

Automaation lisääntymisen vaikutukset tieliikenteessä

**Satu Innamaa, Heikki Kanner
Pirkko Rämä, Ari Virtanen**

Automaation lisääntymisen vaikutukset tieliikenteessä

Satu Innamaa, Heikki Kanner, Pirkko Rämä, Ari Virtanen,
Teknologian tutkimuskeskus VTT

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi
Trafiksäkerhetsverket Trafi
Helsinki Helsingfors 2015

ISBN 978-952-311-066-3
ISSN 2342-0294 (verkkojulkaisu)

ALKUSANAT

Teknologian tutkimuskeskus VTT on tutkinut tieliikenteen automatisoitumisen vaikutuksia osana tutkimusohjelmaa *Turvallinen liikenne 2025* (<http://www.vtt.fi/proj/tl2025>). Tutkimuksesta vastasivat Satu Innamaa (liikennevirtavaikutukset), Heikki Kanner (liikennejärjestelmätason vaikutukset), Pirkko Rämä (kuljettajan käyttäytyminen ja käsitykset) ja Ari Virtanen (tekninen katsaus). Henri Sintonen, Harri Koskinen ja Merja Penttinen avustivat työssä.

Hankkeen ohjausryhmään kuuluivat Anna Schirokoff, Mikko Räsänen, Eetu Pilli-Sihvola ja Tuire Simonen Trafista sekä Risto Kulmala ja Arja Toola Liikennevirastosta. Hankkeen etenemistä seurasivat myös Inkeri Parkkari Trafista ja Auli Forsberg ja Päivi Nuutinen Liikennevirastosta.

Helsingissä, 22. tammikuuta 2015

Inkeri Parkkari
johtava asiantuntija
Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi

FÖRORD

Teknologiska forskningscentralen VTT har som en del av forskningsprogrammet Säker trafik 2025 (<http://www.vtt.fi/proj/tl2025>) undersökt effekterna av en automatisering av vägtrafiken. Ansvarspersoner för studien var Satu Innamaa (effekt på trafikflödet), Heikki Kanner (effekt på trafiksystemet), Pirkko Rämä (förar beteende och uppfattning) och Ari Virtanen (teknisk översikt). Henri Sintonen, Harri Koskinen och Merja Penttinen assisterade arbetet.

Projektets styrningsgrupp bestod av Anna Schirokoff, Mikko Räsänen, Eetu Pilli-Sihvola och Tuire Simonen från Trafi samt Risto Kulmala och Arja Toola från Trafikverket. Projektets fortskridning uppföljdes även av Inkeri Parkkari från Trafi och Auli Forsberg och Päivi Nuutinen från Trafikverket.

Helsingfors, den 22 januari 2015

Inkeri Parkkari
ledande sakkunnig
Trafiksäkerhetsverket Trafi

FOREWORD

VTT Technical Research Centre of Finland has assessed the impacts of road traffic automation as part of *Turvallinen liikenne 2025 (Safe Traffic 2025)* research program (<http://www.vtt.fi/proj/tl2025>). The following scientists were responsible for the research: Satu Innamaa (traffic flow impacts), Heikki Kanner (traffic system level impacts), Pirkko Rämä (driver behaviour and uptake) and Ari Virtanen (technical aspects). Henri Sintonen, Harri Koskinen and Merja Penttinen assisted the work.

Anna Schirokoff, Mikko Räsänen, Eetu Pilli-Sihvola, and Tuire Simonen from Finnish Transport Safety Agency Trafi, and Risto Kulmala and Arja Toola Finnish Transport Agency were the members of the steering group. In addition, Inkeri Parkkari from Finnish Transport Safety Agency Trafi, and Auli Forsberg and Päivi Nuutinen Finnish Transport Agency were following the project.

Helsinki, 22 January 2015

Inkeri Parkkari
Chief Adviser
Finnish Transport Safety Agency Trafi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Sammanfattning

Abstract

1	Johdanto.....	1
1.1	Tausta ja tavoite.....	1
1.2	Terminologia	2
1.3	Automaation tasot.....	3
2	Menetelmä.....	8
2.1	Tutkimusmenetelmä.....	8
2.2	Skenaariot	8
3	Tekninen kehitys	10
3.1	Taustaa	10
3.2	Automaattisen ajamisen teknologia	11
3.2.1	Ympäristön havainnointi.....	12
3.2.2	Paikannus	18
3.2.3	Kartat.....	19
3.2.4	Verkottunut ajoneuvo	21
3.2.5	Vaatimukset Suomen näkökulmasta.....	22
4	Kuljettajan käyttäytyminen ja automaattiajamisen hyväksyntä ...	23
4.1	Johdanto	23
4.2	Kuljettajan käyttäytyminen	23
4.2.1	Kuljettajan tehtävät ja tarkastelukehikko	23
4.2.2	Skenaario 1	28
4.2.3	Skenaario 2	30
4.2.4	Skenaario 3	32
4.2.5	Skenaario 4	34
4.3	Kuljettajien käsitykset automaattiajamisesta	34
4.3.1	Mielipiteet	34
4.3.2	Hyväksyntä	36
4.3.3	Käyttöliittymät	37
4.3.4	Tietotarpeet ja koulutus	37
4.4	Yhteenveto kuljettajan käyttäytymisen muutoksista	39
5	Vaikutukset liikennevirtaan	40
5.1	Tarkastelutapa	40
5.2	Aikaisempia tutkimustuloksia	40
5.2.1	Liikennetiheys ja -määrä	40
5.2.2	Teiden välityskyky	45
5.2.3	Shokkiaallot	47
5.2.4	Sujuvuus	48
5.2.5	Yhteenveto liikennevirtavaikutuksista	49
5.3	Liikennevirtavaikutukset Suomessa	50
5.3.1	Skenaario 1	50
5.3.2	Skenaario 2	52
5.3.3	Skenaario 3	53
5.3.4	Skenaario 4	55
5.4	Yhteenveto liikennevirtavaikutuksista Suomessa.....	56
6	Liikennejärjestelmätason vaikutukset	59
6.1	Tarkastelutapa	59
6.2	Liikennejärjestelmävaikutukset Suomessa	59
6.2.1	Tieliikenteen turvallisuus	59
6.2.2	Matka-aika	60

6.2.3	Hallittavuus	61
6.2.4	Ennakoitavuus	61
6.2.5	Esteettömyys.....	62
6.2.6	Matkustusmukavuus	62
6.2.7	Ympäristövaikutukset	62
6.2.8	Käyttäjien kustannukset.....	63
6.2.9	Yhdyskuntarakenne ja yhteydet	64
6.2.10	Infrastruktuuri	65
6.2.11	Talous	65
6.3	Yhteenveto liikennejärjestelmätason vaikutuksista Suomessa.....	67
7	Tulosten tarkastelu.....	68
	Lähdeluettelo	71

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen päätavoitteena oli arvioida tieliikenteen automatisoitumisen vaikutuksia Suomessa. Tarkastelun pääkohteina olivat järjestelmien hyväksyttävyyden, kuljettajan käyttäytyminen sekä vaikutukset liikennevirtaan ja liikennejärjestelmätasolla. Lisäksi tutkimus kattoi katsauksen automaattiajoneuvojen tekniseen kehitykseen.

Automaattisten ajoneuvojen teknologiassa suurin haaste on ympäristöhavainnoinnin kehittyminen sekä teknisesti että taloudellisesti. Teknisesti suurin haaste on kehittää auton tilannetietoisuutta niin, että voidaan olla varmoja sen kyvystä sekä havaita että reagoida oikein kaikkiin liikenneympäristössä esiintyviin tilanteisiin. Taloudellinen haaste on tuottaa tämä kyky niin kustannustehokkaasti, että se olisi kannattavaa autonvalmistajille. Teknisesti lähimpänä kaupallistamista lienevät ruuhka-ajoavustimet. Pienissä nopeuksissa virheet johtavat lähinnä peltivaurioihin eikä ympäristöhavainnoinnin tarvitse olla kovin kehittynyttä. Lainsäädännön pitäisi sallia ainakin testaustoiminta, muuten järjestelmien kyvystä toimia Suomen olosuhteissa ei saada oikeata kuvaa. Robottitaksien käytön mahdollistamiseksi pitäisi Suomen osoitejärjestelmä uusia. Automaattiajamisen tukemiseksi Digiroad-aineiston mittatarkkuutta pitäisi edelleen parantaa ja täydentää sitä myös maamerkkiaineistolla.

Autonkuljettajan päätöksentekotasojen, strategisen, taktisen ja operationaalisen, tarkastelu osoittaa, että taktisen tason kuormitus vähenee automaation lisääntymisen alkuvaiheessa ja täysin automaattisessa liikenteessä ihmisen kapasiteetti vapautuu lähes kokonaan muihin tehtäviin kuin auton ajamiseen. Tehtäviä siirtyy taktiselta tasolta auton hoidettavaksi, kun auto hoitaa etäisyyden, nopeuden ja tiellä pysymisen. Osa tehtävistä voi siirtyä strategiselle tasolle kuten matkan suunnittelu ja ajamiseen liittyviä valintoja tehdään aikaisempaa enemmän jo ennen liikkeelle lähtöä. Ennen laajan automaation toteutumista suuria ongelmia näyttää syntyvän taktisen tason yllättävistä kuormituspiikeistä, kuljettajan tilannetietoisuuden säilyttämisestä sekä sopivan sisäisen mallin valitsemisesta ja toimintastrategian toteutumisesta tilanteissa, joissa niitä tarvitaan.

Tutkimuksessa luotiin viisi skenaariota nykytilasta (100 % SAE 0+1) korkeaan automaatioon (100 % SAE 4). Liikennevirtatasolla liikenteen automatisoitumisen positiiviset vaikutukset näkyvät vasta automaatiotasolla 3. Tällöin selvästi positiivisia vaikutuksia löytyy kaikilta osa-alueilta (välityskyky, shokkiaallot, ylinopeudet ja sujuvuus). Automaatiotasolla 4 vaikutukset ovat vielä positiivisemmat. Liikenne on sujuvaa ja ruuhkia vähemmän, koska ruuhkautumiseen johtava liikennemäärä- ja tiheys ovat suuremmat. Lisäksi liikennevirta on tasaisempaa, ylinopeuksia on vähän ja shokkiaallot katoavat nopeasti. Alemman automaatiotason autonomisten ajoneuvojen muodostamassa liikennevirrassa välityskyky heikkenee, shokkiaaltojen määrä ja ylinopeudet voivat kyllä vähentyä, mutta liikenne ruuhkautuu nykyistä alemmissa liikennetiheyksissä ja matkanopeudet ruuhkassa ovat nykyistä alhaisempia.

Liikennejärjestelmätason vaikutukset ovat hyvin pieniä automaatiotasolla 1. Automaatiotasolla 2 turvallisuuden paraneminen kuitenkin jo vähentää liikennehäiriöitä ja ruuhkia. Liikenteestä tulee siten ennakoitavampaa, mukavampaa ja ympäristöä säästävämpää. Infrastruktuurikustannukset kasvavat hieman. Talvihoidon kustannukset kasvavat, jos teitä pidetään laajasti automaattiajamiseen sopivassa kunnossa. Automaatiotasolla 3 myönteiset vaikutukset ovat melko suuria, mutta myös negatiivisia ympäristövaikutuksia voi syntyä liikennesuorituksen mahdollisesti kasvaessa. Automaatiotasolla 4 myönteiset vaikutukset ovat suurimmat. Ihmiset, jotka eivät kykene ajamaan nykyisiä autoja, saattavat ryhtyä automaattiajoneuvojen kuljettajiksi. Yhdyskuntarakenteen mahdollisesti hajotessa joukkoliikenteen

palvelutaso saattaa heiketä ja liikennesuoritteet kasvaa, mistä aiheutuu negatiivisia ympäristövaikutuksia.

SAMMANFATTNING

Huvudsyftet med studien var att utvärdera effekterna av en automatiserad vägtrafik i Finland. Huvudpunkterna i utredningen var systemens godkännande, förar beteende och effekterna på trafikflödet och trafiksystemet. Studien inkluderade dessutom en översikt av den tekniska utvecklingen av automatiserade fordon.

Den största utmaningen för den automatiserade fordonsteknologin är utvecklingen av egenskapen för att kunna observera omgivningen, både tekniskt och ekonomiskt sett. Den tekniskt största utmaningen är att utveckla fordonens situationsmedvetenhet, så att man kan vara säker om dess förmåga att upptäcka och reagera korrekt på alla situationer som kan uppstå i trafikmiljön. Den ekonomiska utmaningen är att kunna tillverka denna egenskap så kostnadseffektiv att det är lönsamt för biltillverkarna. De system som lär vara tekniskt sett närmast en kommersialisering är system som underlättar att köra i rusningstrafik. De används vid låga hastigheter där fel i huvudsak leder till plåtskador och egenskapen att kunna observera omgivningen inte behöver vara särskilt utvecklad. Lagstiftningen borde åtminstone tillåta testverksamhet, annars kan man inte få en verklig bild på hur systemen klarar sig i finska förhållanden. För att göra det möjligt att använda robottaxin måste adres-systemet i Finland förnyas. Som stöd för automatiserad körning borde Digiroad-datans måttnoggrannheten förbättras ytterligare och den borde även kompletteras med landmärkesdata.

Utvärderingen av de olika nivåerna av bilförarens beslutsfattande, den strategiska, taktiska och operativa nivån, visade att belastningen på den taktiska nivån minskar i startskedet av en ökad automatisering och att hela människans kapacitet frigörs för att sköta andra uppgifter än att köra i en fullt automatiserad trafik. Ansvaret för uppgifterna flyttas från den taktiska nivån till bilen eftersom bilen sköter om avståndet, hastigheten och att hållas på vägen. En del av uppgifterna kan flyttas till den strategiska nivån som reseplanering och andra val relaterade till körandet görs redan före start. Före en omfattande implementering av automatiseringen verkar det som om problem kan uppstå i oväntade belastningar på förarens taktiska nivå, i att kunna bibehålla förarens situationsmedvetenhet och i valet av den interna modellen och verksamhetsplanen i situationer då de behövs.

I studien skapades fem olika scenarier, från nuläget (100 % SAE 0-1) till hög automation (100 % SAE 4). För trafikflödet syns de positiva effekterna av en automatiserad vägtrafik först på automationsnivå 3. Då finns det klart positiva effekter på alla delområden (kapacitet, chockvågor, fortkörning och smidighet). På automationsnivå 4 är effekterna ännu mer positiva. Trafiken löper smidigt och det finns mindre rusning, eftersom trafikmängden och tätheten som krävs för att orsaka rusning är större. Dessutom är trafikflödet jämnare, det finns få fortkörningar och chockvågorna försvinner snabbt. På de lägre automationsnivåerna försämras kapaciteten i trafikflödet som uppstår av automatiserade bilar. Antalet chockvågor och fortkörningar kan minska men trafiken stockas för trafikmängder som är mindre än i dagsläget och körhastigheterna i rusningen är lägre än i dagsläget.

På automationsnivå 1 är effekterna på trafiksystemet väldigt små. På automationsnivå 2 leder förbättringen i trafiksäkerheten till mindre störningar i trafiken och minskar rusning. På så sätt blir trafiken mer förutsägbar, bekväm och miljövänlig. Kostnaderna för infrastrukturen växer en aning. Kostnaderna för vinterväghållningen växer ifall vägarna uppehålls för att möjliggöra automatiserad körning. På automationsnivå 3 är de positiva effekterna ganska stora men det kan även påverka miljön negativt ifall trafikmängden växer. De positiva effekterna är som störst på automationsnivå 4. Människor som inte kan köra dagens bilar kan börja använda automatiserade bilar. En splittring i samhällsstrukturen kan leda till

att kollektivtrafikens servicenivå försämras och trafikmängderna ökar, vilket kan påverka miljön negativt.

ABSTRACT

The main purpose of the research was to assess the impacts of road traffic automation in Finland. The main focus areas were the use and acceptance of the systems and the impacts on traffic flow and the transport system. The study also examined the state of the art of technical development of automated vehicles.

When developing an automatic/autonomous vehicle, the most challenging task is to develop an environment perception system that is both technically and economically feasible. Situational awareness must be on a level where there is certainty that the vehicle will recognise and react correctly to every possible hazardous situation in traffic. The economical challenge is to produce and market this ability at a cost that will bring revenue to car manufacturers. Traffic Jam Assistant seems to be closest to the commercialisation phase. It is used at low speeds where accidents cause only material losses and the required sensor system is rather simple. Legislation should allow at least for system testing and development on public roads, if correct results are to be obtained on how these systems work in Finnish weather conditions. For the application of robotic taxi systems, one requirement would be the renewal of the Finnish address system. To support other automatic functions, the national Digiroad map database should be extended to contain some landmark data. Its geometrical accuracy also requires further improvement.

A review of drivers' decision-making levels, i.e. strategic, tactical and operational, shows that the workload at tactical level decreases with increasing automation, and that in full automation almost all human capacity can be allocated to other activities than driving. Some tasks at tactical level are transferred to the car when headway, driving speed and lane keeping are controlled automatically. Others may move to strategic level like a trip planning, and some choices related to driving will be made before setting out. Before full automation can be applied, there are substantial problems to be solved including unexpected and sudden peaks in workload while driving, maintenance of sufficient situation awareness, and the selection of proper mental models and action plans for when they are needed.

Five scenarios were drawn up for the assessment, ranging from the current status (100% SAE 0+1) to a high level of automation (100% SAE 4). In traffic flow the positive impacts of automation are seen from SAE 3 onwards, at which point they cover all aspects (capacity, shockwaves, speeding and fluency). At automation level SAE 4 the impacts are even more positive; traffic is fluent and there is less congestion because the flow rate and traffic density leading to congestion are higher. In addition, traffic flow is more homogeneous, few vehicles are speeding, and shockwaves disappear quickly. In the traffic flow of autonomous vehicles with lower level automation, capacity is reduced and the number of shockwaves and speeding may diminish, but traffic gets congested in smaller traffic densities than currently, and travel times in congestion are longer than at present.

The impacts at transport system level are quite small with automation level SAE 1. With SAE 2, the improvement of traffic safety reduces traffic incidents and congestion. The traffic becomes more predictable, more comfortable and more environmentally friendly. The infrastructure investment costs will grow slightly, as will those of winter maintenance, if the network is to be widely maintained for automated driving. On level SAE 3 the positive impacts are quite strong, but a negative impact on the environment may result if the traffic volume increases. The positive impacts are greatest at automation level SAE 4. Those who are not able to drive current cars could become drivers of automated vehicles. Potential urban sprawl may diminish the level of service of public transport, having negative environmental impacts.

1 Johdanto

1.1 Tausta ja tavoite

Liikenteen automatisoituminen ja automaattiajaminen näyttävät tulevan teillemme ja liikennejärjestelmäämme aiemmin kuin arvelimme – ainakin jos hurjimpia visioita ja visionäärejä on uskomisen. Mukautuva vakionopeudensäädin (Adaptive Cruise Control, ACC) ja pysäköintiavustin (Park Assist) ovat esimerkkejä ja tienraivaajia kohti automaattisia järjestelmiä ja lopulta täysin automaattisia ajoneuvoja.

Onkin aika arvioida ja ennakoida automaation yleistymisen vaikutuksia liikenteeseen. Voidaan olettaa, että osa vaikutuksista on yleismaailmallisia, mutta osa riippuu varmastikin kunkin maan liikenteelle ja tieverkolle tyypillisistä piirteistä ja olosuhteista, kuten säästä ja kelistä, tieinfrastruktuurista, ajoneuvokannasta, liikennemääristä jne. Nämä ja varmasti monet muutkin asiat vaikuttavat siihen, miten automaatio hyväksytään sekä lainsäädännössä että käyttäjien parissa ja miten se yleistyy kussakin maassa. Esimerkiksi Suomessa on tärkeää arvioida automaation vaikutuksia erityisesti talviliikenteessä.

Monet eurooppalaiset toimijat ovat määritelleet automaattisen liikenteen kattavasti. Esimerkiksi kreikkalainen Institute of Communication and Computer Systems (ICCS) (Admitis, 2014) on määritellyt automaattiajamisen seuraavasti: *Automaattinen liikenne on innovatiivinen ja holistinen liikkumiskonsepti, jossa kaikki sen eri osat (ajoneuvot, liikkujat, julkinen liikenne, infrastruktuuri, operointi ja ohjaus) ovat kykeneviä organisoitumaan itsenäisesti ja operoimaan ”automaattisesti”, käsittelemään ajantasaisesti kaikkien tietyn liikenneskenaarion osapuolten tarpeet, soveltamaan eri automaatiotasoja ja tukemaan kaikkia kulkutapoja niin matkustajien kuin tavarakuljetusten osalta.*

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli tehdä arvio tieliikenteen automatisoitumisen vaikutuksista Suomessa. Tarkastelun pääkohteina olivat kuljettajien käsitykset automaattiajosta ja käyttäytyminen sekä vaikutukset liikennevirtaan ja liikennejärjestelmään. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin katsaus automaattiajoneuvojen teknisestä kehityksestä. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin mm. lainsäädäntö, vastuukysymykset tai korvattavuudet. Myöskään mahdollista Liikenne palveluna eli MaaS-palvelujen yleistymistä ei ole otettu tarkastelussa huomioon.

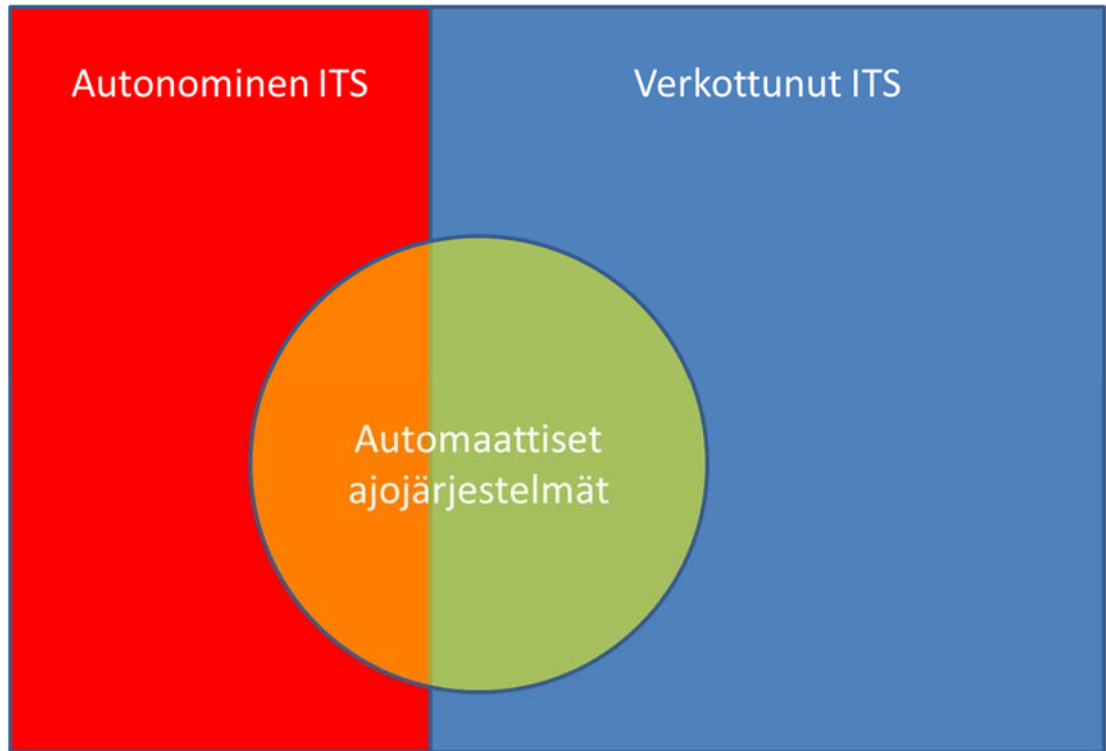
1.2 Terminologia

Automaattiajamisen alueella useimmille käsitteille ei ole vielä vakiintuneita suomennoksia. Tässä raportissa on käytetty taulukossa 1 olevia suomennoksia. Näitä suositellaan muutenkin käytettäväksi.

Taulukko 1. Automaattiajamisen käsitteet

Käsite englanniksi	Suomenno	Merkitys
Automated vehicle	Automaattiajoneuvo, automaattinen ajoneuvo	Ajoneuvo, joka kykenee ainakin osin suoriutumaan ajotehtävästä ilman kuljettajaa
Autonomous vehicle	Autonominen ajoneuvo, (itsenäinen ajoneuvo, omaehtoinen ajoneuvo)	Automaattiajoneuvo, joka kykenee suoriutumaan ajotehtävästä ilman kuljettajaa ja ilman yhteyttä muihin ajoneuvoihin tai infrastruktuuriin
Connected vehicle	Verkottunut ajoneuvo	Ajoneuvo, joka on langattomasti yhteydessä toisiin ajoneuvoihin ja/tai infrastruktuuriin
Tele-operated vehicle	Teleoperoitu ajoneuvo	Ajoneuvo, jota operoidaan auton ulkopuolelta langattomasti. Ajoneuvon ei tarvitse olla automaattinen tai autonominen.
Cooperative service	Yhteistoiminnallinen palvelu	Palvelu, jonka toteuttamiseksi ajoneuvo/liikkuja ja infrastruktuuri tai ajoneuvot/liikkujat vaihtavat tietoa sähköisesti
Collaborative service	Yhteisöllinen palvelu	Palvelu, jonka toteuttamiseksi kaikki tienkäyttäjryhmät (ajoneuvot, kevyt liikenne ja joukkoliikenteen matkustajat) ja infrastruktuuri ovat yhteydessä toisiinsa (paljon eri osapuolia, joukkoistaminen, ml. tiedon tuotto)
Platooning	Letka-ajo, saattueajo	Jonossa ajo, jossa jonon ensimmäinen ajoneuvo ohjaa jonoa ja muut seuraavat automaattisesti. Vaatii tyypillisesti erillisen kaistan tai kaistajärjestelyjä.

On huomattava, että yksittäinen järjestelmä voi olla joko autonominen tai verkottunut, mutta yksittäisessä automaattiajoneuvossa voi olla sekä autonomisia että verkottuneita järjestelmiä (Kuva 1, Shladover 2014).



Kuva 1. Autonomiset ja verkottuneet ajojärjestelmät (Shladover 2014). Lyhenne ITS tarkoittaa älyliikennejärjestelmiä.

1.3 Automaation tasot

SAE (Society of Automotive Engineers) on määritellyt tieliikenteen automaatiolle teknologiatasot (SAE 2014), joita käytetään yleisesti. Luokittelua käytetään myös tässä työssä, ja sitä suositellaan muutenkin Suomessa käytettäväksi, kunnes luokittelulle saadaan eurooppalainen standardi. Muita yleisesti käytössä olevia ovat mm. NHTSA:n ja BAST:n luokittelut.

SAE:n luokittelussa on kuusi tasoa (Taulukko 2): ei-automatisoidusta autosta (SAE 0) täysin automatisoituun (SAE 5). Nämä tasot voidaan jakaa kahteen ryhmään: (A) järjestelmiin, joissa kuljettajana toimiva ihminen seuraa ajoympäristöä, ja (B) järjestelmiin, joissa järjestelmä vastaa täysin ajoympäristön seurannasta.

Taulukko 2. Tieliikenteen automaatiotasot (SAE 2014), taulukossa ”järjestelmällä” tarkoitetaan automaattiajamisen järjestelmiä

Taso	Nimi	Määritelmä	Ohjaus, kiihdyttäminen, jarrutus	Ympäristön monitorointi	Dynaamisen ajamisen vara-suorittaja	Automaation kattavuus
Ihminen monitoroi ajoympäristöä			Ihminen	Ihminen	Ihminen	
0	Ei automaatiota	Ihminen suorittaa kaikki dynaamisen ajotehtävän osa-alueet, vaikka ajamista tuetaan varoituksilla tai ajamiseen puuttuvilla järjestelmillä.				–
1	Kuljettajan tuki	Ajotilannekohtaisia kuljettajan tukijärjestelmiä, jotka liittyvät joko ohjaamiseen tai kiihdyttämiseen/jarruttamiseen hyödyntämällä tietoa ajoympäristön tilasta. Ihminen vastaa kaikista muista dynaamiseen ajotehtävän osa-alueista.	Ihminen ja järjestelmä	Ihminen	Ihminen	Joitakin ajotilanteita
2	Osittainen automaatio	Yksi tai useampi ajotilannekohtainen kuljettajan tukijärjestelmä, joka kattaa sekä ohjaamisen että kiihdyttämisen/jarruttamisen hyödyntämällä tietoa ajoympäristön tilasta. Ihminen vastaa kaikista muista dynaamiseen ajotehtävän osa-alueista.	Järjestelmä	Ihminen	Ihminen	Joitakin ajotilanteita
Järjestelmä monitoroi ajoympäristöä			Järjestelmä	Järjestelmä	Ihminen	
3	Ehdollinen automaatio	Ajotilannekohtainen automaattiajojärjestelmä kattaa kaikki dynaamisen ajotehtävän osa-alueet, kuten pituus- ja poikittaissuuntaisen kontrolloinnin. Ihminen täytyy kuitenkin ottaa auto hallintaansa, kun järjestelmä näin pyytää.				Joitakin ajotilanteita
4	Korkea automaatio	Ajotilannekohtainen automaattiajojärjestelmä kattaa kaikki dynaamisen ajotehtävän osa-alueet myös silloin, kun ihminen ei ota autoa hallintaansa, vaikka järjestelmä näin pyytää. Ellei kuljettaja ota ajoneuvoa haltuunsa, järjestelmä ohjaa auton hallitusti tien sivuun ja pysäyttää sen.	Järjestelmä	Järjestelmä	Järjestelmä	Suurin osa ajotilanteista
5	Täysi automaatio	Kaiken kattava automaattiajojärjestelmä, joka kattaa kaikki dynaamisen ajotehtävän osa-alueet kaikissa tie- ja ympäristöolosuhteissa.	Järjestelmä	Järjestelmä	Järjestelmä	Kaikki ajotilanteet

Kuljettajan (ihmisen) rooli eri automaatiotasoilla:

1. Järjestelmä tukee vain yhtä "toimintoa" ja kuljettaja huolehtii muista ajotoimintoista JA seuraa ajoympäristöä.
2. Kuljettajan täytyy seurata ajoympäristöä.
3. Kuljettaja voi tehdä muita asioita ajaessaan, mutta tarvittaessa hänen täytyy ottaa ajoneuvo haltuunsa (= ryhtyä ajamaan).
4. Kuljettaja voi jopa nukkua, koska järjestelmä varoittaa häntä, jos kuljettajan täytyy ottaa ajoneuvo haltuunsa.
5. Kuljettajaa ei tarvita.

Markkinoilla olevia järjestelmiä eri automaatiotasoilla ovat esimerkiksi seuraavat (mm. ERTRAC 2014):

Taso 0, esimerkkejä

- Kaistanvaihtoavustin (Lane Change Assist, LCA): Järjestelmä monitoroi aluetta auton molemmilla puolilla ja 50 metriin asti auton takana ja varoittaa vaarallista tilanteesta sivupeilien valoja vilkuttamalla. (Volkswagen)
- Pysäköintietäisyyden hallinta (Park Distance Control, PDC): Järjestelmä auttaa ahtaisiin tiloihin/väleihin pysäköimistä kertomalla etäisyyden esteisiin autosta riippuen akustisella tai optisella signaalilla. (BMW)
- Kaistalta lähdön varoitus (Lane Departure Warning, LDW): Järjestelmä varoittaa kuljettajaa visuaalisesti ja varoitusaänellä, jos auto vahingossa ajautuu pois kaistalta. (Nissan)
- Törmäysvaroitin (Forward Collision Warning, FCW): Järjestelmä havaitsee tutkan avulla tilanteita, joissa edessä olevan esteen etäisyys ja suhteellinen nopeus ajoneuvon on kriittinen. Vaarallisissa tilanteissa järjestelmä varoittaa kuljettajaa visuaalisesti ja akustisin signaalein sekä tiukentamalla turvavöitä. (Nissan)

Taso 1, esimerkkejä

- Mukautuva vakionopeuden säädin (Adaptive Cruise Control, ACC): Järjestelmä, joka säilyttää automaattisesti vakioaikavälin suhteessa edellä ajavaan ajoneuvon etäisyyden ja suhteellisen nopeuden perusteella. Kuljettaja asettaa tavoitenopeuden ja -aikavälin järjestelmään. (Useissa automerkeissä)
- Pysäköintiavustin (Park Assist, PA): Järjestelmä ohjaa ajoneuvon tasku- tai rivissä olevaan parkkitilaan ja pois taskuparkista. Järjestelmä tekee automaattisesti optimaaliset ohjausliikkeet, jotta saa peruutettua ajoneuvon oikealle linjalle. Järjestelmä mittaa pysäköintitilan koon ja allokoi paikan, josta pysäköinti aloitetaan, ja ohjausliikkeet. Kuljettaja käyttää kaasua ja jarrua. Hänellä on myös vastuu ajoneuvosta koko pysäköinnin ajan. (Volkswagen, Mercedes Benz, Peugeot)
- Mukautuva vakionopeuden säädin, jossa mukana stop&go (ACC including Stop & Go): Järjestelmässä on mukana ajoetäisyyden hallinta (nopeustasoilla 0–250 km/h), ja se havaitsee lähestyvän ajoneuvon. Järjestelmä ylläpitää tavoiteaikavälin käyttämällä automaattisesti jarrua ja kaasua myös hitaasti liikkuvassa liikennevirrassa. (BMW)
- Kaistavahti (Lane Keeping Assist, LKA): Järjestelmä aktivoituu automaattisesti tietyn nopeustason ylityksestä (tyypillisesti n. 60 km/h). Järjestelmä havaitsee kaistamerkinnot ja päättää ajoneuvon sijainnin. Jos ajoneuvo ajautuu kaistan reunaan, järjestelmä ohjaa sen takaisin oikealle ajolinjalle. Jos tarvittava kor-

jausliike on suurempi kuin järjestelmän sallima maksimi tai ajonopeus laskee alle raja-arvona olevan nopeustason, järjestelmä varoittaa kuljettajaa esimerkiksi ohjauspyörän värinällä. Tämän jälkeen jää kuljettajan vastuulle korjata ajolinja oikeaksi. (Toyota)

Esimerkkejä ylemmän tason automaatiojärjestelmistä:

Taso 2, esimerkkejä

- Pysäköintiavustaja (Park Assistant): Osittain automatisoitu pysäköinti pysäköintitilaan ja siitä ulos, joka toimii yleisessä parkkitalossa tai yksityisessä autotalissa. Pysäköintiprosessi käynnistetään nappia painamalla ja ajoneuvo hoitaa pysäköinnin täysin itsenäisesti (ohjaus, kiihdytys, jarrutus). Kuljettajan täytyy kuitenkin monitoroida auton ympäristöä ja pysäyttää pysäköinti, jos se on tarpeen. (BMW)
- Ruuhka-avustin (Traffic Jam Assistant): Ajoneuvo seuraa järjestelmän avulla liikennevirtaa alhaisissa nopeuksissa (korkeintaan 60 km/h) säilyttämällä tavoitte-ettäisyyden edellä ajavaan ajoneuvoon, säätää ajoneuvon nopeuden ja avustaa ohjaamisessa mm. pitämällä ajoneuvon kaistalla (ACC + LKA). Kuljettaja on kuitenkin velvollinen pitämään kädet ratilla ja tarkkailemaan ympäristöä. (BMW)

Taso 3, esimerkkejä

- Ruuhkakuljettaja (Traffic Jam Chauffeur): Ehdollisen automaation järjestelmä, joka toimii moottoriteillä ja muilla vastaavilla teillä nopeudella 60 km/h ja sitä pienemmillä nopeuksilla. Järjestelmä voidaan aktivoida, jos nämä toimintaympäristöedellytykset täyttyvät. Järjestelmä havaitsee edessä ajavan hitaan ajoneuvon ja hallitsee ajoneuvon ohjauksen pitkittäis- ja poikittaissuunnassa. Kuljettajan täytyy aktivoida järjestelmä, muttei monitoroida sitä jatkuvasti. Kuljettaja voi koska vain laittaa järjestelmän pois päältä. Järjestelmä ei ehdota kuljettajalle ohitusta. (Continental Automotive)
- Maantiekuljettaja (Highway Chauffeur): Ehdollisen automaattiajamisen järjestelmä, joka toimii nopeuteen 130 km/h asti moottoriteillä ja muilla vastaavilla teillä. Järjestelmä vastaa ajamisesta sisääntulorampilta poistumisrampille asti kaikilla kaistoilla, ml. ohittamisen. Kuljettajan täytyy aktivoida järjestelmä, muttei monitoroida sitä jatkuvasti. Kuljettaja voi koska tahansa laittaa järjestelmän pois päältä. Järjestelmä pyytää kuljettajaa ottamaan ajoneuvon haltuunsa, jos automaatio päättää tilanteen sitä vaativan. (Continental Automotive)

Taso 4, esimerkkejä

- Pysäköintitalopilotti (Parking Garage Pilot): Korkeasti automatisoitu pysäköinti-järjestelmä, joka sisältää automaattisen taskupysäköinnin. Kuljettajan ei tarvitse monitoroida järjestelmää pysäköintitalossa, ja hän voi lähteä sieltä aktivoituaan järjestelmän. Ajoneuvon palautus käynnistetään älypuhelimella tai avaimesta. (Audi)
- Maantiepilotti (Higway Pilot): Automaattiajamisen järjestelmä, joka toimii nopeuteen 130 km/h asti moottoriteillä ja muilla vastaavilla teillä. Järjestelmä vastaa ajamisesta sisääntulorampilta poistumisrampille asti kaikilla kaistoilla, ml. ohittamisen. Kuljettajan täytyy aktivoida järjestelmä, muttei monitoroida sitä jatkuvasti. Järjestelmä ei pyydä kuljettajaa ottamaan ajoneuvoa hallintaansa normaalissa toimintaympäristössään (moottoriteillä). Jos järjestelmä on verkot-

tunut, järjestelmän avulla voidaan muodostaa väliaikaisia saattueita. (Mercedes Benz)

Taso 5, esimerkkejä

- Täysin automaattinen ajoneuvo kykenee ajamaan itsenäisesti paikasta A paikkaan B. Esimerkkeinä vuokra-auton palautus tyhjänä lähtöpaikkaan tai lapsien taksikuljetus ilman kuljettajaa.

