

Tieliikenteen automaation vaikutuksia

Elina Aittoniemi

Teemu Itkonen

Esko Lehtonen

Ida Maasalo

Fanny Malin

Satu Innamaa



Yhteisrahoitettu Euroopan unionin
Verkkojen Eurooppa -välineestä

Nordic

WAY3 

Julkaisun nimi Tieliikenteen automaation vaikutuksia	
Tekijät Elina Aittoniemi, Teemu Itkonen, Esko Lehtonen, Ida Maasalo, Fanny Malin, Satu Innamaa	
Toimeksiantaja ja asettamispäivämäärä Traficom	
Julkaisusarjan nimi ja numero Traficomın tutkimuksia ja selvityksiä 10/2024	ISSN (verkkojulkaisu) 2669-8781 ISBN (verkkojulkaisu) 978-952-311-921-5
Asiasanat Kirjallisuustutkimus, käyttötapaukset	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Automaatio yleistyy eri ajoneuvoissa. Tässä työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus tieliikenteen automaation mahdollisista vaikutuksista neljälle eri käyttötapaukselle (yksityisomisteiset henkilöautot, joukkoliikenne, robottitaksit ja logistiset ratkaisut) viidellä eri vaikutusalueella (liikennesuorite ja kulkutapajakauma, liikennevirta, ympäristö, liikenneturvallisuus ja tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus). Lisäksi arvioitiin kirjallisuustulosten soveltuvuutta pohjoismaisiin olosuhteisiin. Kaiken kaikkiaan tässä tutkimuksessa referoitiin 122 tieteellistä tutkimusta.</p> <p>Automaation vaikutuksia liikennevirtaan ja ympäristöön on tutkittu pääasiassa moottoriteillä sekä suurilla liikennemäärillä. Pohjoismaissa moottoriteiden liikennemäärät eivät kuitenkaan tyyppillisesti nouse kovin suuriksi. Lisäksi ainoastaan moottoriteillä toimivan automaation vaikutukset jäävät todennäköisesti vähäisiksi moottoritieverkon harvuuden vuoksi. Kirjallisuuden perusteella automaatio voi parantaa liikenteen sujuvuutta ruuhkatilanteissa, jos automaattiajoneuvojen pitämät aikavälit muihin ajoneuvoihin ovat lyhyempiä kuin ihmiskuljettajien.</p> <p>Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus on tärkeä tekijä sujuvuuden ja turvallisuuden kannalta. Tieteellisesti tällä tutkimusalueella ollaan varhaisessa vaiheessa, jossa alan käsitteistö ja tutkimuskysymykset ovat vielä muotoutumassa. Tähän mennessä konkreettisimpina tutkimustuloksina voidaan pitää niin kutsutun implisiittisen informaation ensisijaisuuden ymmärtämistä ajoneuvojen liikkeen tulkinnassa sekä erilaisten ulkoisten käyttöliittymien tehokkaaseen viestimiseen vaikuttavien tekijöiden tunnistamista. Ulkoisten käyttöliittymien tarvetta on myös kyseenalaistettu. Kuitenkin sekä automaattiautojen että muiden tienkäyttäjien kyky kommunikoida ja tulkita toistensa aikomuksia tulee jatkossakin olemaan oleellinen aihe, johon pohjoismaiset keliolosuhteet tuovat omat erityispiirteensä.</p> <p>Sekä yksityiskäyttöiset että jaetut automaattiset henkilöautot tekevät auton käytön mukavammaksi ja tarjoavat paremmat mahdollisuudet matka-ajan käyttöön huviksi ja hyödyksi. Tämä voi lisätä autolla tehtyjen matkojen kulkutapaosuutta, pidentää autolla kuljettuja matkoja sekä luoda uusia matkoja. Kulkutapasiirtymä erityisesti joukkoliikenteestä automaattisiin henkilöautoihin on todennäköinen. Vaikutusten suuruus ihmisten liikkumiseen on suhteessa automaattisten henkilöautojen penetraatioasteeseen. Automaattisten henkilöautojen vasta yleistyessä ajoneuvokilometrit voivat kasvaa muutamia prosentteja. Kun automaattisista henkilöautoista tulee valtavirtaa, ajoneuvokilometrit voivat kasvaa jo kymmeniä prosentteja. On kuitenkin huomattava, että tässä vaiheessa esimerkiksi tieverkon ruuhkautuminen voi alkaa rajoittaa suoritteen kasvua.</p> <p>Kuten automaattiset henkilöautot, myös robottitaksit voivat helpottaa liikkumista. Robottitaksit voivat periaatteessa mahdollistaa omasta autosta luopumisen, mutta niillä ajatut tyhjät kilometrit voivat lisätä ajoneuvojen kilometrisuoritetta. Robottitaksien vaikutusten kannalta olennaista on se, miten ne nivoutuvat yhteen joukkoliikenteen kanssa. Robottitaksit voivat joko kilpailla joukkoliikenteen kanssa tai tukea sitä, esimerkiksi tarjoamalla liityntäliikenteen juna-ase-mille. Robottitaksipalveluiden saatavuus pohjoismaisissa hankalissa keliolosuhteissa ja harvaan asutuilla alueilla jää kuitenkin nähtäväksi.</p> <p>Liikenneturvallisuuden kannalta on tärkeää vaikuttaa altistukseen, onnettomuusriskiin ja onnettomuuksien vakavuuteen. Automaatiota koskevissa tutkimuksissa ei ole yleensä huomioitu vaikutusta näihin kolmeen eri tekijään, vaan on</p>	

keskitytty onnettomuusriskiin. Tulosten perusteella automaation voi nähdä yleisesti ottaen vähentävän onnettomuusriskiä, mutta vaikutuksen suuruus riippuu käyttötapauksesta ja tutkimuskohteesta sekä käytetyistä menetelmistä. Vahvinta tutkimusnäyttöä on kuljettajan tukijärjestelmien turvallisuushyödyistä, mutta myös niiden toimintaa tulisi vielä tarkastella haastavammissa ympäristö- ja keliolosuhteissa turvallisuusvaikutusten varmistamiseksi. Lisäksi on hyvä huomioida, että jos automaation kehitys johtaa siihen, että tehdään uusia ja pidempiä matkoja sekä siirrytään joukkoliikenteestä turvattomampien kulkutapojen käyttöön, liikenneturvallisuushyödyt voidaan menettää.

Yleisesti voi todeta, että tutkimustuloksia tieliikenteen automaation vaikutuksista voidaan yleistää todelliseen liikenteeseen vain varauksella. Tämä koskee myös tulosten yleistämistä pohjoismaisiin olosuhteisiin. Automaation vaikutuksia tarkastelleissa tutkimuksissa taustoja ja käytettyjä oletuksia ei ole useinkaan kuvattu yksityiskohtaisesti. Suurin osa tutkimuksesta on myös tehty hyvin yksinkertaisissa olosuhteissa ja ympäristöissä sekä esimerkiksi keliolosuhteiden vaihtelu on jätetty huomioimatta.

Tieliikenteen automaation lisääntyminen voi edistää monia liikennejärjestelmälle asetettuja tavoitteita niin tehokkuuden, ympäristön, saavutettavuuden, turvallisuuden kuin terveyden edistämisenkin näkökulmista. Tavoitteiden mukainen kehitys ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys. Tutkimustiedon perusteella tärkeää on erityisesti joukkoliikenteen ja aktiivisten kulkutapojen sekä jaettujen automaattiaukoytien suosiminen. Tulevaisuudenkuvan varmistamiseksi tarvitaan enemmän erityisesti pohjoismaisiin olosuhteisiin keskittyvää tutkimustietoa tukemaan automaattiajamiseen ja sen käyttöönottoon liittyvää säätelyä ja poliittista päätöksentekoa.

Yhteyshenkilö Mikko Räsänen	Raportin kieli suomi	Luottamuksellisuus julkinen	Kokonaissivumäärä 105
Jakaja Liikenne- ja viestintävirasto Traficom	Kustantaja Liikenne- ja viestintävirasto Traficom		

Publikation Effekter av vägtrafikens automation	
Författare Elina Aittoniemi, Teemu Itkonen, Esko Lehtonen, Ida Maasalo, Fanny Malin, Satu Innamaa	
Tillsatt av och datum Traficom	
Publikationsseriens namn och nummer Traficoms forskningsrapporter och utredningar 10/2024	ISSN (elektronisk publikation) 2669-8781 ISBN (elektronisk publikation) 978-952-311-921-5
Ämnesord Litteraturöversikt, användningsfall	
<p>Sammandrag Automation blir vanligare i olika fordon. I detta arbete gjordes en litteraturöversikt över möjliga effekter av vägtrafikens automation för fyra olika användningsfall (privatägda personbilar, kollektivtrafik, robottaxibilar och logistiska lösningar) och fem olika områden (trafikarbete och fördelning av färdväg, trafikflöde, miljö, trafiksäkerhet och interaktionen mellan trafikanter). Dessutom bedömdes forskningsresultatens lämplighet för nordiska förhållanden. Sammanlagt analyserades 122 vetenskapliga artiklar.</p> <p>Automationens inverkan på trafikflöde och miljö har undersökts främst på motorvägar och vid stora trafikmängder. Trafikmängderna på motorvägarna är dock oftast inte särskilt stora i de nordiska länderna. Dessutom är det sannolikt att effekterna av automation som fungerar endast på motorvägar är små på grund av att motorvägsnätet är gles. Utifrån forskningsresultaten kan automation förbättra trafikens smidighet i rusningstrafik, om de avstånd som automatiska fordon håller till andra fordon är kortare än för mänskliga förare.</p> <p>Interaktionen mellan trafikanter är en viktig faktor för en smidig och säker trafik. Vetenskapligt befinner man sig i ett tidigt skede inom detta forskningsområde, där begreppen och forskningsfrågorna ännu håller på att ta form. De konkreta forskningsresultaten hittills kan anses vara förståelsen av den så kallade implicita informationens företrädare i tolkningen av fordonens rörelser samt identifieringen av faktorer som inverkar på en effektiv kommunikation i olika externa användargränssnitt. Behovet av externa användargränssnitt har också ifrågasatts. De automatiska fordonens och andra trafikanters förmåga att kommunicera och tolka varandras avsikter kommer dock även i fortsättningen att vara ett väsentligt ämne, där de nordiska väderförhållandena för med sig sina egna särdrag.</p> <p>Både personliga och delade automatiska personbilar gör bilen bekvämare att använda och erbjuder bättre möjligheter att använda restiden till nöje och nytta. Detta kan öka andelen resor som görs med bil som färdväg, förlänga resorna med bil och skapa nya resor. En övergång av färdväg från framför allt kollektivtrafik till automatiska personbilar är sannolik. Omfattningen av effekterna på människors mobilitet beror på de automatiska personbilarnas penetrationsgrad i trafiken. Då automatiska personbilar håller på att bli vanligare kan fordonskilometrarna öka med några procent. Men då automatiska personbilar blivit etablerade kan antalet fordonskilometer öka med tiotals procent. Det bör dock noteras att till exempel trafikstockningar i så fall kan börja begränsa ökningen av trafikarbetet.</p> <p>Robottaxibilar kan på samma sätt som automatiska personbilar, underlätta människors mobilitet. Robottaxibilar kan i princip göra det möjligt att avstå från att ha en egen bil, men tomma kilometer som körs med dem kan öka fordonens trafikarbete. Effekterna av robottaxibilar beror på hur de sammankopplas med kollektivtrafiken. Robottaxibilar kan antingen konkurrera med eller stödja kollektivtrafiken, till exempel genom att erbjuda anslutningstrafik till tågstationer. Tillgången till robottaxitjänster i de nordiska ländernas svåra väderförhållandena och gles befolkade områden återstår dock att se.</p> <p>För trafiksäkerhet är det viktigt att ta i beaktande exponering, olycksrisk och olyckornas allvarlighetsgrad. Tidigare forskning om automation har i allmänhet inte beaktat effekterna av dessa tre faktorer, utan fokuserat på olycksrisken. Utifrån resultaten kan det konstateras att vägtrafikens automation minskar olycksrisken, men effekternas storlek beror</p>	

på användningsfall, typ av område och använda metoder. De starkaste forskningsrönen gäller trafiksäkerhetseffekterna av förarstödsystem, men även deras funktion bör granskas ytterligare under mer utmanande miljö- och väderförhållanden för att säkerställa säkerhetseffekterna. Dessutom är det bra att beakta att om automationens utveckling leder till att människor gör nya och längre resor och övergår från kollektivtrafik till att använda mer otrygga färdmedel, kan trafiksäkerhetsfördelarna gå förlorade.

Generellt kan man konstatera att forskningsresultaten om effekterna av vägtrafikens automation kan generaliseras till den verkliga trafiken endast med förbehåll. Detta gäller även generaliseringen av resultaten till nordiska förhållanden. I studierna av automationens effekter beskrivs bakgrunden och de antaganden som används ofta inte i detalj. Största delen av forskningen har också gjorts i mycket enkla förhållanden och miljöer, och man har till exempel inte beaktat variationer i väderförhållanden.

En ökad automation av vägtrafiken kan främja många av de mål som ställts upp för transportsystemet ur såväl effektivitets-, miljö-, tillgänglighets-, säkerhets- som hälsofrämjande perspektiv. En utveckling enligt målen är dock ingen självklarhet. På basis av forskningsresultaten är det viktigt att gynna framför allt kollektivtrafiken och aktiva färdmedel samt delade skjutsor i automatiska bilar. För att säkerställa framtidsvisionen behövs mer forskning som fokuserar i synnerhet på nordiska förhållanden för att stödja regleringen och det politiska beslutsfattandet i anknytning till automatisering och ibruktagandet av den.

Kontaktperson Mikko Räsänen	Språk finska	Sekretessgrad offentlig	Sidoantal 105
Distribution Transport- och kommunikationsverket Traficom	Förlag Transport- och kommunikationsverket Traficom		

Title of publication Impacts of automation in road transportation	
Author(s) Elina Aittoniemi, Teemu Itkonen, Esko Lehtonen, Ida Maasalo, Fanny Malin, Satu Innamaa	
Commissioned by, date Traficom	
Publication series and number Traficom Research Reports 10/2024	ISSN (e-publication) 2669-8781 ISBN (e-publication) 978-952-311-921-5
Keywords Literature review, use cases	
<p>Abstract</p> <p>Automation is becoming more common in various vehicles. This study performed a literature review on the potential impacts of automation in road transportation for four different use cases (privately owned passenger cars, public transport, robotaxis and logistic solutions) and five different impact areas (vehicle kilometres travelled and modal split, traffic flow, environment, traffic safety and interaction between road users). The applicability of the literature results to the Nordic context was also assessed. In total, 122 scientific articles were analysed.</p> <p>The impacts of automation on traffic flow and the environment have been studied mainly on motorways and at high traffic volumes. However, traffic volumes are typically not very high in the Nordic countries. In addition, the impacts of automation on motorways alone are likely to be limited due to the sparsity of the motorway network. Literature suggests that automation can improve traffic flow in congested situations if the time headways kept by automated vehicles are shorter than those kept by human drivers.</p> <p>Interaction between road users is an important factor for efficient and safe traffic flow. Scientifically, this area of research is at an early stage, where the concepts and research questions are still taking shape. The most tangible research results to date include an understanding of the importance of so-called implicit information in the interpretation of vehicle movements and the identification of the factors that influence the effective communication of different types of external human-machine interfaces. The need for external human-machine interfaces has also been questioned. However, the ability of both automated vehicles and other road users to communicate and interpret each other's intentions will continue to be an essential issue, with the Nordic weather conditions providing their own specificities.</p> <p>Both privately owned and shared automated passenger cars make car use more convenient and offer more opportunities to use travel time for fun and benefit. This can increase the mode share of car trips, extend car journeys and create new trips. A modal shift is likely, in particular from public transport to automated passenger cars. The magnitude of the impact is related to the penetration rate of automated passenger cars in the vehicle fleet. As automated passenger cars become more widespread, vehicle kilometres may increase by a few percentage points. When automated passenger cars become mainstream, vehicle kilometres could increase by dozens of percentage points. However, at this stage it should be noted that congestion on the road network, among other things, may start to limit the growth of vehicle traffic.</p> <p>Similarly to automated private cars, robotaxis can facilitate mobility. They may, in principle, enable giving up car ownership, but kilometres driven without occupants can increase the vehicle kilometres travelled. The impacts of robotaxis depend on how they are integrated with public transport. Robotaxis can either compete with public transport or support it by providing feeder services to train stations, for example. However, the availability of robotaxi services in the harsh weather conditions and sparsely populated areas of the Nordic countries remains to be seen.</p> <p>In terms of traffic safety, it is important to consider exposure, accident risk and accident severity. Studies on automation have not generally included the impacts on all these three factors but have focused on the accident risk. The results show that automation can be seen to reduce the risk of accidents in general, but the magnitude of the effect</p>	

depends on the use case, the subject of the study and the methods used. The strongest research evidence is on the safety benefits of driver assistance systems, but their performance in more challenging environmental and weather conditions should also be further investigated to determine the safety impact. It is also worth noting that if the development of automation leads to new and longer journeys and a shift from public transport to less safe travel modes, safety benefits may be lost.

In general, the results of research on the impacts of automation in road transport can be generalised to real traffic only, with reservations. This also applies to the generalisation of the results to Nordic conditions. In studies on the effects of automation, the background and assumptions used are often not described in detail. Most of the research has also been conducted in very simple conditions and environments, and variations in weather conditions, for example, have not been taken into account.

Increased automation in road transportation can contribute to many of the objectives set for the transport system in terms of efficiency, environment, accessibility, safety and health. However, progress towards these objectives cannot be taken for granted. Research suggests that the promotion of public transport and active travel modes, in particular shared rides in automated vehicles, is important. To ensure the vision for the future, more research, focusing in particular on the Nordic context, is needed to support regulation and policymaking on automated driving and its introduction.

Contact person Mikko Räsänen	Language Finnish	Confidence status Public	Pages, total 105
Distributed by Finnish Transport and Communications Agency Traficom	Published by Finnish Transport and Communications Agency Traficom		

ALKUSANAT

Tieliikenteen automaation odotetaan yleistyvän lähivuosina ja vuosikymmeninä. Automaation toivotaan osaltaan toteuttavan tavoitteita turvallisemmasta, tehokkaammasta ja kestävämmästä liikenteestä. Tieliikenteen automaatio ei ole kuitenkaan yksi kokonaisuus, vaan siihen kuuluu monia käyttötapauksia, joilla voi olla erilaisia kehityspolkuja ja vastaavasti erilaisia vaikutuksia. Vaikutukset voivat viedä kehitystä tavoitteiden suuntaan, mutta myös hidastaa tai estää sitä. Sen takia on tärkeää pyrkiä tunnistamaan toivottuja ja mahdollisia kielteisiä vaikutuksia, jotta kehitykseen voidaan jo ennalta vaikuttaa tavoitteiden mukaiseen suuntaan.

Tässä tutkimuksessa tehtiin tieteellisen kirjallisuuteen pohjautuva selvitys automaation vaikutuksista tieliikenteessä sekä analyysi tulosten sovellettavuudesta pohjoismaisiin olosuhteisiin. Työ rajattiin tällä hetkellä ilmeisimpiin automaation käyttötapauksiin ja viiteen vaikutusalueeseen.

Työn toimeksiantajina ja tilaajina toimivat Liikenne- ja viestintävirasto ja Väylävirasto. Työn ohjausryhmään kuuluivat Annu Korhonen, Mikko Räsänen, Anna Schirokoff ja Elina Uusitalo Liikenne- ja viestintävirastosta, Petri Antola Väylävirastosta ja Atte Riihelä liikenne- ja viestintäministeriöstä. Työstä vastasi Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, josta työhön osallistuivat Elina Aittoniemi (projektipäällikkö), Teemu Itkonen, Esko Lehtonen, Ida Maasalo, Fanny Malin ja Satu Innamaa.

Työ oli osa yhteispohjoismaista NordicWay 3 -hanketta, joka sai Verkojen Eurooppa -ohjelman (CEF, Connecting Europe Facility) rahoitustukea vuosina 2019–2023.

Helsinki, 17. huhtikuuta 2024

Mikko Räsänen
Johtava asiantuntija
Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

FÖRORD

Vägtrafikens automation väntas bli vanligare under de närmaste åren och årtiondena. Hoppet är att automationens utveckling ska bidra till att förverkliga målen för en säkrare, effektivare och hållbarare trafik. Vägtrafikens automation är dock mångfasetterad och den omfattar många användningsfall som kan ha olika utvecklingsvägar och på motsvarande sätt olika effekter. Effekterna kan föra utvecklingen i riktning mot de transportpolitiska målen, men också bromsa eller hindra den. Därför är det viktigt att försöka identifiera önskade och eventuella negativa effekter, så att man redan på förhand kan påverka utvecklingen i en målenlig riktning.

I detta projekt gjordes en litteraturoversikt av vetenskapliga studier om automationens effekter på vägtrafiken samt en analys av resultatens tillämplighet i nordiska förhållanden. Projektet begränsades till de för närvarande mest uppenbara användningsfallen inom automationen och till fem verkningsområden.

Projektets uppdragsgivare och beställare var Transport- och kommunikationsverket och Trafikledsverket. Projektets styrgrupp bestod av Annu Korhonen, Mikko Räsänen, Anna Schirokoff och Elina Uusitalo vid Transport- och kommunikationsverket, Petri Antola vid Trafikledsverket och Atte Riihelä vid kommunikationsministeriet. Teknologiska forskningscentralen VTT Ab ansvarade för projektet, och i arbetet deltog Elina Aittoniemi (projektchef), Teemu Itkonen, Esko Lehtonen, Ida Maasalo, Fanny Malin och Satu Innamaa.

Arbetet var en del av det samnordiska projektet NordicWay 3 som under 2019–2023 fick finansiering från Fonden för ett sammanlänkat Europa (CEF, Connecting Europe Facility).

Helsingfors, den 17 april 2024

Mikko Räsänen
Ledande sakkunnig
Transport- och kommunikationsverket Traficom

FOREWORD

Automation in road transportation is expected to increase in the coming years and decades. It is expected to contribute to the objectives of safer, more efficient and more sustainable traffic. However, automation is multifaceted and covers a spectrum of use cases that can have different development paths and thus different impacts. These impacts might contribute to the aforementioned objectives, but they could also slow down or hinder them. Therefore, it is important to try to identify the desired and potentially negative impacts of automation so that development can be proactively steered in a direction that contributes to the objectives.

This study performed a literature review on the potential impacts of automation in road transportation and an analysis of the applicability of the results to the Nordic context. The work focused on the currently most apparent use cases of automation and five impact areas.

The study was commissioned and ordered by the Finnish Transport and Communications Agency and the Finnish Transport Infrastructure Agency. The steering group of the study consisted of Annu Korhonen, Mikko Räsänen, Anna Schirokoff and Elina Uusitalo from the Finnish Transport and Communications Agency, Petri Antola from the Finnish Transport Infrastructure Agency and Atte Riihelä from the Ministry of Transport and Communications. The study was carried out by VTT Technical Research Centre of Finland Ltd., where the work was undertaken by Elina Aittoniemi (project manager), Teemu Itkonen, Esko Lehtonen, Ida Maasalo, Fanny Malin and Satu Innamaa.

The study was part of the joint Nordic NordicWay 3 project, which was co-financed by the Connecting Europe Facility (CEF) in 2019–2023.

Helsinki, 17 April 2024

Mikko Räsänen
Chief Adviser
Finnish Transport and Communications Agency Traficom

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	12
1.1	Tausta ja tavoitteet.....	12
1.2	Liikennejärjestelmän toimintaympäristö ja liikennepoliittiset tavoitteet.....	12
1.3	Tieliikenteen automaation tilanne.....	13
2	Tutkimusmenetelmä	15
2.1	Käyttötapaukset	15
2.2	Vaikutusalueet	15
2.2.1	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma.....	15
2.2.2	Liikennevirta	16
2.2.3	Ympäristö	16
2.2.4	Liikenneturvallisuus.....	17
2.2.5	Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus.....	17
2.3	Kirjallisuuskatsaus	17
2.4	Asiantuntijatyöpajat.....	18
2.5	Pohjoismaiset erityispiirteet	19
3	Tulokset.....	22
3.1	Yleistä.....	22
3.2	Henkilöautot	23
3.2.1	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma.....	23
3.2.2	Liikennevirta	31
3.2.3	Ympäristö	35
3.2.4	Liikenneturvallisuus.....	38
3.2.5	Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus.....	43
3.2.6	Yhteenveto.....	47
3.3	Joukkoliikenne.....	48
3.3.1	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma.....	48
3.3.2	Ympäristö	50
3.3.3	Liikenneturvallisuus.....	51
3.3.4	Yhteenveto.....	52
3.4	Robottitaksit	53
3.4.1	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma.....	53
3.4.2	Liikennevirta	58
3.4.3	Ympäristö	58
3.4.4	Liikenneturvallisuus.....	58
3.4.5	Yhteenveto.....	60
3.5	Logistiset ratkaisut.....	60
3.5.1	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma.....	60
3.5.2	Liikennevirta	61
3.5.3	Ympäristö	63
3.5.4	Liikenneturvallisuus.....	65
3.5.5	Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus.....	66
3.5.6	Yhteenveto.....	66
4	Tulosten tarkastelu ja arviointi tieliikenteen automaation vaikutuksista Pohjoismaissa	68
4.1	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma.....	68
4.2	Liikennevirta	70
4.3	Ympäristö	73
4.4	Liikenneturvallisuus	74
4.5	Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus.....	78

4.6	Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet	79
5	Executive summary	82
6	Lähdeviitteet	92

1 Johdanto

1.1 Tausta ja tavoitteet

Automaatio on yleistymässä eri ajoneuvoissa niin henkilö- kuin tavaraliikenteessä. Samaan aikaan tulevaisuuden tieliikenteen tavoitellaan olevan nykyistä turvallisempaa, tehokkaampaa ja kestävämpää. Tieto automaation mahdollisista vaikutuksista yhteiskunnan tasolla on tärkeää, jotta voidaan arvioida, tukeeko se näitä tavoitteita.

Kun tarkastellaan tieliikenteen automaation vaikutuksia, tulee ottaa huomioon, että automaatio sisältää monia erilaisia toimintoja, jotka kehittyvät samanaikaisesti. Lisäksi tulee huomioida, että tieliikenteen automaation mahdolliset vaikutukset riippuvat myös muiden samanaikaisten tekijöiden kehityskuluista, kuten ajoneuvojen sähköistymisen etenemisestä ja liikenteen digitaalisten palveluiden lisääntymisestä.

Tieliikenteen automaation vaikutukset Pohjoismaissa voivat erota vaikutuksista muissa maissa, sillä moniin muihin alueisiin verrattuna keliolosuhteet ovat haastavammat, tieverkko rakentuu suureksi osaksi kaksikaistaisten maanteiden varaan, liikennemäärät ovat pienemmät ja keskimääräiset matkat varsin pitkiä.

Tieliikenteen automaation yleistymisellä on todennäköisesti laaja-alaisia vaikutuksia yhteiskuntaan. Tässä työssä tehty tutkimuskirjallisuuteen perustuva yhteenveto rajattiin koskemaan tieliikenteen automaation valittujen käyttötapauksien mahdollisia vaikutuksia liikennesuoritteeseen, kulkutapajakaumaan, liikennevirtaan, ympäristöön, liikenneturvallisuuteen ja tienkäyttäjien väliseen vuorovaikutukseen. Työssä ei otettu kantaa eri toiminnallisuuksien toteutuksen todennäköisyyteen tai tekniseen toimivuuteen, vaan toistettiin kirjallisuudessa raportoidut tulokset niissä käytetyin oletuksin ja edellytyksin. Lisäksi työssä arvioitiin kirjallisuustulosten soveltuvuutta pohjoismaisiin olosuhteisiin, mutta ei tehty varsinaista vaikutusarviota Pohjoismaille.

1.2 Liikennejärjestelmän toimintaympäristö ja liikennepoliittiset tavoitteet

Suomen liikennejärjestelmän kehittämistä ohjaavat erilaiset suunnitelmat. Tieliikenteen automaation edistämisellä nähdään siinä tärkeä rooli. Vuonna 2021 vahvistettu periaatepäätös liikenteen automaation edistämisestä tavoittelee sitä, että Suomi kuuluu liikenteen automaation edelläkävijöihin (LVM 2021a). Periaatepäätöksessä automaation kehittämisen visiona nähdään tulevaisuuden liikenne, joka on nykyistä turvallisempaa, tehokkaampaa ja kestävämpää. Periaatepäätöksen keskeiset linjaukset kaikkiin liikennemuotoihin liittyen ovat ihmiskeskeisen automaation kehittäminen, tiedonvaihdon tehostaminen ja sääntelyn kokonaisvaltainen kehittäminen. Tätä suunnitelmaa toteutetaan seitsemällä toimenpiteellä, jotka kattavat sääntelyn, fyysisen ja digitaalisen infrastruktuurin kehittämisen, tiedon hyödyntämisen, kokeilut, osaamisen kehittämisen sekä vaikutusten arvioinnin. Myös pääministeri Petteri Orpon hallitusohjelmassa yhdeksi tavoitteeksi nostetaan sujuva liikenne, johon pyritään esimerkiksi uudistamalla liikenteen palveluja digitalisaatiota hyödyntäen sekä kehittäen itseohjautuvia ajoneuvoja ja niiden turvallista käyttöönottoa (Valtioneuvosto 2023).

Valtioneuvoston päätöksellä laaditun ensimmäisen valtakunnallisen liikennejärjestelmäsuunnitelman (LVM 2021b) visiossa vuodelle 2050 Suomen liikennejärjestelmä toimii ”ympäristöllisesti, sosiaalisesti ja taloudellisesti kestävästi ja takaa riittävän saavutettavuuden ihmisille ja elinkeinoelämälle”. Lisäksi liikenne toimii ”multimodaalisesti ja päästöttömästi”. Suunnitelman asettamat kolme rinnakaista päätavoitetta ovat saavutettavuus, kestävyys ja tehokkuus. Liikennejärjestelmäsuunnitelman rinnalla Suomea sitoo EU:ssa ja kansallisella tasolla tehdyt päätökset päästöjen vähentämisestä. Täten tavoitteena on, että kotimaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöt puolitetaan vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2005 tasoon, ja liikenne on päästötöntä vuonna 2045.

Suomen liikenneturvallisuustyötä vuosina 2022–2026 ohjaa vuonna 2022 julkaistu Liikenneturvallisuusstrategia (Rekola ym. 2022). Strategian pohjana on nollavisio, jonka mukaan kenenkään ei tarvitsisi liikennemuodosta riippumatta kuolla tai loukkaantua vakavasti liikenteessä. Tavoiteajaksi strategiassa nollavision saavuttamiselle on annettu vuosi 2050. Liikenneturvallisuusstrategiassa mainitaan, että turvallisuuden on oltava keskeinen liikenteen automaation kehittämistä ja hyödyntämistä ohjaava periaate. Automaatio voi edistää tieliikenteen nollavision tavoittelua ja lisäksi samalla mahdollistaa sen, että liikenne on nykyistä tehokkaampaa ja kestävämpää.

Valtakunnallisena tavoitteena on myös aktiivisten kulkutapojen edistäminen. Kävelyn ja pyöräilyn edistämishjelman mukaan kävely- ja pyöräilymatkojen määrän tulisi kasvaa 30 % vuodesta 2018 vuoteen 2030 mennessä (LVM 2018).

1.3 Tieliikenteen automaation tilanne

Tieliikenteen automaatio etenee suurelta osin teknologian kehityksen kautta. Euroopan tieliikennetutkimuksen neuvoo-antava toimikunta (European Road Transport Research Advisory Council, ERTRAC) on julkaissut etenemissuunnitelman, joka perustuu eri sidosryhmien yhteiseen näkemykseen verkottuneen, yhteistoiminnallisen ja automatisoidun tieliikenteen pitkän aikavälin kehityksestä Euroopassa (ERTRAC 2022). Julkaisussa erotellaan kaksi näkymää: alemman nopeusrajoituksen ympäristöt, jotka kattavat kaikki liikennetilanteet ja moottoritiet (*highways*), joissa liikennetilanteiden monimutkaisuus on rajatumpi.

Maantieliikenteen suunnitelmassa oletetaan kehityksen etenevän vähitellen moottoritien erikoistilanteista (nopeustaso alle 70 km/h, esimerkiksi liikennehuuhkat) tilanteeseen, jossa toimintaympäristö kattaa joustavasti kaikki moottoritiet.

Alemman nopeustason automaatio koskee kaupunkiliikennettä. Varhaisessa kehityksasteessa toiminta on rajattua tietyille alueille, kuten yksityisalueille tai yksisuuntaisille kaduille, nopeuden ollessa korkeintaan 25 km/h. Seuraavat kehitysstavat kattavat omalla ajokaistalla tai hyvin erotellulla kaistalla ajamisen sekä ajamisen sekaliikenteessä pääkaduilla. Taksin kaltaista palvelua tuottava, vapaasti valittavilla reiteillä ja nopeuksilla 50 km/h saakka kulkeva toiminta kattaa koko kaupungin tieverkon.

Näiden käyttötapauksen lisäksi julkaisu mainitsee liikenteen automatisaation maaseudulla. ERTRAC:in näkemyksen mukaan automatisaatio maaseudulla voi edetä määrättyillä reiteillä saavuttaen vähitellen myös syrjäisemmät asutuskeskukset. Nämä ovat kuitenkin kaikkein monimutkaisimpia skenaarioita korkean nopeusrajoituksen ja vastaantulevan liikenteen vuoksi. On odotettavissa, että kuljettajaton

toiminta on mahdollista vain, kun liikennetilanteiden monimutkaisuutta on rajattu merkittävästi.

Suomessa on toteutettu useita automaattiajamisen kokeiluja esimerkiksi joukkoliikenteessä, mutta kokeilut ovat olleet pienimuotoisia ja keskittyneet pitkälti teknologian testaamiseen (LVM 2023). Myös muualla Euroopassa joukkoliikennettä täydentäviä automaattisia pienbussseja tai robottibussseja (*shuttle*) on testattu. Markkinoilla on usean valmistajan kehittämiä pieniä robottibussseja, jotka kulkevat ilman kuljettajaa maltillisella nopeudella, usein omalla kaistalla tai väylällä.

Kansainvälinen ilmailu-, auto- ja ajoneuvoteollisuuden insinööriyhdistys SAE on luonut ajoneuvojen automatisoinnille kuusiportaisen luokituksen, joka on laajasti käytössä tutkimuksissa (SAE 2021). Suurin ero alemman automaation (tasot 1 ja 2) ja korkeamman automaation (tasot 3, 4, ja 5) on siinä, että alemmilla tasoilla vastuu ajotehtävästä on kuljettajalla, kun taas korkeammilla tasoilla automaattifunktion ollessa toiminnassa kuljettajan ei tarvitse keskittyä ajotehtävään. Tasojen 4 ja 5 ajoneuvot voivat toimia myös kokonaan ilman kuljettajaa.

Uusissa henkilöautoissa on jo nyt lukuisia kuljettajan tukijärjestelmiä ja ajotehtävää helpottavia järjestelmiä, kuten mukautuva nopeudensäädin ja kaistallapitoavustin. Nämä tukijärjestelmät kuuluvat SAE-luokituksessa tasoihin 1 ja 2. Ensimmäiset tason 3 järjestelmät on hyväksytty Euroopan markkinoille, mutta niiden toiminta-alue on rajoitettu ruuhkatilanteisiin moottoriteillä. Tason 4 sovellutuksista Euroopassa kehitetään automaattista pysäköintiä. Ilman ajoneuvossa olevaa kuljettajaa toimivia SAE-tason 4 robottitakseja tarjoavia palveluita on toiminnassa useissa kaupungeissa Yhdysvalloissa ja Kiinassa, muttei vielä Euroopassa.

Myös tavaraliikenteen automaatiota tutkitaan vilkkaasti ja sitä on jo hyödynnettykin. Muutamissa kaupunginosissa Suomessa pienet jalkakäytävillä kulkevat kuljetusrobotit ovat tulleet tutuiksi. Rekkojen automaatiosta toivotaan apua kuljettajapulaan sekä lievennystä kuljetuskustannuksiin, joista iso osa (35–43 %) koostuu työvoimakustannuksista (Paddeu ja Denby 2021). Myös letkassa ajon mahdollistamista polttoaineensäästöistä toivotaan kustannussäästöä. Rekkojen letka-ajon toivotaan lisäksi parantavan tien välityskykyä ja liikenneturvallisuutta (Paddeu ja Denby 2021).

Automaattiajamisen yhteydessä tärkeä käsite on automaatiojärjestelmän suunniteltu toimintaympäristö (*ODD, Operational Design Domain*). Se määrittää ne infrastruktuurin ja ympäristön olosuhteet, joissa automaattifunktio on suunniteltu toimimaan. Esimerkiksi Euroopassa hyväksytyt tason 3 ehdollisen automaation järjestelmät voidaan ottaa käyttöön ainoastaan moottoriteillä silloin, kun sää- ja keliolosuhteet ovat riittävän hyvät. On odotettavissa, että toimintaympäristö pysyy rajattuna vielä pitkään, ennen kuin automaatiojärjestelmiä voidaan käyttää esimerkiksi korkeilla nopeuksilla moottoriteiden ulkopuolella tai haastavissa sää- ja keliolosuhteissa.

2 Tutkimusmenetelmä

2.1 Käyttötapaukset

Julkinen keskustelu tieliikenteen automatisaation vaikutuksista käsittelee automaatiota usein yhtenä käsitteenä. Todellisuudessa automaatiota kehitetään usealla liiketoimintamallilla ja on epävarmaa, mitkä niistä saavuttavat suosiota (Narayanan ym. 2020). Jokaisella liiketoimintamallilla ja käyttötapauskella on omat lähtökohtansa ja vaikutuspolkunsä. Erilaisten käyttötapojen ja eri tavalla toteutettujen automaattisen tieliikenteen palveluiden vaikutukset eroavat todennäköisesti merkittävästi toisistaan. Tämän vuoksi tieliikenteen automaation vaikutuksia on syytä arvioida erilaisille käyttötapauskille erikseen. On hyvä huomata, että myös käyttötapausten sisällä oletukset voivat vaikuttaa tuloksiin.

Tässä työssä tarkasteltiin seuraavia tieliikenteen automaation käyttötapauskia:

1. Henkilöautot: yksityisomisteiset automatisoidut henkilöautot
2. Joukkoliikenne: automatisoidut bussit ja pienbussit (*shuttle*)
3. Robottitaksit: yksityiset ja jaetut kyydit
4. Logistiset ratkaisut: pienet jakelurobotit, automatisoidut rekat ja rekkojen automaattinen letka-ajo

2.2 Vaikutusalueet

Tieliikenteen automaatiolla voi olla monenlaisia vaikutuksia sekä yhteiskunnan että yksilöiden tasolla. Tässä työssä käyttötapauskia tarkasteltiin viideltä vaikutusalueelta: 1) liikennesuorite ja kulkutapajakauma, 2) liikennevirta, 3) ympäristö, 4) liikenneturvallisuus ja 5) tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus.

Näiden lisäksi automaatiolla voi olla taloudellisia vaikutuksia eri tahoille sekä pitkän aikavälin vaikutuksia esimerkiksi maankäyttöön, kansantalouteen ja logistiikkaketjuihin, mutta nämä vaikutukset rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Seuraavaksi esitetään lyhyt tausta ja tärkeimmät mekanismit ja indikaattorit jokaisesta valitusta vaikutusalueesta.

2.2.1 Liikennesuorite ja kulkutapajakauma

Liikennesuoritteella tarkoitetaan kuljettujen kilometrien määrää. Liikennesuorite voidaan laskea henkilökilometreinä, jolloin tarkastellaan sitä, kuinka paljon ihmiset liikkuvat, tai ajoneuvokilometreinä, jolloin tarkastelun kohteena on ajoneuvon liikkuminen. Tavarakuljetusten suoritetta voidaan puolestaan kuvata myös tonnikilometreinä. Erottelulla on väliä, koska esimerkiksi bussi tai jaettu robottitaksi voivat kuljettaa useita ihmisiä samalla kertaa. Henkilökilometrejä tarkasteltaessa ajoneuvon ajamat kilometrit kerrotaan matkustajien määrällä. Jotkin automaattiset ajoneuvot voivat myös ajaa "tyhjiä kilometrejä" esimerkiksi siirtyessään pysäköintialueelle tai noutaessaan matkustajia. Tällöin kertyy ajoneuvokilometrejä, mutta ei henkilökilometrejä. Kulkutapajakaumalla tarkoitetaan, miten kuljetut kilometrit tai matkat jakautuvat eri kulkutapojen kesken.

Ajoneuvokilometriä ja kulkutapajakauman muutoksilla voi olla merkittävä vaikutus muille vaikutusalueille. Esimerkiksi jos ajoneuvoilla kuljettujen kilometrien määrä kasvaa voimakkaasti, on tällä vaikutusta niin liikennevirtaan, liikenneturvallisuuteen kuin ympäristöönkin: Lisääntynyt suorite aiheuttaa ruuhkia ja

hidastaa liikennettä, lisääntynyt liikennesuorite lisää altistusta tieliikenteen riskeille ja sitä kautta henkilövahinkoja, suuremmat ajomäärät vaativat myös polttoainetta tai sähköä, joiden kuluttamisesta ja tuottamisesta syntyy päästöjä, jne.

2.2.2 Liikennevirta

Liikennevirran vaikutusalue tarkastelee liikenteen sujuvuutta matka-aikojen ja tien välityskyvyn kautta. Automaattiautojen oletetaan ajavan tasaisemmin kuin ihmiskuljettajien sekä noudattavan nopeusrajoitusta, joten automaattiautojen osuuden kasvaessa liikenteessä niillä voi olla vaikutuksia ajoneuvojen vuorovaikutukseen ja liikennevirtaan.

Tien teoreettista välityskykyä määrittää ajoneuvojen pitämät aikavälit. Aikaväli edellä ajavaan ajoneuvoon määrittää ajan, joka seuraavalla ajoneuvolla on käytettävissään reagoidessaan edeltävän ajoneuvon käyttäytymisen muutoksiin. Aikaväli liittyy siten kuljettajien ja ajoneuvojen toiminta- ja reagointiaikoihin. Toisin kuin ihmiskuljettajilla, joiden reaktioaikojen oletetaan yleisesti olevan 1 s luokkaa (Treiber ja Kesting 2013), ajoautomaatiojärjestelmien oletetaan usein pystyvän reagoimaan lähes välittömästi (Davis 2004, Mahmassani 2016). Tätä oletusta käytetään perustelemaan automaattiautojen pieniä tavoiteaikavälejä liikennesimuloinneissa (Aittoniemi 2022). Toistaiseksi ei kuitenkaan ole selvää, onko kovin pieniä aikavälejä mahdollista toteuttaa turvallisesti. Pienten aikavälien pitäminen saattaa vaatia ajoneuvojen välistä kommunikointia, jolloin sekä automaation että verkottuneisuuden penetraatioasteiden on oltava hyvin suuria vaikutusten toteutumiseksi, ja kommunikoinnin on toimittava kaikissa olosuhteissa.

Suorien erilaisesta ajotavasta seuraavien liikennevirtavaikutusten lisäksi muiden vaikutusalueiden kautta tulevilla epäsuorilla vaikutuksilla, kuten suoritteen tai onnettomuusmäärien muutoksilla, voi olla vaikutusta liikennevirtaan.

2.2.3 Ympäristö

Liikenteen päästöjen kokonaismäärään vaikuttavat sekä ajoneuvosuorite että ajoneuvojen päästöt kilometriä kohti. Automaatio saattaa muuttaa molempia eri mekanismien kautta.

Ajoneuvokilometrien muutokset käsitellään liikennesuorite ja kulkutapamuutokset -vaikutusalueen alla. Ajoneuvojen päästöihin kilometriä kohti vaikuttavat mm. taloudellinen ajotapa, vuorovaikutusten määrä liikennevirrassa sekä ajoneuvon ominaisuudet, kuten massa ja käyttövoima.

Katsaus keskittyy ajonaikaisiin hiilidioksidipäästöihin (CO₂). Myös polttoaineenkulutusta koskevia tutkimuksia on sisällytetty, koska polttomoottoriautoissa CO₂-päästöt ovat suoraan verrannollisia polttoaineen kulutukseen. Lisäksi työhön sisällytettiin muutama energiankäyttöön keskittyvä tutkimus. Ajoneuvokannan sähköistyessä energiankäytön merkitys ympäristön ja kestävyysmittarina tulee kasvamaan.

Automaattiautojen päästöjä koskevia tutkimuksia on pääasiassa kahdenlaisia: verkon kokonaispäästöjen tai ajoneuvo kohtaisten päästöjen optimointiin keskittyvät tutkimukset sekä automaattiautojen erilaisen ajotavan vaikutusten arviointi päästöihin, johon tässä tutkimuksessa keskityttiin.

2.2.4 **Liikenneturvallisuus**

Liikenneturvallisuustavoitteet koskevat liikenteessä kuolleiden ja vakavasti loukkaantuneiden määrää ja niiden ehkäisemistä. Liikenteessä kuolleiden ja loukkaantuneiden määrä riippuu kolmesta tekijästä: onnettomuusriskistä, altistuksesta ja vakavuudesta (Nilsson 2004). Älykkäille järjestelmille on kehitetty arviointihikko (Kulmala 2010, Innamaa ym. 2018), jolla voi ottaa huomioon järjestelmän suorat ja epäsuorat vaikutukset käyttäjään ja muihin tienkäyttäjiin liittyen liikenneturvallisuuden kaikkiin kolmeen ulottuvuuteen.

