopastus

Autopilottiin täytyi suuntaa tai liukupolkua seuratakseen hylätä risteyskohdassa aiempi suunta- ja korkeusarvo ja vaihtaa ILS-vastaanottoon. Jälleen kerran ohjaajan työkuorma keveni, mutta koneen siirtyessä vaakalennosta liukuun sen nopeus luonnollisesti lähti kasvamaan. Ohjaajan tehtäväksi jäi paitsi järjestelmän toiminnan varmistaminen myös nopeuskontrolli, kun liu'un lisäksi muuttuvana tekijänä olivat koneen vastuksen muutokset mm. laskutelineiden ja laskusiivekkeiden tai siiven johtoreunasiivekkeiden käytön vuoksi. Jälleen kerran tekniikan kehitys tuli apuun ja autopilottiin kytkettiin vielä automaattinen tehonsäätö, jolloin autopilottiin seuraamaksi parametriksi tuli vielä koneen ilmanopeus.

Kuten lentokoneen autopilottiin kehityshistoriasta on nähtävissä, askel kehitystä toi esiin uuden tarpeen. Myös ajoneuvoautomaatio joutuu varmasti kohtaamaan kehitysaskeleita, jotka tulevat ilmi vasta kun jo valmiiksi ajateltu tekniikka on ollut jonkin aikaa käytössä. Selvimmin lisääntyvät uudet tarpeet ovat nähtävissä kännyköiden ominaisuuksissa; alkuaikojen matkapuhelimen varsinainen puhelin-ominaisuus alkaa jäädä sivuosaan näissä puhelimiksi kutsutuissa pienoistietokoneissa. Nykyiselläänkin lentokoneen autopilotti yhdistettynä lennonhallintajärjestelmään vaatii edelleen ohjaajien ohjelmoivan tai vähintään valitsevan esiohjelmoidun reitin sekä kytkemään autopilottiin halutussa lennon vaiheessa päälle. Autopilotti ei alla kappaleessa 3.5 esitettävän mukaisesti kykene säilyttämään etäisyyttä edellä menevään tai tekemään itsenäisesti väistöä kohtaavan tai saavutettavan liikenteen kanssa. Vaikka ensimmäinen sukupolvi autopilottista lensi jo 1913, edes yli sadan vuoden kehitystyö ei ole tuottanut kuin lähinnä automaattiajamisen tasoa kolme tai osin neljä vastaavan järjestelmän. Tämän perusteella voi arvioida, että joko tiestön infraan täytyy luoda vain automaattiajamiseen osoitettuja väyliä ja kaistoja tai hyväksyä kehityksen pitkäkko aikajänne, kun esim. Suomessa ajoneuvojen keskimääräinen romutusikä vuoden 2017 tilastoissa on 20,7 vuotta [32] eli perinteisen tekniikan ajoneuvoja on liikenteessä varmasti vuosikymmeniä.

3.2 Transponderi

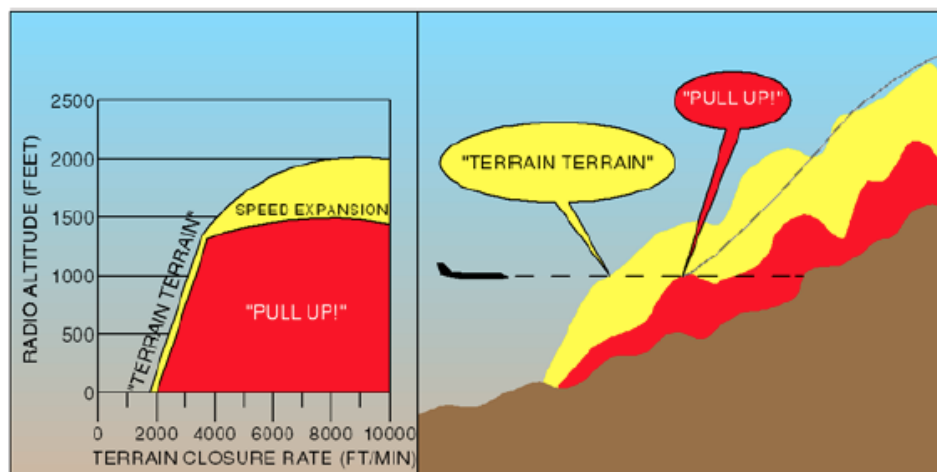
Transponder sanana muodostuu sen toiminnasta “transmitter-responder” eli lähetin-vastaaja. Laite vastaa esimerkiksi lennonjohtotutkan lähettämään kyselyyn [24, s. 183–184]. Teknisesti lähetys ja vastaanotto erottuvat taajuudellaan; maalaite kyselee taajuudella 1030 MHz ja transponderin vastaus lähtee taajuudella 1090 MHz [33, s. 108]. Lennojohtoissa länsimaissa ns. toisiotutka (katso kuva 5 edellä) on lennonjohtojen pääasiallinen tutka. Kuten edellä kerrottiin, ensiotutkan kuvan tulkinassa on vaikeutena erottaa lentokone muista tutkaheijasteen antavista kohteista. Transponderin antama yksilöity tieto tutkan näytöllä on erinomainen, mutta ilman toimivaa transponderia lentävä ilma-alus ei näy lainkaan näytöllä. Tämän vuoksi vilkkaille lentopaikoille on määritelty transponderi pakolliseksi. Suomessa nämä pakolliset alueet Transponder Mandatory Zone TMZ on kerrottu sekä lennonvarmistuspalveluja tarjoavan ANS Finland Oy:n julkaisemassa Suomen Ilmailukäsikirjassa Aeronautical Information Publication AIP [34,

kohta ENR 2.1 ja AD 2] että Suomen ilmailuviranomaisen Liikenteen turvallisuusvirasto Trafin ilmailumääräyksessä OPS M1-31 [35].

Transpondereiden kyvykkyydestä eli lähetettävän tiedon sisällöstä käytetään termejä moodit. Yksinkertaisin eli vain koneelle annetun nelinumeroisen koodin vastauksena antavaa laitetta kutsutaan moodin A transponderiksi. Lennonjohdon näytöllä on vain paikkatieto, joten eri korkeudella lentävät koneet voivat olla samassa pisteessä ongelmitta. Korkeustieto on luonnollisesti erittäin tarpeellinen. Tällaisia lähettäjiä ovat moodin C transponderit. Niiden lähettämä korkeustieto on oikeammin ilmanpaine-pinta, johon kaikilla laitteilla on sama vertailutaso eli ns. keskimääräisen merenpinnan taso 1013,25 hPa [33, s. 33, 111 ja 261]. Moodin S transponderiin on lisäksi kiinteästi asetettu 24 -numeroinen tunniste, joka on yksilöllinen lentokoneyksilölle [33, s. 117]. Myöhemmin kappaleessa 3.5 esitettävien lentokoneiden törmäyksenestojärjestelmien keskinäisen tiedonvaihdon edellytys on moodin S transponderi.

3.3 GPWS

Maahan tai esteeseen kuten korkeaan mastoon törmäämisen välttämiseksi lentokoneissa on varusteena laite, jolle ei oikein ole vakiintunut suomenkielistä termiä. Yleisimmin käytetään lyhennettä GPWS, joka muodostuu sanoista Ground Proximity Warning System eli maanpinnan läheisyydestä varoittava järjestelmä. Sen uudemmasta modifikaatiosta käytetään myös etuliitteellä Enhanced eli EGPWS. Laitteen toiminta perustuu siihen asennettuun datatiedostoon lentokenttien maastosta ja esteistä sekä suoraan lentokoneen alta korkeutta mittaavan radiokorkeusmittarin tietoihin. Kuvan 8 mukaisesti laite laskee muutostrendejä ja niiden perusteella ennakoii tulevan sijainnin ja korkeuden suhteessa esteisiin tai maanpintaan. Sijainnin määrittämiseen laite käyttää maailmanlaajuisia paikallistamisjärjestelmää GPS-suunnistusta. [36, s. 6–7]



Kuva 8. GPWS:n väistökäskyt topografian mukaan

3.4 Lennonjohto

Reitti- ja tilauslennot (kaupallinen ilmakuljetus) lentävät harvoja maantieteellisiä poikkeuksia lukuun ottamatta koko ajan lennonjohto- tai lentotiedotusalueella. Näiden kahden termin erona on ilmatilaluokituksesta johtuva päätöksentekijän ero; vähän liikennöidyillä alueilla palvelua tarjotaan lentotiedotuksena, jollaisella alueella lennonvarmistushenkilö antaa muista koneista paikkatietoa ja voi antaa suosituksia, mutta varsinaisen päätöksen esimerkiksi lähestymisen aloittamisesta tekee lentäjä. Lennonjohtoalueella puolestaan lentokoneelle annetaan lupa liikkua tiettyä reittiä tai korkeutta ja saadusta selvityksestä ei saa normaalitilanteessa poiketa. Näissä kummassakin kuitenkin on maa-aseamalla tieto koneiden sijainneista ja korkeuksista ja tyypillisessä tilanteessa lennonjohto antaa koneille luvan lentämiseen joko paikkatietona tai ohjaussuuntina ja lentokorkeutena. Kohtaava eli vastakkain kulkeva liikenne reittilento-osuudella porrastetaan siten, että koneet erotetaan korkeussuunnassa 300 metrin portailta. Lentopaikan lähistöllä koneiden korkeudet ovat muuttuvia, joten ne porrastetaan myös sivusuunnassa tai etäisyytenä edeltävään. Maalaitteiden varustuksesta kuten tutkasta, lentokoneen sen hetkisestä etäisyydestä tutkaen yms. riippuen vaakaporrastus vaihtelee laajalla skaalalla, mutta pienimmillään se voi lähestymisvaiheessa olevilla koneilla olla vain 5 km [22, s. 1]. Koska lentokoneiden nopeudet ovat erilaisia, minimietäisyyteen lennonjohtaja joutuu huomioimaan myös lentokoneiden keskinäisen nopeuseron. Alueilla, jossa tutka-keitto on riittämätön, lennonjohto perustuu menetelmälennonjohdoksi kutsuttuun toimintaan, jossa lentokoneet antavat paikkatiedon ja korkeutensa ja lennonjohtaja muodostaa mieleensä kolmiulotteisen kuvan liikenteestä. Menetelmälennonjohdolla vaakaporrastukset ovat paljon suuremmat; usein 10 minuuttia, mikä suihkukoneiden nopeudella tarkoittaa jo 50 km:n etäisyyttä [37, kohta 5.4.2.2.1.1].

Lennonjohto pyrkii siis pitämään lentokoneet turvallisen etäällä toisistaan. Viestit eli selvitykset välitetään edelleen pääosin puheradiolla; tosin datalinkit ovat yleistymässä; ilmailussa terminä VDL, VHF Data Link [38, s. 6–7]. Mikäli lennonjohtaja tai nykyisten tutkien lentonopeuteen ja -suuntaan perustuva ennustava reittiviiva, trajectory prediction [39, s. 10, 33–55], toteaa konfliktiriskin, lennonjohtaja ohjaa jompaakumpaa tai molempia ilma-aluksia etämmälle toisistaan. Nykyisissä maatutkissa oleva tietokonekin valvoo ja varoittaa, mikäli lennonjohtaja epähuomiossa ei itse ole yhteentörmäysvaaraa havainnut.

3.5 ACAS/TCAS

Varsinainen lentokoneiden keskinäinen yhteentörmäyksistä varoittava järjestelmä on saanut englanninkielessä kaksi nimeä; Yhdysvalloissa termiksi on vakiintunut TCAS traffic collision avoidance system (tai traffic alert and collision avoidance system) ja kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO sekä Euroopan lentoturvallisuusvirasto EASA käyttävät termiä ACAS airborne collision avoidance system. Tässä työssä käytetään

jatkossa terminä ICAO:n termiä ACAS:ia, koska laitteelle ei ole vakiintunut suomenkielisiä termiä.

ACAS käyttää luvuissa 3.2 ja 3.3 kuvattujen transponderin ja GPWS:n tietoja tilannearvion tekemiseen. ACAS laskee transponderin kysely–vastauspulssin kulkuajasta etäisyyden toiseen koneeseen, saa moodeilla C ja S toimivilta transpondereilta korkeustiedon ja lentokoneessa olevien antennien avulla laskee suhteellisen suuntiman toisiin ilma-aluksiin. Suhteellinen suuntima ei ole magneettinen suunta, vaan suunta suhteessa koneen runkoon ikään kuin kellotauluna ajatellen siten, että kohde on omaan suuntaan nähden esimerkiksi kello kahdessa tai kello seitsemässä. Laskemistaan peräkkäisistä sijaintitiedoista ACAS laskee toisen ilma-aluksen nopeuden ja suhteellisen lentosuunnan sekä korkeuden muutoksen. Seuraavaksi ACAS ekstrapoloi toisen ilma-aluksen sijainnin kymmenien sekuntien päähän. ACAS huomioi oman lentokoneen nopeuden sekä lentoradan ja muodostaa kolme suojavyöhykettä koneen ympärille sisältäen myös korkeussuuntaisen vyöhykkeen [40, s. 17, 21–36]. Mikäli toinen ilma-alus on uloimmalla vyöhykkeellä, se näkyy ohjaajien näytöllä kuten kuvassa 9 alla sinisenä umpineliönä. Toinen ilma-alus näytetään, mutta se ei selvän korkeuseron vuoksi edusta uhkaa ja mitään varoitusta ei tarvitse antaa.