2 Menetelmä

2.1 Tutkimusmenetelmä

Työ perustuu enimmäkseen kirjallisuudessa, konferensseissa ja alan asiantuntijatyöpajoissa esitettyihin tutkimustuloksiin ja arvioihin tieliikenteen automaation lisääntymisen vaikutuksista.

Liikennevirtavaikutusten alueelta pidettiin lisäksi asiantuntijatyöpaja 20.11.2014. Työpajatyöskentelyyn osallistuivat: Anna Schirokoff, Inkeri Parkkari, Eetu Pilli-Sihvola ja Mikko Räsänen Liikenteen turvallisuusvirastosta, Risto Kulmala, Arja Toola ja Auli Forsberg Liikennevirastosta sekä Satu Innamaa, Pirkko Rämä ja Heikki Kanner VTT:ltä.

- Liikennevirtavaikutusten työpajassa olivat näkökulmina automaattiajamisen skenaariot tieliikenteelle (automaation eri tasot, verkottunut vs. autonominen) ja Suomen liikenteen ja liikenneympäristön erityispiirteet. Tällaisia erityispiirteitä ovat mm. seuraavat:
- pienet liikennemäärät suurimpien kaupunkiseutujen ulkopuolella
- pitkät etäisyydet
- tasoliittymät ja -risteykset
- paljon alhaisen (toiminnallisen) luokan teitä, joilla mm. puutteelliset tiemerkinnot, paljon metsätie-/yksityistieliittymiä
- talvella luminen tieympäristö, jossa tienmerkinnät eivät näy, lumisade, pöllyävä lumi, jäiset ja muuten liukkaat tiet, routavauriot
- kesä- ja talvirenkaat
- hirvien ja porojen aiheuttamat onnettomuudet.

2.2 Skenaariot

Tehty vaikutusarvio perustuu viiteen eri skenaarioon, jotka on kuvattu alla ja taulukossa 3. On huomattava, että tarkasteluun mukaan valitut penetraatioasteet ovat osuuksia liikennevirrasta, eivät ajoneuvokannasta.

- Skenaario 0: Nykytila (kuljettaja vastaa ympäristön monitoroinnista ja ajamisesta kaikissa tilanteissa), kaikki autot ovat automaatiotasoa 0–1
 - automaatiotason 1 autoja on 10 %
 - automaatiotason 1 autoista 50 % oletetaan varustelluksi mukautuvalla vakionopeussäätimellä (ACC) ja 50 % kaistavahdilla (LKA) (Öörni 2012)
 - kuljettaja vastaa tavoitenopeustason asettamisesta ACC:hen (tyypillisesti joko nopeusrajoituksen mukaisen nopeuden tai hieman sitä suuremman), hyvin harva kuljettaja säätää tehdasasetuksia minimiaikavälistä.
- Skenaario 1: Automaatiotason 2 autoja alkaa olla liikenteessä (auto kykenee ajamaan itse ruuhkassa tai moottoriteillä), pääasiassa autot ovat kuitenkin vielä tasoa 0–1
 - samat oletukset automaatiotason 0–1 autoista kuin Skenaariossa 0
 - automaatiotason 2 autot oletetaan varustelluiksi sekä ACC:llä että LKA:lla

- o kuljettaja vastaa tavoitenopeustason asettamisesta ACC:hen (tyypillisesti joko nopeusrajoituksen mukaisen nopeuden tai hieman sitä suuremman), hyvin harva kuljettaja säätää tehdasasetuksia minimiaikavälistä.
- Skenaario 2: Autot ovat pääasiassa automaatiotasoa 2, liikenteessä on jonkin verran tason 0–1 autoja
 - o samat kuljettajantukijärjestelmäoletukset kuin Skenaariossa 1.
- Skenaario 3: Autot ovat pääasiassa automaatiotasoa 3 (auto hoitaa lähes kaiken ajamiseen liittyvän, kuljettajan pitää kuitenkin olla valppaana ottamaan auto hallintaansa), liikenteessä on jonkin verran tason 2 autoja
 - o tason 3 automaattiajoneuvoissa on nopeusrajoitustieto eivätkä autot aja automatiikalla ylinopeutta
 - o hyvin harva kuljettaja säätää tehdasasetuksia ACC:n minimiaikavälistä
 - o automaatiotason 3 autoissa on hätäjarrutusjärjestelmä, joka tehostaa auton pysäyttämistä automatiikalla ajettaessa.
- Skenaario 4: Kaikki autot ovat tasoa 4 (auto hoitaa ajamisen lähes kaikissa tilanteissa) ja verkottuneita sekä toisiinsa että liikenneinfrastruktuuriin.
 - o ajoneuvon järjestelmät tunnistavat nopeusrajoituksen ja säätävät tavoitenopeustason automaattisesti sen mukaisesti, autot eivät aja automatiikalla ylinopeutta.

Taulukko 3. Skenaariot kuvattuna automaatiotasoina ja eri automaatiotasosten ajoneuvojen osuuksina liikennevirrasta

Skenaario	SAE 0+1	SAE 2 (+10v)	SAE 3 (+15–20v)	SAE 4 (+30v)	SAE 5
0 (Vertailukohta)	100 %				
1	80 %	20 %			
2	20 %	80 %			
3		20 %	80 %		
4				100 %	

3 Tekninen kehitys

3.1 Taustaa

Visio automaattisesta liikenteestä on varsin vanha; ensimmäisen vision esitti General Motors vuoden 1939 maailmannäyttelyssä (O'Toole, 2009). Sen jälkeisinä vuosikymmeninä visiota on yritetty toteuttaa käytettävissä olevien keinojen avulla. GM:n visiossa autot ohjautuivat mekaanisesti ”rännissä”, 1950–1970-luvulla autot seurasivat maantiehen asennettua kaapelia ja tutkasovelluksiakin kehitettiin jo 1970-luvulla (Kuva 2).



Kuva 2. 10 GHz ajoneuvotutkan prototyyppi 70-luvun alkupuolelta (Meinel, 2014).

1980-luvulla nähtiin ensimmäiset kameraan perustuvat sovellukset. Eurekan rahoittaman Prometheus-projektin budjetti oli 749 M€ (Williams, 1988). 1990-luvulla US DOT panosti 950 M\$ ”Automated highway”-ohjelmaan, jonka huipennus oli Demo97 tapahtuma (Demo97, 1997). 2000-luvulla DARPA:n (Defense Advanced Research Projects Agency) rahoittamat kolme (2004, 2005 ja 2007) Grand Challenge -kilpailua (Darpa, 2014) herättivät runsaasti huomiota (Kuva 3). Niiden taustalla oli Yhdysvaltojen armeijan tavoite automatisoida armeijan kuljetusajoneuvoja miehistötappioiden välttämiseksi. 2010-luvulla Googlen robottiautoprojekti on nostanut automaattisen ajamisen suuren yleisön tietoisuuteen (Simonite, 2013).



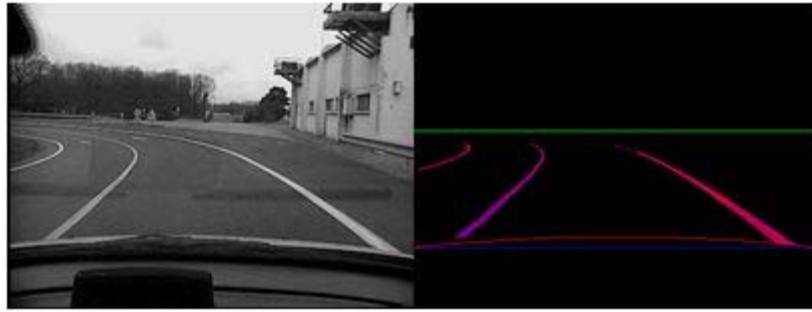
Kuva 3. Darpan Urban Challenge kisaan osallistunut MIT:n robottiajoneuvo (Jur-necka, 2007).

Tekninen kehitys on koko ajan vienyt vision toteutusta lähemmäksi käytäntöä. Suu- rimpia yksittäisiä tekijöitä on autojen digitalisoituminen. Nykyautossa kaikki oh- jaamiseen liittyvät komponentit (ohjaustehostin, jarrujärjestelmä, vaihteisto ja moottori) ovat sekä digitaalisesti ohjattuja että tiedonsiirtoverkolla yhdistettyjä. Au- ton ottaminen täysin tietokonekontrolliin on nykyään teknisesti varsin yksinkertaista ja halpaa verrattuna esimerkiksi 1990-luvun tilanteeseen, jossa auton automatisointi olisi vaatinut useiden erillisten toimilaitteiden asentamista. Autotehtaille järjestel- mien kaupallistaminen on houkuttelevaa – etenkin, kun autoon ei juuri enää pysty kehittämään muita mullistavia uutuuksia.

Jos verrataan nykytilannetta esimerkiksi 1990-lukuun, mm. tietokonekapasiteetin huima lisääntyminen (prosessointiteho, muisti ja tallennuskapasiteetti) sekä koon et- tä tehonkulutuksen lasku lisättynä tiedonsiirtokapasiteetin kasvulla (noin 1000x) an- tavat aina vain parempia mahdollisuuksia toteuttaa järjestelmiä. Ei sovi myöskään unohtaa internetin merkitystä, digitaalisten karttojen kehitystä, langattoman tiedon- siirron antamia mahdollisuuksia, satelliittipaikannusta, anturiteknologian kehitystä jne.

3.2 Automaattisen ajamisen teknologia

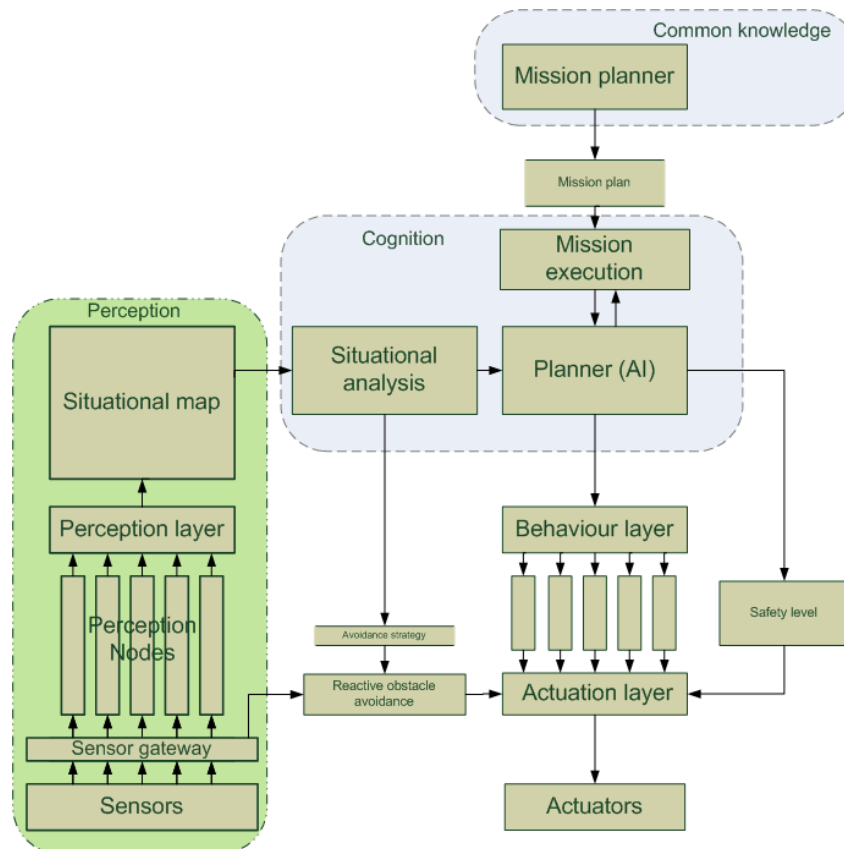
Yksinkertaisimmillaan automaattinen ajaminen vaatii ainoastaan ohjauksen, jolla auto pidetään kaistaviivojen välissä. Ohjaus voidaan toteuttaa havaitsemalla kaista- viivat kameralla ja muodostamalla seurattava trajektori puoleenväliin kaistaviivoja (Kuva 4). Tämä jo toimii, kun muuta liikennettä ole. Käytännössä toinen tarvittava asia on nopeuden säätely muun liikenteen mukaiseksi. Tämä voidaan hoitaa jo nyt yleisesti käytetyllä mukautuvalla vakionopeussäätimellä (Adaptive Cruise Control, ACC), jossa etäisyys edellä kulkevaan ajoneuvoon mitataan tutkalla ja ajonopeus säädetään sellaiseksi, että haluttu etäisyys säilyy. Kaistalla pysymisessä avustava järjestelmä (lane keeping) toimii puolestaan niin kauan, kuin kaistaviivat ovat nä- kyvissä, sen jälkeen kontrolli pitää antaa kuljettajalle.



Kuva 4. Kaistaviivojen haku kameralla.(eFuture, 2013)

3.2.1 Ympäristön havainnointi

Robotisoidun ajoneuvon rakenne on periaatteessa sama kuin ihmisen, aistit ainoastaan korvataan antureilla ja signaalinkäsittelyalgoritmeilla. Näköaisti on ajamisen kannalta ihmisen tärkein aisti, sama pätee robottiin. Anturijärjestelmän tuottamista havainnoista muodostetaan tilannekuva nykyhetkestä robotin lähiympäristössä. Tilannekuvan analyysissä on tärkeintä pystyä ennustamaan tilanteen kehitys lähitulevaisuudessa (tilannetietoisuus = Situation Awareness). Tilannetietoisuus tässä yhteydessä tarkoittaa käsitystä siitä miten muut tienkäyttäjät ja esteet sijoittuvat robottiin nähden ja miten ne tulevat mahdollisesti vaikuttamaan robotin toimintaan. Sen jälkeen toiminta suunnitellaan suhteessa ennalta asetettuihin tavoitteisiin ja arvioituu tilanteen kehittymiseen. Kuva 5 esittää robotin ohjausjärjestelmän periaatekaaviota. Osa äärimmäistä nopeutta vaativista toiminnoista (esim. hätäjarrutus) toiminnoista on reaktiivisia (refleksejä). Toteutustapoja on olemassa muitakin, yhtä yleis-pätevää tapaa ei ole olemassa.



Kuva 5. Kaavio robotisoidun ajoneuvon ohjausjärjestelmän rakenteesta.

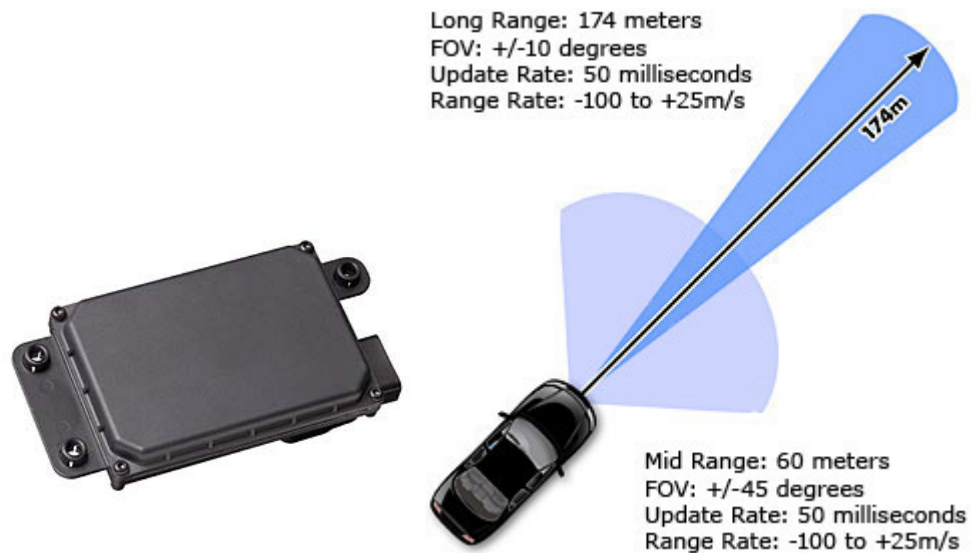
Tilannekuva-analyysissä yksinkertaisin tavoite on määrittää ajoneuvon liikesuunnassa oleva vapaa tila. Maan pinnan tasosta kohoavat kohteet ovat joko dynaamisia (liikkuvia) tai staattisia (paikallaan olevia) esteitä. Dynaamiset esteet ovat liikenteessä yleensä ihmisiä ja autoja. Yksinkertaisin luokittelu voisikin perustua esimerkiksi vain kokoon: leveä on auto, kapea on ihminen. Tämä toimiikin yleensä kohtuullisesti, mutta virhetulkintojen vaara on huomattava. Esimerkiksi hevonen tai hirvi tulkitaan helposti autoksi, jos se on kyljittäin, mutta ihmiseksi, jos sen rintamasaunna on anturiin päin. Sama koskee moottoripyöriä ja mopoja. Paikallaan olevat kohteet voivatkin sitten olla melkein mitä hyvänsä.

Turvallisen ja luotettavan järjestelmän pitää kyetä riittävästi tulkitsemaan ympäristöään, mikä aiheuttaa havaintojärjestelmälle melkoiset suorituskysyvaatimukset. Havaintojen tekemiseen käytettävissä oleva aika on varsin lyhyt, ihminen käsittelee visuaalista informaatiota 10-12 Hz taajuudella (noin 100 ms näyteväli) (Read, 2000). Siinä ajassa ihminen kykenee käsittelemään ja luokittelemaan ympäristöstä saadun yhden kuvan. Kun ihminen pystyy ajamaan autoa liikenteessä tällä näytetaajuudella, voidaan asettaa robotille vähintään sama vaatimus. Ympäristön havainnoinnin toteutukselta vastaavaan suorituskysykyyn pääsemiseksi vaaditaan tällöin hyvin tehokasta rinnakkaislaskentaa, sillä jokainen anturidatasta eroteltava objekti vaatii oman prosessointinsa ("etsi datasta xx").

Ajoneuvojen ympäristön havainnointiin on käytetty eri tekniikkaan perustuvia antureita. Toistaiseksi ei ole kyetty kuitenkaan kehittämään ratkaisua, joka toimisi riittävästi hyvin kaikissa olosuhteissa. Erityisesti vesi- ja lumisade, vahva sumu ja pöly aiheuttavat ongelmia näkyvyyden heiketessä ja signaalinkulun estyessä. Seuraavissa luvuissa on esitetty lyhyt katsaus käytettyihin tekniikoihin.

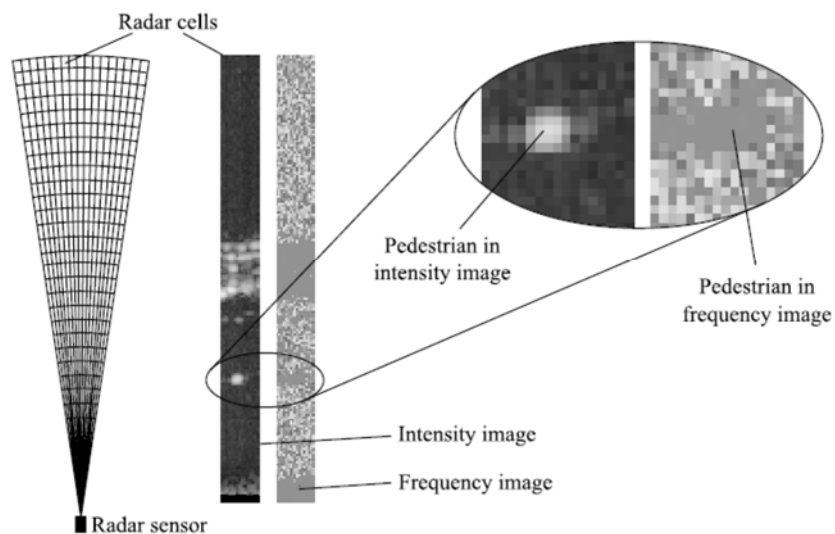
Tutka

Ajoneuvokäyttöön tehdyt tutkat (Kuva 6) toimivat niille varatulla 79 GHz:in taajuusalueella. Myös alempi 24 GHz:in taajuus on ollut käytössä, mutta se ei ole pysyvä taajuus. Tutkan periaate on yksinkertainen. Se lähettää radiotaajuisen pulssin ja kohteista kaikuna palaavan pulssi vastaanotetaan usealla antennilla, jolloin kaiun antaneen kohteen etäisyys ja suunta saadaan selville. Tutka pystyy ilmaisemaan useita kohteita samanaikaisesti ja mittaamaan myös kohteen nopeuden Doppler-ilmiön avulla. Tutkan etuna on, ettei se sisällä liikkuvia osia ja että se toimii myös huonoissa sääoloissa paremmin kuin muut. Myös sen kantama on hyvä aina 250 metriin asti.



Kuva 6. Ajoneuvotutka ja sen soveltaminen ajoneuvoon (Delphi, 2014).

Tutkan rajoituksena on sen huono resoluutio sivusuunnassa, jolloin kohteiden luokittelu on heikkoa (Wolff, 2014). Lähekkäin olevat kohteet sulautuvat yhdeksi. Erotusetäisyys riippuu tutkakeilan leveydestä. Kaiusta tiedetään, että jotain on edessä, mutta ei pystytä sanomaan mitä. Kuva 7 esittää, miten esimerkiksi jalankulkija ”näky” tutkasignaalissa. Signaalin perusteella on vaikea tehdä luotettavaa luokittelua.



Kuva 7. Jalankulkijan näkyminen tutkasignaalissa (Bartsch, 2012).

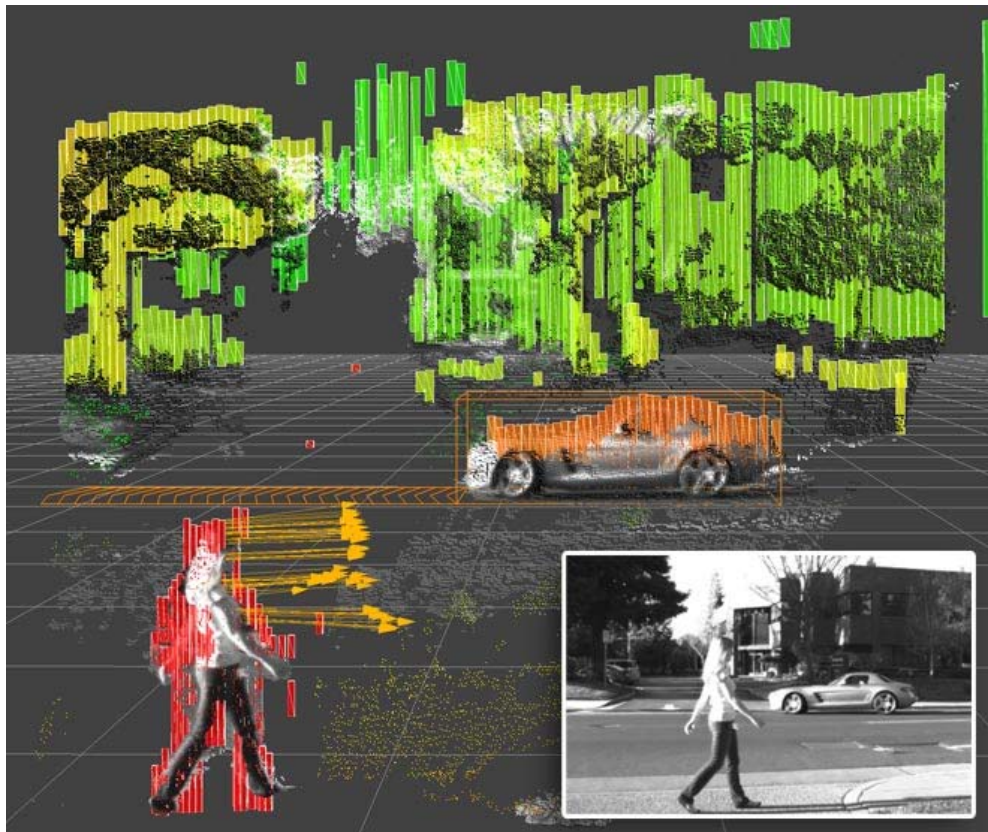
Kamerat

Ajoneuvojen ympäristön havainnoinnissa kamera on suosituin anturi. Kameran etuina ovat edullisuus ja hyvä resoluutio. Yksittäisen kamerasen tuottama kuva puuttuu kuitenkin etäisyystieto, joka voidaan tuottaa käyttämällä kahta kameraa stereokuvan muodostamiseen ja analysoimalla se. Stereokamerapari vaatii kalibroinnin, jotta tiedetään, miten eri etäisyyksillä olevat kohteet sijoittuvat kamerakuviin. Vertailemalla kuvia ja eri kohteiden sijaintia niissä voidaan muodostaa etäisyyskuva ympäristöstä.

Kameran tuottama tieto on itse asiassa ainoastaan kennon pikseleiden mittaaman valon määrä (intensiteetti). Tuntemalla optiikan parametrit voidaan laskea vastavuus reaali maailman ja kuvan välillä. Kuvasta etsitään esimerkiksi jyrkkiä muutoksia intensiteetissä (reunanetsintä), jotka mahdollisesti kuvaavat kiinnostavien kohteiden ääri viivoja. Tämän vuoksi olosuhteet, jotka pienentävät kontrastia, haittaavat merkittävästi kuvan analyysia. Esimerkiksi lumisessa maisemassa ääri viivoja ei juuri näy tai hiekkatie ei löydy aavikolta. Auringon ylivalottamasta kuvasta kontrastit katoavat myös. Varjot taas lisäävät reunoja sinne, missä niitä ei oikeasti ole. Etäisyyskuva auttaakin merkittävästi analyysissä, koska rajausta voidaan tehdä etäisyyden perusteella. Samaan kohteeseen kuuluvat pisteet ovat aika usein yhtä etäällä kamerasta.

Kameratekniikan rajoitus on sen riippuvuus valosta. Kamera ei toimi pimeässä ilman aktiivista valaistusta. Vaihtelevissa olosuhteissa HDR (high dynamic range) -kuvaustekniikka parantaa kuvan laatua paljon. Kameroilta kuitenkin puuttuu ihmisen silmän kyky adaptoitua muuttuvaan valaisuun. Ihmisen näköaistilla on takanaan miljoonien vuosien evoluutio, joten ei ole ihme, ettei kameratekniikalla päästä samaan suorituskykyyn.

Kuva-analyysi vaatii erittäin runsaasti laskentakapasiteettia. Prosessointi ja tiedon siirto ovatkin edelleen pullonkauloja niiden hurjasta tehonnoususta huolimatta. Kuva 8 esittää stereokameralla tehtyä kuva-analyysiä (Vanderbilt, 2012). Jalankulkijan tunnistusta varten järjestelmässä on 1,5 miljoonaa kuvaa erilaisista jalankulkijoista. Ihmissilmällä voi havaita, että taka-alalla olevan ajoneuvon etupyörät on käännetty oikealle, joten auto todennäköisesti kääntyy sinne. Kuvasta tehdyn analyysin perusteella auton kuitenkin on arvioitu jatkavan suoraan eteenpäin (kuvassa auton edessä näkyvä nuolikuvi).



Kuva 8. Näkymän analysointi stereokameralla (Vanderbilt, 2012).

Näkyvän valon lisäksi nykyään on mahdollista suhteellisen edullisesti kuvata myös lämpösäteilyn (far infrared) alueella. Aikaisemmin lämpökamerat vaativat aktiivisen jäähdytyksen, mikä teki niistä kalliita ja epäkäytännöllisiä. Ajoneuvokäyttöön soveltuvat kamerat perustuvat yleensä mikrobolometriaan, joka ei tarvitse jäähdytystä. Niiden ominaisuudet ovat kuitenkin huonompia verrattuna perinteisiin lämpökameroihin. Resoluutio on huonompi (300x200) ja kohina korkeampi. Lämpötilamittaus on suhteellinen. Lämpökamera näkee kuitenkin myös pimeässä (Kuva 9) ja normaalissa sumussa ja on tarpeellinen lisä ympäristön havainnointiin.



Kuva 9. Lämpökameran antama näkymä pimeässä. (Meiners, 2008) Oikealla ajoneuvokäyttöön tehty lämpökamera (Flir, 2014)

Ultraääni

Ultraäänimittauksella, eli yleisemmin kaikuluotauksella, ymmärretään merenkulussa tehtävää merenpohjan kartoitusta, kalastuksessa kalaparvien etsintää, prosessiteollisuudessa säiliöiden pinnankorkeuden mittaamista tai lääketieteen ultraäänimittauksia. Vedessä etenemiseen verrattuna ultraääni vaimentuu ilmassa hyvin nopeasti. Myös äänennopeus on huomattavasti pienempi. Etäisyysmittaus perustuu tyypillisesti 40–180 kHz:n ultraäänipulssin heijastumisajan mittaukseen esteiden pinnasta. Äänennopeus ilmassa on noin 320 m/s, joten mittaus on hidas, ja vaimenemisen vuoksi myös mittausetäisyys on lyhyt, alle 10 metriä. Ultraäänien etenemisnopeuteen vaikuttavat mm. kosteus ja lämpötila. Käyttämällä kapeakeilaista lähetintä parannetaan sensorin suuntatarkkuutta, kasvatetaan etäisyyttä ja vähennetään ympäristön aiheuttamaa kohinaa vastaanotossa.

Sensorin etuna on sen äärimmäisen halpa hinta. Lyhyen kantaman takia ultraäänisensoreita käytetään pääasiassa ajoneuvon lähialueen valvontaan (pysäköintitutka) sekä esimerkiksi pysäköintiavustimissa mittaamaan vapaata tilaa.

Lasertutka

Lasertutkan (Kuva 11) periaate on sama kuin perinteisenkin tutkan, paitsi että se lähettää lyhyen laservalopulssin (5 ns) ja mittaa sen heijastumisen kulkuaikaa. Mittaus on hyvin nopea ja antaa tarkan etäisyydestiedon. Ajoneuvoissa käytetyt anturit sisältävät pyörivän peilin, joka suuntaa säteen vaakatasossa viuhkaksi. Lasertutkalla saavutetaankin hyvä kulmaresoluutio ($\sim 0,125^\circ$). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että halkaisijaltaan 5 cm tolppaa ei välttämättä enää havaita yli 25 metrin etäisyydeltä. Mittausetäisyys on enimmillään noin 250 m, mutta käytännössä se jää pienemmäksi.

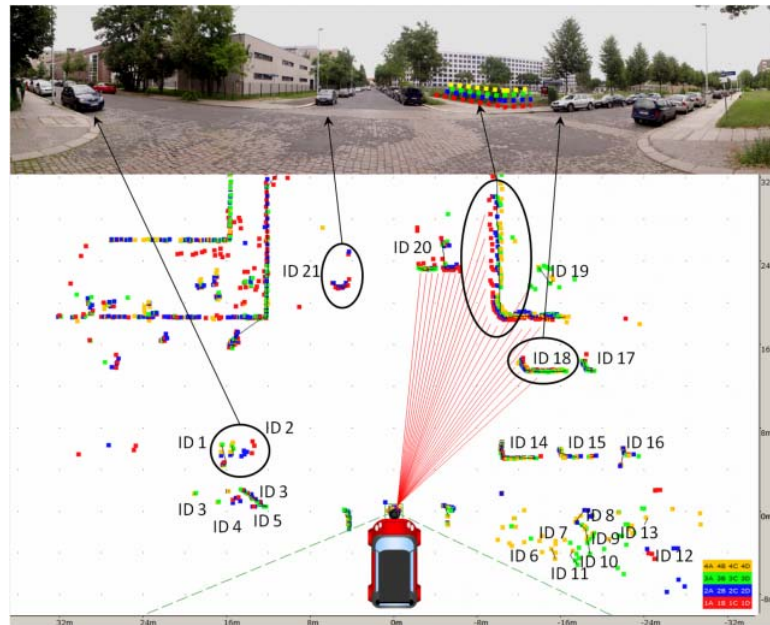
Antureihin on lisätty pyyhkäisytaisoja pystysuuntaisen resoluution parantamiseksi. Tasoja voi olla esimerkiksi 4 tai 8 (Ibeo/Sick) tai 16/32/64 (Velodyne, Kuva 12). Kuva 11 esittää lasertutkan tuottamaa pistepilveä ympäristöstään neljällä tasolla. Kuva 12 esittää pistepilveä, joka on muodostettu 64 juovalla. Ihmissilmällä kuvasta

tunnistaa helposti puut, autot ja rakennukset. Tietokone ei kuitenkaan pysty käsittelemään kuin yhtä pistettä kerrallaan, jolloin hahmontunnistus vaikeutuu merkittävästi.