Onnettomuusriski on tarkastelun kohteena olevan altistustyyppin tai kulkutavan riski joutua onnettomuuteen. Onnettomuusriskiin kuuluvat järjestelmän suorat tai epäsuorat vaikutukset käyttäjään ja muihin tienkäyttäjiin sekä heiden väliseen vuorovaikutukseen. Altistukseen liittyviin vaikutuksiin sisältyvät seuraavat muutokset: 1) kulkutavan valinta (siirtyvätkö ihmiset käyttämään turvallisempia vai turvattomampia kulkutapoja), 2) reitin valinta (siirtyvätkö ihmiset käyttämään turvallisempia vai turvattomampia reittejä) ja 3) liikkumisen määrä (lisääntykö vai väheneekö ihmisten altistus ajan tai matkan funktiona onnettomuuksille). Viimeinen liikenneturvallisuusvaikutukseen vaikuttava tekijä on muutos onnettomuuksien vakavuudessa, johon vaikuttaa esimerkiksi törmäysnopeus.

2.2.5 **Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus**

Tämän alueen tarkastelu rajattiin koskemaan automaattisten ajoneuvojen ja muiden tienkäyttäjien, kuten jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden, välistä vuorovaikutusta. Käytännössä suuri osa käsiteltyä kirjallisuutta koskee sellaisia tilanteita, jossa jalankulkijoiden ja henkilöautojen välillä tapahtuu liikettä, aikomusten tai eleiden tunnistamista sekä tienkäyttäjien välistä kommunikaatiota. Koska aihe ei rajaudu vain yhden tieteen- tai tutkimusalan sisälle, raporttiin sisällytettiin katsaus useisiin näkökulmiin vuorovaikutustutkimuksesta. Tutkimusalueella ei ole vakiintuneita suureita, joilla automatisaation vaikutuksia voitaisiin mitata, vaan vuorovaikutukseen liittyvä käsitteistö ja teoria hakee vielä muotoaan. Näin ollen katsaus pyrki antamaan kuvan viime vuosien tärkeimmiksi katsotuista aiheista ja tutkimuksen nykytilasta.

2.3 **Kirjallisuuskatsaus**

Työn pääasiallinen menetelmä oli kirjallisuuskatsaus. Katsaus kattoi luvuissa 2.1 ja 2.2 esitellyt neljä automaattiajamisen käyttötapausta ja viisi vaikutusalueetta. Kirjallisuuskatsauksella selvitettiin, mitä tieliikenteen vaikutuksista tiedetään ja mitä on tutkittu yleisesti. Lisäksi työssä arvioitiin kirjallisuustulosten sopivuutta pohjoismaiseen kontekstiin. Tätä työtä varten tunnistetut pohjoismaiset erityispiirteet esitetään luvussa 2.5.

Työ keskittyi SAE-tasojen 3, 4 ja 5 automaatioon, mutta soveltuvien osien on tarkasteltu myös kuljettajan tukijärjestelmiä (SAE-tasot 1 ja 2).

Katsaus keskittyi tieteellisiin vertaisarvioituihin julkaisuihin, joita haettiin Web of Science- ja Scopus-tietokannoista. Katsaukseen sisällytetty kirjallisuus valittiin asiantuntija-arvion kautta. Arvioon vaikuttivat mm. julkaisuaika (pääpaino viiden vuoden sisällä julkaistuissa) sekä käytettyjen oletuksien ja automaatiojärjestelmän mahdollisimman tarkka kuvaus. Julkaisujen määrä vaihteli suuresti käyttötapauksesta ja vaikutusalueesta riippuen. Käyttötapauksista eniten kirjallisuutta

löytyi automatisoiduista henkilöautoista (tuhansia hakutuloksia), ja vähiten joukkoliikenteestä ja logistisista ratkaisuista (muutamia kymmeniä hakutuloksia).

Esimerkiksi liikennesuoritetta ja kulkutapajakaumaa koskevaa kirjallisuutta etsittiin Web of Science ja Scopus -tietokannoista (Taulukko 1). Tietokantahaun tulokset käytiin otsikko- ja abstraktitasolla läpi, jonka perusteella tunnistettiin 36 tälle vaikutusalueelle mahdollisesti relevanttia lähdeä, joihin tutustuttiin tarkemmin.

Taulukko 1. Esimerkkejä hakujen tuottamista lähdeviitteiden määrästä liikennesuorite ja kulkutapajakauma -vaikutusalueella.

Tietokanta	Hakulause	Lähteiden määrä
Web of Science 2018–2023	("automated driving" OR "autonomous driving" OR "automated vehicles" OR "autonomous vehicles" OR "automated shuttles" OR "automated public transport" OR "automated car sharing" OR "automated demand responsive transport" OR "shared automated rides" OR "ride sharing" OR "robotaxis" OR "automated ride-hailing") AND ("travel demand" OR "mode choice")	300
Scopus 2018–2023	(TITLE-ABS-KEY("automated driving") OR TITLE-ABS-KEY("autonomous driving") OR TITLE-ABS-KEY("automated vehicles") OR TITLE-ABS-KEY("autonomous vehicles") OR TITLE-ABS-KEY("automated shuttles") OR TITLE-ABS-KEY("automated public transport") OR TITLE-ABS-KEY("automated car sharing") OR TITLE-ABS-KEY("automated demand responsive transport") OR TITLE-ABS-KEY("shared automated rides") OR TITLE-ABS-KEY("ride sharing") OR TITLE-ABS-KEY("robotaxis") OR TITLE-ABS-KEY("automated ride-hailing")) AND (TITLE-ABS-KEY("travel demand") OR TITLE-ABS-KEY("mode choice"))	464

Lopullinen valinta referoiduista tutkimuksista tehtiin asiantuntija-arvion perusteella. Sisällytetyn kirjallisuuden määrä vaikutusalueittain ja käyttötapauksittain on esitetty Taulukossa 2. Kaikkiaan hakutulosten joukosta valittiin 122 tutkimusta, jotka sisällytettiin katsaukseen.

Taulukko 2 Kirjallisuuskatsaukseen sisällytettyjen julkaisujen määrä.

	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma	Liikennevirta	Ympäristö	Turvallisuus	Vuoro-vaikutus
Henkilöautot	13	24	16	17	21
Joukkoliikenne	4	-	3	2	
Robottitaksit	11	1	3	6	
Logistiset ratkaisut	1	5	6	4	

2.4 Asiantuntijatyöpajat

Työn yhteydessä pidettiin kaksi asiantuntijatyöpajaa. Ensimmäinen työpaja järjestettiin 10.10.2023 ohjausryhmän kanssa. Työpajassa esitettiin yhteenveto löydettyistä tuloksista vaikutusalueittain ja mietittiin mitä tulokset tarkoittavat pohjoismaisessa kontekstissa. Toinen työpaja pidettiin VTT:n projektiryhmän kesken 1.11.2023. Työpajassa pohdittiin, mitä olisi huomioitava automaation

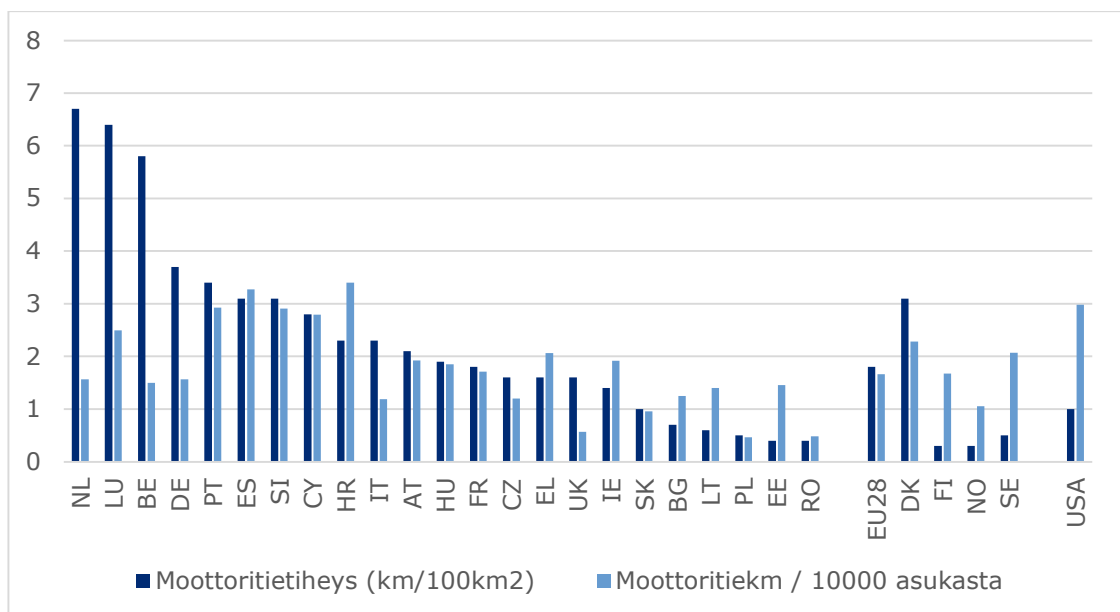
lisääntyessä, jotta voidaan edistää toivottujen ja hillitä epätoivottujen vaikutusten toteutumista.

2.5 Pohjoismaiset erityispiirteet

Tässä työssä arvioitiin kirjallisuuskatsauksen tuloksia pohjoismaisten erityispiirteiden valossa. Pohjoismaiset olosuhteet eroavat monessa suhteessa useasta muusta alueesta, joissa automaatiota tutkitaan. Tämän vuoksi myös tieliikenteen automaation vaikutukset ja vaikutusmahdollisuudet todennäköisesti eroavat. Pohjoismaisiksi erityispiirteiksi tunnistettiin tässä työssä seuraavat:

- talviolosuhteet, haastava keli
- pitkät välimatkat harvaan asutuilla alueilla ja alhaiset liikennemäärät
- lyhyt moottoritieverkko ja paljon kaksikaistaisia maanteitä
- kattava mobiilidatainfrastruktura ja korkea mobiilidatan käyttöaste
- korkeat työvoimakustannukset (kuljettajat)
- vapaa-ajan asunnot ja matkailu isojen kaupunkien ulkopuolella
- luottamus valtioon ja viranomaisiin (esimerkiksi datan jakamisessa)
- useita muita maita pienemmät kaupungit ja kaupunkikeskustat

Kuva 1.1 on esitetty moottoritietiheys suhteessa pinta-alaan ja asukaslukuun Euroopan maissa ja Yhdysvalloissa. Kuvasta oikeasta laidasta käy ilmi, että Suomessa, Norjassa ja Ruotsissa moottoritieverkko pinta-alaan nähden on suhteellisen harva (oranssit histogrammit).



Kuva 1.1 Moottoritietiheys eri Euroopan maissa ja Yhdysvalloissa (Eurostat 2023, ERF 2021).

Vuoden 2022 lopulla Suomessa liikennekäytössä oli yhteensä 2 766 277 henkilöautoa, joiden keski-ikä oli Manner-Suomessa 12,9 vuotta (Moottoriajoneuvokanta 2022). Ajoneuvokannan iät Pohjoismaissa, EU:ssa ja Yhdysvalloissa on esitetty vuodelta 2021 Taulukossa 3 (USA:n tieto vuodelta 2022).

Taulukko 3. Henkilöautojen ja raskaiden ajoneuvojen keski-iat vuosina Pohjoismaissa, EU:ssa ja Yhdysvalloissa vuonna 2021. (ACEA 2023, BTS 2023)

Maa	Henkilöautot	Raskaat ajoneuvot
DK	8,5	7,5
FI	12,6	14,4
SE	10,4	
NO	10,7	12,0
EU27	12,0	14,2
USA	13,1	

Suomessa sähköautojen ja lataushybridien yhteenlaskettu osuus henkilöautojen ensirekisteröinnistä ylsi yli puoleen vuoden 2023 ensimmäisen kymmenen kuukauden ajalla (Autoalan Tiedotuskeskus 2023a). Tällä jaksolla ensirekisteröidyistä henkilöautoista sähköautoja oli 33 %, ladattavia hybridejä 20 % ja bensiinikäyttöisiä 40 %.

Sähköautojen ja lataushybridien osuus koko henkilöautokannasta on kuitenkin yhä pieni. Marraskuun 2023 alussa liikennekäytössä oli noin 78 000 täyssähköautoa ja 130 000 hybridiä (Autoalan Tiedotuskeskus 2023b), eli 2,8 % tai 7,6 % vuoden 2022 henkilöautokannasta. Osuudet ovat kuitenkin olleet kasvussa viime vuosien ajan.

EU-tasolla tuorein käyttövoimiin liittyvä tilastotieto on vuodelta 2021 (Taulukko 4). Vertailun vuoksi taulukkoon on koottu myös tiedot Kaliforniasta, missä on Yhdysvaltojen osavaltiota suurin sähköautojen osuus. Myös siellä sähköautojen myynti on kasvussa, ja täyssähköautojen osuus vuoden 2023 ensirekisteröinneistä marraskuun alkuun mennessä oli 25 % (California Energy Commission 2023a).

Taulukko 4. Eri käyttövoimien osuus henkilöautokannasta Pohjoismaissa 2021, EU:ssa 2021 ja Kaliforniassa 2022. Lähteet: ACEA 2023, California Energy Commission 2023b

	Bensiini (%)	Diesel (%)	Täyssähkö (Battery electric vehicle) (%)	Ladattava hybridi (Plug in hybrid vehicle) (%)	Hybridi (Hybrid vehicle) (%)	Kaasu (Liquefied natural gas) (%)
DK	64,9	28,6	2,4	2,8	1,3	0,0
FI	68,4	27,3	0,8	2,8	0,0	0,5
SE	51,8	34,6	2,2	3,8	3,1	0,8
NO	31,2	41,4	16,2	6,3	4,9	0,0
EU27	51,1	41,9	0,8	0,7	2,3	0,6
Kalifornia	89,4	2,4	2,6	1,2	4,8	

Kuljettajien tukijärjestelmien yleisyyttä Suomessa on tarkasteltu Pilli ym. (2022) selvityksessä. Tämän selvityksen mukaan kuljettajaa avustavat järjestelmät ovat yleistyneet Suomessa nopeasti – useiden järjestelmien määrä ovat kaksikertaistunut vuosien 2018 ja 2022 välillä. Yleisimpiä käytössä olevia kuljettajan tukijärjestelmiä Suomessa ovat muun muassa ajonvakautusjärjestelmä, hätäjarrutusjärjestelmät, pysäköintikamera ja kuljettajan vireystilan tarkkailujärjestelmä.

Taulukossa 5 on esitetty eri järjestelmien osuudet Suomen henkilöautokannassa kesällä 2022.

Taulukko 5. Eri tukijärjestelmillä varustettujen henkilöautojen osuudet Suomen henkilöautokannassa kesällä 2022. Taulukossa on esitetty prosentteina, kuinka monessa autossa järjestelmä on vakiovaruste, mahdollinen lisävaruste tai ei saatavilla. Lähde Pilli ym. (2022).

Järjestelmä	Vakiovaruste (%)	Mahdollinen lisävaruste (%)	Ei saatavilla (%)
Ajonvakautusjärjestelmä ¹	74	11	15
Hätäjarrutus (taajamanopeus) ²	19	19	62
Hätäjarrutus (jalankulkija) ²	16	19	65
Kuljettajan vireystilan tarkkailujärjestelmä ²	13	9	78
Kaistalta poistumisen varoitin	11	29	60
Kaistalla pysymisen avustin ²	8	17	75
eCall ³	8	0	92
Liikennemerkkien tunnistusjärjestelmä	6	16	77
Mukautuva nopeudensäädin ²	3	28	69
Katvealueen varoitin	1	29	70
Automaattinen pysäköintijärjestelmä	0	6	94
Kaistanvaihtoavustin	0	1	99

¹Pakollinen vuodesta 2014 alkaen uusissa henkilöautoissa

²Pakollinen vuodesta 2022 alkaen uusissa henkilöautoissa.

³Pakollinen vuodesta 2018 alkaen uusissa henkilöautoissa.

3 Tulokset

3.1 Yleistä

Tässä luvussa referoidaan kirjallisuuskatsauksen tulokset käyttötapauksittain ja vaikutusalueittain sekä tehdään yhteenveto käyttötapauksittain. Luvussa 4 tarkastellaan tutkimustuloksia ja arvioidaan niiden sovellettavuutta pohjoismaisiin olosuhteisiin.

Koska korkean tason (SAE-taso 3 ja korkeampi) automaation ajoneuvoja ei vielä ole yleisesti liikenteessä, tutkimusmenetelmien valikoima on rajoitettu. Yleisimmät tutkimusmenetelmät korkean tason automaation vaikutusten tutkimuksessa ovat kontrolloidut testit, kenttäkokeet, simulointi ja mallinnus, ajosimulaattorit sekä kyselyt (Harb 2021). Kullakin menetelmällä on hyvät ja huonot puolensa. Taulukossa 6 on esitetty näitä menetelmiä vaikutusalueittain sekä niiden vahvuuksia ja heikkouksia. Automaation vaikutuksia liikennejärjestelmään ja liikkumiseen ei voida suoraan mitata, vaan niitä joudutaan arvioimaan ja mallintamaan. Menetelmät sisältävät useita erilaisia oletuksia, jotka voivat merkittävästi vaikuttaa lopputulokseen.

Taulukko 6 Usein käytettyjä menetelmiä ja niiden vahvuuksia ja heikkouksia automaation vaikutusarvioinneissa

Menetelmä	Vahvuudet	Heikkoudet	Käytetty vaikutusalueelle
Kontrolloitu tutkimus testiradalla	(Joidenkin) suureiden suora mittaus.	Validiteetti: tulokset eivät välttämättä yleisty todelliseen liikenneympäristöön.	Ympäristö (yksittäiset ajoneuvoketjut) Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus
Kenttäkoe oikeassa liikenneympäristössä	(Joidenkin) suureiden suora mittaus. Realistinen ympäristö.	Työläs ja kallis.	Ympäristö (yksittäiset ajoneuvoketjut)
Liikennesimulointi	Vaihtelevien liikennetilanteiden systemaattinen tutkiminen, liikennevirtanäkökulma. Mahdollisuus tarkastella isompia penetraatioasteita kuin kenttäkokeissa.	Mallien ja ohjelmistojen pätevyys, oletukset.	Liikennevirta Ympäristö Liikenneturvallisuus
Aktiviteetti-mallinnus	Vaikutusten simulointi matka- ja yksilötasolla.	Mallien rakentaminen ja kalibrointi työlästä. Kattavaa tietoa ihmisten liikkumisesta on niukasti ja sen kerääminen on haastavaa.	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma
Simulaattori ja virtuaalitodellisuus	Vaihtelevien tilanteiden tutkiminen, yksilönäkökulma.	Validiteetti: tulokset eivät välttämättä yleisty todelliseen liikenneympäristöön.	Liikenneturvallisuus Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus
Kysely	Edullisuus, nopea toteuttaa.	Validiteetti: vastaukset eivät välttämättä kuvaa todellista käyttäytymistä.	Liikennesuorite ja kulkutapajakauma
Onnettomuustilasto	Kuvaavat todellisia onnettomuuksia.	Kattavuus puutteellinen. Eivät välttämättä kerro onnettomuutta edeltävistä tekijöistä ja muista taustatekijöistä tarkasti.	Liikenneturvallisuus

3.2 Henkilöautot

3.2.1 Liikennesuorite ja kulkutapajakauma

Automaattisten henkilöautojen vaikutuksia liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan on tutkittu viime vuosina paljon. Tutkimukset ovat keskittyneet siihen, miten paljon automaattiset henkilöautot voisivat kasvattaa liikennesuoritetta ja missä määrin ne voisivat vähentää joukkoliikenteen ja aktiivisen liikkumisen (kävely ja pyöräily) kulkutapaosuutta. Tutkimuksissa on yleensä tarkasteltu SAE-tasojen 4 tai 5 automaattisia henkilöautoja. Kuljettajaa avustavien järjestelmien vaikutuksista on olemassa jonkin verran tuloksia ja ne käsitellään tämän luvun osana, koska vaikutukset ovat samansuuntaisia korkeamman tason automaation kanssa. Automaattisia henkilöautoja ja robottitakseja on myös usein käsitelty yhdessä. Käyttäjän näkökulmasta ei-jaettu, ovelta ovelle kyydin tarjoava robottitaksi muistuttaakin monella tavalla SAE-tason 5 automaattista henkilöautoa siinä, että kuljettajan ei tarvitse huolehtia ajotehtävästä. Koska tässä suhteessa automaattisen henkilöauton ja robottitaksin vaikutukset ovat osittain päällekkäisiä, on ne koottu yhteen myös Taulukko 7. Automaattinen henkilöauto ja robottitaksi eroavat kuitenkin siinä, miten liikkumisesta maksetaan ja miten ajoneuvo on saatavilla. Robottitakseja käsittelevässä liikennesuorite- ja kulkutapajakaumakappalessa 3.4.1 pureudutaan robottitaksien eroihin suhteessa automaattisiin henkilöautoihin.

Taulukko 7. Automaattisten henkilöautojen ja robottitaksien tunnistettuja vaikutuksia ja mekanismeja. Koottu pääosin katsausten perusteella (Hardman ym. 2022, Soteropoulos ym. 2019).

Vaikutus	Mekanismi
Ajoneuvokilometrit kasvavat	<ul style="list-style-type: none"> Auton käyttämisestä tulee houkuttelevampaa aika- ja vaivakustannusten vähentyessä, mikä kasvattaa ihmisten hyväksymiä matka-aikoja. Tämän seurauksena autolla voidaan tehdä myös pidempiä matkoja sekä uusia matkoja. Edellinen voidaan myös kuvata niin, että alue, joka koetaan olevan saavutettavissa, kasvaa. Tämä voi houkuttaa muuttamaan kauemmas kaupunkikeskuksista tai valitsemaan työpaikan kauempaa. Ihmiset, jotka eivät aikaisemmin halunneet tai voineet ajaa itse, voivat käyttää automaattisia henkilöautoja tai robottitakseja. Esimerkiksi automaattiautolla saatetaan lähteä matkaan pimeään aikaan, vaikka muuten vältettäisiin ajamista pimeällä. Pitkillä matkoilla automaattiauto voi korvata lentämistä tai junalla matkustamista. Automaattiauton voi lähettää pysäköimään itsensä kauemmas sijaitsevalle parkkialueelle, mikä voi helpottaa parkkipaikan löytämistä. Robottitakseja ei tarvitse itse pysäköidä. Automaattiautot ajavat ”tyhjiä kilometrejä” ilman matkustajia siirtyessään kauempana sijaitseville parkkipaikoille, noutaessaan tai odottaessaan matkustajia. Pysäköintipaikkojen puuttuessa tai niiden ollessa kalliita, automaattiauto jää odottamaan matkustajia ajaen tyhjänä. Automaattiautot voivat tietyillä oletuksilla lyhentää matka-aikoja ja tehostaa liikennevirtoja, mikä lisää auton käytön houkuttelevuutta.
Ajoneuvokilometrit vähenevät	<ul style="list-style-type: none"> Jaettuja kyytejä tarjoavat robottitaksit pystyvät ehkä vähentämään ajoneuvokilometrejä, jos kulkutapasiirtymä tapahtuu henkilöautoista jaettuihin robottitakseihin, joiden käyttöaste (matkustajaa per ajoneuvokilometri) on riittävän korkea.
Joukkoliikenteen kulkutapaosuus laskee	<ul style="list-style-type: none"> Autolla ajamiseen liittyvät aika- ja vaivakustannukset vähenevät, mikä voi houkuttaa nykyisiä joukkoliikenteen käyttäjiä valitsemaan automaattiauton. Robottitaksit ja jotkut automaattiset henkilöautot mahdollistavat auton käytön ihmisille, joilla ei ole ajokorttia.
Joukkoliikenteen kulkutapaosuus kasvaa	<ul style="list-style-type: none"> Automaattiautot hidastavat liikennettä, koska ne voivat kasvattaa ajoneuvojen määrää teillä, ajaa hitaammin ja käyttää suurempia turvavälejä. Tällöin joukkoliikenne voi tarjota sujuvamman vaihtoehdon. Robottitaksipalvelut voivat kasvattaa joukkoliikenteen käyttöä tarjoamalla sujuvan ”viimeisen kilometrin” vaihtoehdon.
Aktiivisten kulkutapojen (kävelyn ja pyöräilyn) kulkutapaosuus laskee	<ul style="list-style-type: none"> Automaattiautot ja robottitaksit eivät suoraan kilpaile kävelyn ja pyöräilyn kanssa. Aktiivisten kulkutapojen käyttöön on muita motiiveja (liikunta, virkistyminen, kokemukset) joiden kanssa automaattiautot eivät pysty kilpailemaan. Kävely- ja pyöräilymatkat ovat myös usein sen verran lyhyitä, ettei autoon siirtyminen saisi suurta aikasäästöä. Kokonaisuoritteiden kasvu voi kuitenkin vähentää aktiivisten kulkutapojen osuutta.

Kun liikkujat toteuttavat haluamiaan aktiviteetteja (kuten töissä tai kaupassa käynti), pyrkimys on sellaisen kulkutavan valintaan, joka minimoi matkustamisen koetut kokonaiskustannukset. Nämä kokonaiskustannukset koostuvat rahallisten kustannusten lisäksi myös matkaan käytetystä ajasta ja vaivasta (ITF 2019). Toisaalta matka-aikaan käytetty aika ei välttämättä ole pelkkä kustannus, vaan matkaan käytetyllä ajalla voi olla myös välineellistä tai itsellistä arvoa (*positive utility*) (ITF 2019, Singleton 2019). Junassa ja lentokoneessa voidaan esimerkiksi

työskennellä. Kävelen tai pyöräillen käytetty matka-aika voi tarjota kaivattua liikuntaa tai mahdollisuuden nauttia ympäristöstä. Autolla ajaminenkin voi joissakin tapauksissa olla nautinnollista itsessään. Matka voidaan myös kokea mahdollisuutena rentoutua tai olla tekemättä mitään eri aktiviteettien välillä. Matka- ja kulkutapapäätöksiä mallinnettaessa aikakustannusten suuruus riippuu myös matkaan käytetystä vaivasta ja matka-ajan hyödyistä.

Automaation vaikutuksia kulkutapajakaumaan ja liikennesuoritteeseen on mahdollista hahmottaa tarkastelemalla sitä, miten ajamisen automaatio vaikuttaa kulkutavan koettuihin kustannuksiin ja matka-ajan koettuihin hyötyihin.

Automaattisten henkilöautojen odotetaan edistävän matka-ajan käyttämistä muihin tarkoituksiin, mikä vähentää koettua aikakustannusta (Cornet ym. 2022, ITF 2019). Tärkeässä roolissa matka-ajan uudelleen käytössä ovat digilaitteet, jotka mahdollistavat esimerkiksi työasioiden hoitamisen, yhteydenpidon tai mediaviihteen kuluttamisen liikennevälineissä. Aikakustannusten alentumista digilaitteiden ansiosta on jo mallinnettu esimerkiksi joukkoliikenteen käyttäjien parissa (Wardmann ym. 2020). Toisaalta mahdollisuus työskentelyyn matka-aikana voi lisätä epätoivotusti painetta käyttää matka-aika tuottavasti esimerkiksi rentoutumisen sijaan (Pudane ym. 2019). Ajamisen automaatio voi myös vähentää ajamisesta ja pysäköimisestä johtuvaa vaivaa ja stressiä (Beirão ja Sarsfield Cabral 2007, Werner ja Evans 2011).

Koettujen aikakustannusten väheneminen yhdessä matka-ajan koettujen hyötyjen lisääntymisen kanssa laskee henkilöauton käytön koettuja marginaalikustannuksia. Seurauksena automaattinen henkilöauto valitaan useammin muiden kulkutapojen sijaan, sillä saatetaan tehdä uusia matkoja, jotka olisivat jääneet muuten tekemättä, ja autolla kuljettujen matkojen pituudet voivat kasvaa (Hardman ym. 2022, Pudane ym. 2019, Wardman ym. 2020). Pidemmällä matkoilla automaattisten henkilöautojen on ajateltu kilpailevan erityisesti lentämisen kanssa (Perrine ym. 2020), mutta sama pätee myös esimerkiksi junaliikenteeseen. Pitkällä tähtäimellä tämä voi myös johtaa yhdyskuntarakenteen muutoksiin, kun osa ihmisistä on valmiita muuttamaan kauemmas työpaikoista (Moore ym. 2020).

Automaattiset henkilöautot ovat todennäköisesti jonkin verran kalliimpia hankkia kuin ei-automaattiset, mikä voi muodostua osalle ihmisistä esteeksi automaattisen henkilöauton käyttämiselle (Bösch ym. 2018). Automaattisten autojen vaikutukset matkustamisen kustannuksiin on koottu Taulukko 8. Automaattiset autot saattavat tarvita fyysistä tai digitaalista infrastruktuuria, mutta koska infrastruktuuritarpeet eivät suoraan vaikuta ihmisten liikkumispäätöksiin, on ne rajattu tarkastelun ulkopuolelle.

Taulukko 8. Matka- ja kulkutapapäätöksiin vaikuttavat kustannukset ja hyödyt automaattisten henkilöautojen näkökulmasta.

Kustannuksen tai hyödyn laji	Automaattisten henkilöautojen vaikutus kustannuksiin	Kustannusten vaikutukset liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan
Rahalliset hankintakustannukset	Automaattiset autot ovat todennäköisesti jonkin verran kalliimpia kuin ei-automaattiset.	Vähentää auton hankkimista omaan käyttöön, mikä voi muodostua osalle ihmisistä esteeksi automaattisen henkilöauton hankkimiselle.
Rahalliset käyttökustannukset	Automaattiauton ajotapa saattaa olla taloudellisempi ja vakuutusmaksut alhaisemmat.	Käyttökustannusten väheneminen voi lisätä käyttöä. Vaikutus ei ole todennäköisesti kovin suuri.
Koetut aikakustannukset (sis. koetun vaivan ja matka-ajan hyödyt)	<p>Autolla liikkuminen muuttuu vaivattommaksi, kun kuljettajan ei tarvitse keskittyä liikenteeseen tai pysäköidä itse. Hän voi myös keskittyä paremmin muihin asioihin matkan aikana. Nämä yhdessä vähentävät autolla kulkemisen koettuja aikakustannuksia.</p> <p>Koettuihin aikakustannuksiin voivat vaikuttaa myös muut tekijät. Kuljettaja voi myös esimerkiksi nauttia auton ajamisesta itse, minkä takia automaattiajaminen voisi jopa kasvattaa kuljettajan koettuja aikakustannuksia. Mahdollisuus työskennellä matkan aikana voi myös lisätä odotuksia käyttää matka-aika esimerkiksi työskentelyyn rentoutumisen sijaan, mikä voi myös kasvattaa koettuja aikakustannuksia.</p>	Koettujen aikakustannusten väheneminen automaattisissa henkilöautoissa todennäköisesti kasvattaa henkilöautojen suoritetta ja kulkutapaosuutta. Vaikutus voi olla merkittävä.

Automaattiset henkilöautot voivat vaikuttaa ajoneuvojen kilometrisuoritteeseen myös niin sanottujen tyhjien eli ilman kuljettajaa tai matkustajaa ajettujen kilometrien kautta. Mikäli automaattinen henkilöauto pystyy ajamaan ilman kuljettajan läsnäoloa, on mahdollista järjestää esimerkiksi pysäköinti muualla kuin kodin, työpaikan tai asiointipaikan välittömässä läheisyydessä. Tässä tapauksessa ajoneuvokilometrit voivat kasvaa, vaikka henkilökilometrit eivät kasvaisikaan. Tällaisen automaattisen auton voisi myös lähettää asioille, esimerkiksi noutamaan

ostoksia tai viemään lapsia harrastuksiin. Seurauksena henkilökilometrit voisivat jopa vähentyä, vaikka ajoneuvokilometrit eivät vähenisi.

Kokonaisvaikutusten määrällistämiseksi tarvitaan malleja, jotka pystyvät ennustamaan suorite- ja kulkutapamuutoksia esimerkiksi koettujen aikakustannusten tai rahallisten kustannusten muutosten perusteella. Jotkut mallit huomioivat automaattiautojen tarjoaman liikkuvuuden uusille käyttäjäryhmille, kuten ikääntyneille, joilla ei ole enää voimassa olevaa ajokorttia. Mallinnukset kohdistuvat yleensä tietyille maantieteelliselle alueelle ja ne perustuvat esimerkiksi liikenteen neliporrasmalleihin (*four-step model*), aktiviteettiperustaisiin agenttimalleihin tai systeemidynaamisiin malleihin.

Kirjallisuudessa esitetyt vaikutusten suuruudet vaihtelevat paljonkin johtuen eri menetelmien ja niissä käytettyjen oletusten eroista. Seuraavaksi esitetään kolmessa eri tutkimuksessa (Hardman ym. 2022, Sonnleitner ym. 2022, Kröger ym. 2019) saatuja numeerisia estimaatteja vaikutuksille.

Automaattiset henkilöautot Stuttgartin alueella

Sonnleitner ym. (2022) mallinsivat Stuttgartin (Saksa) alueen liikenteen kysyntää kulkutavoittain. Alueella on 2,5 miljoonaa asukasta. Automaation penetraatioasteet vaihtelivat mallinnuksessa vertailutason 0 %:sta täyteen automaatioon. Automaattiautot olivat korkean automaatiotason (SAE-taso 4) henkilöautoja yksityisessä käytössä, ja ne eivät olleet vielä verkottuneita. Penetraatioasteen kasvaessa myös automaattisten autojen kykyjen oletettiin paranevan: Ensimmäisen sukupolven automaation oletettiin pitävän pidempiä aikavälejä edellä ajavaan kuin kehittyneen automaation. Mallinnuksessa verrattiin myös oletuksia, että automaattiautot pystyisivät toimimaan automaattisessa tilassa vain moottoriteillä tai koko päätieverkolla. Ajan arvon muutosta tarkasteltiin oletuksilla 0 %, -15 % ja -30 %. Mallinnuksessa ei tarkasteltu muutoksia pysäköimiseen tai ihmisten aktiviteetteihin.

Aikakustannusten ja toiminta-alueen merkitys liikennesuoritteelle ja kulkutapaja-kaumalle on huomattava (Taulukko 9). Kun oletettiin laaja toimintaympäristö, korkea automaattisten autojen osuus (80 %) ja 30 % aikakustannusten väheneminen, kasvoivat henkilöautolla ajettujen kilometrien määrä 11,9 prosenttiyksikköä ja kokonaishenkilökilometrit 11,8 prosenttiyksikköä. Jos automaation toimintaympäristö rajataan vain moottoriteille, olisivat vaikutukset vajaa puolet tästä.

Taulukko 9. Yksityiskäytössä olevien automaattisten henkilöautojen (SAE-taso 4) vaikutukset henkilökilometreihin automaattisten autojen eri penetraatioasteiden ja aikakustannusten muutosten suhteen Sonnleitnerin ym. (2022) mukaan.

Oletukset		Vaikutukset henkilökilometreihin				
Aut. henkilöautojen osuus henkilöautoista	Aikakust. muutos	Auton ajajana	Auton matkustajana	Julkinen liikenne	Kävely ja pyöräily	Yhteensä
0 % vuosi 2025		65,0 %	9,0 %	21,3 %	4,7 %	100,0 %
Automaattisten henkilöautojen toimintaympäristö: Vain moottoritiet						
80 % (kehittynyt automaatio)	-30 %	70,7 %	9,8 %	20,5 %	4,6 %	105,6 %
80 % (kehittynyt automaatio)	0 %	67,1 %	9,3 %	20,9 %	4,7 %	102,0 %
40 % (ensimmäisen sukupolven automaatio)	0 %	64,3 %	8,8 %	21,4 %	4,7 %	99,5 %
Automaattisten henkilöautojen toimintaympäristö: Kaikki päätiet						
80 % (kehittynyt automaatio)	-30 %	76,9 %	10,9 %	19,6 %	4,4 %	111,8 %
80 % (kehittynyt automaatio)	0 %	68,1 %	9,5 %	20,7 %	4,6 %	102,9 %
40 % (ensimmäisen sukupolven automaatio)	0 %	63,8 %	8,7 %	21,5 %	4,7 %	98,8 %

Muuten samoilla oletuksilla, mutta ilman aikakustannusten muutosta, henkilöautokilometrit kasvoivat vain 2,1 prosenttiyksikköä ja kokonaishenkilökilometrit 2,0 prosenttiyksikköä. Tämä vaikutus johtui siitä, että automaattisten autojen oletettiin pystyvän pienemmillä turvaväleillä (ns. kehittynyt automaatio) ja siten tehokkaan liikennettä ja lyhentäen matka-aikoja.

Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty myös mallinnus ilman aikakustannusmuutosta, jossa automaattisten autojen oletettiin pitävän suurempia välejä kuin ihmiskuljettaja (ns. ensimmäisen sukupolven automaatio). Automaattisten autojen osuus oli vain 40 %. Tästä johtuva tehokkuuden lasku kasvattaa matka-aikoja ja jopa vähentää henkilöautolla ajettuja kilometrejä sekä matkustajakilometrejä kokonaisuudessaan.

Henkilöautolla ajettujen kilometrien kasvu heijastuu julkisen liikenteen henkilökilometrien lievänä laskuna ja henkilöauton matkustajien kilometrien kasvuna.

Kävelyn ja pyöräilyn henkilökilometreihin vaikutukset ovat saman suuntaisia kuin julkiseen liikenteeseen, mutta suuruusluokaltaan pieniä.

Sonnleitnerin ym. (2022) tutkimuksen vahvuutena on se, että se on tarkastellut samassa simulaatiomallissa eri penetraatioasteiden, aikakustannusten ja automaattiseen ajamiseen valmiin verkon laajuuden vaikutuksia eri kulkutapojen jakaumaan ja suoritteeseen.

Täysin automaattiset henkilöautot Saksassa ja Yhdysvalloissa

Kröger ym. (2019) mallinsivat SAE-tason 5 automaattisten henkilöautojen vaikutuksia kulkutapajakaumaan ja suoritteeseen Saksassa ja USA:ssa. Autojen oletettiin silti edelleen olevan yksityisessä käytössä. Oletuksina olivat aikakustannusten vähenemä 25 %:lla ja se, ettei automaatio vaikuta nopeuksiin. Vertailukohdaksi käytettiin mallinnusta vuodesta 2035 ilman automaatiota ja sitä verrattiin vuoteen 2035 kahdella eri automaation penetraatioasteella: Trendin mukainen automatisoituminen kuvaa automaattisten autojen penetraatioastetta ja vaikutuksia todennäköisellä yleistymistahdilla. Voimakas automatisoituminen kuvaa automaattisten autojen penetraatioastetta ja vaikutuksia siinä tapauksessa, että olosuhteet ovat erittäin suotuisat automaattiautojen yleistymiselle. Mallinnuksen perusteella henkilöauton kulkutapaosuus ja kilometrisuorite kasvavat ja joukkoliikenteen vastavasti vähenevät (Taulukko 10). Muutokset ovat suurimpia kaikista lyhyimmillä (< 2 km) matkoilla sekä pitkillä matkoilla (> 32 km). Aktiivisten kulkutapojen osuus alle 4 km matkoista laskee myös jonkin verran.

Taulukko 10. Automaattisten henkilöautojen penetraatioasteet 2035 ja vaikutukset henkilöliikenteeseen Saksassa ja USA:ssa Krögerin ym. (2019) mukaan.

Maa	Indikaattori	Ei automaatiota	Trendin mukainen automatisoituminen	Voimakas automatisoituminen
Saksa	Autom. autojen penetraatioaste	0 %	10,1 %	37,6 %
	Henkilöautojen kilometrisuoritteiden muutos suhteessa "ei automaatiota"-skenaarioon		3,4 %	8,6 %
	Henkilöautojen osuus matkoista	45,1 %	46,1 %	48,8 %
	Joukkoliikenteen kilometrisuoritteiden muutos suhteessa "ei automaatiota"-skenaarioon		-6,0 %	-19,6 %
	Joukkoliikenteen osuus matkoista	8,6 %	8,3 %	7,7 %
	Aktiivisten kulkutapojen osuus alle 4 km matkoista	33,8 %	33,5 %	32,7 %
Yhdysvallat	Autom. autojen penetraatioaste	0 %	7,5 %	29,3 %
	Henkilöautojen kilometrisuoritteiden muutos suhteessa "ei automaatiota"-skenaarioon		2,4 %	8,6 %
	Henkilöautojen osuus matkoista	66,6 %	66,9 %	69,4 %
	Joukkoliikenteen kilometrisuoritteiden muutos suhteessa "ei automaatiota"-skenaarioon		-4,3 %	-16,6 %
	Joukkoliikenteen osuus matkoista	2,6 %	2,4 %	2,2 %
	Aktiivisten kulkutapojen osuus alle 4 km matkoista	20,3 %	19,9 %	19,1 %

Kuljettaja käytössä -koe

Harb ym. (2018) tekivät Kaliforniassa kokeen, jossa koehenkilöille annettiin kuljettaja vapaasti käyttöön 60 tunnin ajaksi. Kuljettaja ajoi koehenkilöiden omistamaa autoa, ja koehenkilöt maksoivat polttoainekustannukset. Ajatuksena oli "simuloida" täysin automaattista autoa käyttäjän näkökulmasta. Osallistujien ajoneuvokilometrit kasvoivat 83 %, pitkät yli 20 mailin matkat lisääntyivät 91 % ja klo 18 jälkeen tehdyt matkat 88 %. 21 % ajoneuvokilometreistä oli "tyhjiä kilometrejä", eli kokeeseen osallistuja lähetti "automaattiautonsa" kuljettamaan tavaroita tai noutamaan ihmisiä ilman, että kyydissä oli muita kuin palkattu kuljettaja.

Osittaisen automaation vaikutukset (SAE-taso 2)

Osittain automatisoitujen autojen eli SAE-tason 2 kuljettajan tukijärjestelmien vaikutuksista liikennesuoritteeseen on myös empiiristä dataa. Hardman ym. (2022) tekivät kyselytutkimuksen kalifornialaisille Teslan käyttäjille. He tarkastelivat sitä, kuinka paljon enemmän Teslan Autopilotin käyttäjät ajavat verrattuna sellaisiin Teslan käyttäjiin, joilla ei ollut Autopilotia käytössä. Teslan Autopilot pysyy säätelemään sekä nopeutta että ohjausta, mutta edellyttää vielä kuljettajan valvontaa. Kyseessä on siis SAE-tason 2 järjestelmä. Kaikkien Teslan käyttäjien ajokilometrien keskiarvo oli 42 060 (mediaani 23 751). Vuosittainen ajosuorite mallinnettiin auton kyselyaikaisen matkamittarilukeman ja auton iän perusteella.

Vertailemalla ryhmiä suoraan havaittiin, että Teslan Autopilotin käyttäjät ajoivat 5 349 km enemmän vuodessa kuin ne Teslan käyttäjät, joilla ei ollut SAE-tason 2 kuljettajan tukijärjestelmää käytössä. Koska ajettuihin kilometreihin voivat vaikuttaa monet muut tekijät (asuinympäristö, tulotaso, ikä, sukupuoli jne.), tarkasteltiin tukijärjestelmän vaikutusta tilastollisella mallilla, jossa näiden muiden tekijöiden vaikutukset oli pyritty huomioimaan. Mallinnuksen perusteella Autopilotin käyttäjien arvioitiin ajavan jopa 6 532–8 000 km enemmän vuodessa kuin niiden, jotka eivät käyttäneet Autopilottia.

Hardman ym. (2022) kysyivät myös, oliko ihmisten matkustaminen lisääntynyt Autopilotilla varustetun auton hankkimisen jälkeen paikallisilla matkoilla (esimerkiksi työmatkat, asiointi, kauppamatka) tai pidemmällä matkoilla (esimerkiksi viikonloppuretket, lomamatkat). Paikallisilla matkoilla 10 % vastaajista arvioi matkustamisen lisääntyneen, 89 % arvioi sen pysyneen samana ja 2 % koki sen vähentyneen. Pidemmällä matkoilla 36 % sanoi matkustamisen lisääntyneen, 63 % sanoi sen pysyneen samana ja 2 % koki matkustamisen vähentyneen.

Hardmanin ym. (2022) tutkimuksen vahvuutena on se, että se perustuu tutkimusjoukkoon, joka oikeasti käyttää osittain automatisoitua autoa (SAE-taso 2) osana päivittäistä liikkumistaan. Toisaalta on hyvä huomata, että ostaja- ja vastaajajoukkoon on voinut valikoitua sellaisia ihmisiä, jotka ovat kiinnostuneita uudesta tekniikasta ja sen luomista mahdollisuuksista esimerkiksi matkustaa enemmän. Vaikka eri tekijöiden vaikutus pyrittiin ottamaan huomioon mallinnuksessa, niin on mahdollista, että ajomäärän lisääntymistä selittää ainakin osin myös muut tekijät kuin SAE-tason 2 kuljettajan tukijärjestelmät.