Vihreä kaari: Tavoiteltava pystynopeus

Punainen kaari: Vältettävä pystynopeus

Nuoli: Nykyinen pystynopeus (vaakalentotila)

Siniset vinoneliöt: Eivät uhka

Keltainen pallo: Mahdollinen uhka (tunkeutuja, intruder)

Punainen neliö: Uhka (threat)

Kuva 9. ACAS:in käskyttämä pystynopeus ja muun liikenteen sijainti yhdistetyssä pystynopeusmittarissa (variometri) ja ACAS-näytössä

Kuvan merkintä -10 vinoneliön vieressä tarkoittaa, että toinen ilma-alus on alapuolella tuhat jalkaa eli 300 metriä. Avoin sininen neliö poikkeaa tästä siinä, että a) toinen ilma-alus on varustettu vain moodin A transponderilla ja sen korkeus on tuntematon eli siis voi olla hyvinkin aktueelli uhka tai yhtä hyvin lentää huomattavasti korkeammalla tai matalammalla muodostamatta mitään uhkaa; tai b) se antaa kyllä korkeustiedon, mutta 1800 jalkaa (540 metriä) ylempään lentokorkeutensa vuoksi se ei ole uloimankaan

vyöhykkeen alueella. Avoimen vinoneliön vieressä siten joko on tai ei ole korkeustietoa. [40, s. 13]

Jos toisen ilma-aluksen sekä korkeus että etäisyys ovat sellaisia, että ne ovat keskimäisessä vyöhykkeessä, sen katsotaan voivan aiheuttaa uhkaa. Ohjaajien huomiota kiinnitetään sekä kaiuttimesta tai kuulokkeista kuluvalle synteettisellä varoituskäänellä ("traffic, traffic") että ACAS-näyttöön ilmestyvällä keltaisella vinoneliöllä. Kuvan 9 ilma-alus on vain kaksisataa jalkaa (60 metriä) alle oman korkeuden ja on laskeutumassa; merkintänä -02 ja nuoli alaspäin.

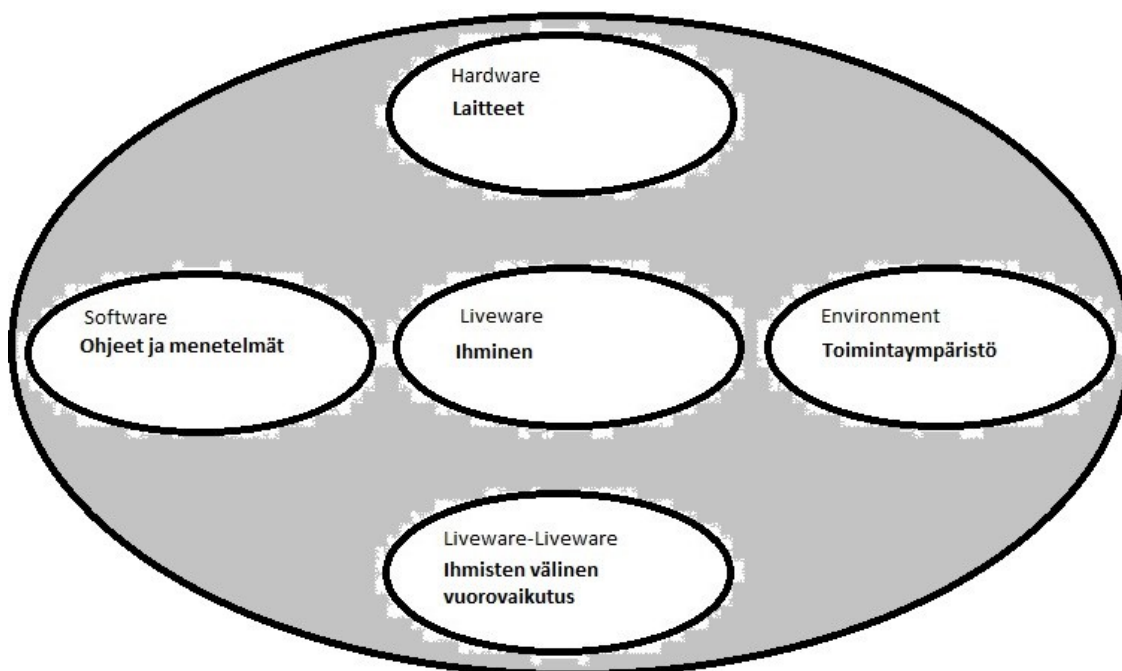
Punainen vinoneliö ja auditiivinen toimintaohje (kuvan tapauksessa käsky nousta; "climb, climb") osoittaa toisen ilma-aluksen edustavan välitöntä törmäysuhkaa. Kuvan tapauksessa sen sijainti on omaan lentokoneeseen pienoiskuvaan nähden suoraan oikealla puolella ("kello kolmessa") ja kaksisataa jalkaa alapuolella (60 metriä) lentäen vaakalentoa. Koneiden sijainti päivittyy näytölle sekunneissa, joten liikerataa ei pysäytyskuvasta pysty sanomaan. Toinen ilma-alus on voinut olla kohtaava, saavuttava tai risteävää rataa lentävä. Joka tapauksessa oma näyttölaitteemme antaa vihreällä sektorilla pystynopeusmittarin asteikolla kohoamisnopeuden, jolla konflikti voidaan välttää. Aiemmin tässä luvussa esiteltiin autopilotti. Se ei ACAS-varoitusta kuitenkaan toteuta, vaan ohjaajat kytkevät autopilotin pois päältä ja ohjaavat käsiohjauksella koneen nousuun.

ACAS-laitteiden kehitys on alkanut jo 1950-luvulla, mutta silti niiden väistöikäskyt rajoittuvat pelkkään korkeuden muuttamiseen tai säilyttämiseen ohjeisiin. Lisäksi kaksisuuntainen kommunikaatio toimii vain kahden moodilla S varustetun transponderin välillä. S-moodillinen laite pystyy kyllä siis varoittamaan A-moodilla varustetusta toisesta ilma-aluksesta suunta- ja nopeustiedon perusteella, mutta korkeutta S-moodillinen ei toisesta koneesta saa. C-moodillisesta ilma-aluksesta S-moodillinen sekä varoittaa että antaa väistöohjeen, mutta laitteet eivät kommunikoi kaksisuuntaisesti ja siten C-moodillinen voi törmäysuhasta tietämättä esim. muuttaa yllättäen lentokorkeuttaan tai -suuntaansa, jolloin S-moodillinen voi joutua käskyttämään vaikkapa täysin päinvastaisen väistön alkuperäiseen nähden. Tieliikenne voi ottaa ACAS-laitteiden teknisistä ratkaisuista ja toimintalogiikasta hyödyksi paljon, mutta oletettavasti tieliikenteessäkin järjestelmien kehitys tulee vaatimaan varsin pitkän ajan erityisesti testausvaiheessa. Oleellisimmaksi ominaisuudeksi ehkä nousee riippumattomuus ulkoisesta infrasta kuten televerkoista. Suora ajoneuvojen välinen kommunikaatio toimii viiveettä ja lähes katveettomasti.

Vaikka ACAS-laitteet toimivat kahden ilma-aluksen yhteydessä oikein, ne aiheuttivat muutaman onnettomuuden toki säästettyään kymmeniä. Matalalla lentävien kahden ilma-aluksen ACAS-järjestelmät sopivat toiselle käskyn nousta ja toiselle laskea. Mikäli alas väistävällä koneella ei ollut maanäkyvyyttä pilvien vuoksi, se täysin oikein käskyä noudattaen ajautui maahan. Järjestelmän seuraavana kehitysvaiheena oli ottaa kappaleessa 3.3 esitelty maanpinnasta varoitettava GPWS:n tieto huomioon ja näin vain nousukäsky annetaan toiselle ilma-aluksista ja toiselle käsky säilyttää lentokorkeutensa.

3.6 ACAS:iin liittyviä onnettomuuksia SHELL-mallilla analysoituna

Eniten onnettomuuksia aiheutui ihmisten toiminnasta järjestelmän käyttäjänä. Yksi tapa lähestyä näitä ongelmia on ollut kuvan 10 inhimillisten tekijöiden käsitelmä SHELL



Kuva 10, SHELL-malli

Tässä mallissa keskiössä on ihminen (liveware), jolla on kosketuspintaa ohjeisiin ja menetelmiin (software), laitteisiin (hardware), toimintaympäristöön (environment) ja ihmisten väliseen vuorovaikutukseen (liveware). [41] ACAS-järjestelmässä ohjeisiin ja menetelmiin liittyvää on mm. ohjeistus siitä, onko lennonjohtajan vai ACAS-laitteen antama väistökäsky prioriteetiltään korkeampi. Tästä on esimerkkinä seuraavissa kappaleissa esiteltävä Überlingenin onnettomuus Saksan ilmatilassa. Laitteisiin liittyvänä on ihmisen kyky toimia laitteen antaman ohjeen mukaan orientoituessaan autopilotin lentämisen koneen ottamiseen käsiohjaukseen. Toimintaympäristön haasteisiin liittyy esimerkiksi liikenteen vilkkaus ja siitä aiheutuva stressitila ohjaajille. Vuorovaikutuksessa voi muodostua ongelma, mikäli tuore vähän kokenut perämies ollessaan lentävänä ohjaajana saa ACAS-järjestelmästä väistökäskyn ja kokenut kapteeni monitoroivana ohjaajana ei osaa luottaa perämieheensä, vaan puuttuu ohjaamiseen itse.

3.6.1 Überlingen

Heinäkuun ensimmäisen päivän yönä vuonna 2012 tapahtui Saksan ilmatilassa kahden lentokoneen välinen tuhoisa törmäys. Toisena koneena oli rahtifirma DHL:n laajarun-

kokone Boeing 757 ja toisena venäläisen lentoyhtiön Tupolev Tu-154 matkustajakone tilauslennolla kuljettamassa pääosin kouluikäisiä nuoria YK:n alaisen UNESCO:n puolesta. Koneiden törmäyksessä kuoli 71 ihmistä. [42, s. 5]

Onnettomuusketju alkoi siitä, että lennonjohtaja työkuormansa (environment) ja tutkien viiveiden (hardware) vuoksi ei ensin havainnut risteävää reittiä lentäneiden koneiden olevan selvitettyinä samalle korkeudelle. Havaittuaan konfliktiuhan hän radiolla käski Tupolevia laskeutumaan. Käytännössä samalla hetkellä näiden kahden koneen ACAS-järjestelmät olivat sopineet keskenään väistön siten, että Tupolev nousee ja Boeing laskeutuu. Tuohon aikaan Venäjän autoritäärisessä järjestelmässä menetelmäohjeistus oli noudattaa lennonjohtajan ohjetta ja jättää ACAS huomiotta, mikäli ohjeiden välillä oli ristiriita. Länsimaissa puolestaan luotettiin tekniikkaan ja länsiyhtiöiden ohjeena (software) oli päinvastoin noudattaa ACAS:in antamaa käskyä ja olla noudattamatta lennonjohtoa, jolta tosin ei Boeingille ohjetta ollut annettukaan. Nyt molemmat koneet olivat lähteneet samalta lentokorkeudelta ja molemmat olivat laskeutumassa.

Onnettomuuden muiksi syiksi tunnistettiin mm. se, että työkuorman aiheutti toisen työvuorossa olleen lennonjohtajan oleminen todellisuudessa lepäämässä (liveware–liveware). Tämä oli ns. hiljaisen hyväksynnän saanut metodi, jonka myös lennonvarmistuspalvelun johto tiesi (software). Tutkien viiveen aiheutti tutkakuvat prosessoivan tietokoneen huoltotyö (hardware) ja samasta syystä lennonjohdon tutkassa oleva törmäysuhan varoitusjärjestelmä oli kytkettynä pois (hardware).

Tieliikenteessä liikenteen ohjaus vikatilanteissa varajärjestelmillä korkean automaatiotason ajoneuvoilla sekä erityisesti eri automaatiotasojen sekaliikenteessä muodostaa potentiaalisen uhan vastaavanlaiselle tilanteelle. Vikasietoisuuteen sekä yksiselitteisiin toimintamenetelmiin häiriötilanteissa tulee kappaleessa 7.5 esiteltävän tieliikenteen harmonisointia tekevän kansainvälisen työryhmän kiinnitettävä erityistä huomiota.

4. LIIKENNEYMPÄRISTÖSTÄ LYHYESTI

Tässä luvussa käsitellään lyhyesti maantie- ja ilmaliikenteen periaatteellisia oleellisia rakenteita ja niiden eroja. Painopisteenä ovat kohtaava ja risteävä liikenne toisen samantyyppisen kulkuneuvon kanssa ja toisaalta mahdolliset erilaiset kulkijat. Tarkemmin yhtenevyyksiä ja eroja käsitellään seuraavissa luvuissa.