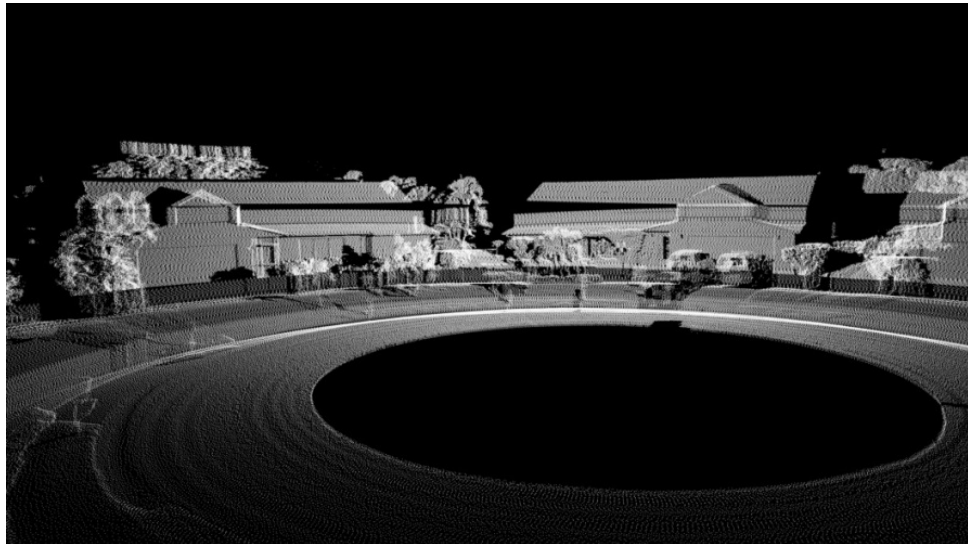
Lasertutka sisältää hienomekaniikkaa ja on kallis valmistaa. Googlen käyttämä Velodynen H-64 -anturin hinta on noin 70 000 €. Työtä tehdään kuitenkin hinnan painamiseksi alaspäin. Esimerkiksi EU:n rahoittamassa Minifaros-hankkeessa (Minifaros, 2013) on kehitelty mikromekaaniseen peiliin perustuvaa uudentyypistä anturia. Anturin valmistuskustannuksiksi on arvioitu noin 50 €. Toistaiseksi tunnistusetaisyys on vielä ajoneuvosovelluksiin liian lyhyt, vain noin 30 m.



Kuva 10. Minifaros-lasertutkan prototyyppi (Minifaros, 2013)



Kuva 11. Lasertutkan tuottama pistepilvi (HTW 2014)



Kuva 12. 64 juovalla muodostettu pistepilvi (Velodyne, 2014).

3.2.2 Paikannus

Vaikka satelliittipaikannusjärjestelmillä on mahdollista päästä jopa millimetrin tarkkuuksiin, se ei ole mahdollista aina ja joka paikassa. Suurin ongelma ei olekaan paikannuksen tarkkuus vaan sen saatavuus. Satelliittipaikannus ei ole 100-prosenttisesti luotettava eikä se luultavasti ole sitä koskaan sitä.

Tarkkuus paranee tulevaisuudessa järjestelmien kehittymisen myötä (Gakstatter, 2015). GPS-järjestelmän uudistus on menossa (GPS 2011) vuosi. Suurin parannus on taajuuksien lisääminen myös siviilivastaanottimien käyttöön. Sotilaskäyttöön tehdyissä vastaanottimissa on pitkään ollut mahdollista käyttää kahta taajuutta, millä on saatu eliminointia suurin osa ilmakehän aiheuttamista virheistä. Useamman taajuuden käyttäminen mahdollistaa saman myös siviilivastaanottimissa, tosin tarkkuus jää hieman huonommaksi. Myös lähetystehoja ollaan lisäämässä. Glonass on toimintakuntoinen ja Galileo pikkuhiljaa toteutumassa. Myös kiinalainen BeiDou on tulossa käyttöön.

Käytännössä tämä näkyy siinä, että taivaalla on yhtä aikaa käytettävissä 30–40 satelliittia entisen alle kymmenen sijasta (Mattos, 2014). Kaiken kaikkiaan maapalloa kiertää jatkossa yli 100 paikannussatelliittia. GPS/Glonass/Galileo/BeiDou-yhdistelmät tuovat parannuksen, jonka suuruutta on vaikea vielä arvioida. Vuonna 2025 satelliittipaikannuksen normaalitarkkuus on luultavasti jo alle metrin, mutta paikannus ei edelleenkään toimi esimerkiksi pysäköintiluolissa.

GPS vastaanottimen avustaminen matkapuhelinverkon kautta on poistanut satelliittipaikannuksen käynnistysviiveen (12 min) jo jonkin aikaa sitten. Signaalin häirintä ja väärentäminen ovat suuri ongelma tulevaisuudessa. Toisaalta usean järjestelmän käyttö vähentää häirinnän riskiä tai ainakin vaikeuttaa häirintää teknisesti.

Satelliittipaikannuksen katkoksia voidaan jonkin verran kompensoida käyttämällä inertiamittausta (IMU, inertial measurement unit) ja odometriaa (auton pyöristä mitattu matka ja nopeus). Tyypillisesti IMU-antureissa on 3- kiihtyvyyssanturi, 3D-gyroskooppi (kiertoliikkeen mittausta) ja 3D-kompassi. Halpojen inertiamittausantureiden laatu ei kuitenkaan ole kovin hyvä, eikä niitä voi käyttää paikantamiseen kuin pienen hetken kerrallaan. Toisaalta hyvät anturit ovat suurikokoisia ja erittäin kalliita. Karkea nyrkkisääntö voisi olla seuraavanlainen: kun tarkkuus paranee de-

kadilla, hinta ja koko nousevat myös dekadilla. Parhaimmat anturit maksavat yli 50 000 €, halvimmat alle 50 €. Inertia-anturi on kuitenkin välttämätön korin asennon mittaamiseksi. Korin asento vaikuttaa ympäristönhavainnointianturien mittaustuloksiin, koska ne on kiinnitetty ajoneuvon koriin.

Paikannukseen voidaan käyttää myös maamerkkejä, joko luonnollisia tai keinotekoisia. Näistä jälkimmäiset ovat esimerkiksi heijastimia tai maahan upotettuja transpondereita tai vastaavia. Niitä käytetään yleensä vain rajatulla alueella, suuremmilla alueilla niiden käyttö ei kustannussyistä ole tarkoituksenmukaista.

Ihminen käyttää navigoidessa osin luonnollisia maamerkkejä, osin keinotekoisia esimerkiksi tienviittoja. Esimerkiksi ”Käänny kirkon jälkeen vasemmalle” -ohjeessa kirkko on luonnollinen maamerkki. Maamerkinä voidaan kuitenkin käyttää mitä hyvänsä objektia, joka pysyy paikallaan ja on havaittavissa joko ihmisen aistein tai robotin antureilla. Sen pitäisi myös olla tunnistettavissa ja paikannettavissa. Maamerkkien avulla voidaan ylläpitää globaalia paikkaa (= ”gps-koordinaatteja”), mutta tärkeämpää on ylläpitää suhteellinen paikka ympäristöön nähden. Ei siis lähdetä kääntymään risteyksessä sokeasti koordinaattien perusteella, vaan ensin havaitaan risteys, asemoidaan ajoneuvo suhteessa ympäristöön ja tehdään käänös sen perusteella. Liikenneympäristössä maamerkkejä voivat olla katukiveykset, suojatiet, liikennemerkkit ja -valot, ajoratamaalaukset ja kaistaviivat, katuvalot, risteykset, talojen kulmat jne.

Paikannukselta vaadittavaa tarkkuutta voidaan arvioida vertailemalla ajokaistojen ja ajoneuvojen leveyttä. Pelivara on (kaistanleveys – auton leveys) / 2. Sen verran ajoneuvon sijainti saa erota kaistan keskilinjasta (Taulukko 4). Virhemarginaali on suurin sallittu kokonaisvirhe. Paikannusvirheen lisäksi se sisältää liikeohjauksen virheet ja karttavirheen.

Taulukko 4. Vaadittava paikannustarkkuus sivusuunnassa eri tieluokilla ja eri kokoisilla autoilla.

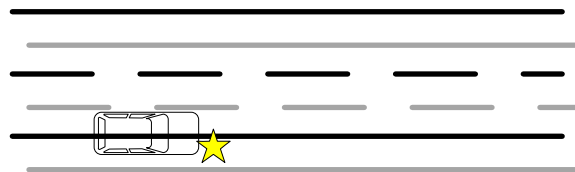
Tieluokka	Kaistan leveys, m	Auton leveys, m 1,80	Auton leveys, m 2,50
Valtatie	4,50	1,35	1,00
Kantatie	3,50	1,10	0,50
Seututie	3,25	0,70	0,38

3.2.3 Kartat

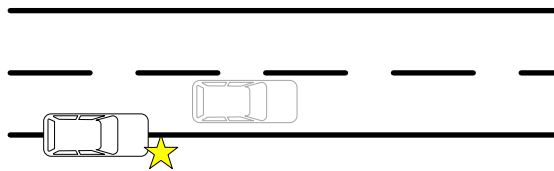
Digitaalisissa kartta-aineistoissa on tapahtunut merkittävä murros viime vuosina. Ensinnäkin niiden saatavuus on huomattavasti parantunut, ja toisaalta myös hinta on romahtanut. Yhdysvalloissa julkisella rahoituksella kerätty aineisto on ollut pitkään ilmaiseksi käytettävissä ja sama trendi on jalkautunut myös muualle maailmaan. Googlen vaikutus on ollut merkittävä maailmanlaajuisen kartaston luomisessa ja tuomisessa yleisesti saataville. Autonomisen ajamisen kannalta merkittävämpiä tekijöitä kartta-aineistossa ovat aineiston virheettömyys, sijaintitarkkuus ja ajantasaisuus (päivitysnopeus).

Autonomiselle ajoneuvolle pitää ensin luoda globaali reittisuunnitelma, joka kuvaa reitin mahdollisimman yksityiskohtaisesti. Koordinaattipisteiden lisäksi pitää määrittellä ajonopeudet, kaistanvaihdot, risteykset, suojatiet, liikennevalot, risteyksien ajojärjestykset ja mahdollisesti paikannuksen apuna käytettävät maamerkit. Reittikuvauksessa pitää siis antaa ohjeet, miten reitti pitää ajaa. Käytettävän aineiston virheet johtavat luonnollisesti virheelliseen reittisuunnitelmaan. Kuljettaja voi havaita navigaattorin antaman ajokelvottoman reitin melko helposti, mutta tietokoneen on vaikea havaita suunnitelman virheitä. Sen vuoksi ajamista ei voida jättää pelkästään satelliittipaikannuksen varaan. Jos suunnitelma on väärin, tarkinkaan paikannus ei enää siinä tilanteessa pelasta. Esimerkiksi jos tielinjan sijainnissa olisi 5 metrin virhe, auto ajaisi ulos tieltä. Ei myöskään voida lähteä siitä, että kartta-aineisto olisi 100-prosenttisesti virheetön ja mittatarkka, eikä myöskään siitä, että (satelliitti)paikannus olisi 100-prosenttisesti luotettava ja tarkka. Lisäksi autoa ei saa seuraamaan suunniteltua rataa absoluuttisen tarkasti.

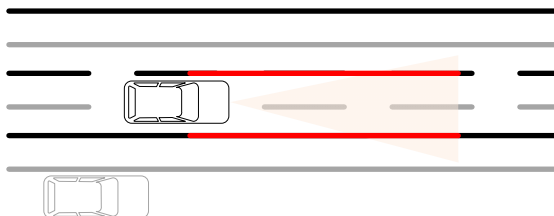
Kuva 13 havainnollistaa virheiden vaikutusta. Karttavirheessä (A) tielinja on todellisuudessa eri paikassa (musta tie), kuin se on ilmaistu kartassa (harmaa tie). Paikannus on virheetön. Auto ajautuu tieltä ulos yrittäessään seurata virheellistä tielinjaa. Paikannusvirheessä (B) auton todellinen sijainti (musta auto) on eri kuin mitattu (harmaa auto). Auto ajautuu tieltä ulos, kun ohjausjärjestelmä yrittää ohjata sen oikealle reitille. Tilanteessa C) sekä karttavirhe että paikannusvirhe on kompensoitu seuraamalla kaistaviivoja ympäristöhavainnoinnilla. Ympäristöhavainnointia tarvitaan aina estämään pahemmat seuraukset.



A) Karttavirhe



B) Paikannusvirhe



C) Paikannusvirhe ja karttavirhe.

Korjaus ympäristöhavainnoinnilla

Kuva 13. Paikannus- ja karttavirheen vaikutus ja niiden kompensointi ympäristöhavainnoinnilla.

Aineistojen luominen ajamalla tiestö läpi johtaa väkisin hitaaseen päivitysväliin. Tieverkon muutokset ja tarvittavat päivityksethän ovat selvillä heti, kun muutoksen suunnitelmat ja työpiirustukset ovat valmiita. Sen jälkeen muutos pitää saada päivitettyä aineistoon välittömästi käyttöönoton jälkeen. Navigoinnin apuna tarvitaan maamerkkejä, jotka ovat ajoneuvon antureilla havaittavissa. Koska havaintojärjestelmät lienevät tulevaisuudessa automerkkikohtaisia, voi olla pakko ajaa autonomisille ajoneuvoille sallitut reitit läpi, jotta maamerkkiaineisto saadaan generoitua.

Nykyisissä aineistoissa on muitakin ongelmia. Osoitteita ei ole linkitetty kiinteistöjen sisäänajoväyliin, ainoastaan kiinteistön sijaintiin. Tilanteen korjaaminen edellyttää osoitejärjestelmän muutosta. Esimerkiksi Digiroad-aineistolle luvattu tarkkuus ± 3 metriä ei ole riittävä autonomiseen ajamiseen. Kiinteät reitit, kuten joukkoliikenteen reittitiedot, voi kartoittaa erikseen, jolloin on mahdollista päästä virheistä eroon ja saada päivitysnopeus riittäväksi. Koordinaatistomuunnoksissa pitää myös olla tarkkana, sillä syntyvät virheet voivat olla satoja metrejä.

Rakennetusta ympäristöstä on jo olemassa mittatarkat kartat (kantakartat). Ongelma on tietojen siirtäminen navigointikarttoihin. Tulevaisuudessa voi teoriassa olla mahdollista ajaa tiestö läpi 3D-mallissa simuloiduilla antureilla ja luoda navigoinnin tarvitsema maamerkkiaineisto suhteellisen vähällä vaivalla.

3.2.4 Verkottunut ajoneuvo

Ajoneuvo on verkottunut, kun se on langattomassa tietoliikenneyhteydessä infrastruktuuriin, toisiin ajoneuvoihin ja laitteisiin (V2X). Käytettävä teknologiat vaihtelevat matkapuhelinverkko-yhteydestä (3G/LTE) lyhyen kantaman radioon, joka pohjautuu IEEE 802.11p -kommunikointistandardiin. Yhdysvalloissa IEEE 802.11p kutsutaan nimellä WAVE (Wireless Access for Vehicular Environments), kun taas Euroopassa sen standardoinnista on vastannut ETSI (European Telecommunications Standards Institute), joka on nimennyt sen ITS-G5 -standardiksi. Ainoa ero on sallitussa taajuusalueessa, Yhdysvalloissa taajuusalue on 5,850–5,925 GHz ja Euroopassa 5.860–5.920 GHz. Järjestelmät ovat kuitenkin keskenään yhteensopivia.

ITS-G5 soveltuu parhaiten turvallisuuskriittisiin sovelluksiin, jotka vaativat hyvin nopeaa vastetta, mutta siirrettävän datan määrä on pieni.

Automaattinen ja autonominen ajoneuvo tarvitsee vähintään mobiiliverkkoyhteyden ainakin ohjelmistojen, karttojen, ruuhkatietojen, tietöiden ja kelitietojen päivitykseen. Autonomiset tason 5 järjestelmät operoivat tuskin ilman etävalvontaa, jonka kautta ajoneuvon voi ongelmatilanteissa ottaa hallintaan. Ne tarvitsevat myös tukiorganisaation, joka huolehtii ajoneuvojen siivouksesta, tankkaamisesta, huoltamisesta ja rikkoutuneiden ajoneuvojen noutamisesta korjaamolle tai romuttamisesta sekä uusien hankkimisesta.

ITS-G5 (tai vastaava muu teknologia) on varsin hyödyllinen robottiajoneuvoille. Sen avulla voidaan parantaa erityisesti tilannetietoisuutta. Sen sijaan, että ympäristönhavainnoinnilla yritetään arvailla lähialueen ajoneuvoja ja niiden aikomuksia, ainakin ne ajoneuvot, jotka ovat ilmaisseet läsnäolonsa, sijaintinsa ja nopeutensa saadaan luokiteltua tilannekuvaan melko luotettavasti. Se jättää enemmän aikaa analysointiprosessille luokitella muita kohteita. Sen lisäksi autonominen ajoneuvo joka seuraa reittisuunnitelmaa, voi tarvittaessa antaa sen hetkisen sijaintinsa lisäksi myös tarkan ennusteen lähitulevaisuuden ajolinjasta ja nopeudesta.

3.2.5 Vaatimukset Suomen näkökulmasta

On selviö, että Suomessa vallitsevat erityisolosuhteet hankaloittavat automaattista ajamista. Teiden liukkaus on suuri ongelma, sillä automaattisten autojen tekniikassa tuskin on otettu huomioon sitä, että tien pinnan kitka voi olla lähellä nollaa, etenkin kun tien liukkauden reaaliaikainen mittaaminen ajoneuvossa on osoittautunut hyvin haastavaksi. Liukkaalla tiellä jarrutus on aloitettava paljon aikaisemmin kuin kesäkelillä. Tiedon liukkaasta risteyksestä pitäisi tulla osittain taustajärjestelmästä, sillä sen pitää olla käytettävissä ennen kuin kitka pienenee renkaiden alta. Talvisäällä tiemerkinnät ja liikennemerkit ovat myös osin näkymättömissä (ks. Kuva 14). Automaattiajaminen rajoittunee näin ainakin aluksi enimmäkseen kesäkuukausiin. Tason 5 autonomisten ajoneuvojen kaupallistumista ja ilmestymistä liikenteeseen joudutaan odottamaan vielä pitkään. Toisaalta automaattisten ja autonomisten ajoneuvojen kehittämistä ei voida tehdä ainoastaan laboratoriossa, joten kokeiluja tieliikenteessä tarvitaan välttämättä.



Kuva 14. Suomen talviset olosuhteet voivat osoittautua haastaviksi automaattiajamiselle.

4 Kuljettajan käyttäytyminen ja automaattiajamisen hyväksyntä

4.1 Johdanto

Tässä luvussa automaattiajamisen vaikutuksia tarkastellaan kuljettajan näkökulmasta. Automaation lisääntyessä kuljettajan päätöksenteko auton ajamisessa muuttuu – toimintoja tehdään uudella tavalla, päätöksentekoon tulee uusia vaihtoehtoja ja osa toiminnoista siirtyy automaation hoidettavaksi. Tätä muutosta tarkastellaan luvussa 4.2. Toisaalta muutoksia automaation suuntaan ei voida toteuttaa ottamatta huomioon kuljettajien ja muidenkin liikkujien suhtautumista automatisoituvaan tieliikenteeseen. Kuljettajien käsityksiä automaattiajamisesta tarkastellaan luvussa 4.3.

4.2 Kuljettajan käyttäytyminen

4.2.1 Kuljettajan tehtävät ja tarkastelukehikko

Aluksi määritellään ja kuvataan kuljettajan käyttäytymisen piirteet, joita tarkastellaan automaation eri skenaarioissa. Tarkasteltavat kohteet valitaan tieliikenteen, lentoliikenteen sekä yleisen psykologian käsitteitä hyödyntäen. Muodostetaan tarkastelukehikko skenaariokohtaista tarkastelua varten. Näkökulmana kuljettajan tehtävien tarkastelussa on ajamisessa tarvittavan informaation havaitseminen ja käyttö.

Päätöksenteon tasot

Kuljettajan perustehtävä on kuljettajaa ajoneuvo turvallisesti lähtöpaikasta määräpaikkaan. Kuljettajan tehtävää jäsennetään tarkastelemalla erikseen strategista, taktista ja operationaalista päätöksentekoa (mm. Michon 1985, Molen ja Botticher 1987). Strategisen tason päätökset vaikuttavat liikennejärjestelmässä laajasti. Esimerkiksi automaatio voi lisätä henkilöauton käyttöä, millä on vaikutuksia useisiin liikennejärjestelmän tavoitteisiin. Liikennejärjestelmävaikutuksia käsitellään kuitenkin tarkemmin luvussa 6, ja pääpaino tässä luvussa on taktisen ja operationaalisen tason päätöksenteossa.

Taktinen taso liittyy erityisesti vuorovaikutukseen toisten tienkäyttäjien ja ympäristön kanssa (toisten tienkäyttäjien ja ajoneuvojen havainnointi, eri osapuolten toiminnan arviointi sekä liikennetilanteiden ennakoointi jne.). Tämän tason tehtävistä tarkasteluun valitaan *reitin valinta* sekä *vuorovaikutus toisten liikkujien kanssa*. Älyliikenteen vaikutusten arvioinnissa on todettu olevan tärkeää tarkastella järjestelmien vaikutuksia sekä toisiin käyttäjiin että sellaisiin käyttäjiin, joilla järjestelmää ei ole (esim. Kulmala 2010, Draskóczy ym. 1998). Tarkastelussa otetaan tämän perusteella huomioon vuorovaikutukset toisiin automaattiautoihin, ei-automaattisiin autoihin sekä pyöräilijöihin ja jalankulkijoihin. Vuorovaikutuksen osapuolina automaattiautojen yhteydessä on myös erityisesti mainittu lapset tai muut automaattiautoille mahdollisesti haastavat ja yllättävät kohteet, kuten tielle juokseva eläin tai yllättäen avautuva pysäköidyn auton ovi (Shladover 2014).

Operationaalisen tason toimintoja ovat ajoneuvon pitäminen ajoradalla tai kaistalla ja ajoneuvon hallintalaitteiden käsittely (esim. Ranney 1994). Operationaalisen tason tehtävistä tarkastellaan *nopeuden*, *ajoetäisyyden* ja *ajolinjan valintaa*. Osin nämä tehtävät ovat myös taktisen tason ennakoivia päätöksiä.

Taktisen ja operationaalisen tason toiminta perustuu tietoon välittömästä ympäristöstä (Norman ja Bobrow 1975). Suurin osa taktisen tason informaatiosta saadaan näköaistin kautta (Luoma 1984, Sivak 1996). Kuljettajan riski kuormittua liikaa on suuri tällä tasolla. Tavallisessa taajama-ajossa (joskus myös maanteillä, ja etenkin risteyksissä) kuljettajan on havaittava ja käsiteltävä valtava määrä informaatiota (esim. Luoma 1984). Mukautuva vakionopeudensäädin (ACC), törmäyksenestovaroitin (Forward Collision Warning), älykäs nopeudensäätö (ISA) ja kaistalla pysymisen tuki (Lane Keeping Support) ovat älykkäitä sovelluksia ja automaation osajärjestelmiä, joiden tavoitteena on hoitaa osa kuljettajan tehtävistä ja siten vähentää kuljettajan kuormittumista sekä parantaa turvallisuutta ja osittain myös ajamisen mukavuutta.

Strategisen tason matkapäätökset (matkan suunnittelu, kulkutavan valinta, reitin suunnittelu, matkan ajankohdan valinta, matka-ajan ja suorituksen minimointi) ovat erityisesti merkittäviä liikennejärjestelmätasoisille vaikutuksille (Luku 6). Vaikuttaa siltä, että automaation lisääminen siirtää joitain nykyisin matkan aikaisia kuljettajan toimia ennen matkaa tehtäviksi. Esimerkiksi ilman älykästä nopeudensäätöä (ISA) tai ACC:tä kuljettaja säättää nopeutta ja ajoetäisyyttä ajon aikana jatkuvasti, mutta järjestelmien myötä hän mahdollisesti päättää ennen ajoa, minkälaisella etäisyydellä haluaa ajaa (joko auton hankkiessaan tai tekemällä myöhemmin säätöjä mahdollisten rajojen sisällä). On myös mahdollista, että reitinvalintaa tehdään aikaisempaa enemmän ennen matkaa – ohjelmoidaan auton järjestelmään lähtöpaikka, määränpää ja haluttu reitti tai reitin ominaisuudet.

Michonin (1985) teorian mukaisesti päätöksentekotasot ovat hierarkkisessa vuorovaikutussuhteessa toisiinsa, ja esimerkiksi kuljettajalle muodostuvien ennakkointien kannalta on merkityksellistä, minkälaisen reitin hän on valinnut. Kuljettajan ennakkoinnit ovat merkittäviä kuljettajan toiminnan, havaintojen ja päätöksenteon kannalta.

Auton kuljettajan tiedon hankinta ja käyttö

Ihmisen tiedon käsittely sisältää sekä käsitteellistä (conceptually driven), ylhäältä alaspäin (top-down) tapahtuvaa toimintaa että alhaalta ylöspäin (bottom-up) yksittäisistä ärsykkeistä tai kohteista lähtöisin olevaa (stimuli-driven) toimintaa (esim. Eysenck ja Keane 1990). Havainto ja tulkinta syntyvät näiden kahden prosessin vuorovaikutuksessa. Myös kuljettajien on todettu tekevän enemmän virheitä visuaalisen haun tehtävässä silloin, kun liikenteen tilanne on yllättävä verrattuna ennalta odotettavissa olevaan tilanteeseen (esim. Young ja Regan 2013). Hyvän kontekstietoisuuden saavuttamiseksi kuljettajien olisi tärkeä tietää ja ymmärtää liikenteen älykkäiden järjestelmien toimintaperiaatteet ja osata siten ennalta varautua järjestelmän tilan muutoksiin. On myös havaittu, että ihminen on operaattorina luonteeltaan konservatiivinen ja muuttaa alkuperäistä hypoteesiaan tilanteesta uuden todistusaineiston perusteella vain vähän (Edwards ym. 1965, Edwards 1968, Wickens 1992).

Kuljettajan tekemä havainto (1), tulkinta (2) ja toiminta (3) tapahtuvat aina liikennetilanteeseen ja asiayhteyteen liittyneinä, ja jokaisessa kolmessa vaiheessa tarvitaan ihmisen rajallista tarkkaavaisuusresurssia (Wickens 1992). Kuljettajankäyttäytymisessä on tehty ero automaattisen ja kontrolloidun käyttäytymisen välillä (Ranney 1994). Ajan ja kokemuksen myötä monet ajamisen toiminnot automatisoituvat ihmillisenä toimintana myös ilman teknisiä järjestelmiä. Pitkälle automatisoitunutta ajamista pidetään yleensä kokeneen kuljettajan tehokkaana toimintana. Tutuissa

paikoissa ja tilanteissa kokenut kuljettaja voi käyttää taitoihin perustuvia automaattisia toimintoja ja tiedonkäsittely kuormittaa kuljettajaa vähemmän. Uudet ja yllättävät tilanteet voivat keskeyttää automaattisen toiminnan ja tehdä tietoista kontrollia ja tarkkaavaisuusresursseja enemmän vaativan toiminnan välttämättömäksi (Ranney 1994, Summala 1988). Älyliikenteen järjestelmät ja niiden tarjoama informaatio voi olla joissain tilanteissa tekijä, joka muuttaa toiminnan luonteen automaattisesta kontrolloituun.

Autojen automaation lisääntyessä kontrolli ajamisesta siirtyy osittain kuljettajalta ajoneuvolle. Automaatio hoitaa osan tehtävistä, mutta kuljettajalla säilyy silti joitain tehtäviä. Kuljettajan toiminnassa tapahtuu suuri muutos, kun kuljettajat siirtyvät nykyisestä totutusta ja osin rutiininomaisesta ajamisesta automaattisten ajoneuvojen kuljettajiksi. Tämän lisäksi on mahdollisesti myös varauduttava ajotehtävän siirtymisiin; automaatio hoitaa ajamisen osan aikaa, kuljettaja osan aikaa. Järjestelmien suunnittelussa ja käyttöönnotossa on kyettävä ennustamaan ja ottamaan huomioon muutosten vaikutuksia. Esimerkiksi kuljettajien täytyy ennalta tietää automaattiauton toimintaperiaatteet: missä tilanteissa kuljettajaa tarvitaan, miten voi tunnistaa järjestelmän kulloisenkin tilan, miten eri toimintavaiheita voi ennakoida.

Liikennetutkimuksessa on erityisesti kiinnitetty huomiota toimenpiteiden pitkäaikaisvaikutuksiin ja *käyttäytymisen mukautumiseen* (behavioural adaptation; Rudin-Brown ja Jamson 2013). Liikenteen turvallisuustoimenpiteiden pitkäaikaisvaikutusten kannalta on merkityksellistä, mikä on kuljettajan mahdollisuus havaita riski (Wilde 1994) tai kyky havaita omaa vuorovaikutustaan järjestelmässä ja tapahtumien vaarallisuutta (McKenna 1985). Kuljettajilla saattaa olla taipumusta kompensoida saavutettua riskin vähenemää esimerkiksi kasvattamalla ajonopeutta. Tyypillinen älyliikennejärjestelmiin liitetty käyttäytymisen mukautumisen muoto on vastuun liiallinen delegointi järjestelmälle (Wilmink ym. 2008, Kulmala ym. 2008), minkä on arvioitu olevan ongelma erityisesti osittaisen automaation aikana (esimerkiksi Anderson 2014).

Tilannetietoisuus ja sisäinen malli

Teollisuudesta on runsaasti kokemusta ihmisen toiminnan korvaamisesta automaattisilla järjestelmillä. Osittainen automaatio muuttaa ratkaisevasti ihmisen tehtävää koneen ohjaamisesta järjestelmän toiminnan monitorointiin ja päätöksentekoon kulloinkin sopivista toimista. Teollisuudessa on jouduttu uusiin ja jopa laajeneviin ongelmiin, kun ihmisen roolia prosessissa on korvattu automaatiolla (esim. Bainbridge 1983). Toimintaympäristö teollisessa automaatiossa ja teollisuuden operaattorin työssä on kuitenkin monessa suhteessa erilainen kuin tieliikenteessä. Esimerkiksi liikenteessä kyse ei niinkään ole järjestäytyneestä työtoiminnasta vaan vaihtelevissa olosuhteissa ja konteksteissa tapahtuvasta vapaa-ajan toiminnasta, huolimatta siitä, että ajaminen voi myös olla työtä ja toiminta on lailla säädeltyä.

Automaation myötä kuljettajan tehtävään tulee operaattorin toiminnan piirteitä. Sen sijaan, että kuljettaja ajaa aktiivisesti, hän seuraa, että järjestelmä toimii oikein, ja tekee tarvittavat päätökset sekä tarvittaessa korjaavat toimet. Mahdollisesti kuljettaja siirtyy ajamaan autoa aktiivisesti. Siirtyessään ajamaan hänellä täytyy olla hyvä käsitys tilanteeseen vaikuttavista kolmesta asiasta: ajoneuvon tilasta, ympäristöstä ja omasta tilastaan sekä näiden tekijöiden keskinäisistä vuorovaikutussuhteista (esim. Saikh ja Krishnan 2012, Häkkinen ja Luoma 1990).

Tilannetietoisuuden käsite (situation awareness) jäsentää tarkemmin ihmisen tiedonkäsittelyä dynaamisessa ja monimutkaisessa järjestelmässä. Endsleyn (1995) mukaan tilannetietoisuuden muodostumisessa on kolme toisiaan seuraavaa tasoa: (1) yksityiskohtien havaitseminen tilanteessa (perception of elements), (2) tilanteen ymmärtäminen (comprehension) ja (3) tilan ennakointi (projection of future status). Endsleyn teoriassa tilannetietoisuus sijoittuu ennen päätöksentekoa ja toimintaa ja liittyy siten juuri havaitsemiseen ja tiedon tulkintaan.

Hyvän tilannetietoisuuden ajatellaan olevan tärkeä tilanteeseen sopivan *sisäisen mallin* (mental model) valikoitumiseksi (Endsley 1995). Tilanteeseen sopiva sisäinen malli tukee tehokkaan ja osuvan ongelmanratkaisu- ja toimintastrategian valintaa, selvittää tilanteen syy-seuraussuhteita ja auttaa toimenpiteiden vaikutusten ennakoinnissa. Sisäiset mallit ovat tilannesidonnaisia ja yleensä puutteellisia. Automaattiajamisen sisäinen malli voisi olla kuljettajan käsitys tai tietorakenteet siitä, mitä auto voi tehdä ja tekee jossain tietyssä tilanteessa, ymmärrys toiminnallisuudesta ja rajoituksista (Foley 2014). Etenkin automaattiajamisen alkuvaiheessa voidaan olettaa, että mallit ovat vielä kehittymättömiä. Ajantasainen palaute ja mahdollisuus automaattiauton ja kuljettajan väliseen kommunikointiin tukee mallien kehittymistä. Myös kokemuksen kertyminen järjestelmien käytöstä näyttäisi parantavan reagoimista äkillisissä tilanteissa (esim. Larsson ym. 2014).

Wickensin (2008) mukaan Endsleyn (1995) esittämä tilannetietoisuuden käsite sijoittuu yleisen kognitiivisen psykologian sekä ihmisen ja toimintajärjestelmän vuorovaikutusten tutkimisen ja kehittämisen (human factors research) välimaastoon. Käsitteen hyödyllisyydestä on käyty keskustelua (mm. mitä se tuo lisää ajatukseen tarkkaavaisuuden allokoinnista ja mikä on sen suhde pitkäkestoiseen muistiin). Wickens (2008) kuitenkin arvioi käsitteen olevan edelleen elinvoimainen automaation sovellusten lisääntyessä eri toimialoilla.

Kuormittavuus (work load) ei viittaa tässä yhteydessä fyysiseen kuormittavuuteen, vaan sillä tarkoitetaan tehtävän vaatimusten ja henkilön kyvykkyyden (capabilities) välistä vuorovaikutusta jossain tietyssä ajallisesti ja paikallisesti määritellyssä tilanteessa (Stanton ja Young 2000, Parasuraman ym. 2008). Wickens (2008) tarkasteli tilannetietoisuuden ja kuormittavuuden välistä suhdetta. Järjestelmien suunnittelun kannalta on tärkeää löytää järjestelmäkohtainen automaation tason optimi näiden kahden muuttujan suhteen. Pääpiirteissä automaation edetessä tilannetietoisuuden oletetaan heikkenevän ja kuormittavuuden vähenevän; muutokset eivät välttämättä ole lineaarisia, vaan käyrät voivat olla myös eksponentiaalisia tai logaritmisia (Wickens 2008).

Endsleyn (1995) esimerkit tilannetietoisuudesta tulevat pääasiassa lentoliikenteestä, jossa automaatiota on toteutettu varsin pitkälle ja pitkään. Tilannetietoisuuden menetyksen onkin todettu johtavan esimerkiksi hidastuneeseen ongelmien tunnistamiseen ja viivästyneisiin korjaaviin toimenpiteisiin (Endsley 1995), millä on merkitystä tieliikenteen automatisointia kehitettäessä. Myös lentoliikenteen piiristä tulevan käsitteenmuodostus ihmisen toiminnasta saattaa olla hyödyllistä tieliikenteen automaation tarkastelussa. Kuitenkin selkeä puute on liikkujien välisen vuorovaikutuksen tarkastelun vähäisyys tai puuttuminen näistä teorioista. Tämä puute on nähtävissä myös Stantonin ja Youngin (2000) esittämässä psykologisessa mallissa, jota he ehdottavat automaattiajamisen tarkasteluun. Malli rakentuu seuraavista käsitteistä: palaute eli tieto oman toiminnan tuloksesta (feedback / knowledge of results), luottamus (trust), ohjautuvuus (locus of control), psyykinen kuormitus (mental workload), stressi (driver stress), tilannetietoisuus (situational awareness) ja sisäinen

malli (mental model). Osa näistä käsitteistä pyrkii selittämään melko yleisellä tasolla ihmisten välisiä eroja liikennekäyttäytymisessä, kuten onko ihminen taipuvainen sisäiseen vai ulkoiseen toiminnan ohjaukseen. Automaattiajamisen tarkastelussa on olennaista havaita, että tieliikenteen järjestelmien tulee sopia kaikenlaisille kuljettajille ja että kuljettajien välinen vaihtelu on suuri ja nimenomaan suurempi kuin ammattimaisessa työtehtävässä toimivien operaattoreiden tai lentäjien. On todennäköistä, että automatisoituminen vähentää jonkin verran yksilöiden välisistä persoonallisuuseroista johtuvaa vaihtelua liikenteessä. Toisaalta, nopeasti havaitsevat kaikkeen reagoivat automaattiautot voivat tarjota uudenlaisia mahdollisuuksia poikkeavaan ja äärimmäiseen käyttäytymiseen.