3.2.2 Liikennevirta

Tässä luvussa esitetään tutkimustuloksia korkean automaation vaikutuksista liikennevirtaan. Tarkastelussa ovat erikseen vaikutukset välityskykyyn, matka-aikeihin ja nopeuteen. Lisäksi lopuksi esitetään tutkimuksia kenttätutkimuksista. Osa tuloksista pohjautuu Aittoniemen vuonna 2022 tekemään simulaatioita koskevaan kirjallisuuskatsaukseen (Aittoniemi 2022).

Liikennevirtatutkimuksissa ei aina tehdä selvää eroa automaation eri tasojen välillä, vaan korkeamman tason automaation vaikutuksia moottoriteillä on voitu tutkia mallintamalla automaattiauton pitkittäistä liikettä mukautuvaa vakionopeudensäädintä (*ACC, Adaptive Cruise Control*) kuvaavalla säätimellä olettaen, että pitkittäisen liikkeen toimintaperiaatteet ovat samanlaiset myös korkeamman tason automaatiassa. Tästä syystä kappale sisältää myös alemman tason automaatiojärjestelmistä saatuja tuloksia. Suurimmat erot liikennevirran kannalta liittyvät siihen, voiko kuljettaja itse valita tavoiteaikavälin ja -nopeuden. On todennäköistä, että korkeamman tason automaatiolla automaattifunktion ollessa vas- tuussa ajotehtävästä esimerkiksi nopeusrajoituksen ylittäminen ei ole mahdollista toisin kuin alemman tason automaatiolla.

Koska korkeamman tason automaattiautoja ei vielä ole liikenteessä ja niiden tarkat toimintaperiaatteet ovat liikesalaisuuksia eivätkä tutkijoiden tiedossa, mahdollisia vaikutuksia liikennevirtaan on tutkittu simuloinneilla olettamalla erilaisten teoreettisten säätimien edustavan tarpeeksi hyvin automaatiojärjestelmää tai muokkaamalla alun perin ihmiskuljettajia kuvaavien ajoneuvonseurantamallien parametreja (Do ym. 2019).

Välityskyky

Henkilöautojen automaation vaikutuksia liikennevirtaan on tutkittu pääosin mikrosimuloinneilla yksittäisissä skenaarioissa käyttäen erilaisia oletuksia ja simulointimalleja (Aittoniemi 2022). Erityisesti moottoriteiden välityskyky ja sen muutos automaattisten autojen lisääntyessä on ollut tutkimusten kiinnostuksen kohteena. Aittoniemi (2022) tuotti yhteenvedon kahdestatoista simulointitutkimuksesta, jotka tutkivat ei-verkottuneiden automatisoitujen henkilöautojen vaikutuksia liikennevirtaan. Katsauksessa havaittiin, että automatisoitujen autojen tavoiteaikavälien ja tien välityskyvyn (*throughput*) välillä on negatiivinen lineaarinen yhteys, ja välityskyky paranee lähinnä alle 1,2 s tavoiteaikaväleillä verrattuna pelkästään ihmiskuljettajista koostuvaan liikennevirtaan. Välityskyky siis simulointitutkimuksissa paranee silloin, kun automaattiautojen tavoiteaikavälit ruuhkatilanteissa ovat lyhempiä kuin ihmiskuljettajien käyttämät reilun sekunnin keskimääräiset aikavälit (Moridpour 2014).

Oletuksista, erityisesti automaattiautojen tavoiteaikavälistä, riippuen tulokset yksittäisissä skenaarioissa ovat vaihdelleet välityskyvyn useamman kymmenen prosentin kasvusta useamman kymmenen prosentin laskuun 100 % penetraatioasteella. Penetraatioasteella 20–25 % vaihteluväli on noin -10 %:sta +10 %:iin. Monet tutkimukset olettavat optimistisesti, että automaattiautot voivat käyttää lyhyitä, noin 0,5 s aikavälejä. Näin lyhyiden aikavälien toteutumiseen todellisuudessa ei ole viitteitä.

Calvert ym. (2017) tutkivat mikrosimuloinnilla automatisoitujen autojen vaikutuksia 19 km pitkän kolmikaistaisen moottoritien välityskykyyn ja matka-aikoihin. Simulointeja tehtiin kahdella automaattiautojen tavoiteaikavälijakaumalla, joista ensimmäisen keskiarvo oli 0,9 s ja toisen 1,5 s. Simuloinnin aikana liikennemäärä kasvatettiin 3 300 ajoneuvosta tunnissa 6 270 ajoneuvoon tunnissa, minkä jälkeen liikennemäärä vähitellen laski nollaan. Raskaiden ajoneuvojen osuus virrasta oli 6 %. Tutkijat päättelivät, että automaattiautot saattavat aluksi heikentää liikenteen sujuvuutta. Simuloinneissa parannuksia nähtiin vasta yli 70 % penetraatioasteilla. Kun 30 % henkilöautoista oli automatisoituja, moottoritien välityskyky ei muuttunut pienemmällä tavoiteaikavälijakaumalla ja laski 6 % suuremmalla aikavälijakaumalla. Matka-ajat kasvoivat samoissa olosuhteissa 5 % ja 13 %. Kun kaikki henkilöautot liikennevirrassa olivat automatisoituja, välityskyky kasvoi pienemmällä aikavälijakaumalla 7 % ja isommalla laski 14 %. Matka-ajat laskivat vastaavasti 26 % ja 2 %.

James ym. (2019) simuloivat ACC-järjestelmällä varusteltuja automatisoituja autoja suoralla moottoritienpätkällä muutamalla eri ajoneuvonseurantamallilla. Mallit oli kalibroitu kaupallisella ACC-ajoneuvolla kerätyllä kenttädatalla. Tulokset kaikilla malleilla osoittivat, että vaikutukset moottoritien välityskykyyn riippuvat penetraatioasteesta. Automatisoitujen autojen osuuden ollessa pieni (alle 25 %) välityskyky kasvoi, jos suurin osa kuljettajista valitsi pienet tavoiteaikavälit, kun taas isolla penetraatioasteella (yli 50 %) välityskyky laski. Suuremmilla tavoiteaikaväleillä välityskyky laski jo pienemmällä penetraatioasteella. Simuloinneissa ei ollut raskaita ajoneuvoja. Artikkelissa ei tehdä johtopäätöksiä siitä, miksi välityskyky laski, mutta sen voidaan olettaa johtuvan ainakin osittain automaattiautojen varovaisemmasta ajotavasta (pienemmät kiihtyvyydet kuin ihmiskuljettajilla), sillä välityskyky laski myös suhteellisen pienillä automaattiautojen tavoiteaikaväleillä (1,1 s).

Matka-ajat ja nopeudet

Calvert ym. (2017) tutkimuksessa pienemmillä tavoiteaikaväleillä (jakauman keskiarvo 0,9 s) ja penetraatioasteilla 5–80 % matka-ajat kasvoivat 0–1 %. Kun kaikki henkilöautot olivat automatisoituja, matka-ajat lyhenivät 26 %. Suuremmilla aikaväleillä (jakauman keskiarvo 1,5 s) havaittiin 5–19 % kasvu matka-ajoissa 10–90 % penetraatioasteilla ja pieni kahden prosentin lasku 100 % penetraatioasteella.

Mattas ym. (2018) tutkivat automaattisten ja verkottuneiden automaattisten autojen vaikutuksia matkanopeuksiin Belgian Antwerpenin kehätiellä (117 km). Automaattiautoilla ilman verkottuneisuutta huipputunnin ajonopeudet laskivat kaikilla tavoiteaikavälvaihtoehdoilla (1,1 s, 1,6 s ja 2,2 s). Automaattiautojen 20 % penetraatioasteella vaikutus 1,1 s aikavälillä oli 0 %, 1,6 s aikavälillä 8 % ja 2,2 s aikavälillä 23 %. Kun kaikki henkilöautot olivat automaattisia, matkanopeudet laskivat vastaavasti 38 %, 50 % ja 62 %. Kun automaattiautot olivat lisäksi verkottuneita, nopeudet kasvoivat etenkin isolla penetraatioasteella. Verkottuneiden automaattiautojen penetraatioasteen ollessa 20 % nopeudet kasvoivat 7 % tavoiteaikavälillä 1,1 s, pysyivät samana tavoiteaikavälillä 1,6 s ja laskivat 7 % tavoiteaikavälillä 2,2 s. 100 % penetraatioasteella nopeudet kasvoivat kaikilla tavoiteaikaväleillä 21 % verrattuna tilanteeseen ilman automaatiota. Huipputunnin lisäksi Mattas ym. (2018) tutkivat vaikutuksia matkanopeuksiin alhaisen kysynnän tilanteessa. Silloin nopeudet laskivat hieman (6–17 %), kun ei-verkottuneiden automaattiautojen penetraatio kasvoi, mutta pysyivät samana verkottuneen automaation osalta. Raskaiden ajoneuvojen osuus liikennevirrasta oli 10 %.

Stogios ym. (2019) tutkivat automaattiautojen vaikutuksia matka-aikoihin 5 km pitkällä moottoritienpätkällä Kanadassa käyttäen mikrosimulointia. He tutkivat kahta erityyppistä automaattiautoa: aggressiivista, jonka tavoiteaikaväli oli 0,5 s, ja varovaista tavoiteaikavälillä 2,1 s. Simuloinneissa käytettiin kahta liikennemäärää: alhainen (50 % huipputuntiliikenteestä) ja korkea (150 % huipputuntiliikenteestä). Simuloinneissa ei ollut raskaita ajoneuvoja. Tilanteessa, jossa 100 % autoista oli automatisoituja, matka-ajat laskivat pienemmällä tavoiteaikavälillä 39 %, kun taas suuremmalla ne kasvoivat 26 %.

Liu ym. (2020) simuloivat verkottuneen ACC:n (*CACC, Cooperative Adaptive Cruise Control*) vaikutuksia Kaliforniassa. Tutkimuksessa tarkasteltiin 20 kilometrin pituista moottoritieosuutta, jossa oli useita liittymiä ja kaistoja, aamuruuhkaliikenteessä. Tulokset osoittivat, että keskinopeus nousi lähes lineaarisesti CACC:n penetraatioasteen kasvaessa. Penetraatioasteen ollessa 100 % keskinopeus oli 70 % korkeampi kuin ilman automaatiota (noin 53 km/h:istä 90 km/h:iin), ja keskinopeus kasvoi lähelle vapaiden liikenneolosuhteiden keskinopeutta. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös tilannetta, jossa liikennemäärää lisättiin 5–40 % aamuruuhkatunnista. Tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon liikennemäärä voisi kasvaa niin, että keskinopeus säilyisi samana kuin alkuperäisessä tilanteessa ilman automaatiota. CACC-ajoneuvojen penetraatioasteen ollessa 100 % moottoritiele mahtui noin 30 % enemmän liikennettä samalla keskinopeudella, mutta tilanne oli ruuhkainen. Tämä kasvu oli paljon pienempi kuin aiemmassa CACC-tutkimuksessa yksittäisessä liittymässä havaittu välityskyvyn kasvu 90 %:lla (Liu ym. 2018). Pääsiallinen syy tähän eroon oli tutkijoiden mukaan se, että yksittäisen pullonkaulan suorituskyvyn parantuminen kasvatti liikennettä alavirtaan, mikä lisäsi seuraavien pullonkaulojen ruuhkautumista.

Liu ym. (2020) päättelevät, että yksittäisen liittymän parannuksia on vaikea soveltaa koko verkolle eikä yksittäisten pullonkaulojen sujuvoituminen tuonut saman suuruusluokan hyötyä koko moottoritiepatkan liikenteelle. He ehdottavat vastatoimena liikenteen hallintastrategioita (esimerkiksi nopeuksien harmonisointi) pullonkaulojen sisään- ja ulostulovirtausten hallitsemiseksi. Tulos korostaa suurempien kokonaisuuksien tarkastelun tärkeyttä yksittäisten liittymien tai muiden pullonkaulojen sijaan. Liikennevirrassa oli raskaita ajoneuvoja, mutta on epäselvää, onko vaikutuksia niiden nopeuksiin sisällytetty tuloksiin.

Mesionis ym. (2020) simuloivat lyhyitä tavoiteaikavälejä käyttäviä automaattiautoja 32 km pituisella moottoritieellä Englannissa aamu- ja iltapäivähuipputuntina. Liikenteessä oli 8 % raskaita ajoneuvoja. 25 %:n penetraatioasteella matka-ajat lyhenivät 12–17 % ja viivytykset 23–37 %. 100 %:n penetraatioasteella matka-ajat lyhenivät 28–29 % ja viivytykset 58–69 %.

L3Pilot-hankkeessa arvioitiin ehdollisella automaatiolla (SAE-taso 3) varusteltujen henkilöautojen vaikutuksia Euroopan moottoritieverkolla vuoden ajalle, huomioiden rajatun toimintaympäristön sääolosuhteiden kannalta (Aittoniemi ym. 2023). Arviointi tehtiin mikrosimuloinnilla erilaisissa Euroopan moottoritieverkkoa edustavissa skenaarioissa ja skaalaamalla vaikutukset Euroopan tasolle hyödyntäen kartta- ja liikennemäärätietoja Euroopan moottoritieverkosta sekä säästä. Tutkimus osoitti, että vaikka vaikutukset tietyissä, erityisesti suuren liikennemäärän, skenaarioissa voivat olla merkittävät, näiden tilanteiden osuus kokonaisuuriteesta on pieni. Kokonaisvaikutusten laskennassa suurempi painoarvo on pienen liikennemäärän tilanteilla, joissa automaattiautojen vaikutukset olivat pieniä. Arvioitu kokonaisvaikutus matka-aikoihin Euroopan moottoritieverkolla oli 0,8 %.

Kenttätutkimukset

Liikennesimulointien lisäksi ACC:n vaikutuksia liikennevirtaan on tutkittu myös kenttäkokeilla kahdella tavalla (Aittoniemi 2022). Muutama tutkimus koski yksittäisiä ACC-järjestelmällä varustettuja ajoneuvoja jokapäiväisessä ajossa tavallisessa liikenteessä (Schakel ym. 2017, Alkim ym. 2007, Zhu ym. 2019). Toisen ryhmän muodostivat kontrolloidut kokeet, joissa tutkittiin useita toisiaan ACC-tilassa seuraavia ajoneuvoja ajoneuvon seuranta-tilanteissa. Useimmat tutkimukset keskittyivät pitkittäiseen liikkeeseen (*longitudinal motion*), ja kaistanvaihtokäyttäytymistä on tutkittu vähemmän.

Tulokset osoittivat, että keskimääräiset aikavälit ajoneuvon seuranta-tilanteissa olivat pidemmät ACC-tilassa kuin ihmisen ajaessa. Schakel ym. (2017) tutkivat kiihdytys- ja hidastuskäyttäytymistä ja havaitsivat, että ACC:n ollessa päällä nopeudet olivat korkeammat sekä hidastettaessa edessä olevan ajoneuvon jarrutuksen jälkeen että kiihdytettäessä pysähdysten jälkeen. Kolmen tutkimuksen tulokset (Schakel ym. 2017, Alkim ym. 2007, Zhu ym. 2019) osoittivat, että aikavälien ja kiihtyvyyksien keskihajonnat olivat pienemmät ACC:n ollessa päällä.

Ajoneuvoletkoja testanneissa kenttäkokeissa on ollut kahdesta kymmeneen ajoneuvoa eri valmistajilta, joissa on ollut tehdasvarusteltu ACC-järjestelmä. Kokeissa ajoneuvoletka ihmisen kuljettamaa tai vakionopeudensäätimellä ajavaa johtoajoneuvoa. Kuusi tutkimusta (Milanés ym. 2014, Knoop ym. 2019, He ym. 2020, Gunter ym. 2020, Li ym. 2021, Shi ja Li 2021) tehtiin yleisillä teillä ja kolme (Tiernan ym. 2017, Makridis ym. 2020a, Ciuffo ym. 2021) testiradoilla. Useimmissa tutkimuksissa tutkittiin seuraavien ajoneuvojen toimintaa

johtoajoneuvon nopeusmuutosten yhteydessä, kun taas kahdessa tutkimuksessa (He ym. 2020, Knoop ym. 2019) käsiteltiin naturalistista ajotapaa. Viidessä tutkimuksessa, joissa tutkittiin ajoneuvoletkojen stabiliteettia (*string stability*) todettiin, että johtoajoneuvon pienet nopeuden muutokset voimistuvat jokaisessa seuraavassa ajoneuvossa, eli järjestelmät olivat epästabiileja (*string unstable*). Tiernan ym. (2017) eivät tutkineet eksplisiittisesti stabiliteettia, mutta kenttäkokeen tulokset, joissa seurattavien ajoneuvojen reaktiot voimistuivat, viittaavat samaan johtopäätökseen. Tämä havainto eroaa simulointimalleissa yleisestä oletuksesta, että letkat ovat stabiileja.

He ym. (2020) tekemässä kenttäkokeessa kolmea ACC-ajoneuvoa seurasi ihmisen ohjaama ajoneuvo, joka ei voimistanut edellään kulkevien autojen reaktioita vaan pystyi jopa vähentämään häiriöitä.

Kolmessa uudemmassa vuonna 2021 julkaistussa tutkimuksessa (Ciuffo ym. 2021, Shi ja Li 2021, Makridis ym. 2021) pyrittiin selittämään kaupallisissa ACC-järjestelmissä havaittua epästabiiliutta. Niissä tutkimuksissa, joissa letka muodostui eri ajoneuvomerkkien ja -mallien ajoneuvoista (Ciuffo ym. 2021, Shi ja Li 2021), havaittiin eroja erilaisten kaupallisten ACC-järjestelmien käyttäytymisessä, mikä viittaa järjestelmien suunnittelun eroavaisuuksiin valmistajien välillä. Myös Makridis ym. (2021) ja Staiger ja Calvert (2021), jotka analysoivat useiden empiiristen tutkimusten tuloksia, havaitsivat valmistajien välisiä eroja ACC-säätimissä. Li ym. (2021) havaitsivat, että kaupallisen ACC-säätimen reaktio edellä olevan ajoneuvon käyttäytymiseen riippuu aikaväliasetuksesta, nopeustasosta ja ärsykeestä, kuten johtavan ajoneuvon hidastuvuuden suuruudesta. Seuraavien ajoneuvojen reaktioiden vahvuudet ja ylivärähtelyt (*overshoot*) olivat suurempia alemmilla nopeuksilla.

On mahdollista, että automaattiautojen verkottuneisuus on tarpeen liikennevirran stabiiliteetin varmistamiseksi. Toisaalta myös ei-verkottuneen ACC:n kohdalla stabiiliteetti voi olla mahdollinen saavuttaa (Donà ym. 2022). ACC:tä kehittyneempien ja korkeamman tason automaatiojärjestelmien toiminta vastaavissa tilanteissa ei vielä ole tiedossa.

3.2.3 Ympäristö

Usein siteeratusta artikkelissaan Wadud ym. (2016) käsittelevät automaation vaikutusmekanismeja energiankulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. He jakoivat vaikuttavat tekijät seuraaviin: liikkumisen määrä (*travel activity*), kulkutapaja-kauma, energiankulutus kilometriä kohti ja polttoaineen hiilipitoisuus (*carbon intensity of fuel*) ja arvioivat automaation vaikutuksia kuhunkin näistä. Tutkitut mekanismit olivat hyvin eri tasoisia ja niiden vaatimukset automaation toimintamallille ja -ympäristölle erosivat. Mekanismit olivat ruuhkien lieventäminen (*mitigation*), ympäristöystävällinen ajotapa (*eco-driving*), letka-ajo, korkeammat ajonopeudet, muutokset ajoneuvojen suorituskyvyssä, parempi törmäyksenesto, ajoneuvojen oikeanlainen mitoitus, muutokset matkakustannuksissa, uusien käyttäjryhmien kysyntä ja muutokset liikkumispalveluiden palvelumalleissa. Tutkimuksessa oletettiin lähes 100 % penetraatioastetta sekä kevyiden että raskaiden ajoneuvojen osalta. Skenaarioiden viitevuotena toimi vuosi 2050. Mekanismin vaikutusarviot perustuivat kirjallisuuskatsaukseen melko optimistisin oletuksin. Skenaariosta riippuen automaatio saattaa kirjoittajien mukaan vähentää tieliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä ja energiantarvetta puolella, tai kaksinkertaistaa ne, riippuen automaation toteuttamisperiaatteista esimerkiksi ajoneuvojen

ominaisuuksien ja koon, jaettujen kyytien osuuden, suoritteiden kasvun ja lainsäädännöllisten toimenpiteiden suhteen.

Automaattiautojen päästövaikutusten arviointi perustuu suurelta osin samoihin periaatteisiin kuin liikennevirtavaikutusten: niitä on tutkittu pääosin liikenteen mikrosimuloinneilla erilaisilla kuljettajamalleilla ja oletuksilla yksittäisissä skenaarioissa (tietyissä tieympäristöissä ja liikennetilanteissa). Tutkimukset ja niiden tulokset eroavat sen suhteen, kuinka pitkälle meneviä oletuksia niissä on tehty ja mitä vaikutusmekanismeja ne huomioivat. Seuraavassa esitetään yksittäisiä simulointi- ja kenttätutkimuksia automaation vaikutuksista CO₂-päästöihin. Osa tuloksista pohjautuu Aittoniemen vuonna 2022 tekemään simulaatioita koskevaan kirjallisuuskatsaukseen (Aittoniemi 2022).

Simulointitutkimukset

Mattas ym. (2018) tutkivat automaattisten ja verkottuneiden automaattisten autojen vaikutuksia mikrosimuloinnilla Belgian Antwerpenin kehätiellä (117 km). Automaattiautoilla, jotka käyttivät 1,6 s tavoiteaikaväliä, liikenteen päästöt vähenivät noin 2 % tilanteessa, jossa liikennemäärä oli 80 % huipputuntikysynnästä ja penetraatioaste vähintään 70 %. Huipputuntina vähintään 60 % penetraatioaste johti päästöjen kasvuun 2–6 %:lla, ja suurimmalla kysyntätasolla (120 % huipputuntikysynnästä) päästöt kasvoivat 2–11 %, kun automaattiautojen osuus henkilöautoista oli yli 50 %. Päästöjen kasvu selitettiin mm. keskinopeuksien muutoksilla. Verkottuneiden automaattiautojen kohdalla päästöt pysyivät samalla tasolla huipputuntiliikenteessä ja liikenteen ollessa 80 % huipputuntikysynnästä. Liikennemäärän ollessa 120 % huipputuntikysynnästä päästöt vähenivät 2–4 %. Raskaiden ajoneuvojen osuus liikennevirrasta oli tässä tutkimuksessa 10 %.

Stogios ym. (2019) simulointitutkimuksessa tarkasteltiin automaattiautojen (ei raskaita ajoneuvoja) vaikutuksia moottoritiepätkällä kahdella eri aikavälillä: lyhyellä (0,5 s) ja pitkällä (2,1 s). Tulosten mukaan 100 % penetraatioasteella automaattiautot pienellä aikavälillä voisivat vähentää CO₂-päästöjä ajettua kilometriä kohti 3 % alhaisilla liikennemäärillä ja 26 % korkeilla liikennemäärillä. Suurilla aikaväleillä tulokset olivat päinvastaiset: päästöt ajoneuvokilometriä kohti kasvoivat 10 % alhaisilla liikennemäärillä ja 35 % korkeilla liikennemäärillä.

Makridis ym. (2020a) tutkivat verkottuneiden ja ei-verkottuneiden automaattiautojen vaikutuksia CO₂-päästöihin samalla verkolla kuin Mattas ym. (2018) (Antwerpenin kehätie Belgiassa) kahdella eri mallilla. Näissä simuloinneissa mukana oli ainoastaan henkilöautoja. Tulokset näyttävät, että ei-verkottuneiden automaattiautojen päästöt olivat 3–6 % korkeampia kuin ihmiskuljettajien penetraatioasteella 100 %. Verkottuneiden automaattiautojen kohdalla päästöt olivat 2–3 % pienempiä kuin ihmiskuljettajien käyttäen yleisempää mallia ja 1 % suuremmat, kun käytettiin realistisemmin vapaan liikenteen (*free flow*) ajoneuvodynaamiikkaa kuvaavaa mallia.

Rafael ym. (2020) tutkivat automaattiautojen vaikutuksia hiilidioksidipäästöihin liikennesimuloinnilla, verkkona pääkatu Aveirossa Portugalissa. Liikennemäärä kuvasi alueen aamuliikennettä. Tilanteessa, jossa 30 % henkilöautoista korvattiin automaattiautoilla, verkon CO₂-päästöt kasvoivat 0,7 %. Kirjoittajat perustelivat kasvua risteysten kapasiteetin kasvulla (jolloin enemmän ajoneuvoja mahtui verkolle) sekä automaattiautojen aggressiivisemmalla kiihtyvyydellä.

Liu ym. (2020) tarkastelivat simulointitutkimuksessaan CACC:n vaikutuksista myös polttoaineenkulutusta. CACC:n penetraatioasteen kasvaessa 50 %:iin kulu- tus oli 10 % pienempää kuin tilanteessa ilman automaatiota. Liikennevirran ta- soittuessa 50 % suuremmilla penetraatioasteilla ajonopeudet kasvoivat, mikä osittain kumosi tasaisemmasta ajotavasta johtuvat polttoainesäästöt. Liikennevir- rassa oli raskaita ajoneuvoja, mutta on epäselvää, onko vaikutuksia niiden poltto- aineenkulutukseen sisällytetty tuloksiin.

Saleh ja Hatzopoulou (2020) tutkivat automaattiautojen vaikutusmahdollisuuksia kasvihuonekaasupäästöihin matkustuskäyttäytymisen kyselyn analyysin perus- teella Toronton läheisyydessä Kanadassa. Tutkijat päättelivät, että 42 % talouk- sista, joilla oli kaksi autoa tai enemmän, olisi matkustustarpeen puolesta mahdol- lista käyttää automaattiautoa. Ajoneuvon korvaaminen automaattiautolla johti kuitenkin keskimääräisen suoritteiden kasvuun 57 %:lla. Kotitalouksista 44 % arvioi- tiin korvaavan joukkoliikennematkoja automaattiautolla. Kotitalouksien kasvihuo- nekaasupäästöt kasvaisivat 42 %, kun automaattiauto korvaa toisen henkilöauton suoritekasvun takia, ja 88 %, kun automaattiauto korvaa joukkoliikenteen käyt- tää. Automaattiauton oletettiin olevan bensiinikäyttöinen, ja tutkijat huomautta- vat, että sähkökäyttöinen automaattiauto voisi vähentää päästökasvua.

L3Pilot-hankkeessa arvioitiin ehdollisen automaation liikennevirtavaikutusten li- säksi myös CO₂-päästövaikutukset Euroopan moottoriteillä. Kuten matka-aikoihin, myös päästöihin suurimmat vaikutukset syntyivät korkean liikennemäärän tilan- teissa, joiden edustama osuus Euroopan moottoritieverkon suoritteesta on pieni. Arvioitu kokonaisvaikutus CO₂-päästöihin Euroopan moottoritieverkolla vuoden ai- kana oli päästöjen 0,5 %:n lasku (Aittoniemi ym. 2023).

Kenttätutkimukset

Simulointitutkimusten lisäksi kenttäkokeista saatua tietoa on hyödynnetty auto- matisoitujen autojen polttoaineenkulutuksen ja päästöjen arviointiin.

Neljässä yksittäisten ACC-ajoneuvojen kenttätutkimuksessa tarkasteltiin polttoai- neenkulutusta, ja niissä raportoitiin polttoaineenkulutuksen vähentyneen 2–7 % ACC:n ollessa päällä verrattuna tilanteisiin, joissa ihminen ohjasi autoa (Alkim ym. 2007, Benmimoun ym. 2012, Dvorkin ym. 2019, Zhu ym. 2019).

He ym. (2020) puolestaan tekivät kenttäkokeita moottoriteillä Italiassa viiden au- ton letkassa, josta keskimäiset kolme olivat osan ajasta ACC-tilassa. Näin he saivat dataa sekä ACC-autojen että ihmiskuljettajien toiminnasta. ACC-ajoneuvo- jen energiantarve oli 3–21 % suurempi kuin ihmisen kuljettaman ajoneuvon polt- toaineenkulutus, ja energiantarve kasvoi jokaisen ACC-ajoneuvon myötä jonossa. Tutkijat arvioivat syyksi ACC-autojen epästabiliin ajotavan.

Shi ja Li (2021) tutkivat kaupallisten ACC:llä varustettujen ajoneuvojen polttoai- neenkulutusta usealla polttoaineenkulutus- tai päästömallilla käyttäen kenttäko- keista kerättyä dataa. Kokeissa kaksi automaattiautoa seurasi vakionopeudensää- timellä varustettua ihmisen kuljettamaa autoa. ACC-autoilla oli valittavana neljä aikaväliä: 0,8, 1,2, 1,6 ja 2,1 s. Kokeet tehtiin kahdella eri nopeustasolla: 45–55 mph, (noin 72–89 km/h) ja 25–35 mph (noin 40–56 km/h). Tulokset näyttävät, että ACC-ajoneuvot kuluttavat vähemmän polttoainetta kuin ihmiskuljettajat. Suuremmilla aikaväleillä ACC-autojen polttoaineenkulutus oli pienempää kuin pie- nillä. Polttoaineenkulutuksen ja päästöjen sekä liikenteen sujuvuuden välillä on

siis tehtävä kompromissi. Aikavälin vaikutus polttoaineenkulutukseen oli suurempi alemmalla nopeustasolla. ACC-letkassa jälkimmäisenä ajavalla ajoneuvolla oli suurempi kulutus kuin ensimmäisenä, mikä voi kirjoittajien mielestä indikoida epävakaa ajoneuvon seuranta. Suuremmat aikavälit mahdollistavat vakaamman ajon jonossa.

Huang ym. (2023) tutkivat yhdeksän automatisoiduilla ajoneuvoilla tehdyn kenttätutkimuksen perusteella automaattiautojen energiankulutusta. Kulutusta verrattiin ihmiskuljettajista Pekingissä kerättyyn dataan. Tulokset osoittivat, että automaattiautojen liikeradat olivat vakaampia kuin ihmiskuljettajien ajoradat tilanteissa, joissa olosuhteet ovat vakaat. Haastavissa olosuhteissa automaattiautot saattoivat toimia aggressiivisemmin, mikä näkyi nopeana kiihdyttämisenä ja hidastamisena. Alhaisilla ajonopeuksilla automaattiajamisen ajotapa oli samankaltainen kuin ihmiskuljettajien, ja ajotapa määräytyi lähinnä liikenneympäristön kautta. Nopeuksien kasvaessa ajotapa on määräävin tekijä, ja erilaisten ajotapojen väliset erot tulivat selvemmin esille. Automaattiautojen energiankulutus oli vakaissa liikenneolosuhteissa 4–26 % pienempi ja epävakaisissa olosuhteissa 3–49 % suurempi kuin ihmiskuljettajien vastaavissa olosuhteissa (nopeudet 10–100 km/h).

3.2.4 Liikenneturvallisuus

Korkean tason automaatio

Korkean tason automaation henkilöautojen liikenneturvallisuusvaikutuksia on tutkittu useilla eri menetelmillä ja mittareilla. Yksi hyödynnetyimmistä menetelmistä on konfliktitilanteiden tarkastelu, jossa konfliktit toimivat epäsuorana mittarina liikenneturvallisuudelle. Konfliktitarkastelua hyödyntäneissä tutkimuksissa on yleensä käytetty yhdysvaltalaisen Federal Highway Administrationin kehittämää ohjelmaa "Surrogate Safety Assessment Model (SSAM)", joka tunnistaa konfliktitilanteita ajoneuvojen mikrosimuloinneista saatujen liikeratojen perusteella (Gettman ym. 2008). Monet mikrosimulointityökalut ja niissä toimivat ajoneuvomallit on kehitetty tutkimaan liikennevirtaa eivätkä ne sovellu ainakaan suoraan turvallisuuskriittisten tilanteiden tutkimiseen. Seuraavassa kappaleessa esitetään kuitenkin muutamia tutkimuksia, joissa on arvioitu automaation vaikutusta konfliktitilanteiden syntymiseen.

Papadoulis ym. (2019) mallinsivat moottoritiejaksoa Englannissa mikrosimulointiohjelmalla ja arvioivat verkottuneiden automaattiautojen (aikaväli 0,6 s) liikenneturvallisuusvaikutuksia eri penetraatioasteilla. Tulosten mukaan konfliktit vähenivät 12–47 %, kun automaattiautojen osuus liikennevirassa oli 25 %. Morando ym. (2018) simuloivat liikennevaloliittymää (Melbourne, kolme kaistaa/tie, 760–2 260 ajon/h, ajonopeudet 65–75 km/h) ja kiertoliittymää (New York, 490–1 050 ajon/h, ajonopeudet 52–54 km/h) mikrosimulointiohjelmalla ja arvioivat automaattiautojen (aikaväli 0,5 s) vaikutuksia eri penetraatioasteilla. Automaattiautojen osuuden liikennevirrassa ollessa 25 % konfliktit vähenivät liikennevaloliittymässä 17 %, mutta kiertoliittymässä määrä pysyi ennallaan. Mourtakos ym. (2021) simuloivat Ateenan keskusta-alueen liikennettä (n. 20 km² alue, missä 348 km tietä ja 1 137 liittymää) ja arvioivat korkean tason automaattiautojen vaikutuksia eri skenaarioissa. Heidän tulostensa mukaan konfliktit vähenivät 0,8 % skenaariossa, jossa 20 % henkilöautoista ja tavaraliikenteen ajoneuvoista ajoi automaattisesti, verrattuna skenaarioon, jossa kaikilla ajoneuvoilla oli ihmiskuljettaja.

Automaattiautojen liikenneturvallisuusvaikutuksia on myös lähestytty tunnistamalla niiden kohdeonnettomuuksia onnettomuustilastojen perusteella. Näissä tutkimuksissa on yleensä tarkasteltu korkean tason automaattiautoja ilman sen tarkempaa kuvausta automaattiautojen ominaisuuksista ja niiden toimivuudesta. Tutkimuksissa ei myöskään ole yleensä huomioitu mahdollisia uusia onnettomuustilanteita. Kahdessa tutkimuksessa (Utriainen ja Pöllänen 2020, Utriainen 2021) analysoitiin jalankulkijoiden ja henkilöautojen välisiä kuolemaan johtaneita onnettomuuksia Suomessa vuosina 2014–2016 (N=40). Korkean tason automaattiauto (ei tarkempaa kuvausta funktiosta tai suunnitellusta toimintaympäristöstä) olisi voinut estää 70–93 % näistä onnettomuuksista (Utriainen ja Pöllänen 2020). Utraisen (2021) tulosten mukaan automaattiauto, jolla on rajallinen toimintaympäristö (ei toimi lumi- tai vesisateessa, lumisella tienpinnalla tai pimeässä) olisi voinut estää 20–28 % näistä onnettomuuksista. Combs ym. (2019) analysoivat jalankulkijoiden kuolemaan johtaneita onnettomuuksia Yhdysvalloissa vuonna 2015 (N=3 386). Tulosten mukaan paremmat havainnointitekniikat (visible-light camera, LiDAR, radar) olisivat voineet estää 30–90 % onnettomuuksista.

Malin ym. (2023) selvittivät henkilöautojen ehdollisen automaattiajamisen järjestelmien (SAE-taso 3) potentiaalia parantaa Suomen liikenneturvallisuutta. Tätä varten tunnistettiin tieverkko, joka kattaa automaattisten ajojärjestelmien suunnitellun toiminta-alueen, ja laskettiin nykytilanteen turvallisuustilanne kyseisellä tieverkolla empiirisellä Bayes-menetelmällä (mahdollisimman luotettava onnettomuuksien nykyinen määrä onnettomuushistorian ja onnettomuusmallin ennusteen avulla (Elvik 2008, Hauer ym. 2002)). Malinin ym. (2023) tulosten mukaan moottoriteiden automaattiset ajojärjestelmät voisivat vaikuttaa vuosittain enintään 191 henkilövahinko-onnettomuuteen, kahdeksaan kuolemaan ja 15 vakavaan loukkaantumiseen Suomessa (3,1–3,3 % Suomen vuosikeskiarvosta). Kaupunkialueiden automaattiset ajojärjestelmät voisivat puolestaan neljässä suuressa suomalaisessa kaupungissa (Helsinki, Espoo, Vantaa ja Turku) vaikuttaa vuosittain enintään 127 henkilövahinko-onnettomuuteen, kolmeen kuolemaan ja 12 vakavaan loukkaantumiseen (1,1–2,5 % kansallisesta ja 17,1–26,8 % valittujen kaupunkien vuosikeskiarvosta).

Kuljettajan tukijärjestelmät

Erilaisia kuljettajan tukijärjestelmiä on ollut markkinoilla pitkään, ja ne ovat viime vuosina yleistyneet Suomessa nopeasti (kts luku 2.5). Tukijärjestelmien liikenneturvallisuusvaikutuksista löytyy myös useita onnettomuustilastoihin perustuvia tutkimuksia. Lisäksi järjestelmien penetraatioasteen vaikutuksesta liikenneturvallisuuteen on tehty simulointitutkimuksia. Tässä luvussa käsiteltyjen järjestelmien lyhenteiden selitteet löytyvät Taulukosta 11.

Wang ym. (2020) tarkastelivat meta-analyysissä eri kuljettajan tukijärjestelmien vaikutuksia onnettomuuksiin. Tutkimuksessa käsiteltiin yhdeksää järjestelmää: ACC, AEB, BSW, ESC, FCW, LCW, LDW, PCAM ja IMA. Aineistossa oli 826 tutkimusta, joista 73 tutkimusta oli sisällytetty varsinaiseen meta-analyysiin. Tutkimuksen tuloksena oli järjestelmien vaikutus kohdeonnettomuuksien määrään (kaikki vakavuudet), jotka on esitelty Taulukossa 11. Tulokset viittaavat siihen, että kaikki tarkastellut järjestelmät vähentävät niiden kohdeonnettomuuksia.

Taulukko 11. Yhteenvedo kuljettajan tukijärjestelmien vaikutuksesta kohdeonnettomuuksien (kaikki vakavuudet) määrään (Wang ym. 2020).

Järjestelmä	Kohdeonnettomuustyypit	Vaikutus kohdeonnettomuuksiin, suluissa 95 % luottamusväli.
Mukautuva ajonopeudensäädin (Adaptive cruise control, ACC)	Peräänajo-onnettomuus	-9,3 % (-5 %...-14 %)
Automaattinen hätäjarrutus (Automatic emergency braking, AEB)	Peräänajo-onnettomuus. Suistumisonnettomuus ja yhteenajo esteen kanssa. Jalankulkijaonnettomuus. Eläinonnettomuus. Risteysonnettomuus, joka liittyy punaista liikennevaloa tai STOP-merkkiä vastaan ajamiseen.	-25,7 % (-20 %...-31 %)
Katvealueen varoitin (Blind spot warning, BSW)	Kaistanvaihto-onnettomuus	-15 % (-10 %...-20 %)
Ajonvakautusjärjestelmä (Electronic stability control, ESC)	Suistumisonnettomuus ja yhteenajo esteen kanssa	-43,2 % (-38 %...-48 %)
Kuljettajan törmäysvaroitin (Forward collision warning, FCW)	Peräänajo-onnettomuus	-21,1 % (-17 %...-25 %)
Kaistanvaihtovaroitin (Lane change warning, LCW)	Kaistanvaihto-onnettomuus	-21 % (-10 %...-33 %)
Kaistalta poistumisen varoitin (Lane departure warning, LDW)	Suistumisonnettomuus ja yhteenajo esteen kanssa	-24 % (-21 %...-30 %)
Automaattinen hätäjarrutus jalankulkijoita varten (Pedestrian collision and mitigation PCAM)	Jalankulkijaonnettomuus	-38,9 % (-36 %...-42 %)
Kuljettajan törmäysvaroitin risteyksessä (Intersection Movement assist, IMA)	Risteysonnettomuus, joka liittyy punaista liikennevaloa tai STOP-merkkiä vastaan ajamiseen	-49 % (-40 %...-57 %)

Kuljettajaa avustavat järjestelmät tarjoavat mahdollisuuden vähentää liikenneonnettomuuksia, mutta niiden tehokkuuteen vaikuttavat esimerkiksi ympäristö- ja keliolosuhteet. Masello ym. (2022) arvioivat kuuden eri kuljettajan tukijärjestelmän (ACC, AEB, BSW, ESC, FCW ja LDW) turvallisuusvaikutuksia eri tietyypeillä ja olosuhteissa. Tutkimuksessa hyödynnettiin Wang ym. (2020) tuloksia soveltaen analyttistä hierarkiaprosessia, jossa oli kolme eri tasoa: tietyppi (moottoritie, maaseututie, taajamatie), sääolosuhteet (pouta, sade/sumu, myrsky/lumi) ja valoisuus (päivänvalo, pimeys). Turvallisuusvaikutusten tehokkuus luokiteltiin viisiportaisella skaalalla kaikille 18 yhdistelmälle, minkä jälkeen niihin sovellettiin Wang ym. (2020) turvallisuusvaikutusten luottamusvälejä jaettuna viiteen luokkaan. Masellon ym. (2022) tulosten mukaan kuljettajaa avustavien järjestelmien turvallisuusvaikutukset vaikuttaisivat yleisesti ottaen olevan suurimmillaan

päivänvalossa ja poutasäässä. Tulosten mukaan esimerkiksi ACC:n turvallisuusvaikutus oli pimeällä, sateessa tai sumussa, kaupungissa tai maaseudulla matalampi [-5 %...-7 %] kuin poutasäässä päivänvalossa moottoritiellä tai maaseudulla [-12 %...-14 %].

On hyvä huomioida, että Wangin ym. (2020) ja Masellon ym. (2022) tutkimusten tulokset koskevat järjestelmien vaikutuksia kaikkiin kohdeonnettomuuksiin eikä tutkimuksissa käsitelty erilaisia vakavuuksia. Seuraavaksi esitetään muutamia tutkimuksia, joissa on arvioitu järjestelmien vaikutuksia henkilövahinko-onnettomuuksiin.

Leslie ym. (2021) analysoivat kuljettajien tukijärjestelmien turvallisuusvaikutusta General Motorsin autoilla hyödyntäen poliisin onnettomuusaineistoa (12 osavaltiota Yhdysvalloissa, vuodet 2012–2020). Tarkasteltu aineisto sisälsi yhteensä 424 872 onnettomuudessa osallisena ollutta autoa. Tutkimuksessa onnettomuusriskiä arvioitiin hyödyntämällä *quasi-induced exposure* -menetelmää ja suhteuttamalla onnettomuudet, joihin tietty järjestelmä olisi voinut vaikuttaa (kohdeonnettomuudet), onnettomuuksiin, joihin järjestelmä ei olisi voinut vaikuttaa (altistus). Tutkimuksessa kontrolloitiin myös muita onnettomuusriskiin vaikuttavia tekijöitä, kuten kuljettajien ikää ja sukupuolta. Tulosten mukaan kuljettajan tukijärjestelmillä varustetuilla autoilla oli matalampi onnettomuusriski verrattuna autoihin, joita ei oltu varusteltu tukijärjestelmillä. Vaikutus henkilövahinkoon johtaneiden peräänajo-onnettomuuksien määrään oli -55 % [-49 %...-60 %] autoille, joissa oli AEB-järjestelmä, ja -31 % [-24 %...-37 %] autoille, joissa oli FCW-järjestelmä, verrattuna autoihin, joissa ei ollut näitä järjestelmiä. Vaikutus henkilövahinkoon johtaneiden kaistanvaihto-onnettomuuksien määrään oli -17 % [-9 %...-25 %] LDW-järjestelmällä varustetuille autoille ja -17 % [-8 %...-25 %] LDW+LKA-järjestelmällä varustetuille autoille.

Cicchino (2017) analysoi poliisin onnettomuusaineistoa (22 osavaltiota Yhdysvalloissa, vuodet 2010–2014) ja mallinsi eri kuljettajien tukijärjestelmillä varustettujen ja varustelemattomien autojen onnettomuusastetta (onnettomuuksien määrä suhteutettuna vakuutettuihin vuosiin) Poisson-regressioanalyysillä. Aineistossa oli yhteensä 7 055 henkilövahinkoon johtanutta peräänajo-onnettomuutta. Tulosten mukaan tukijärjestelmillä varustettujen autojen peräänajo-onnettomuusaste oli pienempi kuin niiden autojen, joilla kyseisiä järjestelmiä ei ollut. Vaikutus peräänajo-onnettomuusasteeseen oli -20 % [-2 %...-34 %] FCW-järjestelmälle, -45 % [-40 %...-48 %] kaupunkialueen AEB-järjestelmälle ja -56 % [-24 %...-74 %] FCW+AEB-järjestelmäyhdistelmälle.

Cicchino (2022) teki vastaavan analyysin kuin aikaisemmassa Cicchino (2017) -tutkimuksessa jalankulkijoiden AEB-järjestelmälle. Aineistossa (18 osavaltiota Yhdysvalloissa, v. 2017–2020) oli yhteensä 3 130 jalankulkijaonnettomuutta, joista 1 381 johti jalankulkijan lievään loukkaantumiseen ja 266 jalankulkijan vakavaan loukkaantumiseen tai kuolemaan. Tulosten mukaan jalankulkija-AEB-järjestelmällä varustetuilla autoilla oli 25–27 % pienempi onnettomuusaste ja 29–30 % pienempi henkilövahinko-onnettomuusaste verrattuna autoihin, joissa sitä ei ollut.