4.1 Tie

Maantieliikenteessä keskeistä on erittäin rajattu sivuttaisliikkumismahdollisuus. Ajo-kaistan leveys vaihtelee tien tekoajan ja liikennemäärien ja -nopeuksien perusteella viidestä metristä yli kahteentoista metriin [43, s. 42]. Yksityistie voi olla jopa niin kapea, että kohtaamista varten niihin on tarvittavin välein tehty ohittamista varten levennys. Lisäksi ajoradalta sivuun ajautuminen hyvin usein merkitsee uhkaa törmätä kiinteisiin esineisiin, jotka aiheuttavat vähintään merkittäviä vaurioita ajoneuvoon. Tiet ja kadut ovat usein mutkaisia ja niissä on sekä korkeusvaihtelua että mutkien ja kumpareiden aiheuttamia näkemäesteitä. Liikennettä on myös silloilla tai tunneleilla korkeusporrastetuna siten, että paikkatieto horisontaalisesti voi kahdella ajoneuvolla olla identtinen.

Teitä ja katuja käyttävät moottoriajoneuvojen lisäksi kevyt liikenne eli pyöräilijät ja jalkankulkijat sekä myös eläimet ainakin ylitykseen. Varsinkin kevyen liikenteen kulkijoissa on eri-ikäisiä ja erilaisilla liikenteellisillä valmiuksilla olevia ihmisiä, joiden liikkuminen ei aina ole hyvin ennakoitavissa.

Kohtaava ajoneuvoliikenne on vain hyvin pienellä sivuttaisporrastuksella. Nykyisillä kaupunkirakenteilla ja maanteilläkin kevyt liikenne voi olla joko ajoradalla tai erillisillä kevyen liikenteen väylillä, joiden etäisyys kadun tai tien reunasta vaihtelee. Kevyen liikenteen väylillä liikennettä on usein molempiin suuntiin eli ajoneuvon kannalta se on joko saavutettavaa tai kohtaavaa liikennettä, jonka nopeus kaupunkialueella voi olla sama kuin moottoriajoneuvojen.

Risteävää liikennettä on hyvin erimallisissa ja eri kulmasta liittyvistä risteyksistä. Kiertoliittymä, X-mallinen risteys tai T-mallinen risteys muodostavat täysin erilaisen havainnointitarpeen. Nykyisten väistämissääntöjen perusteella yleistä oikealta tulevan väistämisyjärjestystä voidaan muuttaa joko liikennevaloilla tai liikennemerkeillä. Lisäksi esimerkiksi piha-alueita tuleva on aina väistämisvelvollinen.

Moottoriajoneuvot – myös ilman ajoneuvoautomaatiota olevat – olisi mahdollista varustaa keskinäiseen kommunikointiin kykenevillä lisälaitteilla, mutta jo kevyen liikenteen

osalta tarvittava sähköenergia muodostaisi ongelman. Eläimille tällaisia kommunikaatiolaitteita ei saada millään.

4.2 Ilmailu

Kaupallisessa ilmaliikenteessä käytetään yhteentörmäysten välttämiseen reittilento-osuudella korkeussuuntaista porrastusta siten, että ilma-alusten välillä on 1000 jalan (300 metrin) korkeusero niin, että itäisillä ilmansuunnilla lentokoneet lentävät parittomilla lentopinnoilla ja läntisillä parillisilla [44, Appendix 3]. Näkölentosääntöjen mukaan lentäville on varattu niiden puoliväliin oma käytävänsä, mutta käytännössä kaikki ”raskas” liikenne lentää mittarilentosääntöjen mukaan, joten tässä keskitytään vain niihin. Luonnollisesti lentoonlähdössä ja laskeutuessa lentokoneet menevät läpi useiden lentopintojen, joten lentokenttien lähellä käytetään siis vaakaetäisyysporrastusta, kuten luvussa 3 on kuvattu. Lentokoneiden nopeudet poikkeavat toisistaan, joten samaan suuntaan kulkevat voivat tosin saavuttaa toisiaan. Merkittävä osa liikenteestä ei tieliikenteestä poiketen kuitenkaan muodosta siis yhteentörmäysuhkaa.

Kuten luvussa 3 kuvattiin, Euroopan alueella ovat nykyään käytettävissä vapaat reitit, mutta väylät voi yhtä hyvin ajatella tiettyjen pisteiden välisiksi reiteiksi. Suunnistamista ja reitillä pysymistä koskevat vaatimukset ovat samat. Käsitteenä suorituskykyperusteiselle suunnistamiselle eli navigaatiotarkkuudelle on Performance Based Navigation PBN. Reittilento-osuuksille Euroopassa on Euroopan ilmatilan kehittämisestä vastaava monikansallinen Eurocontrol määritellyt tarvittavan suunnistustarkkuuden siten, että lentokoneen sijainnin pitää olla +/- 5 merimailia (Nautical Mile NM) oletetusta sijainnista. Lentokenttää lähestyttäessä vaatimus kiristyy siten, että loppulähestymistä varten tarkkuuden pitää olla 0,3 NM. [45, s. 6 ja 10] 0,3 NM tarkoittaa vielä noin 100 metrin epätarkkuutta, joten paikkatietovaatimus on tieliikenteeseen nähden erittäin paljon kevyempi. Vuoristoisen seudun lähestymiset pois lukien lisäksi merkittävänä erona tieliikenteeseen on, että sallitulta reitiltä poikkeaminen ei välttämättä välittömästi aiheuta törmäystä maastoon tai esteisiin.

Ilmaliikenteessäkin eläimet eli linnut muodostavat jonkinasteisen uhan ja tieliikenteen tavoin eläimien tunnistaminen on teknisesti haastavaa. Iso lintuparvi on tutkalla nähtävissä, mutta yksittäistä lintua ei niillä voi välttää. Kasvavana uhkana lentokenttien läheisyydessä ovat miehittämättömät ilma-alukset eli dronit. Niihin törmääminen ei aiheuta laitteen lennättäjälle fyysistä vahinkoa, mutta voi lentokoneen tai helikopterin matkustajille olla kohtalokasta [46]. Tieliikenteessä vastuuton tai fyysisesti rajoitteinen jalankulkija tai pyöräilijä loukkaantuu itse, mutta kulkuneuvossa matkustava usein ei lainkaan. Periaatteellisella tasolla tämä ero on huomattava.

5. YHTENEVYYTTÄ TIELIIKENTEESSÄ JA ILMAILUSSA

Automaatioiden kehityskaari näyttää molemmissa liikennemuodoissa olevan samankaltainen. Ominaisuuksia lisätään moduuli kerrallaan. Ensimmäisenä laajasti käytettynä kuljettajaa avustavana järjestelmänä tulivat käyttöön ABS-jarrut. Autoissa vakionopeudensäädin ja vastaava lentokoneiden autokaasu olivat kuljettajaa avustavia järjestelmiä, jotka helpottivat kuljettajaa, mutta eivät lisänneet automaatiota; kuljettajalla oli edelleen täysi velvollisuus valita tilanteeseen sopiva nopeus. Sen sijaan ohjaamisen korvaavat kaistavahtiin perustuva automaattiohjaus ja lentokoneen autopilotti vapauttivat kuljettajaa jo merkittävästi, vaikka edelleen järjestelmän valvonta ja poikkeustilanteisiin sopeutuminen olivat täysin kuljettajan kontrolloitavia. Kun lentokoneen autopilottiin kytkettiin myös suunnistaminen eli navigointi, astui ilmailu askeleen tieliikenteen kehitystä ylemmäs. Autoilussa puolestaan ovat automaation kehitykseen tulleet mukaan tutkaan perustuvan väistön ja törmäykseneston lisäksi konenäkö ja hahmontunnistus. [47, s. 516–519] [48, s. 10] Näillä tieliikenne puolestaan on ohittamassa ilmailun automaation. Yhteistä molemmissa on kuitenkin erillisten järjestelmien kehittäminen ja niiden yhteensovittaminen olemassa olleisiin muihin järjestelmiin.

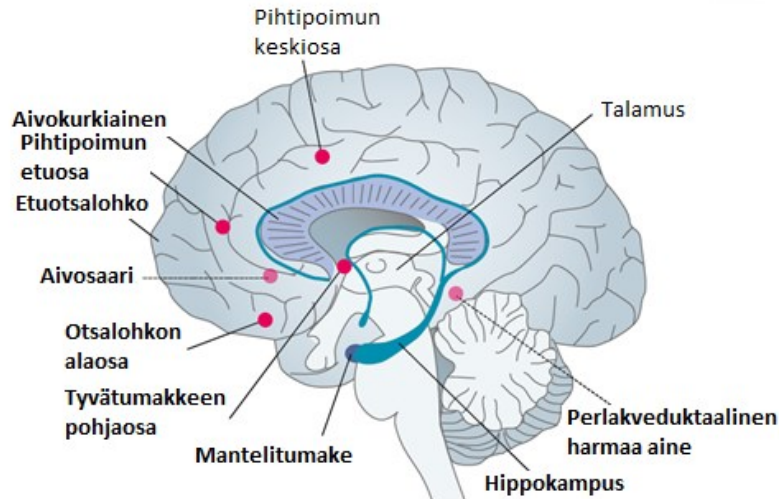
Niin tieliikenteessä kuin ilmailussakin väistäminen on tyypillisesti yhden parametrin säätöä. Tieliikenteessä risteyksissä, ruuhkissa ja yllättävissä tilanteissa kuljettaja hallitsee auton väistöä yleensä nopeuden hallinnalla eli jarruttamalla. Joissain tilanteissa väistämiseksi myös sivusuuntainen siirtymä eli ohjaaminen on joko pelkästään tai jarruttamisen ohella tarpeen. Näkemiseen perustuvat väistöt ilmailussa ovat meidän oikeanpuoleiseen liikenteeseen tottuneiden kannalta yhtenevät; kohtaavaa liikennettä väistämme kulkusuunnassamme oikealle. Ilmailun törmäyksenestojärjestelmät sen sijaan antavat käskyt kappaleessa 3.5 kuvatusti pystysuuntaisina eli korkeuden muutoksiin perustuvana. Väistökäskyt ovat täysin yhteen parametriin perustuvia – sivusuuntaista uuteen ohjaussuuntaan perustuvaa käskyä ei järjestelmä tuota. Pitkälti siis yhtenevyytenä on yhteen parametriin perustuva väistö. Tieliikenteen sivuttaissiirtymä on lisähaaste järjestelmille ja sitä käsitellään seuraavassa, eroavuuksia käsittelevässä luvussa.

Kolmas yhtenevyys on tarve liikennevälineiden välisen kommunikaation luotettavuuteen, nopeuteen ja eheyteen. Jo kaupunkinopeudessa autokin liikkuu 10–15 m/s ja kohtaava liikenne kaksinkertaistaa suhteellisen nopeuden. Lentokoneilla kohtaava liikenne voi liikkua puoli kilometriä sekunnissa toisiaan kohti. Mikäli läheteessä ei ole sisällytettynä suunta-, nopeus- ja korkeustietoa, edellyttää suureiden laskenta vähintään kahden paikkatiedon saamista. Kommunikaatio ei voi perustua esimerkiksi nykyiseen tele-

verkkoon viiveiden sekä alueellisen kattavuuden vuoksi, vaan liikennevälineiden on pystyttävä kommunikoimaan keskenään.

Neljäntenä samankaltaisuutena on eri automaattiosukupolvien liikennevälineiden liikuminen samassa liikenneympäristössä. Ilmailussa tämä haaste on määrätyissä ilmatilan osissa vältetty rajoittamalla riittämättömästi varustettujen lentokoneiden lentämistä näissä; ilmatilaa voidaan jakaa korkeussuunnassa vähemmän ja enemmän rajoitettuihin osiin helposti. Tieliikenteessä tiettyjen ajoneuvojen rajaaminen on vaikeampaa, mutta poliittisella päätöksellä esimerkiksi kokonaan uuden asuinalueen sisäinen liikenne tai moottoritien tietty osa voitaisiin rajata vain robottiautoille. Tällaisissa ratkaisuissa yhteinen kansainvälinen sääntely varmistaisi tavoitellun turvallisuustason minimin. Ilmailussa YK:n alainen Kansainvälinen siviili-ilmailuorganisaatio ICAO on ottanut näkyvän roolin säädösten harmonisointiin. Tieliikenteen vastaavan UNECE alaisten työryhmien WP.1 ja WP.29 sen sijaan pitää saada itseään ja ohjaavaa rooliaan vahvemmin esiin, jotta tehtävillä ratkaisuilla olisi yhteiset käytännöt. Muussa tapauksessa rajat ylittävän liikenteen turvallisuus on voimakkaasti uhattuna. Toisaalta myös kustannukset kasvavat, mikäli luodaan alueellisia eroja. Yksityiskohtaisemmin UNECE-työryhmiä kuvataan luvussa 7, jossa käsitellään tieliikenteen lisähaasteita.

Viidentenä merkittävänä yhtenevyytenä on ihmisen ja automaation toiminta äkkitilanteissa. Yllättävässä tilanteessa ihmisen pelon tunne ja adrenaliinin vaikutus aiheuttavat sen, että ihminen pyrkii ottamaan kontrollin itselleen, vaikka analyysien perusteella hänellä olisi vankka tieto siitä, että laitteen toiminta on useimmiten parempi. Ilmiö selittyy ihmisen vuosimiljoonien aikaisella evoluutiolla. Tämä ominaisuus poikkeaa aiemmista, melko puhtaasti teknisesti ratkaistavista yhtymäkohdista. Tunteiden hallinta on vaikeampaa ja siksi tähän kannattaa keskittyä tarkemmin. Seuraava varsin yksityiskohtainen kuvaus osoittaa, miksi ensireaktion kontrollointi on vaikeaa. Evelin Lindner on tiivistelmässään ”Emotion and Conflict: Why It Is Important to Understand How Emotions Affect Conflict and How Conflict Affects Emotions” [49] kirjastaan “The Handbook of Conflict Resolution: Theory and Practice” käsitellyt laajasti tunteiden vaikutusta konfliktitilanteissa ja myös konfliktien vaikutusta tunteisiin. Hänen mukaansa [49, s. 4] ”henkilö, joka ilmentäisi puhdasta järkevyyttä tunteiden häiritsemättä, olisi hirviö, jos hän ei olisi mahdottomuus.” Ihmiskunta ei olisi selvinnyt nykyaikaan, ellei ihmiselle olisi kehittynyt hätätilanteisiin pakene tai taistele -reaktiota [49, s. 10–11]. Jo aivan pieni vauva reagoi voimakkaaseen ääneen säpsähtäen. Aivojen manteliumake [50] on evolutiivisesti aivojen vanhoissa osissa eli alaosissa, kuva 11. Se on automaattisesti ja nopeasti lajitteleva aivojen osa, joka ei edellytä tietoisuutta tai tietoista valvontaa. Sen ohjaamana uhan ilmetessä mm. sydämen sykenopeus ja hengitys tihentyy. [49, s. 7] Elimistö valmistelelee siis tehokasta hapetusta lihaksille joko pakenemista tai taistelemista varten. Oleellista on ymmärtää, että tämä on ihmisen automaattinen primitiivireaktio.



Kuva 11. Ihmisen aivojen rakenne

Niissä konfliktitilanteissa, joissa ihmisellä on aikaa analysoida tilannetta tarkemmin, aivojen korkeampi rakenne alkaa käsitellä tunteita hallitusti. Se pystyy tunnistamaan, jos automaattinen vasteemme ei toimi tai on väärin. Aivojen toiset osat säätelevät ja valvovat tunnereaktioitamme. Nämä korkeammat rakenteet oppivat aiemmista ja soveltavat oppimaansa sekä kehittävät mielikuvituksensa ansiosta uusiakin ratkaisumalleja. [49, s. 7] Merkittävä ero edelliseen autonomiseen reaktioon on aiemmasta oppiminen ja reaktion muokkaantuminen.

Ilmailussa lentotoimintaa koskevan EASA Part OPS –määräyksen määritelmät käyttävät englanninkielisinä termejä startle (säikähdyks) ja surprise (hämmästyks) [11, kohta GM15 Annex I] ja määrittelevät ne seuraavasti:

“‘Startle’ means the initial short-term, involuntary physiological and cognitive reactions to an unexpected event that commence the normal human stress response.

”Säikähdyks” tarkoittaa alkuperäistä lyhytkestoista, tahtomatonta fysiologista ja kognitiivista reaktiota odottamattomaan tapahtumaan, joka aiheuttaa normaalin ihmisen stressivasteen

‘Surprise’ means the emotionally-based recognition of a difference in what was expected and what is actual.”

“Yllätys” tarkoittaa tunneperäistä muutostuntemusta siihen, mitä odotettiin ja mitä on käytännössä.

Säikähdyksen (startle) määritelmästä hyvin ilmenee, että reaktio on tahtomaton. Tarpeettoman reaktion pois saaminen on siten hyvin vaikeaa koulutuksen tai kokemusten tuottamisenkaan avulla. Toisaalta reaktio on määritelmänsäkin mukaan lyhytkestoinen,

joten siitä toipumiseen voidaan toimintatapoja opettaa. Hämmästyksen (surprise) määritelmä kuvaa erinomaisesti, kuinka ajattelumme on tuottanut ensin kuvan tilanteesta. Se on tahdon alainen ja siten vaihtoehtoisten ratkaisumallien tuottaminen esimerkiksi kouluttamalla onnistuu ja voidaan luoda vaihtoehtoisia olettamia. Tämä prosessointi vaatii kuitenkin enemmän aikaa.

Yhteenvedona tästä viidennestä yhtenevyydestä ilmailun ja tieliikenteen automaatioon on, että äkkitilanteessa, kuten kuljettajan todennäköiseksi törmäysuhaksi kokemassa tilanteessa, ihminen reagoi primitiivireaktiolla. Ihminen palaa taistele tai pakene -moodiin ja käyttäytyminen on arvaamatonta. Se voi pelastaa välittömältä vaaralta, mutta aiheuttaa myös ajattelun kapenemista, ”tunnelinäköä”, ja karsii harkintaa ja ajattelua [49, s. 11]. Mikäli kuljettajalla on mahdollisuus puuttua ajoneuvon hallintaan (kuten kaikessa lentoliikenteessä ja robottiautoissakin automaatiotasolle 4 asti ainakin), hän mitä ilmeisimmin niin tekee. Tällöin automatiikan laskemat ja ajoneuvojen automatiikan keskenään sopimat väistömenetelmät voivat korruptoitua kuljettajan toiminnan vuoksi ja uusi väistö ei ehkä enää olekaan mahdollinen törmäämättä. Tässä työssä käsitellään hyvin lyhyesti vakuutus- ja vastuukysymyksiä, mutta on selvää, että ihmisen ja automaation väliset konflikti- ja kolaritilanteet tulevat olemaan laaja ja vaikea kysymys oikeusasteissa.

6. ILMAILUSSA HAVAITUT HAASTEET, JOTKA TIELIIKENTEESSÄ ON OTETTAVA HUOMIOON

Tässä luvussa kerrotaan näkökulmista, jotka ovat jo tulleet ilmailussa esiin ja jotka on ratkaistu. Tieliiikenteen on resurssien säästämiseksi hyvä ottaa huomioon nämä. Samalla myös eri liikennemuotojen ratkaisut ovat yhtenäisempiä ja siten tulevaisuudessa mahdollisesti palvelu, joka on vain liikkumispalvelu ilman erityistä liikennemuotokohtaista määrittelyä, on helpompaa. Tässä työssä ei käsitellä tarkemmin liikkumispalvelua – MaaS, Mobility as a Service. Toistaiseksi artikkeleissa ja diplomitöissä liikkumispalvelu on vielä pitkälti eri maaliikennemuotojen käsittelyä palveluketjuna, mutta jo siinä on sekä raide- että maantieliikennettä ajateltu yhtenä palvelukokonaisuutena; ilmailun liittämisessä on enää kyse pidempien matkakokonaisuuksien ajattelemisesta. Esimerkiksi eri liikennemuotojen laitteiden kommunikointi ennakoimattomissa viiveissä olisi oleellisesti helpompaa ja virheettömämpää, mikäli niiden käyttämä tekniikka olisi yhdenmuukaista. Mikäli lukija haluaa perehtyä tarkemmin Mobility as a Service teemaan, esimerkiksi liikenteen hallinnointiin ja kaupunkiliikenteeseen keskittynyt lehtijulkaisu ITS International järjesti 20.2.2018 kokouksen, jonka esitysmateriaalit ovat saatavissa <https://www.maas-market.com/presentations/1>. Samoin lehden sivuilla on 17.5.2018 julkaistu raportti <https://www.itf-oecd.org/blockchain-and-beyond>.

Edellisessä luvussa jo käsiteltiin ongelmia, jotka liittyvät eri automaatiokupolvien laitteiden liikkumiseen samassa liikenneympäristössä. Lisäksi kaikkien liikenteessä kuljijoiden ei voida olettaa käyttävän omatunnisteluohjelmia, jolla automaattijoneuvot pystyisivät nämä tunnistamaan. Kevyestä liikenteestä polkupyörät ovat jo rajoilla; omatunnisteluohjelmat tarvitsevat ainakin jonkin verran sähköenergiaa ja on varmasti vaikeaa velvoittaa pyöräilijät käyttämään voimiaan laitteen lataamiseen. Esimerkkinä täysin mahdottomista omatunnisteella tunnistettavista liikkujista mainittiin jo aiemmin eläimet. Ilmailussa ratkaisuna on ollut kappaleessa 3.2 kerrotusti ilmatilan rajaaminen siten, että tietyissä osissa on laitevaatimuksena omatunnisteluohjelma transponderi kaiken kokoisille ilma-aluksille ja raskaammille ilma-aluksien varustukseen kuuluu pakollisena törmäyksenestojärjestelmä ACAS. Tieliiikenteessä vastaavantyyppisiä ratkaisuja ovat olleet esimerkiksi autonvalmistajien suljetut testialueet kuten esimerkiksi Volvolla [51]. Nämä eivät kuitenkaan edusta normaalia liikenneympäristöä.

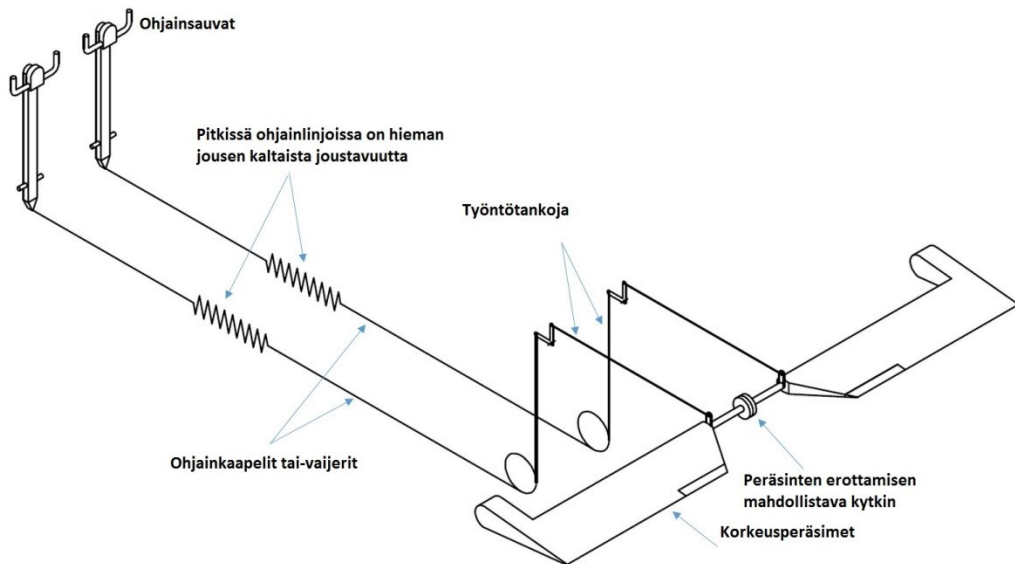
Edellisissä luvuissa kuvattiin automaation kehitysaskelaita laite tai ominaisuus kerrallaan. Näiden aiempien järjestelmien päälle rakennettavien uusien ominaisuuksien yhteensopivuuden riittävä varmistaminen ja prioriteettien asettaminen ovat näkökulmia,

joista nopeasti kehittyvä ja dynaaminen automaailma saa ottaa oppia konservatiivisesta, mutta maailman turvallisimmaksi joukkoliikennemuodoksi [52] kehittyneestä ilmailusta. Tieliikenteestä todennettuja esimerkkejä ei helposti pystytä osoittamaan, koska autoissa ei ole samanlaisia tallentimia kuin lentokoneissa. Taksi- tai kuljetuspalvelua tarjoavan Uber-ketjun auto Volvo XC90 kolaroi 19.3.2018 kohtalokkaasti pyörää taluttaneen naisen kanssa Tempessä, Yhdysvalloissa [53]. Lehtitietojen mukaan Uber oli asentanut Volvon törmäyksenestojärjestelmän päälle oman tutka- ja kameratekniikan perusteella päätöksiä tekevän ohjelmiston niin, että Volvon systeemit olivat kaikki pois päältä [54]. Ilmailussakin järjestelmien logiikan yhteensopimattomuutta ennalta arvaamattomissa kombinaatioissa tapahtuu edelleen. Lentokoneen lentoarvotallentimien tiedoista Onnettomuustutkintakeskus julkaisi 23.10.2018 loppuraportin Turun lentoasemalla 25.10.2017 tapahtuneesta liikennelentokoneen pyörähtämisestä sohjoisella kiitotiellä. Lentokoneessa oli järjestelmä, joka normaalitilanteessa laskutelineiden antureiden todettua painon olevan päällä, avaa moottoreista luukut, jotka kääntävät ilmapvirtauksen jarruttavaksi. Nyt lasku oli ollut tavanomaista hieman voimakkaampi ja laskutelineiden joustimet palautuessaan saivat painon aistivat anturit luulemaan, että lentokone oli ilmassa. Moottorijarrutusta ohjaajat eivät saaneet päälle, sillä moottorijarrutuksen estävän toiminnon nollaus olisi edellyttänyt kaasuvipujen viemistä takaisin normaalilentoasentoon. Tätä tietoa ei edes lentokoneen valmistaja ollut käsikirjaan laittanut. Toinen järjestelmä eli pyöräjarrun ABS-luistonesto ei puolestaan aktivoitunut, koska pyörät eivät ABS-järjestelmän varaamana pyörimisen alkukiihtyvyyden aikana sohjoliirron vuoksi nousseet vaadittavaan nopeuden raja-arvoon ja siten pyörät lukkiutuivat ja menettivät sivuttaispitonsa. Kukin lentokoneen järjestelmistä oli teknisesti täysin kunnossa, mutta epäsuotuisissa olosuhteissa toinen järjestelmä esti valmistajan suunnitteleman toiminnon. [55, s. 16 ja 40–42] Priorisointi on enemmän tieliikenteen kysymys ja tätä eroa käsitellään seuraavassa, eroavuuksia käsittelevässä luvussa.

6.1 Järjestelmien toimivuuden varmistus

Ilmailussa on järjestelmävikojen varalta tärkeimmät laitteet kahdennettu niissä toimilaitteissa, joiden toimimattomuuden tai muun vikaantumisen ohjaajat voivat havaita. Esimerkiksi usein mainittuja omatunnistelaitteita, transpondereita, on käytännössä kaikissa liikennelentokoneissa kaksi. Samoin korkeus- ja kallistusohjaimet voidaan erottaa toisistaan myös mekaanisesti toimivilla ohjaimilla. Esimerkkinä vaikka Airbus-konsernin valmistama myyntimenestys ATR-72, jonka ohjausjärjestelmää on kuvattu Australiassa tapahtuneen lentovaurion tutkinnan tehneen Australian kansallisen liikenneturvallisuus-toimiston Australian Transport Safety Bureau:n tutkintaselostuksessa. Normaalitilanteessa tällaiset ohjaimet ovat kytketty siten, että molemmat ohjaimet liikkuvat samaan aikaan. Kuvassa 12 esitetään havainnekuva, kuinka työntötankojen, kaapeleiden, vaijerien sekä vipuvarsien välityksellä vasen ohjain liikuttaa vasenta korkeusperäsintä (ja siivekettä vastaavasti) oikean puolen ollessa sen peilikuva. Vasen ohjain siis periaatteessa liikuttaa vasenta korkeusperäsintä ja yhteen kytkennän ansiosta oikeaa ohjainta.

Kytkenän irrottaminen voi olla tarpeen, mikäli toiselle puolelle tulee vika, joka jumitaisi ohjaimet. Kytköksen avaamisen jälkeen toinen puoli ohjaimista on käytettävissä; luonnollisesti ohjauskyky on rajoitetumpi, mutta lentokone on edelleen ohjattavissa. [56, s. 4–6] Vastaavalla tavalla sähkövälitteisissä ohjaimissa on ohjelmallisesti vikaantunut puoli passivoitavissa.



Kuva 12. Kahdennetut erotettavissa olevat lentokoneiden ohjaimet

Tieliikenteessä vastaavanlainen ajattelumalli on jo olemassa esimerkiksi liikennevalojen suunnitteluohjeessa [57, s. 14–15, 27–28]. Sen mukaan niiden normaalitoiminta on automaattista. Poikkeustilanteissa liikennevalojen operoinnista vastaavalla taholla on oltava mahdollisuus vaikuttaa liikennevalojen toimintaan. Vikatilanteiden varalta Tieliikennekeskukseen on vähimmillään välityttävä tieto, mikäli valojärjestelmässä on vika. Vian korjaus voi edellyttää siis paikan päällä tapahtuvaa korjausta, mutta korjaushälytystä varten vikatiedon on kulkeuduttava valvojalta. Näissä kahdennettu järjestelmä toimii siis siten, että varajärjestelmä on ihminen. Edellisessä kappaleessa kuvatun lentokoneen ohjainjärjestelmän jumiutumisen kanssa tilanne on täysin analoginen. Lentokoneen autopilottikaan ei ratkaise ohjainten jumiutumista, vaan sen tekee lentäjä.

Oikea ja virheetön tieto on robottiautojen monille järjestelmille ehdottoman välttämätöntä. Jos järjestelmä koostuu yhdestä tietokoneesta, se ei pysty itse havaitsemaan virheellistä parametriään. Jos järjestelmä on kahdennettu, ristiriitaisista tuloksista tiedetään jommankumman olevan väärä. Ilmailussa ratkaisu ensiarvoisen tärkeille tiedoille tällaisia tilanteita varten on ollut järjestelmän kolminkertaistaminen. Tietokoneet voivat verrata saamiaan arvoja ja poikkeava tulos voidaan äänestää tuloksin kaksi vastaan yksi pois. [58, s. 32–33 ja 35–36] Myös virransyöttö on tällaisille järjestelmille toteutettu eri reitityksillä. Korkean automaatiotason autojen suunnittelussa vastaavatyypillisesti varajärjestelmät tulee ehdottomasti toteuttaa. Autojen lukumäärä huomioiden liikennevalo-

vikojen ratkaisuna oleva Tieliikennekeskuksen päivystäjän kaltainen varautuminen ei ole riittävä.

6.2 Tiedon tallennus poikkeamatilanteiden jälkiselvittelyä varten

Kaupallisessa lentoliikenteessä jo liikematkustusluokan kalustossa on pakollisena varustuksena sekä ohjaamoäänentallennin Cockpit Voice Recorder CVR [58, s. 21–22, 53–54 ja 56–57] sekä lentoarvojen tallennin Flight Data Recorder FDR – joskus myös etuliite D kuvaamaan digitaalista (Digital, DFDR) tai SS kuvaamaan puolijohdetekniikkaan perustuvaa (Solid State, SSFDR) – lentoarvojen sekä eri toimilaitteiden asentotietojen tallentamiseen [58, s. 20–22 ja 53–55]. Näitä usein kutsutaan niiden oranssista väristä huolimatta mustiksi laatikoiksi. Nimitys johtunee siitä, että tallenninta tutkitaan pääasiassa surullisten onnettomuuksien jälkeen, joihin on usein liittynyt paloja. Tallennin lieinee löydettyä useammin nokisen musta kuin kirkkaan oranssi. Sen enempiä ohjaamoäänitallenninta kuin lentoarvotallennintakaan lentokone ei toimiakseen tarvitse. Laitteet ovat ainoastaan onnettomuustutkijoita ja lentokonevalmistajien kehitystyötä varten.

Tallenteiden merkityksestä onnettomuuksien selvittämiseen ovat edellä viitatus Air Francen AF447 vuonna 2009 tapahtuneen onnettomuuden [58] lisäksi esimerkiksi kappaleessa 3.6.1 kerrottu Überlingenin yllä tapahtunut onnettomuus. Tieliikenteessäkin on tallenteen merkitys ehditty todeta edellä kappaleessa 6 kerrotussa onnettomuudessa, jossa Uber-yhtiön autonominen auto ei pystynyt välttämään pyöräänsä taluttaneen naisen kuolemaan johtanutta onnettomuutta. Autossa oli kojelautavideokamera ja Uberin tallettamat tiedot auton ohjelmointimuutoksesta sekä auton sensoreiden lähettämien tietojen rekisteri [53][54]. Näiden perusteella pystyttiin toteamaan, miten järjestelmä oli teknisesti havaintonsa luokitellut. Artikkelin mukaan onnettomuus ei ehkä olisi tosin ollut vältettävissä kuljettajankaan ohjaamana, sillä valaistusolosuhteiden sekä näkemäes- teidenvuoksi tapahtuma on tullut hyvin yllättäen.

7. TIELIIKENTEEN LISÄHAASTEET, JOITA ILMALIIKENTEESSÄ EI OLE TARVINNUT OTTAA HUOMIOON

Tieliikenteessä esiintyy tilanteita, joihin ilmailiikenteessä ei ole osattu tai tarvinnut varautua. Näihin teemoihin pitää tieliikenteessä päättää ratkaisut. Ensimmäisenä esiteltävä on varmasti kaikkein ikävin; oikeaa ja oikeuden mukaiselta tuntuva ratkaisua siihen ei ole – on vain huonoja vaihtoehtoja, joissa voi olla kulttuurillisiakin eroja. Muut ovat pääosin teknisesti ratkaistavissa ja vain kustannuspaine voi ohjata valintoja riittämättömälle riskitasolle.

7.1 Priorisointi

Liikenteessä tulee väkisin tilanteita, jotka johtavat onnettomuuteen; ilmailussa erityisten sääilmiöiden, lintutörmäysten tai vaikka tulivuoren purkauksesta syntyneen tuhkan takia. Tieliikenteessä puolestaan sää ja lyhyellä matkalla huomattavasti muuttuva kitka, eläintörmäykset sekä ajoneuvon ulkopuolisten ihmisten ennakoimaton käytös ja huomiovirheet aiheuttavat väistämättä nykyisellä liikenneinfralla onnettomuuksia ja niiden uhkia. Väistöä suunnittelevalla tietokoneella ei ole moraalialia, mutta yhteiskunnan pitää määritellä hyväksyttävät normit, jotka ohjelmiin on kahden huonon vaihtoehdon valinnassa tehtävä.

Kärkevänä esimerkkinä priorisointitilanteesta kuvitellaan kapea reunaesteinen tai rotkon reunalla oleva tie. Elämme vuotta 2040, jolloin robottiauto on korkeimman tason automaatiota ja kevyt liikennekin on pakotettu käyttämään omatunnistelähetintä. Täysin autonomisessa autossa on kyydissään kaksi vanhusta, joiden ikä on järjestelmän tiedossa, koska he tilasivat kyydin omilla henkilökorteillaan kyydin maksamista varten. Toisena ajoneuvona on kotoaan polkupyörällä lähtenyt kymmenvuotias tyttö, joka on lupaava urheilijalupaus. He tulevat toisiaan kohti ja tytön polkupyörän eturengas puhkeaa tuulen tielle lennättämään rutistuneeseen ja teräviä kulmia omaavaan alumiinitölkkiin. Tyttö kaatuu tien keskilinjaa suuntaan ja auto on ehtinyt lukea tytön pyöräilykypärän omatunnistelaiteesta, että kyseessä on tämä nuori tyttö. Etäisyyttä on niin vähän, että auto ei pysty välttämään törmäystä hätäjarrutuksesta huolimatta eikä pysty väistämään kapealla tiellä niin, että menisi tytön ohi. Mikä on oikea moraalinen ratkaisu? Joko koulussa hyvin menestynyt ja terveet elämäntavat omaava tyttö jää auton alle tai auto valitsee tieltä suistumisen, jossa kaksi pitkän työuran tehnyttä ja yhteiskunnalle sääntillisesti veronsa maksaneet kaksi vanhusta kuolee. Entäpä, jos kaatuja onkin hulttionuori, joka jälleen

kerran alkoholihuuruissaan kaatuu omaa tyhmyyttään ja autossa on iäkäs vuorineuvospariskunta, jotka molemmat ovat jatkaneet työuriaan ja ovat edelleen usean yrityksen hallintoneuvostojen arvostettuja suunnannäyttäjiä? Kysymykset tekee vielä hankalammaksi kulttuuriset erot. Länsimaissa ihmisen arvoa ajatellaan helposti hyötyennusteen kautta. Ikääntynyt ihminen voi olla yhteiskunnalle painolasti, kun taas nuorissa on tulevaisuus. Kaukoidän kulttuureissa vanhuutta ja viisautta puolestaan arvostetaan korkealle. Hyväksyttävien moraalinen päätös on siis maantieteellinenkin kysymys.

Kuten aiemmin kerrottiin, tässä työssä käsitellään luvussa 7.4 vain lyhyesti vakuutus- ja vastuukysymyksiä, koska mm. lainsäädäntö on vielä kehittämättä autonomista ajamista ajatellen. Edellä olevaan hulttionuoren tapaukseen voi ajatuksena vastuukysymyksistä kuitenkin näkökulmana esittää: Kuka olisi syyllinen, jos pyöräilijät menevätkin peräkäin ja hulttionuori paiskaa alkoholipullonsa tielle ja sen sirpaleet aiheuttavat tytön kaatumisen ja autonomisen auton onnettomuuden jommallakummalla seurauksella?

7.2 Paikkatiedon tarkkuus

Ilmailussa lateraalinen paikkavirhe reittilento-osuudella itse asiassa kasvattaa turvamarginaalia kohtaavaan liikenteeseen ja minimilentokorkeudet kullekin reittivälille on määritelty niin leveälle käytävälle, että edes satojen metrien virheet eivät aiheuta törmäysriskiä reunaesteisiin vuoristoisellakaan alueella. Lentokenttää lähestyttäessä tarkkuusvaatimus toki kasvaa. Missään vaiheessa ei kuitenkaan tule tilannetta, joka tieliikenteessä on jokahetkistä; parin metrin sivuttaissiirtymä virheellisesti vie auton vastaantulevan ajoneuvon keulaan.

Massan liikkeen jatkuvuuden vuoksi paikkatiedon kadotessa ajoneuvo jatkaa maantienopeuksilla kymmeniä tai yli sata metriä, vaikka ajoneuvo pyrki pysähtymään. Oleellista paikkatiedon katkoksesta lisäksi on, katoaako paikkatieto suoralla osuudella vai auton ajaessa kaarteissa. Tien geometria nykyisillä teillä vaihtelee jatkuvasti ja mitään ennakkoon ohjelmoitua varamenettelyä ei voida asentaa. Konenäkö pystyy suotuisissa olosuhteissa kuljettamaan auton turvalliseen paikkaan, tosin pohjoisten tai aivan eteläisten leveyspiirien alueilla merkittävän osan vuotta lumi haastaa konenäön ja lämpimämmilläänkin seuduilla esimerkiksi tiheä sumu voi estää autonomisen auton turvallisen hidastamisen. Ihmisen näkö ja aivojen kyky prosessoida ja sopeutua ovat tämän hetkisen tiedon perusteella vielä täysin ylivoimaiset muuttuvissa olosuhteissa.

Satelliittisuunnistusjärjestelmien lähettimet sijaitsevat maapallon kiertoradoilla; esimerkiksi GPS noin 20 200 km:n korkeudella [59, s. 83]. Suuntaavillakin antennilla teho maanpinnalla jää pieneksi ja siten signaalin häiritseminen on jo pienikokoisilla ja -tehoisilla laitteilla helppoa [60, s. 24]. On ihmisiä, joilla on mielenkiinto ja halu rikkoa yhteiskunnan normeja ja lakeja tai vähintään ymmärtämättömyyttä vaaroista, joita uteliaisuuden vuoksi aiheutetaan. Tämä on tullut hyvin näkyviin, kun markkinoille ilmestyi miehittämättömiä lennokkeja eli drooneja. Niiden lentoliikenteelle aiheuttamat vaarati-

lanteet ovat kasvaneet räjähdysmäisesti [61]. Droonien laiton käyttö salakatselussa, kiellettyjen kohteiden kuvaamisessa sekä salakuljetuksessa rajojen yli tai vankiloihin on ollut toistuvasti uutisissa. Lentoliikenteen GPS-signaaliin ilmeisesti Venäjän tekemästä häirinnästä Pohjois-Suomessa on konkreettista näyttöä [62]. Edellä olevien perusteella on oletettavaa, että robottiautojen yleistyessä myös niiden suunnistusjärjestelmien häirintä tulee lisääntymään. Lähikontaktiin kuten tiehen upotetun johtimen seuraamiseen häirintä on vaikeampaa, mutta ei mahdotonta.

7.3 Liikennöivien kohteiden tiheys (kpl/pinta-ala)

Kappaleessa 3.4 kerrotun mukaisesti lentoliikenteessä ilma-alusten etäisyys pidetään lennonjohdon porrastuksilla kilometreinä. Virhetapauksissa tai täydellisessä kommunikaatiokatkoksessakin törmäyksenestojärjestelmä ACAS turvaa kymmenien sekuntien tilan ympärilleen. Tieliikenteessä ainakin nykyisestä liikennevirtojen välityskyvystä katsoen edes maanteillä samaan suuntaan kulkevien välillä tuntuu kolmen sekunnin turvaväli olevan useille kuljettajille mahdoton. Kaupunkiliikenteessä ajoneuvot ovat ruuhkassa alle oman mittansa päässä toisistaan. Vaikka autonomisen liikenteen infraratkaisuna risteävää liikennettä rakennettaisiin eri tasoille, ei keskittymiin kuten nykyisiin kasvukeskuskaupunkien keskustoihin tulevien ajoneuvojen ruuhkia voida välttää muuten kuin ihmisten kulkumahdollisuuksia rajoittamalla. Siihen tuskin nykyihminen lisääntyneen egokeskisyytensä vuoksi helposti suostuu. Ajoneuvotiheys sekä etäisyydet ympärillä oleviin ajoneuvoihin ovat niin pienet, että satelliittinavigointijärjestelmät vaativat maanpäällisiä sijainnin paikkatarkennuksia. Nykyisissä GPS-järjestelmissä käytetään tarkkuuden parantamiseksi satelliittien paikkavirheen ja ilmakehän ominaisuuksien aiheuttamien vääristymien korjaamiseen joko satelliittipohjaista lisäjärjestelmää (Satellite Based Augmentation System SBAS) tai maanpäällisiin kiinteisiin mastoihin asennettuja lisälähtimiä (Ground Based Augmentation System GBAS). Näistä GBAS:in etuna on korjaussignaalin lähettäminen eri taajuusalueella kuin varsinainen satelliittipaikannustieto, joten sen häirintä on monimutkaisempaa. [63] Tarkka sijaintitietokaan ei poista tarvetta sille, että ajoneuvossa on edelleen välttämätöntä olla tutkajärjestelmä mm. eläintörmäysten välttämiseksi. Kuten aiemmin on mainittu, tässä työssä keskitytään ilmailun ja robottiautoilun automaation yhtäläisyyksiin ja eroihin, joten tutkiin ja kameroiden hahmontunnistuksiin ei työssä syvennytä.

Mielenkiintoisia lisähaasteita ohjelmoijille tuovat vielä rinnakkaiset ajokaistat, mikäli nykyinfran kaltainen ratkaisu myös robottiautoilussa valitaan. Liikenteen välityskyvyn kannalta lienee mahdotonta ajatella autonomisten ajoneuvojen kulkevan vain yhdessä jonossa. Lisää pohdittavaa ajoneuvojen toimintalogiikkaan tuovat erimerkiksi moottori-teillä tyypilliset risteysten eritasoratkaisut, joissa korkeuseroa alkaa muodostua vasta ajoneuvojen jo ollessa sivuttaisetäisyydeltään melko lähellä toisiaan ja niiden liikerata lähes samalla korkeudella ollessaan vaikuttaa törmäysuhalta.

Törmäyksenestojärjestelmien pitää siten pystyä huomioimaan huomattavasti ilmaliikennettä lyhyemmät etäisyysporrastukset niin pituus- kuin sivusuunnassakin. Järjestelmien pitää myös osata laskea muuttuva korkeustieto tieprofiilitiedon perusteella.

7.4 Vakuutusten ja vakuutusyhtiöiden näkökulma

Tässä työssä käsitellään vakuutus- ja vastuukysymyksiä suppeasti ja puuttuvan lainsäädännön vuoksi pääosin vain esimerkkien sekä kysymysten kautta, mutta niiden ratkaiseminen jo ennakkoon on ehdoton edellytys robottiautojen liittymisestä normaaliin liikenteeseen. Nykyinen vastuumalli on selkeästi ajoneuvon käyttäjillä. Autossa olevat aputoiminnoiksi laskettavat alemman asteiset automaatiojärjestelmät saattavat estää onnettomuuksia ja joistain laitteista voi saada alennuksia vakuutusmaksuihin. Täysin autonomisessa ajoneuvossa ei ole varsinaisesti kuljettajaa; on vain kuljetettavia. Kenen kuuluu vastata tällaisten ajoneuvojen välisistä onnettomuuksista aiheutuneet kustannukset? Muuttuuko tilanne, mikäli on todettavissa selvä virhe järjestelmässä? Kenen kuuluu maksaa vakuutusmaksu? Onko se ajoneuvon valmistajan vai sitä käyttävän ja kuljetuspalvelua tarjoavan operaattorin velvollisuus? Nykymallissa kuljetuspalvelua myyvä taho on esimerkiksi matkatoimisto, mutta vahinkotapauksissa kuljetuksen toteuttaja (livi- tai lentoyhtiö esimerkiksi) vastaa vakuutuksista.

7.5 Regulaation kehittymättömyys

Tällä hetkellä ajoneuvojen valmistajat luovat järjestelmiä, jotka ovat toiminnallisesti identtisiä, mutta joihin ilmeisesti imagosyistä on täytynyt antaa valmistajan kehittämä nimi. Tästä esimerkkinä vaikkapa ajovakauden hallintajärjestelmät, joista saksalaisista autonvalmistajistakin Audi, Mercedes ja Volkswagen käyttävät nimeä Electronic Stability Program (ESP), kun taas BMW Dynamic Stability Control:ia (DSC) ja Porsche puolestaan termiä Porsche Stability Management (PSM). Ilmailussakin törmäyksenestojärjestelmille jäi elämään kaksi termiä, kappaleessa 3.5 esitetyt ACAS ja TCAS (airborne / traffic collision avoidance system), mutta esimerkiksi maahan törmäyksestä varoittava järjestelmä tunnetaan siis vain nimellä GPWS (ground proximity warning system).

Ilmailussa kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO International Civil Aviation Organisation on hyvin tunnettu vaikuttaja, meriliikenteessä vastaavasti kansainvälinen merenkulun järjestö IMO International Maritime Organisation on tehnyt itsensä tunnetuksi myös suurelle yleisölle. Rautatieliikenteessä esimerkiksi Euroopan Unionin alueella yhteistyöorganisaationa toimiva Euroopan rautatievirasto ERA European Railway Agency ei ole erityisen tunnettu, mutta erityisesti seuraavassa luvussa käsiteltävä tieliikenteen kansainvälinen yhteistyöelin on jäänyt täysin tuntemattomaksi. Tunnettavuus ei estä tietenkään regulaation kehittymistä tai ajoneuvovalmistajien osallistumista työhön, mutta näkyvyys toisi julkista painetta, joka ilmeisimmin pakottaisi ajoneuvovalmistajat harmonisoimaan käsitteet sekä mahdollistaisi muut palveluntuottajat tarjoamaan erityisesti

niitä palveluja, jotka eivät ole ajoneuvovalmistajien syvintä osaamisaluetta. Samoin voitaisiin välttää saman työn tekemistä monien valmistajien kehityspajoissa ja siten saada kustannustehokkuutta ja asiakkaille edullisempia ajoneuvoja käyttöön.

Osa regulaation ja ajoneuvojen kehittymisestä on saavutettavissa vasta käyttökokemusten perusteella. Parhainkaan asiantuntijatyö ideapajoihin ei pysty luomaan kaikkia skenaarioita, joita tosielämä tuo vastaan. Sen hyväksyminen tulee olemaan vaikeaa erityisesti Yhdysvaltojen kaltaisissa maissa, joista tiedämme käyttöohjeiden pitkät vastuunkiertolauselmat. Oikeusasteissa riitely voi haitata autonomisten autojen kehitystä.

7.5.1 UNECE

Tieliikenteen kansainvälinen yhteistyöelin, YK:n alainen Euroopan talouskomissio The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), on saanut alkunsa isäntäorganisaatiostaan vuonna 1945 perustetusta Yhdistyneiden kansakuntien talous- ja sosiaalineuvosto The United Nations Economic and Social Council (ECOSOC) [64]. UNECE perustettiin 1947 ja on siten organisaationa yhtä vanha kuin YK:n alainen kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö ICAO. Nimestään huolimatta se ei ole rajoittunut vain Eurooppaan, vaan sen toimintaan osallistuu 56 valtiota niin Aasiasta kuin Pohjois-Amerikastakin. [65]

UNECE:lla on useita kehityskohteita ja työryhmiä alkaen metsistä ja kestävästä energiantuotannosta jatkuen mm. kauppaan ja liikenteeseen. Liikenteen alta löytyy useita tarkemmin fokuoituja teemoja. Näitä ovat esimerkiksi tieliikenteen ajoneuvoja koskevat säädökset, vaarallisten aineiden kuljettaminen, tieliikenteen turvallisuus, ilmastonmuutos ja kestävä kehityksen mukainen kuljettaminen, älykäs liikennejärjestelmä ja liikenteen infrastukturi. UNECE:n toiminnan monipuolisuuden tuo hyvin esiin vielä työryhmä, jonka teemana on sukupuoli ja kuljettaminen, jossa pohditaan keinoja edistää sukupuolten välistä tasa-arvoa. [65]

Työryhmä WP.29 (Working party / The World Forum for the harmonization of vehicle regulations) on maailmanlaajuinen foorumi, jonka tarkoituksena on sisällyttää yhdenmukaisesti määräyshankkeisiinsa turvallisuutta parantavat tekniset innovaatiot ja tehdä ajoneuvoista ympäristöystävällisempää. Sen säädöstyön pohjana on myös kansainvälinen tieliikenteen turvallisuuteen keskittynyt WP.1 (Global Forum for Road Traffic Safety), jossa yhtenä erikoisteemana on älykäs liikennejärjestelmä (Intelligent Transport Systems).

Alla WP.1:tä tarkemmin esiteltävän WP.29:n työn tuloksilla on kiinteä yhteys tämän työn aiheeseen eli törmäyksenestojärjestelmiin. Sen vuoksi WP.1 esitellään yleisluonteisemmin, kun taas WP.29:n työhön syvennyttään laajemmin.

7.5.1.1 WP.1

Kansainvälisellä yhteistyöllä tieliikenteen turvallisuudesta on pitkät perinteet. Jo vuoden 1968 sopimuksen mukaan WP.1 on laatinut ja päivittänyt parhaita käytäntöjä tieliikenteeseen, liikennemerkkeihin ja liikenteenohjaukseen. WP.1 ja UNECE ovat koordinoineet liikenneturvallisuuteen liittyviä projekteja kuten “Improving Global Road Safety: Setting Regional and National Road Traffic Casualty Reduction Targets” eli kehittyvän liikenneturvallisuuden näkökulma on koko maailma. Tavoitteet tieliikennekuolemien vähenemisille -projekti on sen sijaan harkitusti asettanut ne sekä alueelliselle että kansalliselle tasolle. Kohteena tällä työllä oli kehittää alhaisen tai keskinkertaisen tulotason maille tieliikenneturvallisuuden tavoitteet sekä jakaa kokemuksia hyvistä käytänteistä näiden tavoitteiden saavuttamiseksi. Tyypillisesti länsimaissa olemme tottuneet siihen, että hyvinvoiva osa maailmasta saa eniten huomiota; liekö ajatuksena, että varakas länsimainen ihminen olisi arvokkaampi kuin kehittyvien maiden ihminen. Tässä projektissa on globaalilla ajattelulla haettu suurinta vaikuttavuutta. Kehittyvien maiden infrastruktuuri ei välttämättä tue liikenneturvallisuutta yhtä hyvin, ajoneuvot ovat keskimäärin huonompia ja yhteiskuntajärjestys heikompaa mukaan lukien resurssit kehittää vaikuttavaa tieliikenteen säädöstä, joka loisi pohjan turvallisen liikkumisen opettamiselle. WP.1 on myös valtuuttanut ja mahdollistanut erityisteemoihin keskittyneitä tieliikenteen turvallisuuden asiantuntijatyöryhmiä. [66, s. 57]

7.5.1.2 WP.29

Älykkään liikennejärjestelmän sääntelystä UNECE:ssä vastaa työryhmä WP.29 World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations. Esimerkkinä työryhmän luomista teknisistä spesifikaatioista UNECE:n esittelyssä kerrotaan kehittyneet hätäjarrutusjärjestelmät sekä kaistavahti, Advanced Emergency Braking Systems (AEBS) ja Lane Departure Warning Systems (LDWS). WP.29:n mandaattiin kuuluu myös liikenteen aiheuttamien päästöjen vähentäminen. [66, s. 54]

WP.29 hallinnoi kahta puitesopimusta, joista ensimmäinen on yhteiset tekniset kuvaukset pyörillä kulkeville ajoneuvoille, laitteet ja osat, joita voidaan asentaa tai käyttää pyörillä kulkevissa ajoneuvoissa sekä vastavuoroinen tunnustaminen hyväksynnöille, jotka perustuvat niihin kuvauksiin. Tämä vuoden 1958 sopimus on siten erittäin merkittävä ja kattava vastaten ilma-alusten ja osien tyyppihyväksyntäperiaatteita. Toisena on vuoden 1998 sopimus. Sen perusteella mahdollistettiin erikoistuneiden työryhmien toimiminen WP.29:n alla. Erikoisryhmiä älykkääseen liikennejärjestelmään ovat olleet mm. työryhmät jarruista ja pyörivistä hammaspyöristä / vaihteista tai passiivisesta turvallisuudesta eli sekä niin sanottu kova tekniikka kuin turvallisuuden laaja-alaisempi ymmärrys ovat edustettuina. [66, s. 56]

Tämän työn kannalta merkittävin on ollut moottoriajoneuvoihin asennettavan tekoälyn ja tietojärjestelmien sekä kehittyneiden ajoneuvojärjestelmien parissa työskentelevä

epämuodollinen WP.29:n alla toimiva työryhmä, joka perustettiin vuonna 2002. Sen toiminta lähti tarpeesta lisätä yleisön tietoa uusien älyliikennejärjestelmälaitteiden liikenneturvallisuutta ja tehokuutta mahdollisesti parantavista ominaisuuksista, vaikka kyseinen tekniikka ei vielä olisi täysin kehittynyt ja nämä puutteet voisivat johtaa toiminnon vastustukseen. Vastustuksen vuoksi koko lupaava tekniikka voitaisiin hylätä, mutta oikeaa tietoa jakamalla jatkokehitys voi toteutua. Ajoneuvojen älyliikennejärjestelmiin mahdollisesti tarvittavien säädösten ja hyväksyntöjen tarpeesta oli saatava yhteisymmärrys jäsenmaissa. Työryhmän mukaan on tunnistettava ja tunnustettava, että jotkut älykkäät järjestelmäsovellukset ajoneuvoissa lisäävät turvallisuutta, osalla on vain viihdearvoa ja jotkin järjestelmät jopa heikentävät turvallisuutta. [66, s. 58]

8. YHTEENVETO

Koko työn tärkein havainto ei oletuksesta poiketen ole teknisten järjestelmien kehittämisen varmistaminen, vaan kappaleessa 7.5.1.2 kerrottu UNECEn roolin selkeyttäminen ja sen resurssien varmistaminen erityisesti uusien järjestelmien kehittämisen osalta. Automaatiotasojen 4 ja 5 ajoneuvot edustavat niin merkittävää muutosta tasoihin 0–3 nähden, että kehittyneitä ajoneuvoja ei voi pitää alemman asteisten kehitysaskelena, vaan kokonaan uusista lähtökohdista toimivina innovaatioina. Näin suuren muutoksen johtaminen ei voi olla WP.29:n alla toimivan epämuodollisen työryhmän varassa.

UNECE:n näkyvyys julkisuudessa nykyistä vahvemmin olisi tarkoituksenmukaista, jotta kuljettajien ymmärrys eri järjestelmien toiminnasta ja erityisesti rajoitteista vahvistuisi. Kappaleessa 7.5 on esimerkkinä ajoneuvovalmistajien markkinointisyistä käyttämät sekavat termit sinällään samoille toiminnoille tai järjestelmille. Markkinoinnissa ominaisuuksien etujen korostaminen antaa kuljettajalle epäyhtenäisen kuvan järjestelmän kokonaisuudesta.

Useissa luvuissa ja kappaleissa tuli selvästi esiin, kuinka korkean tason automaatiotasolla on mahdollista hyödyntää niitä oppeja ja teknisiä ratkaisuja, jotka ilmailun historiassa on jo toteutettu samoihin tarpeisiin, mutta eri liikennemuotoon. Tieliikenne tosin vaatii lisäratkaisuja liikennetiheyksien ja ajoneuvojen keskinäisten etäisyyksien sekä samassa tasossa risteävien liikenneväylien vuoksi. Tieliikenteessä on jo yleisesti käytössä automaatiotasolla 3 ajoneuvoja, jotka ilmailusta poiketen tekevät muun liikenteen väistöjä kahdella parametrilla eli nopeuden säätelyllä ja sivusuunnassa ohjaamalla. Törmäyksenesto voi lisäksi perustua kahteen eri tekniikkaan eli tässä työssä käsiteltyyn ilmailussakin käytettyyn ajoneuvojen väliseen kommunikaatioon ja toisaalta tutka- ja kameratekniikkaan, jota ei siis tässä työssä käsitelty, koska sille ei löydy ilmailusta vastinetta.

Robottiautoilun hyväksyttävyyden ja niiden yleistymisen keskeisin ominaisuus on turvallisuus. Mikäli ihminen kokee olonsa turvattomaksi automaation ohjaamassa autossa, hän valitsee mahdollisuuksien mukaan ajoneuvon, joka on hänen omassa kontrollissaan. Valintaa ei muuta tieto, että robottiauto on tilastollisesti yhtä turvallinen kuin hänen itse ajamansa. Robottiautolta odotetaan paljon enemmän. Järjestelmissä varautuminen ennemmin tai myöhemmin tapahtuvaan vikaantumiseen on oleellista. Kappaleessa 6.1 esitelty kolmen tietokoneen periaate ensiarvoisen tärkeissä järjestelmissä on uskoakseni tarpeen ottaa ilmailun tapaan käyttöön myös täysin automaattisiin autoihin. SAE:n standardi lähti luvussa 2 pitkälti olettamuksesta, että yksi tietokone ikään kuin putoaa kokonaan pois virtakatkoksen tai muun selvän ja vakavan vian vuoksi ja toinen tietokone ot-

taa roolin tämän jälkeen. Mikäli vikatilanteeksi kuitenkin tulee esimerkiksi etäisyysmittauksen jumiutuminen kiinteään, mutta loogiseen arvoon, ajoneuvon ensimmäinen tietokone ei tunnista vikaa ja törmäys on ilmeinen.

Eri sukupolvien laitteiden, kuten ilmailun transponderien moodeilla A, C ja S ja vastaavasti tieliikenteen automaatiotasolla 0 – 5, liikkuminen samassa ympäristössä vaatii ehkä jopa enemmän huomiota kuin teknisesti edistyneiden järjestelmien luominen. Tieliikenteen rakentamis- ja ylläpitokustannuksiin vaikuttaa radikaalisti periaatteellinen ratkaisu siitä, rakennetaanko tai rajataanko autonomisille tason 5 robottiautoille oma suljettu liikenneinfransa vai kulkevatko ne muun, alemmanasteisella automaatiolla liikkuvan liikenteen seassa? Kappaleessa 7.3 esitetystä ajoneuvojen tiheys yhdistettynä sekaliikenteeseen edellyttää robottiautoilta paljon enemmän kuin eriytetyt alueet. Tällä on suora vaikutus ajoneuvojen kehittämiseen kuluvaan aikaan ja kustannuksiin.

Asteittain lisääntyvässä automaatiossa on oleellista niiden keskinäinen yhteensopivuus. Ilmailun automaatio on rakentunut asteittain luvussa 3 esiteltyjen innovaatioiden lisäyksillä aiempiin järjestelmiin. Yhteensopivuutta voidaan tietysti testaamalla varmistaa, mutta kappaleen 6.2 tarkoittama parametrien tallennin ja niissä olevien tietojen analysointi onnettomuuksien jälkeen voi ehkäistä joko toimintatavoista tai teknisistä järjestelmistä johtuneiden onnettomuuksien toistumisen. Oppimisprosessia ja toimintamenetelmien onnistunutta kehittämistä kuvasi kappaleen 3.6.1 lento-onnettomuus.

Ihmisen toiminta on säikähdystilanteessa kappaleessa 5 kerrotusti primitiivinen hengissä säilymisviettiin perustuvaa ja arvaamatonta. Nopeasti robottiajoneuvolta ihmiselle siirtyvien yllätystilanteiden hallinnan varalle pitää olla selkeät ja usein toistetut toimintamenetelmät. Lisäksi ihmisen orientoitumista uuteen tilanteeseen voi haitata vähäisten ärsykkeiden aiheuttama alentunut vireystila.

Robottiautoilussa on hyväksyttävä lähes väistämättömänä totuutena ilmailusta opittuna, että suojaavaksi tarkoitettu laite voi epäsuotuisissa olosuhteissa aiheuttaa alkuperäistä vakavampia uhkia, jos uhkia ei suunnitteluvaiheessa ole osattu huolellisella riskianalyysillä tunnistaa. Tästä kappaleessa 3 oli esimerkkinä lentokoneen törmäyksenestojärjestelmän antama väistöohje, mikäli laitteessa ei ole maanpinnan topografiaa huomioivaa tietokantaa.

Järjestelmien yhteensovittamisen tarve säilyy pysyvästi. Hyvinkin suunniteltujen järjestelmien lisätarpeet ilmenevät käyttökokemusten perusteella. Lentokoneiden autopilottien kehityskaaresta voi uskoa, että edes sadan vuoden kehitys ei välttämättä tee järjestelmästä erinomaista. Tieliikenteessä kuten ilmailussakin lisäksi kulkuneuvoon tehty investointi on niin merkittävä, että kulkuneuvo pyritään pitämään vuosikymmeniä liikenteessä. Alemman kehitysasteen ja edistyneen tekniikan kulkuneuvot ovat pitkään rinnakkain samassa liikenneympäristössä.

LÄHTEET

- [1] Adrenaliini, suorituskyky ja aktivoiva hormoni, Mielen ihmeet, 2018, Viitattu 19.3.2018. Saatavissa <https://mielenihmeet.fi/adrenaliini-suorituskyky-ja-aktivoiva-hormoni/>
- [2] Luonnonvoimat pitävät auton tiellä, Länsi-Uusimaa, 22.10.2010. Viitattu 27.2.2018. Saatavissa <https://www.lansi-uusimaa.fi/artikkeli/8665-luonnonvoimat-pitavat-auton-tiella>
- [3] Non-skid braking, Flight, 1953. Viitattu 27.2.2018. Saatavissa <https://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1953/1953%20-%201433.html>
- [4] ISO standardit, Kansainvälinen standardisoimisjärjestö. Viitattu 19.3.2018. Saatavissa <https://www.iso.org/home.html>
- [5] SAE standardit, Society of Automotive Engineers. Viitattu 19.3.2018. Saatavissa <https://www.sae.org/about/>
- [6] Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, SAE International, 2016. Viitattu 20.3. – 8.12.2018. Saatavissa (edellyttää rekisteröitymisen) https://saemobilus.sae.org/content/j3016_201609
- [7] SAE International and DIN Announce Agreement to Publish SAE Autonomous Vehicle Definition Standard in German, PRWeb, 15.8.2016. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <https://www.prweb.com/releases/2016/08/prweb13615380.htm>
- [8] Tieliikennelaki 3.4.1981/267. Viitattu 19.3.2018. Saatavissa <http://finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1981/19810267?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=tieliikennelaki>
- [9] Safety Information Bulletin, European Aviation Safety Agency EASA, 20.12.2016. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <https://ad.easa.europa.eu/ad/2016-20R1>
- [10] Fatigue, fail-safe, and damage tolerance evaluation of metallic structure for normal, utility, acrobatic, and commuter category airplanes, Advisory Circular AC 23-13A, Federal Aviation Authority FAA. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/ac_23-13a.pdf