Tarkastelukehikko ja nykytila

Kuljettajakäyttäytymisen tarkastelukehikko ja sisältö esitetään taulukkona:

	<i>Skenaario (1 – 4)</i>		
	<i>Tilannetietoisuus</i>	<i>Sisäinen malli</i>	<i>Vaikutukset</i>
Reitin valinta	Muutoksia tarkastellaan suhteessa nykytilaan.		
Nopeus			
Etäisyys			
Ajolinja			
Vuorovaikutus - <i>Automaattiauto</i> - <i>Ei-automaattiauto</i> - <i>Pyöräilijä</i> - <i>Jalankulkija</i>			

Seuraavassa tarkastelussa noudatetaan pääpiirteissä taulukon rakennetta. Lisäksi tarkastellaan tai kommentoidaan tarpeen mukaan vaikutuksia erilaisissa ympäristöissä, pitkäaikaisvaikutuksia, ajamisen kuormittavuutta, vaikutuksia eri iäisiin ja ajokokemuksen vaikutusta.

Nykytilanteessa kuljettaja vastaa ympäristön monitoroinnista ja ajamisesta kaikissa tilanteissa. Mahdollisuus käyttää ajonavigaattoria reitinvalinnan tukena on yleistynyt. Ajonaikaisessa reitinvalinnassa kuljettaja tarvitsee tietoa kääntymissuunnasta, etäisyydestä kääntymiseen ja tiedon kadusta tai tiestä, jolle käännytään (Streeter ym. 1985). Lisäksi tunnistettavat maamerkit ovat hyödyllisiä. Kuljettaja päättää reitin yksityiskohdat ajaessaan.

Usein navigaattoreissa on toiminto, joka kertoo nopeusrajoituksen ja huomauttaa rajoituksen ylittämisestä. Digitaalinen karttatieto nopeusrajoituksista on kuitenkin puutteellinen ja oletettavasti *älykkään nopeudensäädön* (ISA) käyttö on vähäistä.

Suomessa on toteutettu automaattista nopeusvalvontaa melko laajasti, mikä parantaa varustetuilla tieosilla nopeusrajoitusten noudattamista. Kuljettajat valitsevat ajonopeuden, ajoetäisyyden ja sijainnin tiellä pääasiassa omiin havaintoihinsa perustuen ilman älykkäiden järjestelmien tukea. Kuljettajien välillä on suuria eroja, esimerkiksi ikä ja kokemus näkyvät hyväksytyissä aikaväleissä ja nopeuksissa. Kokeneilla kuljettajilla ajaminen on osin vakiintunutta ja automaattista. Ajovakauden hallintalaitte (Electronic Stability Control, ESC) on laajasti käytössä ja tukee kaarreaajossa ja

auttaa pysymään tiellä etenkin huonolla kelillä. ESC voi pitkään käytettynä lisätä nopeuksia huonoissa olosuhteissa (Wilmink ym. 2008).

Toisten tienkäyttäjien havaitsemiseksi on kehitteillä järjestelmiä, mutta ne eivät ole laajassa käytössä. Vuorovaikutus toisten tienkäyttäjien kanssa perustuu kuljettajan (pääasiassa) visuaaliseen havaintoon ja aikeiden ilmaisemiseen pääasiassa nopeuden ja suunnan muutoksilla sekä suuntamerkillä. Polkupyöräilijöiden ja jalankulkijoiden havaitseminen on tyypillisesti haastavaa etenkin pimeällä. Ajoneuvossa ajonaikana käytettävät laitteet voivat heikentää vuorovaikutuksen laatua suuntaamalla tarkkaavaisuutta pois kevyen liikenteen osapuolista (esimerkiksi navigaattori ja matkapuhelin).

Jalankulkijoiden ja autoilijoiden välinen varsinainen vuorovaikutus voi olla melko vähäistä tai huomaamatonta. Kommunikointi perustuu lähinnä liikkumisen nopeuden ja suunnan havainnointiin eikä niinkään katsekontaktiin. Missä määrin vuorovaikutusta koetaan, on ollut tutkimuskysymys myös lasten liikennekäyttäytymisen tutkimuksessa. Lasten videointi- ja haastattelututkimuksessa oli tuloksena, että lapset useimmiten kokivat olevansa aktiivisessa vuorovaikutuksessa auton kuljettajan kanssa tietä ylittäessään (Rämä 1993). Vuorovaikutuksen puutteellisuudesta kertoo tulos, jonka mukaan kadunylitystilanteessa lasten hyväksymän ajoneuvovälin pituus metreissä pysyi samana ajoneuvon lähestymisnopeudesta riippumatta (Connolly ym. 1998). Olosuhteet voivat vaikuttaa vuorovaikutukseen, sillä jalankulkijoiden on havaittu hyväksyvän hieman pienempiä aikavälejä sateella kuin poudalla (Kulmala ja Salusjärvi 1987).

Ajaminen etenkin taajamissa on kuormittavaa eikä ajon aikana ole sallittua tehdä muita toimintoja esimerkiksi kannettavalla tietokoneella.

4.2.2 Skenaario 1

Skenaariossa 1 automaatiotason 2 autoja alkaa olla liikenteessä, pääasiassa kuitenkin autot ovat vielä tasoa 0–1. Automaatiotason 2 ajoneuvot kykenevät ajamaan itse ruuhkassa tai moottoriteillä, mutta kuljettaja on yhä vastuussa ajamisesta sekä ajo-olosuhteiden tarkkailusta ja suorittaa mm. kaistanvaihdot ja ohittamiset ilman automaation tukea.

Reitti

Reitin valinnassa ja reitin määrittämisen tavassa ei ole suurta laadullista eroa verrattuna nykytilaan, vaikka navigointijärjestelmiä voi olla käytössä entistä enemmän. Dynaaminen navigointi on toteutumassa. Kuljettaja saa reittiin liittyvää ajantasaista liikennetietoa, tietoa vapaista pysäköintipaikoista ja reitin taloudellisuudesta (ruuhkamaksut ja pituus).

Automaattitason 2 autoilijat saattavat siirtyä jonkin verran aikaisempaa enemmän moottoriteille, missä järjestelmä toimii. Myös ruuhkaisten osuuksien välttely voi vähetä.

Nopeus

Oletetaan, että automaatiotason 1 autoissa on usein myös käytössä ISA-palvelu, joka muistuttaa nopeusrajoituksen noudattamisesta, jos kuljettaja ei tätä aktiivisesti estä. ISA:n ansiosta kuljettajien on arvioitu olevan paremmin tietoisia nopeusrajoituksista, tahattomat ylinopeudet vähenevät, automaattisen nopeusvalvonnan vaiku-

tus tehostuu ja muita hiljempaa ajavat saattavat vähän nostaa nopeutta myös huonoissa keliolosuhteissa (Rämä ym. 2009, Wilmink ym. 2008).

Automaattitason 2 kuljettajan ajonopeuden valinta on suurimman osan ajasta samanlaista kuin automaattitason 1 kuljettajalla. Tietyissä olosuhteissa, pienillä nopeuksilla ajamista tukee ruuhka-avustin. Nopeutta ei tarvitse tuolloin säädellä; järjestelmän käyttäjät alkavat saada kokemusta automaattisesta ajamisesta.

Nopeusrajoitustiedon helppo saatavuus auton oman järjestelmän kautta parantaa kuljettajan tilannetietoisuutta. Kuormittavuuteen nopeusrajoitustiedon saatavuudella ei liene merkittävää vaikutusta.

Etäisyys

Erityistilanteissa, kuten moottoritien ruuhkassa, kuljettaja voi vapautua nopeuden ja etäisyyden säätämisestä ja luovuttaa tehtävän ajoneuvolle määrääjäksi. Vaikka kuljettaja ei luovuta vastuuta ajamisesta, ajotilanne muuttuu kuitenkin merkittävästi. Siihen tulee erilaisia vaiheita: tuettu ajaminen, ei-tuettu ajaminen ja siirtymät näiden tilojen välillä.

Kuljettajan tilannetietoisuuden kannalta on merkittävää, miten kuljettaja toimii tuetun ajon aikana ja miten siirtymät tuetusta ajosta ei-tuettuun on toteutettu. Siirtymisten on oltava niin ilmeisiä, ettei kuljettajan tilannetietoisuus heikkene. Oletettavasti myös toimintaa ohjaava sisäinen malli on erilainen tuetun ajon aikana, siirtymissä ja muuna aikana. On mm. todettu, että käyttäessään tukijärjestelmiä kuljettajat saattavat lisätä ajamiseen liittymättömiä tehtäviä (esim. Young ja Regan 2013). Toimintamallit ja päätöksenteko kehittyvät ajan ja kokemuksen myötä. Käyttökokemusta kertyy Suomen olosuhteissa kuitenkin melko hitaasti koko kuljettajapopulaatiolle. Kuitenkin pieni joukko kuljettajia voi ajaa ruuhkaista tieosaa lähes päivittäin ja kokemusta kertyy nopeasti.

Ajotehtävän aiheuttama kuormitus vähenee tuetun ajamisen aikana aikaisempaan verrattuna (esim. Stanton ja Young 2005) ja tarkkaavaisuus voidaan suunnata aikaisempaa enemmän muihin tehtäviin ajon aikana. Kuormitus voi kuitenkin kasvaa hetkellisesti suureksi etenkin siirtymien aikana, mikä asettaa haasteita järjestelmien suunnittelulle.

Mukautuvan vakionopeudensäätimen (ACC) on arvioitu (Rämä ym. 2009, Wilmink ym. 2008) lyhentävän erittäin lyhyiden ajoetäisyyksien osuutta jonossa niiden osalta, joilla on ACC.

Ajolinja

Automaattitason 1 ja 2 autoissa voi olla kaistalla pysymisen tuki (LKS), jonka tavoitteena on tukea kuljettajan pysymistä valitulla ajokaistalla (Jamson ym. 2013), vähentää kuljettajan kuormittumista sekä parantaa turvallisuutta (Rämä ym. 2009, Wilmink ym. 2008).

Suomen oloissa järjestelmän toimintavarmuutta voi heikentää kaistamerkintöjen peittyminen lumella, kaistamerkintöjen heikko laatu tai puuttuminen. Kuljettajan tulisi olla koko matkan ajan tietoinen järjestelmän tilasta, eli onko kaistalla pysymisen avustettua vai ei. Todennäköisesti kaistalla pysymisen tuki ei ainakaan alkuvaiheessa, kun järjestelmän kattavuus on huono, muuta laadullisesti ajamista. Hyvin toimiessaan järjestelmä parantaa tilannetietoisuutta ja vähentää ajamisen aiheutta-

maa kuormitusta. Jos kuljettaja tämän vuoksi lisää oheistoimintojen tekemistä, hän tarvitsee uusia toimintastrategioita ja päätöksentekomalleja. Miten nämä kehittyvät ajan kuluessa, on vaikea ennustaa.

Vuorovaikutus

Älykäs nopeudensäätö saattaa näkyä myös muiden ajonopeuksien alenemisena. Toisaalta on esitetty, että kuljettajat, joilla ei ole samaa järjestelmää, saattavat lisätä ohittelu.

Tason 2 autoja on vielä vähän ja ne toimivat autonomisen ajoneuvon tavoin pitkillä aikaväleillä toisiin ei-automaattiautoihin. Tämän vuoksi ne eivät vaikuta merkittävästi autojen väliseen vuorovaikutukseen.

4.2.3 Skenaario 2

Skenaariossa 2 autot ovat pääasiassa automaatiotasoa 2, mutta liikenteessä on yhä myös tasojen 0–1 autoja. Automaatiotasolla 2 kuljettaja vastaa itse mm. kaistanvaihtoista, vaikka ajaisikin muuten automatiikalla tietyssä liikennetilanteessa.

On oletettavaa, että manuaalisilla autoilla ajavien vähemmistö ei ole satunnaisotos kuljettajista, vaan joukossa korostuvat ne, joilla on varaa vain halvimpiin/vanhoihin autoihin tai jotka jostain muusta syystä haluavat ajaa itse ilman automaattiominaisuuksia.

On epätodennäköistä, että automaattiajamista voi vielä hyödyntää kaupunkien kauduilla ajettaessa.

Reitti

Skenaariossa 2 ei ole suurta muutosta skenaarioon 1 verrattuna. Vaikutukset korostuvat, esimerkiksi moottoriteiden suosimisena. Oletetaan, että reitinvalinnassa saatavat korostua myös taloudelliset perusteet ja vähäpäästöisyyden vaatimus.

Nopeus

ISA:aa käytetään enemmän ja sen vaikutukset tehostuvat. Nopeuden vaihtelu ruuhkissa vähenee.

Etäisyys

Ruuhka-avustinta käytetään laajasti moottoritietyypisillä teillä. Ajoneuvot oletetaan autonomisiksi ja tavoiteaikavälit ovat vielä varsin pitkiä. ACC:n käytön on arvioitu vähentävän kaikkein lyhimpiä aikavälejä (Wilmink ym. 2008).

Kun kuljettajille kertyy kokemusta tuettuna ajamisesta, sen mukaiset toimintatavat saattavat siirtyä myös ajanjaksoille, jolloin automaattiajamisen tukea ei ole tarjolla. Kuljettaja on tärkeä pitää tietoisena tuen saatavuudesta, jottei hän esimerkiksi toimi automaattiajamisen sisäisen mallin varassa silloin, kun automaattista ajamista ei tueta.

Totuttautumien automaattiajamiseen voi olla vaikeinta kokeneille, mutta automaattien käyttöön oton aikaan vähän ajaville kuljettajille.

Ajolinja

Pysäköinnin tuki on laajassa käytössä, mikä totuttaa kuljettajia automaattiajamiseen. Kaistalla pysymisen tuki on aikaisempaa laajemmassa käytössä. Järjestelmä ei kuitenkaan toimi luotettavasti pääteitä lukuun ottamatta. Toiminnan osittaisuuden etuna on, että vastuuta ei delegoida tältä osin liikaa järjestelmälle.

Poikkeuksena erityisesti Suomen olosuhteissa saattaa olla siirtyminen kesäliikenteestä talviolosuhteisiin. Nykyinenkin nopeuskäyttäytyminen osoittaa, että kuljettajat eivät ota riittävästi huomioon talviolosuhteita ajokäyttäytymisessä (esim. Rämä 2001, Malmivuo ja Peltola 1997). Tämä siirtymä voi tulla entistä vaikeammaksi, jos kuljettajat ovat paljailla teillä tottuneet siihen, että auto pysyy ajokaistalla automaattisesti, ja tämä tuki lumen tulon vuoksi häviää. Toisaalta jos ajaminen tuntuu palautteen perusteella riittävän epävarmalta, nopeuskin voi aleta.

Vuorovaikutus

Nopeudet valitaan ruuhkissa niin laajasti automaattiautojen järjestelmillä, että tämä vaikuttaa myös ei-automaattiautojen nopeuksiin.

Ei-automaattisen auton kuljettajaa saattaa häiritä mahdollisesti perässä vakioetäisyydellä ajava automaattiauto. Automaattiauton kuljettaja ei todennäköisesti häiriinny samalla tavoin, koska on oppinut luottamaan järjestelmään oman kokemuksen perusteella.

Yleensä ottaen kuljettajien välinen tietoinen vuorovaikutus vähenee, kun automaatio huolehtii turvamarginaaleista. Ajonaikaisten ajamiseen liittymättömien tekemisten määrä kasvaa, mikä myös suuntaa kuljettajien huomiota liikenteen vuorovaikutuksesta muihin aktiviteetteihin ja heikentää kuljettajan kykyä reagoida toisiin osapuoliin. Osittain tämä on tavoitteenakin automaattiajamisessa – vapauttaa kapasiteettia muuhun – mutta toisaalta vaikutus voi olla yleisempi ja suurempi kuin alkuvaiheessa (skenaariossa 2) tavoitellaan.

Koska automaattiajamista ei hyödynnetä laajasti kaupunkialueilla, vaikutukset jalankulkijoihin ja pyöräilijöihin ovat vähäisiä. Liikenteen siirtyminen isoille väylille, joilla automaattiajaminen toimii, voi hieman rauhoittaa pieniä katuja ja vähentää vuorovaikutusta.

Automaattisessa pysäköinnissä voi tulla uudenlaista vuorovaikutusta sekä jalankulkijoiden että etenkin pyöräilijöiden kanssa. Auton liikkeet voivat olla aluksi yllättäviä pyöräilijän näkökulmasta, koska automaattinen pysäköinti tapahtuu manuaalista sujuvammin ja nopeasti. Oletetaan kuitenkin, että automaattiauto osaa havaita myös liikkuvan kohteen pysäköidessään ja väistää tai pysähtyä tarvittaessa.

Nopeuden aleneminen voi heijastua myönteisesti vuorovaikutukseen jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden kanssa. Ruotsalaisissa ISA-kokeissa on todettu, että kuljettajat ottivat paremmin huomioon suojatietä ylittämään pyrkivät jalankulkijat, kun heillä oli ISA-sovellus (Hjälmdahl ja Vårhelyi 2004). Vaikutus lienee samansuuntainen vuorovaikutukseen pyöräilijöiden kanssa. Koska ruuhka-avustin on käytössä moottoriteiden kaltaisissa ympäristöissä, sillä ei ole vaikutusta vuorovaikutukseen kevyen liikenteen kanssa.

4.2.4 Skenaario 3

Skenaariossa 3 autot ovat pääasiassa automaatiotasoa 3, mutta liikenteessä jonkin verran tason 2 autoja. Tasolla 3 ajoneuvo hoitaa lähes kaiken ajamiseen liittyvän, mutta kuljettajan pitää kuitenkin yhä olla valppaana ottamaan auto hallintaansa, kun autopilotti kytkeytyy pois päältä ja siirtää vastuun kuljettajalle.

Reitti

Oletetaan, että automaattisissa järjestelmissä on mahdollista määritellä vaihtoehtoisia reittejä etukäteen erilaisten kriteerien perusteella (nopein reitti, ekotehokkain reitti, maisemareitti jne.). Tämä muuttaa reitin yksityiskohtien valintaa strategiseksi ennen matkaa tehtäväksi päätökseksi. Käytännössä voi myös olla, että lähdetään aluksi karkealla suunnitelmalla liikkeelle ja tarkennetaan reittimäärittäminen matkan alussa. Valittu reitti voi kuitenkin osoittautua ennalta ajateltua huonommaksi (esim. ruuhkainen tiejakso) ja tällaisessa tilanteessa kuljettaja (tai automaatio) voi valita reitin uudelleen. Todennäköisesti tämä tapahtuu ajon aikana, koska automaatio on muun ajamistoiminnan tukena.

Ajan myötä kuljettajan kriteerit reitinvalinnalle saattavat vakiintua. Tarjoamalla tukea päätöksentekoon automaattinen järjestelmä kannustaa kuljettajia valitsemaan reitin aikaisempaa tietoisempaa valintakriteereistä eli siitä, onko valintaperuste matkan pituus, nopeus, energiatehokkuus, taloudellisuus vai esimerkiksi maisemat.

Oletetaan, että myös tason 2 autoissa navigointilaitteet ovat yleistyneet. Reitinmäärittäminen voi olla samantyylistä kuin tason 3 autoissa, mutta kuljettaja huolehtii itse navigaattorin ohjeiden seuraamisesta.

Nopeus

Automaattiajoneuvo säättää ajonopeuden suurelta osin. Suurin osa autoista on koko ajan ja lähes kaikki autot ovat välillä automaattisen nopeusvalinnan piirissä. Autot ajavat keskenään enemmän samaa nopeutta kuin aikaisemmin.

Dynaamisen, vaihtuvat sääolosuhteet ja kelin huomioon ottavan järjestelmän ansiosta nopeudet alenevat myös huonolla kelillä (Rämä ym. 2009, Kulmala ym. 2009, Malone ym. 2014).

On kuitenkin joukko tilanteita, joissa järjestelmä kysyy kuljettajaa ottamaan kontrollin ajonopeudesta. Lisäksi kuljettaja voi itse kytkeä automaation pois päältä omaloitteisesti, jos haluaa itse kontrolloida ajonopeutta.

Etäisyys

Pääosan ajasta ajoetäisyys edellä ajavaan säätyy automaattisesti. Aikavälit ovat melko lyhyitä, koska autot ovat verkottuneita toisiinsa. Lähes kaikilla on automaattiajoneuvo, joten kuljettajat tottuvat melko pian lyhyisiin ajoetäisyyksiin. Kuljettajan täytyy kuitenkin olla varautunut ottamaan kontrolli ajamisesta, kun autopilotti kytkeytyy pois päältä.

Automaattisessa ajamisessa kuljettajan tilannetietoisuus heikkenee ja ajamisen kuormittavuus vähenee. On oletettavaa ja ehkä tarkoitettua, että kuljettajat suuntaavat huomiotaan muihin tehtäviin, kun aktiivista ajamista ei tarvita, esimerkiksi käyttävät matkapuhelinta tai kannettavaa tietokonetta tai mahdollisesti päivittävät valittua reittiä.

Kun kuljettaja kutsutaan takaisin ajotehtävään, hänen täytyy nopeasti päivittää havaintonsa ajotilanteesta, miksi häntä tarvitaan, mitä ympäristössä näkyy, mikä on nopeus ja suunta, mitä on lähellä, mitä hieman kauempana, tarvitseeko väistää kohdetta jne. Hänellä täytyy myös olla tilanteeseen sopiva toimintamalli. Todennäköisesti kuljettajien tueksi pitäisi automaattiajamisessa jo etukäteen määritellä tilanteiden joukko, joissa kuljettajaa voidaan tarvita aktiivisesti ajamaan. Tämä voisi auttaa ainakin osittain ennakoimaan tilanteita ja muodostamaan sisäisiä toimintamalleja eri tilanteisiin. Toisaalta kuljettajalla täytyy olla myös selkeä käsitys perustehtävästään ja tehtävien priorisoinnista.

Jos siirtymää tarvitaan nopeasti ja ennalta arvaamatta, tehtävä voi olla liian vaikea ainakin osalle kuljettajista tai osassa tilanteita. Tilannetietoisuudessa, sisäisten mallien repertuaarissa ja kehittyneisyydessä, reaktioajoissa ja reaktiokyvyissä on suurta yksilöllistä ja tilannekohtaista vaihtelua.

Kuljettajan kutsuminen ajotehtävään täytyy myös hoitaa selkeästi ja tehokkaasti. Mm. matkapuhelimeen on jo suunniteltu sovellusta, joka on yhteenliitetty auton järjestelmään ja ilmoittaa puhelimen näytön kautta vaatimuksen palata ajotehtävään vaikkapa edessä olevan tietyömaan ja ajokaistan sulkemisen takia (Lapoehn ym. 2014).

Kuljettajan täytyy ilmaista järjestelmälle, että hän on ottanut vastuun auton ohjaamisesta. Muussa tapauksessa auto esim. ohjautuu tien sivuun ja pysähtyy. Kuitauksen luotettavuus ajotehtävän vastaanottamisesta täytyy varmistaa jollain tapaa.

Ajolinja

Myös omalla kaistalla pysymiseen on automaattiajamisen tuki, josta kuljettaja kuitenkin voi joutua luopumaan erityistilanteessa ja kohdatessaan edellä kuvattuja ongelmia. Todennäköisesti kaikki automaattiset operationaalisen tason toiminnot (nopeus, etäisyys, ajolinja) kytkeytyvät monissa tilanteissa yhtä aikaa pois.

Edelleen kuljettaja voi joutua myös tilanteeseen esimerkiksi lumisateessa, jossa kaistamerkinnot katoavat ja kaistalla pysymisen tuki loppuu. Järjestelmän on ilmaistava selkeästi, milloin kuljettajaa tarvitaan pitämään auto omalla ajokaistalla.

Vuorovaikutus

Vuorovaikutuksen muutos on perustavaa laatua, koska tekninen järjestelmä hoitaa totuttua vuorovaikutusta autojen kesken.

Kaikki osapuolet eivät kuitenkaan ole automaation piirissä, kuten jalankulkijat ja pyöräilijät, ja heidän kannaltaan vuorovaikutuksen puuttuminen on ongelmallista. Toisaalta myös osa kevyen liikenteen osapuolista voi olla verkottunut kannettavien laitteiden avulla. Koska liikenteessä on vielä automaatiotasolta keskenään erilaisia autoja, autojen käyttäytyminen ei myöskään ole kovin hyvin ennustettavaa.

Moottoriajoneuvon liike on suoraviivaisempaa kuin jalankulkijan tai pyöräilijän. Auton liike jatkuu yleensä pidemmän matkan samaan suuntaan, kun taas jalankulkija tai pyöräilijä voi vaihtaa vaikeammin ennustettavasti suuntaa ja esimerkiksi etäisyys tien reunasta voi vaihdella paljonkin ja yllättävästi. Tämä asettaa erityisiä haasteita automaattiautojen suunnittelulle; pehmeitä yllättäviä kohteita varten on rakennettava riittävät turvamarginaalit. Kevyen liikenteen osapuolen näkökulmasta toi-

sen osapuolen toiminnan jäykkyys voi olla vaikea ja luonnollisen vuorovaikutuksen puute tekee toiminnan myös vaikeasti ennakoitavaksi ja huonosti sujuvaksi. Automaattisen liikenteen sujumiseksi myös kevyen liikenteen osapuolten pitäisi omaksumaa uusia sisäisiä malleja ja toimintamalleja sekä olla uudella tavalla tilannetietoisia. Toisaalta erityisesti heidän kohdallaan ei välttämättä ole motivaatiota toimia toisin.

Tulevaisuutta on visioitu myös siten, että samassa paikassa olevat kuljettajat verkottuvat keskenään sosiaalisen median kautta ja viestittelevät toisilleen lähiympäristöön liittyviä asioita (esim. Juhlin 2009).

4.2.5 Skenaario 4

Skenaariossa 4 kaikki autot ovat tasoa 4. Tällöin auto hoitaa ajamisen lähes kaikissa tilanteissa.

Reitti

Reitin määrittäminen on suurin piirtein samanlaista kuin skenaariossa 3. Kaikissa autoissa reitti määritellään etukäteen tai matkan alussa.

On mahdollista, että kuljettaja ei halua päättää reittiä alussa, vaan kytkee automaation (tältä osin) pois päältä ja etenkin kaupunkiliikenteessä tekee reittipäätöksiä matkan kuluessa.

Nopeus, etäisyys ja ajolinja

Autojen liike ja etäisyys kohteisiin säädetään automaattisesti. Kuljettaja on autossa matkustajan roolissa, mutta voi tarvittaessa kuljettaa autoa. Auto voi myös ohjautua tien sivuun, jos ajamaan kykenevää kuljettajaa ei ole. Ongelmaksi tulee tällöin turvallisen pysähdyspaikan löytyminen.

Vuorovaikutus

Autojen välinen vuorovaikutus hoituu koneellisesti. Vuorovaikutus jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden kanssa voi edelleen olla ongelmallista. Autojen toiminnan ennustettavuus on tosin hieman parantunut, kun kaikki autot ovat automaattisia ja automaattiautoihin on totuttu.

4.3 Kuljettajien käsitykset automaattiajamisesta

Tässä luvussa käsitellään neljää asiakokonaisuutta, jotka ovat kuljettajien mielipiteet, automaattiajamisen hyväksyntä, käyttöliittymät ja tietoisuus automaattiajamisesta. (Ero asiakokonaisuuksien välillä ei ole tarkka, käsiteltävillä asioilla on keskinäisiä yhteyksiä.)

4.3.1 Mielipiteet

Mielipiteillä (opinions) tarkoitetaan tässä kuljettajien yleistä suhtautumista automaattiajamiseen. Schoettle ja Sivak (2014a ja 2014b) selvittivät kyselytutkimuksella kuljettajien mielipiteitä kuudessa maanosassa (USA, Euroopasta Isossa Britanniassa (UK), Australiassa, Kiinassa, Intiassa ja Japanissa). Suurin osa vastaajista suhtautui yleisesti positiivisesti automaattiajamiseen, esim. Isossa Britanniassa 66,6 % kuljettajista. Negatiivisesti suhtautuvia oli eniten USA:ssa (16,4%) ja Isossa Britan-

niassa (13,7%). Ranskassa tehdyn kyselytutkimuksen tulokset olivat samansuuntaisia: kuljettajista 68,1 % hyväksyi täysin automaattisen ajamisen (Payre ym. 2014)

Automaattiajamisessa kuljettaja ei itse kontrolloi ajamista vaan luovuttaa osittain tai lähes täysin kontrollin ajoneuvolle. Kysyttäessä (Schoettle ja Sivak 2014a ja 2014b) kuinka huolestuneita kuljettajat olisivat ajamisesta tai kyydissä olosta automaatiotason 3 ajoneuvossa (NHTSA, 2013 – ”limited self-driving technology” kuten SAE 3) eurooppalaisista (UK) kuljettajista 14,6 % ilmaisi, ettei olisi lainkaan huolissaan, 36,8 % olisi hieman huolissaan, ja loput kohtalaisen (33,8 %) tai erittäin (14,8 %) huolissaan. Kun sama kysymys esitettiin koskien tason 4 autossa ajamisesta, erittäin huolestuneiden osuus kasvoi 26 %:iin (ei lainkaan huolissaan olevien osuus väheni vain 1,3 % yksikköä). Kuljettajia vaikuttaa huolestuttavan ajoneuvon kontrollista luopuminen.

Schoettle ja Sivak (2014a ja 2014b) esittivät kuljettajille listan mahdollisista huolenaiheista tason 4 automaattiaamiseen liittyen ja kysyivät huolestuneisuuden määrää neliportaisella asteikolla (ei lainkaan huolestunut, hieman huolestunut, kohtalaisesti huolestunut, erittäin huolestunut). Eurooppalaisia kuljettajia huolestuttivat eniten turvallisuusseuraamukset järjestelmävirheen takia (safety consequences of equipment/system failure, 44,8 % oli erittäin huolestuneita). Vähiten eurooppalaisia kuljettajia huolestutti oppiminen käyttämään itse ajavaa ajoneuvoa (15,4 %, esimerkiksi Intiassa vastaava luku oli 43,6 %). Kun kahden eniten huolestuneisuutta ilmaisevan luokan vastaukset (kohtalaisen ja erittäin huolestunut) lasketaan yhteen, kysytyjen asioiden huolestuttavuus Ison Britannian aineistossa asettuu seuraavaan järjestykseen:

- turvallisuusseuraamukset järjestelmävirheen takia (81,6 %)
- kuljettajan/omistajan laillinen vastuu (72,5 %)
- itse ajavan auton erehtyminen odottamattomassa tilanteessa (72,3 %)
- vuorovaikutus jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden kanssa (68,9 %)
- järjestelmän turvallisuus (hakkereilta) (67,1 %)
- vuorovaikutus ei itse ajavien ajoneuvojen kanssa (67 %)
- ajoneuvon turvallisuus (hakkereilta) (66,4 %)
- datan yksityisyys (paikan ja määränpään jäljitys, tracking) (61,7 %)
- itse ajavat autot eivät aja yhtä hyvin kuin ihmiskuljettaja (61,5 %)
- järjestelmän toimiminen huonossa säässä (55,4 %)
- oppiminen ajamaan itse ajavaa ajoneuvoa (48,4 %).

Brittivastaajien käsitykset edustanevat tutkimuksen maiden joukosta parhaiten suomalaisia vastaajia. Esimerkiksi suhtautumisessa huonoon säähän voi kuitenkin odottaa olevan eroa, esimerkiksi USA:ssa vastaajat olivat selvästi huolestuneempia (73,4 %) tästä asiasta. Yleensä ottaen vastaajat ilmaisivat paljon huolestumista, mikä on luonnollista asioista erityisesti kysyttäessä. Ei lainkaan huolestuneiden osuus jäi useimman asian kohdalla alle 10 %:iin. Tyypillisesti ei lainkaan huolestuneiden osuus oli suurin brittivastaajilla verrattuna muiden maanosien vastauksiin. Mainittakoon, että 15 % ilmaisi, ettei olisi lainkaan huolestunut tietosuojasta (data privacy).

Kuljettajille esitettiin myös automaattiajamisen skenaarioita kuten ”Riding in a vehicle with no controls available” ja ”Self-driving commercial vehicles such as heavy trucks or semi-trailer trucks”. Enemmistö brittikuljettajista ilmaisi olevansa erittäin huolestuneita näistä skenaarioista (51,8 % ja 51,7 %).

Automaattiajamisessa kuljettaja vapautuu osittain tai lähes kokonaan ajamisesta. Tämä mahdollistaa muiden asioiden tekemisen ajon aikana. Selvästi suurin osa brittikuljettajista (44 %) ilmaisi, että he kuitenkin katsoisivat tietä, vaikka eivät ajaisi, 7,6 % ilmaisi lukevansa ja 7,2 % nukkuisi (Schoettle ja Sivak 2014a ja 2014b).

Luottamus automaatioon määrittää osaltaan, kuinka paljon automaatiota hyödynnetään (Parasuraman ja Riley 1997). Luottamusta on kuvattu kolmitasoisella mallilla: ennustettavuus (predictability), riippuvuus (dependability) ja luottamus (faith) (Muir 1994). Operaattorin luottamus automaatioon kehittyy käytön myötä ja alussa operaattori monitoroi järjestelmän toimintaa tarkemmin kuin kolmannella tasolla, jolloin järjestelmän toimintaan luotetaan ilman evidenssiä siitä, että se toimii toivotulla tavalla. Automaation alemmilla tasoilla saattaa olla vaarana luottaa automaatioon liikaa (esim. Rudin-Brown ja Paker 2004).

4.3.2 Hyväksyntä

Minkä tahansa teknisen järjestelmän hyödyt saavutetaan niiden käytön kautta. Yleisten mielipiteiden ja järjestelmän yleisen *hyväksyttävyyden* (acceptability) tai järjestelmästä pitämisen (Adell ym. 2014) lisäksi on järjestelmien yleistymisen kannalta tärkeää, arvioiko kuljettaja järjestelmän tuoman hyödyt niin merkittäviksi (ja haitat suhteessa pieniksi), että aikoo käyttää järjestelmää.

Hyväksyntä (acceptance) tarkoittaa sitä, ”missä määrin henkilö sisällyttää (incorporates) järjestelmän ajamiseensa tai, jos järjestelmä ei ole saatavilla (available), aikoo käyttää sitä” (Adell ym. 2014). Määritelmä korostaa yksilöllistä näkökulmaa ja sitä, että järjestelmällä saatava hyöty on ymmärrettävä ja sen arvioidaan toteutuvan. Määritelmä korostaa käytön merkitystä.

Schoettle ja Sivak (2014a ja 2014b) selvittivät kuljettajien arviota saavutettavista hyödyistä täysin automaattisessa ajamisessa, jossa ajoneuvo kontrolloi kaikki turvallisuuskriittiset toiminnot koko matkan ajan (NHTSA-luokituksen 2013 taso 4). Suurin osa brittikuljettajista arvioi kysyttäessä, että olisi erittäin tai melko todennäköistä, että onnettomuuksia olisi vähemmän (71,1 %), onnettomuudet olisivat lievempiä (72,7 %), onnettomuuksiin reagoitaisiin nopeammin (improved emergency response 60,2 %), päästöjä olisi vähemmän (67,2 %), ajo olisi taloudellisempaa (fuel economy, 75,9 %) ja vakuutusmaksut olisivat pienemmät (58,2 %). Arviot olivat muualla maailmassa samansuuntaisia. Eurooppalaiset kuljettajat pitivät vähemmän todennäköisenä, että matka-aika lyhenisi (39,3 % erittäin tai melko todennäköisenä) tai ruuhkat vähenisivät (47,3 %). USA:n ja Australian vastaukset olivat samansuuntaisia myös tältä osin, kun taas Kiinan, Intian ja Japanin vastaajat pitivät todennäköisempänä, että myös matkan sujuvuus paranisi täysin automaattisessa ajamisessa.

Aikomusta käyttää automaattiajoneuvoa voidaan selvittää myös kysymällä, hankkisiko automaattiauton ja olisiko valmis maksamaan siitä. Kansainvälisessä vertailussa kiinalaiset ja intialaiset kuljettajat ilmaisivat selvästi muita enemmän olevansa erittäin kiinnostuneita hankkimaan (40,2 % ja 46,9 %) täysin automaattisen (tason 4) auton (Schoettle ja Sivak (2014b) arvioivat tosin aineiston olevan valikoitunutta erityisesti näissä maissa). Suurin osa vastaajista USA:ssa (33,7 %), Isossa Britanniassa (36,6 %) ja Australiassa (32,3 %) ei ollut lainkaan kiinnostunut hankkimaan automaattiautoa. Kuitenkin myös vastaajista Isossa Britanniassa 18 % oli erittäin kiinnostuneita itse ajavan auton hankkimisesta ja 22,6 % kohtalaisen kiinnostuneita. Lähes 60 % brittivastaajista oli sitä mieltä, etteivät olisi halukkaita maksamaan lisää

saadakseen automaattiauton. Samansuuntaisia tuloksia on saatu tason 1 järjestelmien kenttäkokeissa: 42 % vastaajista ilmaisi olevansa halukkaita maksamaan yhteistoiminnallisista järjestelmistä, vaikka järjestelmien hyväksyttävyyttä arvioitiin varsin korkeaksi (91 %, Rech 2014).

4.3.3 Käyttöliittymät

Tekninen järjestelmä tarjoutuu käyttäjälle käyttöliittymän välityksellä. Kuljettajien tukijärjestelmien suunnittelun haasteena on ollut kuljettajan toiminnan ja vuorovai-
kutustilanteiden monimuotoisuus ja se, että kuljettajan ajonaikaisten reaktioiden on tapahduttava suhteellisen nopeasti, muutamassa sekunnissa. Suunnitteluperiaatteissa on korostettu (esim. ESOP 2006), että käyttöliittymän ja siinä esitettävän tiedon on oltava helposti havaittavaa ja ymmärrettävää ja että esitettävän informaation määrän on oltava rajallinen. Katse ei saa kohdistua liian pitkään ajoneuvon näyttöön, kohdistuksia ei saa tulla liian usein (esim. Stevens ym. 2002) ja häiritsevyys (distracti-
on) pitää minimoida.

Automaattiauton käyttöliittymien suunnittelussa tulevat korostumaan uudet vaatimukset. Häiritsevyys minimointi ei enää ole yhtä keskeinen suunnitteluperiaate, vaan tärkeämmäksi tulee, miten säilyttää kuljettajan tilannetietoisuus riittävänä tai palauttaa se tarvittaessa nopeasti ja miten tukea kuljettajaa ennakoimaan manuaali-
seen ajamiseen siirtymistä jne. (esim. Merat ym. 2014).

Erityiseksi haasteeksi tulee, miten kuormitusta voidaan hallita (jos voidaan) erityis-
tilanteissa, etenkin jos kuljettajan odotetaan ottavan vastuu auton ohjaamisesta yhtään yllättävässä tilanteessa. Todennäköisesti kuljettajaa on ohjattava vaihteittain ot-
tamaan kontrolli ajamisesta – aluksi kuljettajan huomio on saatava mahdollisesta toisesta tehtävästä, kuljettajan tilannetietoisuus on saatava riittäväksi ja tilanteeseen sopiva sisäinen malli on aktivoitava ennakoivalla informaatiolla edessä olevaan ti-
lanteeseen sopivan toimintastrategian löytämiseksi. Jossain tilanteessa käyttöliittymän pitänee ohjata keskeyttämään ajaminen.

4.3.4 Tietotarpeet ja koulutus

Jotta älyliikenteen sovellutusten käyttö lisääntyisi, kuljettajien pitäisi olla tietoisia näistä uusista sovelluksista. Kuljettajien täytyisi myös olla tietoisia siitä, millä ta-
voin käytettynä järjestelmistä voidaan saada paras turvallisuus- tai muu hyöty. Vaikka järjestelmät pyritään suunnittelemaan intuitiivisiksi, kuljettajan päätöksen-
teon varaan jää kuitenkin erilaisia käyttötapoja ja vaihtoehtoja.

Internetkysely osoitti, että kuljettajat ympäri maailmaa olivat yleisesti melko hyvin tietoisia automaattiajamisesta (Schoettle ja Sivak 2014a ja 2014b). Iso Britannia si-
joittui keskivaiheille, 66 % kuljettajista oli kuullut autonomisista tai automaattisista ajoneuvoista aiemmin.

Yleisen tietoisuuden lisäksi kuljettajien on ymmärrettävä automaattisen järjestelmän toimintaperiaatteet, teknologian rajoitukset ja vastuut erilaisissa tilanteissa. Tällaista tietoa kuluttajat saavat uutta autoa ostaessaan. Uudet kuljettajat perehtyvät ajami-
seen, ajoneuvon ominaisuuksiin ja liikennejärjestelmään kuljettajankoulutuksessa. Kuljettajankoulutusjärjestelmä pitää päivittää automaation edetessä. Jo nykyinen koulutus saattaa olla vanhanaikaista uusien älyliikenteen sovellusten perehdyttämi-
sen osalta. Koulutuksen ajan tasalla pitäminen on haasteellista, koska alan teknolo-
gia kehittyy nopeasti.

Valmennusta tai harjoittelua on ehdotettu jo markkinoilla olevien järjestelmien tueksi. Rudin-Brown & Parker (2004) tutkivat ACC:tä testiradalla ja havaitsivat, että kuljettajien reaktioaika havaita vaaratilanne kasvoi verrattuna tilanteeseen, jossa ACC ei ollut käytössä. Heidän tulkintansa oli, että kuljettajien tilannetietoisuus heikkeni, kun järjestelmä oli käytössä. Tutkijat ehdottivat sekä valmennusta (coaching) että käyttöliittymien suunnittelua keinoiksi parantaa tilannetta. Tarkkavaisuuden jakaminen eri tehtävien kesken voi tulla uudeksi kuljettajankoulutuksen sisällöksi automaation edetessä.

Kuljettajankoulutus tavoittaa tehokkaasti vain uudet kuljettajat. Teknologian uudistuminen haastaa myös kaikkien liikkujien elinikäistä oppimista. On tärkeää, että kaikki liikkujat ymmärtävät, miten automaattiauto ajaa ja mitkä ovat sen vahvuudet ja heikkoudet.

4.4 Yhteenveto kuljettajan käyttäytymisen muutoksista

Taulukossa 5 on yhteenveto kuljettajan käyttäytymisen muutoksista.

Taulukko 5. Yhteenveto kuljettajan käyttäytymisen muutoksista

	Skenaario 1: (SAE 0+1 80 %, SAE 2 20 %)	Skenaario 2: (SAE 0+1 20 %, SAE 2 80 %)	Skenaario 3: (SAE 2 20 %, SAE 3 80 %)	Skenaario 4: (SAE 4 100 %)
Reitin valinta	• Navigaattorin käyttö yleistä, myös ajantasaisen liikennetiedon lähde	• Palvelu kattaa korkea-luokkaiset tiet, joten moottoriteitä suositaan entisestään.	• Reitin suunnittelu toteutuu aikaisempaa enemmän strategisena päätöksentekona, ennen matkaa	• Sama kuin skenaariossa 3
Nopeus	• ISA yleistyy: Tahattomat ylinopeudet vähenevät • Tietoisuus nopeusrajoituksista paranee	• ISA:n vaikutukset tehostuvat	• Automaattiajoneuvo säättää nopeuden pääosin	• Säätyy automaattisesti
Etäisyys	• Ajoneuvo voi osin huolehtia ajoetäisyydestä • Ajotehtävään tulee uusia elementtejä: tuettu ajaminen ja siirtymä tuetusta ei-tuettuun	• Etenkin moottoritie tyypisillä teillä aikaväli säädetään automatiikalla. Kuljettajan on oltava tietoinen tuen saatavuudesta.	• Etäisyys säätyy pääosan ajasta automaattisesti. • Kuljettajan tilannetietoisuus liikenteestä heikkenee • Ajamisen kuormittavuus vähenee; On mahdollista tehdä muita tehtäviä. • Siirtymät takaisin kuljettajan rooliin haastavia, jopa vaarallisia	• Säätyy automaattisesti
Ajolinja	• Kaistalla pysymistä tuetaan osin. Tuetun ajon aikana ajamisen kuormittavuus vähenee.	• Kaistalla pysymisen tuki on laajassa käytössä. Talviolosuhteet aiheuttavat ongelmia.	• Kaistalla pysymistä tuetaan mutta kuljettaja voi joutua ottamaan kontrollin ohjaamisesta. • Tilannetietoisuuden säilyminen on haasteellista.	• Säätyy automaattisesti
Vuorovaikutus	• ISA:n ansiosta myös muiden ajonopeus voi pienentyä; ohittelu voi lisääntyä.	• Tietoinen vuorovaikutus vähenee automaattisen toiminnan osalta • ISA parantaa vuorovaikutusta jk/pp kanssa	• Tekninen järjestelmä hoitaa vuorovaikutusta autojen kesken. • Vuorovaikutus osapuolten kanssa, jotka eivät ole automaation piirissä on ongelmallista	• Edelleen ongelmia kevyen liikenteen suhteen

5 Vaikutukset liikennevirtaan

5.1 Tarkastelutapa

Tässä luvussa tarkastellaan tieliikenteen automatisoitumisen vaikutuksia liikennevirtaan. Luku 5.2 tekee yhteenvedon kirjallisuudesta löytyneistä liikennevirtavaikutustutkimuksista. Asiantuntijatyöpajassa näitä tuloksia peilattiin tehtyihin skenaarioihin Suomessa, ja luvussa 5.3 esitellään vaikutusarviot Suomen olosuhteissa.

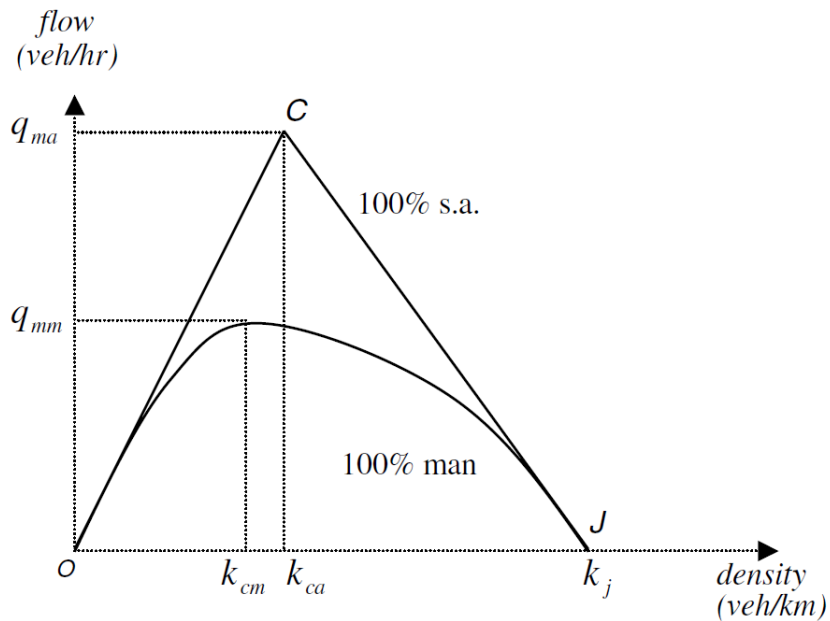
On ymmärrettävä, että vaikutusten suuruus ja suunta riippuvat mm. penetraatiosta ja erilaisista teknisistä ratkaisuista, kuten automaattiajoneuvon tavoiteaikaväleistä. Aikaisempi kirjallisuus pohjautuu pääasiassa mukautuvan (yhteistoiminnallisen) vakionopeuden säätimen (ACC, CACC) vaikutuksiin, simulointitutkimuksiin ja teoreettisiin vaikutustarkasteluihin.

5.2 Aikaisempia tutkimustuloksia

5.2.1 Liikennetiheys ja -määrä

Kullakin tiejaksolla on maksimiliikennetiheys (ajoneuvoa/kilometri), jossa liikenne on täysin ruuhkautunut eikä ajoneuvojono enää liiku. Tätä maksimia pienemmillä liikennetiheyksillä liikennemäärä (ajoneuvoa/aikayksikkö) ensin kasvaa kriittiseen liikennetiheyteen asti, minkä jälkeen liikennemäärä alkaa laskea saavuttaen nollaliikennemäärän maksimitiheydellä. Kriittistä liikennetiheyttä pienemmillä tiheyksillä voidaan olettaa vakionopeustaso kaikille ajoneuvoille. Sitä suuremmilla liikennetiheyksillä ajoneuvot eivät mahdu tielle tavoitenopeudellaan ja joutuvat tinkimään nopeudestaan säilyttääkseen riittävän aikavälin edellä ajavaan. Näin ollen automaattiajoneuvot vaikuttavat liikennevirtaan erityisesti kriittistä liikennetiheyttä suuremmilla tiheyksillä. Tilanne on kuitenkin kompleksinen, koska automaattiajoneuvot vaikuttavat myös kriittiseen liikennetiheyteen ja liikennemäärään, jolla tämä liikennetiheys saavutetaan.

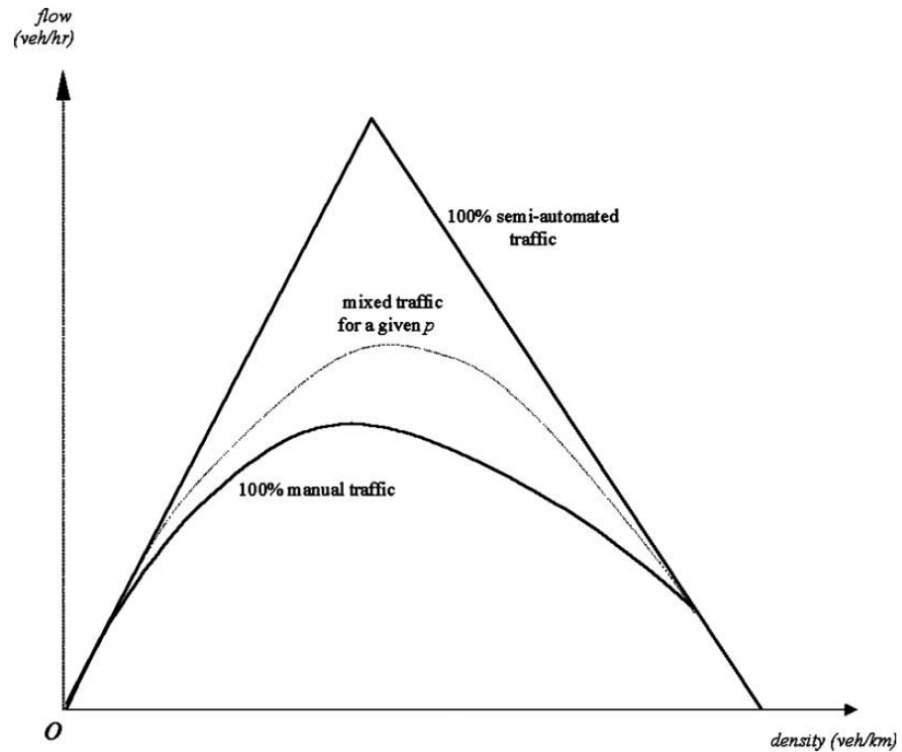
Bose & Ioannou (2003) osoittivat, että ICC:llä (intelligent cruise control, longitudinal control; artikkeli ei kerro, miten järjestelmä eroaa ACC:stä vai eroaako lainkaan) varustetuista automaattisista ja manuaalisista ajoneuvoista koostuvan liikennevirran liikennemäärä on kaikilla liikennetiheyksillä suurempi kuin pelkistä manuaalisista ajoneuvoista koostuvassa liikennevirrassa (Kuva 15). Hyvin pienillä liikennemäärillä, joilla autojen välistä kanssakäymistä on vain vähän, automaattisten ajoneuvojen ja manuaalisten ajoneuvojen käyrät ovat yhtenevät, samoin kaikkein suurimmilla liikennemäärillä, jolloin liikennetiheys on lähellä maksimia.



Kuva 15. Liikennevirran peruskuvaaja 100-prosenttisesti manuaaliselle liikennevirralle (pyöreä käyrä, '100% man') ja 100-prosenttisesti automaattiselle liikennevirralle (kolmio, '100% s.a.'). Lyhenne q_{ma} tarkoittaa maksimiliikennemäärää automaattiajoneuvoille ja q_{mm} manuaalisille ajoneuvoille. Lyhenne k_{cm} on kriittinen liikennetiheys manuaalisille ajoneuvoille ja k_{ca} automaattisille. Lyhenne k_j tarkoittaa maksimitiheyttä ja C välityskykyä. (Bose & Ioannou 2003)

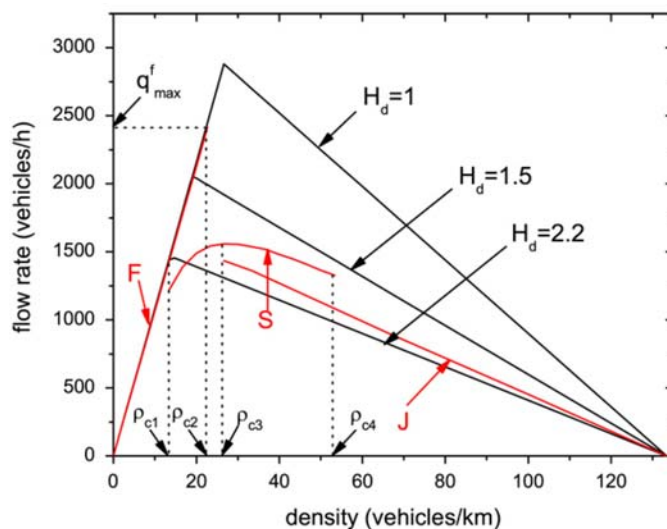
Manuaalisten ajoneuvojen liikennevirta tiedetään epästabiiliksi kriittisessä liikennetiheydessä. Bose & Ioannou (2003) arvioivat myös automaattisten ajoneuvojen virrassa vastaavan tilanteen epästabiiliksi. Vastaavasti kuin manuaalisten ajoneuvojen liikennevirrassa, myös automaattiajoneuvojen virrassa välityskyky on saavutettu eikä tiellä ole enää ylimääräistä tilaa. Jos tällaisessa tilanteessa liikennevirrassa tapahtuu mikä tahansa häiriö, tämä johtaa jonoutumiseen ja ruuhkautumiseen samoin kuin manuaalisten ajoneuvojen virrassa.

Liikennevirran, joka koostuu sekä manuaalisista että automaattisista ajoneuvoista, peruskuvaaja on pelkkien manuaalisten ajoneuvojen liikennevirran ja pelkkien automaattisten ajoneuvojen liikennevirran peruskuvaajien välissä (Kuva 16). Vastaavasti kriittinen liikennetiheys on suurempi kuin täysin manuaalisessa liikennevirrassa, mutta pienempi kuin täysin automaattisessa liikennevirrassa. (Bose & Ioannou 2003)



Kuva 16. Liikennevirran peruskuvaaja 100-prosenttisesti manuaaliselle liikennevirralle, sekavirralla ja 100-prosenttisesti automaattiselle liikennevirralle. (Bose & Ioannou 2003)

Yuanin ym. (2009) simulointitutkimuksen tulosten mukaan liikennevirran välityskyky ja sitä vastaava liikennetiheys pienenevät ACC-ajoneuvojen kasvavan penetraation myötä (Kuva 17). Täydellä (100 %) ACC-penetraatiolla vapaan virran (F) maksimiliikennemäärä (q_{max}^f) on tavoiteaikavälillä (H_d) 1,0 sekuntia suurempi kuin pelkillä manuaalisilla ajoneuvoilla, mutta pienempi tavoiteaikaväleillä 1,5 sekuntia ja 2,0 sekuntia. Lisäksi ruuhkaisen peruskuvaajan osa (J) on täydellä ACC-penetraatiolla manuaalisten ajoneuvojen käyrän yläpuolella tavoiteaikaväleillä 1,0 sekuntia ja 1,5 sekuntia, kun taas tavoiteaikavälillä 2,2 sekuntia se jää manuaalisten ajoneuvojen käyrän alapuolelle.



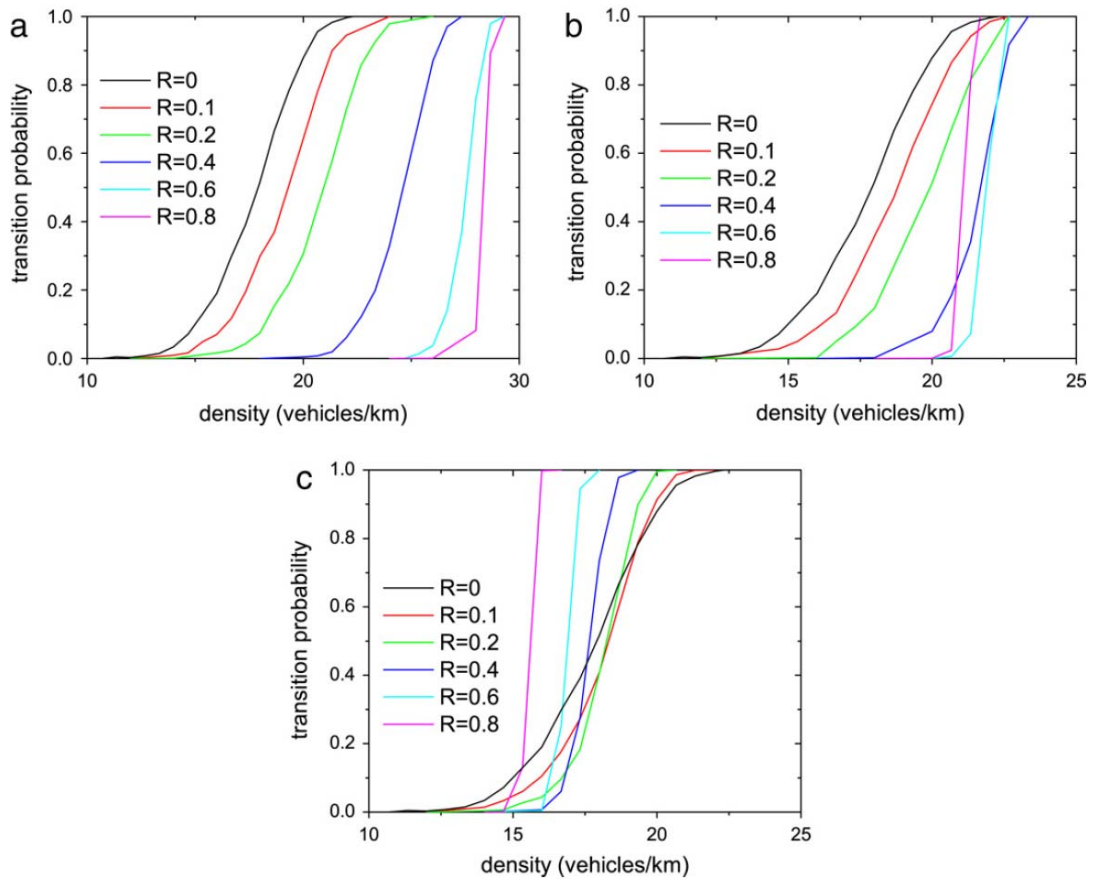
Kuva 17. Liikennevirran peruskuvaaja 100-prosenttisellä ACC-penetraatiolla (mustat kolmiot) ja 100-prosenttisellä manuaalisten autojen penetraatiolla (punainen)

käyrä). H_d on ACC:n tavoiteaikaväli. Punainen suora F edustaa vapaata liikennevirtaa, S synkronoitua ja J ruuhkautunutta. (Yuan ym. 2009)

Luttinen (1996) tutki 1990-luvulla aikavälejä kaksikaistaisilla teillä. Hänen aineistossaan aikavälijakauman moodi oli 1,53 sekuntia nopeusrajoitusalueilla 80–100 km/h. Tutkitut liikennemäärät eivät kuitenkaan olleet lähellä välityskykyä, joten voidaan arvioida, että arvo on yläkanttiin. Erityisesti kaksikaistaisilla teillä välityskykyyn vaikuttavat luonnollisesti myös ohitusmahdollisuudet.

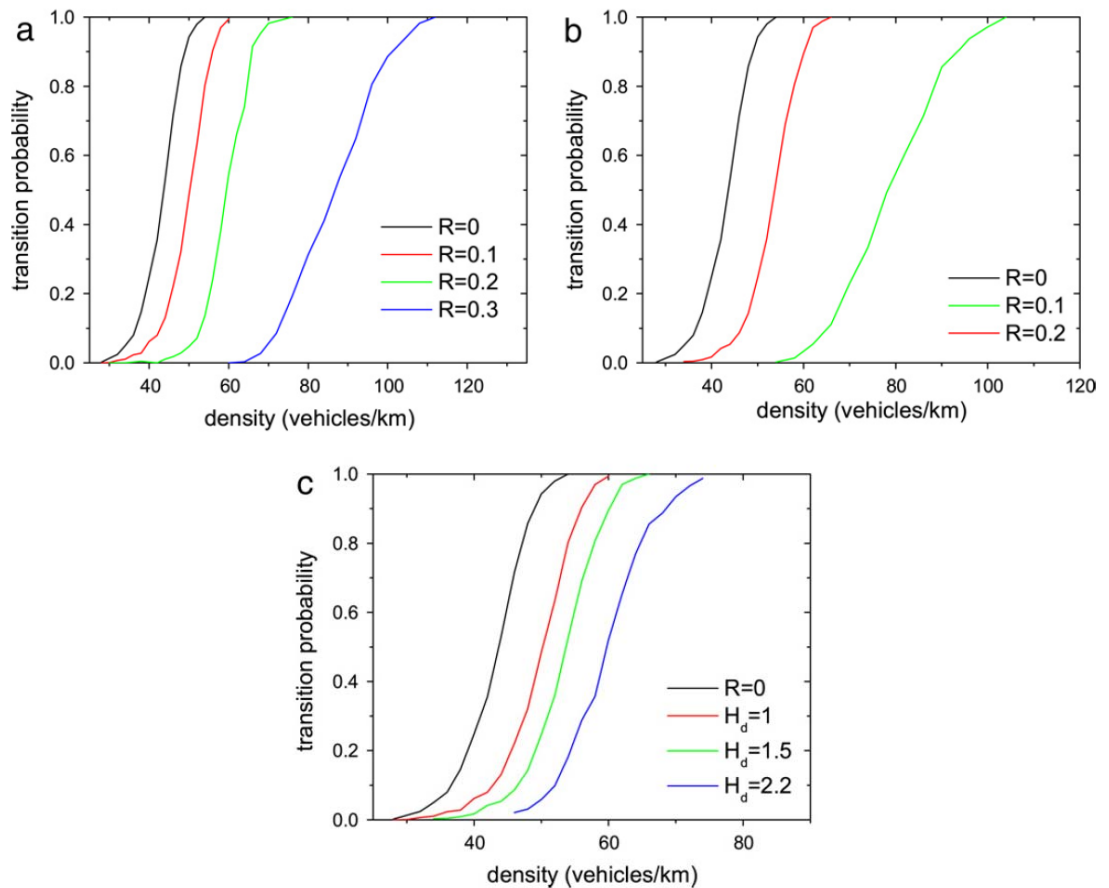
Yuan ym. (2009) tutkivat liikennettä, jossa on sekä ACC-ajoneuvoja että manuaalisia. Heidän tulostensa mukaan liikennetiheys, jossa liikennevirta muuttuu vapaasta virrasta synkronoiduksi¹ (synkronoitumistiheys), kasvaa ACC-penetraation kasvaessa (Kuva 18 a, tavoiteaikaväli 1,0 sekuntia). Jos tavoiteaikaväli on 1,5 sekuntia, synkronoitumistiheys vastaavasti kasvaa ACC-penetraation kasvaessa, mutta alkaakin laskea ACC-penetraation ylittäessä raja-arvon 60 % (Kuva 18 b). Tavoiteaikavälin ollessa 2,2 sekuntia synkronoitumistiheys pienenee ACC-penetraation kasvaessa, eli liikenne muuttuu helpommin vapaasta virrasta synkronoituneeksi (Kuva 18 c). Toisin sanoen: Jos automaattiajoneuvojen tavoiteaikaväli on 1,0 sekuntia, liikennevirta kykenee etenemään tavoitenopeudella sitä suurempaan liikennetiheyteen asti mitä suurempi on ACC-penetraatio. Jos tavoiteaikaväli on 1,5 sekuntia, ACC:lle on olemassa optimipenetraatio (60 %), joka maksimoi tavoitenopeudella etenevän liikennetiheyden. Tavoiteaikavälillä 2,2 sekuntia maksimiliikennetiheys, jolla liikennevirta kykenee vielä etenemään tavoitenopeudella, sitä vastoin pienenee ACC:n penetraation kasvaessa, eli ACC-ajoneuvot tekevät liikennevirrasta ruuhkaantumisherkemmän.

¹ Muutos vapaasta virrasta F synkronoituun virtaan S (Kuva 17), jossa liikennemäärä on maksimissaan ja tullaan tilanteeseen, jossa ajoneuvot eivät enää mahdu ajamaan tielle tavoitenopeudellaan ja aikavälillään, vaan liikennetiheyden kasvaessa nopeus ja liikennemäärä alkavat laskea.



Kuva 18. Liikenteen ruuhkautumisen (muutos vapaasta virrasta F synkronoituun virtaan S) todennäköisyys erilaisilla liikennetiheyksillä ja ACC-penetraatioilla (R). Kuvassa a tavoiteaikaväli (H_a) on 1,0 sekuntia, kuvassa b 1,5 sekuntia ja kuvassa c 2,2 sekuntia. (Yuan ym. 2009)

Tarkastellessaan muutosta synkronoidusta liikennevirrasta (S) täysin ruuhkautuneeseen (J) Yuan ym. (2009) saivat tulokseksi (Kuva 19), että muutos synkronoidusta virrasta täysin ruuhkautuneeseen on sitä epätodennäköisempi tietyllä liikennetiheydellä, mitä suurempi on ACC:n tavoiteaikaväli tai mitä suurempi on ACC-penetraatio. Yuanin ym. simuloinnit näyttivät, että jos liikenne ruuhkautuu esim. onnettomuuden takia, ruuhka katoaa nopeasti ACC-penetraation ollessa riittävän suuri. Mitä suurempi on tavoiteaikavälin suuruus, sitä pienempi on tämä penetraatio (1,0 s & 30 %, 1,5 s & 20 %, 2,2 s & 10 %).



Kuva 19. Liikenteen täydellisen ruuhkautumisen (muutos synkronoidusta virrasta S ruuhkautuneeseen virtaan J) todennäköisyys erilaisilla liikennetiheyksillä ja ACC-penetraatioilla (R). Kuvassa a tavoiteaikaväli (H_d) on 1,0 sekuntia ja kuvassa b 1,5 sekuntia ja kuvassa c ACC-penetraatio on 10 %. (Yuan ym. 2009)

5.2.2 Teiden välityskyky

Vaikka ACC voidaan laskea pääasiassa kuljettajan ajomukavuutta parantavaksi järjestelmäksi, sen on oletettu parantavan liikenteen välityskykyä tai helpottavan ruuhkia. Xiao & Gao (2010) tekivät yhteenvedon asiaa selvittäneistä tutkimuksista. Heidän mukaansa eritason simulointi- ja kentäkokeiden tulokset ovat ristiriitaisia. Tämä johtuu eroista simulointimalleissa, liikenneolosuhteissa, tien fyysisissä ominaisuuksissa, järjestelmän parametreissa (mm. aikavälit, maksimihidastuvuus), ACC:n penetraatioasteessa ja kuljettajakäyttäytymisessä.

Xiao & Gaon (2010) mukaan ACC:n on joissain tutkimuksissa osoitettu lisäävän välityskykyä tietyissä erityistilanteissa, kuten hyvin lyhyillä aikaväleillä ajettaessa, korkealla ACC-penetraatiolla ja paikoissa, joissa ei ole liikenteellisiä pullonkauloja. Esimerkiksi Broqua ym. (1991) saivat simulointitutkimuksessaan selville, että rampittomassa moottoritieympäristössä 1,0 sekunnin tavoiteaikavälillä liikenteen välityskyky kasvoi 6 % ja 13 %, kun ACC-penetraatio oli 20 % ja 40 %. Minderhoud & Bovy (2006) saivat tulokseksi, että hyvin pienellä tavoiteaikavälillä (0,8 s) ajettaessa ACC lisää välityskykyä jopa 12 %.

Xiao & Gaon (2010) mukaan toiset tutkimukset taas osoittivat, että ACC:llä olisi vain hyvin pieni vaikutus välityskykyyn tilanteissa, joissa tavoiteaikavälit ovat kohdallaisia tai liikenteellisissä pullonkaulapaikoissa. Esimerkiksi van der Werf ym. (2002) osoittivat, että liikenteen välityskyky kasvoi korkeintaan 7 %, kun ACC-

penetraatio oli 20–60 %, tavoiteaikaväli 1,4 sekuntia ja alueena oli pääteiden ramp-piliittymäalue. Minderhoud & Bovy (2006) saivat tulokseksi, että välityskyky kasvoi 4 %, kun tavoiteaikaväli oli 1,0 sekuntia, mutta he eivät havainneet välityskyvyssä merkitseviä muutoksia, jos tavoiteaikaväliksi asetettiin 1,2 sekuntia moottoritien ramppialueella. Leen ym. (2014) simulointitutkimuksessa rampillisen moottoritiejakson välityskyky parani vain 0,5–0,7 % CACC-penetraatioilla 10–30 % ja penetraatiolla 5 % muutos ei ollut tilastollisesti merkitsevä, kun tavoiteaikavälinä oli skenaarioittain joko 0,6 sekuntia tai 0,9 sekuntia. Alle 10 %:n CACC-penetraatio heikensi tien välityskykyä, kun rampin liikennemäärä oli 400–600 ajon./h. Välityskyvyn lasku johtui siitä, että rampilta ajoletkaan liittyvät ajoneuvot saivat päätien ajoneuvot laskemaan hetkeksi nopeuttaan, jotta saivat kasvatettua aikavälin taas tavoitteeseensa. Tämä saattaa aiheuttaa tiheässä liikennevirrassa shokkiaaltoja ylävirran suuntaan. Ngoduy (2012) havaitsi, että noin 1 km moottoritien rampista alavirtaan välityskyky kasvoi, kun ACC-penetraatio kasvoi 0 %:sta 10–30 %:iin ja tavoiteaikavälinä oli 2,0 sekuntia.

Xiao & Gaon (2010) mukaan kirjallisuus osoittaa, ettei ACC voi parantaa välityskykyä merkitsevästi tietyissä tilanteissa, kuten pitkällä tavoiteaikaväleillä ajettaessa. Esimerkiksi Broqua ym. (1991) havaitsivat maksimiliikennemäärässä 3 %:n ja 6 %:n laskun ACC-penetraatioilla 20 % ja 40 %, jos tavoiteaikaväli oli 2,0 sekuntia.

Xiao & Gao (2010) tekemän yhteenvedon mukaan liikenteen välityskyky kasvaa enemmän ACC-penetraation kasvaessa 20 %:sta 40 %:iin kuin 0 %:sta 20 %:iin. 40 %:a suuremmilla ACC-penetraatioilla ei näyttänyt olevan vaikutusta välityskykyyn (van der Werf ym. 2002). Lisäksi tavoiteaikaväli ei saa olla liian pitkä (yli 2,0 s), jotta voidaan saavuttaa välityskykyhyötyjä (Brackstone & McDonald 2000, Broqua ym. 1991, van Arem ym. 1996, Benz 1996). Lyhyen tavoiteaikavälin tuoma välityskykyhyöty tulee esiin myös yhteistoiminnallisen mukautuvan vakionopeussäätimen (cooperative ACC, CACC) vaikutuksiin liittyvissä tutkimuksissa. Arnaout & Bowling (2013) saivat tulokseksi omassa simulaatiotutkimuksessaan, että tien välityskyky ja nopeustaso paranivat tutkimuskohteena olleella 4-kaistaisella moottoritiejaksolla, jossa oli ramppiliittymä. Välityskyvyn parannus oli jopa 140 % ja nopeustason kasvu 180 %, kun CACC-penetraatioksi oletettiin 100 % ja tavoiteaikavälinä oli 0,5 sekuntia. Van Arem ym. (2006) saivat omassa tutkimuksessaan samansuuntaisen tuloksen tutkiessaan CACC:n vaikutuksia jonoutumiseen 4-kaistaisella päätiellä alueella, jossa kaistojen lukumäärä vähenee yhdellä aiheuttaen pullonkaulan. Heidän tulostensa mukaan välityskyky kasvoi suurilla liikennemäärillä, kun CACC-penetraatio oli yli 60 %. Tutkimuksessa CACC-ajoneuvojen tavoiteaikavälinä käytettiin 0,5 sekuntia, kun se ajoi toisen CACC-ajoneuvon takana, ja muuten 1,4 sekuntia.

Zhang ym. (2014) arvioivat rekkojen letka-ajon (platooning) vaikutuksia välityskykyyn. Heidän mukaansa kaavaillut letka-ajon välityskykyedut ovat epärealistisia, mikä johtuu käytännön rajoituksista. Esimerkkinä tästä on se, että pitkät rekkajonot estävät muita ajoneuvoja vaihtamasta kaistaa. Lisäksi ajoletkan muodostaminen on vaarallinen toimenpide, jossa rekkojen pitäisi käytännössä ajaa lähemmäksi toisiaan melko hitaasti. Letkaan liittyvät ja siitä poistuvat rekat, kaistanvaihdot ja liittymiset aiheuttavat koko liikennevirtaan huomattavaa turbulenssia. Tästä syystä letka-ajo on heidän mukaansa mahdollista vain sellaisilla ajoneuvoilla, jotka ajavat pitkää matkaa erityisillä letka-ajoon tarkoitetuilla kaistoilla. Verkottuneiden ajoneuvojen virrassa voidaan kokonaisuutta kuitenkin hahmottaa paremmin automaattiautojen määrän kasvaessa, jolloin letka-ajo onnistunee myös ilman erillisiä letka-ajokaistoja.

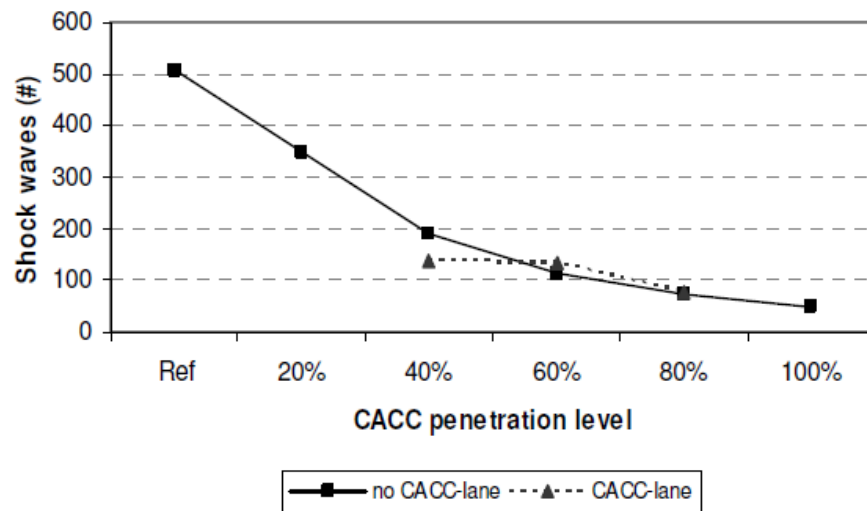
5.2.3 Shokkiaallot

Kirjallisuudesta löytyy useampi tutkimus, jonka tulokset viittaavat siihen, että ACC ja CACC tekevät liikennevirrasta vakaamman ja vähentävät shokkiaaltoja. Doi ym. (2014) osoitti kenttäkokeissaan, että jonossa ajettaessa manuaalinen ajoneuvo jarrutti aina viipeellä edellä ajavan jarruttaessa ja joutui näin ollen jarruttamaan voimakkaammin kuin edellä ajava ajoneuvo. CACC-ajoneuvolla viive oli lyhyempi, koska se hyödynsi edessä ajavien ajoneuvojen jarrutustietoja, eikä nopeus päässyt laskemaan yhtä alas. Näin ollen manuaalisilla ajoneuvoilla shokkiaalto voimistui edetessään jonossa, kun taas CACC-ajoneuvoilla se vaimeni. ACC-ajoneuvojen tulokset sijoituivat manuaalisten ajoneuvojen ja CACC-ajoneuvojen väliin.

Bose & Ioannou (2003) osoittivat, että ICC:llä varustetuista (intelligent cruise control, longitudinal control) automaattisista ja manuaalisista ajoneuvoista koostuvassa liikennevirrassa (sekavirta) shokkiaallot vaimenivat nopeammin ja shokkiaaltojen aiheuttama keskimääräinen viivytys oli lyhyempi kuin pelkistä manuaalisista ajoneuvoista koostuvassa liikennevirrassa. Myös Marsden ym. (2001) osoittivat, että jonossa seuraavan manuaalisen ajoneuvon nopeuskäyrä on huipukkaampi kuin ACC:lla varustetun automaattiajoneuvon.

Ngoduy (2012) tutki kaasu-kineettisellä mallilla rampittoman päätieosuuden liikennevirtaa, joka muodostui ACC-ajoneuvoista (tavoiteaikaväli 2 sekuntia) ja manuaalisista ajoneuvoista. Heidän tulostensa mukaan pysähtelevän (stop & go) liikenteen määrä väheni ACC-penetraation kasvaessa. Kun ACC-penetraatio oli 30 %, shokkiaallot katosivat ajan myötä ja liikennevirta muuttui vakaaksi. Ngoduy'n tulokset osoittavat, että ACC-penetraation kasvaessa shokkiaallot sekä liikkuvat nopeammin että katoavat nopeammin ylävirran suunnasta. Hän teki johtopäätöksen, että kasvava ACC-penetraatio tuo vakautta liikennevirtaan, vähentää shokkiaaltojen määrää ja aallon amplitudia (aallon huipun ja pohjan välinen erotus).

Ngoduy (2012) tutki ruuhkautumista myös rampillisella päätieosuudella. Kun kaikki ajoneuvot olivat manuaalisia, liikenteeseen aiheutui pahoja shokkiaaltoja, jotka liikkuivat ylävirtaan. Kun liikennevirrasta 10 % tai 20 % ajoneuvoista varustettiin ACC:llä, shokkiaallot vaimenivat selvästi, ja 30 %:n penetraatiolla liikennevirta oli ramppialueella vakaa. Ngoduy'n tulokset osoittavat, että ACC-ajoneuvot harmonisoivat nopeuden varianssin liikennevirrassa, mikä saa aikaan shokkiaaltojen katoamisen. Ngoduy (2013) sai vastaavan tuloksen myös CACC:n vaikutuksista shokkiaaltoihin. Tulokset osoittivat, että myös CACC vakautti liikennevirtaa ja vähensi shokkiaaltoja. Myös van Arem ym. (2006) saivat simulaatiotutkimuksessaan tulokseksi, että CACC vähentää shokkiaaltojen määrää pullonkaulan edellä (Kuva 20).



Kuva 20. Shokkiaaltojen määrä ennen pullonkaulaa eri CACC-penetraatioilla simulaatiotutkimuksessa, jossa tutkimusalueena 4-kaistainen päätie, jossa kaistojen lukumäärä laskee yhdellä muodostaen pullonkaulan. CACC-ajoneuvojen tavoiteaikavälinä käytettiin 0,5 sekuntia, kun se ajaa toisen CACC-ajoneuvon takana, ja muuten 1,4 sekuntia. (van Arem ym. 2006)

5.2.4 Sujuvuus

Kirjallisuus osoittaa, että automaation vaikutukset liikenteen sujuvuuteen voivat olla myönteisiä tai kielteisiä. Bose & Ioannou (2003) osoittivat, että ICC:llä varustetuista automaattisista ja manuaalisista ajoneuvoista koostuvan liikennevirran keskimääräinen viivytys pysähtelevässä liikennevirrassa oli lyhyempi kuin pelkistä manuaalisista ajoneuvoista koostuvassa liikennevirrassa ja ACC-penetraation (tavoiteaikaväli 1 sekunti) ollessa 50 % ajoneuvot etenivät 10,6 % pidemmälle aikayksikköä kohti kuin pelkistä manuaalisista ajoneuvoista koostuvassa liikennevirrassa samassa paikassa. Kesting ym. (2007) saivat tulokseksi omassa simulointitutkimuksessaan, että 10 %:n penetraatiolla ja yhden sekunnin tavoiteaikavälillä yksittäisten kuljettajien maksimiviivytys pieneni 30 % ja kumuloitu viivytys 50 %.

Lee ym. (2014) tutki simulointimallin avulla CACC:n vaikutuksia rampillisen moottoritiejakson liikennevirtaan. Kokonaismatka-aika lyheni keskimäärin 16,3 % ja keskinopeus 15,7 %, kun CACC-penetraatio oli 30 % ja tavoiteaikaväli 0,6 s tai 0,9 s. Pienemmillä 5, 10 tai 20 %:n CACC-penetraatioilla kokonaismatka-aikavaikutus oli vastaavasti 2,6 % / 5,2 % / 11,7 % ja keskinopeusvaikutus 2,5 % / 5,3 % / 11,5 %. Väliytysvaikutuksissa näiden kahden tavoiteaikavälin välinen ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Tulokseen vaikuttikin pääasiassa CACC-penetraatio ja päätien liikennemäärä. Leen ym. tulosten mukaan CACC auttoi rampilta saapuvia autoja saavuttamaan päätien nopeusrajoitusta vastaavan nopeuden, joka johti sujuvaan liittymiseen päätien liikennevirtaan, ja näin CACC-ajoneuvot pääsivät helpommin osaksi päätien ajoletkaa kuin manuaaliset ajoneuvot.

Van Arem ym. (2006) selvitti simulaatiotutkimuksessaan, CACC:n vaikutuksia jonnoutumiseen 4-kaistaisella päätiellä alueella, jossa kaistojen lukumäärä vähenee yhdellä aiheuttaen pullonkaulan. Tutkimuksessa CACC-ajoneuvojen tavoiteaikavälinä käytettiin 0,5 sekuntia, kun se ajaa toisen CACC-ajoneuvon takana, ja muuten 1,4 sekuntia. Heidän tulostensa mukaan 100 % CACC-penetraatiolla jonojen pituudet lyhenivät jopa 80 % ja nopeus nousi jopa 10 %. Alhainen (20 %) CACC-penetraatio sitä vastoin alensi keskinopeutta.

Davis (2004) sitä vastoin osoitti, että ACC-penetraatio 10 % on riittämätön ehkäisemään ruuhkaa 30 km/h ja sitä korkeammilla nopeustasoilla. Sitä vastoin heidän mukaansa ruuhka vähenee, jos ACC-penetraatio on 20 %. Vastaavasti van Arem (1996) osoitti, että 1,5 sekunnin tavoiteaikaväli kasvattaa matka-aikoja ja vähentää liikennevirran stabiiliutta (suurempi nopeuden hajonta) verrattuna 1,0 sekunnin aikaväliin, jos ACC-penetraatio on 40 %.

Marsden ym. (2003) saivat myös tulokseksi simulointitutkimuksessaan, että keskimääräinen matka-aika kasvoi ACC-penetraation kasvaessa. Tulos oli selvempi tavoiteaikavälillä 1,5 sekuntia kuin 1,2 sekuntia, mutta molemmilla samansuuntainen. Matka-ajan suhteellinen kasvu oli sitä suurempi, mitä suurempi liikennemäärä oli. Penetraatiolla ei kuitenkaan näyttänyt olevan vaikutusta ulomman kaistan ajoneuvojen keskinopeuteen kummallakaan tavoiteaikavälillä, kun liikennemäärä oli 5400–6000 ajon./h. Sitä vastoin sisemmällä kaistalla keskinopeus laski, kun tavoiteaikaväli oli 1,5 sekuntia, penetraatio 70 % ja liikennemäärä suuri (5700–6000 ajon./h). Ulomman kaistan tulos johtuu suuresta raskaiden ajoneuvojen määrästä (15 %) ulkokaistalla. Nopeuden keskihajonta kasvoi ohituskaistalla penetraation kasvaessa.

5.2.5 Yhteenveto liikennevirtavaikutuksista

Automaattiajoneuvojen liikennevirran peruskuvaaja (liikennetiheys–liikennemääräkuvaaja) on (teoriassa) kolmion muotoinen (Kuva 15). Pienillä liikennetiheyksillä ajoneuvot ajavat kaikki tavoitenopeutta (tyypillisesti nopeusrajoitus tai olosuhteisiin sopeutettu nopeustaso) ja pitävät vähintään tavoiteaikavälin edellä ajavaan. Kun tie tulee tavoitenopeudella ja -aikaväleillä täyteen, joutuvat automaattiajoneuvot(kin) laskemaan nopeuttaan mahtuakseen kaikki tielle säilyttäen tavoiteaikavälin edellä ajavaan. Se, nouseeko kolmio manuaalisten autojen peruskuvaajan ylä- vai alapuolella ja kuinka kauas siitä, on riippuvainen automaattiajoneuvojen keskimääräisestä tavoiteaikavälin pituudesta (Kuva 17). Jos keskimääräinen automaattiajoneuvojen tavoiteaikaväli on pidempi kuin manuaalisilla ajoneuvoilla, kolmion huippu on alempana kuin manuaalisten ajoneuvojen peruskuvaajan laki. Tällöin liikenteen maksimitiheys on alhaisempi kuin manuaalisilla ajoneuvoilla. Liikennevirran, jossa on sekä automaattisia että manuaalisia ajoneuvoja, peruskuvaaja sijoittuu puhtaasti automaattisten ajoneuvojen liikennevirran ja puhtaasti manuaalisten ajoneuvojen liikennevirran peruskuvaajien väliin (Kuva 16).

Automaattiajoneuvojen liikennevirrassa liikennemäärä on suurempi ja nopeustaso korkeampi kuin pelkkien manuaalisten autojen liikennevirrassa samalla liikennetiheydellä. Lisäksi tien välityskyky kasvaa. Jos automaattiajoneuvojen tavoiteaikaväli on kuitenkin ”liian” suuri (keskimäärin suurempi kuin manuaalisilla ajoneuvoilla), liikennemäärä ja tien välityskyky ovat pienempiä kuin pelkkien manuaalisten autojen liikennevirrassa. On myös huomattava, että hyvin pienillä ja hyvin suurilla liikennetiheyksillä peruskuvaajissa ei ole eroa automaattisten ja manuaalisten autojen liikennemäärissä tai nopeustasossa. Kriittistä tiheyttä suuremmilla tiheyksillä liikennevirta on yhtälailla epästabiili kuin manuaalisten autojen liikennevirrassa.

Jos automaattiajoneuvojen tavoiteaikaväli on pieni (esim. 1,0 s), liikenteen synkronoitumistiheys (muutos vapaasta virrasta synkronoituun) kasvaa automaattiautojen penetraation kasvaessa. Pidemmällä aikaväleillä (esim. 1,5 s), löytyy penetraatiolle raja-arvo (esim. 60 %), jonka alapuolella penetraation kasvu kasvattaa synkronoitumistiheyttä, mutta jonka yläpuolella se alkaakin laskea penetraation kasvaessa. Pitkillä tavoiteaikaväleillä (esim. 2,2 s) synkronoitumistiheys pienenee automaatti-

autojen penetraation kasvaessa, eli liikennevirta muuttuu helpommin vapaasta virrasta synkronoiduksi.

Kun tarkastellaan muutosta synkronoidusta liikennevirrasta täysin ruuhkautuneeseen, on löydetty tietty kriittinen automaattiautojen penetraatio, jota suuremmilla penetraatioilla liikennesuuhka ei enää muutu synkronoidusta liikennevirrasta täysin ruuhkaantuneeksi. Muutos synkronoidusta virrasta täysin ruuhkautuneeseen on myös sitä epätodennäköisempi tietyllä liikennetiheydellä ja automaattiajoneuvojen penetraatiolla (esim. 10 %), mitä suurempi on automaattiautojen tavoiteaikaväli.

Verkottunut automaattiajoneuvo reagoi edellä ajavan ajoneuvon nopeusmuutokseen nopeammin kuin manuaalinen ajoneuvo eikä joudu vastaavasti ylikompensoimaan nopeusmuutosta (ihmiskuljettaja tarvitsee reaktioajan aiheuttaman viipeen vuoksi nopeamman ja voimakkaamman jarrutuksen kuin edellä ajava). Tämän takia kasvava automaattiajoneuvojen penetraatio tuo vakautta liikennevirtaan, vähentää shokkiaaltojen määrää ja aallon amplitudia (aallon huipun ja pohjan välinen erotus). Automaattiajoneuvojen penetraation kasvaessa shokkiaallot liikkuvat nopeammin kuin manuaalisten ajoneuvojen virrassa, mutta ne myös katoavat nopeammin ylävirran suunnasta.

Liikennevirtavaikutusten kannalta olennaisia tekijöitä liikenteen automatisoitumisessa ovat automaation tason lisäksi automaattiajoneuvojen tavoiteaikaväli ja penetraatio sekä liikennetiheys. Liikennetiheyden pitää olla riittävä, jotta automaattiautoilla voisi olla vaikutusta liikenteen sujuvuudelle. Sujuvassa liikenteessä vaikutusta ei luonnollisestikaan ole.

5.3 Liikennevirtavaikutukset Suomessa

5.3.1 Skenaario 1

Tilanne

Skenaariossa 1 (Taulukko 3) automaatiotason 2 autoja alkaa olla liikenteessä (20 %), pääasiassa autot kuitenkin ovat vielä tasoa 0+1 (80 %). Automaatiotason 2 autot kykenevät esim. seuraamaan edellä ajavaa autoa tietyllä aikavälillä ja pitämään auton kaistalla ruuhkassa tai moottoriteillä, mutta kuljettaja vastaa kaikista muista dynaamiseen ajotehtävän osa-alueista ja on yhä vastuussa ajo-olosuhteiden tarkkailusta.

Jotta verkottuneet automaattiajoneuvot voisivat hyödyntää ajoneuvojen välistä tiedonvaihtoa, useamman verkottuneen automaattiajoneuvon pitäisi osua yhtä aikaa samalle alueelle. Kun automaattiajoneuvoja on vielä suhteellisen vähän, verkottumisen täysimittainen hyödyntäminen on vielä harvinaista ja monessa tilanteessa automaattiajoneuvot joutuvat toimimaan omien antureidensa pohjalta tapahtuvan tilannekuvatulkitun pohjalta (autonomisesti). Ajoneuvojen onkin oletettu toimivan autonomisesti.

Infrastruktuuri

Automaattiajamisen vaatimukset infrastruktuurin laadulle ovat suhteellisen korkeat (esim. hyvälaatuiset kaistamerkinnot ja tarkka digitaalinen infrastruktuuri). Tästä syystä automaattiajamisen mahdollistavia tiejaksoja on alussa vain melko vähän. Automaattiajoneuvojen yleistymisen alkuvaiheessa on todennäköistä, että automaat-

tiajamista tuetaan infrastruktuurin osalta ainoastaan valituilla tieosuuksilla, kuten moottoriteillä tai muilla korkeimman tärkeysluokan tieosuuksilla.

Välityskyky

Automaatiotason 2 ajoneuvojen lisäksi 5 % automaatiotason 1 ajoneuvoista on varustettu ACC:llä. Näin ollen ACC-autojen penetraatio on 24 % ($= 20 \% + 5 \% \cdot 80 \%$). Tämä on 19 %-yksikköä enemmän kuin skenaariossa 0 eli nykytilanteessa, jossa ACC-autojen penetraatioksi oletetaan Öörnin (2012) tutkimuksen perusteella 5 % autoista.

Edellä kerrottiin tutkimustulosten viittaavan siihen, että liikenteen välityskyky kasvaa enemmän ACC-penetraation kasvaessa 20 %:sta 40 %:iin kuin 0 %:sta 20 %:iin ja että 40 %:a suuremmilla ACC-penetraatioilla ei näyttänyt olevan vaikutusta välityskykyyn (Xiao & Gao 2010). Koska skenaariossa 1 on todennäköistä, että autot joutuvat toimimaan autonomisesti, on luultavaa, että siinä automaattiajoneuvojen tavoiteaikaväli on asetettu varsin pitkäksi (2 sekuntia). Näin ollen liikennevirran keskimääräinen tavoiteaikaväli olisi hieman pidempi (1,6 sekuntia) kuin kuljettajalla nykyään keskimäärin (1,5 sekuntia, Luttinen 1996). Tästä syystä skenaariossa 1 välityskyky ei kasva skenaarioon 0 verrattuna, vaan pienenee kuten Kuva 17 osoittaa. Välityskyvyn laskun suuruudeksi voidaan olettaa noin 5 %.

Shokkiaallot

Automaattiajoneuvot reagoivat nopeammin ja optimaalisemmin edessä ajavan ajoneuvon nopeusmuutoksiin kuin manuaalinen ajoneuvo. Jo 19 %-yksikköä suurempi ACC-autojen penetraatio (24 % penetraatio) vaikuttaa liikennevirtaan ympäristöissä ja tilanteissa, joissa kuljettajat ovat kytkeneet automatiikan päälle. Näin ollen shokkiaallot häviävät jonkin verran nykyistä nopeammin ja jäävät vaimeammiksi. Vaikutus on kuitenkin pienempi kuin verkottuneilla automaattisilla ajoneuvoilla.

Koska manuaalisen auton kuljettaja kuitenkin usein näkee edessään ajavien henkilöautojen läpi, mutta (ei-verkottunut) automaattiajoneuvo kykenee havainnoimaan vain edessään ajavan ajoneuvon suhteellisen sijainnin, on kuitenkin epävarmaa, olisiko vaikutus todellisuudessa yhtä positiivinen kuin yllä on esitetty. Tätä lisää automaattiajoneuvojen pitkä tavoiteaikaväli, joihin manuaaliset ajoneuvot voivat ohittaa ja näin lisätä shokkiaaltojen määrää.

Ylinopeudet

On oletettu, että kuljettaja asettaa ACC:lle tavoitenopeustason joko nopeusrajoituksen mukaiseksi tai hieman sen yläpuolelle. Räikeimmät nopeuden ylitykset vähenevät tämän myötä. Kaikki autoilijat eivät kuitenkaan aina kytke automatiikkaa päälle, vaan ajavat halutessaan yhä selvällä ylinopeudella.

Nopeusrajoitusten mukaan ajavat ajoneuvot vähentävät ylinopeuksia enemmän kuin niiden osuuden verran, sillä nopeusrajoituksen mukaisesti ajava ajoneuvo estää monessa tilanteessa myös takanaan ajavia ajamasta ylinopeutta. Ajonopeuksien hajonta liikennevirrassa pienenee.

Sujuvuus

Nopeuksien hajonnan pieneminen liikennevirrassa ja shokkiaaltojen nopeampi katoaminen tekevät liikennevirrasta vähemmän häiriöalttiin kuin se nykyään on. Pienentynyt välityskyky saa liikenteen kuitenkin ruuhkautumaan pienemmällä lii-

kennemäärällä ja -tiheydellä kuin nykyään. Sujuvuus siis paranee kriittiseen tiheyteen asti, mutta kriittinen tiheys laskee hieman. Suomessa niiden tieosuuksien määrä on kuitenkin pieni, joissa kriittinen liikennetiheys ylitettäisiin usein. Isolla osalla tieverkkoa sujuvuusvaikutus olisi siis positiivinen muutamia poikkeustilanteita lukuun ottamatta (esim. juhannusruuhka). Ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana nykyistä huonompi.

Automaattiajoneuvojen ansiosta peräänajo-onnettomuudet ja ketjukolarit vähenevät jonkin verran. Tästä on vaikutuksena niiden seurannaisruuhkien väheneminen. Kaistavahdin yleistymisen myötä myös suistumisonnettomuuksien määrä vähenee.

5.3.2 Skenaario 2

Tilanne

Skenaariossa 2 (Taulukko 3) autot ovat pääasiassa automaatiotasoa 2 (80 %), mutta liikenteessä on yhä jonkin verran tason 0+1 autoja (20 %). Automaatiotasolla 2 kuljettaja vastaa itse mm. kaistanvaihtoista, vaikka ajaisikin muuten automatiikalla tietyssä liikennetilanteessa.

On oletettavaa, ettei manuaalisilla autoilla ajavien vähemmistö ole satunnaisotos kuljettajista, vaan joukossa korostuvat ne, jotka nauttivat (manuaalisella autolla) ajamisesta ja ne, joilla on varaa vain halvimpiin/vanhoihin autoihin. Nuorten miesten ja vanhimpien kuljettajien osuus saattaa olla korostunut.

Infrastrukturi

Automaattiajamisen vaatimukset infrastruktuurin laadulle ovat suhteellisen korkeat (esim. hyvälaatuiset kaistamerkinnot tai tarkka digitaalinen infrastrukturi). Tästä syystä automaattiajamisen mahdollistavia tiejaksoja on alussa vain rajallisesti. Automaattiajoneuvojen yleistyessä tienkäyttäjiltä tuleva paine saada automaattiajamisen mahdollistavia teitä kasvaa.

Välityskyky

ACC:llä varustettujen ajoneuvojen osuus on 81 % ($= 80 \% + 5 \% \cdot 20 \%$). Vastavilla oletuksilla kuin skenaariossa 1, keskimääräiseksi liikennevirran tavoiteaikaväliksi saadaan 1,9 sekuntia.

Skenaarion 1 vaikutukset korostuvat: Teiden välityskyky laskee skenaarioon 1 verrattuna selvästi. Välityskyvyn lasku nykytilanteeseen (skenaario 0) verrattuna olisi luokkaa 20 %. Jos automaattiajoneuvo esim. säätää tavoiteaikavälään kelin mukaan, teiden välityskyky voi laskea erityisesti huonolla kelillä (esim. joululiikenteessä).

Shokkiaallot

Automaattiajoneuvot reagoivat nopeammin ja optimaalisemmin edessä ajavan ajoneuvon nopeusmuutoksiin kuin manuaalinen ajoneuvo. Automaattiautojen penetraatio on suurempi kuin skenaariossa 1. Näin ollen shokkiaallot häviävät sitä nopeammin ja jäävät vaimeammiksi.

Koska manuaalisen auton kuljettaja kuitenkin usein näkee edessään ajavien henkilöautojen läpi, mutta (ei-verkottunut) automaattiajoneuvo kykenee havainnoimaan vain edessään ajavaan, on kuitenkin epävarmaa, olisiko vaikutus todellisuudessa yh-

tä positiivinen kuin yllä on esitetty. Manuaalisten ajoneuvojen ohitukset automaatti-autojen ylläpitämiin tavoiteaikaväleihin ja niiden aiheuttamat shokkiaallot ovat yhä haaste, mutta manuaalisten ajoneuvojen määrä on selvästi pienempi kuin skenaariossa 1, joten myös vaikutus shokkiaaltojen määrään on pienempi.

Ylinopeudet

On oletettu, että kuljettaja asettaa ACC:lle tavoitenopeustason joko nopeusrajoituksen mukaiseksi tai hieman sen yläpuolelle. Räikeimmät nopeuden ylitykset vähenevät tämän myötä selvästi ACC-autojen suuren määrän takia (enemmän kuin skenaariossa 1). Kaikki autoilijat eivät kuitenkaan aina kytke automatiikkaa päälle, vaan ajavat halutessaan yhä (selvällä) ylinopeudella.

Nopeusrajoitusten mukaan ajavat ajoneuvot vähentävät ylinopeuksia enemmän kuin niiden osuuden verran, sillä nopeusrajoituksen mukaisesti ajava ajoneuvo estää monessa tilanteessa myös takanaan ajavia ajamasta ylinopeutta. Ajonopeuksien hajonta liikennevirrassa pienenee selvästi skenaarioon 0 verrattuna.

Sujuvuus

Nopeuksien hajonnan pieneminen liikennevirrassa ja shokkiaaltojen nopeampi katoaminen tekevät liikennevirrasta nykyiseen verrattuna vähemmän häiriöalttiin. Selvästi pienentynyt välityskyky saa liikenteen kuitenkin ruuhkautumaan pienemmällä liikennemäärällä ja -tiheydellä kuin nykyään. Sujuvuus siis paranee kriittiseen tiheyteen asti, mutta kriittinen tiheys pienenee. Säännöllisesti ruuhkautuvien tieosien määrä Suomessa kasvaa. Lisäksi ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana huonompi kuin tällä hetkellä.

Automaattiajoneuvojen ansiosta peräänajo-onnettomuudet ja ketjukolarit vähenevät. Tästä seuraa niiden aiheuttamien seurannaisruuhkien väheneminen. Kaistavahdin yleistymisen myötä myös suistumisonnettomuuksien määrä vähenee.

Jos ruuhka-ajoavustin on yleinen tason 2 automaation muoto, saattaa ruuhkassa ajamisen kynnys madaltua niillä, jotka ovat manuaalisilla autoilla ajoittaneet matkansa ruuhkahuipun ulkopuolelle, mikä pahentaisi ruuhkahuippuja entisestään.

5.3.3 Skenaario 3

Tilanne

Skenaariossa 3 (Taulukko 3) autot ovat pääasiassa automaatiotasoa 3 (80 %), mutta liikenteessä jonkin verran tason 2 autoja (20 %). Tasolla 3 ajoneuvo hoitaa lähes kaiken ajamiseen liittyvän, mutta kuljettajan pitää kuitenkin yhä olla valppaana ottamaan auto hallintaansa. Kun autopilotti kytkeytyy pois päältä ja siirtää (yllättäen) vastuun kuljettajalle, kestää aikansa ennen kuin kuljettaja saa auton hallintaansa ja on valmis toimimaan vallitsevan liikennetilanteen edellyttämällä tavalla.

On oletettavaa, että skenaariossa 3 ainakin automaatiotasoa 3 ajoneuvot ovat verkottuneita. Lisäksi oletetaan, että autoissa on hätäjarrutusjärjestelmä, joka tehostaa auton pysäyttämistä automatiikalla ajettaessa.

Infrastruktuuri

Liikenteen automatisoitumisen tuomat edut saadaan hyödynnettyä vain siltä osin kuin infrastruktuuri on riittävän korkeatasoinen automaattiajamisen mahdollista-

miseksi. Tässä vaiheessa päätieverkko ja tärkeimmät kadut voidaan olettaa infrastruktuurin laadultaan sellaisiksi, että ne mahdollistavat automaattiajamisen. Talvel-la teiden kunnossapito ei kuitenkaan välttämättä vielä riitä pitämään teitä siinä kun-nossa, että automaattiajaminen voidaan taata aina.

Välityskyky

Skenaariossa 3 kaikissa ajoneuvoissa olisi ACC. Muutos teiden välityskyvyssä riip-puu selvästi automaattiajoneuvojen keskimääräisestä tavoiteaikavälistä. Automaat-tiotason 3 ajoneuvot oletetaan verkottuneiksi. Automaattiotason 2 ajoneuvot sitä vas-toin ovat vielä pääosin autonomisia. Autonomisissa autoissa tavoiteaikaväli olete-taan 2 sekunniksi ja verkottuneissa 1 sekunniksi. Tosin ei-verkottunutta ajoneuvoa seurattessaan verkottunutkin ajoneuvo pitää 2 sekunnin aikavälin edellä ajavaan.

Vaikka autoilija voi säätää tavoiteaikaväliasetuksia tehdasasetuksista, on oletetta-vaa, että hyvin harva säätää niitä. Alkuun 1 sekunnin aikaväli voi tuntua hurjalta, mutta voidaan olettaa, että siihen tottuu ja autoilijoiden subjektiivinen onnettomuus-riski pysyy hyväksyttävänä.

Liikennevirran keskimääräinen tavoiteaikaväli on hieman lyhyempi kuin skenaar-iorissa 0 (1,4 sekuntia) ja selvästi lyhyempi kuin skenaariossa 2 (1,9 sekuntia). Siten teiden välityskyky kasvaa nykytilanteeseen verrattuna korkeintaan 7 %.

Shokkiaallot

Autot ovat verkottuneita ja automaation aste on korkeampi kuin skenaariossa 2. Verkottuneet automaattiajoneuvot reagoivat siis vielä nopeammin ja optimaalisem-min edessä ajavan ajoneuvon nopeusmuutoksiin kuin automaattiotason 2 ajoneuvo. Näin ollen shokkiaallot häviävät yhä nopeammin ja jäävät vaimeammiksi.

Ylinopeudet

On oletettavaa, että tason 3 automaattiajoneuvoissa on nopeusrajoitustieto eivätkä autot aja automatiikalla ylinopeutta. Näin ollen automaattiajoneuvojen suuri osuus vähentäisi ylinopeuksia merkittävästi (enemmän kuin automaattiajoneuvojen penet-raation verran). Automatiikka kattaa skenaarion 2 tilannetta laajemman kirjon ajo-ympäristöjä ja -olosuhteita. Tästä syystä nopeustason hyöty saadaan skenaariota 2 laajemmalti.

Kuhunkin tilanteeseen määritettyjen suositusnopeuksien välittäminen verkottunei-siin ajoneuvoihin antaa mahdollisuuden hallita liikennevirtaa ja vähentää liikenteen onnettomuusriskiä.

Sujuvuus

Nopeuksien hajonnan pieneneminen liikennevirrassa ja shokkiaaltojen nopeampi katoaminen vähentävät liikennevirran häiriöalttiutta nykyisestä. Lisäksi kasvava vä-lityskyky saa liikenteen ruuhkautumaan vasta suuremmalla liikennemäärällä ja -tiheydellä kuin nykyään. Sujuvuus siis paranee kriittiseen tiheyteen asti, ja kriit-tinen tiheys kasvaa jonkin verran. Säännöllisesti ruuhkautuvien tieosien määrä Suomessa vähenee. Lisäksi ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana parempi kuin tällä hetkellä.

Automaattiotason 3 ruuhka-ajomatemiikalla ajettaessa ihminen voi vaikkapa aloit-taa jo autossa päivän sähköposteihin vastaamisen. Näin ruuhkassa ajamisen kynnys

saattaa madaltua edelleen skenaarioon 2 verrattuna niillä, jotka ovat manuaalisilla autoilla ajoittaneet matkansa ruuhkahuipun ulkopuolelle. Tämä lisää liikenteen määrää ruuhkahuippujen aikana. Tämä vaikutus lienee kuitenkin pienempi kuin välityskyvyn kasvu.

Kun autopilotti kytkeytyy pois päältä ja siirtää (yllättäen) vastuun kuljettajalle, kestää aikansa (joidenkin tutkimusten mukaan jopa 25 sekuntia) ennen kuin kuljettaja saa auton täysin hallintaansa. Tämä voi saada aikaan uudenlaisia onnettomuuksia ja niiden seurauksena ruuhkia. Sitä vastoin suistumisonnettomuuksien määrä vähenee kaistavahdin ansiosta, mikä myös kompensoi edellistä vaikutusta.

5.3.4 Skenaario 4

Tilanne

Skenaariossa 4 (Taulukko 3) kaikki autot ovat automaatiotasoa 4. Tällöin auto hoitaa ajamisen (lähes) kaikissa tilanteissa. Skenaariossa 4 ajoneuvot oletetaan verkottuneiksi. Lisäksi oletetaan, että autoissa on hätäjarrutusjärjestelmä, joka tehostaa auton pysäyttämistä automatiikalla ajettaessa.

Jos automaattiautolla ajamista väsyneenä, sairaana, humalassa tms. ei estetä alkoluokalla tai muulla kuljettajan tilan arvioivalla järjestelmällä, ei aina voida olla varmoja, onko kuljettaja ajokelpoinen niissä harvoissa tilanteissa, joissa automatiikka yhä joutuu luovuttamaan ajovastuun hänelle. Automaattiajoneuvo ajaa tiensivuun ja pysähtyy sinne, jos sillä ei ole edellytyksiä jatkaa ajamista turvallisesti vallitsevassa tilanteessa eikä kuljettaja ota autoa haltuunsa.

Infrastrukturi

Skenaariossa 4 on sama infrastruktuurivaatimus kuin skenaariossa 3, jotta liikenteen automatisoitumisen edut saadaan hyödynnettyä. Päätieverkon ja tärkeimpien katu-
jen infrastrukturi voidaan olettaa laadultaan sellaisiksi, että se mahdollistaa automaattiajamisen. Talvella tämä tieverkko pyritään pitämään kunnossapidon keinoin siinä kunnossa, että automaattiajaminen on silloinkin mahdollista.

Koska verkottuneisiin automaattiajoneuvoihin saadaan dynaaminen nopeusrajoitus-
tieto, riittää, että maastossa on vain regulatiiviset merkit ja liikenneoperaattori antaa suositusnopeuksia kulloisenkin tilanteen mukaan. Tämä antaa uuden mahdollisuuden hallita liikennevirtaa ja vähentää onnettomuusriskiä poikkeusolosuhteissa.

Välityskyky

Muutos teiden välityskyvyssä riippuu paljon automaattiajoneuvojen tavoiteaikavälistä. Kun kaikki autot ovat automaattisia, verkottuneita ja varustettuja automaattisella hätäjarrutusjärjestelmällä, joka tehostaa auton pysähtymistä automatiikalla ajettaessa, tavoiteaikaväli voidaan asettaa lyhyemmäksi kuin alemmilla automaatiotasolla (1 sekuntia). Teiden välityskyky voi kasvaa keskimääräisen tavoiteaikavälin lyhenemisen seurauksena nykytilanteeseen verrattuna jopa 50 %.

On toivottavaa, että tavoiteaikavälin pituus on riippuvainen kelistä. Näin ollen välityskyvyn kasvu koskisi vain olosuhteita, joissa keli on hyvä. Alkuvaiheessa automaattiautojen kitkan tunnistus ei välttämättä ole kovin kehittynyt/luotettava, mutta päästäessä automaatiotasolle 4 tämäkin asia lienee kunnossa.

Shokkiaallot

Autot ovat verkottuneita ja ajavat (lähes) täysin automaattisesti. Verkottuneet automaattiajoneuvot reagoivat viipymättä ja optimaalisesti edessä ajavien ajoneuvojen nopeusmuutoksiin. Näin ollen shokkiaallot häviävät nopeasti ja jäävät vaimeiksi.

Ylinopeudet

Tason 4 automaattiajoneuvoissa on nopeusrajoitustieto. Automatiikalla ajettaessa ajoneuvo ei aja ylinopeutta. Näin ylinopeudet vähenevät merkittävästi, jopa lähes kokonaan.

Liikennevirtaa voidaan hallita määrittämällä kuhunkin tilanteeseen ja paikkaan sopivin suositusnopeus.

Sujuvuus

Normaalitilanteissa verkottuneet tason 4 automaattiautot ajavat hyvin sujuvasti, onnettomuuksia on vähän, mikä vähentää niiden seurauksena syntyviä ruuhkia. Lisäksi kasvava välityskyky saa liikenteen ruuhkautumaan vasta entistä suuremmalla liikennemäärällä ja -tiheydellä kuin edellä. Sujuvuus paranee kriittiseen tiheyteen asti ja kriittinen tiheys kasvaa. Säännöllisesti ruuhkautuvien tieosien määrä Suomessa vähenee entisestään. Lisäksi ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana nykyistä parempi.

Ruuhkassa ajamisen kynnys saattaa madaltua edelleen skenaarioon 3 verrattuna niillä, jotka ovat manuaalisilla autoilla ajoittaneet matkansa ruuhkahuipun ulkopuolelle. Tämä lisää ruuhkahuippujen liikennemäärää. Automaattiajoneuvojen manuaalisia ajoneuvoja lyhyemmän tavoiteaikavälin aikaansaama kasvanut välityskyky riittää kuitenkin kompensoimaan kasvaneet huipputuntien liikennemäärät.

Moottoritien varteen tai muihin hankaliin paikkoihin pysähtyneet automaattiautot voivat tuoda uuden riskin ja aiheuttaa ruuhkaa luomalla liikenteellisiä pullonkauloja. Verkottuneet ajoneuvot voivat kuitenkin varoittaa toisiaan pysähtyneistä ajoneuvoista, mikä vähentää onnettomuusriskiä. Liikenteen sujuvuuden turvaaminen vaatii dynaamista reititystä automaattiajoneuvoissa.

Periaatteessa automaatiotason 4 ajoneuvovirta 100 % automaatiopenetraatiolla saat-taisi kyetä ajamaan turvallisesti nykyistä korkeammilla nopeustasoilla. On kuitenkin hyvin mahdollista, ettei sujuvuus ole tärkein kriteeri nopeusrajoituksia asetettaessa, vaan meluhaitat ja päästöt ovat etusijalla. Näin ollen voi myös olla, että nopeustasoa lasketaan taajama-alueilla, ainakin dynaamisesti tietyissä olosuhteissa tai tiettyinä kellonaikoina.

5.4 Yhteenveto liikennevirtavaikutuksista Suomessa

Alla on esitetty yhteenveto automatisoitumisen liikennevirtavaikutuksista Suomessa (

Taulukko 6). Skenaarioissa 3 ja 4 automaattiajoneuvot on oletettu verkottuneiksi, sitä alhaisemmilla autonomisiksi. Taulukko näyttää, miten myönteiset liikennevirta-vaikutukset saadaan vasta automaatiotasoilla 3–4 (skenaariot 3 ja 4) ja automaatiotason 2 autoilla (skenaariot 1 ja 2) vaikutukset voivat olla jopa kielteisiä.

Taulukko 6. Liikenteen automatisoitumisen liikennevirtavaikutusten yhteenveto; SAE = automaatiotaso. Taulukossa + = myönteinen muutos, – = kielteinen muutos ja 0 = ei muutosta. Mitä useampi merkki, sitä suurempi on vaikutus.

	Skenaario 1: (SAE 0+1 80 %, SAE 2 20 %)	Skenaario 2: (SAE 0+1 20 %, SAE 2 80 %)	Skenaario 3: (SAE 2 20 %, SAE 3 80 %)	Skenaario 4: (SAE 4 100 %)
Välityskyky	-	--	+	+++
Shokkiaallot	0/+	0/++	+++	++++
Ylinopeudet	0/+	0/++	+++	++++
Sujuvuus	-/+	--/++	++	++++

6 Liikennejärjestelmätason vaikutukset

6.1 Tarkastelutapa

Automaattiajoneuvojen yleistymisen vaikuttaa liikennevirran ominaisuuksiin mm. nopeuteen, aikavälien jakaumaan ja sujuvuuteen. Nämä vaikutukset heijastuvat matkapäättöksiin, liikenteen turvallisuuteen, energiakulutukseen, päästöihin, meluun ja mm. yhdyskuntarakenteeseen.

Tässä luvussa käsitellään soveltuvien osin automaattiajoneuvojen vaikutusta palvelutasoindikaattoreihin, jotka on esitetty Liikenneviraston julkaisussa Pitkien matkojen ja kuljetusten palvelutaso (Weiste ym. 2014). Skenaarioita 1–4 verrataan skenaarioon 0 eli nykytilaan.

6.2 Liikennejärjestelmävaikutukset Suomessa

6.2.1 Tieliikenteen turvallisuus

Vuonna 2013 Suomessa kuoli 162 autossa matkustanutta henkilöä eli 63 % kaikista tieliikenne-onnettomuuksissa kuolleista, joista autojen välisissä onnettomuuksissa kuoli 87 henkilöä (34 %) ja autojen peräänajo-onnettomuuksissa 13 henkilöä (5 %). Autojen suistumisonnettomuuksissa kuoli 77 henkilöä (30 %), kevyen liikenteen onnettomuuksissa 59 henkilöä (23 %) ja alkoholi- ja muissa päihdetapauksissa 66 henkilöä (26 %) (Tilastokeskus ja Liikenneturva 2014).

Skenaariossa 1 mukautuvan vakionopeuden säätimen ansiosta peräänajo-onnettomuudet ja ketjukolarit vähenevät jonkin verran. Kaistavahdin ansiosta myös suistumisonnettomuuksien määrä vähenee hieman. Jos tason 2 automaattiajoneuvoissa vakionopeus asetetaan lähelle nopeusrajoitusta, automaattiajoneuvot vähentävät ylinopeuksia enemmän kuin niiden osuuden verran, sillä nopeusrajoituksen mukaisesti ajava ajoneuvo estää monessa tilanteessa myös takanaan ajavia ajamasta ylinopeutta. Myös tämä nopeuden alenema vähentää onnettomuuksia. Suomessa kaistavahdin on arvioitu vähentävän kuolemia 19,8 % ja mukautuvan vakionopeussäätimen lisäävän kuolemia 0,8 % (Rämä et al. 2009), mikäli kaikissa ajoneuvoissa ovat nämä järjestelmät. eImpact-projektissa (Wilmink et al 2008) arvioitiin järjestelmien vaikutuksia eri penetraatioasteilla, joten sen tulokset soveltuvat paremmin skenaariotarkasteluun. Niiden mukaan kaistavahti vähentää EU-tasolla kuolleiden lukumäärää 15,2 % ja mukautuva vakionopeudensäädin 1,4 % penetraatioasteella 100 %. Kuolleiden lukumäärän vähenemä eImpactin tuloksiin perustuvan laskelman mukaan on tässä skenaariossa 7 %, mutta epävarmuustekijöiden takia vähenemäksi oletetaan 5–10 %.

Skenaariossa 2 mukautuvan vakionopeudensäätimen yleistymisen ansiosta peräänajo-onnettomuudet ja ketjukolarit vähenevät. Kaistavahdin yleistymisen vähentää suistumis- ja kohtaamisonnettomuuksia. Jos tason 2 automaattiajoneuvoissa vakionopeus asetetaan lähelle nopeusrajoitusta, automaattiajoneuvot vähentävät ylinopeuksia enemmän kuin niiden osuuden verran, sillä nopeusrajoituksen mukaisesti ajava ajoneuvo estää monessa tilanteessa myös takanaan ajavia ajamasta ylinopeutta. Myös tämä nopeuden alenema vähentää onnettomuuksia. Mikäli tekniset järjestelmät toimivat oikein, ja niitä myös käytetään, automaattiajoneuvot vähentäisivät kuolleiden lukumäärää eImpactiin tuloksiin perustuvan laskelman mukaan 13 %. Epävarmuustekijöiden takia vähenemäksi oletetaan 10–15 %,

Skenaariossa 3 80 % autoista on varustettu automatiikalla, joka ehkäisee peräänajoja ja tieltä suistumisia, mikäli tekniset järjestelmät toimivat oikein ja niitä myös käytetään. Kuolleiden lukumäärän vähenemäksi oletetaan 40–70 % niillä teillä, joilla automaattiajaminen on mahdollista.

Skenaariossa 4 kuolleiden lukumäärän vähenemäksi oletetaan 70–80 %, mikäli kuljettajat reagoivat ja ottavat auton hallintaansa ajoissa.

Tosin huonot sää- ja keliolosuhteet voivat vaikuttaa järjestelmien toimivuuteen. Mahdolliset tietoturvaluutteen heikentäisivät turvallisuutta. Jos tekniset järjestelmät eivät toimi oikein, onnettomuudet voivat olla kohtalokkaampia kuin nykyisin, koska autot saattavat kulkea nopeammin ja lähempänä toisiaan. Turvallisuutta saattaa heikentää myös automaattitason 4 ajoneuvojen valmistaminen kevyistä materiaaleista, joiden törmäyskestävyys ei välttämättä ole nykyautojen luokkaa. Kuljettajien huomio saattaa kohdistua myös muuhun kuin ajamiseen heidän luottaessa järjestelmien varoittavan ajoissa. Matkustajat voivat vähentää turvavöiden käyttöä tehdessään olonsa mukavaksi turvalliseksi koetussa ympäristössä. Muut tiellä liikkujat saattavat käyttäytyä entistä varomattomammin. On myös mahdollista, että kuljettajien auton hallintaan ottaminen epäonnistuu ja aiheuttaa onnettomuuksia.

6.2.2 **Matka-aika**

Tällä hetkellä yli 40 % autoista ajaa maanteillä ylinopeutta (Liikennevirasto 2014). Tieliikenteen automatisoituessa vakionopeuden säätimen yleistyminen vähentänee ylinopeuksia ja keskinopeutta, toisaalta ruuhkautumisen väheneminen nostaa keskinopeutta. Mikäli nopeusrajoituksia ei muuteta ja nopeustasoksi valitaan nopeusrajoitus, vilkkaassa liikenteessä keskinopeus kasvaa ja hiljaisessa liikenteessä pienenee.

Skenaariossa 1 onnettomuuksien pieni väheneminen vähentää hieman onnettomuuksista aiheutuvia ruuhkia ja lyhentää matka-aikaa. Jos tason 2 automaattiajoneuvot ajavat suunnilleen nopeusrajoituksen mukaista nopeutta, automaattiajoneuvot vähentävät ylinopeuksia enemmän kuin niiden osuuden verran, sillä nopeusrajoituksen mukaisesti ajava ajoneuvo estää monessa tilanteessa myös takanaan ajavia ajamasta ylinopeutta.

Edellä sujuvuuden arvioitiin paranevan mm. nopeushajonnan pienenemisen myötä kriittiseen tiheyteen asti, mutta kriittinen tiheys laskee hieman (välityskyky pienenee 5 %). Isolla osalla tieverkkoa sujuvuusvaikutus olisi positiivinen muutamia poikkeustilanteita lukuun ottamatta (esim. juhannusruuhka). Ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana nykyistä huonompi.

Skenaariossa 2 onnettomuuksien väheneminen vähentää onnettomuuksista aiheutuvia ruuhkia ja lyhentää matka-aikaa. Jos tason 2 automaattiajoneuvot ajavat suunnilleen nopeusrajoituksen mukaista nopeutta, automaattiajoneuvot vähentävät ylinopeuksia enemmän kuin niiden osuuden verran, sillä nopeusrajoituksen mukaisesti ajava ajoneuvo estää monessa tilanteessa myös takanaan ajavia ajamasta ylinopeutta. Jos automaattiajoneuvo esim. säätää tavoiteaikataikaväliään kelin mukaan, teiden välityskyky voi laskea erityisesti huonolla kelillä (esim. joululiikenteessä). Tällöin voi matka-aika kasvaa.

Edellä arvioitiin, että liikennevirta on skenaariossa 2 nykyiseen verrattuna vähemmän häiriöaltis. Selvästi pienentynyt välityskyky saa liikenteen kuitenkin ruuhkautumaan pienemmällä liikennemäärällä ja -tiheydellä kuin nykyään. Sujuvuus siis pa-

raanee kriittiseen tiheyteen asti, mutta kriittinen tiheys pienenee. Säännöllisesti ruuhkautuvien tieosien määrä Suomessa kasvaa. Lisäksi ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana huonompi kuin tällä hetkellä.

Skenaariossa 3 onnettomuuksien vähenemisen aiheuttama ruuhkien väheneminen lyhentää tuntuvasti matka-aikaa. Automaattijoneuvot kulkevat maanteillä lähes aina nopeusrajoitusnopeudella (aina ajaessaan automatiikalla). Automaattijoneuvot suosivat sujuvimpia reittejä. Sujuvuus paranee ja kriittinen tiheys kasvaa jonkin verran. Säännöllisesti ruuhkautuvien tieosien määrä Suomessa vähenee. Lisäksi ruuhkaantuvilla tieosilla sujuvuus olisi ruuhka-aikana parempi kuin tällä hetkellä. Automaattiajamisen vaikutus on suurimmillaan juhlapyhien ja viikonlopun meno- ja paluuliikenteessä sekä arkipäivien aamu- ja iltaruuhkassa. Pysäköimistä helpottavat järjestelmät lyhentävät myös jonkin verran ovelta ovelle -matka-aikaa.

Skenaariossa 4 vilkkaassa liikenteessä ruuhkien ja häiriöiden vähenemisen ansiosta keskinopeus kasvaa ja matka-aika lyhenee. Se lyhenee myös liikenneonnettomuuksien vähenemisen seurauksena. Teiden välityskyky kasvaa selvästi. Ajoneuvojen keskinopeus on maanteillä lähellä nopeusrajoitusnopeutta, sillä autot eivät aja automatiikalla ylinopeutta. Automaattijoneuvot suosivat sujuvimpia reittejä. Liikennejärjestelmän ajantasaisen tilannekuvan perusteella optimoivat liittymien ohjausjärjestelyt kasvattavat liittymien välityskykyä ja lyhentävät siten niissä kuluvaa aikaa. Automaattiajamisen vaikutus on suurimmillaan juhlapyhien ja viikonlopun meno- ja paluuliikenteessä sekä arkipäivien aamu- ja iltaruuhkassa. Pysäköimistä helpottavat järjestelmät lyhentävät myös jonkin verran ovelta ovelle -matka-aikaa.

6.2.3 Hallittavuus

Hallittavuudella tarkoitetaan tässä kuvaa liikennejärjestelmän tilasta ja palveluista.

Skenaariossa 1 osasta liikennejärjestelmää on internetin kautta saatavissa ajantasainen kuva liikennejärjestelmän tilasta, joka välittyy myös osaan ajoneuvoista.

Skenaariossa 2 suuresta osasta liikennejärjestelmää ja suurella osalla autoista on käytössään ajantasainen kuva liikennejärjestelmän tilasta.

Skenaariossa 3 melkein kaikissa ajoneuvoissa on kattava ajantasainen liikennekuva liikennejärjestelmän tilasta.

Skenaariossa 4 liikennejärjestelmän tilasta on kattava ajantasainen kuva.

6.2.4 Ennakoitavuus

Ennakoitavuudella tarkoitetaan tässä matkan toteutumista ennakoidun aikataulun mukaisesti ilman yllätyksiä. Matkojen kestoa voidaan ennakoida liikennejärjestelmän ajantasaisen kuvan avulla. Automaattiajamisen vaikutus on suurimmillaan juhlapyhien ja viikonlopun meno- ja paluuliikenteessä sekä arkipäivien aamu- ja iltaruuhkassa.

Skenaariossa 1 ruuhkien ja häiriöiden pieni väheneminen mahdollistaa matkojen ja kuljetusten toteutumisen hieman ennakoidummin kuin nykyisin. Joidenkin matkojen ajankohta ja reitti voidaan valita liikenteen ajantasaisen tilannekuvan perusteella.

Skenaariossa 2 ruuhkien ja häiriöiden väheneminen mahdollistaa matkojen ja kuljetusten toteutumisen ennakoidummin kuin nykyisin. Useimpien matkojen ajankoh- ta ja reitti voidaan valita liikenteen ajantasaisen tilannekuvan perusteella.

Skenaariossa 3 matkat ja kuljetukset toteutuvat useimmiten ennakoidun aikataulun mukaisesti ruuhkien vähenemisen seurauksena. Matkojen ajankohta ja reitti voidaan valita liikenteen ajantasaisen tilannekuvan perusteella.

Skenaariossa 4 matkat ja kuljetukset toteutuvat lähes aina ennakoidun aikataulun mukaisesti ruuhkien vähenemisen seurauksena. Matkojen ajankohta ja reitti voidaan valita liikenteen ajantasaisen tilannekuvan perusteella. Automaattiajoneuvot ohja- taan edullisimmalle reitille. Automaattiajamisen vaikutus on suurimmillaan juhla- pyhien ja viikonlopun meno- ja paluuliikenteessä sekä arkipäivien aamu- ja iltaruuhkassa.

6.2.5 Esteettömyys

Skenaariossa 1 ei vaikutusta.

Skenaariossa 2 ei vaikutusta.

Skenaariossa 3 ainakin osa vanhuksista voi jatkaa ajamistaan siirtymällä automaat- tiajoneuvon kuljettajaksi. Osa muistakin ihmisistä, jotka syystä tai toisesta eivät aja nykyisin autoa, voi tulevaisuudessa ajaa automaattiajoneuvoa.

Skenaariossa 4 ainakin osa vanhuksista voi jatkaa ajamistaan siirtymällä automaat- tiajoneuvon kuljettajaksi. Osa muistakin ihmisistä, jotka syystä tai toisesta eivät aja nykyisin autoa, voivat ajaa tulevaisuudessa automaattiajoneuvoa.

6.2.6 Matkustusmukavuus

Skenaariossa 1 automaattiajoneuvojen tasainen ja pehmeä kulku lisää matkustus- mukavuutta.

Skenaariossa 2 automaattiajoneuvojen tasainen ja pehmeä kulku lisää matkustus- mukavuutta.

Skenaariossa 3 Automaattiajoneuvojen tasainen ja pehmeä kulku lisää matkustus- mukavuutta. Osa kuljettajista voi matkan aikana myös esim. työskennellä, lukea, käyttää internetiä tai rentoutua muuten vaan, mutta heidän on oltava valmiita otta- maan ajoneuvo hallintaansa.

Skenaariossa 4 auton tasainen ja pehmeä kulku lisää matkustusmukavuutta. Kuljet- taja voi matkan aikana myös esim. työskennellä, lukea, käyttää internetiä tai rentou- tua muuten vaan. Vain poikkeustapauksissa heidän on otettava ajoneuvo hallintaan- sa.

6.2.7 Ympäristövaikutukset

Skenaarion 1 häiriöttömämmässä liikennevirrassa auton energiankulutus on hie- man vähäisempää kuin usein seisahtelevassa liikenteessä.

Päästöjen määrä riippuu paljon energian kulutuksesta, joten myös automaattiautojen päästöt ovat kuljettajien ohjaamien autojen päästöjä pienemmät.

Ylinopeuksien väheneminen ja tasaisemmin ajaminen synnyttävät hieman vähem- män melua.

Skenaarion 2 häiriöttömämmässä liikennevirrassa auton energiankulutus on vähäisempää kuin seisahtelevassa liikenteessä.

Päästöjen määrä riippuu paljon energian kulutuksesta, joten myös automaattiautojen päästöt ovat kuljettajien ohjaamien autojen päästöjä pienemmät.

Ylinopeuksien väheneminen merkittävästi ja tasaisemmin ajaminen aiheuttavat vähemmän melua.

Skenaarion 3 tasaisessa liikennevirrassa auton energiankulutus on vähäisempää kuin seisahtelevassa liikenteessä. Chan 2012 arvioi, että letka-ajossa perässä kulkevan ajoneuvon kulutus on 16 % ja vetävän ajoneuvon 8 % pienempi kuin yksinään liikkuvan ajoneuvon polttoaineenkulutus.

Päästöjen määrä riippuu paljon energian kulutuksesta, joten myös automaattiautojen päästöt ovat kuljettajien ohjaamien autojen päästöjä pienemmät.

Ylinopeuksien väheneminen merkittävästi ja tasaisemmin ajaminen aiheuttavat vähemmän melua.

Skenaarion 4 tasaisessa liikennevirrassa auton energiankulutus on vähäisempää kuin ruuhkan seisahtelevassa liikenteessä. Onnettomuuksien aiheuttamien häiriöiden vähäisyys vähentää myös energian kulutusta. On arvioitu, että letka-ajossa perässä kulkevan ajoneuvon kulutus on 16 % ja vetävän ajoneuvon 8 % pienempi kuin yksinään liikkuvan ajoneuvon polttoaineenkulutus (Chan 2012).

Toisaalta automaattiajoneuvot valmistettaneen kevyemmistä materiaaleista, toisaalta ne voivat olla suurempia kooltaan mukavuuden lisäämiseksi, joten automaattiajoneuvojen ominaisenergiankulutusta on vaikea ennustaa.

Päästöjen määrä riippuu vahvasti energian kulutuksesta, joten myös automaattiautojen päästöt ovat kuljettajien ohjaamien autojen päästöjä pienemmät.

Melua syntyy vähemmän tasaisemmin ajamalla.

Tosin, jos matkat pitenevät ja lisääntyvät, saattavat energiankulutus ja päästöt jopa lisääntyä. Samoin vaikuttaa mahdollinen nopeusrajoitusten nostaminen melun lisääntymisen lisäksi.

6.2.8 Käyttäjien kustannukset

On arvioitu (EY 2012), että verkottuneen auton lisävarustelujen hinta on 350 USD vuonna 2017 ja 300 USD vuonna 2022. Korkean automaatiotason autonomisen ajoneuvon hintaero tavalliseen autoon verrattuna olisi 7 000–10 000 USD vuonna 2025, 5000 USD vuonna 2030 ja 3000 USD kalliimpi vuonna 2035.

Skenaariossa 1 tason 2 automaattiajoneuvot ovat kalliimpia kuin perinteiset autot, koska automatiikkaa mahdollistavia järjestelmiä tuodaan ensin kalleimpiin malleihin, ainakin aluksi. Autojen huolto- ja korjauskustannukset voivat toisaalta kasvaa, kun autoon tuodaan uusia osia, toisaalta ne voivat pienetä, koska automatiikka säästää moottoria. Niiden polttoainekustannukset ovat pienempiä pienemmän kulutuksen vuoksi. Turvallisuuden paraneminen saattaa pienentää vakuutusmaksuja. Automaattiajaminen vähentäne myös sakkoja.

Skenaariossa 2 tason 2 automaattiajoneuvojen hinnat laskevat tuotannon lisääntyessä. Autojen huolto- ja korjauskustannukset voivat toisaalta kasvaa, kun tuodaan

autoon uusia osia, toisaalta ne voivat pienetä, koska automatiikka saattaa säästää moottoria. Niiden polttoainekustannukset ovat pienempiä pienemmän kulutuksen vuoksi. Turvallisuuden paraneminen saattaa pienentää vakuutusmaksuja. Automaattiajaminen vähentänee myös sakkoja.

Kuljetuskustannukset pienenevät kuljetusaikojen lyhetessä, koska kalustokierto nopeutuu ja työkustannukset pienenevät.

Skenaariossa 3 tason 3 autonomiset ajoneuvot ovat kalliimpia kuin perinteiset autot ainakin aluksi, samoin niiden huolto- ja korjauskustannukset. Niiden polttoainekustannukset ovat pienempiä pienemmän kulutuksen vuoksi. Turvallisuuden paraneminen puolestaan pienentää vakuutusmaksuja. Automaattiajaminen vähentänee myös sakkoja.

Kuljetuskustannukset pienenevät kuljetusaikojen lyhetessä, koska kalustokierto nopeutuu ja työkustannukset pienenevät.

Skenaariossa 4 automaattiajoneuvojen hinnat laskevat tuotannon lisääntyessä, mutta ne ovat edelleen kalliimpia kuin perinteiset autot, samoin niiden huolto- ja korjauskustannukset. Niiden polttoainekustannukset ovat pienempiä pienemmän kulutuksen vuoksi. Turvallisuuden paraneminen pienentää puolestaan vakuutusmaksuja. Automaattiajaminen vähentänee myös sakkoja.

Kuljetuskustannukset pienenevät kuljetusaikojen lyhetessä, koska kalustokierto nopeutuu ja työkustannukset pienenevät.

Tosin automaattiajoneuvojen korkea hinta saattaa lisätä joukkoliikenteen tai yhteiskäyttöisten ajoneuvojen käyttöä. Edellinen parantaa joukkoliikenteen palvelutasoa ja lisää edelleen sen käyttöä, mikä vähentää liikennesuoritetta. Jälkimmäisessä tapauksessa joukkoliikenteen käyttö vähenee, ja siten liikennesuorite kasvaa. Yhteiskäyttöisen ajoneuvon korkea hinta kuitenkin kasvattaa matkan hintaa, mikä taas saattaa vähentää liikennesuoritetta. Suoritteen muutoksen etumerkki riippuu siitä, kumpi näistä vaikutuksista on suurempi.

6.2.9 Yhdyskuntarakenne ja yhteydet

Skenaarioissa 1 ja 2 ei vaikutusta.

Skenaariossa 3 matka-ajan lyhetessä ihmiset saattavat tehdä automaattiajoneuvoiltaan pidempiä ja useampia matkoja. He voivat muuttaa kauemmaksi työpaikoistaan. Myös työpaikat saattavat muuttaa kauemmaksi kaupunkikeskustoista halvemmille alueille. Nämä seikat johtavat yhdyskuntarakenteen hajoamiseen, jolloin joukkoliikenteen palvelutaso saattaa heiketä ja käyttö vähetä. Sama vaikutus on uusien ihmisryhmien siirtymisellä autonkuljettajiksi. Seurauksena on liikennesuoritteen kasvu, joka vähentää automaattiajamisen positiivisia vaikutuksia.

Skenaariossa 4 matka-ajan lyhetessä ihmiset saattavat tehdä automaattiajoneuvoiltaan pidempiä ja useampia matkoja. He voivat muuttaa kauemmaksi työpaikoistaan. Myös työpaikat saattavat muuttaa kauemmaksi kaupunkikeskustoista halvemmille alueille. Nämä seikat johtavat yhdyskuntarakenteen hajoamiseen, jolloin joukkoliikenteen palvelutaso saattaa heiketä ja käyttö vähetä. Sama vaikutus on uusien ihmisryhmien siirtymisellä autonkuljettajiksi. Seurauksena on liikennesuoritteen kasvu, joka vähentää automaattiajamisen positiivisia vaikutuksia.

Tosin automaattinen pysäköinti tehostaa pysäköintitilojen käyttöä ja vapauttaa tilaa muuhun käyttöön kaupunkien keskustassa. Ajoneuvojen korkea hinta saattaa lisätä joukkoliikenteen tai yhteiskäyttöisten ajoneuvojen käyttöä. Edellinen parantaa joukkoliikenteen palvelutasoa ja lisää edelleen sen käyttöä, ja jälkimmäinen vähentää ajoneuvojen lukumäärää ja pysäköintiä.

6.2.10 Infrastrukturi

Skenaariossa 1 automaattiajaminen edellyttää jo korkeatasoista kunnossapitoa: tiemerkintöjen täytyy olla korkealaatuisia. Automaattiajoneuvojen yleistymisen alkuvaiheessa on todennäköistä, että automaattiajamista tuetaan infrastruktuuripuolella ainoastaan rajallisilla tieosuuksilla, kuten moottoriteillä tai muilla korkeimman tärkeysluokan tieosuuksilla.

Skenaariossa 2 automaattiajamisen vaatimukset infrastruktuurin laadulle ovat suhteellisen korkeat. Järjestelmien toiminta vaatii mm. laadukkaat kaistamerkinnot ja/tai tarkan digitaalisen tietoinfrastruktuurin. Tästä syystä automaattiajamisen mahdollistavia tiejaksoja on alussa vain rajallisesti. Automaattiajoneuvojen yleistymässä tienkäyttäjiltä tuleva paine saada automaattiajamisen mahdollistavia teitä kasvaa.

Skenaariossa 3 automaattiajoneuvojen vaatima kaistaleveys pienenee. Tällöin välityskyky kasvaa ja/tai osa kaistoista ja väylistä voidaan vapauttaa muuhun käyttöön, esimerkiksi kevyelle tai joukkoliikenteelle. Jotta liikenteen automatisoitumisen tuomat edut voidaan hyödyntää, täytyy infrastruktuuri saada laajalti riittäviksi: kaistamerkinnot pitää olla laadukkaita ja/tai tarvitaan tarkka digitaalinen tietoinfrastruktuuri, eikä tienvarren kasvillisuutta tai muuta näköesteitä saa olla liian lähellä ajorataa. Tietyömaista, hoito- ja kunnossapitotoimenpiteistä samoin kuin erikoiskuljetuksista täytyy välittää ajoneuvoihin ajantasaiset tiedot. Kapeilla kaistoilla kaistavahdin käyttö saattaa lisätä päällysteen urautumista ja päällystämiskustannuksia. Letka-ajo saattaa edellyttää kantavampia tierakenteita.

Skenaariossa 4 täytyy infrastruktuurin olla kauttaaltaan automaattiajamiseen sopiva.

6.2.11 Talous

Skenaariossa 1 väylien kunnossapitotarve ja tietopalvelujen kysyntä lisääntyvät hieman.

Skenaariossa 2 väylien kunnossapitotarve, ajoneuvojen huoltotarve ja tietopalvelujen kysyntä lisääntyvät.

Skenaariossa 3 väylien kunnossapitotarve, ajoneuvojen huoltotarve ja tietopalvelujen kysyntä lisääntyvät. Liikenneonnettomuuksien väheneminen vaikuttaa kolariteollisuuteen: korjaamoja tarvitaan vähemmän tai ainakin ne muuttuvat ja vakuutus- sekä terveyspalveluiden kysyntä pienenee. Myös liikennevalvontaa tarvitaan vähemmän.

Skenaariossa 4 väylien kunnossapitotarve, ajoneuvojen huoltotarve ja tietopalvelujen kysyntä lisääntyvät. Liikenneonnettomuuksien väheneminen vaikuttaa kolariteollisuuteen: korjaamoja tarvitaan vähemmän tai ainakin ne muuttuvat ja vakuutus- sekä terveyspalveluiden kysyntä pienenee. Myös liikennevalvontaa tarvitaan vähemmän.

Laskelma

Alla olevassa taulukossa 7 on esitetty automaattiajamisen onnettomuuskustannussäästöt ja automaattiajamisen edellyttämät talvihoidon lisäkustannukset vuodessa. Onnettomuussäästöjä laskettaessa on tehty seuraavat oletukset:

- Kaistavahdin ja mukautuvan vakionopeuden säätimen vaikutukset Suomen maanteillä 2013 tapahtuneiden kuolemien ja loukkaantumisten lukumääriin ovat eImpact-projektin mukaiset (Wilmink ym. 2008).
- Kuolleiden ja loukkaantuneiden lukumäärän (Liikennevirasto 2014) yksikkökustannuksilla (Tervonen & Ristikartano 2010) painotettu suhteellinen muutos on sama kuin kaikkien onnettomuuskustannusten (Kallberg 2013) muutos.
- Automaattinen ajaminen edellyttää tehostettua talvihoitoa.
- Jos kaikkien päällystettyjen teiden reunaviivojen pitää talvella näkyä, se kaksinkertaistaa talvihoitokustannukset, jotka ovat nykyisin n. 108 M€ (Rajala 2014).
- Reunaviivat ovat näkyvissä näillä teillä 95 % ajasta.
- Näiden teiden osuus suoritteesta on 83 % (Liikennevirasto 2014).
- Muilla teillä automaattiajaminen on erittäin hankalaa.

Taulukko 7. Liikenteen automatisoitumisen onnettomuuskustannussäästöt ja automaattiajamisen edellyttämät talvihoidon lisäkustannukset vuodessa

Skenaario	Onnettomuuskustannus- vähenemä (Me)	Talvihoidon lisäkustannukset (Me)
1	(108)	(108)
2	203	108
3	1233	108
4	1545	108

Vuotuiset onnettomuuskustannussäästöt ylittävät huomattavasti vuotuiset talvihoidon lisäkustannukset. On huomattava, että lisäkustannuksia tulee verkottuneen ajoneuvon vaatimasta tietoinfrastruktuurista, ehkä myös teiden urautumisen lisääntymisestä. Lisäsäästöjäkin tullee uusien väylien rakentamis- ja olemassa olevien väylien leventämistarpeen vähetessä. Sitä paitsi laskelma ei sisällä aika- eikä ajoneuvokustannussäästöjä.

6.3 Yhteenvedo liikennejärjestelmätason vaikutuksista Suomessa

Taulukossa 8 on esitetty yhteenvedo tieliikenteen automatisoitumisen liikennejärjestelmätason vaikutuksista Suomessa.

Taulukko 8. Liikenteen automatisoitumisen liikennevirtavaikutusten yhteenvedo; AT = automaatiotaso. Taulukossa + = myönteinen muutos, – = kielteinen muutos, 0 = ei muutosta ja --/+ + on vaihteluväli. Mitä useampi merkki, sitä suurempi on vaikutus.

Palvelutasoindikaattori	Skenaario			
	Skenaario 1 (SAE 0+1 80 %, SAE 2 20 %)	Skenaario2 (SAE 0+1 20 %, SAE 2 80 %)	Skenaario 3 (SAE 2 80 %, SAE 3 20 %)	Skenaario 4 (SAE 4 100 %)
Turvallisuus	+	++	+++	++++
Matka-aika	0/+	0/+	0/++	0/+++
Ennakoitavuus	+	++	+++	++++
Esteettömyys			+	+++
Hallittavuus	+	++	+++	++++
Matkustusmukavuus	+	++	+++	++++
Ympäristövaikutukset	+	++	-/+++	-/++++
Käyttäjien kustannukset	-	-/++	-/++	--/++
Yhdyskuntarakenne ja yhteydet			--/+	--/++
Infrastruktuurikustannukset	-	--	---/+	----
Talous	+	++	-/++	-/+++
Liikennesuorite		-/+	-/+	-/+

7 Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli tehdä arvio tieliikenteen automatisoitumisen vaikutuksista Suomessa. Tarkastelun pääkohteina olivat kuljettajien käsitykset automaattiajosta ja käyttäytyminen sekä vaikutukset liikennevirtaan ja liikennejärjestelmään. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin katsaus automaattiajoneuvojen teknisestä kehityksestä.

Automaattisten ajoneuvojen teknologiassa suurin haaste on ympäristönhavainnoinnin kehittyminen sekä teknisesti että taloudellisesti. Teknisesti suurin haaste on kehittää auton tilannetietoisuus sille asteelle, että voidaan olla varmoja sen kyvystä sekä havaita että reagoida oikein kaikkiin liikenneympäristössä esiintyviin tilanteisiin. Taloudellinen haaste on tuottaa tämä kyky niin kustannustehokkaasti, että se olisi kannattavaa autonvalmistajille ja autoilijoiden maksuhalukkuuden puitteissa. Teknisesti lähimpänä kaupallistamista lienevät ruuhka-ajoavustimet. Ruuhka-ajossa ajetaan alhaisella nopeudella ja järjestelmävirheet johtavat lähinnä peltivaurioihin. Ympäristönhavainnoinnin ei tarvitse myöskään olla kovin kehittynyttä, mikä laskee järjestelmän hintaa. Automaattiajamisen kehittämiseksi lainsäädännön pitäisi sallia ainakin testaustoiminta, muuten järjestelmien kyvystä toimia Suomen olosuhteissa ei saada oikeaa kuvaa. Suomessa osoitteita ei ole linkitetty kiinteistöjen sisäänajovyliin, joten esimerkiksi robottitaksien käyttöönotto edellyttää osoitejärjestelmän uusimista. Automaattiajamisen tukemiseksi Digiroad-aineiston mittatarkkuutta pitäisi edelleen parantaa ja täydentää sitä myös maamerkkiaineistolla.

Autonkuljettajan päätöksentekotasojen (strateginen, taktinen, operationaalinen) tarkastelu osoittaa, että taktisen tason kuormitus vähenee automaation lisääntymisen alkuvaiheessa ja täysin automaattisessa liikenteessä lähes ihmisen kapasiteetti vapautuu kokonaan muihin tehtäviin kuin auton ajamiseen. Tehtäviä siirtyy taktiselta tasolta auton hoidettavaksi, kun auto hoitaa etäisyyden, nopeuden ja tiellä pysymisen. Osa tehtävistä voi siirtyä strategiselle tasolle: matkaa suunnitellaan ja ajamiseen liittyviä valintoja tehdään aikaisempaa enemmän jo ennen liikkeelle lähtöä. Ennen laajan automaation toteutumista suuria ongelmia näyttää syntyvän taktisen tason yllättävistä kuormituspiikeistä, kuljettajan tilannetietoisuuden säilyttämisestä sekä sopivan sisäisen mallin valitsemisesta ja toimintastrategian toteutumisesta tilanteissa, joissa niitä tarvitaan.

Tutkimuksessa luotiin viisi skenaariota nykytilasta (100 % SAE 0–1) korkeaan automaatioon (100 % SAE 4). Liikennevirtavaikutuksissa liikenteen automatisoitumisen positiiviset vaikutukset näkyvät vasta automaatiotasolla 3 (skenaario 3). Tällöin selvästi positiivisia vaikutuksia löytyy kaikilta osa-alueilta (välityskyky, shokkiaallot, ylinopeudet ja sujuvuus). Automaatiotasolla 4 vaikutukset ovat vielä positiivisemmat. Liikenne on sujuvaa ja ruuhkia vähemmän, koska ruuhkautumiseen johtava liikennemäärä- ja tiheys ovat suuremmat. Lisäksi liikennevirta on tasaisempaa, ylinopeuksia on vähän ja shokkiaallot katoavat nopeasti. Alemman automaatiotason autonomisten ajoneuvojen muodostamassa liikennevirrassa välityskyky heikkenee, shokkiaaltojen määrä ja ylinopeudet voivat kyllä vähentyä, mutta nykytilanteeseen verrattuna liikenne ruuhkautuu liikennetiheyden ollessa pienempi ja matkanopeudet ruuhkassa ovat nykyistä alhaisempia. On huomattava, että tämä perustuu olettamukseen, että skenaarioissa 1 ja 2 automaattiautojen tavoiteaikaväli on noin 2 sekuntia eli manuaaliliikenteen tyypillisiä aikavälejä pidempi.

Liikennejärjestelmätason vaikutukset ovat hyvin pieniä automaatiotasolla 1, mutta selvästi näkyvissä jo automaatiotasolla 2 (skenaario2). Tällöin turvallisuuden paraneminen vähentää liikennehäiriöitä ja ruuhkia. Liikenteestä tulee siten ennakoitavampaa, mukavampaa ja ympäristöä säästävämpää. Toisaalta infrastruktuurikustannukset kasvavat hieman. Talvihoidon kustannukset kasvavat, jos teitä pidetään laajasti automaattiajamisen edellyttämässä kunnossa. Automaatiotasolla 3 (skenaario 3) myönteiset vaikutukset ovat melko suuria, mutta myös negatiivisia ympäristövaikutuksia voi syntyä liikennesuoritteiden mahdollisesti kasvaessa. Automaatiotasolla 4 myönteiset vaikutukset ovat suurimmat. Ihmiset, jotka eivät kykene ajamaan nykyisiä autoja, saattavat ryhtyä automaattiajoneuvojen kuljettajiksi. Yhdyskuntarakenteen mahdollisesti hajotessa joukkoliikenteen palvelutaso saattaa heiketä ja liikennesuoritteet kasvaa, josta aiheutuu negatiivisia ympäristövaikutuksia.

Alla liikenteen automatisoitumisen päävaikutuksista on esitetty yhteenveto skenaarioittain:

Skenaarion 1 (SAE 0+1 80 %, SAE 2 20 %) päävaikutukset:

Kuljettajan tukijärjestelmät alkavat yleistyä ja tietoisuus niistä lisääntyy. Käyttökokemus on kuitenkin vielä vähäistä. Nopeusrajoituksia noudatetaan hieman paremmin, ajoetäisyydet voivat kasvavaa vähän ja vuorovaikutus jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden kanssa voi parantua hieman.

Liikenteen välityskyky heikkenee hieman, samoin sujuvuus ruuhkissa. Ruuhkien ulkopuolella sujuvuus kuitenkin paranee jonkin verran, samoin räikeiden ylinopeuksien määrä. Shokkiaallot katoavat jonkin verran nopeammin kuin nyt ja jäävät vaimeammiksi.

Liikennejärjestelmätason vaikutukset ovat pieniä. Useimmat vaikutukset ovat myönteisiä, mutta infrastruktuurin kustannukset kasvavat. Osa käyttäjien kustannuksista pienenee osa kasvaa. Myös liikennesuorite voi pienetä tai kasvaa.

Skenaarion 2 (SAE 0+1 20 %, SAE 2 80 %) päävaikutukset:

Navigaattorit ovat laajasti käytettävissä. Nopeudet alenevat jonkin verran. Kuljettajat alkavat saada kokemusta automaattisista järjestelmistä. Kaistalla pysymisen tuki estää osan kohtaamis- ja suistumisonnettomuuksista. Vuorovaikutus kuljettajien kesken vähenee automatiikan tukemien toimintojen osalta.

Liikenteen välityskyky heikkenee edelleen, koska ajoneuvojen keskimääräinen aikaväli liikennevirrassa kasvaa. Liikenne ruuhkautuu pienemmillä liikennemäärillä ja -tiheyksillä, ja sujuvuus on ruuhkassa huonompi kuin nykyään. Kriittistä liikennetiheyttä pienemmillä tiheyksillä liikenne on jonkin verran sujuvampaa kuin nyt. Shokkiaallot katoavat nopeammin kuin nyt ja jäävät vaimeammiksi. Räikeiden ylinopeuksien määrä vähenee edelleen.

Turvallisuuden paraneminen vähentää liikennehäiriöitä ja ruuhkia. Liikenteestä tulee siten ennakoitavampaa, mukavampaa ja ympäristöä säästävämpää. Infrastruktuurikustannukset kasvavat hieman. Talvihoidon kustannukset kasvavat, jos teitä pidetään laajasti automaattiajamiseen sopivassa kunnossa.

Skenaarion 3 (SAE 2 20 %, SAE 3 80 %) päävaikutukset:

Automaatio siirtää matkan suunnittelupäätöksiä taktiselta tasolta strategiselle tasolle. Välittömään kuljettajan tekemään havainnointiin perustuva vuorovaikutus toisiin tienkäyttäjiin vähenee. Nopeuden valinta harmonisoituu ja ajoetäisyydet ovat lyhyitä. Ajaminen muuttuu taloudellisemmaksi. Kuljettajilla voi olla vaikeuksia, kun järjestelmä pyytää palaamaan ajotehtävän suorittamiseen. Erikoistilanteissa ajoneuvo voi joutua pysähtymään. Vuorovaikutus heikkenee erityisesti kevyen liikenteen osapuolten kanssa, mikä voi heikentää liikenteen sujuvuutta.

Liikenteen välityskyky teillä kasvaa, samoin kriittinen liikennetiheys, koska automaatiotason 3 ajoneuvot on oletettu verkottuneiksi ja ajavan manuaalisia ajoneuvoja lyhyemmin aikavälein. Ruuhkassa ja sujuvassa liikenteessä liikenne on sujuvampaa kuin nykyään. Ylinopeuksia ja shokkiaaltoja on selvästi nykyistä vähemmän, ja shokkiaallot vaimenevat nopeasti.

Liikenneturvallisuus paranee huomattavasti, joskin voi tapahtua uuden tyyppisiä automatiikasta johtuvia onnettomuuksia. Matkustaminen sujuu muuten häiriöttä, liikenne soljuu tasaisesti ja tuottaa entistä vähemmän kielteisiä ympäristövaikutuksia, elleivät matkat pitene ja liikennesuorite kasva. Autoilusta tulee kuitenkin entistä kalliimpaa. Talvihoidon kustannukset kasvavat. Joidenkin ammattikuntien tarve pienenee, toisten kasvaa.

Skenaarion 4 (SAE 4 100 %) päävaikutukset:

Kuljettaja päättää reitin etukäteen ja syöttää järjestelmälle. Kuljettaja on yleensä matkustajan roolissa. Tästä poiketaan vain harvoin, ja tällöin auto voi joutua pysähtymään. Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus on vähentynyt, mutta jalankulkijat ja pyöräilijät ovat jossain määrin sopeutuneet tilanteeseen.

Liikenteen välityskyky teillä kasvaa entisestään, samoin kriittinen liikennetiheys. Ruuhkassa ja sujuvassa liikenteessä liikenne on sujuvampaa kuin nykyään. Ylinopeuksia on hyvin vähän, samoin shokkiaaltoja ja ne vaimenevat nopeasti.

Liikenneturvallisuus paranee edelleen, joskin uuden tyyppiset automatiikasta johtuvat onnettomuudet voivat lisääntyä. Matkustaminen sujuu häiriöttä, liikenne soljuu tasaisesti ja tuottaa entistä vähemmän negatiivisia ympäristövaikutuksia, elleivät matkat pitene ja liikennesuorite kasva. Autoilusta tulee kuitenkin entistä kalliimpaa. Talvihoidon kustannukset kasvavat. Joidenkin ammattikuntien tarve pienenee, toisten kasvaa.

Lähdeluettelo

- Adell, E., Várhelyi, A. ja Nilsoson, L. (2014). The Definition of Acceptance and Acceptability. Teoksessa *Human Factors in Road and Rail Transport: Driver Acceptance of New Technology : Theory, Measurement and Optimisation*. Regan, M., Horberry, T., Stevens A. (toim.) Ashgate Publishing Ltd. ISBN 9781409439851. 380 s.
- Anderson, J. (2014). 12886 Autonomous Vehicle Technology: How to Best Realize ITS Social Benefits. Esitelmä, Session Automated Transportation. ITS World Congress, Detroit.
- Arem, B. van, Driel, C. van & Visser, R. (2006). The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics. *Intelligent Transport Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7 no. 4, December. s. 429–436.
- Arem, B van, Hogema, J. & Smulder, S. (1996). The impact of autonomous intelligent cruise control on traffic flow. *Proceedings of the 3rd Annual World Congress of Intelligent Transport Systems*, Orlando.
- Arnaout, G. & Bowling, S. (2013). Towards reducing traffic congestion using cooperative adaptive cruise control on a freeway with a ramp. *Journal of Information and Management. JIEM*, 2011 – 4(4):699-717 – Online ISSN: 2013-0953 – Print ISSN: 2013-8423.
- Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, Vol. 19, No. 6, pp. 775-779.
- A.Bartsch, F.Fitzek and R.H.Rasshofer (2012). Pedestrian recognition using automotive radar sensors. *Advances in Radio Science* 10, 45–55, 2012. <http://www.adv-radio-sci.net/10/45/2012/ars-10-45-2012.pdf>
- Benz, J. (1996). Autonomous distance keeping in high speed environment – ICC parameter design. *Proceedings of the 3rd Annual World Congress of Intelligent Transport Systems*, Orlando.
- Bose, A., & Ioannou, P. (2003). Mixed manual/semi-automated traffic: A macroscopic analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 11(6), s. 439-462.
- Brackstone, M. & McDonald, M (2000). A comparison of EU and US progress in the development of longitudinal advanced vehicle control and safety systems (AVCSS). *Transp. Rev.* 20. S. 173–190.
- Broqua, F., Lerner, G., Mauro, V. & Morello, E. (1991). Cooperative driving: Basic concepts and a first assessment of ‘Intelligent Cruise Control’ strategies. *Advanced Telematics in Road Transport, Proceedings of the DRIVE Conference*, Brussels, 1991.
- Chang, T., & Lai, I. (1997). Analysis of characteristics of mixed traffic flow of autopilot vehicles and manual vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 5(6), s. 333-348.
- Connelly, M.L., Conaglen, H.M., Parsonson, B.S. ja Isler, R.B. (1998). Child pedestrians’ crossing gap thresholds. *Accid. Anal and Prev.* Vol 30, No. 4, s. 443-453.

- Darbha, S., & Rajagopal, K. R. (1999). Intelligent cruise control systems and traffic flow stability. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7(6), s. 329-352.
- Darpa (2014). DARPA Grand Challenge: Ten years Later. Darpa News, March 13, 2014. <http://www.darpa.mil/newsevents/releases/2014/03/13.aspx>
- Davis, L. (2004). Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow. *Phys. Rev. E* 69 (2004). s. 66–110
- Delphi (2014). Delphi Electronically Scanning Radar. Tuote-esite. <http://www.delphi.com/manufacturers/auto/safety/active/electronically-scanning-radar>
- Demo97 (1997). Demo '97 proving AHS works. *Public Roads Vol61-No.1 July/August* 1997. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/97july/demo97.cfm>
- Doi, T., Shida, M. & Kitahama, K. (2014). Approach for congestion mitigation using cooperative adaptive cruise control. *Proceedings of ITS World Congress, Detroit*. 12 s.
- ERTRAC (2014). Automated Driving Roadmap. Luonnos 2.0. 3.12.2014. 43 s.
- Draskóczy, M., Carsten, O.M.J. & Kulmala, R. (1998). Road Safety Guidelines. CODE Project, Telematics Application Programme, Deliverable B5.2.
- Edwards, W. (1968). Conservatism in human information processing. In: B. Kleinmuntz (ed.). *Formal representation of human judgment*. New York: Wiley. Pp. 17–52.
- Edwards, W., Lindman, H. & Philips, L.D. (1965). Emerging technologies for making decisions. In: T.M. Newcomb (ed.). *New directions of psychology II*. New York: Holt, Rinehart & Winston
- eFuture (2013). eFuture efficient mobility. WP 610 Extericeptive sensors and data fusion. <http://www.efuture-eu.org/sub-projects/wp600-command-layer/wp-610-exteriorceptive-sensors-data-fusion/>
- Endsley, M.R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 37, No. 1, pp. 32-64.
- ESoP (2006). Komission suositus turvallisista ja tehokkaista ajoneuvoihin asennettavista tieto- ja viestintäjärjestelmistä: ajantasaistetut käyttöliittymiä koskevat eurooppalaiset periaatteet 22.12.2006. (2007/78/EY).
- EY. Deploying autonomous vehicles. Commercial considerations and urban mobility scenarios.EYGM Limited. 29014. [http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-Deploying-autonomous-vehicles-30May14/\\$File/EY-Deploying-autonomous-vehicles-30May14.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/EY-Deploying-autonomous-vehicles-30May14/$File/EY-Deploying-autonomous-vehicles-30May14.pdf). Haettu 10.11.2014.Eysenk, M.W. & Keane, M.T. 1990. *Cognitive Psychology. A Student's Handbook*. East Sussex, UK: Lawrence Erlbaum Associates Ltd.
- Flir (2014). PathFindII Driver Vision Enhancement System. Tuote-esite. <http://www.flir.com/cores/content/?id=62945>
- Foley (2014), Esitelmä 10.9.2014, Session SIS35 Human Factor Challenges of Vehicle Automation. ITS World Congress, Detroit.

- Gakstatter Eric (2015). GNSS: The New GPS. GPSWorld 7.1.2015. <http://gpsworld.com/gnss-the-new-gps/>
- GPS (2011). GPS Future and Evolutions. esa navipedia. European Space Agency 2011. http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Future_and_Evolutions
- Han, D. & Yi, K. (2006). A driver adaptive range policy for adaptive cruise control. Proc. IMechE 2006, s. 321–324.
- Hjälmdahl M. ja Várhelyi, A. (2004). Speed regulation by in-car active accelerator pedal. Effects on driver behaviour. In, In-vehicle speed adaptation. On the effectiveness of a voluntary system. M. Hjälmdahl. Lund university, Bulletin 223, 2004.
- HTW (2014). Hochschule für Technik und Wirtschaft. Umfeldsensorik Laserscanner. <http://www.htw-mechlab.de/index.php/labor/kernkompetenzen/umfeldsensorik/>
- Häkkinen, S. & Luoma, J. (1990). Liikennepsykologia. Hämeenlinna: Otatieto
- Jamson, A.H., Merat, N., Carsten, O.M. & Lai, F.C. (2013) Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol. 30, pp. 116-125.
- Juhlin O. (2009). Social media on the road – The future of car based computing, Monography, Springer Verlag, CSCW series, October 2010, ISBN 978-1-84996-331-2.
- Jurnecka Rory (2007). Land Rover, MIT team up for DARPA Urban Challenge. Motor Trend October 22, 2007. <http://blogs.motortrend.com/land-rover-mit-team-up-for-darpa-urban-challenge-1219.html#ixzz3K5mII1UA>
- Kallberg, H. (2013). Tieliikenteen kustannusarvio 2012. Tieliikenteen tietokeskus. http://www.autoalantiedotuskeskus.fi/files/563/Tieliikenteen_kustannusarvio_2012.pdf. Haettu 11.12.2014.
- Kesting, A., Treiber, M., Schönhof, M., Kranke, F., & Helbing, D. (2007). Jam-avoiding adaptive cruise control (ACC) and its impact on traffic dynamics. Traffic and granular Flow'05 (pp. 633-643) Springer.
- Kikuchi, S., Uno, N., & Tanaka, M. (2003). Impacts of shorter perception-reaction time of adapted cruise controlled vehicles on traffic flow and safety. Journal of Transportation Engineering, 129(2), s. 146-154.
- Kulmala, R., Leviäkangas, P., Sihvola, N., Rämä, P., Francsics, J., Hardman, E., Ball, S., Smith, B., McCrae, I., Barlow, T. & Stevens, A. (2008). Final study report. CODIA Deliverable 5
- Kulmala, R. (2010). Ex-ante assessment of the safety effects of intelligent transport systems. Accident Analysis & Prevention, doi:10.1016/j.aap.2010.03.001.
- Kulmala, R. ja Salusjärvi M. (1987). Sään vaikutus jalankulkijoiden riskinottoon. Liikenneturvan tutkimuksia 87/1987. Helsinki: Liikenneturva.
- Lapoehn, S.; Schieben, A., Hesse, T., Schindler, J. ja Köster, F. (2014). Usage of nomadic devices in highly-automated vehicles. In proceedings of 10th ITS European Congress, Helsinki, Finland.
- Larsson, A.F.L., Kircher, K. ja Andersson Hultgren, J. (2014). Learning from experience: Familiarity with ACC and responding to a cut-in situation in automated driving. Transportation Research Part F 27 (2014) s.229-237.

- Lee, J., Bared, J. & Park, B. (2014). Mobility impacts of cooperative adaptive cruise control (CACC) under mixed traffic conditions. Proceedings of ITS World Congress, Detroit. 12 s.
- Li, K., & Ioannou, P. (2004). Modeling of traffic flow of automated vehicles. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions On, 5(2), s. 99-113.
- Liang, C., & Peng, H. (2000). String stability analysis of adaptive cruise controlled vehicles. JSME International Journal Series C, 43(3), s. 671-677.
- Liikennevirasto. Tietilasto (2013). Liikenneviraston tilastoja 4/2014. http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf8/lti_2014-04_tietilasto_2013_web.pdf. haettu 11.12.2014.
- Tilastokeskus ja Liikenneturva (2010). Tieliikenneonnettomuudet 2013, Suomen virallinen tilasto. https://www.liikenneturva.fi/sites/default/files/materiaalit/Tutkittua/Tilastot/tilastokirja/tieliikenneonnettomuudet_2013_netti_id_15139.pdf. Haettu 25.11.2014.
- Luoma, J. (1984). Autonkuljettajan visuaalisen informaation hankinta: Merkityksellisen ja merkityksettömän informaation vuorovaikutus. Helsinki: Liikenneturva. (Liikenneturva, Tutkimusosaston julkaisuja 64/1984).
- Malmivuo, M. & Peltola, H. (1997). Talviajan liikenneturvallisuus – tilastollinen tarkastelu (Traffic safety at wintertime – a statistical investigation). Helsinki: Tielaitos. (Tielaitoksen selvityksiä 6/1997).
- Malone, K. (2014). Esitys. DRIVE C2X Final event 17.7.2014.
- Marsden, G., McDonald, M., & Brackstone, M. (2001). Towards an understanding of adaptive cruise control. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 9(1), s. 33-51.
- Philip G. Mattos and Fabio Pisoni. (2014). Quad-Constellation Receiver: GPS-Glonass-Galileo-Beidou. GPSWorld January 8, 2014.
- McKenna, F.P. (1985). Do safety measures really work? An examination of risk homeostasis theory. Ergonomics, Vol. 28, pp. 489-498.
- Meinel, Holger. Evolving Automotive Radar - from the very beginnings into the future. The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014) p. 3107 - 3114
- Meiners Jens (2008). 2009 BMW 7-Series Equipped With New Night Vision and Speed-Limit Recognition Technology. Car and Driver June 2008.. <http://www.caranddriver.com/photo-gallery/2009-bmw-7-series-equipped-with-new-night-vision-and-speed-limit-recognition-technology>
- Merat, N., Jamson, H., Lai F.C.H., Daly, M. ja Carsten, O. (2014). Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle (2014). Transportation Research Part F 27 (2014) s. 274-282.
- Michon, J.A. (1985). A critical view of driver behaviour models. What do we know, what should we do? In: L., Evans and R., Schwing (eds.) Human behaviour and traffic safety. New York: Plenum Press.
- Minderhoud, M. & Bovy, P. (1999). Impact of intelligent cruise control on motorway capacity. Transport Research Record 1679, Paper No. 99-0049.
- Minifaros (2013) . <http://www.minifaros.eu/>

- Molen, H.H. van der and Botticher, A.M.T. (1987). Risk models for traffic participants: A concerted effort for theoretical operationalizations: In J.A., Rothengatter and R.A., de Bruin (eds.) Road users and traffic safety. Assen, The Netherlands: Van Gorcum.
- Muir, B.M. (1994). Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics*, Vol. 37, No. 11, pp. 1905-1922.
- Ngoduy, D. (2013). Instability of cooperative adaptive cruise control traffic flow: A macroscopic approach. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Volume 18, Issue 10, October 2013. S. 2838–2851.
- Ngoduy, D. (2012). Application of gas-kinetic theory to modelling mixed traffic of manual and ACC vehicles. *Transportmetrica*, 8(1). S. 43-60.
- O'Toole Randall (2009). Gridlock: Why We're Stuck in Traffic and what to Do about it. Cato Institute, 2009. ISBN 978-1-93508-23-2.
- Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Vol. 39, No. 2, pp. 230-253.
- Parasuraman, R., Sheridan, T.B. & Wickens, C.D. (2008). Situation awareness, mental workload, and trust in automation: Viable, empirically supported cognitive engineering constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, Vol. 2, No. 2, pp. 140-160.
- Payre, W., Cestac, J. ja Delhomme, P. (2014). Intention to use fully automated car: Attitudes and a priori acceptability. *Transportation Research Part F* 27 (2014) s. 252-263.
- Rajala, P. (2014). Liikennevirasto. Puhelinhaastattelu.
- Ranney, T.A. (1994). Models of driving behavior: A review of their evolution. *Accident Analysis and Prevention*, Vol 26, No. 6, pp. 733-750.
- Read Paul, Meyer Paul (2000). Restoration of Motion Picture Film. Butterworth-Heinemann. 14.8.2000.
http://books.google.fi/books?id=jzbUUL0xJAEC&hl=fi&source=gbs_navlinks_s
- Rech, J. (2014). Esitys. DRIVE C2X Final event
- Rudin-Brown, C.M. ja Jamson, S.L. (2013). Behavioural adaptation and road safety. Theory, evidence and action. (ed.) Boca Raton, FL, CRC Press, 2013, 467 pp., ISBN 978-1-4398-5667-3.
- Rudin-Brown, C.M. & Parker, H.A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 7, No. 2, pp. 59-76.
- Rämä, P. (1993). Väsentliga beteendevariabler hos barn i trafiken. Nordiske seminar- og arbeidsrapporter 1993:554. 108 s.
- Rämä, P. (2001). Effects of weather-controlled variable message signing on driver behaviour. Espoo: Technical Research Centre of Finland. (Publications 447/2001).
- Rämä, P., Sihvola, N., Luoma, J., Koskinen, S., Aittoniemi, E. ja Kulmala, R. (2009). Ajoneuvojen telemaattisten järjestelmien turvallisuusvaikutukset Suomessa. VTT tutkimusraportti VTT-R-00996-09, Espoo.

- SAE (2014). Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. Standard J3016, issued 2014-01-16. Society of Automotive Engineers.
- Shladover, S. (2014). Presentation of Steven Shladover, University of California, PATH. IBEC session 7.9.2014, ITS World Congress, Detroit.
- Shaikh, S.A. & Krishnan, P. (2012). A Framework for Analysing Driver Interactions with Semi-Autonomous Vehicles. FTSCS. Pp. 85.
- Schoettle, B. ja Sivak, M. (2014a). A survey of public opinion about connected vehicles in the U.S., the U.K. and Australia. UMTRI University of Michigan.
- Schoettle, B. ja Sivak, M. (2014b). Public opinion about self-driving vehicles in China, India, Japan, the U.S., the U.K., and Australia. UMTRI University of Michigan.
- Simonite Tom (2013). Data shows Google's Robot Cars Are Smoother, Safer Drivers Than You or I. MIT Technology Review October 25, 2013. www.technologyreview.com/news/520746/data-shows-googles-robot-cars-are-smoother-safer-drivers-than-you-or-i/
- Sivak, M. (1996). The information that drivers use: is it indeed 90% visual. Perception, 25, 1081-1089.
- Stanton, N.A. & Young, M.S. (2000). A proposed psychological model of driving automation. Theoretical Issues in Ergonomics Science, Vol. 1, No. 4, pp. 315-331.
- Stanton, N.A. & Young, M.S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. Ergonomics, Vol. 48, No. 10, pp. 1294-1313.
- Stevens, A., Quimbly, A., Board, A., Kersloot, T. ja Burns, P. (2002). Design guidelines for safety of in-vehicle information systems. (Project report PA3721/01). Crowthorne, United Kingdom: Transport Research Laboratory.
- Streeter, L.A., Vitello, D. and Wonsiewicz, S.A. (1985). How to tell people where to go: comparing navigational aids. International Journal of Man-Machine Studies 22, pp. 549-562.
- Summala, H. (1988). Risk control is not risk adjustment: The zero-risk theory of driver behavior and its implications. Ergonomics 31, s. 491-506.
- Tampère, C., & van Arem, B. (2001). Traffic flow theory and its applications in automated vehicle control: A review. Paper presented at the Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE, s. 391-397.
- Tervonen, J., Ristikartano, J. (2010). Tieliikenteen ajokustannusten yksikköarvot 2010. Liikenneviraston ohjeita 21/2010. http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lo_2010-21_tieliikenteen_ajokustannusten_web.pdf. Haettu 11.12.2014.
- Tilastokeskus (2014). Suomen tieliikenneonnettomuudet vuodelta 2013.
- Tilastokeskus ja Liikenneturva (2010). Tieliikenneonnettomuudet 2013, Suomen virallinen tilasto. https://www.liikenneturva.fi/sites/default/files/materiaalit/Tutkittua/Tilastot/tilastokirja/tieliikenneonnettomuudet_2013_netto_id_15139.pdf. Haettu 25.11.2014.
- U.S. DOT (2014). SchagrinGayDeveloping a U.S. DOT Multimodal R&D Program Plan for Road Vehicle Automation.

- Vanderbilt Tom (2012). Let the Robot Drive: The Autonomous Car of the Future Is Here. Wired 01.2012. http://www.wired.com/2012/01/ff_autonomouscars/all/
- Wang, J. & Rajamani, R. (2004). Should adaptive cruise-control systems be designed to maintain a constant time gap between vehicles? Vehicular Technology, IEEE Transactions On, 53(5), s. 1480-1490.
- Velodyne (2014). Autonomous vehicles – Velodyne.
<http://www.docstoc.com/docs/150779365/Autonomous-Vehicles---Velodyne>
- Weiste, H., Helaakoski, R., Lampinen, S., Räsänen, J., Somerpalo, S. (2014). Pitkien matkojen ja kuljetusten palvelutasotavoitteet. Liikennevirasto, liikkumisen palvelut ja älyliikenne –yksikkö, Helsinki. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 33/2014. 97 + 3 s. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-481-9.
- Werf, J. van der, Shladove, S. & Mille, M. (2002). Effects of adaptive cruise control systems on highway traffic flow capacity. Transport Research Record 1800, Paper No. 02-3665. S. 78–84.
- Wickens, C.D. (1992). Engineering psychology and human performance (second edition). New York: HarperCollins Publishers.
- Wickens, C.D. (2008). Situation awareness: review of Mica Edsley's 1995 articles on situation awareness theory and measurement. Human Factors, Vol. 50, No. 3, June 2008, pp. 397-403.
- Wilde, G. (1994). Target risk. Toronto: PDE Publications.
- Williams, M. (1988). "PROMETHEUS-The European research programme for optimising the road transport system in Europe," Driver Information, IEE Colloquium on , vol., no., pp.1/1,1/9, 1 Dec 1988
- Wilmink, I., Janssen, W., Jonkers, E., Malone, K., van Noort, M., Klunder, G., Rämä, P., Sihvola, N., Kulmala, R., Schirokoff, A., Lind, G., Benz, T., Peters, H. & Schönebeck, S. (2008). Impact assessment of Intelligent Vehicle Safety Systems. eIMPACT Deliverable D4. Version 0.6 March 2008.
- Wolff Christian (2014). Radar tutorial. <http://www.radartutorial.eu/>.
- Young, K.L. ja Regan, M.A. (2013). Defining the relationship between behavioural adaptation and driver distraction. Teoksessa, Behavioural adaptation and road safety. Theory, evidence and action. Rudin-Brown, C.M. ja Jamson, S.L. (toim.) Boca Raton, FL, CRC Press, 2013, 467 pp., ISBN 978-1-4398-5667-3.
- Xiao, L. & Gao, F. (2010). A comprehensive review of the development of adaptive cruise control systems. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 48:10. Taylor & Francis, London. S. 1167–1192.
- Yuan, Y., Jiang, R., Hu, M., Wu, Q., & Wang, R. (2009). Traffic flow characteristics in a mixed traffic system consisting of ACC vehicles and manual vehicles: A hybrid modelling approach. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 388(12), s. 2483-2491.
- Zhang, W., Chan, C., Misener, J., Zhou, K., Tan, H. & Li, J. (2014). Deployment challenges for truck platooning. Proceedings of ITS World Congress, Detroit. 12 s.
- Zhou, J., & Peng, H. (2005). Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions On, 6(2), s. 229-237.

Öörni, R. (2012). Implementation road map. iCar Support D3.1. Euroopan Komissio. 141 s.