Cicchino (2018) teki vastaavan analyysin kuin Cicchino (2017) kaistavahtijärjestelmälle (LDW). Aineistossa (25 osavaltiota Yhdysvalloissa, v. 2009–2015) oli yhteensä 5 433 kohdeonnettomuutta (yksittäis-, kohtaamis-, ja kylkikosketusonnettomuutta, joissa kukaan osallisista ei ollut vaihtamassa kaistaa, liittymässä,

kääntymässä, ohittamassa tai peruuttamassa) ja näistä 986 oli henkilövahinko-onnettomuuksia. Tulosten mukaan LDW-järjestelmällä varustetuilla autoilla oli 11 % [-20 %...-1 %] pienempi onnettomuusaste ja 21 % [-38 %...2 %] pienempi henkilövahinko-onnettomuusaste verrattuna autoihin, joilla näitä järjestelmiä ei ollut.

Sternlund ym. (2017) analysoivat Ruotsin onnettomuustilastoa ja vertasivat LDW- ja LKA-järjestelmillä varustettuja ja varustelemattomia Volvo-henkilöautoja logistisella regressioanalyysillä. Aineistossa (v. 2007–2015) oli yhteensä 1 853 henkilövahinko-onnettomuutta, joissa yksi osallinen oli ollut Volvo. Tulosten mukaan LDW+LKA-järjestelmäyhdistelmän vaikutus kohdeonnettomuuksien määrään (henkilövahinkoon johtaneet yksittäis- ja kohtaamisonnettomuudet nopeusrajoitusalueella 70–120 km/h) oli -53 %.

Kuljettajaa avustavien järjestelmien penetraatioasteen kasvu liikenteessä ei vaikuta välttämättä liikenneonnettomuuksien määrään suoraviivaisesti. Tämä johtuu siitä, että turvallisuuden vaikuttaa se, onko tietyssä liikennekonfliktitilanteessa molemmilla osapuolilla käytössä tietty avustava järjestelmä, vai ainoastaan toisella.

Esimerkiksi Sander ja Lubbe (2018) tarkastelivat simulaatioita hyödyntämällä, kuinka iso osuus saksalaisesta onnettomuustietokannasta (GIDAS) poimituista risteysonnettomuuksista olisi voitu välttää tietyillä risteys-AEB-järjestelmien penetraatioasteilla. Tutkimuksessa tarkasteltiin myös järjestelmän anturien näkökentän laajuuden vaikutusta. Tulosten mukaan risteys-AEB 180° näkökenttäanturilla ja 100 % penetraatioasteella vähentäisi jopa 80 % onnettomuuksista. Tulosten mukaan penetraatioasteen kasvun vaikutus onnettomuuksien määrään on merkittävin alhaisilla penetraatiosuorilla. Kun penetraatioaste kasvaa, lisääntyy sen todennäköisyys, että molemmilla konfliktin osapuolilla on risteys-AEB, jolloin yleinen turvallisuusvaikutus pienenee, sillä jos se, että vain toisella osapuolella olisi ollut järjestelmä, olisi voinut estää onnettomuuden.

Puolestaan Li ym. (2017) tarkastelivat simulaatioanalyysiä hyödyntämällä ACC:n vaikutusta peräänajo-onnettomuuksien määrään ruuhkaisilla moottoriteillä eri penetraatioasteilla. Tulokset viittaavat siihen, että liikenneonnettomuuksien määrä väheni merkittävämmiin ACC-järjestelmien penetraatioasteen kasvaessa, kun penetraatioaste on vielä matala (suuruusluokkaa alle 30 %). Tulosten viittaavat myös siihen, että jos ACC:n asetukset eivät ole sopivat, se voi lisätä törmäysriskiä ruuhkassa. Turvallisuus paranee yleensä, kun ajoneuvot pitävät suurempaa välimatkaa toisiinsa, reagoivat nopeammin muutoksiin muiden tienkäyttäjien liikkeessä ja hidastavat tehokkaammin hätätilanteissa.

ADAS-järjestelmien penetraatioasteen muutoksen vaikutukset turvallisuuteen ovat todennäköisesti erilaisia, kun tarkastellaan ajoneuvojen ja suojaamattomien tienkäyttäjien välisiä onnettomuuksia verrattuna ajoneuvojen välisiin onnettomuuksiin. Ma ja Andréasson (2005) tarkastelivat simulaatiotutkimuksessaan ISA-järjestelmien turvallisuushyötyjä jalankulkijoiden onnettomuuksien ja kuolemien ehkäisemisessä. Tutkimuksen mukaan ISA-järjestelmien penetraatioasteen kasvulla oli odotetusti melko suoraviivainen yhteys näiden onnettomuuksien väheneeseen. Tulosten mukaan erityisesti jalankulkijoiden kuolemien väheneminen on huomattavaa, kun ISA-järjestelmien osuus kasvaa.

3.2.5 Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus

Automaattiautojen vuorovaikutusta muiden tienkäyttäjien kanssa on lähestytty viime vuosina useista eri näkökulmista. Tutkimusala on kehittynyt vaiheeseen, jossa olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta on kirjoitettu lukuisia katsausartikkeleita, ja tulosten luokittelumiseksi on kehitetty erilaisia käsitteellisiä kehikoita. Tällaisten kokoavien katsausten taustalla voi havaita useita tutkimusintressejä, kuten esimerkiksi kaupunkisuunnittelua, kestävyystiedettä ja sosiaalista vuorovaikusta korostavia tavoitteita (esim. Brill ym. 2023, Ezzati Amini ym. 2019), tai teknisempiä, vuorovaikutustilanteiden kommunikaatio-ongelmia ratkaisemaan pyrkiviä tutkimuksia (Carmona ym. 2021, Reyes-Munoz ja Guerrero-Ibanez 2022). Niin kutsuttuihin inhimillisiin tekijöihin (*human factors*) keskittyvä näkökulma keskittyy usein ihmisten kykyyn havainnoida ja tulkita automaattisten ajoneuvojen aikomuksia (esim. Predhumeau ym. 2023). Myös automaattiautoja koskeviin asenteisiin, ja niihin kohdistuvaan luottamukseen ja hyväksyttävyyteen on kiinnitetty paljon huomiota, sillä se nähdään onnistuneen vuorovaikutuksen ennako-ehtona (Zhou ym. 2022).

Vuorovaikutusta käsittelevässä kirjallisuudessa tyypillisin liikenteen automatisaatiota edustava ajoneuvotyyppi on henkilöauto. Muilla tienkäyttäjillä tarkoitetaan tässä yhteydessä ns. suojaamattomia tienkäyttäjiä (*vulnerable road user, VRU*). Termille ”suojaamaton tienkäyttäjä” ei ole kirjallisuudessa olemassa yhtä yleisesti hyväksyttyä määritelmää, mutta yleensä siihen luetaan kuuluvaksi vähintäänkin jalankulkijat, pyöräilijät ja moottoroidut kaksipyöräiset (Reyes-Munoz ja Guerrero-Ibanez 2022).

Eräs laajimmin käsitellyistä tutkimusaiheista automaattiautojen ja muiden tienkäyttäjien vuorovaikutuksessa on ollut ulkoiset käyttöliittymät (*external human-machine interface, eHMI*), joilla tarkoitetaan muille tienkäyttäjille ajoneuvon tilasta viestiviä laitteita, esimerkiksi etujarruvaloa. Näiden ulkoisten käyttöliittymien lähtökohtainen pyrkimys on ehkäistä vuorovaikutustilanteissa syntyviä kommunikaatio-ongelmia. Niiden ympärillä käyty keskustelu linkittyy pitkälti kaikkeen muuhun vuorovaikutuksesta käytyyn keskusteluun, ja niitä onkin raportin tarkasteluvuosina hankala erottaa toisistaan. Pelkästään ulkoisia käyttöliittymiä erilaisiin taksonomioihin luokittelevia julkaisuja on kirjoitettu viime vuosina paljon, ja ne päätyvät usein toisistaan hyvinkin paljon eroaviin luokitteluihin (esim. Carmona ym. 2021, Dey ym. 2020a).

Ei ole olemassa hyvää ymmärrystä vuorovaikutustilanteista, joissa toinen osapuoli on korvattu automaattisella ajoneuvolla. Tällaisiin tilanteisiin vaikuttaa olennaisesti myös ympäristö, jossa vuorovaikutus tapahtuu. Kaupunkisuunnittelussa käytetty käsite ”jaettu tila” (*shared space*), tarkoittaa pääpiirteissään sellaista ka-tua, jossa autoilulle aiemmin erikseen varatut alueet sulautetaan yhteen kävely- ja pyöräilytilojen kanssa, jolloin näitä eriyttävät liikennesäännöt vähenevät ja vapaiden vuorovaikutustilanteiden määrä kasvaa (Clarke 2006). Tällaisen tilan ajatellaan yleisesti olevan toivottu ja vaativan tavallisiltakin autonkuljettajilta normaalia enemmän tilannetietoisuutta. Mikäli jaetussa tilassa täytyy lisäksi pystyä operoimaan myös automaattista autoa, vaatimukset sen kyvystä havainnoida ja kommunikoida ympäristönsä kanssa lisääntyvät yhtäläisesti.

Vuorovaikutustutkimuksen käsitteellisiä kehityskulkuja

Vuorovaikutusta käsitteleviä vartenotettavia käsitteellisiä kehyksiä on julkaistu viime vuosina ainakin kaksi kappaletta: Markkula ym. (2020) ja Predhumeau ym. (2023). Ne ovat samalla sekä yrityksiä ymmärtää ilmiötä paremmin että tarjota mahdollisuuksia jatkaa tutkimusta vanhemmalta teoreettiselta pohjalta. Samanlaisia, joskin vaatimattomampia yrityksiä käsitteellistää aihepiiriä on julkaistu myös konferenssijulkaisuissa (Bengler ym. 2020, Löcken ym. 2019; Owensby ym. 2018), tai tutkimuksissa, jotka ovat aihepiiriltään rajatumpia (Ezzati Amini ym. 2019).

Markkula ym. (2020) jakavat aikaisemmat teoreettiset näkökulmat autojen ja jalankulkijoiden välisestä vuorovaikutuksesta neljään ryhmään: i) Ajoneuvojen väliin konflikteihin ja turvallisuuteen, ii) peliteoriaan, iii) sosiologiaan sekä iv) kielen ja kommunikaatioon perustuviin lähestymistapoihin. Näiden tilalle he ehdottavat poikkitieteellistä viitekehystä, joka perustuu neuvotteluun pääsystä samaan fysikaaliseen tilaan. Täsmällisemmin, vuorovaikutustilanteen määritelmän heidän mukaansa tulisi olla: "Tilanne, jossa vähintään kahden tienkäyttäjän käyttäytymisen voidaan tulkita olevan seurausta siitä mahdollisuudesta, että ne ovat molemmat oikeissa olla samassa avaruudellisessa tilassa samaan aikaan lähitulevaisuudessa."

Tällaiset vuorovaikutustilanteet voidaan liikeratansa puolesta palauttaa viiteen prototyyppiseen esimerkkiin: estettyihin polkuihin, yhdistyviin ja risteäviin polkuihin sekä (sivuttaisliikkeen puolesta) rajoitettuihin tai rajoittamattomiin vastaantulo-tilanteisiin, joissa ollaan "suoralla törmäyskurssilla". Varsinainen hyödyllinen taksonomia heidän mukaansa kuitenkin saadaan, jos vuorovaikutustilanteet jaetaan kahdelle luokitteluasteikolliselle akselille: niihin voi sisältyä joko liikkumista (M) tai havainnoimista (P). Toisaalta ne voidaan luokitella myös akselille, jossa pyritään saavuttamaan joku tavoite (A), signaloidaan muille tienkäyttäjille omista aikomuksista (S) tai kommunikoidaan toisille jonkinlainen pyyntö (R). Näiden kombinaatioista voidaan saada kokonaisvaltainen taksonomia eri vuorovaikutustilanteille, esimerkiksi liike-signalointikäyttäytyminen (M-S) tarkoittaisi, että kuljettaja viestii muille aikovansa liikkua tietyllä tavalla.

Lisäksi Markkula ym. (2020) antavat teknisen määritelmän "implisiittiselle" ja "eksplisiittiselle" kommunikaatiolle tienkäyttäjien vuorovaikutustilanteessa: Implisiittisellä kommunikaatiolla tarkoitetaan käyttäytymistä, joka "vaikuttaa tienkäyttäjän itsensä liikkumiseen tai havainnointiin, mutta jonka voi samalla tulkita viestiksi tai pyynnöksi toiselle tienkäyttäjälle" (esimerkiksi äkillinen hidastaminen). Vastaavasti eksplisiittinen kommunikaatio on käyttäytymistä, joka ei vaikuta tienkäyttäjän itsensä liikkumiseen, mutta voidaan silti tulkita viestiksi, esimerkiksi käsimerkin näyttäminen tai hymynaaman projisoiminen auton konepellille. Tämä jako kahteen erilaiseen kommunikaatiotyyppiin toistuu vuorovaikutus- ja eHMI-kirjallisuudessa usein, ja niitä käytetään monessa koeasetelmassa keskeisessä roolissa. Samankaltaisia, joskin ei täysin identtisiä määritelmiä näille termeille löytyy kirjallisuudesta useita (esim. Dey ja Terken, 2017, Ezzati Amini ym. 2019, Predhumeau ym. 2023). Yhteistä niille kuitenkin on ajatus siitä, että implisiittinen kommunikaatio on jollain tapaa osa ajoneuvon itsensä liikettä ilman tietoista aikomusta viestin lähettämiseen, kun taas eksplisiittinen viestintä vaatii kuljettajalta tai automatisoidulta autolta aktiivista viestintää, joka voi myös olla implisiittisen kommunikaation kanssa ristiriidassa.

Toisenlaisen kehyksen vuorovaikutustapahtumille antavat Predhumeau ym. (2023), jotka katsovat aihetta jalankulkijan näkökulmasta. He ehdottavat, että jalankulkijaa tulisi kognitiiviseen tapaan ajatella ympäristönsä kanssa vuorovai-kuttavana tiedonkäsittelyilmukkana. Automaattisten autojen vuorovaikutusta ja-lankulkijoiden kanssa voidaan tutkia rinnastamalla autot suoraan ihmisen kuljet-tamiin autoihin käyttäen näitä tiedonkäsittelyn eri vaiheita hyväksi. Heidän mu-kaansa jalankulkijan tiedonkäsittelyssä on kolme keskeistä osaa: aistiminen ja ha-vainnointi, emootiot ja kognitio sekä toiminta ja kommunikaatio.

Aistimisen ja havainnoinnin osalta Predhumeau ym. (2023) käsittelevät sitä, millä tavoin jalankulkija vastaanottaa tietoa ajoneuvolta. Tällaisessa aistihavaintoon perustuvassa jaottelussa näyttää olevan vaikeaa tehdä eroa siinä, miten jalankul-kijat suhtautuvat perinteisiin ja automaattiautoihin. Yhtenä alustavana tutkimus-tuloksena voidaan pitää implisiittisen informaation olennaista roolia jalankulkijan tiedonkäsittelyssä. Näyttääkin siltä, että pelkästään auton havaittu liike riittää an-tamaan tarpeeksi tietoa, jotta jalankulkija kykenee arvioimaan, aikooko auto py-sähtyä vai ei. Tästä on tutkimustuloksia sekä perinteisten (Lee ym. 2021a) että automaattisten (Dey ym. 2019, Fuest ym. 2018) autojen osalta. Kuitenkin jalan-kulkijoiden on raportoitu myös haluavan eksplisiittistä informaatiota automatisoi-duilta järjestelmiltä, mukaan lukien niiden niiden aikomuksista pysähtyä tai kään-tyä, sekä siitä, onko järjestelmä kyennyt tunnistamaan jalankulkijan vai ei (Merat ym. 2018).

Emootioiden ja päätöksenteon suhteen Predhumeau ym. (2023) katsauksessa korostuvat luottamukseen ja oletuksiin liittyvät asiat. Automaattisilta autoilta odotetaan ennakoitavaa käyttäytymistä ja sosiaalisten normien kunnioitusta, mikä vaatii myös aikomusten kommunikoimista. Tämä korostuu entisestään jaetuissa tiloissa, missä automaattisia autoja ei koeta yhtä turvallisiksi kuin erotelluissa ti-loissa. Toiminnallisessa mielessä jalankulkijat raportoivat pitävänsä suurempia vä-limatkoja automaattisiin autoihin sekä olevansa varovaisempia jaetuissa tiloissa. Näitä tuloksia voidaan pitää pääasiassa tähänastiseen tietoon perustuvina toi-veina, sillä ne perustuvat useimmiten kyselytutkimuksiin eivätkä välttämättä kon-taktiin vielä kehitteillä olevan teknologian kanssa.

Vuorovaikutustilanteet automaattiautojen teknisinä haasteina

Kolmas tapa katsoa vuorovaikutustilanteita on tarkastella niitä teknisinä ongel-mina automaattiautojen kehitysprosessissa. Tässä kirjallisuudessa korostuu auto-maattisen auton kommunikointi jalankulkijoiden suuntaan, jota pidetään osana sen itsensä havainnointia ja päätöksentekoa. Pääpiirteissään prosessin voi kuvata niin, että ensin muita tienkäyttäjiä tunnistetaan ja luokitellaan ja niiden liikerataa ennustetaan, ja sen pohjalta tehtyjä päätöksiä kommunikoidaan eteenpäin (Car-mona ym. 2021, Reyes-Munoz ja Guerrero-Ibanez 2022). Teknisesti katsottuna jopa ajoneuvon sensorien toimintaa voidaan pitää kommunikaationa ajoneuvon ja jalankulkijan välillä, mutta koska ihmisten eleiden tulkitseminen koneellisesti ei ole vielä käytännössä mahdollista, tutkimuksessa on keskitytty automaattisten ajoneuvojen kykyyn viestiä aikomuksistaan muille tienkäyttäjille. Suurimman pai-noarvon tutkimuksessa viimeisen viiden vuoden aikana on saanut erilaisten eHMI-laitteiden (ulkoisten käyttöliittymien) kehittäminen ja niiden vaikuttavuuden tutki-minen. Näiden tarjoama lisäarvo voidaan tulkita yllä mainitun kaltaiseksi ekspli-siittiseksi informaatioksi.

Osa ulkoisista käyttöliittymistä on kehitetty vain konseptiasteelle ja joistakin on rakennettu prototyyppisiä, joko fyysisiä tai virtuaalisia, mutta mikään niistä ei ole vielä edennyt massatuotantoon asti. Suurin osa laitteista toimii visuaalisesti: erilaisina näyttöinä tai tuulilasin yläpuolelle sijoitettuina LED-valojen sarjana (esim. Bazilinskyy ym. 2019, Dey ym. 2020a). Muita konsepteja ovat esimerkiksi etujarruvalo (Petzoldt ym. 2018) tai kokeilut erilaisista auton eteen heijastettavista projektioista. Mahdollisesti erikoisimpana esimerkkinä voidaan mainita myös kokeilut silmistä, jotka seuraavat jalankulkijaa katseellaan (Chang ym. 2017) tai hymyilevät kasvot (Carlsson ja Nilsson, 2016). Tyypillisesti niissä näytetyt viestit voidaan jakaa värin ja muodon lisäksi myös abstrakteihin tai tekstiin perustuviin (de Winter ja Dodou, 2022, Dey ym. 2020b).

Mitä tulee ulkoisten käyttöliittymien kommunikoimien viestien muotoon, tekstimuotoiset viestit on havaittu kyselyissä selkeimmäksi tavaksi kommunikoida jalankulkijoiden kanssa (Ackermann ym. 2019, Bazilinskyy ym. 2019, Chang ym. 2018). Tällaisia viestejä ovat esimerkiksi näyttöpäätteiltä esitetyt käskyt "walk" tai "don't walk". Ongelmaksi tekstuaalisessa sisällössä on nähty viestien kieli-sidonnaisuus ja mahdolliset esteettömyysongelmat. Erilaisten LED-valojen väriyhdistelmien suhteen on huomattu neutraalien värien sopivan käyttöliittymiin paremmin kuin esimerkiksi vihreän tai punaisen, joiden saatetaan tulkita yhdistyvän tuttuihin viesteihin sellaisenaan (esimerkiksi liikennevalot) (Dey ym. 2020b).

Ulkoisten käyttöliittymien tarvetta on myös kyseenalaistettu. Lee ym. (2021a) esittävät, että edellä mainittu eksplisiittinen kommunikaatio muodostaa häviävän pienen osan jalankulkijoiden ja ihmiskuljettajien välisestä kommunikaatiosta, ajoneuvojen liikkeen riittäessä tyypillisesti viestiksi kuljettajan aikomuksista. Suorimmin ulkoiset käyttöliittymät kyseenalaistavat de Winter ja Dodou (2022) argumentoidessaan, että tosiasiasa mitään sosiaalista tilausta käyttöliittymille ei ole – ne voivat muodostua jopa häiriöksi liikennetilanteissa. Se, että ihmiskuljettajaan kanssa ei välttämättä synny katsekontaktia tai että kuljettajaa ei jopa näe ollenkaan, ei ole muodostunut ongelmaksi nykyisissäkään liikennetilanteissa. Lisäksi he argumentoivat, että standardien puute sekä yleinen hajaannus teknologian suunnitteluperiaatteista eivät auta käyttöliittymien kehitystyötä. Samaa mieltä ovat myös Dey ym. (2020a): esimerkiksi käyttöliittymien paikka autossa, kommunikaation sisältö ja kommunikaation muoto eivät ole toistaiseksi vakiintuneet. Näistä puutteista huolimatta de Winter ja Dodou (2022) kuitenkin argumentoivat, että ulkoisilla käyttöliittymillä on myös mahdollisuus tehostaa automaattisten autojen ja muiden tienkäyttäjien välistä kommunikaatiota.

Osa jalankulkijoiden ja automaattisten autojen vuorovaikutukseen liittyvästä empiirisestä tutkimuksesta on toteutettu tilanteissa, joissa jalankulkija joutuu tekemään päätöksen joko ylittää tai olla ylittämättä tietä ajoneuvon lähestyessä. Tällaisia tutkimuksia on yleisimmin tehty virtuaaliympäristöissä (esim. De Clercq ym. 2019, Kooijman ym. 2019) ja erilaisin videoihin tai kuviin perustuvissa kyselytutkimuksissa. Vaikka fyysikaalisiin ympäristöihin perustuvaa tutkimusta tehdään enenevässä määrin, se tapahtuu yleensä rajoitetuissa ympäristöissä, esimerkiksi sisätiloissa tai tarkoitukseen varatuilla kentillä. Toinen suosittu menetelmä on ns. *Wizard-of-Oz*-koeasetelma, jossa koehenkilölle uskotellaan, että auto on automaattinen, vaikka todellisuudessa sitä ajaa ihmiskuljettaja (esim. Hensch ym. 2020). Reaalimaailmassa vaikeudeksi muodostuu rakentaa sellaisia kontrolloituja koeasetelmia, joissa autojen ja suojaamattomien tienkäyttäjien vapaata vuorovaikutusta voitaisiin tutkia.

3.2.6 Yhteenveto

Automaattiset henkilöautot vaikuttavat **liikennesuoritteeseen ja kulkutapaja-kaumaan**. Mitä enemmän koetut aikakustannukset laskevat automaattiajamisen myötä, sitä enemmän henkilöauton liikennesuorite ja kulkutapaosuus kasvavat (Sonnleitner ym. 2022, Kröger ym. 2019). Samoin myös mitä korkeampi on automaattiautojen osuus henkilöautoista, sitä suuremmat vaikutukset ovat kokonaisuudessaan (Sonnleitner ym. 2022, Kröger ym. 2019). Liikenne ei voi kuitenkaan kasvaa rajatta, vaan jossain vaiheessa tieverkon välityskyky tulee vastaan. Liikenteen ruuhkautuminen hidastaa liikkumista henkilöautolla, mikä rajoittaa henkilöauton liikennesuoritteen ja kulkutapaosuuden kasvua (Sonnleitner ym. 2022, Snelder ym. 2019). Automaattiset henkilöautot voivat periaatteessa tehostaa liikennevirtaa (ks. 3.2.2). Henkilöautoliikenteen kasvu on kuitenkin niin voimakasta, että automaattiautojen liikennevirtaa tehostava vaikutus ei pysty sitä kompensoimaan (Sonnleitner ym. 2022). Ainakin ruuhkaisilla kaupunkialueilla liikennevirran tehostuminen johtaa vain lisääntyneeseen liikkumiseen. Jos automaattisilla henkilöautoilla voi matkustaa ilman ajokortillista ajajaa, niin merkittävä osuus (yli 2/3) lisääntyneestä henkilöauton käytöstä voi johtua uusista käyttäjistä (Kröger ym. 2019).

Kokonaisuudessaan henkilöautojen automaatiolla on siis henkilöautokilometrejä ja henkilöauton kulkutapaosuutta kasvattava vaikutus. Vaikutuksen suuruuteen vaikuttaa erityisesti se, kuinka paljon automaatio vähentää koettua aikakustannusta henkilöautolla matkustettaessa. Automaattisten henkilöautojen penetraatioasteella on myös suuri vaikutus. Suuri osa tutkimuksista on tehnyt oletuksen, että merkittävä osa tai jopa kaikki henkilöautot on korvattu automaattisilla henkilöautoilla. Lähitulevaisuuden ennakkoinnin kannalta olennaisempaa voi kuitenkin olla tarkastella tutkimuksia, joissa on oletettu kohtuullisen matala penetraatioaste. Esimerkiksi Kröger ym. (2019) mukaan 10,1 % automaattisten henkilöautojen penetraatioasteella henkilöautokilometrit kasvaisivat 3,4 % ja henkilöauton osuus matkoista kasvaisi yhden prosenttiyksilön. Joukkoliikenteen kilometrisuorite taas laskisi 6,0 % ja osuus matkoista laskisi 0,4 prosenttiyksikköä. Pidemmällä tähtäimellä liikkumisen, maankäytön ja talouden vuorovaikutukset määrittävät vaikutusten suuruuden.

Liikennevirtavaikutusten yhteenvetona voidaan todeta, että henkilöautojen automaatio saattaa pidentää keskimääräisiä matka-aikoja ainakin silloin, kun liikenteessä on sekä ihmiskuljettajia että automaattiautoja. Matka-ajat voivat lyhentyä, kun kaikki ajoneuvot ovat automatisoituja tai automatisoituja ja verkottuneita ja käyttävät lyhyitä tavoiteaikavälejä. Tulosten tulkinnassa on kuitenkin huomiotava, että nykytilanteessa osa ihmiskuljettajista ajaa ylinopeutta, kun taas automaattiautojen (SAE-taso 3 ja korkeampi) oletetaan noudattavan nopeusrajoituksia. Tästä erosta voi aiheutua kasvua matka-aikoihin etenkin alhaisilla liikennemäärillä, joissa pystytään ajamaan tavoitenopeudella.

Simulointitutkimuksissa moottoriteiden välityskyvyn on todettu kasvavan silloin, kun automatisoitujen autojen tavoiteaikavälit ovat lyhempiä kuin ihmiskuljettajien keskimäärin käyttämät aikavälit. Oletuksista riippuen yksittäisissä skenaarioissa vaikutukset välityskykyyn ovat vaihdelleet suuresti välityskyvyn merkittävästä laskusta huomattavaan kasvuun.

Simulointitulokset viittaavat siihen, että **ympäristön** kannalta CO₂-päästöt saattavat kasvaa hieman ainakin tilanteessa, jossa kaikki ajoneuvot eivät ole

automatisoituja. Kenttäkokeet osoittavat, että automatisoitujen henkilöautojen polttoaineenkulutus ja päästöt ajettua kilometriä kohti voivat olla ihmiskuljettajan autoja pienemmät etenkin vakaissa liikennetilanteissa, vakaammasta ajotavasta johtuen.

Korkean tason automaation henkilöautojen vaikutuksia **liikenneturvallisuuteen** on tutkittu useilla eri menetelmillä. Yksi hyödynnetyimmistä on konfliktitilanteet, joka on epäsuora mittari liikenneturvallisuudelle. Lisäksi liikenneturvallisuusvaikutuksia on tutkittu tunnistamalla autojen kohdeonnettomuuksia onnettomuustilastojen perusteella. Yhteenvedona voi todeta, että näitä menetelmiä hyödyntäneissä tutkimuksissa tulokset ovat suhteellisen positiivisia korkean tason automaation henkilöautojen liikenneturvallisuusvaikutuksista. Kuitenkaan näissä tutkimuksissa ei ole huomioitu, että henkilöautojen automaatio todennäköisesti lisää liikennesuoritetta ja aiheuttaa kulkutapasiirtymän joukkoliikenteestä henkilöautoihin (kappale 3.2.1). Tällä hetkellä joukkoliikenne on hyvin turvallinen vaihtoehto liikua. Liikenneturvallisuuden kannalta on kielteinen asia, jos ihmiset siirtyvät käyttämään turvattomampia kulkutapoja sekä tekevät uusia ja pidempiä matkoja.

Kuljettajan tukijärjestelmien vaikutuksia liikenneturvallisuuteen on tutkittu laajasti. Tulokset viittaavat siihen, että eri järjestelmät vähentävät niiden kohdeonnettomuuksia (esim. Wang ym. 2020). Järjestelmien turvallisuusvaikutukset voivat kuitenkin vaihdella eri ympäristö- ja keliolosuhteissa (Masello ym. 2022). Lisäksi järjestelmien penetraatioasteella liikenteessä on merkitystä niiden yleiseen turvallisuusvaikutukseen (esim. Sander ja Lubbe 2018).

Automaattisten autojen ja muiden **tienkäyttäjien välisen vuorovaikutustutkimuksen** voidaan todeta olevan tilanteessa, jossa olennaisia käsitteitä ja teoreettista pohjaa vielä etsitään ilman, että mikään yksittäinen näkemys tai tarkastelutapa olisi noussut hallitsevaan asemaan. Tämä kuvastaa omalta osaltaan automaattiajamisen teknisen kehityksen tilaa ja siitä nousevaa epävarmuutta automaation vaikutuksista tulevaisuudessa. Keskeisenä tutkimustuloksena voidaan pitää todisteita siitä, että jalankulkija pystyy päättelemään ajoneuvon aikomukset pitkälti pelkästään sen liikkeestä, ilman ajoneuvon juuri tätä tarkoitusta varten lähettämiä viestejä, kuten käsimerkkejä tai erilaisia tekstejä, värejä tai valoja. Tällä on merkitystä ulkoisten käyttöliittymien kehittämisen kannalta. Ulkoisten käyttöliittymien tehokasta viestintää tutkittaessa on havaittu tekstimuotoisten viestien ja neutraalien värien toimivan parhaiten.

3.3 Joukkoliikenne

Automatisoitujen linja-autojen tutkimuksessa on keskitytty tähän mennessä enemmän teknologian kehittämiseen, käyttäjien hyväksyntään, turvallisuuteen ja lainsäädäntöön kuin päästövaikutuksiin (Nikitas ym. 2021).

3.3.1 Liikennesuorite ja kulkutapajakauma

Joukkoliikenteen automaatio ei vaikuta matkustajan kokemukseen samalla tavalla suoraan kuin henkilöauton kuljettajien kohdalla. Osa matkustajista tosin saattaa kokea kuljettajan läsnäolon tuovan turvaa, mikä voi vaikuttaa ilman kuljettajaa kulkevien joukkoliikennevälineiden hyväksyttävyyteen (Roche-Cerasi 2019). Merkittävimmät automaation tuomat muutokset koskevat joukkoliikenteen operointikustannuksia sekä operointimallia.

Noin puolet operointikustannuksista muodostuu kuljettajien palkoista (HSL 2023, Bösch ym. 2018, Tirachini ja Antoniou 2020). Operointikustannukset voivat siis merkittävästi laskea, jos kuljettajille ei tarvitse maksaa palkkaa. Myös ajamisen energiatehokkuus voi parantua. Lisäkustannuksia voi tosin syntyä mm. joukkoliikenteen ajoneuvojen etäavustuksesta (*remote assistance*). Edullisemmat operointikustannukset voivat mahdollistaa edullisemmat lipun hinnat, paremman palvelutason tai julkisen subvention vähentämisen (Tirachini ja Antoniou 2020).

Bösch ym. (2018) analysoivat Sveitsin olosuhteissa automaattisten ja ei-automaattisten henkilöautojen ja joukkoliikenteen kustannuksia ja vertailivat niitä robottitakseihin. Analyysissä oli oletettu, että kaikki ajoneuvot sähköistyvät. He arvioivat, että junien automaatio voisi vähentää operointikustannuksia 5 %, kun kuljettajia ei enää tarvittaisi. Bussien operoinnissa 55 % kustannuksista tuli kuljettajien palkoista. Työvoimakustannusten säästöt voivat olla kuitenkin todellisuudessa tätä maltillisempia, koska automaattisia joukkoliikennevälineitä joudutaan todennäköisesti etävalvomaan ja -avustamaan ihmisvoimin.

Böschin ym. (2018) analyysin mukaan kaupunkiolosuhteissa automaattisten bussien kokonaiskustannukset 0,24 CHF¹ (sisältäen niin hankinta- kuin operointikustannukset) matkustajakilometriä kohden olivat matalammat kuin robottitaksien (jaetut 0,29 CHF ja ei-jaetut 0,41 CHF). Ihmisen kuljettamat bussit (0,53 CHF) hävisivät kokonaiskustannuksissa myös ei-jaetuille robottitakseille. Kaupunkien ulkopuolisessa liikenteessä robottitaksit tarjosivat edullisimmat kokonaiskustannukset (jaetut 0,21 CHF ja ei-jaetut 0,32 CHF). Automaattisten bussien kokonaiskustannukset olivat 0,40 CHF ja ihmisten kuljettamien 0,89 CHF. Robottitaksit olivat myös edullisempia kuin junaliikenne (automatoitu 0,44 CHF, ihmisen kuljettama 0,47 CHF). Vastaavat kustannukset yksityisillä henkilöautoilla kaupungissa sekä sen ulkopuolella olivat ilman automaatiota 0,48 CHF ja automaation kanssa 0,50 CHF. Automaattiset bussit ja muut joukkoliikenteen ajoneuvot voivat olla ei-automaattisia kalliimpia hankkia, mutta tämän arviointiin liittyy paljon epävarmuuksia. Bösch ym. (2018) käyttivät laskemissaan oletusta, että automaattiset bussit olisivat 20 % kalliimpia kuin ei-automaattiset.

Joukkoliikenteen automaatio voi myös mahdollistaa kutsumuotoisen joukkoliikenteen järjestämisen riittävän kustannustehokkaasti. Räch ym. (2023) mallinsivat Zürichin metropolialueella kutsumuotoista joukkoliikennettä, jolla oli kiinteät pysäkit ja kiinteät lähtöajat pysäkeiltä. Pysäkit oli sijoitettu niin, että koko alueella lähimmälle pysäkille oli korkeintaan 300 m kävelymatka. Lähdöt tapahtuivat 15 min välein. Käyttäjät saattoivat kutsua pienbussin (2–10 matkustajaa) haluamalleen pysäkille valitsemallaan ajankohdalla. Kyydit olivat aina suoraan käyttäjän pyytämän lähtö- ja päätepysäkin välillä. Kyse oli siis eräänlaisesta robottitaksin ja joukkoliikenteen välimuodosta. Mallinnuksessa kutsubussin osuudeksi matkoista tuli 20 %. Perustuen Böschin ym. (2018) tuloksiin he arvioivat kutsubussin hinnaksi 0,30 CHF per matkustajakilometri. Perinteisen joukkoliikenteen (30 % → 21 %) ja henkilöauton (22 % → 14 %) osuudet matkoista laskivat. Kävelyn osuus pysyi samana (39 %) mutta pyöräilyn laski (8 % → 6 %). Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin keinoja, joilla kulkutapasiirtymää saataisiin ohjattua yksityisautoilusta kutsujoukkoliikenteeseen ja estettyä perinteisen joukkoliikenteen ja pyöräilyn määrän väheneminen. Mallinnuksessa keskusta-alueen ympäröivä rajan ylittämistä maksettava henkilöautojen tietulli osoittautui tehokkaaksi keinoksi vähentää

¹ Artikkelin julkaisuvuonna 2017 yksi Sveitsin frangi (CHF) vastasi noin 0,90 euroa.

pysäköintipaikkojen kysyntää keskustassa yhdessä kutsumuotoisen joukkoliikenteen kanssa.

Joukkoliikenteen automaatio tekee alhaisempien operointikustannusten vuoksi taloudellisesti mahdolliseksi parantaa joukkoliikenteen palvelutasoa, kun muutaman ison bussin sijasta voidaan samoilla kustannuksilla ajaa useita pienempiä (Tirachini ja Antoniou 2020). Tämä mahdollistaa tiheämmät vuorovälit ja tiheämmän reittiverkoston, jossa etäisyydet pysäkeille ovat lyhyemmät. Parantunut palvelutaso voisi lisätä joukkoliikenteen houkuttelevuutta. Toisaalta alhaisemmat operointikustannukset voivat kanavoitua myös alempiin lipun hintoihin, vähäisempään julkiseen subventioon tai operaattoreiden voittoihin.

Automaation mahdollistamien muutosten vaikutuksia reittimuotoisen ja aikataulutetun joukkoliikenteen kulkutapaosuuteen tai liikennesuoritteeseen ei ole mallinnettu vastaavalla tarkkuudella kuin automaattisten henkilöautojen ja robottitaksien kohdalla. On kuitenkin hyvä pitää mielessä, että automaattisten henkilöautojen ja robottitaksien käytön vaikutusta perinteisen joukkoliikenteen käyttöön on usein tarkasteltu, ja näitä vaikutuksia on käsitelty muissa luvuissa. Automaattisten henkilöautojen on yleensä ennustettu houkuttelevan joukkoliikenteen käyttäjiä vaihtamaan automaattisiin henkilöautoihin (ks. 3.2.1). Automaattisiin henkilöautoihin kohdistuvan kulkutapasiirtymän myötä liikennesuorite voi kasvaa, mikä johtaa ruuhkautumiseen isoilla kaupunkiseuduilla. Tämä voi puolestaan kasvattaa joukkoliikenteen kulkutapaosuutta. Robottitaksit voivat toisaalta houkutellessa nykyisiä joukkoliikenteen käyttäjiä robottitaksien käyttäjiksi, mikäli robottitaksien koettut käyttökustannukset (rahalliset, ajalliset ja vaivalliset) ovat kilpailukykyisiä suhteessa joukkoliikenteeseen. Toisaalta robottitaksien on visioitu toimivan erinomaisesti joukkoliikenteen tukena tarjoten ratkaisun joukkoliikenteen liityntäliikenteelle (ks. 3.4.1).

Edellisen analyysin perusteella joukkoliikenteen automaatio on tärkeää, jotta kaupunkialueilla pystytään tarjoamaan riittävän houkutteleva joukkoliikenteen palvelutaso kustannustehokkaasti. Muussa tapauksessa robottitaksipalvelut saattavat kilpailla joukkoliikenteen kanssa, vähentäen lippituloja ja sitä kautta järjestämisen edellytyksiä. Joukkoliikenteen kulkutapaosuuden lasku kaupungeissa puolestaan pahentaa ruuhkia ja lisää matka-aikoja. Isot bussit, junat ja raitiovaunut pystyvät kuljettamaan isoja joukkoja tilatehokkaammin kuin pienet robottibussit, mutta siellä missä matkustajavirrat ovat pieniä, robottitaksit tai automaattiset pienbussit saattaisivat olla varteenotettava vaihtoehto näille perinteisille joukkoliikenneajoneuvoille (Bösch ym. 2018, Räth ym. 2023).

Yksityisten robottitaksioperaattoreiden näkökulmasta kaupunkiseudut ovat kuitenkin todennäköisesti taloudellisesti houkuttelevampia kuin kaupunkien ulkopuoliset alueet. Haja-asutusalueiden asukkaiden liikkuvuuden kannalta robottitaksipalveluiden subventointi saattaa kuitenkin olla yhteiskunnan kannalta tehokkaampaa kuin reittimuotoisen joukkoliikenteen subventointi.

3.3.2 Ympäristö

Zhang ym. (2020) mallinsivat automatisoitujen bussien vaikutuksia CO₂-päästöihin kahdeksankaistaisella kaupunkimootoritiellä (4,5 km pitkä osuus) Kiinassa. Bussien osuus liikennemäärästä oli 3,2 %. Tilanteessa, jossa kaikki bussit olivat automatisoituja, bussien päästöt vähenivät 1,8 % ja koko liikenteen päästöt

0,4 %. Skenaariossa, jossa yksi kaista varattiin vain bussien käyttöön, bussien päästöt vähenivät 23–34 % ja kaikkien ajoneuvojen 3–4 %.

Marques ym. (2021) tutkivat yliopistokampuksen ja tiedepuiston yhdistävien automatisoitujen ajoneuvojen vaikutuksia liikenteen sujuvuuteen ja päästöihin Aveirossa Portugalissa. Kohteiden välinen matka oli noin 5–6 km ja reittivaihtoehtoja oli useita, mm. maantie ja moottoritie. Liikennesimulointien ja päästölaskennan avulla simuloitiin kahta skenaariota. Ensimmäisessä osa henkilöautoista korvattiin automaattiautoilla (penetraatioasteet 10–50 %) ja toisessa simuloitiin uuden joukkoliikennepalvelun käyttöönottoa, joka kulki yliopistokampuksen ja tiedepuiston välillä. Automaattiautojen tavoiteaikaväli oli 1,0 s ja ihmiskuljettajien 0,9 s. Ensimmäisessä skenaariossa, jossa automaattiset henkilöautot korvasivat perinteisiä henkilöautoja, CO₂-päästöt ajoneuvokilometriä kohti (ilmeisesti kaikista ajoneuvoista, mutta artikkeli ei tätä suoranaisesti raportoi) laskivat aamuliikenteessä 10 % penetraatioasteella 1,0 % ja 50 % penetraatioasteella 5,4 %. Iltaliikenteessä vastaavat päästölaskut olivat 0,3 % ja 0,5 %. Toinen skenaario koski automaattista joukkoliikennettä. Ajoneuvon kapasiteetti oli neljä matkustajaa ja nopeus korkeintaan 20 km/h. Palvelun oletettiin korvaavan 25–35 henkilöautoa tarkastelun alla olevalla ajanjaksolla (75 min). Tässä skenaariossa päästölasku oli 0,1 % sekä aamu- että iltaliikenteessä, joka oli vähemmän kuin tekijät odottivat. He arvioivat vaikutuksen pienuuden syyksi automaattiajoneuvojen alempien nopeuksien aiheuttamaa liikenteen ruuhkautumista.

Huber ym. (2022) tutkivat automatisoitujen pienbussien elinkaaren ympäristövaikutuksia viidessä Euroopan kaupungissa. Pienbussiin mahtui korkeintaan 15 matkustajaa ja sen maksiminopeus oli 25 km/h. Bussi operoi osana joukkoliikennejärjestelmää kiinteillä reiteillä, mutta myös kutsuperusteista ovelta ovelle -palvelua kokeiltiin. Kokeiluista kerätyn datan perusteella laadittiin käyttötapaukset lähitulevaisuudelle sekä huonoimman ja parhaan tapauksen skenaariot. Nämä erosivat pienbussin odotetun käyttöiän, vuosisuoritteen, keskimääräisen matkustajamäärän, energiankäytön ajettua kilometriä kohti sekä käytetyn sähkönsäilytyksen osalta. Skenaarioissa huonoimman ja parhaan tapauksen energiankulutukset saatiin kenttäkokeiden tulosten ääriarvoista, mitkä poikkesivat suuresti toisistaan. Myös sähkön hiilidioksidiarvolle oletettiin erilaiset ääripäät: pääosin fossiilinen ja lähes täysin uusiutuva sähkönsäilytys. Lähitulevaisuuden käyttötapauksessa matkustajakilometrin kasvihuonekaasupäästöksi laskettiin 78 g CO₂-ekvivalenttia, josta 59 % johtui käyttövaiheesta ja 39 % komponenttien tuotannosta. Ihanteellisessa käyttötapauksessa, jossa pienbussin suorite sen elinaikana on suuri ja myös täyttöaste on korkea, energiankulutus kilometriä kohti on pieni ja sähkö tulee uusiutuvista lähteistä. Tämän tapauksen vaikutukset ilmastonmuutokseen (CO₂-ekv.-päästöt) olivat 91 % pienemmät kuin lähitulevaisuuden käyttötapauksessa, jossa ajoneuvojen keskimääräinen käyttöikä, vuosisuorite, täyttöaste ja energiankulutus arvioitiin viidessä Euroopan kaupungissa tehtyjen kenttäkokeiden tuloksista. Automaation vaatimien komponenttien osuudeksi pienbussien tuotantovaiheen päästöistä arvioitiin noin 2 % ja käyttövaiheen päästöistä noin 5 %.

3.3.3 Liikenneturvallisuus

Automaattisen joukkoliikenteen liikenneturvallisuusvaikutuksiin liittyvässä kirjallisuudessa on keskitytty automaattisiin pienbusseihin.