- [11] European Aviation Safety Agency EASA, Part OPS, revision 11, 07/2018. Viitattu 20.3. – 8.12.2018. Saatavissa <https://www.easa.europa.eu/regulations#regulations-air-operations>
- [12] A. Hirvonen, Lukkiutumattomien jarrujärjestelmien kehitys ja toiminta, Mikkelin AMK. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41000/OpinnaytetyoABS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [13] Autoaakkoset: ESC – mitä ihmettä se tarkoittaa? MTV, 29.2.2016. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <https://www.mtv.fi/lifestyle/autot/artikkeli/autoaakkoset-esc-mita-ihmetta-se-tarkoittaa/5759462#gs.UY2yV00>
- [14] BAS-järjestelmä pakolliseksi, Yle, 8.10.2007. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <https://yle.fi/uutiset/3-5805171>
- [15] Näihin testeihin Ford ei sentään käyttänyt oikeita ihmisiä, Uusi Suomi, 1.10.2014. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <https://www.uusisuomi.fi/autot/72549-naihin-testeihin-ford-ei-sentaan-kayttanyt-oikeita-ihmisia>
- [16] Cooperative Adaptive Cruise Control: Human Factors Analysis, Publication No. FHWA-HRT-13-045, Federal Highway Administration FHA, 10/2013. Viitattu 20.3.2018. Saatavissa <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/safety/17025/17025.pdf>
- [17] Autoneuvotekniikka: Hyvä renki, huono isäntä? Suomen Autoteknillinen Liitto, 8.11.2012. Viitattu 21.3.2018. Saatavissa <http://docplayer.fi/2592564-Suomen-autoteknillinen-liitto-satl-esityksen-sisalto.html>
- [18] Flight Control Laws, European Organisation for the Safety of Air Navigation Eurocontrol initiated SKYbrary, 8.7.2018. Viitattu 4.12.2018. Saatavissa https://www.skybrary.aero/index.php/Flight_Control_Laws
- [19] Pitot tube, National Aeronautics and Space Administration NASA, (päiväämätön). Viitattu 13.4.2018. Saatavissa <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitot.html>
- [20] Digital Fly By Wire: Aircraft Flight Control Comes of Age, National Aeronautics and Space Administration NASA, 17.12.2003. Viitattu 21.3.2018. Saatavissa https://www.nasa.gov/vision/earth/improvingflight/fly_by_wire.html
- [21] Free route airspace (FRA), European Organisation for the Safety of Air Navigation Eurocontrol, (päiväämätön). Viitattu 13.4.2018. Saatavissa <https://www.eurocontrol.int/articles/free-route-airspace>

- [22] Miksi tuo kone on niin lähellä Ilmailutoimittajat ry, (päivämätön). Viitattu 13.4.2018. Saatavissa <http://www.ilmailutoimittajat.fi/seli/porrastus.html>
- [23] Air Navigation Services Finland Oy ANS-Finland, Lentosuunnitelmalomakkeen (FPL) täyttöohjeet, 7.8.2017. Viitattu 13.4.2018. Saatavissa https://www.ais.fi/application/files/7915/1151/2470/Lentosuunnitelmalomakkeen_taytto_ohje.pdf
- [24] H. Palukka, Johtotähdet, Tampereen Yliopisto, 22.9.2003. Viitattu 13.4.2018. Saatavissa <https://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/67314/951-44-5783-8.pdf?sequence=1>
- [25] Ilmailun navigaatio- ja valvontalaitejärjestelmien strategia Suomessa vuosille 2012-2030, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, 20.6.2012. Viitattu 13.4.2018. Saatavissa https://www.trafi.fi/filebank/a/1340619231/a1673131f655c2e19bdd130135da5095/9945-NAV_SUR_esitys_20062012_lausunokierrokselle.pdf
- [26] Detecting and Quantifying Mind Wandering during Simulated Driving, Human Neuroscience, 8.8.2017. Viitattu 18.4.2018. Saatavissa <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2017.00406/full>
- [27] George the Autopilot, Historic wings, 30.8.2012. Viitattu 18.4.2018. Saatavissa <http://fly.historicwings.com/2012/08/george-the-autopilot/>
- [28] Flight Instruments, Pilot's Handbook of Aeronautical knowledge Chapter 8, Federal Aviation Authority FAA, 2016. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/10_phak_ch8.pdf
- [29] Glossary, Pilot's Handbook of Aeronautical knowledge Chapter G, Federal Aviation Authority FAA, 2016. Viitattu 6.12.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/21_phak_glossary.pdf
- [30] Navigation, Advanced Aviation Handbook Chapter 3, Federal Aviation Authority FAA, 2009. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/aah_ch03.pdf
- [31] Automated Flight Control, Advanced Aviation Handbook Chapter 4, Federal Aviation Authority FAA, 2009. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/aah_ch04.pdf

- [32] Autojen romutusikä, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, 15.10.2018. Viitattu 6.12.2018. Saatavissa https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/henkiloautot/autojen_romutusika
- [33] Aeronautical Information Manual, Transport Canada, 11.10.2018. Viitattu 6.12.2018. Saatavissa http://www.tc.gc.ca/media/documents/ca-publications/AIM_2018-2_EN-ACCESS.pdf
- [34] Suomen ilmailukäsikirja, Air Navigation Services Finland Oy ANS-Finland, 1.2.2018. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa <https://www.ais.fi/ais/aip/fi/index.htm>
- [35] Ilmailumääräys OPS M1-31, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, 20.4.2018. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa https://www.trafi.fi/filebank/a/1524232293/70a4ce8b873e75ea6760000314be59cc/30187-OPS_M1-31_2018_Transponderivyohykkeet_FI.pdf
- [36] Information Systems, Advanced Aviation Handbook Chapter 5, Federal Aviation Authority FAA, 2009. Viitattu 7.12.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/advanced_avionics_handbook/media/aah_ch05.pdf
- [37] Air Traffic Management Doc 4444, International Civil Aviation Organisation ICAO, 30.6.2001. Viitattu 7.12.2018. Saatavissa <http://www.navcanada.ca/EN/media/Publications/ICAO-Doc-4444-EN.pdf>
- [38] VHF air-ground Digital Link (VDL) Mode 2; Technical characteristics and methods of measurement for ground-based equipment; Part 1: Physical layer and MAC sub-layer, EN 301 841-1, European Telecommunications Standards Institute ETSI, 1/2010. Viitattu 7.12.2018. Saatavissa https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/30184101/01.04.01_60/en_30184101v010401p.pdf
- [39] Eurocontrol Specification for Trajectory Prediction, European Organisation for the Safety of Air Navigation Eurocontrol, 3.3.2017. Viitattu 29.4.2018. Saatavissa <http://www.eurocontrol.int/publications/trajectory-prediction-specification>
- [40] Introduction to TCAS II Version 7.1, Federal Aviation Authority FAA, 28.2.2011. Viitattu 29.4.2018. Saatavissa https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/tcas%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf
- [41] ICAO SHELL Model, European Organisation for the Safety of Air Navigation Eurocontrol initiated SKYbrary, (päiväämätön). Viitattu 21.3.2018.. Saatavissa https://www.skybrary.aero/index.php/ICAO_SHELL_Model

- [42] Investigation Report AX001-1-2/02, German Federal Bureau of Aircraft Accident Investigation, 19.5.2004. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa http://www.bfu-web.de/EN/Publications/Investigation%20Report/2002/Report_02_AX001-1-2_Ueberlingen_Report.pdf?__blob=publicationFile
- [43] Tietilasto 2017, Liikennevirasto, 6/2018. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lti_2018-05_tietilasto_web.pdf
- [44] Single European Rules of Air SERA, European Aviation Safety Agency EASA, 26.9.2012. Viitattu 26.4.2018. Saatavissa <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:281:0001:0066:EN:PDF>
- [45] Introducing Performance Based Navigation (PBN) and Advanced RNP (A-RNP), European Organisation for the Safety of Air Navigation Eurocontrol, 1/2013. Viitattu 24.5.2018. Saatavissa <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/2013-introducing-pbn-a-rnp.pdf>
- [46] Vastuuttomalla drone-toiminnalla voi olla vakavat seuraukset, Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, 16.5.2018. Viitattu 24.5.2018. Saatavissa https://www.trafi.fi/trafi/ajankohtaista/6174/vastuuttomalla_drone-toiminnalla_voi_olla_vakavat_seuraukset
- [47] S. Sarikana, A. Ozbayoglu, O. Zilcia, Automated Vehicle Classification with Image Processing and Computational Intelligence, ScienceDirect, 30.10.2017. Viitattu 8.12.2018. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917318161>
- [48] T. Alho, P. Neittaanmäki, P. Hänninen, O. Tammilehto, Humanoidirobotti Pepper - Mahdollisuuksia ja haasteita, Jyväskylän yliopisto, Informaatio-tekniologia tiedekunnan julkaisu- ja 61/2018. Viitattu 5.12.2018. Saatavissa https://www.jyu.fi/it/fi/tutkimus/julkaisut/tekes-raportteja/humanoidirobotti_pepper_mahdollisuuksia_ja_haasteita_verkkoversio.pdf
- [49] E. Lindner, Emotion and Conflict: Why It Is Important to Understand How Emotions Affect Conflict and How Conflict Affects Emotions. The Handbook of Conflict Resolution: Theory and Practice, Indigenous Psychology, 2006. Viitattu 24.5.2018. Saatavissa http://indigenoupsych.org/Discussion/forum/Emotion_and_Conflict_November_ICCC_R9_like_book.pdf

- [50] J. Tuulari, H. Karlsson, Mielihyvä, mielihyvä ja ihmisen aivot, Lääketieteellinen Aikakauskirja Duodecim, 2017. Viitattu 24.5.2018. Saatavissa <https://www.duodecimlehti.fi/lehti/2017/23/duo14049>
- [51] The Massive Testing Ground Where Volvo's Perfecting Its Self-Driving Cars, Wired Magazine, 9.3.2014. Viitattu 5.9.2018. Saatavissa <https://www.wired.com/2014/09/volvo-proving-grounds/>
- [52] Yhdistyneiden kuningaskuntien (Britannian) liikenneturvallisuustilasto Passenger casualty rates by mode: 2006 to 2015, UK Government, Department of Transport, 12/2016. Viitattu 6.9.2018. Saatavissa <https://www.gov.uk/government/publications/reported-road-casualties-great-britain-annual-report-2015>
- [53] Trafi seuraa Arizonan robottiautokolarin tutkintaa – Suomalaisitutkija arvostelee robottiautojen testaamista julkisilla teillä: ”Jos tässä vaiheessa kuolee ihmisiä, onhan se aika iso ongelma”, Helsingin Sanomat HS, 20.3.2018. Viitattu 7.11.2018. Saatavissa <https://www.hs.fi/autot/art-2000005611383.html>
- [54] Itsestään ajavan auton kuolonkolarista häkellyttävä tieto: Uber ohitti Volvon törmäyksenestotekniikan, Kauppalehti, 29.3.2018. Viitattu 7.11.2018. Saatavissa <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/tutkavalmistaja-vierittaa-vastuun-robottiauton-kuolonkolarista-uberin-ohjelmistolle/2a1b40e9-2a27-30a6-9993-5d7cc474ba0d>
- [55] Liikennelentokoneen hallinnan menetys laskukiidossa Turun lentoasemalla 25.10.2017, Onnettomuustutkintakeskus, 23.10.2018. Viitattu 7.11.2018. Saatavissa https://turvallisuustutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/ilmailuonnettomuuksientutkinta/2018/Ke98gmwor/Tutkintaselostus_L2017-05.pdf
- [56] In-flight pitch disconnect involving ATR 72 aircraft, VH-FVR, Interim report, Australian Transport Safety Bureau, 15.6.2016. Viitattu 7.11.2018. Saatavissa <https://www.atsb.gov.au/search?query=AO-2014-032>
- [57] Maanteiden liikennevalojen suunnitteluohje LIVASU 2016, Liikennevirasto, 2016. Viitattu 8.12.2018. Saatavissa https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf8/lo_2016-37_livasu_web.pdf
- [58] Final Report On the accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP, French Civil Aviation Safety Investigation Authority BEA, 27.7.2012. Viitattu 7.11.2018. Saatavissa <https://www.bea.aero/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf>

- [59] GPS, positioning_methods_part5, Oulun Ammattikorkeakoulu, 8.10.2010. Viitattu 25.9.2018. Saatavissa http://www.tekniikka.oamk.fi/tl-lab/tietoliikennejarjestelmat/Paikannusmenetelmat/5_session/positioning_methods_part5.pdf
- [60] Uudistuva satelliittinavigointi, PRS-signaalin hyödyntäminen, Valtioneuvoston julkaisu 11/2004, 2.4.2014. Viitattu 25.9.2018. Saatavissa http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/77908/Julkaisuja_11-2014.pdf
- [61] Yhteentörmäykset ja läheltä piti -tilanteet ilmassa (MAC/Airprox), Liikenteen turvallisuusvirasto Trafin Liikennefakta, 12.10.2018. Viitattu 17.11.2018. Saatavissa https://www.liikennefakta.fi/turvallisuus/ilmailu/yhteentormaykset_ja_lahelta_piti-tilanteet_ilmassa
- [62] Niinistö: Lentoliikenteen GPS-signaalin häirintä selvitettävä, Yle, 11.11.2018. Viitattu 17.11.2018. Saatavissa <https://yle.fi/uutiset/3-10503012>
- [63] EGNOS in Action, European Global Navigation Satellite Systems Agency GSA, 8.6.2016. Viitattu 12.11.2018. Saatavissa <https://www.gsa.europa.eu/news/egnos-action>
- [64] About Us, The United Nations Economic and Social Council ECOSOC, (päiväämätön). Viitattu 27.9.2018. Saatavissa <https://www.un.org/ecosoc/en/about-us>
- [65] Mission, The United Nations Economic Commission for Europe UNECE, (päiväämätön). Viitattu 27.9.2018. Saatavissa <https://www.unece.org/mission.html>
- [66] Intelligent Transport Systems (ITS) for sustainable mobility, United Nations Economic Commission for Europe UNECE, 2/2012. Viitattu 27.9.2018. Saatavissa https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/publications/Intelligent_Transport_Systems_for_Sustainable_Mobility.PDF