Beauchamp ym. (2022) arvioivat automaattisten pienbussien turvallisuutta Kana-dassa konfliktimenetelmällä. Tutkimuksessa arvioitiin kahta pientä pilottikokeilua

kahdessa kaupungissa: Montreal (kaksi pienbussia, seitsemän päivää heinä-elokuussa 2019) ja Cadiac (yksi pienbussi, kaksi päivää marras-joulukuussa 2019). Kahdella reitillä oli seitsemän eri tutkimuskohdetta, joissa arvioitiin tienkäyttäjien käyttäytymistä ja vuorovaikutustilanteita seuraavien indikaattoreiden osalta: nopeus, kiihtyvyys, Time-to-Collision (TTC), eli aika törmäykseen, ja Post-Encroachment Time (PET), eli aika siitä, kun ensimmäinen tienkäyttäjä poistuu mahdolliselta törmäysalueelta, siihen, kun toinen tienkäyttäjä saapuu alueelle. Pienbussien ajotapaa vertailtiin niihin ihmisen kuljettamiin ajoneuvoihin, jotka ajoivat samantyyppisillä liikeradoilla kuin pienbussit. Tulosten perusteella automaattisilla pienbusseilla oli alhaisemmat nopeudet ja kiihtyvyydet verrattuna ihmiskuskien ajamiin autoihin. Lisäksi vuorovaikutustilanteisiin liittyvät mittarit TTC ja PET olivat pääosin pidempiä automaattisilla pienbusseilla verrattuna ihmiskuljettajien ajamiin autoihin. On kuitenkin hyvä huomioida, että tutkimuksen tarkastelujakso oli lyhyt – vain seitsemän päivää.

Mourtakos ym. (2021) simuloivat liikennettä Ateenan kaupungissa (2 580 tiejaksoa, 1 137 liittymää), jossa ruuhkatunnin aikana tehdään 82 270 automatkaa ja 3 110 kuorma-automatkaa. Tutkimuksessa arvioitiin korkean tason automaattiautojen vaikutuksia eri skenaarioille. Tulosten mukaan konfliktit vähenivät 14 % skenaariossa, jossa 20 % henkilöautoista korvattiin automaattisilla pienbusseilla ja 20 % tavaraliikenteen ajoneuvoista ajoi automaattisesti, verrattuna skenaarioon, jossa kaikissa ajoneuvoissa oli ihmiskuljettaja.

3.3.4 Yhteenveto

Joukkoliikenteen automatisointi voisi mahdollistaa sen operoimisen alhaisemmilla kustannuksilla. Tämän vaikutuksia **liikennesuoritteeseen ja kulkutapaja-kaumaan** ei ole suoraan mallinnettu. Joukkoliikenteen automatisoinnin voidaan kuitenkin ajatella olevan tärkeää, jotta se voidaan pitää kustannuksiltaan kilpailukyisenä esimerkiksi jaettuja kyytejä tarjoavien robottitaksipalveluiden kanssa.

Vaikka kokeilut automatisoiduilla pienbusseilla ovat yleisiä eri puolella Eurooppaa, myös Pohjoismaissa, niiden **ympäristövaikutuksista** ei juuri löydy tutkimustuloksia.

Automaattisen joukkoliikenteen kehityksellä ja automaattisten pienbussien käyttönotolla vaikuttaa olevan **turvallisuushyötyjä**. Kanadalaisen tutkimuksen mukaan pienbusseilla oli alhaisemmat nopeudet ja kiihtyvyydet sekä pienempään törmäysriskiin viittaavia indikaattoreita verrattuna perinteisiin ajoneuvoihin, mikä viittaa niiden parempaan liikenneturvallisuuteen (Beauchamp ym. 2022). Lisäksi Ateenan kaupunkia koskeva simulaatio viittaa siihen, että automaattisten pienbussien ja tavaraliikenteen ajoneuvojen integroiminen kaupunkiliikenteeseen voi vähentää konflikteja (Mourtakos ym. 2021). Toisaalta ylipäättään liikenteen automaation on ennustettu vähentävän joukkoliikenteen käyttöä (luku 3.2.1), jolla voi olla kielteinen vaikutus turvallisuuteen, jos ihmiset siirtyvät turvattomampien kulkutapojen käyttöön. On kuitenkin mahdoton sanoa tarkemmin, mikä olisi eri tekijöiden kokonaisvaikutus turvallisuuteen tulee tulevaisuudessa olemaan. Tätä on hyvä jatkuvasti tutkimuksellisesti seurata.

3.4 Robottitaksit

3.4.1 Liikennesuorite ja kulkutapajakauma

Robottitaksipalvelut tarjoavat kyytejä ”ovelta ovelle” kuten ihmistenkin ajamat taksit ja toimivat yleensä kutsuliikenteen (*mobility on demand*) periaatteella. Robottitaksien kyydit voivat olla yksityisiä tai jaettuja. Ensimmäisessä tapauksessa sama auto palvelee useita matkustajia, mutta kyytejä ei jaeta (*car-sharing*). Jälkimmäisessä robottitaksipalvelu yhdistelee eri liikkujien matkoja dynaamisesti (*ride-sharing*). Riippumatta kyytien jakamisesta, robottitakseista käytetään englanniksi usein nimitystä *shared autonomous vehicles* (SAV) (Narayanan ym. 2020).

Autojen ja kyytien jakaminen ja autojen operointi ilman kuljettajaa mahdollistaa palveluita, jotka voivat olla hinnaltaan kilpailukykyisiä ja kokonaiskustannuksiltaan jopa edullisempia suhteessa oman auton käyttöön (Compostella ym. 2020, Fagnant ja Kockelman 2018). On kuitenkin tärkeä huomata, että sillä, millä tavalla eri kulkutavoista maksetaan, saattaa olla merkittävä vaikutus kulkutapajakaumaan. Oman auton kustannuksista suuri osa on upotettuja kustannuksia (hankinta- ja pääomakustannukset), jolloin suorat käyttökustannukset jäävät automaattisenkin henkilöauton kohdalla houkutteleviksi suhteessa automatisoituihin liikkumispalveluihin (Bösch ym. 2018). Käytön mukaan maksettavissa liikkumispalveluissa käyttäjä maksaa palveluntarjoajan hankinta- ja pääomakustannukset matkan hinnassa, mikä takaa marginaalikustannukset muodostuvat oman auton käyttöä korkeammiksi, mikä rajoittaa palveluiden kysyntää. Hinnoittelumalli voi vaikuttaa myös liikkumisen kysyntään. Liikkumisen kysyntä voi jopa laskea tilanteessa, jossa liikkuminen perustuu käytön mukaan maksettaviin liikkumispalveluihin, kuten robottitakseihin (Thakur ym. 2016). Robottitaksien vaikutukset liikkumisen kustannuksiin on koottu Taulukkoon 12.

Taulukko 12. Robottitaksien vaikutukset matka- ja kulkutapapäätöksiin vaikuttaviin kustannuksiin.

Kustannuksen tai hyödyn laji	Robottitaksipalvelun vaikutukset kustannuksiin ja hyötyihin	Vaikutukset liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan
Rahalliset hankintakustannukset	Ei hankintakustannuksia käyttäjille.	Vähentää auton hankkimista omaan käyttöön.
Rahalliset käyttökustannukset	Ilman kuljettajaa toimiva taksi voi olla huomattavasti ihmisen kuljettaa taksia halvempi. Käyttökustannukset ovat kuitenkin todennäköisesti suurempia kuin oman henkilökohtaisen auton kohdalla, jossa merkittävä osuus kustannuksista on upotettuja kustannuksia.	Tekevät robottitakseista houkuttelevan vaihtoehdon osalle joukkoliikenteen ja oman auton käyttäjistä.
Koetut aikakustannukset	Automaattiset robotaksit mahdollistavat matka-ajan käytön muihin tarkoituksiin ja poistavat ajamisen ja pysäköinnin vaivan. Tämä vähentää koettuja aikakustannuksia. Robottitaksin jakaminen vieraiden ihmisten kanssa voi heikentää mahdollisuuksia käyttää matka-aika hyödyllisesti.	Todennäköisesti lisäävät liikumista. Aikakustannusten aleneminen kannustaa robottitaksien käyttöön. Jos robottitaksit lisäävät liikennettä ja houkuttelevat joukkoliikenteen käyttäjiä, ajoneuvosuorite voi kasvaa.
Matka-ajan koettu hyöty	Ajaminen ei tarjoa enää nautintoa tai iloa. Mahdollisuus tehdä muita asioita voi lisätä painetta matka-ajan hyötykäyttöön, jolloin se ei enää tarjoa ”hengähdystaukoa” arjessa. Toisaalta robottitaksissa voi viettää rauhallisen hetken tekevä mitään. Robottitaksin jakaminen vieraiden ihmisten kanssa voi vähentää matka-ajan koettua hyötyä.	Matka-ajan koettujen hyötyjen kasvu lisää automaattisten robottitaksien käyttöä ja alentuminen vähentää sitä. Vaikutukset vaihtelevat eri käyttäjillä, ja niitä voi olla vaikea määrittää.

Robottitakseilla on hyvin samansuuntaisia vaikutuksia kuin automaattisilla henkilöautoilla: ajamisen eteen ei tarvitse nähdä vaivaa ja matka-ajan voi käyttää muihin tarkoituksiin. Liikkuminen helpottuu myös niille käyttäjäryhmille, joilla ei ole ajokorttia tai autoa. Tämä voi kasvattaa kokonaisliikennesuoritetta ja syödä esimerkiksi joukkoliikenteen, kävelyn ja pyöräilyn kulkutapaosuutta siinä missä automaattiset henkilöautotkin (ks. 3.2.1).

Robottitaksin etuna suhteessa yksityisessä käytössä oleviin henkilöautoihin on se, ettei ajoneuvon pysäköimisestä tarvitse huolehtia. Haittapuolena kyytiä saattaa joutua odottamaan eikä kyyti ole välttämättä yhtä nopea kuin omalla autolla,

mikäli se on jaettu useamman matkustajan kesken (Bösch ym. 2018, Fagnant ja Kockelman 2018, Huang ym. 2021).

Robottitaksien vaikutukset kulkutapajakaumaan riippuvat palvelun toteutustavasta ja kontekstista. Robottitaksit voivat kilpailla sekä yksityisautojen että joukkoliikenteen kanssa syöden molempien kulkutapaosuutta (Narayanan ym. 2020, Nguyen-Phuoc ym. 2023). Toisaalta robottitaksit voivat myös lisätä joukkoliikenteen käyttöä, mikäli ne helpottavat liityntäliikennettä esimerkiksi juna-asemille (Huang ym. 2021, Narayanan ym. 2020, Nguyen-Phouc ym. 2023, Yueshuai ym. 2022).

Jaettuja kyytejä tarjoavat robottitaksipalvelut voivat periaatteessa vähentää ajettujen kilometrien määrää, mikäli robottitaksien käyttöaste (matkustajat ajoneuvokilometriä kohti) on riittävän suuri (Narayanan ym. 2020). On kuitenkin toinen kysymys, pystyykö palvelu silloin tarjoamaan riittävän houkuttelevan palvelutason käyttäjille, koska matka-aika kasvaa muiden matkustajien noudoista ja vienneistä (Bösch ym. 2018). Robottitakseille tulee myös ”tyhjiä kilometrejä”, jos ne odottavat asiakkaita ajaen tai siirtyvät kyydin jälkeen toiselle alueelle, jolla on enemmän asiakkaita (Fagnant ja Kockelman 2018, Huang ym. 2021). Tämän takia robottitaksipalvelut todennäköisesti lisäävät ajoneuvojen kilometrisuoritetta (Narayanan ym. 2020).

Huang ym. (2021) mallinsivat jaettuja kyytejä tarjoavien robottitaksien vaikutuksia USA:n Austinissa sillä oletuksella, että robottitakseja voitaisiin käyttää metroasemien ympäristöissä. Robottitaksit voisivat siis tukea liityntäliikennettä, mutta eivät korvata pidempiä (esimerkiksi asemien välisiä) matkoja. Robottitaksit houkuttelisivat 3,7 % ihmisistä käyttämään robottitaksin ja metron yhdistelmää. Uudet metropolvelun käyttäjät tulisivat nykyisistä henkilöauton käyttäjistä (Taulukko 13). Huolimatta suhteellisen pienestä prosenttiosuudesta tarkoittaisi tämä kuitenkin kyseisessä tapauksessa metron käyttäjien määrän kymmenkertaistumista. Aseman ympäristössä koko matkan kävelleiden sekä kävelen metrolle kulkeneiden osuudet pysyivät samoina kuin ilman robottitaksipalvelua.

Taulukko 13. Kulkutapajakauma Huang ym. (2021) tutkimuksessa, joka mallinsi robottitaksien käyttöä metron liityntäliikenteen tukena.

Skenaario	Kulkutapajakauma			
	Henkilöauto	Robottitaksi ja metro	Kävely ja metro	Kävely
Nykytila ilman robottitakseja	91,1 %	0 %	0,4 %	8,5 %
Jaetut robottitaksit metroasemien ympäristöissä	87,4 %	3,7 %	0,4 %	8,5 %

Herkkyysanalyysin perusteella parempi palvelutaso (metron lyhyempi vuoroväli ja robottitaksien suurempi määrä) lisäsivät robottitaksin ja metron yhdistämisen suosiota matka-ajan lyhentyessä. Kävelyn ja metrolle kävelemisen suosioon palvelutasolla ei ollut merkitystä, koska lyhyillä matkoilla kävely tarjosi joka tapauksessa houkuttelevan vaihtoehdon.

Mallinnuksen perusteella henkilöautojen ajosuorite väheni n. 14 000 mailista n. 13 000 mailiin, mutta samalla robottitaksit ajoivat n. 1 000 mailia matkustaja kyydissä ja n. 500 mailia tyhjänä. Yhteensä henkilöautojen ja robottitaksien ajosuorite kasvoi n. 700 mailia (5 %) (artikkelissa luvut on raportoitu pyöristettyinä, minkä takia luvut eivät summaudu tasan). Herkkyysanalyysissä kokonaisajoneuvokilometrit vähenivät vain skenaariossa, jossa robottitaksien määrä per metro-alue oli pienin ja myös vaikutukset kulkutapajakaumaan olivat pieniä. Muuten ajoneuvokilometrien määrä kasvoi.

Huang ym. (2021) tulosten yleistämisessä täytyy muistaa, että näin suuri lisäys joukkoliikenteen käytössä olisi mahdollista vain, jos joukkoliikenteessä on riittävästi vapaata kapasiteettia. On myös huomioitava, että mallinnuksessa ei huomioidu mahdollisuutta käyttää robottitaksia koko matkalla eikä siinä tarkasteltu robottitaksien mahdollisesti synnyttämiä uusia matkoja. On myös huomioitava, että mallinnuksessa ei oletettu metrolle olevan syöttöjoukkoliikennettä, jonka kanssa robottitaksit kilpailisivat. Kävelyn osuus liityntäliikenteestä oli myös pieni, mikä voi selittyä Yhdysvaltojen erilaisella liikenneympäristöllä. Suomen kontekstissa robottitaksit voisivat myös kilpailla esimerkiksi metron tai lähijunien liityntälinjojen kanssa, jolloin vaikutus joukkoliikenteen käyttöön voisi olla monimutkaisempi.

Nguyen-Phuoc ym. (2023) mallinsivat robottitaksien vaikutuksia Singaporessa kahdessa eri skenaariossa. Osittaisen automaation skenaariossa automaattiset robottitaksit (jaetuilla ja yksityisillä kyydeillä) tuotiin olemassa olevien kulkutapojen rinnalle. Täyden automaation skenaariossa henkilöautoilu sekä ihmisten ajamien taksien ja minibussien liikennöinti kiellettiin. Vertailukohdaksi mallinnettiin Singaporen liikenne vuonna 2030 ilman automaattista liikennettä.

Osittaisen automaation skenaariossa joukkoliikenteen kulkutapaosuus väheni 10 % ruuhka-aikana ja 3 % ruuhka-ajan ulkopuolella. Robottitaksit houkuttivat käyttäjiä erityisesti joukkoliikenteen parista, koska ne tarjosivat sujuvan ovelta ovelle -yhteyden. Myös henkilöautoliikenteen kulkutapaosuus laski. Täyden automaation skenaariossa joukkoliikenteen kysyntä sen sijaan kasvoi 5–6 % ruuhka-aikana ja 9 % ruuhka-ajan ulkopuolella. Robottitaksit itsessään palvelivat vain 11 % matkoista rinnakkaisessa skenaariossa ja 15 % matkoista täysautomaation skenaariossa. Kävelyn osuus pysyi melko samana skenaariossa, jossa robottitaksit palvelivat ihmisten ajamien ajoneuvojen rinnalla, mutta kasvoi täysin automatisoidussa skenaariossa. Vaikka joukkoliikenteen kulkutapaosuus täyden automaation skenaariossa kasvoi, heikkeni sen palvelutaso ruuhkautumisen myötä. Toimia palvelutason parantamiseksi ei tarkasteltu.

Lau ja Susilawati (2021) tutkivat jaettujen automaattisten ajoneuvojen (*shared automated vehicle, SAV*) toteuttamiskelpoisuutta julkisen liikenteen ensimmäisen ja viimeisen kilometrin yhteysongelmien ratkaisemisessa. Tutkimuksessa mallinnettiin SAV-ajoneuvojen integrointia joukkoliikenteeseen Kuala Lumpurissa ja arvioitiin niiden vaikutusta liikenneverkon suorituskykyyn ja julkisen liikenteen matkustajamääriin. Automaattiautot suunniteltiin tarjoamaan jaettuja liikkumispalveluja erityisesti tärkeimpien joukkoliikenneasemien läheisyydessä, ratkaisuna ensimmäisen ja viimeisen kilometrin (*first mile – last mile*) haasteeseen. Tutkimuksessa todettiin, että automaattiautojen integrointi joukkoliikenteeseen lisäsi joukkoliikenteen käyttöä 3 % ja vähensi henkilöautosuoritetta 6 %. Liiallinen odotusaikojen lyhentäminen voi johtaa automaattiauton matkustajamatkojen lisääntymiseen joukkoliikenteen kustannuksella, mikä saattaa pahentaa ruuhkia.

Tutkimuksessa korostettiin huolellisen suunnittelun tarvetta integroitaessa automaattiautoja joukkoliikenteeseen, jotta liikenneolosuhteet eivät huononisi. Tutkijat pitivät tärkeänä, että automaattiautopalvelut vetoavat henkilöautojen käyttäjiin. On tärkeää varmistaa, että nämä palvelut täydentävät tehokkaasti joukkoliikennettä.

Tarjolla olevien robottitaksien määrä vaikuttaa kulkutapasiirtymän suuruuteen. Vosooghi ym. (2019) mallinsivat Rouenin metropolialueen (Ranska) liikennettä. Alueella on noin puolimiljoonaa asukasta. Sillä oletuksella, että 2 000 robottitaksia ajaa ei-jaettuja kyytejä muodostui robottitaksien kulkutapaosuudeksi 3,1 % matkoista². Joukkoliikenteen osuus oli 9,2 % ja henkilöauton 59,3 % matkoista. 6 000 robottitaksilla robottitaksien kulkutapaosuus oli 7,6 %, joukkoliikenteen 6,8 % ja henkilöauton 57,5 %. Loput matkat käveltiin, ja kävelyn osuus pysyi suhteellisen vakaana. Henkilöauton ja robottitaksien yhteenlaskettu kilometrisuorite oli vastaavasti 10,1 milj. km ja 11,3 milj. km. Tämä oli siis 13 % ja 27 % enemmän kuin 8,9 milj. km, joka oli arvioitu suoritteeksi ilman robottitakseja. Mallinnuksen perusteella kyytien jakaminen vähensi kulkutapasiirtymää. Kun robottitakseja oli 6 000 kappaletta ja ne olivat 6-paikkaisia pienbusseja, robottitakseja käytettiin 6,9 %, joukkoliikennettä 7,1 % ja henkilöautoa 57,7 % matkoista.

Robottitaksien kohdalla kyytien jakamisella on merkittävä vaikutus henkilöautojen ja robottitaksien yhteiseen ajoneuvosuoritteeseen sekä kulkutapajakaumaan. Fagnant ja Kockelman (2018) mallinsivat Austinissa (USA) robottitaksien käyttöä. Robottitakseja oli 1 705 ja ne palvelivat 56 324 henkilön matkalla. Verrattuna yksityisautojen käyttöön ajoneuvokilometrit kasvoivat. Ei-jaettuja kyytejä tarjoavat robottitaksit ajoivat 8,7 % ja jaettuja kyytejä tarjoavat 4,5 % enemmän kilometrejä. Jaettujen kyytien kohdalla sallittiin matka-ajan kasvavan korkeintaan 20 %. Jos jaettujen kyytien matka-aikojen sallittiin kasvaa jopa 40 % suhteessa suoriin kyyteihin, ajoneuvosuorite kasvoi vain 1,5 %. Toisaalta kyytien jakaminen leikkasi ruuhkahuippujen odotusaikoja (9 min) lähes puoleen (4–5 min), mikä voi olla käyttäjille kannuste kyytien jakamiseen.

Tulokset viittaavat siis siihen, että robottitaksit voisivat korvata automatkoja mahdollistamalla joukkoliikenteeseen tukeutuvia matkaketjuja sellaisilla alueilla, joissa joukkoliikenteen käyttö on nykyisellään vähäistä (esimerkiksi kaupunkien reuna-alueet). Toisaalta robottitaksit todennäköisesti vähentävät joukkoliikenteen käyttöä siellä, missä sitä käytetään eniten (kaupunkien keskusta-alueet).

Robottitaksien on ennustettu myös radikaalisti vähentävän oman auton omistamista (Rahman ja Thill 2023). Argumentti perustuu kuitenkin vahvasti siihen simulaatioista saatuun tulokseen, että jaettuja kyytejä tarjoavat robottitaksit pystyvät täyttämään matkakysynnän kohtalaisella lisääjällä suhteessa omaan autoon. Voidaan kuitenkin kysyä, että riittääkö tämä motiiviksi omasta autosta luopumiselle, koska oma auto saattaa edelleen tarjota nopeamman tavan kulkea kuin jaettu robottitaksi. Omaan autoon voi myös liittyä muita arvoja, kuten kokemus kulkemisen vapaudesta, minkä kanssa robottitaksin on vaikea kilpailla. Mikäli robottitaksit vähentävät auton omistamista, saattaa seurauksena olla myös joukkoliikenteen ja aktiivisten kulkutapojen osuuden kasvu.

² Kulkutapaosuuksia ennen robottitakseja ei ole raportoitu, mutta kulkutapasiirtymän kerrotaan tapahtuneen henkilöautoista ja joukkoliikenteestä.

3.4.2 *Liikennevirta*

Robottitaksien vaikutuksia liikenteen sujuvuuteen ei ole juuri tutkittu.

Overtoom ym. (2020) tutkivat yksityisomisteisten ja jaettujen automaattiautojen vaikutuksia kaupunkiliikenteeseen mikrosimuloinnilla tieverkolla Haagin kaupunginosassa aamuruuhkassa vuonna 2040, olettaen matkustustarpeen pysyvän samana. Automaattiautojen oletettiin ajavan lyhyemmällä aikavälillä kuin ihmiskuljettajien, ja niiden reaktioajat oletettiin lyhemmiksi, mutta parametrien arvoja ei kerrota. Simuloinneissa kokeiltiin kahta mahdollista tapaa hallita automaattiautojen vaikutuksia: pääkadun leventämistä yhdellä kaistalla, jonka käyttö sallitaan ainoastaan jaetuille automaattiautoille ja busseille, sekä automaattiautojen matkustajien jättöpaikkojen ohjaamista alemmalle tieverkolle pääkadun ruuhkien minimoimiseksi.

Tulokset näyttivät, että yksityiskäyttöiset automaattiautot vähensivät ruuhkia ja viiveitä verrattuna tilanteeseen ilman automaattiautoja. Jaetut automaattiautot taas johtivat suurempiin viiveisiin etenkin suuremmilla penetraatioasteilla. Ruuhkien lisääntyminen johtui automaattiautojen pysähdyksistä matkustajia jättäessä sekä tyhjänä ajosta. Jaettujen automaattiautojen oma kaista ei onnistunut vähentämään viiveitä, sillä kaistanvaihdot ja u-käännökset lisääntyivät. Jättöpaikkojen osoittaminen pienemmällä teillä osoittautui tehokkaaksi toimenpiteeksi vähentää jaettujen automaattiautojen aiheuttamia viiveitä silloin, kun penetraatioaste oli vähintään 25 %.

Tutkijat korostavat, että kaupungeissa on mietittävä robottitaksien jättöpaikkojen sijaintia ja sitä, miten niiden sallitaan liikkuvan tyhjinä kaupungissa.

3.4.3 *Ympäristö*

Robottitaksien vaikutuksia päästöihin on tutkittu lähinnä epäsuorasti suoritemuutosten ja ajoneuvokannan sähköistymisen kautta. Erityisesti yhdysvaltalais tutkimuksissa korostuu robottitaksien sähköistymisen vaikutus (Narayanan ym. 2020). Monet tutkimukset koskevat tilannetta, jossa koko liikennejärjestelmä mullistetaan niin, että yksityisomisteiset henkilöautot korvataan yhteiskäyttöisillä robottitakseilla. Siihen, miten tilanne saavutetaan, ei oteta kantaa.

Martinez ja Viegas (2017) mallinsivat liikennettä Lissabonin kaupungissa. Mallinnuksessa kaupunkiliikenteen kaikki nykyiset henkilöauto-, taksi- ja bussimatkat korvattiin jaetuilla automaattisilla vaihtoehdoilla, kahdeksan tai 16 hengen pienbuseilla. Näiden lisäksi liikenteen rungon muodostivat metro ja kävely. Sama liikumistarve pysyttiin mallinnuksessa hoitamaan niin, että CO₂-päästöt vähenivät 32–38 %, ajoneuvosuoritteen laskiessa 25–29 %.

Jiang ym. (2022) hyödynsivät aktiviteettipohjaista mallinnusta Etelä-Kaliforniassa yksityisomisteisten ja jaettujen automaattiautojen vaikutusten arvioinnissa. Tuloksena sekä suorite että CO₂-päästöt kasvoivat 10 %.

3.4.4 *Liikenneturvallisuus*

Robottitaksien liikenneturvallisuutta on ollut mahdollista tutkia hyödyntämällä todellisesta liikenteestä saatua aineistoa. Kaliforniassa sallitaan automaattiautojen testaaminen julkisilla teillä. Valmistajat on veloitettu raportoimaan kaikki onnettomuudet ja tilanteet, joissa automaattinen ajojärjestelmä on kytketty pois

päältä, sekä ajetut kilometrit. Tämä mahdollistaa sen, että voidaan analysoida ro-bottitaksien onnettomuusriskiä verrattuna ihmiskuljettajaan, onnettomuuksien vakavuutta ja muita ominaisuuksia. Seuraavaksi esitellään tutkimuksia, jotka pe-rustuvat Kalifornian automaattiautojen onnettomuustilastoon.

Favarò ym. (2017) analysoivat automaattiautojen onnettomuusriskiä (onnetto-muusaineisto ja ajetut kilometrit vuosilta 2014–2020) ihmiskuljettajiin verrattuna (kansallinen onnettomuus- ja suoritetilasto vuodelta 2015). Tulosten mukaan ih-miskuljettaja on osallisena onnettomuudessa 805 000 km välein (500 000 mailia), ja automaattiauto 67 620 km välein (42 017 mailia).

Goodall (2021) analysoi automaattiautojen peräänajo-onnettomuusriskiä (onnet-tomuusaineisto ja ajetut kilometrit vuosilta 2014–2020). Tulosten mukaan riski kaupunkiajossa oli melkein viisinkertainen automaattiautolle verrattuna ihmiskul-jettajaan (naturalistisen kenttäkokeen SHRP2 tulos).

Das ym. (2020) analysoivat vuosien 2014–2019 onnettomuusaineistoa (N=151) bayesilaisella klusteroinnilla ja tunnistivat kuusi tyypillistä onnettomuusluokkaa automaattiautoille. Onnettomuusluokat, jotka liittyivät kääntymiseen, ajoneuvojen yhteenajoihin, katuvalaistusolosuhteisiin, kylkikosketuksiin ja peräänajoihin, liit-tyivät myös korkeampiin henkilövahinkovakavuustasoihin.

Zhu ja Meng (2022) analysoivat eri tekijöiden vaikutusta automaattiauto-onnetto-muuksien vakavuuteen (v. 2018–2021, N=245) luokittelu- ja regressiopuumene-telmällä. Tulosten mukaan onnettomuuksien vakavuus on yhteydessä seuraaviin tekijöihin: i) valmistaja (vakavammat onnettomuudet, kun valmistaja on Cruise tai Waymo verrattuna muihin valmistajiin), ii) onnettomuuspaikka (lievemmat on-nettomuudet linjaosuudella verrattuna liittymiin), iii) toisen osallisen edeltävä liike (vakavammat onnettomuudet, kun toinen osallinen on ajamassa suoraan tai kääntymässä oikealle kuin jos toinen osallinen oli kääntymässä vasemmalle, hi-dastamassa, pysäköimässä, peruuttamassa, ohittamassa tai vaihtamassa kais-taa), iv) onnettomuustyyppi (lievemmat onnettomuudet kylkikosketuksissa kuin risteys-, peräänajo- tai kohtaamisonnettomuuksissa tai yhteenajoissa esteen kanssa ja v) valoisuus (lievimmät onnettomuudet päivänvalossa).

Boggs ym. (2020) analysoivat eri tekijöiden vaikutusta automaattiautojen pe-räänajo-onnettomuuksien yleisyyteen ja niiden vakavuuteen (v. 2014–2018, N=124) bayesilaisilla malleilla. Peräänajo-onnettomuudet ovat yleisempiä sekoite-tun maankäytön alueilla verrattuna muihin alueisiin (asuin-, teollisuus- ja kaupal-linen alue). Lisäksi ne olivat harvinaisempia koulujen läheisyydessä kuin muualla. Peräänajo-onnettomuuksien vakavuus kasvoi perään ajaneen ajoneuvon nopeu-den myötä. Lisäksi henkilövahinkoon johtaneen peräänajo-onnettomuuden toden-näköisyys oli pienempi linjaosuuksilla, joissa on näkyvä keskiviiva kuin linjaosuuksilla, joissa ei ole keskiviivaa, sekä kirkkaissa sääolosuhteissa kuin muissa sääolo-suhteissa (pilvinen, sumu, ei tiedossa).

Kutela ym. (2022) analysoivat onnettomuuksia, joissa osallisena on ollut auto-maattiauto ja suojaamaton tienkäyttäjät (jalankulkija, pyöräilijä tai potkulautailija) vuosilta 2017–2020. Suojaamaton tienkäyttäjät oli suoraan osallisena 23 onnetto-muudessa ja välillisesti (vaikuttivat tapahtumaan mutta eivät olleet mukana tör-mäyksessä) 12 onnettomuudessa. Pyöräilijät ja potkulautailijat olivat useammin osallisena niissä onnettomuuksissa, joissa suojaamaton tienkäyttäjät oli suoraan osallinen, ja pyöräilijät olivat niissä yleensä pääaiheuttajana. Jalankulkijat olivat

useammin osallisena onnettomuuksissa, joissa suojaamaton tienkäyttäjä on epäsuorasti osallisena. Onnettomuus, jossa suojaamaton tienkäyttäjä on välillisesti osallisena, tapahtuu todennäköisemmin, kun auto ajaa automaattisesti kuin manuaalisesti.

3.4.5 Yhteenveto

Robottitaksien vaikutukset **liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan** riippuvat robottitaksipalvelun ominaisuuksista ja ympäristöstä, mihin ne tuodaan. Parhaimmillaan robottitaksit voivat tyydyttää ihmisten liikkumistarpeet vähäisemmällä ajoneuvokilometreillä kuin yksityisessä käytössä olevilla henkilöautoilla on mahdollista. Tämä kuitenkin edellyttää sitä, että käyttäjät ovat valmiita jakamaan kyytinsä myös tuntemattomien käyttäjien kanssa ja hyväksymään matkojen yhdistelyn seurauksena pidemmät matka-ajat. Ajoneuvokilometriä väheneminen on epätodennäköisistä, mikäli nykyiset joukkoliikenteen käyttäjät siirtyvät robottitaksien käyttäjiksi merkittävässä määrin. Joissain tilanteissa robottitaksit saattavat tosin myös tukea joukkoliikenteen käyttöä, mikäli ne mahdollistavat joukkoliikenteeseen perustuvat matkaketjut. Markkinaehtoiset robottitaksipalvelut tulevat todennäköisesti ensimmäiseksi saataville suurissa kaupungeissa, joissa on riittävästi potentiaalisia asiakkaita. Koska palvelut ovat saatavilla vain rajallisella alueella, jää niiden vaikutus kokonaissuoritteeseen ainakin aluksi vähäiseksi. Alkuvaiheen kokemukset tarjoavat aikaikkunan kehittää keinoja, joilla robottitaksipalvelut saadaan integroitua osaksi kestävästä liikennejärjestelmästä.

Robottitaksien vaikutukset **liikennevirtaan** riippuvat siitä, kuinka suuren osan henkilöautoliikenteestä ne korvaisivat, sekä siitä, minkälaisia toimenpiteitä ne vaativat infrastruktuurin suhteen: toimivatko robottitaksit omilla kaistoillaan vai muun liikenteen seassa ja miten pysäkit tai jättöpaikat sijoitetaan.

Robottitaksien **ympäristövaikutuksia** on tutkittu lähinnä epäsuorasti sitä kautta, miten ne vaikuttavat liikennesuoritteeseen ja ajoneuvokannan sähköistymiseen.

Liikenneturvallisuuden kannalta yhteenvetona voi todeta, että tulosten mukaan robottitaksien turvallisuus ei ole parempi kuin ihmiskuljettajilla. Tulosten tulkinnaassa on kuitenkin syytä huomioida vertailtujen onnettomuustilastojen kattavuus. Yhdysvaltojen onnettomuusaineistossa ovat vain kaikki poliisin tietoon tulleet onnettomuudet, mutta sen sijaan Kalifornian automaattiautojen onnettomuustilasto sisältää kaikki tapahtumat, joissa automaattinen ajojärjestelmä on kytketty pois päältä tai jossa auto on ollut osallinen onnettomuudessa. Tämä tarkoittaa, että robottitaksien turvallisuus on todennäköisesti esitettyjä tuloksia parempi, kun huomioidaan kansallisen onnettomuusaineiston aliraportointi (ne aineiston ulkopuolelle jäävät onnettomuudet, joissa poliisi ei tule paikalle).

3.5 Logistiset ratkaisut

3.5.1 Liikennesuorite ja kulkutapajakauma

Automaattiset kuorma-autot voivat vähentää kumipyörillä liikkuvan tavaraliikenteen kustannuksia, kun kuljettajille ei tarvitse enää maksaa palkkaa. Toisaalta rahdin käsittelyyn tarvittaisiin lisää työvoimaa, koska kuljettajat eivät enää olisi tekemässä sitä. Automaattiset kuorma-autot tarvitsisivat todennäköisesti myös ihmisen suorittamaa etäavustusta (*remote assistance*).

Engholm ym. (2021) mallinsivat automaattisten rekkojen hankinta- ja operointikustannusten vaikutuksia tavaraliikenteen kysyntään vaihdellen erilaisia oletuksia kustannusrakenteesta ja kuorma-autojen automaattisesta toimintaympäristöstä. Mallinnus perustui Ruotsin tavaraliikenteen valtakunnalliseen Samgods-malliin.

‘Kaikki kuorma-autot automaattisia’ -skenaariossa kaikkien kuorma-autojen (3,5–60 t) oletettiin olevan automaattisia. Tämä tarkoitti myös sitä, että kuorma-autojen oletettiin pystyvän hoitamaan myös jakeluliikenteen kaupunkiympäristössä. ‘Hubista hubiin’ -skenaariossa oletettiin, että ainoastaan 40 t kuorma-autot pystyisivät operoimaan automaattisesti terminaalien välillä, mutta tavaraliikenne lähettäjältä terminaaliin ja terminaalista vastaanottajalle toteutettaisiin edelleen ihmisten ajamalla kuorma-autoilla. Mallinnuksessa tavaraliikenteen kokonaismäärä pysyi samana eli kustannusten muutokset heijastuivat muutoksiin eri kuljetustapojen välillä (kumipyörä-, raide- ja meriliikenne). Ilmarahi edusti vain alle 0,2 % tonnikilometreistä vertailuskenaariossa, joten sitä ei tarkasteltu.

Skenaariossa, jossa kaikki kuorma-autot olivat automaattisia, tieliikenteen tonnikilometrit kasvoivat 22 % ja kuorma-autojen ajoneuvokilometrit 35 %, kun taas logistiikan kokonaiskustannukset vähenivät 8 % (1 700 miljoonaa euroa). ‘Hubista hubiin’ -skenaariossa tonnikilometrit kasvoivat 11 % ja kuorma-autojen ajoneuvokilometrit 15 %, kun taas logistiikan kokonaiskustannukset vähenivät 5 % (1200 miljoonaa euroa). Rajaamalla automaattinen hubista hubiin -operointi ainoastaan pääteille (joka vastasi kansainvälistä E-tieverkkoa) vaikutukset pienenevät ainoastaan vähän. Vertailuskenaariona oli Ruotsin tavaraliikenne vuonna 2017.

Tuloksia tarkasteltaessa on hyvä huomioida, että alentuneet tavaraliikenteen kustannukset voisivat kuitenkin johtaa myös tavaraliikenteen kysynnän kasvuun, mikä voisi tarkoittaa tavaraliikenteen määrän lisääntymistä. Mallinnus ei ottanut huomioon kysynnän muutosten vaikutuksia kuljetusten hintoihin.

3.5.2 Liikennevirta

Ramezani ym. (2018) tutkivat rekkojen CACC:n vaikutuksia mikrosimuloinnilla 24 km pituisella Kalifornian moottoritieellä, jossa raskaiden osuus liikennevirrasta oli noin 10–19 %. Simuloidulla verkolla oli tiheästi liittyviä ja erkanuvia rampeja ja useampi kaista. Tarkasteltu ajankohta oli tyypillinen aamupäiväliikenne, kun liikenne ei ole ruuhkautunut ja rekkojen osuus on suurempi kuin huippuun teina. CACC-tilassa ajavien rekkojen tavoiteaikaväleiksi valittiin aiemman kenttäkokeen perusteella 1,2 s (60 % kuljettajista) tai 1,5 s (40 % kuljettajista). Kun CACC ei ollut käytettävissä, rekat ajoivat ACC-tilassa, jolloin tavoiteaikaväli oli 2 s.

Tuloksena liikenteen sujuvuus parani, keskinopeus ja välityskyky kasvoivat. Rekkojen keskinopeudet kasvoivat 21 % ja henkilöautojen 6 %. Rekkojen suorite kasvoi 7 %. Kokonaissuorite laski hieman, kun penetraatioaste oli alle 60 % ja kasvoi hieman penetraatioasteen ollessa yli 60 %. Tutkijat selittivät tämän CACC-rekkojen kahdenlaisilla mekanismeilla: ne vähensivät ruuhkia ja täten kasvattivat ajonopeuksia verkon alussa. Lisäksi henkilöautoille koitui viipeitä, kun ne liittyivät rampilta moottoritieellä, sillä rekkaletkat eivät antaneet niille tietä.

Yang ym. (2019) tutkivat liikennesimuloinneilla rekkojen letka-ajon vaikutuksia moottoritieiliittymän kohdalla Alankomaissa. Simuloitu tienpätkä oli 1 800 m pitkä. Letkat koostuivat kolmesta ajoneuvosta, joiden välinen etäisyys oli 6,7 m

(vakioetäisyys). Letkojen pituus oli täten 70 m. Tulokset näyttivät, että letka-ajo voi vaikuttaa myönteisesti liikennevirtaan moottoritien ramppien lähellä. Letkojen määrän kasvaessa liikenteen sujuvuus heikkeni, sillä henkilöautojen kaistanvaihdot vaikeutuivat. Erityisesti päätielle liittyminen vaikeutui olennaisesti.

Calvert ym. (2019) mallinsivat rekkojen letka-ajon vaikutuksia liikennevirtaan mikrosimuloinnilla. Tutkimusalueena toimi 57 km moottoritietä Alankomaiden ja Saksan välillä, jossa on vilkas rekkaliikenne (rekkojen osuus kokonaisliikennemäärästä 20–50 %). Letkan sisällä ajoneuvot käyttivät vakioaikaväliä ajoneuvojen välillä. Simulointeja tehtiin kolmella aikaväliasetuksella: 0,3 s, 0,5 s ja 0,7 s. Mallissa tarkasteltiin erilaisia skenaarioita, jotka koskivat liikennemääriä, aikavälejä, penetraatioasteita ja letkan maksimijoneuvomääriä. Tulokset osoittivat, että letka-ajo huononsi hieman liikenteen sujuvuutta. Liikennemäärien ollessa alle 80 % kapasiteetista vaikutukset olivat vähäiset, mutta ruuhkaskenaarioissa havaittiin merkittäviä kielteisiä vaikutuksia: viivytykset kasvoivat 4 % iltapäiväruuhkassa ja 10–90 % aamuruuhkassa. Aikavälillä ei ollut suurta vaikutusta rampilta liittymisen keston, mutta se lisäsi kaistanvaihtojen (*cut-ins*) määrää letkan väliin.

Wang ym. (2019) mallinsivat letka-ajoa kaksikaistaisella moottoritielellä Alankomaissa. Verkon pituus oli 6,4 km, ja sen keskellä sijaitsi liittymä moottoritielelle (*on-ramp*). Tiellä oli vilkasta raskasta liikennettä. Nopeusrajoitus oli 130 km/h. Letkan sisällä ajoneuvot käyttivät vakioaikaväliä ajoneuvojen välillä. Simulointeja tehtiin kolmella aikaväliasetuksella: 0,3 s, 0,5 s ja 0,7 s. Letkat koostuivat kahdesta tai kolmesta rekasta. Liikennemäärää vaihdeltiin alhaisesta korkeaan ja ruuhkaan. Raskaan liikenteen letka-ajon penetraatioasteet olivat tutkimuksessa 0 %, 25 %, 50 %, 75 % ja 100 %.

Pienillä liikennemäärillä letka-ajon merkitys matka-aikoihin oli pieni. Ruuhkassa tien välityskyky kasvoi 2–19 %, vähentäen ruuhkien vakavuutta ja myöhäistäen niiden alkamisajankohtaa. Matka-ajat vähenivät 16 %. Pidempi letka lisäsi tien välityskykyä 8 %, kun penetraatioaste oli yli 25 %. On kuitenkin huomioitava, että nämä parannukset johtuivat osittain siitä, että letka-ajolla oli haitallisia vaikutuksia rampilta liittyvään liikenteeseen. Kaikki ajoneuvot eivät pystyneet liittymään, jolloin ne poistettiin simuloinnista. Letkan pituus ja aikaväli letkassa ajavien rekkojen välillä vaikuttivat merkittävästi siihen, miten monta ajoneuvoa pystyi liittymään rampilta moottoritielelle. Pidempi letka ja pidemmät aikavälit tekivät liittymisestä haastavampaa, erityisesti korkeilla liikennemäärillä.

Wang ym. (2019) päättelivät, että rekkojen letka-ajo voi lisätä tien välityskykyä ja parantaa liikenteen sujuvuutta erityisesti ruuhkatilanteissa. Se kuitenkin aiheuttaa haasteita liittyvälle liikenteelle, erityisesti silloin, kun penetraatioaste on suuri, letkat ovat pitkiä ja ramppien liikennemäärä on korkea. Hyödyt pääkaistojen sujuvuudelle olivat suurimmat suurilla penetraatioasteilla.

Wang ym. suosittelevat väylänpitäjille useita toimenpiteitä, mm.

- Letka-ajon sallimista vain ruuhka-aikojen ulkopuolella liittymishaittojen minimoimiseksi
- Letka-ajon kieltämistä ramppien läheisyydessä ruuhka-aikoina
- Ajoneuvojen välien säätämistä liikennetilanteen mukaan
- Letkan pituuden rajoittamista.

Lee ym. (2021b) tutkivat rekkojen letka-ajoa moottoritien rampin läheisyydessä mikrosimuloinnilla. Moottoritillä oli kolme kaistaa ja liikennemäärä kohtalainen (3 500 ajoneuvoa tunnissa). Raskaiden osuus liikennevirrasta oli 17 %. Letkan sisällä rekkojen välinen etäisyys oli 5 m, ja letkojen välinen etäisyys oli 50 m. Letka sai ajaa ainoastaan oikeanpuolisimmalla kaistalla. Tutkijat jakoivat 3,4 km tienpätkän 100 m pituisiin ja 50 s pituisiin jaksoihin, yhteensä 1 360 aika-avaruussoluun (*time-space-cells*), ja laskivat ajoneuvojen keskinopeuksien perusteella ruuhkaisuusindeksin joka solulle. Ruuhkaa ei ollut, kun keskinopeus oli vähintään 80 km/h, ja ruuhka oli vähäistä keskinopeuksien ollessa 40 ja 80 km/h välillä.

Penetraatioasteiden ollessa 20–80 % vaikutukset olivat pieniä, mutta kun kaikki simuloinnissa olevat rekat olivat automatisoituja, ruuhkaisten solujen osuus kasvoi 13 %:iin (verrattuna 3 %:iin tilanteessa ilman automatisoituja rekkoja). Nopeudet laskivat erityisesti rampin kohdalla, sillä oikeanpuolimmaisella kaistalla ajavat rekat joutuivat hidastamaan päästääkseen muita ajoneuvoja liittymään moottoritielle. Ajokaistojen välinen nopeusero oli 100 % penetraatioasteella 2,5-kertainen verrattuna tilanteeseen ilman automaatiota. Tutkijat päättelevät, että erityinen liikenteen hallinnan strategia on tarpeen näiden haittojen välttämiseksi, esimerkiksi letkan nopeuksia säätelämällä.

3.5.3 Ympäristö

Automaattiset logistiset ratkaisut

Figliozi (2020) tutki erilaisten tavarankuljetusrobottien päästövaikutuksia verraten niitä kotiinkuljetuksiin isokokoisella dieselajoneuvolla. Tulokset osoittivat, että jakelurobotit voivat vähentää hiilidioksidipäästöjä silloin, kun ne korvaavat polttomoottorilla varustettuja jakeluautoja. Tutkimuksen mukaan jalkakäytävää käyttävät pienet jakelurobotit olivat päästövähennysten kannalta hyödyllisiä erityisesti silloin, kun jakelualue on lähellä varikkoa/kauppaa eikä erillistä kuljetusajoneuvoa ("emoalus") tarvita.

Lemardelé ym. (2023) tekivät elinkaarianalyysin erilaisille "viimeisen kilometrin" (last-mile) jakelumalleille. Yhtenä tavoitteena oli tutkia kaksivaiheisen toimituskuvion, jossa yhdistyvät raskaat jakeluautot ja pienet jakelurobotit, vaikutuksia. Jakelumalleja verrattiin perinteisiin jakelutoimintoihin, jotka käyttävät polttomoottoriajoneuvoja tai sähköisiä pakettiautoja. Vaikutuksia tutkittiin mallinnuksella Barcelonan ja Hampurin kaupunkikeskustoissa. Kaksivaiheisessa järjestelmässä paketit viedään ensin kuljetusyhtiön jakelukeskuksesta "mikrohubille" raskailla jakeluautoilla, minkä jälkeen ne siirretään jakelurobotteihin, jotka toimittavat paketit loppuasiakkaille. Tavanomaisessa järjestelmässä kevyet kaupalliset ajoneuvot vievät paketit suoraan jakelukeskuksesta loppuasiakkaille.

Tulokset osoittavat, että kaksivaiheisessa toimitusjärjestelmässä jakelurobotteja käyttäen energiankulutus jaettua pakettia kohti oli 24 % (Hampuri) ja 34 % (Barcelona) alempi kuin yksivaiheinen jakelu sähköisillä pakettiautoilla. Tehokkuus riippui kysynnän tiheydestä, eli keskimääräisestä etäisyydestä vastaanottajien välillä. Yksi raskas jakeluauto ja 15–30 jakelurobottia korvasivat noin kymmenen pakettiautoa. Kaksivaiheinen jakelu vähensi kokonaismatkaa noin 20 %.

Letka-ajo

Bishop ym. (2017) tutkivat kuljettajaa avustavan letka-ajon vaikutuksia Yhdysvalloissa. Letkat koostuivat kahdesta rekasta. Tutkimus hyödynsi liikennesimulointia

ja virtausdynamiikkamallinnusta. Letkan polttoaineensäästöt olivat suurimmat (7 %) välimatkan ollessa noin 9 m. Tällä etäisyydellä myös letkassa ensimmäisenä ajavan polttoaineensäästö oli suurin (5 %). Jälkimmäisen ajoneuvon osalta polttoaineensäästö oli suurimmillaan (10 %), kun välimatka oli noin 15 m, mutta säästö oli samaa luokkaa myös välimatkan ollessa pidempi, noin 23 m. Tällöin letkan kokonaispolttoaineensäästö oli noin 6 %.

Bibeka ym. (2019) tutkivat rekkojen letka-ajoa moottoritiellä mikrosimuloinnilla. Letkat koostuivat korkeintaan viidestä rekasta ja niiden massa oli 15 tonnia. Letkat muodostuivat *ad-hoc* eli aina, kun kaksi varustettua rekkaa oli samalla kaisalla ja niiden välimatka oli korkeintaan 100 m. Tutkimuksessa mallinnettiin 42 km pitkä monikaistainen moottoritienpätkä ilman liittymiä tai muita mahdollisia pullonkauloja. Henkilöautoissa oli ihmiskuljettajat. Liikennemäärää (2 500 ja 4 000 ajoneuvoa tunnissa), penetraatioastetta (10 %, 30 %, 50 % ja 70 %, mikä oli samalla rekkojen osuus liikennevirrasta) ja letka-ajossa olevien rekkojen minimaikaväliä vaihdeltiin (0,2 s ja 0,6 s). Tulokset osoittivat, että letka-ajo pienemmillä 0,2 s aikaväleillä johti CO₂-päästöjen laskuun. Aikavälillä 0,6 s vaikutukset olivat pieniä. Vaikutuksia muihin ajoneuvoihin ei tutkittu.

Song ym. (2021) tutkivat letka-ajon vaikutuksia polttoaineenkulutukseen ja tien kulumiseen tarkastelemalla ilmanvastuskertoimen muutoksia virtausdynamiikkamallinnuksella. Letkojen koko vaihteli kahdesta kuuteen ja rekkojen välistä etäisyyttä vaihdeltiin yhden rekan pituuden L funktiona $0,5 L$ ja $5 L$ välillä. Malli ei huomionnut muuta liikennettä. Heidän tuloksensa näyttivät, että suoraan toistensa perässä ajaessa kahden rekan letkan keskimääräinen polttoaineensäästö oli noin 9 %, kun ajoneuvojen välinen etäisyys oli $0,5 L$. Säästö laski 4 %:iin etäisyyden kasvaessa $5 L$:ään. Hyötyjen kasvu pieneni letkan pituuden kasvaessa, ja neljännen ajoneuvon jälkeen lisähyödyt olivat pieniä. Letkan pituuden vaikutus letkassa ensimmäisenä ja viimeisenä ajavien polttoaineensäästöihin oli pieni.

Tienpinnan kulumisen vähentämiseksi Song ym. (2021) arvioivat myös tilannetta, jossa rekat seurasivat toisiaan tien poikittaissuunnassa hieman eri kohdissa (*lateral offset*). Kun kahden rekan letkassa perässä kulkeva rekka muutti sijaintiaan ensimmäiseen nähden 5, 10 ja 15 cm, päällysteen rasisuhteita (*fatigue damages*) vähenivät 9 %, 30 % ja 41 %. Polttoaineensäästöihin vaikutus oli alle 1 %.

Cheng ym. (2023) tekivät kattavan analyysin rekkojen letka-ajon päästövaikutuksista Pohjois-Amerikassa. Analyysiin sisältyi 1 457 tieosuutta Yhdysvalloista ja Kanadasta, ja tutkimuksella oli käytettävissään kattavaa tietoa liikenneinfrastruktuurista, liikennemääristä, ajoneuvokannasta ja sääolosuhteista. Letka-ajon päästövaikutuksia tutkittiin liikennesimulointien avulla. Letkassa ajavien rekkojen välinen etäisyys oli noin 5 m ja letkoissa oli kolme rekkaa. Letka-ajo vähensi rekkojen päästöjä keskimäärin 12 %. Ajonaikaisten päästöjen lisäksi tutkijat huomioivat letka-ajosta johtuvan suuremman kunnossapitotarpeen päästöt. Tutkimus osoitti, että rekkojen letka-ajo vähensi ajonaikaisia päästöjä, mutta se heikensi tieinfrastruktuurin kestävyttä ja vaati tiheämpiä kunnossapitotyöitä, joista aiheutui päästöjä. Kaikkiaan letka-ajo vähensi kasvihuonekaasupäästöjä 5 %, kun huomioitiin sekä letka-ajon päästövähennykset että lisääntyneen kunnossapitotyön aiheuttama päästöjen kasvu.

3.5.4 Liikenneturvallisuus

Automaattinen letka-ajo moottoriteillä voi vähentää konfliktien määrää esimerkiksi letkan sisällä ajavien ajoneuvojen pienempien nopeusvaihteluiden kautta. Kuitenkin sekaliikenneympäristössä, jossa on sekä tavanomaisia ajoneuvoja että toisiinsa yhteydessä olevia automatisoituja letka-ajoneuvoja, onnettomuuksien riski voi kasvaa. Erillinen kaista automaattiselle letka-ajolle voi huonontaa ihmiskuljettajien turvallisuutta. Letkat voivat esimerkiksi vaikeuttaa muiden kykyä liittyä moottoritielle erityisesti silloin, jos letkoja on paljon ja ne ovat pitkiä (Wang ym. 2019).

Leen ym. (2021b) tutkimuksessa tarkasteltiin rekkaletkojen ja niiden penetraatioasteen vaikutuksia moottoriteiden liittymäalueilla hyödyntämällä simulaatioita. Tulosten mukaan rekkaletkojen penetraatioasteen kasvaessa peräänajojen määrä voi vähentyä, mutta sen sijaan kaistanvaihtoihin liittyvä turvallisuus heiketä.

Yangin ym. (2023) tutkimuksessa tarkasteltiin ajosimulaattoria hyödyntämällä tietyn kaistan varanneiden rekkaletkojen vaikutusta tavanomaisten ajoneuvojen kuljettajiin heidän liittyessään moottoritielle tai sieltä pois. Tulosten mukaan rekkaletka vaikutti tavanomaisten ajoneuvojen kuljettajien mentaaliseen kuormaan erityisesti heidän liittyessään moottoritielle. Tällöin kokemattomampien kuljettajien kohdalla myös erityisesti letkan pituudella oli vaikutusta, mutta ei niinkään letkan sisällä ajavien rekkojen etäisyydellä.

Kirjallisuuskatsauksessa löydettiin lisäksi kaksi tutkimusta, joissa on arvioitu henkilöautojen letka-ajon turvallisuusvaikutuksia rekkojen sijaan. Nämä tutkimukset raportoidaan kuitenkin tässä luvussa, koska oletettavasti vaikutus ihmiskuljettajan käyttäytymiseen olisi sama riippumatta ajoneuvotyypistä.

Dasin ym. (2022) tutkimuksessa hyödynnettiin konfliktianalyysiä tarkastellessa erilaisten letkojen, jotka sisältävät vain ACC-autoja tai vain tavanomaisia autoja tai näiden yhdistelmiä, vaikutusta erityisesti pitkittäisen ajon liikenneturvallisuuteen. Tutkimuksen aineistona oli kaksi eri lähde: OpenACC-aineisto, joka sisältää tietoa ACC:llä varustettujen autojen käyttäytymisestä testiradoilla ja todellisessa liikenteessä (Makridis ym. 2021), sekä Italiassa todellisessa liikenneympäristössä kerätty tutkimusaineisto tavanomaisten ja ACC-ajoneuvojen käyttäytymisestä. Tulosten mukaan erityisesti sellaiset letkat, joissa on sekä tavanomaisia että ACC-autoja, lisäävät pitkittäissuuntaisia liikennekonflikteja. Konfliktien määrä oli erityisen suuri silloin, kun ACC-auto seurasi tavanomaista autoa.

Chen ym. (2022) selvittivät ajosimulaattoria hyödyntäen, vaikuttavatko letka-ajossa olevien autojen käyttämän kaistan puoli, letkan autojen välinen etäisyys ja letkan nopeus ihmisen kuljettamien autojen kuljettajien turvallisuuteen. Tutkimuksessa koehenkilöt ajoivat ajosimulaattorissa kolmikaistaisella moottoritiellä ja suorittivat perässäajotehtävää. Tulokset viittaavat siihen, että vasemmanpuoleinen automaattiautolle kohdennettu kaista (DAVL-kaista, *Dedicated Automated Vehicle Lane*) verrattuna oikeanpuoleiseen vastaavaan kaistaan, lyhyemmät etäisyydet letka-ajossa (4 metriä verrattuna 10–18 metriin) ja letkan muita autoja suurempi nopeus (sen ollessa 110 km/h) heikensivät ihmisten kuljettamien autojen ajajien turvallisuutta ja lisäsivät henkistä kuormittuneisuutta.

3.5.5 Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus

Katsausartikkelissaan Fabricius ym. (2022) kävivät läpi 19 raskaan liikenteen ja suojaamattomien tienkäyttäjien vuorovaikutusta tarkastelevaa tutkimusartikkeliä. Kuten henkilöautojenkin kohdalla, vuorovaikutus ymmärretään eräänlaiseksi neuvottelutilanteeksi rajatussa fyysisessä tilassa, jonka tarkoituksena on turvallisen kulun varmistaminen (Markkula ym. 2020). Valtaosa vuorovaikutuksesta on siis kommunikaatiota tienkäyttäjien välillä, jonka tarkoitus on heidän keskinäisten aikomustensa ymmärtäminen. Kirjoittajien mukaan raskaiden ajoneuvojen ja suojaamattomien tienkäyttäjien välisessä viestinnässä keskeisessä roolissa ovat heidän noudattamansa liikeradat, joita havaitsemalla tienkäyttäjät muodostavat tulokinnan toistensa aikomuksista. Tätä kutsutaan yleisesti implisiittiseksi informaatioksi (ks. kappale 3.2.5) erotuksena eksplisiittisestä informaatiosta, jossa tienkäyttäjät viestivät toisilleen tarkoituksenmukaisesti (esimerkiksi käsimerkein, vilkuin tai ulkoisen käyttöliittymän avulla). Keskeisenä erona henkilöautoihin voidaan pitää rekkojen fyysisiä ominaisuuksia, kuten kokoa, muotoa ja painoa. On kuitenkin vielä avoin kysymys, millä tavalla automaattiset rekat tulisivat eroamaan ihmiskuljettajien ajamista rekoista, joten tutkimuskirjallisuus koskee pääsääntöisesti rekkojen ja suojaamattomien tienkäyttäjien vuorovaikutusta yleensä (Fabricius ym. 2022).

Tunnistettaessa erilaisia kommunikaatiomuotoja rekkojen ja suojaamattomien tienkäyttäjien välillä on havaittu, että niistä suurin osa perustuu yllä mainittuun implisiittiseen informaatioon (esimerkiksi rekka ohittamassa pyöräilijää tai etuajo-oikeus tienristeyksessä), jopa enemmän kuin henkilöautojen tapauksessa. Tämä antaisi ymmärtää, että erilaiset ulkoiset käyttöliittymät tai muunlainen merkinanto automaattiselta ajoneuvolta suojaamattomalle tienkäyttäjälle eivät ole välttämättömiä myöskään automaattisten rekkojen tapauksessa. Ei ole kuitenkaan poissuljettua, että tulevaisuudessa kehittyneemmät merkinantojärjestelmät voisivat tarjota tukea automaattisten rekkojen ja muiden tienkäyttäjien väliseen vuorovaikutukseen.

3.5.6 Yhteenveto

Liikennesuoritteiden ja kulkutapajakautuksen vaikutusalueella tieliikenteen automaattirekat voivat laskea kuljetuskustannuksia ja tätä kautta siirtää meri- ja rai-dekuljetuksia kumipyörille. Dynaamisia vaikutuksia kuljetusten kysynnälle ei ole vielä mallinnettu, mutta alhaisemmat kuljetuskustannukset todennäköisesti lisäävät myös kysyntää.

Liikennevirran kannalta vaikutukset riippuvat siitä, kenen näkökulmasta niitä tarkastellaan, sekä letka-ajon toimintaperiaatteista, kuten siitä, antavatko ne tietä moottoritielelle liittyville ajoneuvoille vai eivät. Pääsuunnan osalta letka-ajo voi kasvattaa välityskykyä ja keskinopeuksia, mutta rampilta liittyvien ajoneuvojen viivytykset voivat kasvaa, jos sopivaa aikaväliä moottoritielelle liittymiselle ei löydy.

Ympäristövaikutusten osalta jakelurobotit voivat olla polttomoottorilla varustettuja jakeluautoja tai sähköisiä jakeluautoja päästöystävällisempiä etenkin, kun kysynnän tiheys on suuri ja jakelun välimatkat eivät ole kovin suuria.

Letka-ajon keskimääräiset polttoaine- ja CO₂-päästösäästöt olivat noin 4–12 % erilaisilla etäisyyksillä rekkojen välissä ja eripituisissa letkoissa. Yksi tutkimus huomioi rekkojen päästöjen lisäksi tieverkon suuremman kunnossapitotarpeen

aiheuttamat päästöt, jolloin letka-ajon nettopäästövähennykset olivat 12 %:n sijasta 5 %.

Automaattisten logististen ratkaisujen **liikenneturvallisuusvaikutusten** yhteenvedona voidaan todeta, että tutkimusten mukaan automaattinen letka-ajo moottoriteillä voi tuoda mukanaan sekä etuja että haasteita liikenneturvallisuudelle. Sekaliikenneympäristössä, jossa on sekä tavanomaisia ajoneuvoja että automattisia letka-ajoneuvoja, onnettomuuksien riski voi kasvaa. Esimerkiksi liittymäalueilla rekkaletkojen penetraatioasteen kasvaessa voi ilmetä liikenneturvallisuushaasteita (Wang ym. 2019, Lee ym. 2021b). Myös letka-ajon ominaisuudet, kuten ajoneuvojen välinen etäisyys ja letkan nopeus, voivat vaikuttaa ihmiskuljettajien turvallisuuteen ja/tai kokemaan henkiseen kuormitukseen (Chen ym. 2022, Yang ym. 2023).

4 Tulosten tarkastelu ja arviointi tieliikenteen automaation vaikutuksista Pohjoismaissa

Tässä työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus tutkimuksista, joissa on tarkasteltu tieliikenteen automaation vaikutusta liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan, liikennevirtaan, ympäristöön, liikenneturvallisuuteen tai tienkäyttäjien väliseen vuorovaikutukseen. Tieliikenteen automaation vaikutusta tarkasteltiin erikseen yksityisomisteisten henkilöautojen, joukkoliikenteen, robottitaksien ja logististen ratkaisujen osalta. Kirjallisuuskatsauksen tulokset on esitetty luvussa 3. Tässä luvussa esitetään kirjallisuuskatsauksen yhteenveto ja arvioidaan tutkimustulosten sovellettavuutta pohjoismaisiin olosuhteisiin.

Yhteenvetona voi todeta, että tieliikenteen automaation mahdollisista vaikutuksista löytyy runsaasti tutkimusta. Kuitenkaan tuloksia ei voi suoraan tulkita automaation todennäköisiksi vaikutuksiksi todellisessa liikenteessä. Tämä johtuu siitä, että tutkimuksissa käytettyjen tutkimusmenetelmien valikoima on hyvin rajoitettu, sillä korkean tason automaation ajoneuvoja on liikenteessä vasta vähän ja ne toimivat rajatuilla alueilla. Automaation vaikutuksia ei ole yleensä suoraan mitattu, vaan niitä on arvioitu yksinkertaistusten ja oletusten kautta hyödyntämällä esimerkiksi virtuaalisia ympäristöjä ja kyselyitä.

Arvioitaessa tutkimustuloksia pohjoismaisten olosuhteiden valossa on erityisesti haastavan kelin ja talviolosuhteiden huomioiminen tärkeää. Suomessa 45 % maanteiden suoritteesta tehdään talvipuoliskon (marras-maaliskuu) aikana (Peltola 2015). Kuitenkin suurin osa automaation kehitystä koskevasta tutkimuksesta on tehty ideaaleissa ja yksinkertaistetuissa olosuhteissa. Tällöin on jätetty huomiotta esimerkiksi keliolosuhteet ja liikenteessä olevien ajoneuvojen moninaisuus. Ainoat pohjoismaisiin olosuhteisiin löydetty tutkimukset liittyivät kohdeonnettomuuksien tunnistamiseen. Muissa tutkimuksissa ei ole huomioitu pohjoismailla yleisiä talvisia olosuhteita. Toistaiseksi ei siis ole tarkempaa tietoa siitä, miten automaatiojärjestelmät toimisivat lumisilla ja liukkailla teillä tai mitkä olisivat niiden vaikutukset eri vaikutusalueilla eri olosuhteissa. Ainakin automaation alkuvuosina on todennäköistä, että huonot keliolosuhteet eivät kuulu automaattisten henkilöautojen toimintaympäristöön. Pienillä nopeuksilla erillisillä väylillä kulkevat pienbussit ja jakelurobotit saattavat toimia haastavammassakin olosuhteissa, mutta vaativat parempaa väylien talvikunnossapitoa kuin ihmiskuljettajat. Toistaiseksi tästä ei ole juurikaan tutkimusta.

Automaation vaikutuksia koskevan tutkimusten tulosten yleistämisessä todelliseen liikenteeseen, sekä erityisesti pohjoismaisiin olosuhteisiin, täytyy siis olla varovainen. Seuraavaksi tarkastellaan kirjallisuuskatsauksen tuloksia erikseen jokaiselle vaikutusalueelle ja arvioidaan niiden soveltuvuutta pohjoismaisiin olosuhteisiin. Jokaisen alaluvun lopussa on esitetty toivottuja ja epätoivottuja vaikutuksia sekä keinoja edistää tai välttää niiden toteutuminen.

4.1 Liikennesuorite ja kulkutapajakauma

Liikenteen automatisoituminen voi vaikuttaa liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan monin tavoin. Automaation vaikutukset voidaan ymmärtää toisaalta sen kautta, miten automaatio vaikuttaa eri kulkutapojen koettuihin kustannuksiin, ja toisaalta sen, millaisia kulkutapoja automaatio mahdollistaa.

Henkilöautossa automaatio parhaimmillaan vapauttaa kuljettajan ajotehtävästä. Tämän takia ajoaika on mahdollista käyttää muulla tavalla eikä ajaminen kuormita. Seurauksena koettu aikakustannus laskee. Koettujen aikakustannusten väheneminen tekee automaattisella henkilöautolla kulkemisesta houkuttelevampaa. Seurauksena on, että ajallisesti pidemmät matkat koetaan hyväksyttävämpinä henkilöautolla, mikä laajentaa sitä kohteiden ja aktiviteettien kirjoa, mihin henkilöautolla ollaan valmiita kulkemaan. Tämän on mallinnettu lisäävän automaattisella henkilöautolla tehtyjen matkojen määrää ja pituutta sekä henkilöauton kulkutapaosuutta. Näiden muutosten seurauksena henkilöautojen liikennesuorite todennäköisesti kasvaa kokonaisuudessaan ja joukkoliikenteestä siirrytään henkilöauton käyttöön. Koettujen aikakustannusten vähenemisen määrä ja automaattisten henkilöautojen osuus kaikista autoista vaikuttavat olennaisesti vaikutusten suuruuteen. Automaattisten SAE-tason 4 henkilöautojen vasta yleistyessä (noin 1/10 henkilöautoista automaattisia) vaikutukset henkilöautojen tai joukkoliikenteen ajoneuvokilometreihin lasketaan todennäköisesti vielä muutamissa prosentteissa. Kun automaattisten autojen osuus kasvaa hieman suuremmaksi, voidaan puhua jo kymmenien prosenttien muutoksista ajoneuvokilometreihin. Automaattiset henkilöautot eivät kuitenkaan muuta sitä tosiseikkaa, että henkilöautoliikenteen lisääntyminen voi lisätä ruuhkaisuutta ja ruuhkautuminen kasvattaa matka-aikoja. Tämä voi toimia rajoitteena henkilöautoliikenteen kasvulle. Automaattiset henkilöautot voivat jossain määrin tehostaa liikennevirtaa. Aikakustannusten alenemisen luoma kysynnän kasvu voi kuitenkin mitätöidä liikennevirran tehostumishyödyt nopeasti.

Robottitaksit voivat kilpailla henkilöautojen ja joukkoliikenteen kanssa kulkutapaosuudesta. Toisaalta robottitaksit voivat myös mahdollistaa joukkoliikenteeseen tukeutuvat matkaketjut. Vaikutusten suuruuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten tarjolla olevien robottitaksien määrä ja se, ovatko kyydit yksityisiä vai jaetaanko robottitaksi muiden asiakkaiden kanssa. Suurempi määrä robottitakseja tarjoaa paremman palvelutason ja lisää niiden käyttöä. Kyytien mahdollinen jakaminen tarkoittaa sitä, että robottitaksi ei mene asiakkaan näkökulmasta suorinta reittiä, jos robottitaksi noutaa ja vie muita asiakkaita. Tämä tarkoittaa pidempiä matka-aikoja, mikä vähentää robottitaksien kulkutapaosuutta. Robottitaksit ajavat tyhjiä kilometrejä (ilman matkustajia) noutaessaan tai odottaessaan asiakkaita, minkä takia henkilöautojen ja robottitaksien yhteenlasketut ajoneuvokilometrit todennäköisesti pikemminkin kasvavat kuin vähenevät. Mikäli robottitaksit tuodaan henkilöautojen ja joukkoliikenteen rinnalle eikä kyytejä jaeta, ajoneuvokilometrit voivat kasvaa 10 % tai enemmän. Ajoneuvokilometrien kasvu voi lisätä ruuhkaisuutta ja tätä kautta matka-aikoja.

Robottitaksien käyttöön vaikuttaa myös palveluista maksamisen malli. Robottitaksipalvelut saattavat laskuttaa kuljettujen kilometrien tai matka-ajan perusteella, mikä voi kannustaa harkitsemaan liikkumista enemmän kuin esimerkiksi yksityistä henkilöautoa käytettäessä.

Joukkoliikenteen ja tavaraliikenteen automaatio voi tehdä palvelujen operoinnista edullisempaa. Joukkoliikenteessä tämä helpottaa sellaisen palvelutason ylläpitämistä, joka voi tarjota vartenotettavan vaihtoehdon vähemmän tilatehokkaille kulkutavoille (henkilöauto tai robottitaksi) tai tuoda entistä laajempia alueita joukkoliikenteen pariin. Tavaraliikenteessä edullisemmat kuljetuskustannukset kumipyöräliikenteessä houkuttelevat siirtämään kuljetuksia raide- ja merikuljetuksista

maanteille. Näin edullisemmat kuljetuskustannukset voivat luoda uutta kysyntää maantiekuljetuksille.

Taulukossa 14 esitetään liikennesuoritteiden ja kulkutapajakauman osalta tunnistetut toivotut vaikutukset ja esimerkkejä keinoista niiden edistämiseksi sekä epätoivotut vaikutukset ja esimerkkejä keinoista niiden rajoittamiseksi tai välttämiseksi.

Taulukko 14. Yhteenveto automaation toivotuista ja epätoivotuista vaikutuksista liikennesuoritteeseen ja kulkutapajakaumaan sekä esimerkkejä mahdollisista vaikuttamiskeinoista asiantuntijatyöpajaan ja työssä käytettyyn kirjallisuuteen perustuen.

Tieliikenteen automaation toivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja vahvistaa toivottuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Kulkutapasiirtymä henkilöautosta joukkoliikenteeseen • Uusien käyttäjäryhmien liikkumisen helpottuminen • Ajoneuvojen käyttöasteen kasvu • Sama henkilökilometrisuorite vähemmällä ajoneuvokilometreillä • Joukkoliikenteen ja tavarakuljetusten edullisempi ja tehokkaampi operointi 	<ul style="list-style-type: none"> • Maankäytön ja liikennejärjestelmän suunnittelu toivotun kulkutapasiirtymän edistämiseksi • Multimodaalisten matkaketjujen helpottaminen (esimerkiksi automaattisten liikennepalveluiden kytkeminen osaksi joukkoliikennettä sekä liityntäpysäköinnin ja pyörän mukaanottomahdollisuuksien kehittäminen) • Kestävien kulkutapojen teiden ja katujen kunnossapidon priorisointi • Jaettujen kyytien kannustimet, kuten edullisempi verokehitys • Automaattisten liikennepalveluiden kytkeminen osaksi joukkoliikenteen matkaketjuja
Tieliikenteen automaation epätoivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja rajoittaa epätoivottuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Henkilöauton käyttö uusilla ja nykyistä pidemmillä matkoilla, henkilöautosuoritteiden kasvu • Robottitaksipalveluista johtuva ajoneuvokilometrien kasvu • Joukkoliikenteen, kävelyn ja pyöräilyn kulkutapaosuuksien lasku • Joukkoliikenteen palvelutason heikkeneminen lipputulosten vähentyessä, kun aiemmat käyttäjät siirtyvät automaattisten henkilöautojen ja robottitaksien kyytiin • Vaikutusten epätasa-arvoinen kohdistuminen, mikäli kaikilla alueilla ja ihmisryhmillä ei ole yhtäläistä mahdollisuutta tieliikenteen automaation käyttöön • Palveluiden keskittyminen isompiin kaupunkikeskuksiin ja sitä myöten alueellisen palvelutarjonnan heikkeneminen • Tavaraliikenteen siirtyminen raide- ja merikuljetuksista kumipyörille 	<ul style="list-style-type: none"> • Kestävien kulkutapojen priorisointi suunnittelussa, esimerkiksi liikenteen rauhoittaminen ja joukkoliikenteen ja aktiivisten kulkutapojen kilpailukykyyn varmistaminen • Kannustimet ja rajoitukset automatisoidun henkilöautoliikenteen suoritteiden kasvun hillitsemiseen. Esimerkiksi kustannusten määräytyminen käytön mukaan toimii yksilöille kannustimena välttää lisäämästä suoritteesta henkilöautojen automaation johdosta. • Joukkoliikenteen edistämistoimet • Kävelyn ja pyöräilyn edistämistoimet • Liikkumisen kustannusten tasapuolinen hallinta • Joukkoliikenteen ja jaettujen kyytien riittävän palvelutason takaaminen • Huolehtiminen siitä, että liikkumisessa välttämättömiä ovat vain sellaiset laitteet, jotka ovat kaikilla käytössä (vrt. älypuhelin, luottokortti) • Robottitaksien tyhjien kilometrien ja matkojen rajoittamiskeinot • Kannustimet raide- ja merikuljetusten käyttöön

4.2 Liikennevirta

Yleisesti ottaen tutkimuksissa nähdään, että automaatio voi parantaa liikennejärjestelmän sujuvuutta. Kuitenkin esimerkiksi automaattisten henkilöautojen vaikutuksia matka-aikoihin on tutkittu enimmäkseen tietyissä rajoitetuissa

ympäristöissä, jotka eivät välttämättä yleisty laajemmin esimerkiksi pohjoismaiden tai Euroopan tasolla. Vaikutuksia liikennevirtaan ja ympäristöön on tutkittu pääosin moottoriteillä suurilla liikennemäärillä. Moottoritiet eivät kuitenkaan todellisuudessa ole usein ainakaan pohjoismaissa ruuhkaisia ja niiden liikennemäärät ovat suhteellisen pieniä. Lisäksi pohjoismaissa moottoritieverkon osuus koko tieverkosta on pieni. Täten pelkästään moottoriteillä toimivan automaation tuomat mahdolliset hyödyt jäävät oletettavasti vähäisiksi koko liikennejärjestelmää ajatellen. Kuljetusten kannalta erityisesti kaksikaistainen maantieverkko on pohjoismaissa tärkeä ja siksi vaikuttavuuden kannalta olisi tärkeää kehittää automaattijamamista kattamaan myös tällainen toimintaympäristö.

Automaattisten henkilöautojen vaikutuksia liikennevirtaan on tutkittu pääosin liikennesimuloinneilla. Simuloidut tilanteet ovat olleet rajoitettuja tarkasteltujen tietyyppien ja liikennemäärien suhteen, ja simuloinnilla on tutkittu eniten ruuhkaisia olosuhteita moottoriteillä, olettaen hyvät sää- ja keliolosuhteet. Liikennevirtaa on usein yksinkertaistettu koostumaan vain henkilöautoista. Näin ollen tulokset edustavat teoreettista ideaalitulannetta, eivätkä välttämättä kuvaa todennäköisiä vaikutuksia oikealla tieverkolla. Lisäksi tutkimuksissa on käytetty hyvin erilaisia oletuksia automaattiautojen kyvyistä, eikä oletuksia ole aina kerrottu, mikä tekee tulosten hyödyntämisen vaikeaksi (Aittoniemi 2022, Yu ym. 2021). Tulokset sopivat vain rajoitetusti Pohjoismaihin, sillä korkeat liikennemäärät moottoriteillä muodostavat vain pienen osan kokonaissuoritteesta. Pienillä liikennemäärillä suurin vaikutus lienee mahdollinen matka-aikojen muutos tavoitenopeuksien rajoittuessa nopeusrajoitukseen. Muiden käyttötapausten vaikutuksista liikennevirtaan ja liikenteen sujuvuuteen tiedetään toistaiseksi vain vähän. Suurin vaikutus liikenteen sujuvuuteen tulee ajoneuvosuoritteiden muutosten kautta. Liikenteenhallintakeinot, kuten rekkojen automaattisen letka-ajon letkan pituuden rajoittaminen, saattavat olla tarpeen haittojen välttämiseksi.

Henkilöautojen automaatio saattaa pidentää keskimääräisiä matka-aikoja tilanteissa, jossa kaikki ajoneuvot eivät ole automatisoituja. Väliytyskyvyn osalta simulointitutkimuksen tulokset riippuvat lähinnä automaattiautojen oletetusta tavoiteaikavälistä: jos tämä on pienempi kuin ihmiskuljettajien keskimäärin, väliytyskyky kasvaa, muussa tapauksessa se heikkenee.

Tulokset yksittäisessä skenaariossa, kuten tietyllä moottoritietyyppillä, tietyllä nopeusrajoituksella ja liikennemäärällä, eivät kerro vaikutuksista isommassa kuvassa, esimerkiksi Pohjoismaiden tai Euroopan tasolla. Simulointituloksia ei näin ollen välttämättä voida tulkita automaation todennäköisiksi vaikutuksiksi todellisilla teillä.

Automaatiolla nähdään olevan mahdollisuuksia liikennejärjestelmän sujuvuuden parantamisessa, mutta ei millä tahansa toimintaperiaatteella. Hyötyjen edellytykset ovat melko tiukat ja vaativat suuria muutoksia matkustuskäyttäytymisessä (Calvert ym. 2017, Mattas ym. 2018, Do ym. 2019, Milanés ja Shladover 2014). Tutkimusten mukaan hyötyjä voidaan saavuttaa, jos sekä automaatio että ajoneuvojen välinen kommunikaatio ovat laajasti käytössä, automaattiautojen ajotapa ei heikennä liikennevirran stabiliteettia ja automaattiautojen kyydit ovat jätettyjä, jotta suorite ei kasva.

Simulointiin perustuvat vaikutustulokset ovat korkeintaan yhtä luotettavia kuin niiden perustana oleva malli. Nykyiset kuljettaja- ja ajoneuvonseurantamallit eivät välttämättä sovellu mallintamaan eroja ihmisten kuljettamien ja

automaattisten autojen välillä (Yu ym. 2021). Perinteiset liikenteen mikrosimulointimallit on tehty kuvaamaan liikennevirtaa kokonaisuutena, ei niinkään kuvaamaan yksittäisten ajoneuvojen liikkeitä, mutta juuri tätä ominaisuutta tarvitaan erottelamaan ihmiskuljettajien ja automaattiautojen vaikutuksia. Lisäksi simulointimallit olettavat ideaaleja olosuhteita, eikä esimerkiksi liukkaalla kelillä ajamiseen ole sopivia malleja. Todellisuudesta poiketen simuloitujen verkot ovat yleensä tasaisia, mutta todellisuudessa pienilläkin tien kaltevuuksilla on merkitystä sujuvuuteen ja päästöihin. Todellisessa liikenneympäristössä on lisäksi monella muullakin tavalla ideaaleista olosuhteista poikkeavia olosuhteita, kuten erilaisia ajoneuvotyyppisiä ja kuljettajia erilaisine mieltymyksineen ja kykyineen, vaihtelevia sää- ja keliolosuhteita, tuulen mukana kulkevia esineitä, tiellä liikkuvia eläimiä ym. Pienikin häiriötekijä voi johtaa siihen, ettei automaattiauto voi ajaa tehokkaimmillaan. Oikeissa liikenneolosuhteissa vaikutukset ovat siis todennäköisesti pienempiä kuin simuloinneissa (Zhang ym. 2023).

Vaikka useat simulointitutkimukset ovat olettaneet automaattiautoille optimistisen pienen tavoiteaikavälin, jopa 0,5 s, tämän toteutuminen on epävarmaa. Tutkijoiden mukaan erittäin pieni aikaväli vaatii ajoneuvojen kommunikointia keskenään, minkä laajamittainen toteutuminen ja käyttöönotto on epävarmaa. Lisäksi Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission (UNECE) laatimat säädökset suosittavat automaattiautojen käyttävän kunkin maan lakisääteisiä aikavälejä, jotka voivat olla pidempiä kuin ihmiskuljettajien pitämät aikavälit suurilla liikennemäärillä.

Tavoiteaikavälien lisäksi vaikutusta liikennevirtaan on ajotavan muilla tekijöillä, kuten kiihtyvyyksillä ja kaistanvaihdolla. Erityisesti kaupunkiliikenteessä on merkitystä sillä, kuinka nopeasti ajoneuvot kiihdyttävät pysähdyksistä esimerkiksi liikennevalojen vaihtuessa vihreiksi. Wang ym. (2023) analysoivat Waymon avointa dataa vuodelta 2019 ja päättelivät, että Waymon robotaksien ajotapa on monella tapaa ihmiskuljettajia varovaisempi. Robotitaksit mm. jarruttivat aikaisemmin kuin ihmiskuljettajat lähestyessään punaisia liikennevaloja ja kiihdyttivät hitaammin valojen vaihduttua vihreiksi. Lisäksi robotitaksien reaktioaika oli ihmiskuljettajia pidempi. Vaikka automaattiajofunktioiden voidaan olettaa kehittyvän ajan myötä varmemmiksi, ei ole tietoa missä määrin voidaan saavuttaa ajotapa, joka on samaan aikaan mahdollisimman turvallinen, tehokas ja ympäristöystävällinen.

Automaattiajofunktioiden vaikutus liikennevirran stabiliteettiin on erityinen kysymys, johon ei vielä tiedetä vastausta. Simulointimallit olettavat automaattiautojen ajotavan olevan stabiili, jolloin edellä ajavan ajoneuvon pienet nopeuden muutokset eivät voimistu seuraavassa ajoneuvossa. On kuitenkin viitteitä siihen, etteivät nykyiset alhaisemman tason automaation järjestelmät, kuten mukautuva nopeudensäädin, välttämättä käyttäydy stabiilisti, mikä voi johtaa liikenteen ruuhkautumiseen suuremmilla penetraatioasteilla ja liikennemäärillä. Kenttäkokeet kaupallisilla automatisoiduilla ajoneuvoilla (Makridis ym. 2020b) viittaavatkin siihen, että ainakin nykytilanteessa kaupalliset toimijat painottavat mukavuutta ja turvallisuutta sujuvan liikennevirran sijaan enemmän kuin simulointimalleissa oletetaan. Toistaiseksi liikennevirran tehokkuus ei ole ollut osa automaatiojärjestelmiä koskevia lakisääteisiä vaatimuksia (Ciuffo ym. 2021). Suurin osa kenttätutkimuksista ja myös simulointitutkimuksista perustuu mukautuvaan vakionopeudensäätimeen (ACC). Vielä ei ole tiedossa, millä tavoin kehittyneemmät automaatiojärjestelmät toimivat ajoneuvonseurantatilanteissa.

Taulukossa 15 esitetään liikennevirran osalta tunnistetut toivotut vaikutukset ja esimerkkejä keinoista niiden edistämiseen sekä epätoivotut vaikutukset ja esimerkkejä keinoista niiden rajoittamisen.

Taulukko 15. Yhteenveto automaation toivotuista ja epätoivotuista vaikutuksista liikennevirtaan sekä esimerkkejä mahdollisista vaikuttamiskeinoista asiantuntijatyöpajaan ja työssä käytettyyn kirjallisuuteen perustuen.

Tieliikenteen automaation toivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja vahvistaa toivotuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Tasaaisempi liikennevirta (tavoitenopeudet) • Ruuhkahuippujen tasaantuminen • Liikennemäärät voivat vähentyä, jos ajoneuvojen käyttöasteet kasvavat eikä tapahdu kulkutapasiirtymää pienemmän kuljetuskapasiteetin ajoneuvoihin 	<ul style="list-style-type: none"> • Lainsäädäntötyö automaattiautojen ajotapaatimuksista (esimerkiksi ajonopeus) • Kestävien kulkutapojen edistäminen (katso Taulukko 14)
Tieliikenteen automaation epätoivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja rajoittaa epätoivotuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Korkeammat liikennemäärät • Pidemmät aikavälit ja pienempi kiihtyvyys voivat johtaa ruuhkatilanteiden kasvuun • Matka-ajat voivat kasvaa, jos tiettyjä reittejä suositaan • Raskaan liikenteen letka-ajo saattaa vaikeuttaa moottoritielle liittymistä 	<ul style="list-style-type: none"> • Kannustimet ja rajoitukset automatisoidun henkilöautoliikenteen suoritteen kasvun hillitsemiseen • Lainsäädäntötyö automaattiautojen ajotapaatimuksista (esimerkiksi ajonopeus) • Letka-ajossa letkojen maksimipituuden rajoittaminen

4.3 Ympäristö

Henkilöautojen automaation päästövaikutuksiin pätee suurelta osin sama tarkastelu kuin liikennevirtaan, sillä tutkimusten päästövaikutukset johtuvat usein liikenteen sujuvuuden ja suoritteen muutoksista. Vaikutustulokset riippuvat pitkälti tutkimusten tekemiin oletuksiin suoritemuutoksista, eli siitä, missä määrin automaattiautojen tai robottitaksien oletetaan korvaavan nykyisin yleisiä yksityisomisteisia perinteisiä henkilöautoja. Lisäksi vaikutusta on sillä, minkälaisia oletuksia tehdään automaattiautokannan kokoonpanosta ja käyttövoimasta (kuten sähköautojen osuus ja sähköntuotannon hiilijalanjälki).

Kenttäkokeiden tulokset kaupallisilla ACC-järjestelmillä varustetuista ajoneuvoista viittaavat siihen, että vakaisissa olosuhteissa ajettaessa automatisoitujen ajoneuvojen polttoaineenkulutus ja täten myös CO₂-päästöt voivat olla ihmiskuljettajien autojen vastaavia pienempiä, mutta pientenkin nopeusmuutosten kohdalla vaikutukset voivat olla päinvastaiset. Yksittäisen ajoneuvon kenttäkokeissa ACC-ajoneuvoilla varustettujen ajoneuvojen päästöt olivat 2–7 % pienemmät ACC:n ollessa päällä verrattuna siihen, kun ihminen ohjasi autoa. On kuitenkin huomattava, että kaistanvaihdot ja vaikutukset muihin ajoneuvoihin eivät kuuluneet näiden tutkimusten piiriin, eikä yleisiä johtopäätöksiä tästä syystä voida tehdä (Aittoniemi 2022). Kenttätutkimuksissa ei myöskään ole huomioitu automaattiajoneuvojen erilaisen ajotavan ja suoritteen mahdollisia vaikutuksia muiden ajoneuvojen päästöihin.

Yhteenvetona voi todeta, että automaattiautojen ajotapa voi olla ihmiskuljettajia tehokkaampi vakaisissa liikenneolosuhteissa (*steady-state*), kun nopeusvaihteluita on vähän ja automaattiautojen oletetaan noudattavan nopeusrajoituksia. Tilanteissa ja ympäristöissä, jotka ovat todellisessa liikenteessä yleisiä, kuten liittymät,

ruuhkatilanteet ja tien pitkittäiskaltevuus, tulokset ovat vähemmän selkeitä ja riippuvat pitkälti automaatiojärjestelmän ominaisuuksista.

Robottitaksien päästövaikutukset riippuvat käyttöönoton laajuudesta ja siitä, korvaavatko robottitaksit yksityisomisteisia henkilöautoja, joukkoliikennettä vai aktiivisia kulkutapoja. Jakelurobotit voivat vähentää kuljetusten päästöjä viimeisellä kilometreillä ainakin tiheästi asutuilla alueilla ja osana tehokkaita kuljetusketjuja. Rekkojen letka-ajo voi vähentää raskaiden ajoneuvojen päästöjä, mutta lisätutkimusta tarvitaan määrittämään, mitkä vaikutukset ovat liikennevirtaan kokonaisuudessaan. Ajoneuvosuoritteiden muutoksilla on suuri merkitys myös automaation päästövaikutuksiin.

Automaattiautojen ihmiskuljettajiin verrattuna erilaisen ajotavan lisäksi energiankäyttöön ja siten päästöihin vaikuttaa myös automaation vaatimien sensorien ja algoritmien käyttämä energia. Tästä tiedetään toistaiseksi vain vähän, ja arviot vaikutuksen suuruudesta vaihtelevat suuresti.

Taulukossa 16 esitetään ympäristön osalta tunnistetut toivotut vaikutukset ja esimerkkejä keinoista niiden edistämiseen sekä epätoivotut vaikutukset ja esimerkkejä keinoista niiden rajoittamiseen.

Taulukko 16. Yhteenveto automaationtoivotuista ja epätoivotuista ympäristövaikutuksista sekä esimerkkejä mahdollisista vaikuttamiskeinoista asiantuntijatyöpajaan ja työssä käytettyyn kirjallisuuteen perustuen.

Tieliikenteen automaation toivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja vahvistaa toivotuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Energiatehokkaampi ajotapa, alemmat nopeudet • Reittimuutokset, jos ne lyhentävät matkaa tai johtavat vähäpäästöisempään ajotapaan • Sähköiset jakelurobotit korvaavat polttomoottorijakeluautoja • Ajoneuvokannan sähköistymisen nopeampi eteneminen • Joukkoliikenteen kulkutapaosuuden kasvu • Pienempi ilmanvastus letka-ajossa 	<ul style="list-style-type: none"> • Lainsäädäntötyö automaattiautojen ajotapa-vaatimuksista (esimerkiksi ajonopeus) • Tietoisuuden lisääminen eri kulkutapojen päästöistä • Sähköisten jakelurobottien toimintamahdollisuuksien tukeminen • Kannustin kyytien jakamiseen • Sähköisen liikenteen palveluiden edellytysten varmistaminen esimerkiksi riittävällä latausverkolla. • Kestävien kulkutapojen edistäminen (katso Taulukko 14)
Tieliikenteen automaation epätoivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja rajoittaa epätoivotuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Henkilöautosuoritteiden kasvu • Reittimuutokset, jos ne pidentävät matkaa tai johtavat korkeapäästöisempään ajotapaan 	<ul style="list-style-type: none"> • Ympäristöystävällisten kulkutapojen palvelutason turvaaminen ja palvelujen kehittäminen • Tietoisuuden lisääminen eri kulkutapojen päästöistä • Kannustimet ja rajoitukset automatisoidun henkilöautoliikenteen suoritteiden kasvun hillitsemiseen

4.4 Liikenneturvallisuus

Liikenteessä kuolleiden ja loukkaantuneiden määrä riippuu kolmesta tekijästä: onnettomuusriskistä, altistuksesta ja vakavuudesta (Nilsson 2004). Löydetyissä tutkimuksissa ei yleensä huomioitu automaation vaikutuksia näihin

liikenneturvallisuuden kaikkiin kolmeen ulottuvuuteen. Pääosa tutkimustuloksista koskee arvioinnin kohteena olevan kulkutavan tai sen käyttäjän onnettomuusris-kiä. Lisäksi suuri osa tutkimustuloksista koskien korkeamman tason automaation vaikutuksia liikenneturvallisuuteen perustuvat simulointeihin, jolloin ohjelmisto, käytetyt oletukset ja parametrit ajoneuvon käyttäytymisestä vaikuttavat tuloksiin. Simulointitutkimuksissa on yleensä käytetty yhdysvaltalaisista SSAM-ohjelmaa, joka tunnistaa konfliktitilanteet mikrosimulointiajoissa olevien ajoneuvojen liikera-tojen perusteella. Monet simulointityökalut, ja niissä toimivat ajoneuvomallit, on kehitetty tutkimaan liikennevirtaa eivätkä ne sovellu ainakaan suoraan turvalli-suuskriittisten tilanteiden tutkimiseen.

Tutkimustulosten mukaan automaation vaikutus riippuu käyttötapauksesta ja tut-kimuskohteesta. Esimerkiksi kun automaattisten henkilöautojen osuus oli 20–25 % liikennevirrasta, konfliktit vähenivät 12–47 % moottoritiejaksolla (Papa-doulis ym. 2019), 0–17 % yksittäisissä liittymissä (Morando ym. 2018) ja 0,8 % kokonaisella kaupunkialueella (Mourtakos ym. 2021). Vastaavasti konfliktit vähe-nivät 15 % kokonaisella kaupunkialueella, kun 20 % henkilöautoista korvattiin au-tomaattisilla pienbusseilla ja 20 % tavaraliikenteen ajoneuvoista ajoi automaatti-sesti (Mourtakos ym. 2021).

Tutkimustulokset viittaavat siihen, että rekkojen automaattinen letka-ajo mootto-riteillä voi vähentää peräänajojen määrää, mutta kuitenkin kaistanvaihtoihin liit-tyvä turvallisuus voi heiketä (esim Lee ym. 2021b). Letkat voivat tuoda haasteita tavanomaisten ajoneuvojen kuljettajille heidän liittyessään moottoriteille - erityi-sesti jos he ovat kokemattomia (Yang ym. 2023). Chenin ym. (2022) tutkimuksen mukaan lyhyet etäisyydet letkojen välillä ja letkojen suurempi nopeus lisäsivät ta-vanomaisten ajoneuvojen kuljettajien henkistä kuormittuneisuutta.

Robottitaksien onnettomuusris-kiä ja onnettomuuksien vakavuutta suhteessa ihmisen ajamiseen on mahdollista tutkia hyödyntämällä todellisesta liikenteestä saa-tua aineistoa, sillä Kaliforniassa sallitaan automaattiautojen testaaminen julkisilla teillä. Tulosten mukaan vaikuttaa siltä, että robottitakseilla on korkeampi onnetto-muusris-ki verrattuna ihmiskuljettajiin (esim Goodall 2021). Onnettomuuksien kes-kimääräinen vakavuus vaikuttaisi kuitenkin olevan pienempi auton ajaessa auto-maattisesti kuin ihmiskuljettajilla. Eri tutkimusten tulosten tulkinnessa on syytä huomioida onnettomuustilastojen erot. Kalifornian automaattiautojen onnetto-muustilastossa ei pitäisi olla puuttuvia tapauksia, koska valmistajat ovat velvolli-sia raportoimaan kaikki tapahtumat, joissa järjestelmä on kytketty pois päältä tai jossa auto on ollut osallisena onnettomuudessa. Sitä vastoin tutkimuksissa käyte-tyissä kansallisissa onnettomuustilastoissa on mukana ainoastaan kaikki poliisin tietoon tulleet onnettomuudet, eli lievimmät onnettomuudet eivät ole mukana. Tämä tarkoittaa, että robottitaksien turvallisuustilanne suhteessa ihmisen kuljet-tamiin ajoneuvoihin olisi todennäköisesti parempi, jos vertailussa olisi mahdollista huomioida kansallisen onnettomuustilaston aliraportointi, eli myös ne onnetto-muudet, jotka eivät tule poliisin tietoon.

Automaation vaikutus altistukseen on kuvattu Liikennesuorite ja kulkutapaja-kauma -kappaleissa (esim. 3.2.1). Turvallisuuden keskeisimmät mekanismit ovat muutokset kulkutavan ja reitin valintaan, eli siirtyvätkö ihmiset käyttämään tur-vallisempia vai turvattomampia kulkutapoja tai reittejä, ja liikkumisen määrään, eli lisääntykö vai väheneekö ihmisten altistus onnettomuuksille ajan tai matkan funktiona. Aikaisemman tutkimustiedon perusteella vaikuttaa siltä, että

automaattiset henkilöautot voisivat saada ihmiset siirtymään joukkoliikenteestä henkilöauton käyttöön. Tämä huonontaa liikenneturvallisuutta järjestelmätasolla, koska tällöin ihmiset siirtyvät korkeamman onnettomuusrisikin kulkutapojen käyttöön. Lisäksi automaattiset henkilöautot ja robottitaksit voivat johtaa siihen, että ihmiset tekevät uusia ja pidempiä matkoja, mikä lisää ihmisten altistusta onnettomuuksiin eli huonontaa liikenneturvallisuutta. Automaattiset henkilöautot voisivat saada ihmiset muuttamaan reittiä, jotta järjestelmän käyttö olisi mahdollista. Mikäli uusi reitti olisi turvallisempi – esimerkiksi vaihdetaan yksiajorataiselta alemman verkon maantieltä turvallisemmalle tielle, jossa ajosuunnat on eroteltu, liikenneturvallisuus paranee.

Henkilöautojen korkean tason automaation osalta löytyi tutkimuksia, joissa on huomioitu pohjoismaiset olosuhteet, mutta niissä tunnistettiin vain järjestelmien kohdeonnettomuudet, eikä arvioitu varsinaista liikenneturvallisuusvaikutusta. Kohdeonnettomuuksien osuus riippuu tutkimuksen kohteena olevasta automaattisesta ajojärjestelmästä. Esimerkiksi moottoriteiden automaattinen ajojärjestelmä, joka ei toimi kovassa vesisateessa, lumi- tai räntäsateessa, lumisella tai sohjoisella tiepinnalla, voisi Suomessa estää noin 3,1–3,3 % nykyisistä henkilövahinkoonnettomuuksista sekä kuolemista ja vakavista loukkaantumisista (Malin ym. 2023). Utraisen (2021) tutkimuksessa analysoitu automaattinen henkilöauto (ei toimi lumi- tai vesisateessa, lumisella tienpinnalla tai pimeässä) voisi estää 20–28 % kaikista jalankulkijoiden ja henkilöautojen välisistä kuolemaan johtaneista onnettomuuksista. Simulointitutkimuksissa sitä vastoin ei ole huomioitu pohjoismailla tavallisia lumisia ja jäisiä olosuhteita, vaan tulokset koskevat ideaaliolosuhteita. Talviset olosuhteet ovat muutenkin haasteelliset liikenneturvallisuudelle, koska erilaiset lumisateet ja liukkaat tienpinnat ovat ihmiskuljettajien näkökulmasta kaikista vaarallisimmat sää- ja keliolosuhteet (Malin ym. 2019). Talviset olosuhteet ovat myös tällä hetkellä pääosin ehdollisten automaattisten ajojärjestelmien suunnitellun toimintaympäristön ulkopuolella, mikä tarkoittaa, että kuljettajan on ajettava itse kaikista vaarallisimmissa olosuhteissa. On mahdollista, että tällaisessa tulevaisuuden tilanteessa ihmiskuljettajan kyky ajaa turvallisesti vaarallisissa olosuhteissa olisi vielä nykyistäkin heikompi ajokokemuksen puutteen takia. Automaattisten ajojärjestelmien liikenneturvallisuusvaikutusten tutkiminen talvisissa olosuhteissa olisi siten pohjoismaiden kannalta erityisen tärkeää.

Kuljettajan tukijärjestelmiä on ollut markkinoilla pitkään, ja ne ovat yleistyneet voimakkaasti viime vuosina Suomessa. Kuljettajien tukijärjestelmistä löytyy onnettomuustilastoihin (ei kuitenkaan suomalaisiin aineistoihin) perustuvia tutkimuksia. Wangin ym. (2020) meta-analyysissä tarkasteltiin yhdeksän eri järjestelmän vaikutusta niiden kohdeonnettomuuksiin huomioiden kaikki onnettomuudet, eli ei pelkästään henkilövahinkoon johtaneita (kts. luku 3.2.4). Tulosten mukaan kaikki tarkastellut järjestelmät vähensivät niiden kohdeonnettomuuksia. Esimerkiksi Wangin ym. (2020) meta-analyysin mukautuva ajonopeudensäädin vähensi peräänajo-onnettomuuksia 9,3 % (5 %...14 %), ajovakautusjärjestelmä suistumisonnettomuuksia ja yhteenajoja esteen kanssa 43,2 % (38 %...48 %) ja automaattinen hätäjarrutus jalankulkijoita varten jalankulkuonnettomuuksia 38,9 % (36 %...42 %). On kuitenkin hyvä huomioida, että ympäristö- ja keliolosuhteet vaikuttavat todennäköisesti tukijärjestelmien toimintaan (Masello ym. 2022), minkä vuoksi niiden toimintaa olisi tärkeää tutkia myös pohjoismaisilla aineistoilla.

Vaikka kuljettajien tukijärjestelmien lisääntyminen liikennevirrassa parantaa turvallisuutta, ei penetraatioasteen kasvun vaikutus turvallisuuteen ole kuitenkaan

välttämättä suoraviivainen. Tulokset viittaavat siihen, että ajoneuvojen välisiä konflikteja tarkastellessa penetraatioasteen kasvun myönteinen vaikutus kokonaisuusturvallisuuteen on merkittävämpi alhaisilla penetraatioasteilla (esim Sander ja Lubbe, 2018). Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että tietyssä liikennekonfliktitilanteessa voi riittää, että toisella ajoneuvolla on tietty avustava järjestelmä, jonka aktivoituminen voi välttää onnettomuuden tapahtumisen. Sen sijaan ajoneuvojen ja suojaamattomien tienkäyttäjien välisissä konflikteissa penetraatioasteen kasvulla vaikuttaisi odotetusti olevan suoraviivaisempi vaikutus turvallisuuteen (Ma ja Andréasson, 2005). Tämä tarkoittaa, että riippumatta siitä, kuinka yleisiä kuljettajien tukijärjestelmät ovat, niiden lisääminen parantaa suojaamattomien tienkäyttäjien turvallisuutta liikenteessä.

Taulukossa 17 esitetään liikenneturvallisuuden osalta tieliikenteen automaation toivottuja vaikutuksia ja esimerkkejä keinoista niiden edistämiseen. Lisäksi esitetään tieliikenteen automaation epätoivottuja vaikutuksia ja esimerkkejä keinoista niiden rajoittamisen. Onnettomuusriskin osalta on tärkeää myötävaikuttaa siihen, että automaattiset ajoneuvot ovat turvallisia, ja vähentää konfliktitilanteiden ja sitä kautta onnettomuuksien määrää. Euroopassa on vahva lainsäädäntötyö mm. automaattiajoneuvojen ajotavasta ja käyttöön otosta, mikä osaltaan pyrkii vaikuttamaan tähän. Kyseinen lainsäädäntötyö vaikuttaa myös onnettomuuksien vakavuuteen ajonopeuden kautta, koska nopeus on keskeinen tekijä onnettomuuksien vakavuudessa. Myös kuljettajan koulutukseen liittyvä lainsäädäntötyö voi olla tapa vaikuttaa automaattiajoneuvojen onnettomuusriskiin, etenkin ehdollisen automaation järjestelmien osalta. Altistuksen osalta keskeisintä on hillitä ihmisten altistusta onnettomuuksille ja tukea heidän siirtymistään turvallisempien kulkutapojen käyttöön (henkilöautosta joukkoliikenteeseen). Tätä voi tehdä eri tavoin, esimerkiksi suoritteeseen tai muuhun käyttöön perustuvalla hinnoittelulla tai rajoituksilla (Auvinen ym. 2020). Lisäksi on turvattava turvallisten kulkutapojen, eli joukkoliikenteen, palvelutasoa ja kehittää palveluita, reittiverkostoa ja hinnoittelua käyttäjien tarpeiden mukaan. Toinen altistukseen liittyvä keino on vaikuttaa siihen, että suositaan turvallisempia reittejä esimerkiksi käyttämällä teitä, joissa ajosuunnat on eroteltu, tai tukemalla kaupunkien katuverkon hierarkian, jossa liikenne ohjataan pääkaduille, käyttöön otossa tai edistämässä.

Taulukko 17. Yhteenveto automaation toivotuista ja epätoivotuista vaikutuksista liikenneturvallisuuteen sekä esimerkkejä mahdollisista vaikuttamiskeinoista asiantuntijatyöpajaan ja työssä käytettyyn kirjallisuuteen perustuen.

Tieliikenteen automaation toivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja vahvistaa toivotuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Onnettomuuksien ja konfliktien vähentyminen • Reittimuutokset alemman onnettomuusriskin teille, eli esimerkiksi moottoriteille • Ylinopeuksien vähentyminen • Siirtymä pienemmän riskin kulkutapoihin 	<ul style="list-style-type: none"> • Turvallisten kulkutapojen palvelutason turvaaminen ja palvelujen kehittäminen • Joukkoliikenteen reittiverkosto, palvelutaso ja hinnoittelu käyttäjien tarpeiden mukaan. • Multimodaalisten matkaketjujen helpottaminen (esimerkiksi automaattisten liikennepalveluiden kytkeminen osaksi joukkoliikennettä sekä liityntäpysäköinnin ja pyörän mukaanottomahdollisuuksien kehittäminen) • Lainsäädäntötyö automaattiautojen ajotapaatimuksista (esimerkiksi ajonopeus)
Tieliikenteen automaation epätoivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinoja rajoittaa epätoivotuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Uusien konflikti- ja onnettomuustilanteiden syntyminen • Siirtymä korkeamman onnettomuusriskin kulkutapoihin • Suoritteiden kasvu, uudet matkat • Siirtymä korkeamman onnettomuusriskin reiteille 	<ul style="list-style-type: none"> • Turvallisten kulkutapojen palvelutason turvaaminen ja palvelujen kehittäminen • Kannustimet ja rajoitukset automatisoidun henkilöautoliikenteen suoritteiden kasvun hillitsemiseen (esimerkiksi kustannusten määräytyminen käytön mukaan toimisi yksilöille kannustimena välttää lisäämästä suoritteita henkilöautojen automaation johdosta)

4.5 Tienkäyttäjien välinen vuorovaikutus

Tienkäyttäjien välisen vuorovaikutuksen tutkimuksessa on viime vuosina rakennettu teoreettisia viitekehyksiä olemassa olevan tutkimuksen pohjalta ja tarkasteltu vuorovaikutussuhteita eri tieteen- tai tutkimusalojen erityisintressien mukaisesti. Näihin kuuluvat mm. automaattisten autojen kehitystyö, kaupunkisuunnittelu ja kestävyystiede sekä käyttäytymistieteet.

Konkreettisimpina tutkimustuloksina voidaan pitää niin kutsutun implisiittisen informaation ensisijaisuuden ymmärtämistä ajoneuvojen liikkeen tulkinnassa, sekä erilaisten ulkoisten käyttöliittymien (eHMI) tehokkaaseen viestimiseen vaikuttavien tekijöiden tunnistamista. eHMI-laitteiden tarvetta on myös kyseenalaistettu. Tuloksia tulee kuitenkin pitää suuntaa antavina johtuen teknologian nopeasta kehityksestä. Lisäksi on epävarmaa, kuinka hyvin kontrolloiduissa kokeissa tai virtuaaliympäristöissä saadut tulokset yleistyvät monimutkaisiin tosielämän tilanteisiin.

Tutkimuskenttä on vaiheessa, jossa suosituista tutkimuskohteista on nousemassa alustavia teoreettisia käsityksiä ilman, että mikään niistä olisi selkeästi noussut määrittävään asemaan. Tällainen käsitteen- ja teorianmuodostus saattaa jatkossa tuottaa selkeämpiä tutkimuslinjoja, joissa nousee esiin yleisluontoisen tiedon lisäksi myös pohjoismaita erityisesti koskevia näkökulmia. Tällaisia voivat olla esimerkiksi säätilan tai näkyvyyden tuomat erityistarpeet automaattisten ajoneuvojen kommunikointitavoissa. Esimerkiksi ulkoisten käyttöliittymien säänkestävyys tai niitä peittävä lumi voivat aiheuttaa ongelmia jalankulkijoille, ja

suojaamattomien tienkäyttäjien tunnistaminen vaikeissa sääolosuhteissa voi puolestaan asettaa tiukempia vaatimuksia automaattisille ajoneuvoille. Lisäksi valti-oon ja viranomaisiin kohdistuvan luottamuksen merkitys saattaa korostua, mikäli yleisiä automaattisiin järjestelmiin kohdistuvia luottamusongelmia ilmenee. Tällaisia voivat olla esimerkiksi vihamielisyys robottitakseja tai kuljetusrobotteja kohtaan ja niiden kulun tahallinen estäminen. Tällä hetkellä yllä mainitun kaltaisia erityispiirteitä ei kuitenkaan ole käsitelty tutkimuskirjallisuudessa, vaan saatuja tuloksia voidaan pitää alustavasti yhtä pätevänä kaikkiin olosuhteisiin.

Taulukossa 18 on esitetty automaation vaikutuksia vuorovaikutukseen ja esimerkkejä keinoista tukea tai välttää niiden kehityskulkua. Keskeistä toimivassa vuorovaikutuksessa liikenteessä on, että tienkäyttäjät pysyvät ennakoimaan toistensa toimintaa. Jotta konfliktien ja onnettomuustilanteiden kasvu voidaan välttää, on tärkeää säädellä uudenlaisten ajoneuvojen käyttöönottoa liikenteessä ja samalla tukea aiheen tutkimusta ja kehitystyötä. Lisäksi on syytä muistaa, että jaetuissa tiloissa autoilijoiden oletetaan olevan tarkkaavaisempia kuin tavallisessa liikenteessä, joten myös automaattisten ajoneuvojen tulee noudattaa tätä oletusta, mikä asettaa paineita niiden kehitystyöhön.

Taulukko 18 Yhteenveto automaation toivotuista ja epätoivotuista vaikutuksista tienkäyttäjien väliseen vuorovaikutukseen sekä esimerkkejä mahdollisista vaikuttamiskeinoista asiantuntijatyöpajaan ja työssä käytettyyn kirjallisuuteen perustuen.

Tieliikenteen automaation toivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinot vahvistaa toivottuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Liikenne on sujuvaa, turvallista ja miellyttävää erityisesti kaupungeissa ja jaetuissa tiloissa kaikille tielläliikkuville • Kommunikaatio jalankulkijoiden ja automaattisten ajoneuvojen välillä toimii • Automaattiset ajoneuvot ovat ennakoitavia ja noudattavat liikennesääntöjä 	<ul style="list-style-type: none"> • Tulevien tutkimushankkeiden tukeminen • Sääntelyn ajaminen kansainvälisesti ja kotimaassa
Tieliikenteen automaation epätoivotut vaikutukset ja mekanismit	Vaikuttamiskeinot rajoittaa epätoivottuja vaikutuksia
<ul style="list-style-type: none"> • Konfliktien ja onnettomuustilanteiden lisääntyminen • Suojaamattomat tienkäyttäjät suhtautuvat epäillen automaattisiin ajoneuvoihin 	<ul style="list-style-type: none"> • Samat kuin toivottujen vaikutusten vaikutuskeinoissa.

4.6 Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet

Tässä työssä tuotettiin kirjallisuuskatsaus tieliikenteen automaation mahdollisista vaikutuksista. Lisäksi arvioitiin tutkimustulosten sovellettavuutta pohjoismaisiin olosuhteisiin. Yhteenvetona voi todeta, että vaikka aiheen tutkimuskirjallisuutta on runsaasti, on epäselvää yleistyvätkö tutkimustulokset todelliseen liikenneympäristöön ja erityisesti pohjoismaihin.

Kirjallisuuskatsaus osoittaa, että tieliikenteen automaation lisääntyminen voi edistää monia liikennejärjestelmälle asetettuja tavoitteita. Tavoitteiden mukainen kehitys ei kuitenkaan ole itsestäänselvyys. Myönteiset vaikutukset turvallisuuteen, sujuvuuteen ja ympäristöön toteutuvat vain, jos vaikutusalueiden tavoitteiden myönteiset taustaoletukset toteutuvat. Tämä ei todellisuuden monimutkaisuus huomioiden ole varmaa (Van Wynsberghe ja Guimarães Pereira 2021). Esimerkiksi automaation tuomat turvallisuushyödyt voidaan saavuttaa vain, jos ihmiset

eivät samaan aikaan tee useampia ja pidempiä matkoja tai siirry turvattomampien kulkutapojen käyttöön.

Automaation vaikutuksia tarkasteltaessa on hyvä huomata, että positiivinen vaikutus voidaan saada aikaan eri vaikutusalueilla erilaisten, jopa vastakkaisten, toimintojen kautta (Shi ja Li 2021). Esimerkiksi turvallisuuden kannalta pitkät tavoiteaikavälit ajoneuvojen välillä ovat toivottuja, kun taas liikenteen sujuvuuden kannalta pitkät tavoiteaikavälit voivat olla haitallisia vilkkaassa liikenteessä. Kaikkien liikennejärjestelmälle asetettujen tavoitteiden yhtäaikainen edistäminen on siis haastavaa myös tieliikenteen automaation edistämisen kautta.

Automaation toivotaan vähentävän nykyisen liikennejärjestelmän negatiivisia vaikutuksia, kuten onnettomuuksia, mutta odotukset ovat usein irrallisia automaation tosiasiallisista toteutustavoista (Olin ja Mladenović 2022). Useat tutkijat (Cohen ja Cavoli 2019, Ciuffo ym. 2021) ovat suositelleet, että päätöksentekijöiden tulisi ottaa aktiivinen rooli automaation käyttöönottamisessa, jotta yhteiskunnalliset vaikutukset olisivat mahdollisimman positiiviset. On esimerkiksi esitetty, että automaattiajamisen pilottihankkeet tulisi sovittaa paremmin yhteen kaupunkien liikennetavoitteiden kanssa (McAslan ym. 2021). Tämä vaatii luotettavaa tietoa siitä, miten teknologia voi edistää näitä tavoitteita.

Tutkimukset viittaavat siihen, että tieliikenteen automaatio voi parantaa liikenteen sujuvuutta ja turvallisuutta. Kuitenkin automaattisten ajoneuvojen yleistyminen voi johtaa uusien ja pidempien matkojen tekemiseen sekä siirtymään esimerkiksi joukkoliikenteestä yksityisautoiluun. Sekä liikenneturvallisuuden että ympäristönäkökulmien kannalta on tärkeää hillitä henkilöautoliikenteen suoritteiden kasvua sekä turvata joukkoliikenteen palvelutaso ja kannustaa aktiivisiin kulkutapoihin myös automaation yleistyessä. Olisi hyvä keskittyä automaation mahdollisuuksiin erityisesti joukkoliikenteen kehittämisessä. Tähän mennessä suurin osa tutkimuksesta on kuitenkin keskittynyt henkilöautojen automatisointiin. Myös viranomaisien julkaisut ovat keskittyneet henkilöautoihin (Olin ja Mladenović 2022). Olen-naista on myös huomioida erilaiset käyttäjät, jotta tieliikenteen automaation kehitys vastaisi erilaisten ryhmien tarpeisiin (kuten henkilöt, joilla on toimintarajoitteita tai matalampi sosioekonominen asema).

Työn pohjalta voi ehdottaa useita tärkeitä jatkotutkimusaiheita. Kuljettajaa avustavat järjestelmät ovat yleistyneet Pohjoismaissa. Tutkimusten mukaan järjestelmät parantavat liikenneturvallisuutta, mutta niiden toimintaan vaikuttavat esimerkiksi ympäristö ja keliolosuhteet. Kuljettajaa avustavat järjestelmät voivat myös vaikuttaa liikennevirtaan ja jopa henkilöautolla tehtyjen matkojen määrään, jos ne tekevät ajamisesta mukavampaa. Jotta näiden järjestelmien vaikutuksista nimenomaan pohjoismaisissa olosuhteissa voisi sanoa tarkemmin, myös meillä olisi tärkeää tutkia niiden vaikutusta liikenteeseen ja kuljettajien käyttäytymiseen.

Tärkeä jatkotutkimusaihe olisi myös selvittää millaisia vaikutuksia automaation yleistymisellä olisi kuljettajien ajotaidolle heidän ajaessaan harvemmin. Talviset olosuhteet ovat tällä hetkellä ehdollisten automaattisten ajojärjestelmien suunnitellun toimintaympäristön ulkopuolella ja tällöin kuljettajien tulisi itse ajaa kaikista vaarallisimmista olosuhteista. Tämä jatkotutkimus voisi siis hahmotella keinoja, joilla voidaan säilyttää ja parantaa ihmiskuljettajien ajotaitoja tulevaisuudessa, ottaen huomioon automaation kasvava rooli liikenteessä. Erityisen tärkeää olisi

selvittää, miten nämä muutokset vaikuttavat liikenneturvallisuuteen pohjoismaissa, joissa talviset olosuhteet ovat yleisiä.

Lisäksi moottoritien ehdollisella automaatiolla (SAE-taso 3) varusteltujen henkilöautojen vaikutuksia liikennevirtaan ja ympäristöön (Aittoniemi ym. 2023) olisi tärkeää simulointien lisäksi tutkia oikeilla kuljettajilla. Suomen kannalta olisi myös tärkeää selvittää automaation mahdollisuuksia kaksikaistaisilla maanteillä. Lisää tutkimustietoa tarvitaan myös automatisoitujen pienbussien ja tavara- ja jakeluliikenteen vaikutuksista.

Liikennesuoritteiden ja kulkutapajakauman muutoksilla automaation myötä on suuri vaikutus ainakin ympäristö-, sujuvuus- ja turvallisuusvaikutuksiin. On siis tärkeää, että näistä muutoksista on luotettavaa tietoa. Yleisemmin voi sanoa, että toivotunlaisen tulevaisuuden rakentamiseksi on tärkeää tuottaa lisää pohjoismaisiin olosuhteisiin keskittyvää tutkimustietoa tieliikenteen automaation vaikutuksista laajemmissa olosuhteissa ja useammassa käyttötapauksessa.

5 Executive summary

This study carried out an extensive literature review on the impacts of automation in road transport (ART) on five different impact areas: vehicle kilometres travelled and modal split, traffic flow, environment, traffic safety and interaction between road users. The impacts of ART were examined separately for privately owned passenger cars, public transport, robotaxis and logistic solutions. Furthermore, this study evaluated the applicability of the research results to Nordic conditions.

In summary, it can be stated that there is plenty of research on the potential impacts of ART. However, the results cannot be directly interpreted as the likely impacts of automation in real traffic. This is due to the fact that the range of research methods used in the studies is very limited, as there are only a few vehicles with a high level of automation in traffic today and they operate in limited areas. The impacts of automation have not usually been directly observed, but rather assessed through simplifications and assumptions by using, for example, virtual environments and surveys.

When evaluating research results from a Nordic perspective, it is especially important to consider the challenging weather and winter conditions. In Finland, 45% of vehicle kilometres accumulate during the winter months (November–March) (Peltola 2015). However, most of the research on the development of automation has been done under idealized and simplified conditions. In this case, for example, weather conditions and the variety of vehicles in traffic have been ignored. The only studies found for Nordic conditions were related to the identification of target accidents. In other studies, the winter conditions common to the Nordic countries have not been taken into account. So far, there is no more detailed information on how the automation systems would work on snowy and slippery roads or what their effects would be in different impact areas and in different conditions. At least in the early years of automation, it is likely that poor weather conditions are not part of the operating environment of automated passenger cars. Minibuses and delivery robots traveling at low speeds on separate lanes may work even in more challenging conditions, but they are likely to require better winter maintenance of roads than human drivers do. So far, there is not much research on this.

For these reasons, one must be careful when generalising the results of research on the impacts of automation to real traffic, and especially to Nordic conditions. Next, the results of the literature review and their applicability to the Nordic conditions are presented separately for each impact area.

Vehicle kilometres travelled and modal split

ART can affect vehicle kilometres travelled and modal split in many ways. The impacts of automation can be understood on the one hand through the way automation affects the perceived costs of different travel modes, and on the other hand, what kinds of travel modes automation enables.

Automation in passenger cars can free the driver from the driving task, hence enabling them to use the travel time for other purposes reducing the effort of driving. As a result, the perceived travel time cost is reduced, which makes traveling with an automated passenger car more attractive. Consequently, longer journeys in terms of time are perceived as more acceptable by car, expanding the range of

destinations and activities that people are willing to travel to by car. Models have shown an increase in the number and length of trips made with an automated passenger car, as well as in the modal share of passenger cars. As a result of these changes, the vehicle kilometres of passenger cars will probably increase overall and there will be a shift from public transport to passenger cars. The magnitude of the impacts is significantly affected by how much the perceived travel time costs drop and by the penetration rate of automated passenger cars. In the introduction phase of automated passenger cars (about 1/10 of passenger cars are automated), the change in passenger car or public transport vehicle kilometres is a few percentages. When the share of automated cars increases further changes in vehicle kilometres may be counted in tens of percent. However, automated passenger cars do not change the fact that an increase in passenger car traffic may increase congestion, and congestion increases travel times. This could act as a constraint on the growth of vehicle kilometres travelled with passenger cars. Automated passenger cars can improve traffic flow to some extent. However, the increase in demand created by the reduction in time costs could quickly offset benefits of increased traffic flow.

Robotaxis can especially compete with private cars and public transport in terms of modal share. On the other hand, robotaxis can act as a feeder service to public transport in areas where walking or cycling is not possible. Many factors affect the magnitude of the effects, such as the number of robotaxis available and the proportion of shared rides. A larger number of robotaxis provides a better level of service and increases their use. Sharing a ride generally means a longer travel time, which reduces robotaxis' modal share. Robotaxis can accumulate empty kilometres, i.e. drive without any driver or passenger on board, which is why the combined vehicle kilometres of passenger cars and robotaxis will probably increase rather than decrease. If robotaxis are introduced alongside passenger cars and public transport and without ride sharing, vehicle kilometres can increase by 10% or more, which can worsen congestion and increase travel times.

Robotaxi usage is also affected by the business model. Robotaxi services may charge based on the length or duration of trips, which can encourage making as few trips as possible. In the case of a private car, the use of the car can be perceived as economically sensible once a significant amount of money has been spent on its purchase. Because of this, robotaxis may at least initially compete mainly with human-driven taxis and public transport. On the other hand, robotaxis can make it easier to give up owning a car, as they could replace a private car especially when the car is only needed occasionally.

Long distances in sparsely populated areas are typical in the Nordic countries. In Finland, even the largest cities and urban centres are quite small compared to many countries. Based on research results, combining robotaxis and public transport might be a recommended option for longer trips in the future. In this case, robotaxis act as a feeder service for public transport, which could increase the use of public transport in the event that the combination offers a sufficiently fast, effortless and affordable way to travel. In practice, the combination of robotaxis with public transport can present a viable alternative, particularly for extended trips or in situations where using the private car is less appealing, such as in traffic congestion, road tolls, or parking constraints and charges.

However, for now it can be seen that robotaxis (or other use cases of automated driving) will not work in the near future in traffic conditions that are challenging for automated vehicles. These include for example single-carriageway roads with relatively high speed limits outside built-up areas.

Automation of public transport and freight transport can make the operation of services more affordable. For public transport, this enables maintaining a level of service that can offer a viable alternative to less space-efficient means of transport (car or robotaxi) or extend the reach of public transport. In freight transport, reduced costs of road transport are tempting for shifting deliveries from rail and ship transport to road transport. In this way, cheaper transport costs can create new demand for road transport.

Traffic flow

In general, research shows that driving automation can improve the efficiency of transport. However, for example, impacts on travel time have mostly been studied in certain limited conditions, which may not generalize to other contexts such as the Nordic countries or to Europe. Impacts on traffic flow and the environment have mainly been studied on motorways with large traffic volumes. However, in reality, motorways are seldom congested, at least in the Nordic countries, and their traffic volumes are relatively low. In addition, in the Nordic countries, motorways constitute only a small proportion of the entire road network. Thus, the potential benefits of ART on motorways will presumably be minor on a transport system level. In terms of freight transport, the two-lane road network is particularly important in the Nordic countries, and therefore, in terms of impacts, it would be important to develop automated driving for such an operating environment as well.

The impacts of automated passenger cars on traffic flow have mainly been studied with traffic simulations. The simulated scenarios have been limited in terms of considered road types and traffic volumes, focusing mostly on congested conditions on motorways. Furthermore, traffic flow is often simplified to consist only of passenger cars. Thus, the results represent a theoretical ideal situation, and do not necessarily describe the likely effects on real road networks. In addition, studies have used very different assumptions about the capabilities of automated cars, and the assumptions have not always been stated, which makes it difficult to utilize the results (Aittoniemi 2022, Yu et al. 2021). The results are therefore only suitable for the Nordic countries to a limited extent, as high traffic volumes on motorways make up only a small part of the overall vehicle kilometres travelled. In low traffic volumes, the largest impact will be a possible change in travel times when the desired speeds are limited to the speed limit. So far, little is known about the effects of other use cases on traffic flow and efficiency. The biggest impact on traffic flow will likely come through changes in vehicle kilometres travelled. Traffic management measures, such as limiting the length of platoons in automated truck platooning, may be necessary to avoid disadvantages.

Automation of passenger cars may increase average travel times in a scenario where not all vehicles are automated. In simulation studies, the impact on network throughput depend mainly on the automated car's assumed desired time headway to the vehicle in front: if the desired headway is smaller than an average human driver's, throughput increases, otherwise throughput decreases.

Results on the impacts of automated vehicles in a single scenario, such as a certain type of road, a certain speed limit and traffic volume, do not disclose the impacts on a larger scale, for example at the Nordic or European level. The simulation results cannot therefore necessarily be interpreted as the probable impacts of automation on real roads.

Road automation is seen to have the potential to improve the efficiency of the transport system, but this can only be achieved with certain operating principles. The conditions for achieving the positive impacts are quite strict and require major changes in travel behaviour (Calvert et al. 2017, Mattas et al. 2018, Do et al. 2019, Milanés and Shladover 2014). According to previous studies, positive impacts can be achieved if both automation and communication between vehicles are widely used, the driving behaviour of automated cars does not weaken the stability of the traffic flow, and the rides with automated vehicles are shared so that the overall vehicle kilometres travelled do not increase.

The results from simulation studies are at most as reliable as the model on which they are based on. Current driver and car following models are not necessarily suitable for modelling the differences between human-driven and automated vehicles (Yu et al. 2021). Traditional traffic microsimulation models are designed primarily to depict the traffic flow overall, rather than the movements of individual vehicles. However, this is exactly the feature needed to distinguish the effects of human drivers from those of automated cars. In addition, the simulation models assume ideal conditions, and there are no suitable models for driving in slippery weather, for example. In contrast to reality, simulated networks are usually even, but in real traffic conditions, even small road gradients have an impact on efficiency and emissions. In the real traffic environment, conditions can deviate from ideal conditions in many other ways, such as different types of vehicles and drivers with different preferences and abilities, varying weather and road conditions, objects moving with the wind, animals moving on the road, etc. Even a small disturbance can lead to the automated vehicle being unable to operate at its optimal efficiency. In real traffic conditions, the impacts are therefore likely to be smaller than in simulations (Zhang et al. 2023).

Several simulation studies have assumed optimistically small desired time headways, such as 0.5 s, for automated vehicles, but the feasibility of this is uncertain. Research indicates that implementing such short time headways requires vehicle-to-vehicle communication, and it is uncertain whether this will be widely implemented and utilised. In addition, regulations drawn up by the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) recommend that automated vehicles use each country's statutory time headways, which may be longer than those of human drivers in high traffic volumes.

In addition to the desired time headways, other driving behaviour aspects, such as accelerations and lane changes, affect the traffic flow. Especially in urban traffic it is important how quickly vehicles accelerate from a stop, for example, when the traffic lights change to green. Wang et al. (2023) analysed Waymo's open data from 2019 and concluded that the way Waymo's robotaxis drive in many ways more carefully than human drivers. Robotaxis for example braked earlier than human drivers when approaching red traffic lights and accelerated more slowly when the lights turned green. In addition, the reaction time of robotaxis was longer than that of human drivers. Although it can be assumed that

automated driving systems will become more reliable over time, there is no information to what extent it is possible to achieve a driving style that is simultaneously as safe, efficient and environmentally friendly as possible.

The impact of automated driving systems on the stability of the traffic flow is a very specific question to which the answer is yet unknown. Simulation models assume that the driving behaviour of automated vehicles is string stable, so that small changes in the speed of the vehicle in front do not grow with the following vehicle. However, there are indications that current lower-level automation systems, such as adaptive cruise control, may not behave in a string stable way, which could lead to more traffic congestion at higher penetration rates and traffic volumes. Field tests with commercial automated vehicles (Makridis et al. 2020) suggest that, at least in the current situation, commercial operators emphasize comfort and safety instead of smooth traffic flow to larger extent than the simulation models assume. So far, traffic flow efficiency has not been part of the legal requirements for automated driving systems (Ciuffo et al. 2021). Most field studies, as well as simulation studies, are based on Adaptive Cruise Control (ACC). It is not yet known how more advanced automation systems will operate in car following situations.

Environment

The impact of automated passenger cars on emissions is to a large extent in line with the impact on traffic flow, as research shows that impacts on emissions often result from changes in traffic flow vehicle kilometres travelled. The impacts on emissions largely depend on the assumptions about changes in vehicle kilometres travelled, i.e., to what extent automated vehicles are assumed to replace the currently common privately owned traditional passenger cars. In addition, the impacts depend on the assumptions about the composition of the automated vehicle fleet and their powertrains (e.g. the share of electric vehicles and the carbon footprint of electricity production).

The results from field tests of vehicles equipped with commercial adaptive cruise control (ACC) suggest that when driving in steady-state conditions, the fuel consumption and thus also the CO₂ emissions of automated vehicles can be lower than those of human-driven vehicles. However, even with small fluctuations in speed, the effects can be the opposite. In single-vehicle field tests, vehicles equipped with ACC had 2–7% lower emissions with ACC on compared to when a human was driving the car. However, it should be noted that lane changes and effects on other vehicles were not covered by these studies, and general conclusions cannot therefore be drawn (Aittoniemi 2022). The field studies have also not considered the possible impacts of the different driving behaviour and performance of automated vehicles on the emissions of other vehicles.

In summary, it can be stated that the driving behaviour of automated cars can be more efficient than that of human drivers in steady-state traffic conditions, when there are few speed fluctuations, and automated cars are assumed to follow speed limits. In conditions common in real traffic, such as interchanges, congestion and longitudinal road gradients, the results are less clear and largely depend on the characteristics of the automated driving system.

In the case of robotaxis, the impact on emissions depends on the extent of implementation and whether robotaxis replace privately owned passenger cars, public

transport or active travel modes. Delivery robots can reduce freight emissions of the last kilometre, at least in densely populated areas and as part of efficient transport chains. Truck platooning can reduce emissions from heavy vehicles, but further research is needed to determine the emission impacts on the traffic flow as a whole. Changes in vehicle kilometres travelled also greatly influence the emission impacts of automation in road transport.

In addition to the different driving behaviour of automated vehicles compared to human drivers, energy use and thus emissions are also affected by the energy required for the sensors and algorithms. Little is known about this so far and estimates of the magnitude of the impact vary widely.

Traffic safety

The number of traffic fatalities and injuries depends on three dimensions: accident risk, exposure and severity (Nilsson 2004). The studies found do usually not consider the impacts of ART on all three dimensions of traffic safety. The majority of the research results concern the accident risk of the user or the vehicle type under evaluation. Additionally, many studies regarding the impacts of higher-level automation on traffic safety are based on simulations, in which case results are heavily affected by the software and used assumptions and parameters for the vehicle's behaviour. Several simulation studies also use the American SSAM program to identify traffic conflicts from trajectories of vehicles exported from microsimulation runs. Many simulation tools, and the vehicle models that they use, have been developed to study traffic flow and are not suitable, at least directly, for studying safety-critical situations.

According to research results, ART reduces the accident risk of passenger cars, robotaxis and trucks. The magnitude of the effect depends on the use case, study area and penetration rate. For example, when the penetration rate of automated passenger cars was 20–25%, the number of traffic conflicts decreased by 12–47% on a motorway section (Papadoulis et al. 2019), 0–17% in individual intersections (Morando et al. 2018) and 0.8% in an entire urban area (Mourtakos et al. 2021). Correspondingly, conflicts decreased by 15% in an entire urban area, when 20% of passenger cars were replaced by automated shuttle buses and 20% of freight vehicles were automated (Mourtakos et al. 2021).

Research results suggest that automated truck platooning on motorways can reduce the number of rear-end collisions, but the safety of lane changes may deteriorate (e.g. Lee et al., 2021). Platooning can cause challenges to human drivers when entering motorways – especially if they are inexperienced drivers (Yang et al., 2023). According to Chen et al.'s (2022) study, short distances between platoons as well as their high speed increase the cognitive load of human drivers.

The accident risk of robotaxis and the severity of their accidents compared to human drivers can be investigated by using data obtained from real traffic in California. According to the results, it seems that robotaxis have a higher accident risk compared to a human driver (e.g. Goodall, 2021). When interpreting the results of different studies, it is necessary to take into account the differences in accident statistics. There is no underreporting in the accident statistics of automated vehicles in California, as manufacturers are required to report all incidents where the system has deactivated or been deactivated by the driver, or where the vehicle has been involved in an accident. In contrast, the national accident statistics used

in the studies include only accidents reported to the police, i.e. they have a high share of underreporting for accidents with low severity. This means that the safety situation of robotaxis in relation to human drivers would probably be better if it were possible to take into account the underreporting of the national accident statistics in the comparison.

The impact of road transport automation on traffic safety is also affected by exposure. The most important mechanisms are changes in the choice of mode and route, i.e. whether people switch to safer or less safe modes/routes, and the amount of movement, i.e. whether people's exposure to accidents increases or decreases as a function of time or distance. Based on previous research, it seems that automated passenger cars could make people change mode from public transport to using private cars which could worsen traffic safety at the system level, as public transport has a very low accident risk. In addition, automated passenger cars and robotaxis can lead to people making new and longer trips, which increases people's exposure to accidents, i.e. worsens traffic safety. Automated passenger cars could prompt people to change their routes to such where the automation is available. If the new route is safer, for example, switching from a single-lane road on a lower network to a safer road with separated lanes for opposing traffic, traffic safety would improve.

For high-level automation of passenger cars, there are studies that take Nordic conditions into account, but they only identify target accidents of the systems, and do not evaluate the actual traffic safety impact. The proportion of target accidents depends on the automated driving system under investigation. For example, an automated driving system for motorways (does not work in heavy rain, snow or sleet, on snowy or slushy road surfaces) could affect approximately 3.1–3.3% of personal injury accidents, deaths and serious injuries in Finland each year (Malin et al. 2023). The automated passenger car analysed in Utriainen's (2021) study (does not work in snow or rain, on a snowy road surface or in the dark) could affect 20–28% of all fatal accidents between pedestrians and passenger cars. In simulation studies, on the other hand, the snowy and icy conditions usual for the Nordic countries have not been taken into account, but the results concern ideal conditions. Winter conditions are challenging for traffic safety anyway, because different types of snowfall and slippery road surfaces are the most dangerous weather conditions from the point of view of a single human driver (Malin et al. 2019). Winter conditions are also currently mostly outside the planned operational design domain of conditional automated driving systems, which means that the driver has to drive themselves in the most dangerous conditions. It's possible that in such a future scenario, the human driver's ability to drive safely in hazardous conditions could be even weaker than today due to a lack of driving experience. More research on the traffic safety impacts of automated driving systems in winter conditions would therefore be particularly important for the Nordic countries.

Advanced driver support systems (ADAS) have been on the market for a long time, and they have become common in Finland in recent years. Regarding safety impacts of ADAS, there are studies based on accident statistics (however, not on Finnish data). Wang et al.'s (2020) meta-analysis examined the impact of nine different systems and according to the results, all the examined systems reduced their target accidents (all severities). For example, according to this meta-analysis, adaptive cruise control reduced rear-end accidents by 9.3% (-5%...-14%) and

automatic emergency braking by 25.7% (-20%...-31%). However, it is good to note that environmental and weather conditions probably affect the operation of support systems (Masello et al., 2022), which is why it would be important to study their operation also in a Nordic context.

Although the increase of ADAS usage presumably improves safety, the impact of the penetration rate on safety is not necessarily straight forward. Previous research results suggest that in conflicts between vehicles, the overall safety impact of the systems is better with low penetration rates (e.g. Sander & Lubbe, 2018). This is probably due to the fact that in a certain traffic conflict situation, it may be enough for the other party to have a certain assistance system. Instead, in conflicts between vehicles and unprotected road users, a change in the penetration rate would, as expected, seem to have a more straight forward safety impact (Ma & Andréasson, 2005). This means that regardless of how common driver support systems become, their addition enhances the safety of vulnerable road users in traffic.

With regards to policy measures, it is important to ensure that automated vehicles are safe, and that they reduce the number of conflict situations and thus accidents. There is strong legislative work in Europe, e.g. regarding the driving and behaviour of automated vehicles and their use, which in part tends to influence this. The legislative work in question also affects the severity of accidents through driving speed, because speed is a key factor in the severity of accidents. Legislative work related to driver training can also be a way to influence the accident risk of automated vehicles, especially with regard to conditionally automated systems. In terms of exposure, the most important thing is to curb people's exposure to accidents and support their transition to using safer modes of transportation (from private cars to public transport). This can be done in different ways, e.g. with pricing or restrictions based on performance or other usage (Auvinen et al. 2020). In addition, a high service level of safe travel modes, i.e. public transport, must be secured and services, route network and pricing developed according to the needs of users. Another method related to exposure is to influence the preference for safer routes, for example, by using roads where the directions of travel are separated, or by supporting cities in the adoption or promotion of a street network hierarchy that directs traffic to main roads.

Interaction between road users

Research on the interaction between road users has recent years focused on building theoretical frameworks based on existing research and examining interactions from the perspective of different scientific or research fields. These fields include e.g. technological development of automated vehicles, urban planning, sustainability and behavioural sciences.

The most concrete research results include the understanding of implicit information for interpretation of vehicle movement, as well as the identification of factors affecting the effective communication of various external human-machine interface (eHMI) devices. The need for eHMI devices has also been questioned. However, the results should be considered indicative due to the rapid development of technology. Furthermore, it is uncertain how well the results obtained in controlled experiments or virtual environments generalize to complex real-life situations.

The research field is at a stage where preliminary theoretical understandings of popular research topics are emerging without any of them having clearly risen to a defining position. This kind of concept and theory formation may in the future produce clearer lines of research, in which not only general information but also perspectives specifically concerning the Nordic countries emerge. These can be, for example, special needs brought about by the weather or visibility in the communication methods of automated vehicles. For example, the weather resistance of external user interfaces or the snow covering them can cause problems for pedestrians, and the identification of vulnerable road users in difficult weather conditions can in turn place more stringent requirements on automated vehicles. In addition, the importance of trust in the state and authorities may be emphasized if general problems of trust in automated systems occur. These can be, for example, hostility towards robotaxis or delivery robots and deliberately blocking their passage. Currently, however, these issues have not been discussed in the research literature, but the obtained results can be tentatively considered equally valid for all conditions.

The key to successful interactions in traffic is that road users can anticipate each other's actions. To avoid an increase in conflicts and accidents, it is important to regulate the introduction of new types of vehicles in traffic and at the same time support research and development work on the subject. In addition, it is worth remembering that motorists in shared spaces are assumed to be more attentive than in normal traffic, so automated vehicles must also follow this assumption, which puts pressure on their development work.

Conclusions and recommendations

This study conducted an extensive literature review on the potential impacts of ART. In addition, the applicability of the research results to the Nordic context was evaluated. In summary, it can be stated that although there is plenty of research literature on the topic, it is unclear whether the research results generalize to the real traffic environment in general and especially to the Nordic countries.

The literature review shows that an increase in ART can contribute to many transport policy goals. However, development in accordance with the goals is not self-evident. The positive impacts on safety, efficiency and the environment will only be realized if the optimistic assumptions are fulfilled. Considering the complexity of reality, this is not certain (Van Wynsberghe and Guimarães Pereira 2021). For example, the safety benefits brought by automation can only be realized if, at the same time, people do not make more and longer trips or switch to using less safe modes of transportation.

When looking at the impacts of automation, it is good to note that positive impacts can be achieved through different means, which may lead to opposing effects for different impact areas (Shi and Li 2021). For example, in terms of safety, long desired time headways between vehicles are desirable, while in terms of traffic flow, long desired time headways can be harmful in congested traffic. The concurrent promotion of all the goals set for the transport system presents a general challenge, and this is also true in the context of ART.

Automation is often expected to eliminate the negative externalities produced by the current transport system, but expectations are often detached from the actual implementation of automation (Olin and Mladenovic 2022). Several researchers

(Cohen and Cavoli 2019, Ciuffo et al. 2021) have recommended that decision makers should take an active role in the deployment of automation, so that the societal effects are as positive as possible. For example, it has been suggested that pilot projects for automated driving should be better aligned with the transport policy goals of cities (McAslan et al. 2021). This requires reliable information about how technology can contribute to these goals.

Research findings suggests that ART can improve traffic flow and safety. However, the deployment of automated vehicles can lead to new and longer journeys and a mode shift from, for example, public transport to private cars. From the perspective of both traffic safety and environment, it is important to curb the growth of passenger car traffic, to secure an adequate service level of public transport and to encourage active travel modes even as automation advances. Focusing on the potential of automation, particularly regarding the advancement of public transport, would be beneficial. So far, however, most of the research has focused on the automation of passenger cars. In addition, official publications have also focused on passenger cars (Olin and Mladenovic 2022). It is also essential to consider the needs of different users, so that the development of ART meets the needs of different groups (such as people with functional limitations or lower socio-economic status).

Based on this study, several important topics for further research can be proposed. Advanced driver assistance systems have gained popularity in the Nordic countries. Research indicate that these systems improve traffic safety, but their operation is affected by factors such as the environment and weather conditions. It would be important to investigate their effect on driver behaviour to be able to understand their safety impacts in Nordic conditions.

An important topic for further research would also be to examine the impact of the increasing prevalence of automation on drivers' driving skills as they drive less frequently. Currently, winter conditions are outside the planned operational design domain of conditional automatic driving systems, and in such cases, drivers themselves should drive in the most dangerous conditions. This further research could outline ways to maintain and improve human drivers' driving skills in the future, considering the growing role of automation in traffic. It would be particularly important to investigate how these changes affect traffic safety in the Nordic countries, where winter conditions are common.

In addition to simulations, it would be important to study the impacts of cars equipped with conditional automation (SAE level 3) for motorways on traffic flow and the environment (Aittoniemi et al. 2023) with real drivers. For Finland, it would also be important to find out the possibilities of automation on two-lane rural roads. More research is also needed on the impacts of automated shuttle buses and automation in freight transport.

The impacts of ART on vehicle kilometres travelled and modal split significantly affect the impacts on the environment, traffic efficiency and safety. Therefore, reliable information about these changes is important. More generally, producing more research on the impacts of ART under Nordic conditions in broader conditions and in more use cases is essential for shaping the desired future.

6 Lähdeviitteet

ACEA (2023). Vehicles in use Europe. European Automobile Manufacturers Association, <https://www.acea.auto/files/ACEA-report-vehicles-in-use-europe-2023.pdf>. Viitattu 11.12.2023.

Ackermann, C., Beggiato, M., Schubert, S., Kreams, J. F. (2019). An experimental study to investigate design and assessment criteria: What is important for communication between pedestrians and automated vehicles? *Applied Ergonomics*, 75, 272–282.

Aittoniemi, E. (2022). Evidence on impacts of automated vehicles on traffic flow efficiency and emissions: Systematic review. *IET Intelligent Transport Systems*, 16(10), 1306–1327. <https://doi.org/10.1049/itr2.12219>

Aittoniemi, E., Itkonen, T., Innamaa, S. (2023). Travel time, delay and CO₂ impacts of SAE L3 driving automation of passenger cars on the European motorway network. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 23(1), 1–29. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2023.23.1.6553>

Alkim, T.P., Bootsma, G., Hoogendoorn, S.P. (2007). Field operational test “the assisted driver”. In: 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Istanbul, Turkey, pp. 1198–1203.

Autoalan Tiedotuskeskus (2023a). https://www.aut.fi/tilastot/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_kayttovoimittain/henkilautojen_kayttovoimatilastot. Viitattu 23.11.2023.

Autoalan Tiedotuskeskus (2023b). https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys. Viitattu 23.11.2023.

Auvinen, H., Tuominen, A., Lehtonen, E., Malin, F. (2020). Kestävän liikkumisen toimien kulkutapavaikutukset. Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä 13/2020. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Viitattu 22.11.2023. Saatavilla: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Kest%C3%A4v%C3%A4n_liikkumisen_toimien_kulkutapavaikutukset_Traficom_13_2020.pdf

Bazilinskyy, P., Dodou, D., De Winter, J. (2019). Survey on eHMI concepts: The effect of text, color, and perspective. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 67, 175–194.

Beauchamp, É., Saunier, N., Cloutier, M-S. (2022). Study of automated shuttle interactions in city traffic using surrogate measures of safety, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 135, 103465, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103465>.

Beirão, G., Sarsfield Cabral, J. A. (2007). Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. *Transport Policy*, 14(6), 478–489. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.04.009>

Bengler, K., Rettenmaier, M., Fritz, N., Feierle, A. (2020). From HMI to HMIs: Towards an HMI framework for automated driving. *Information*, 11(2), 61.

Benmimoun, M., Pütz, A., Zlocki, A., Eckstein, L. (2012). Effects of ACC and FCW on speed, fuel consumption, and driving safety. In: *IEEE Vehicular Technological*

- Conference. Quebec City, QC. pp. 1–6
(2012).<https://doi.org/10.1109/VTCFall.2012.639917369>.
- Bibeka, A., Songchitruksa, P., Zhang, Y. (2021). Assessing environmental impacts of ad-hoc truck platooning on multilane freeways. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 25(3), 281-292.
- Bishop, R., Bevly, D., Humphreys, L., Boyd, S., Murray, D. (2017). Evaluation and testing of driver-assistive truck platooning: phase 2 final results. *Transportation research record*, 2615(1), 11-18.
- Boggs, A.M., Wali, B., Khattak, A.J. (2020). Exploratory analysis of automated vehicle crashes in California: A text analytics & hierarchical Bayesian heterogeneity-based approach. *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105354. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105354>
- Bösch, P. M., Becker, F., Becker, H., Axhausen, K. W. (2018). Cost-based analysis of autonomous mobility services. *Transport Policy*, 64, 76–91.
<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.09.005>
- Brill, S., Payre, W., Debnath, A., Horan, B., Birrell, S. (2023). External Human-Machine Interfaces for Automated Vehicles in Shared Spaces: A Review of the Human-Computer Interaction Literature. *Sensors*, 23(9), Article 4454.
<https://doi.org/10.3390/s23094454>
- BTS (2023). Average Age of Automobiles and Trucks in Operation in the United States Bureau of Transportation Statistics. <https://www.bts.gov/content/average-age-automobiles-and-trucks-operation-united-states>. Viitattu 11.12.2023.
- California Energy Commission (2023a). <https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/zero-emission-vehicle-and-infrastructure-statistics/new-zev-sales>. Viitattu 23.11.2023.
- California Energy Commission (2023b). <https://www.energy.ca.gov/data-reports/energy-almanac/zero-emission-vehicle-and-infrastructure-statistics/light-duty-vehicle>. Viitattu 23.11.2023.
- Calvert, S., Schakel, W., Van Lint, J. (2017). Will Automated Vehicles Negatively Impact Traffic Flow?, *Journal of advanced transportation*, 2017, 1–23.
<https://doi.org/10.1155/2017/3082781>
- Calvert, S. C., Schakel, W. J., van Arem, B. (2019). Evaluation and modelling of the traffic flow effects of truck platooning. *Transportation research part C: emerging technologies*, 105, 1-22.
- Carlsson, M., Nilsson, P. (2016). The Smiling Car - concept for autonomous cars. Retrieved 2023-09-28 from <https://semcon.com/smilingcar/>
- Carmona, J., Guindel, C., Garcia, F., de la Escalera, A. (2021). eHMI: Review and Guidelines for Deployment on Autonomous Vehicles. *Sensors*, 21(9), Article 2912.
<https://doi.org/10.3390/s21092912>
- Chang, C.-M., Toda, K., Igarashi, T., Miyata, M., Kobayashi, Y. (2018). A video-based study comparing communication modalities between an autonomous car

and a pedestrian. Adjunct Proceedings of the 10th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications,

Chang, C.-M., Toda, K., Sakamoto, D., Igarashi, T. (2017). Eyes on a Car: an Interface Design for Communication between an Autonomous Car and a Pedestrian. Proceedings of the 9th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications.

Chen, F., Lu, G., Tan, H., Liu, M., Wan, H. (2022). Effects of assignments of dedicated automated vehicle lanes and inter-vehicle distances of automated vehicle platoons on car-following performance of nearby manual vehicle drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 177, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106826>.

Cheng, H., Wang, Y., Chong, D., Xia, C., Sun, L., Liu, J., Gao, K., Yang, R., Jin, T. (2023). Truck platooning reshapes greenhouse gas emissions of the integrated vehicle-road infrastructure system. *Nature Communications*, 14(1), 4495.

Cicchino, J. B. (2017). Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates. *Accident Analysis & Prevention*, 99, 142–152. <https://doi.org/10.1016/J.AAP.2016.11.009>

Cicchino, J. B. (2018). Effects of lane departure warning on police-reported crash rates. *Journal of Safety Research*, 66, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2018.05.006>

Cicchino, J. B. (2022). Effects of automatic emergency braking systems on pedestrian crash risk. *Accident Analysis & Prevention*, 172, 106686. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106686>

Ciuffo, B., Mattas, K., Makridis, M., Albano, G., Anesiadou, A., He, Y., Josvai, S., Komnos, D., Pataki, M., Vass, S., Szalay, Z. (2021). Requiem on the positive effects of commercial adaptive cruise control on motorway traffic and recommendations for future automated driving systems. *Transp. Res. Part C: Emerging Technol.* 130, 103305 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103305>

Clarke, E. (2006). Shared space-the alternative approach to calming traffic. *Traffic Engineering & Control*, 47(8).

Cohen, T., Cavoli, C. (2019). Automated vehicles: Exploring possible consequences of government (non)intervention for congestion and accessibility. *Transport Reviews*, 39(1), 129–151. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1524401>

Combs, T. S., Sandt, L. S., Clamann, M. P., Mc Donald, N. C. (2019). Automated vehicles and pedestrian safety: Exploring the promise and limits of pedestrian detection. *American Journal of Preventive Medicine*, 56(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2018.06.024>

Compostella, J., Fulton, L. M., De Kleine, R., Kim, H. C., Wallington, T. J. (2020). Near- (2020) and long-term (2030–2035) costs of automated, electrified, and shared mobility in the United States. *Transport Policy*, 85, 54–66. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2019.10.001>

Cornet, Y., Lugano, G., Georgouli, C., Milakis, D. (2022). Worthwhile travel time: A conceptual framework of the perceived value of enjoyment, productivity and

fitness while travelling. *Transport Reviews*, 42(5), 580–603.
<https://doi.org/10.1080/01441647.2021.1983067>

Das, D., Samandar, M.S., Roupail, N. (2022). Longitudinal traffic conflict analysis of autonomous and traditional vehicle platoons in field tests via surrogate safety measures, *Accident Analysis & Prevention*, 177, 106822,
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106822>.

Das, S., Dutta, A., Tsapakis, I. (2020). Automated vehicle collisions in California: Applying Bayesian latent class model. *IATSS Research* 44, 300–308.
<https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2020.03.001>

Davis (2004). Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow. *Phys. Rev. E*. 69(6), 066110 (2004). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.69.066110>

De Clercq, K., Dietrich, A., Núñez Velasco, J. P., De Winter, J., Happee, R. (2019). External human-machine interfaces on automated vehicles: Effects on pedestrian crossing decisions. *Human Factors*, 61(8), 1353–1370.

De Winter, J., Dodou, D. (2022). External human-machine interfaces: Gimmick or necessity? *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 15, 100643.

Dey, D., Terken, J. (2017). Pedestrian interaction with vehicles: roles of explicit and implicit communication. *Proceedings of the 9th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications*.

Dey, D., Martens, M., Eggen, B., Terken, J. (2019). Pedestrian road-crossing willingness as a function of vehicle automation, external appearance, and driving behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 65, 191–205.

Dey, D., Habibovic, A., Löcken, A., Wintersberger, P., Pfleging, B., Riener, A., Martens, M., Terken, J. (2020a). Taming the eHMI jungle: A classification taxonomy to guide, compare, and assess the design principles of automated vehicles' external human-machine interfaces. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 7, 100174.

Dey, D., Habibovic, A., Pfleging, B., Martens, M., Terken, J. (2020b). Color and animation preferences for a light band eHMI in interactions between automated vehicles and pedestrians. *Proceedings of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems*.

Do, W., Rouhani, O. M., Miranda-Moreno, L. (2019). Simulation-Based Connected and Automated Vehicle Models on Highway Sections: A Literature Review. *Journal of Advanced Transportation*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9343705>

Donà, R., Mattas, K., He, Y., Albano, G., Ciuffo, B. (2022). Multianticipation for string stable adaptive cruise control and increased motorway capacity without vehicle-to-vehicle communication. *Transportation research part C: emerging technologies*, 140, 103687.

Dvorkin, W., King, J., Gray, M., Jao, S. (2019). Determining the greenhouse gas-emissions benefit of an adaptive cruise control system using real-world driving data. *SAE Technical Papers*, 2019-01-0310, 1–9 (2019). <https://doi.org/10.4271/2019-01-0310>

- Elvik, R. (2008). The predictive validity of empirical Bayes estimates of road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 40(6), 1964–1969. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.07.007>
- Engholm, A., Kristoffersson, I., Pernestal, A. (2021). Impacts of large-scale driverless truck adoption on the freight transport system. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 154, 227–254. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.10.014>
- ERTRAC (2022). Connected, Cooperative and Automated Mobility Roadmap. Version 10. ETRAC Working Group “Connectivity and Automated Driving”.
- Ezzati Amini, R., Katrakazas, C., Antoniou, C. (2019). Negotiation and decision-making for a pedestrian roadway crossing: A literature review. *Sustainability*, 11(23), 6713.
- Fabricius, V., Habibovic, A., Rizgary, D., Andersson, J., Warnestal, P. (2022). Interactions Between Heavy Trucks and Vulnerable Road Users-A Systematic Review to Inform the Interactive Capabilities of Highly Automated Trucks. *Frontiers in Robotics and Ai*, 9, Article 818019. <https://doi.org/10.3389/frobt.2022.818019>
- Fagnant, D. J., Kockelman, K. M. (2018). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 45(1), 143–158. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9729-z>
- Favarò, F. M., Nader, N., Eurich, S. O., Tripp, M., Varadaraju, N. (2017). Examining accident reports involving autonomous vehicles in California. *PLoS ONE*, 12(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184952>
- Figliozzi, M. A. (2020). Carbon emissions reductions in last mile and grocery deliveries utilizing air and ground autonomous vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102443.
- Fuest, T., Michalowski, L., Träris, L., Bellem, H., Bengler, K. (2018). Using the driving behavior of an automated vehicle to communicate intentions-a wizard of oz study. 2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC).
- Gettman, D., Pu, L., Sayed, T., Shelby, S. G., Energy, S. (2008). Surrogate safety assessment model and validation (No. FHWA-HRT-08-051). Turner-Fairbank Highway Research Center.
- Goodall, N.J. (2021). Comparison of automated vehicle struck-from-behind crash rates with national rates using naturalistic data. *Accident Analysis & Prevention*, 154, 106056, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106056>
- [Gunter, G., Gloudemans, D., Stern, R.E., McQuade, S., Bhadani, R., Bunting, M., Delle Monache, M., Lysecky, R., Seibold, B., Sprinkle, J., Piccoli, B. Work, D. \(2020\). Are commercially implemented adaptive cruise control systems string stable? *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 22, 6992–7003. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3000682>](https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3000682)
- Harb, M., Xiao, Y., Circella, G., Mokhtarian, P. L., Walker, J. L. (2018). Projecting travelers into a world of self-driving vehicles: Estimating travel behavior

implications via a naturalistic experiment. *Transportation*, 45(6), 1671–1685.
<https://doi.org/10.1007/s11116-018-9937-9>

Harb, M., Stathopoulos, A., Shiftan, Y., Walker, J. L. (2021). What do we (not) know about our future with automated vehicles?. *Transportation Research Part C: emerging technologies*, 123, 102948. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102948>

Hardman, S., Chakraborty, D., Tal, G. (2022). Estimating the travel demand impacts of semi automated vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107, 103311. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103311>

Hauer, E., Harwood, D. W., Council, F. M., Griffith, M. S. (2002). Estimating safety by the empirical Bayes method. A tutorial. *Transportation Research Record*, vol. 1784, pp. 126–131.

He, Y., Makridis, M., Fontaras, G., Mattas, K., Xu, H., Ciuffo, B. (2020). The energy impact of adaptive cruise control in real-world highway multiple-car-following scenarios. *Eur. Transp. Res. Rev.* 12, 17. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00406-w>

Hensch, A. C., & Neumann, I., Beggiato, M., Halama, J., Krems, J. F. (2020). How should automated vehicles communicate?—Effects of a light-based communication approach in a Wizard-of-Oz study. *Advances in Human Factors of Transportation AHFE 2019 International Conference on Human Factors in Transportation*, Washington DC, USA.

HSL (2023). Tilinpäätös 2022. <https://hslfi.azureedge.net/globalassets/hsl/uutisten-pdf-liitteet/hsl-tilinpaatos-2022.pdf>

Huang, Y., Kockelman, K. M., Garikapati, V., Zhu, L., Young, S. (2021). Use of Shared Automated Vehicles for First-Mile Last-Mile Service: Micro-Simulation of Rail-Transit Connections in Austin, Texas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675(2), 135–149.
<https://doi.org/10.1177/0361198120962491>

Huang, J., Song, G., He, F., Tan, Z. (2023). Energetic Impacts of Autonomous Vehicles in Real-World Traffic Conditions From Nine Open-Source Datasets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

Huber, D., Viere, T., Nemoto, E. H., Jaroudi, I., Korbee, D., Fournier, G. (2022). Climate and environmental impacts of automated minibuses in future public transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102, 103160.

Innamaa, S., Smith, S., Barnard, Y., Rainville, L., Rakoff, H., Horiguchi, R., Gellerman, H. (2018). Trilateral Impact Assessment Framework for Automation in Road Transportation. Trilateral Impact Assessment Sub-Group for ART. Available at: https://www.connectedautomateddriving.eu/wp-content/uploads/2018/03/Trilateral_IA_Framework_April2018.pdf

ITF (2019). What is the Value of Saving Travel Time? (176; ITF Roundtable Reports). OECD Publishing. <https://www.itf-oecd.org/what-value-saving-travel-time>

- James, R.M., Melson, C., Hu, J., Bared, J. (2019). Characterizing the impact of production adaptive cruise control on traffic flow: An investigation. *Transportmetrica B*. 7(1), 992–1012. <https://doi.org/10.1080/21680566.2018.1540951>
- Jiang, Q., He, B. Y., Ma, J. (2022). Connected automated vehicle impacts in Southern California part-II: VMT, emissions, and equity. *Transportation research part D: transport and environment*, 109, 103381.
- Kooijman, L., Happee, R., de Winter, J. C. (2019). How do eHMIs affect pedestrians' crossing behavior? A study using a head-mounted display combined with a motion suit. *Information*, 10(12), 386.
- Knoop, V.L., Wang, M., Wilminck, I., Hoedemaeker, D.M., Maaskant, M., Van der Meer, E.J. (2019). Platoon of SAE Level-2 automated vehicles on public roads: setup, traffic interactions, and stability. *Transp. Res. Rec.* 2673(9), 311–322. <https://doi.org/10.1177/0361198119845885>
- Kröger, L., Kuhnimhof, T., Trommer, S. (2019). Does context matter? A comparative study modelling autonomous vehicle impact on travel behaviour for Germany and the USA. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 122, 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.03.033>
- Kulmala, R. (2010). Ex-ante assessment of the safety effects of intelligent transport systems. *Accident Analysis and Prevention*, 42(4), 1359–1369. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.03.001>
- Kutela, B., Das, S., Dadashova, B. (2022). Mining patterns of autonomous vehicle crashes involving vulnerable road users to understand the associated factors. *Accident Analysis & Prevention*, 165, 106476. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106473>
- Lai, F., Carsten, O., Tate, F. (2012). How much benefit does Intelligent Speed Adaptation deliver: An analysis of its potential contribution to safety and environment. *Accident Analysis & Prevention*, 48, 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.04.011>
- Lau, S. T., Susilawati, S. (2021). Shared autonomous vehicles implementation for the first and last-mile services. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11, 100440.
- Lee, Y. M., Madigan, R., Giles, O., Garach-Morcillo, L., Markkula, G., Fox, C., Camara, F., Rothmueller, M., Vendelbo-Larsen, S. A., Rasmussen, P. H. (2021a). Road users rarely use explicit communication when interacting in today's traffic: implications for automated vehicles. *Cognition, Technology & Work*, 23, 367–380.
- Lee, S., Oh, C., Lee, G. (2021b). Impact of automated truck platooning on the performance of freeway mixed traffic flow. *Journal of Advanced Transportation*, 2021, 1–13.
- Lemardelé, C., Melo, S. P., Cerdas, F., Herrmann, C., Estrada, M. (2023). Life-cycle analysis of last-mile parcel delivery using autonomous delivery robots. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103842.
- Leslie, A. J., Kiefer, R. J., Meitzner, M. R., Flannagan, C. A. (2021). Field effectiveness of General Motors advanced driver assistance and headlighting systems.

Accident Analysis & Prevention, 159, 106275.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106275>

Li, Y., Li, Z., Wang, H., Wang, W., Xing, L. (2017). Evaluating the safety impact of adaptive cruise control in traffic oscillations on freeways. *Accident Analysis & Prevention*, 104, 137–145.

Li, T., Chen, D., Zhou, H., Laval, J., Xie, Y. (2021). Car-following behavior characteristics of adaptive cruise control vehicles based on empirical experiments. *Transp. Res. Part B: Methodol.* 147, 67–91.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.03.003>

Liu, H., Kan, X. D., Shladover, S. E., Lu, X. Y., Ferlis, R. E. (2018). Modeling Impacts of Cooperative Adaptive Cruise Control on Mixed Traffic Flow in Multi-Lane Freeway Facilities. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 95, pp. 261–279.

Löcken, A., Golling, C., Riener, A. (2019). How should automated vehicles interact with pedestrians? A comparative analysis of interaction concepts in virtual reality. *Proceedings of the 11th international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications.*

LVM (2018). Kävelyn ja pyöräilyn edistämishjelma (Nro 5/2018; Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja, s. 43). Liikenne- ja viestintäministeriö.

LVM (2021a). Valtioneuvoston periaatepäätös liikenteen automaation edistämisestä LVM/2021/137. <https://valtioneuvosto.fi/delegate/file/98069>

LVM (2021b). Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma vuosille 2021–2032. Valtioneuvoston julkaisuja 2021:75. Valtioneuvosto Helsinki 2021. ISBN pdf: 978-952-383-749-2. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-749-2>

[LVM \(2023\). Tieliikenteen automaatiokehitys kaupunkien joukko- ja palveluliikenteessä. Muistio.](#)

Ma, X., Andréasson, I. (2005). Predicting the effect of various ISA penetration grades on pedestrian safety by simulation. *Accident Analysis & Prevention*, 37(6), 1162–1169.

Mahmassani, H.S. (2016). 50th Anniversary invited article autonomous vehicles and connected vehicle systems: Flow and operations considerations. *Transp. Sci.* 50(4), 1140–1162 (2016). <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0712>

Makridis, M., Mattas, K., Mogno, C., Ciuffo, B., Fontaras, G. (2020a). The impact of automation and connectivity on traffic flow and CO₂ emissions. A detailed microsimulation study. *Atmospheric Environment*, 226, 117399.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117399>

Makridis, M., Mattas, K., Ciuffo, B. (2020b). Response time and time headway of an adaptive cruise control. An empirical characterization and potential impacts on road capacity. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 21(4), 1677–1686.

Makridis, M., Mattas, K., Anesiadou, A., Ciuffo, B. (2021). OpenACC. An open database of car-following experiments to study the properties of commercial ACC systems. *Transportation research part C: emerging technologies*, 125, 103047.

- Malin, F., Norros, I., Innamaa, S. (2019). Accident risk of road and weather conditions on different road types. *Accident Analysis & Prevention*, 122, 181–188, <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.10.014>
- Malin, F., Silla, A., Mesimäki, J., Innamaa, S., Peltola, H. (2023). Identifying crashes potentially affected by conditionally automated vehicles in Finland, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 27:5, 665–676, <https://doi.org/10.1080/15472450.2022.2074793>
- Markkula, G., Madigan, R., Nathanael, D., Portouli, E., Lee, Y. M., Dietrich, A., Billington, J., Schieben, A., Merat, N. (2020). Defining interactions: A conceptual framework for understanding interactive behaviour in human and automated road traffic. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 21(6), 728–752.
- Marques, D., Bandeira, J., Coelho, M. C. (2021). Traffic, emissions and safety impacts of automated vehicles connecting a university and a science park. In *2021 7th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)* (pp. 1-6). IEEE.
- Martinez, L. M., Viegas, J. M. (2017). Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(1), 13–27.
- Masello, L., Castignani, G., Sheehan, B., Murphy, F., McDonnell, K. (2022). On the road safety benefits of advanced driver assistance systems in different driving contexts. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 15, 100670. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100670>
- Mattas, K., Makridis, M., Hallac, P., Raposo, M. A., Thiel, C., Toledo, T., Ciuffo, B. (2018). Simulating deployment of connectivity and automation on the Antwerp ring road. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(9), 1036–1044. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5287>
- McAslan, D., Najar Arevalo, F., King, D. A., Miller, T. R. (2021). Pilot project purgatory? Assessing automated vehicle pilot projects in US cities. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8(1), 1-16.
- Merat, N., Louw, T., Madigan, R., Wilbrink, M., Schieben, A. (2018). What externally presented information do VRUs require when interacting with fully Automated Road Transport Systems in shared space? *Accident Analysis & Prevention*, 118, 244–252.
- Mesionis, G., Brackstone, M., Gravett, N. (2020). Microscopic modeling of the effects of autonomous vehicles on motorway performance. *Transportation Research Record*, 2674(11), 697–707. doi: 10.1177/0361198120949243
- Milanés, V., Shladover, S.E. (2014). Modeling cooperative and autonomous adaptive cruise control dynamic responses using experimental data. *Transp. Res. Part C: Emerging Technol.* 48, 285–300. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.09.001>
- Moore, M. A., Lavieri, P. S., Dias, F. F., Bhat, C. R. (2020). On investigating the potential effects of private autonomous vehicle use on home/work relocations and

commute times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 110, 166–185. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.11.013>

Moottoriajoneuvokanta [verkkajulkaisu]. Viiteajankohta: 2022. ISSN=1798-856X. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 24.11.2023]. Saantitapa: <https://www.stat.fi/julkaisu/cl8crukpo80zo0avul86i2zrt>

Morando, M. M., Tian, Q., Truong, L. T., Vu, H. L. (2018). Studying the safety impact of autonomous vehicles using simulation-based surrogate safety measures. *Journal of Advanced Transportation*, Article ID 6135183, 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/6135183>

Moridpour, S. (2014). Evaluating the time headway distributions in congested highways. *Journal of Traffic and Logistics Engineering Vol*, 2(3).

Mourtakos, V., Oikonomou, M. G., Kopelias, P., Vlahogianni, E.I., Yannis, G. (2021). Impacts of autonomous on-demand mobility service: A simulation experiment in the City of Athens, *Transportation Letters*, 14:10, 1138–1150, <https://doi.org/10.1080/19427867.2021.2000571>

Narayanan, S., Chaniotakis, E., Antoniou, C. (2020). Shared autonomous vehicle services: A comprehensive review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 111, 255–293. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.12.008>

Nguyen-Phuoc, D. Q., Zhou, M., Hong Chua, M., Romano Alho, A., Oh, S., Seshadri, R., Le, D.-T. (2023). Examining the effects of Automated Mobility-on-Demand services on public transport systems using an agent-based simulation approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 169, 103583. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103583>

Nikitas, A., Thomopoulos, N., Milakis, D. (2021). The environmental and resource dimensions of automated transport: a nexus for enabling vehicle automation to support sustainable urban mobility. *Annual Review of Environment and Resources*, 46, 167-192.

Nilsson, G. (2004). *Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety*. Doctoral thesis. Lund Institute of Technology Department of Technology and Society. Lund.

Olin, J. J., Mladenović, M. N. (2022). Imaginaries of road transport automation in Finnish governance culture—a critical discourse analysis. *Sustainability*, 14(3), 1437.

Overtoom, I., Correia, G., Huang, Y., Verbraeck, A. (2020). Assessing the impacts of shared autonomous vehicles on congestion and curb use: A traffic simulation study in The Hague, Netherlands. *International journal of transportation science and technology*, 9(3), 195–206.

Owensby, C., Tomitsch, M., Parker, C. (2018). A framework for designing interactions between pedestrians and driverless cars: insights from a ride-sharing design study. *Proceedings of the 30th Australian conference on computer-human interaction*.

Paddeu, D., Denby, J. (2021). Decarbonising road freight: Is truck automation and platooning an opportunity?. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1-15.

Papadoulis, A., Quddus, M., Imprialou, M. (2019). Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways. *Accident; Analysis & Prevention*, 124, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.019>

Peltola, H. (2015). Talviajan nopeusrajoitusten liikenneturvallisuusvaikutukset: vuosien 2010–2014 onnettomuuksien tarkastelu. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 61/2015. <https://www.doria.fi/handle/10024/121607>

Perrine, K. A., Kockelman, K. M., Huang, Y. (2020). Anticipating long-distance travel shifts due to self-driving vehicles. *Journal of Transport Geography*, 82, 102547. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102547>

Petzoldt, T., Schleinitz, K., Banse, R. (2018). Potential safety effects of a frontal brake light for motor vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(6), 449–453.

Pilli, M., Stenberg, E., Schirokoff, A. (2022). Kuljettajan tukijärjestelmien yleisyys Suomessa vuonna 2022. Traficom in tutkimuksia ja selvityksiä 28/2022. ISBN (verkkojulkaisu) 978–952–311–820–1.

Predhumeau, M., Spalanzani, A., Dugdale, J. (2023). Pedestrian Behavior in Shared Spaces With Autonomous Vehicles: An Integrated Framework and Review. *Ieee Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(1), 438–457. <https://doi.org/10.1109/tiv.2021.3116436>

Pudāne, B., Rataj, M., Molin, E. J. E., Mouter, N., van Cranenburgh, S., Chorus, C. G. (2019). How will automated vehicles shape users' daily activities? Insights from focus groups with commuters in the Netherlands. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 71, 222–235. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.014>

Rafael, S., Correia, L. P., Lopes, D., Bandeira, J., Coelho, M. C., Andrade, M., Borrego C., Miranda, A. I. (2020). Autonomous vehicles opportunities for cities air quality. *Science of the Total Environment*, 712, 136546.

Rahman, Md. M., Thill, J.-C. (2023). Impacts of connected and autonomous vehicles on urban transportation and environment: A comprehensive review. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104649. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104649>

Ramezani, H., Shladover, S. E., Lu, X. Y., Altan, O. D. (2018). Micro-simulation of truck platooning with cooperative adaptive cruise control: Model development and a case study. *Transportation Research Record*, 2672(19), 55–65.

Rekola, M., Kolinen, L., Asikainen, E., Heliste, L., Immonen, E., Starck, M., Ahokas, M., Suomento, J., Johansson, S. (2022). Liikenneturvallisuusstrategia 2022–2026. Liikenne- ja viestintäministeriö. Helsinki, 2022. ISBN pdf: 978-952-243-746-4 <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163951>

Reyes-Munoz, A., Guerrero-Ibanez, J. (2022). Vulnerable Road Users and Connected Autonomous Vehicles Interaction: A Survey. *Sensors*, 22(12), Article 4614. <https://doi.org/10.3390/s22124614>

Roche-Cerasi, I. (2019). Public acceptance of driverless shuttles in Norway. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 66, 162–183. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.09.002>

- Räth, Y. M., Balac, M., Hörl, S., Axhausen, K. W. (2023). Assessing service characteristics of an automated transit on-demand service. *Journal of Urban Mobility*, 3, 100038. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100038>
- SAE (2021). Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles. SAE J3016. https://doi.org/10.4271/J3016_202104
- Saleh, M., Hatzopoulou, M. (2020). Greenhouse gas emissions attributed to empty kilometers in automated vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102567.
- Sander, U., Lubbe, N. (2018). Market penetration of intersection AEB: Characterizing avoided and residual straight crossing path accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 115, 178–188.
- Schakel, W.J., Gorter, C.M., De Winter, J.C.F., Van Arem, B. (2017). Driving characteristics and adaptive cruise control-A naturalistic driving study. *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.* 9(2), 17–24. <https://doi.org/10.1109/MITS.2017.2666582>
- Shi, X., Li, X. (2021). Empirical study on car-following characteristics of commercial automated vehicles with different headway settings. *Transp. Res. Part C: Emerging Technol.* 128, 103134 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103134>
- Singleton, P. A. (2019). Discussing the “positive utilities” of autonomous vehicles: Will travellers really use their time productively? *Transport Reviews*, 39(1), 50–65. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1470584>
- Snelder, M., Wilmlink, I., van der Gun, J., Bergveld, H. J., Hoseini, P., van Arem, B. (2019). Mobility impacts of automated driving and shared mobility – explorative model and case study of the province of north- Holland.
- Song, M., Chen, F., Ma, X. (2021). Organization of autonomous truck platoon considering energy saving and pavement fatigue. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102667.
- Sonnleitner, J., Friedrich, M., Richter, E. (2022). Impacts of highly automated vehicles on travel demand: Macroscopic modeling methods and some results. *Transportation*, 49(3), 927–950. <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10199-z>
- Soteropoulos, A., Berger, M., Ciari, F. (2019). Impacts of automated vehicles on travel behaviour and land use: An international review of modelling studies. *Transport Reviews*, 39(1), 29–49. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1523253>
- Staiger, J., Calvert, S.C. (2021). Empirical analysis of longitudinal and lateral vehicle dynamics of automated vehicles. In: 100th Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, DC.
- Sternlund, S., Strandroth, J., Rizzi, M., Lie, A., Tingvall, C. (2017). The effectiveness of lane departure warning systems—A reduction in real-world passenger car injury crashes. *Traffic Injury Prevention*, 18(2), 225–229. <https://doi.org/10.1080/15389588.2016.1230672>

- Stogios, C., Kasraian, D., Roorda, M. J., Hatzopoulou, M. (2019). Simulating impacts of automated driving behavior and traffic conditions on vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 76, 176-192. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.09.020>
- Thakur, P., Kinghorn, R., Grace, R. (2016). Urban form and function in the autonomous era. Australasian Transport Research Forum, Melbourne, Australia. <http://www.atrf.info/papers/index.aspx>
- Tiernan, T.A., Richardson, N., Azeredo, P., Najm, W.G., Lochrane, T. (2017). Test and Evaluation of Vehicle Platooning Proof-of-Concept Based on Cooperative Adaptive Cruise Control Final Report. pp. 1–112. US Department of Transportation, Southeast, Washington, DC.
- Tirachini, A., Antoniou, C. (2020). The economics of automated public transport: Effects on operator cost, travel time, fare and subsidy. *Economics of Transportation*, 21, 100151.
- Treiber, M., Kesting, A. (2013). *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer, Berlin.
- Utriainen, R., Pöllänen, M. (2020). Prioritizing safety or traffic flow? Qualitative study on highly automated vehicles' potential to prevent pedestrian crashes with two different ambitions. *Sustainability*, 12(8), 3206. <https://doi.org/10.3390/su12083206>
- Utriainen, R. (2021). Potential impacts of automated vehicles on pedestrian safety in a four-season country. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 25(2), 188–196. <https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1845671>
- Valtioneuvosto (2023). Vahva ja välittävä Suomi. Pääministeri Petteri Orpon hallituksen ohjelma. Valtioneuvoston julkaisuja 2023:58. ISBN pdf: 978-952-383-763-8. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-763-8>
- Van Wynsberghe, A. and Guimarães Pereira, Â. (2021). *Mobility Imaginaries: Social and Ethical Issues of Connected and Automated Vehicles*, EUR 30783 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-20412-1, doi:10.2760/104013, JRC125412.
- Viti, F., Hoogendoorn, S.P., Alkim, T.P., Bootsma, G. (2008). Driving behavior interaction with ACC: Results from a field operational test in the Netherlands. In: 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Eindhoven, Netherlands, pp. 745–750.
- Vosooghi, R., Puchinger, J., Jankovic, M., Vouillon, A. (2019). Shared autonomous vehicle simulation and service design. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2019.08.006>
- Wadud, Z., MacKenzie, D., Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- Wang, M., van Maarseveen, S., Happee, R., Tool, O., van Arem, B. (2019). Benefits and risks of truck platooning on freeway operations near entrance ramp. *Transportation Research Record*, 2673(8), 588-602.

- Wang, L., Zhong, H., Ma, W., Abdel-Aty, M., Park, J. (2020). How many crashes can connected vehicle and automated vehicle technologies prevent: A meta-analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 136, 105299. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105299>
- Wang, Y., Farah, H., Yu, R., Qiu, S., van Arem, B. (2023). Characterizing Behavioral Differences of Autonomous Vehicles and Human-Driven Vehicles at Signalized Intersections Based on Waymo Open Dataset. *Transportation Research Record*, 03611981231165783.
- Wardman, M., Chintakayala, P., Heywood, C. (2020). The valuation and demand impacts of the worthwhile use of travel time with specific reference to the digital revolution and endogeneity. *Transportation*, 47(3), 1515–1540. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10059-x>
- Wener, R. E., Evans, G. W. (2011). Comparing stress of car and train commuters. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 14(2), 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2010.11.008>
- Yang, D., Kuijpers, A., Dane, G., van der Sande, T. (2019). Impacts of large-scale truck platooning on Dutch highways. *Transportation research procedia*, 37, 425-432.
- Yang, S., Park, J., Abdel-Aty, M. (2023). Driver behaviour and experience around automated freight vehicle platoons. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Transport* 176:3, 165–197, <https://doi.org/10.1680/jtran.22.00039>
- Yu, H., Jiang, R., He, Z., Zheng, Z., Li, L., Liu, R., Chen, X. (2021). Automated vehicle-involved traffic flow studies: A survey of assumptions, models, speculations, and perspectives. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 127, 103101. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103101>
- Yueshuai He, B., Jiang, Q., Ma, J. (2022). Connected automated vehicle impacts in Southern California part-I: Travel behavior and demand analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109, 103329. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103329>
- Zhang, Y., Chen, X., Yu, L. (2020). Evaluating the emission and energy impacts of automated buses on urban expressways. *Transportation Research Record*, 2674(12), 515-529.
- Zhang, Z., Liu, H., Lei, M., Yan, X., Wang, M., Hu, J. (2023). Review on the impacts of cooperative automated driving on transportation and environment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 115, 103607.
- Zhou, S. Y., Sun, X., Liu, B. J., Burnett, G. (2022). Factors Affecting Pedestrians' Trust in Automated Vehicles: Literature Review and Theoretical Model. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 52(3), 490–500. <https://doi.org/10.1109/thms.2021.3112956>
- Zhu, S., Meng, Q. (2022). What can we learn from autonomous vehicle collision data on crash severity? A cost-sensitive CART approach. *Accident Analysis & Prevention*, 174, 106769. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106769>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM

p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 000-000-000-000-0

ISSN 0000-0000 (verkojulkaisu)

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto