

Sähköautojen liikenneturvallisuus

Kirjallisuuskatsaus

Antonio Fadel da Costa

Ida Maasalo



Julkaisupäivämäärä
25.4.2025

Julkaisun nimi
Sähköautojen liikenneturvallisuus: kirjallisuuskatsaus

Tekijät
Antonio Fadel da Costa ja Ida Maasalo

Toimeksiantaja ja asettamispäivämäärä

Julkaisusarjan nimi ja numero
Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä 25/2024
ISSN (verkkojulkaisu) 2669-8781
ISBN (verkkojulkaisu) 978-952-311-945-1

Asiasanat
Sähköauto, ajosuorite, onnettomuusriski, tekniset viat

Tiivistelmä

Tämä tutkimus tarkastelee täyssähköautojen turvallisuutta kirjallisuuskatsauksen avulla. Sähköautojen määrä kasvaa Suomessa - samoin kuin sähköauto-onnettomuuksien määrä. Siksi on tärkeää ymmärtää sähköautojen liikenneturvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Katsauksessa esitellään tutkimuksia sähköauton kuljettajien ajokäyttäytymisestä, ajosuoritteesta ja onnettomuusriskistä sekä autojen teknisistä vioista ja törmäysturvallisuudesta. Lisäksi arvioidaan, mitä tutkimusten perusteella voi päätellä sähköautojen liikenneturvallisuudesta ja miten tutkimustulokset soveltuvat Suomeen.

Tulokset viittaavat siihen, että sähköautojen kuljettajien ajotapa saattaa olla vähemmän aggressiivinen verrattuna polttomoottoriautojen kuljettajiin. Löydetyissä tutkimuksissa oli kuitenkin heikkoutena itse tutkimusmenetelmä ja vanha aineisto, tai tutkimuksen kohderyhmä ei ollut yksityisautoilijat. Tulevissa tutkimuksissa olisi tärkeää tarkastella sähköautojen vaikutusta kuljettajien ajokäyttäytymiseen nykypäivänä – myös talvisissa olosuhteissa, joiden vaikutuksesta ei löytynyt tutkimustuloksia.

Ajosuorite vaikuttaa olennaisesti onnettomuuskertymään, mutta tutkimusten valossa sähköautojen vaikutus liikennesuoritteeseen nykypäivänä, ja erityisesti Suomessa, jää hyvin epävarmaksi. Löydetty tutkimukset olivat jo verrattain vanhoja, perustuivat pieneen aineistoon tai itseraportoituihin tuloksiin.

Sähköautoilun onnettomuusriskiä tarkasteltiin viidessä tutkimuksessa. Tulokset viittaavat siihen, että onnettomuudet, joissa on jalankulkijoita ja pyöräilijöitä osallisena, ovat tyypillisempiä sähköautojen kuljettajille kuin polttomoottoriautojen kuljettajille. Suojaamattomien tienkäyttäjien onnettomuusriskiä koskevien päätelmien tueksi tulisi kuitenkin olla enemmän tietoa onnettomuuksien syistä. Onnettomuusriskiä tarkastelleissa tutkimuksissa oli yleisesti puutteita taustatekijöiden kontrolloimisessa, koskien esimerkiksi kuljettajan ja ajoneuvon ominaisuuksia sekä liikenneympäristöä. Onnettomuusriskiä tulisi tulevaisuudessa tutkia suomalaisten aineistojen pohjalta nämä tekijät huomioiden.

Tutkimukset kuvaavat kattavasti sähköautojen mahdollisia teknisiä vikoja, joilla voi olla liikenneturvallisuusvaikutuksia. Näitä ovat esimerkiksi akkupalot sekä maasulku- ja invertteriviat. Tutkimustietoa vikojen yleisyydestä ei kuitenkaan löytynyt.

Tutkimukset sähköautojen törmäysturvallisuudesta ovat ristiriitaisia. Yleisesti voi todeta, että vaikka olemassa oleva kirjallisuus tunnistaa sähköautojen törmäysturvallisuuteen liittyviä riskejä (esimerkiksi sähköiskut ja palovammat), tarvitaan lisätutkimuksia niiden todennäköisyyden selvittämiseksi ja estämistoimenpiteiden kehittämiseksi.

Olemassa olevan tutkimuksen valossa ei voi sanoa, tuleeko sähköautojen yleistyminen parantamaan vai huonontamaan liikenneturvallisuutta. Sähköautoilun liikenneturvallisuutta tulisi tutkia lisää suomalaisiin aineistoihin perustuen.

Yhteyshenkilö
Riikka Rajamäki, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

Raportin kieli
suomi

Luottamuksellisuus
Julkinen

Kokonaissivumäärä
39

Jakaja
Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

Kustantaja
Liikenne- ja viestintävirasto Traficom



Utgivningsdatum
25.4.2025

Publikation
Elbilars trafiksäkerhet: litteraturöversikt

Författare
Antonio Fadel da Costa, Ida Maasalo

Tillsatt av och datum

Publikationsseriens namn och nummer
Traficoms forskningsrapporter och utredningar 25/2024
ISSN (elektronisk publikation) 2669-8781
ISBN (elektronisk publikation) 978-952-311-945-1

Ämnesord
Elbil, körbeteende, olycksrisk, tekniska fel

Sammandrag

Denna studie undersökte elbilars säkerhet genom en litteraturöversikt. Antalet elbilar ökar i Finland, liksom antalet olyckor som involverar elbilar. Därför är det viktigt att förstå de faktorer som påverkar elbilars trafiksäkerhet. Rapporten presenterar forskningsresultat om elbilsförarens körbeteende, exponering och olycksrisk samt om elbilars tekniska fel och kollisionssäkerhet. Dessutom bedöms vilka slutsatser som kan dras om elbilars trafiksäkerhet på basis av forskningsresultaten och hur dessa resultat kan tillämpas för Finland.

Tidigare forskningsresultat tyder på att körstilen kan vara mindre aggressiv hos förare av elbilar än förbränningsmotorbilar. De granskade studierna begränsades dock ofta av metodologiska svagheter, föråldrad data eller att målgruppen för studien inte var privatbilstater. Framtida forskning bör undersöka hur elbilar påverkar förarens beteende i dagens trafik, även under vinterförhållanden, för vilka inga forskningsresultat hittades.

Exponering har en betydande inverkan på antalet trafikolyckor, men på basis av tidigare forskningsresultat är det fortfarande oklart hur elbilar påverkar exponering, särskilt i Finland. De granskade studierna var föråldrade eller baserade på små mängder data eller självrapporterade resultat.

Litteraturöversikten inkluderar fem studier som undersökte elbilars olycksrisk. Resultaten tyder på att olyckor med fotgängare och cyklister är vanligare för förare av elbilar än förbränningsmotorbilar. Det behövs mer olycksdata för att kunna dra tillförlitliga slutsatser om elbilars effekt på oskyddade trafikanter olycksrisk. Dessutom saknade de granskade studierna i allmänhet kontroll för bakgrundsfaktorer, såsom förar- och fordonsegenskaper eller trafikmiljön. Framtida forskning om elbilars olycksrisk bör därför utnyttja finländsk olycksdata och kontrollera för bakgrundsfaktorer.

Tidigare forskningsresultat beskriver på ett heltäckande sätt potentiella tekniska fel i elbilar som kan påverka trafiksäkerheten, såsom batteribränder och problem med jordfel eller växelriktare. Tyvärr hittades inga forskningsresultat om förekomsten av sådana defekter.

Tidigare forskningsresultat var motstridiga angående elbilars krocksäkerhet. Även om forskningsresultaten identifierar risker relaterade till elbilars krocksäkerhet (t.ex. elektriska stöter och brännskador), behövs ytterligare forskning för att fastställa deras sannolikhet och för att utveckla förebyggande åtgärder.

Baserat på tidigare forskningresultat kan det inte avgöras om den ökande förekomsten av elbilar kommer att förbättra eller försämra trafiksäkerheten. Sammanfattningsvis bör elbilars trafiksäkerhet utredas närmare på basis av data från Finland.

Kontaktperson Riikka Rajamäki, Transport- och kommunikationsverket Traficom
Språk finska
Sekretessgrad Offentlig
Sidonantal 39
Distribution Transport- och kommunikationsverket Traficom
Förlag Transport- och kommunikationsverket Traficom



Date of publication
25.4.2025

Title of publication
Traffic safety of electric vehicles: a literature review

Author (s)
Antonio Fadel da Costa, Ida Maasalo

Commissioned by, date

Publication series and number
Traficom Research Reports 25/2024
ISSN (e-publication) 2669-8781
ISBN (e-publication) 978-952-311-945-1

Keywords
EV, safety, driving behaviour, exposure, accident risk, technical faults, collision

Abstract

This study examines the safety of electric vehicles (EVs) through a literature review. The number of EVs is increasing in Finland, as is the number of accidents involving these vehicles. Therefore, it is important to understand the factors affecting the traffic safety of EVs. The report presents studies on driving behaviour, exposure, and accident risk associated with EVs, as well as on technical faults and collision safety. Additionally, it assesses what conclusions can be drawn about EV traffic safety based on existing research and how these findings apply to Finland.

Previous research results suggest that the driving behaviour of EV drivers may be less aggressive than that of internal combustion engine vehicle (ICEV) drivers. However, previous studies were often limited by methodological weaknesses, outdated data, or a focus on non-private drivers. Further research should examine the impact of EVs on driver behaviour, including in winter conditions, for which no research findings were identified.

Exposure significantly influences the number of accidents. However, based on previous studies, the impact of EVs on exposure, particularly in Finland, remains uncertain. The identified studies were outdated, based on small datasets, or relied on self-reported results.

The accident risk of EVs was examined in five studies included in the review. The results indicate that accidents involving pedestrians and cyclists are more common for EV drivers compared to ICEV drivers. However, to draw more robust conclusions about the accident risk associated with unprotected road users, more data on accidents and their causes is needed. Additionally, studies examining accident risk generally lacked control for background factors, such as driver and vehicle characteristics, or traffic environment. Future research on accident risk should utilize Finnish datasets while accounting for these factors.

Previous studies comprehensively describe potential technical faults in EVs that may affect traffic safety, such as battery fires and ground fault or inverter issues. Unfortunately, no research results were found on the prevalence of such faults.

Previous studies on the collision safety of EVs presented contradictory findings. In general, while existing literature identifies risks related to EV crash safety (e.g., electric shocks and burn injuries), further research is needed to determine their likelihood and to develop preventive measures.

Based on existing research results, it cannot be determined whether widespread EV adoption will improve or worsen traffic safety. In conclusion, further research on the traffic safety of EVs should be conducted using Finnish datasets.

Contact-person Riikka Rajamäki, Finnish Transport and Communication Agency Traficom
Language Finnish
Confidence status Public
Pages, total 39
Distributed by Finnish Transport and Communication Agency Traficom
Published by Finnish Transport and Communication Agency Traficom

Alkusanat

Siirtyminen polttomoottoriautoista sähköautoihin on tärkeää liikenteen päästöjen vähentämiseksi. Sähköautojen yleistymisellä voi olla ympäristövaikutusten lisäksi vaikutuksia liikenneturvallisuuteen. Traficom teetti Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:llä tämän kirjallisuuskatsauksen, jotta saadaan käsitys nykyisestä aiheesta koskevasta tietämyksestä ja voidaan arvioida, onko tarvetta tarkemmille tutkimuksille.

Tämän kirjallisuuskatsauksen ovat laatineet Antonio Fadel da Costa ja Ida Maasalo VTT:ltä. Lisäksi Ari Hentunen ja Fanny Malin VTT:ltä kommentoivat työtä. Niina Sihvola ja Timo Kari Liikennevakuutuskeskuksesta toimittivat tilastoaineistoa sähköautojen vahingoista. Työn tilaajana toimi Riikka Rajamäki Liikenne- ja viestintävirasto Traficomista. Useat Traficomin työntekijät ovat kommentoineet tämän tutkimuksen luonnosversiota.

Helsinki, 25. huhtikuuta 2025

Riikka Rajamäki

Erityisasiantuntija

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

Sisällys

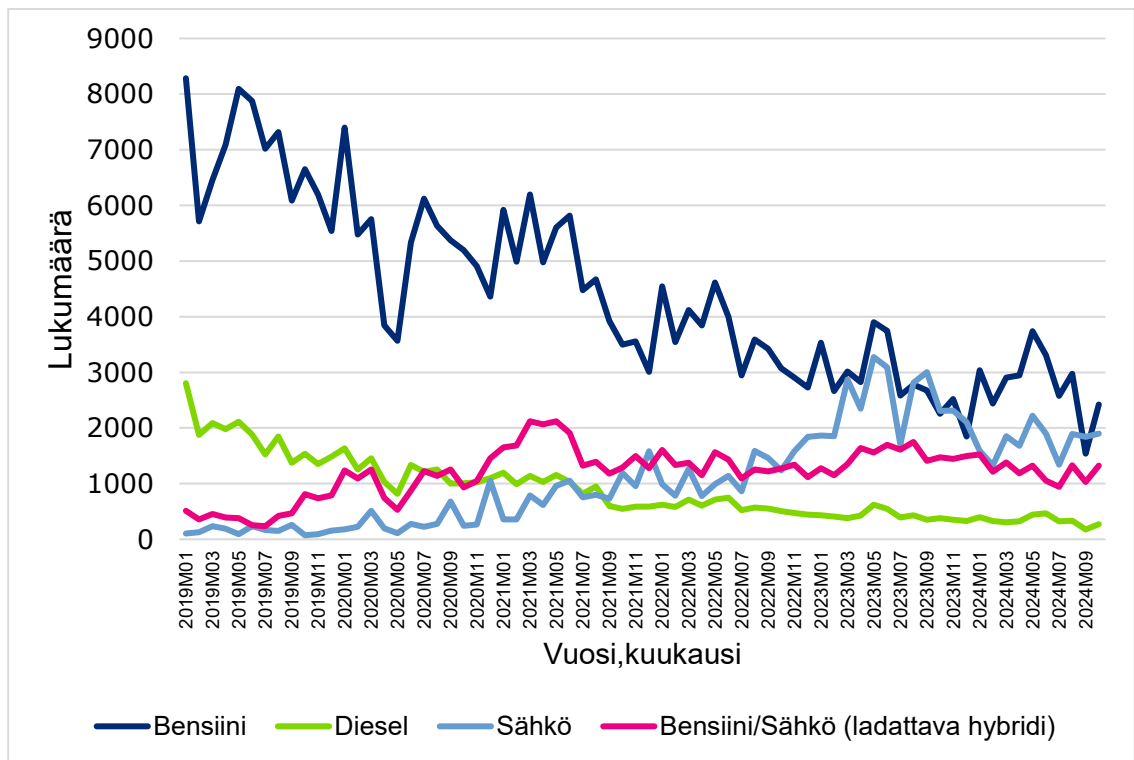
1	Johdanto	9
2	Menetelmät.....	13
3	Tulokset	14
3.1	Kuljettajien ajokäyttäytyminen	14
3.2	Ajosuorite	16
3.3	Onnettomuusriski ja taustatekijät	17
3.4	Teknisten vikojen turvallisuusvaikutukset	21
3.5	Törmäysturvallisuus	23
3.5.1	Massan vaikutus onnettomuuksien seurauksiin	23
3.5.2	Akkujen ja suurjännitejärjestelmien vaikutus onnettomuuksien seurauksiin.....	23
3.5.3	Yleinen törmäysturvallisuus.....	24
4	Johtopäätökset	26
4.1	Kuljettajien ajokäyttäytyminen	26
4.2	Ajosuorite	27
4.3	Onnettomuusriski ja taustatekijät	28
4.4	Teknisten vikojen turvallisuusvaikutukset	30
4.5	Törmäysturvallisuus	31
4.6	Yhteenveto	32
5	Lähteet.....	35

1 Johdanto

Henkilöautokannan sähköistymisellä on todennäköisesti liikenneturvallisuusvaikutuksia. Näiden vaikutusten ymmärtäminen ja ennakoiminen on tärkeää. Tässä kirjallisuuskatsauksessa kootaan tutkittua tietoa erityisesti täyssähköisten henkilöautojen liikenneturvallisuudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä.

Liikenteen sähköistyminen etenee Suomessa. Täyssähköautojen ensirekisteröintien määrä kasvoi noin vuoden 2023 alkuun asti, jonka jälkeen trendi on tasaantunut (Kuva 1). Bensiinillä ja dieselillä kulkevien autojen rekisteröinnit ovat vähentyneet tasaisesti. Tämä heijastanee muutoksia paitsi kulluttajien mieltymyksissä myös päästömääräyksissä, jotka ovat saaneet autonvalmistajat siirtymään sähköisiin käyttövoimiin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Mahdollisesti myös sähköauton hankintatuki, ja sen päättyminen, ovat vaikuttaneet autojen hankintaan.

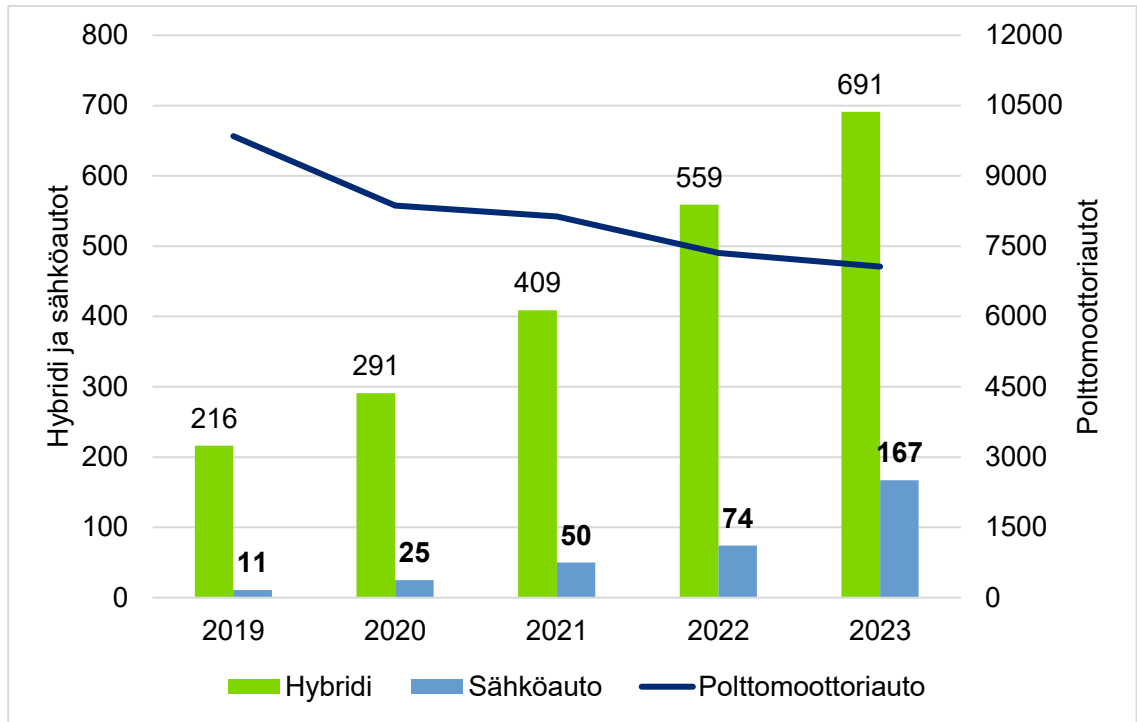
Euroopan unioni on asettanut tavoitteeksi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna ja Euroopan komission lanseeraama "Fit for 55" -lainsäädäntöpaketti tähtää EU:n ilmastoneutraaliuden saavuttamiseen vuoteen 2050 mennessä. Yksi keino tämän tavoitteen saavuttamiseksi on polttomoottoriajoneuvojen myynnin kieltäminen vuoteen 2035 mennessä (Euroopan komissio, 2023). EU:ssa tehdyt päätökset sitovat myös Suomea. Tavoitteena on, että Suomen kasvihuonepäästöt olisivat puolet pienemmät vuonna 2030 verrattuna vuoteen 2005 ja, että liikenne olisi päästötöntä vuoteen 2045 mennessä (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2021).



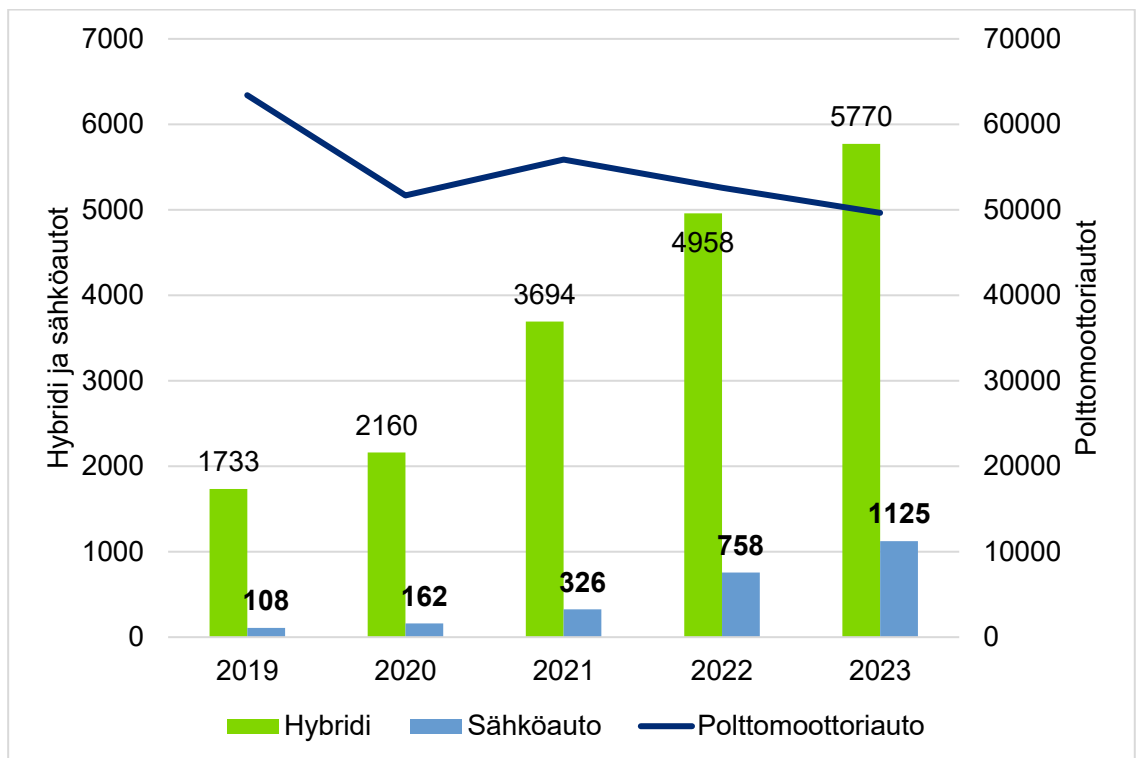
Kuva 1. Henkilöautojen ensirekisteröinnit käyttövoiman mukaan Suomessa (Tilastokeskus, 2024)

Siirtyminen sähköajoneuvoihin on tärkeä askel liikenteen päästöjen vähentämisessä, mutta samalla tulee huomioida vaikutukset liikenneturvallisuuteen. Esimerkiksi sähköajoneuvojen hiljaisuus, akkuteknikka, törmäysturvallisuus ja ajokäyttäytymiseen vaikuttavat tekijät tuovat mukaan uusia piirteitä, jotka on hyvä huomioida liikenneturvallisuuden kannalta.

Kuvissa 2 ja 3 on esitetty Liikennevakuutuksen riskitutkimuksen tietoja erikseen täyssähkö-, hybridi- ja polttomoottorihenkilöautojen osalta (Liikennevakuutuskeskus, 2024). Riskitutkimus on tehty liikennevakuutetuille ajoneuvoille tapahtuneiden vahinkojen tilastoaineiston perusteella. Se sisältää tietoja vain liikennevahingon aiheuttajaosapuolista. Kuvassa 2 ovat henkilövahinkoon johtaneet onnettomuudet ja Kuvassa 3 omaisuusvahinkoon johtaneet onnettomuudet auton käyttövoiman mukaan. Kuvista nähdään, että vaikka polttomoottoriautokuljettajilla on paljon enemmän onnettomuuksia, niiden määrä on laskeva. Sen sijaan täyssähkö- ja hybridiautokuljettajien aiheuttamien onnettomuuksien määrä on kasvava.



Kuva 2. Liikennevakuutuksesta korvattujen henkilövahinkoon johtaneiden onnettomuuksien määrä, joissa hybridi-, polttomoottori- tai sähköhenkilöauto oli aiheuttajana. Huomaa polttomoottoriautojen asteikko oikeassa reunassa.



Kuva 3. Liikennevakuutuksesta korvattujen omaisuusvahinkoon johtaneiden onnettomuuksien määrä, joissa hybridi-, polttomoottori- tai sähköhenkilöauto oli aiheuttajana. Huomaa polttomoottoriautojen asteikko oikeassa reunassa.

Tieliikenneturvallisuuden osalta EU:n tavoite on vakavien tieliikenteessä tapahtuvien vammautumisten ja kuolemien puolittaminen vuosien 2019 ja 2030 välillä sekä liikennekuolemien vähentäminen nollaan vuoteen 2050 mennessä (Euroopan komissio, 2020). Myös Suomen liikenneturvallisuustyötä ohjaavassa Liikenneturvallisuusstrategiassa tavoiteaika nollavisiolle on vuosi 2050 (Rekola ym., 2022). Nollavision mukaan kenenkään ei tulisi kuolla tai loukkaantua vakavasti liikenteessä.

Liikenneturvallisuuden voi esittää kolmena ulottuvuutena: altistuminen onnettomuuksille, onnettomuusriski ja onnettomuuksien seuraukset (Nilsson, 2004). On hyvä huomioida, että muutokset liikennejärjestelmässä voivat vaikuttaa liikenneturvallisuuteen kaikkien näiden kolmen ulottuvuuden kautta (Kulmala, 2010). Tämän raportin tavoitteena on tarjota kattava ymmärrys sähköautojen vaikutuksista altistumiseen (ajosuoritteeseen), onnettomuusriskiin ja onnettomuuksien seurauksiin kirjallisuuskatsauksen avulla. Pyrkimyksenä katsauksessa on vastata seuraaviin kysymyksiin:

- Kuljettajien ajokäyttäytyminen
 - Eroavatko keskimääräiset ajonopeudet sähköautoilla ajavien ja polttomootoriautoilla ajavien välillä?
 - Miten sähköautojen kuljettajat hyödyntävät sähköautojen kiihtyvyyttä?
 - Miten sähköautojen tekniset erityispiirteet (esimerkiksi suurempi kiihtyvyys, regeneraation vaikutukset ja ikkunoiden huurtuminen) vaikuttavat ajokäyttäytymiseen talvisissa olosuhteissa?
- Vaikutus ajosuoritteeseen
 - Miten sähköautot vaikuttavat ajosuoritteeseen? Eroavatko esimerkiksi sähköautoilla tehtyjen matkojen määrät tai pituus polttomootoriautojen vastaavista?
- Onnettomuusriski ja onnettomuuksien taustatekijät
 - Millainen onnettomuusriski sähköautoiluun liittyy ja mitkä tekijät korostuvat? Miten sähköautoilun riski eroaa polttomootoriautoista, kun huomioidaan myös mahdolliset erot kuljettajaryhmissä?
 - Lisäävätkö sähköautot erityisesti suojaamattomien tienkäyttäjien liikenneturvallisuusriskiä, esimerkiksi hiljaisen äänen takia?
- Teknisten vikojen turvallisuusvaikutukset
 - Kuinka yleisiä ja minkä tyyppisiä ovat sähköautojen turvallisuuteen vaikuttavat tekniset viat verrattuna vastaavan ikäisiin polttomootoriautoihin? Miten nämä tekniset viat vaikuttavat onnettomuusriskiin?

- Törmäysturvallisuus
 - Miten sähköautojen suurempi massa vaikuttaa onnettomuuksien vakavuuteen?
 - Millaisia akkujen ja suurjännitejärjestelmien turvallisuusvaikutuksia sähköautoiluun liittyy?
 - Mitä muita erityispiirteitä sähköautojen törmäysturvallisuuteen liittyy verrattuna samanikäisiin polttomoottoriautoihin?

Raportin rakenne on seuraava: Luvussa 2 esitellään käytetty menetelmä ja lähestymistapa. Luvussa 3 esitetään pääasialliset kirjallisuuskatsauksen havainnot sähköautojen liikenneturvallisuudesta. Luku 4 sisältää yhteenvedon raportin keskeisistä löydöksistä ja niiden laadusta, sekä arvion tulosten soveltuvuudesta Suomeen.

2

Menetelmät

Tämän tutkimuksen tulokset perustuvat laajaan kirjallisuuskatsaukseen. Katsauksessa painotettiin vertaisarvioituja tieteellisiä julkaisuja viimeisen kymmenen vuoden ajalta, jotka käsittelevät täyssähköautojen liikenneturvallisuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Kirjallisuuskatsauksen pääasiallisena lähteenä toimi Scopus, josta haettiin sähköautojen liikenneturvallisuuteen liittyviä tutkimuksia esimerkiksi seuraavilla hakusanoilla: TITLE ("electric") AND TITLE ("vehicle" OR "car") AND TITLE ("adopt*" OR "driver" OR "behaviour" OR "habit" OR "exposure" OR "fault" OR "fire" OR "safety" OR "security" OR "collision" OR "crash*" OR "accident" OR "claim" OR "risk"). Katsaukseen valittiin julkaisuja, jotka vastasivat tämän raportin tutkimuskysymyksiin. Valinta tapahtui asiantuntija-arvion pohjalta esimerkiksi otsikoita ja tiivistelmiä tarkastamalla. Julkaisut, jotka keskittyivät pääasiassa autoteollisuuden teknologiseen kehitykseen (esimerkiksi sähkömoottorien suunnittelu tai vikojen tunnistusanturit) jätettiin katsauksen ulkopuolelle. Seulonta- ja valintaprosessi rajasi tarkastelun lopulta 15 tutkimukseen.

Aiheeseen liittyviä julkaisuja haettiin myös ns. "lumipallomenetelmällä" etsittäessä lisälähteitä vastaamaan katsauksen teon aikana esiin nousseisiin lisäkysymyksiin. Tämän jälkeen katsaukseen lisättiin 5 lisätutkimusta, mikä nosti kokonaismäärän 20 tutkimukseen. Näistä mukaan valituista referoiduista tutkimuksista raportoitiin saatavilla olevat tiedot menetelmistä, tietolähteistä, otoskoosta, julkaisuvuodesta ja siitä missä tutkimus oli tehty.

3 Tulokset

3.1 Kuljettajien ajokäyttäytyminen

Tässä luvussa esitellään tutkimuksia, joissa tarkasteltiin, eroavatko sähköauton kuljettajien ja perinteisten polttomoottoriautojen kuljettajien ajokäyttäytyminen toisistaan. Tarkasteltuja tekijöitä olivat esimerkiksi ajonopeus ja kiihdytyskäyttäytyminen, jotka voivat vaikuttaa liikenneturvallisuuteen.

McDonnell ym. (2024) tutkivat täyssähköautojen kuljettajien ajokäyttäytymistä verrattuna hybridi- ja polttomoottoriautojen kuljettajiin. Tutkimuksessa käytettiin Alankomaissa kerättyä telematiikkatietokantaa, joka sisälsi 125 miljoonaa ajomatkaa 14 642 kaupallisen ajoneuvokannan autoista, joista 830 oli täyssähköautoja ja 1 344 hybridisähköautoja. Tutkimuksessa ei jaettu tarkempaa tietoa tietokannan ajoneuvojen käyttötarkoituksesta, mutta kaupalliseen ajoneuvokantaan voi sisältyä esimerkiksi taksiliikenteessä sekä tavaroiden kuljetus- ja -postipalveluissa hyödynnetyt ajoneuvot. Myöskään kuljettajien demografisia tietoja ei kerrottu tutkimuksessa. Telematiikkatietokanta kattoi ajanjakson tammikuusta 2022 lokakuuhun 2022.

McDonnell ym. (2024) tutkimuksessa havaittiin, että kuljettajien ajokäyttäytyminen vaihteli käyttövoiman mukaan. Polttomoottoriautojen kuljettajille rekisteröityjen ajotapahtumien mediaani yhdellä matkalla oli 1,28 äkillistä kiihdytystä, 0,34 äkillistä jarrutusta, 0,20 ylinopeutta ja 1,94 äkillistä kaarreaajoa (harsh cornering manoeuvres). Sen sijaan täyssähköautojen kuljettajille kirjattujen tapausten mediaani oli hieman pienempi: 1,25 äkillistä kiihdytystä, 0,32 äkillistä jarrutusta, 0,14 ylinopeutta ja 1,79 äkillistä kaarreaajoa. Hybridiautojen kuljettajilla vastaavat luvut olivat vielä pienemmät: 0,87 äkillistä kiihdytystä, 0,29 äkillistä jarrutusta, 0,16 ylinopeutta ja 1,63 äkillistä kaarreaajoa. Nämä kaikki erot ajoneuvoryhmien välillä olivat tilastollisesti merkitseviä (Dunnin testissä $p < 0,05$), pl. täyssähköautojen ja hybridien ero jarrutuksissa. McDonnell ym. (2024) perustuu kattavaan aineistoon, mutta sen keskeinen puute on se, että siinä käytössä ei ollut yksityisautoilijoiden ajotapamittauksia.

Wang ym. (2020) kyselytutkimuksessa verrattiin sähköautojen (mukaan lukien täyssähköautot, hybridiautot ja ladattavat hybridit) kuljettajien ajokäyttäytymistä polttomoottoriautojen kuljettajiin. Kyselyyn vastasi 347 henkilöä Yhdysvalloista, joista 212 (61 %) oli polttomoottoriautojen kuljettajia, 52 (15 %) ladattavien hybridien kuljettajia, 41 (12 %) täyssähköautojen kuljettajia ja 28 (8 %) hybridisähköautojen kuljettajia. Aineisto kerättiin vuonna 2016 huhtikuun ja kesäkuun välillä.

Wang ym. (2020) kyselyssä kysyttiin viisiportaisella asteikolla, miten vastaaja kokee, että hänen ajotapansa on muuttunut sen jälkeen, kun hän on hankkinut nykyisen autonsa (rauhallisempi/hitaampi vr. aggressiivisempi/nopeampi). Tulosten mukaan kaikissa kolmessa tarkastellussa ajokäyttäytymisen osa-alueessa (ajonopeus, kiihdyttäminen ja jarruttaminen) täyssähköautojen kuljettajat erosivat tilastollisesti merkittävästi polttomootoriautojen kuljettajista: täyssähköautojen kuljettajat raportoivat ajavansa nykyisellä autollaan (verrattuna aiempaan) keskimäärin maltillisempaa ajonopeutta sekä kiihdyttävänsä ja jarruttavansa rauhallisemmin verrattuna polttomootoriautojen kuljettajien vastauksiin (Fischerin testin $p < 0,05$). Hybridiautojen kuljettajien tulokset olivat samansuuntaisia, kuin täyssähköauton kuljettajilla, mutta hybridiautojen kuljettajien vertailu polttomootoriautojen kuljettajiin ei ollut merkitsevä. Kyselyn tulosten mukaan täyssähköautojen ja ladattavien hybridien kuljettajat osoittivat suurempaa halukkuutta priorisoida energiansäästöä matka-ajan lyhentämisen sijaan verrattuna polttomootoriautojen kuljettajiin. On kuitenkin hyvä huomata, että Wang ym. (2020) tutkimus perustuu melko pieneen ja vanhahkoon aineistoon, joka heikentää sen merkitystä.

Labeye ym. (2016) tutkivat täyssähköautojen kuljettajien ajotapojen muutoksia keräämällä tietoa 36 tutkimukseen osallistuneen kuljettajan itse raportoimista ajokokemuksista. Tutkimuksen osallistujat ajoivat täyssähköautoa kuuden kuukauden ajan Pariisissa, Ranskassa. Osallistujista 27 (75 %) ei ollut ajanut sähköautoa aikaisemmin. Kokeen päätyttyä 19 (52 %) osallistujista ilmoitti mukauttaneensa ajotapaansa joustavammaksi eli ajaneensa sähköautolla pehmeämmin ja vähemmän aggressiivisesti verrattuna aiempaan ajotapaan. Tutkijat arvelivat tuloksen selittyvän sillä, että sähköautojen regeneratiivinen jarrutus ja yhden polkimen käyttömahdollisuus tekevät ajamisesta ennakoivampaa ja pehmeämpää. Regeneratiivisessa jarrutuksessa syntyvä energia palautetaan akun lataamiseen, ja yhden polkimen käyttömahdollisuus mahdollistaa ajoneuvon hidastamisen vähentämällä painetta kaasupolkimella ilman, että jarrupoljinta tarvitsee käyttää. Tutkimuksen osallistujista 7 (19 %) kertoi kokeen jälkeen kokevansa ajaneensa aiempaa turvallisemmin täyssähköautoa käyttäessään, kuten ennakoiden paremmin etäisyyksiä ja jarruttaen rauhallisemmin.

Labeye ym. (2016) tutkimukseen osallistuneista 36 sähköauton kuljettajasta 10 (28 %) raportoi, että jalankulkijat eivät ajoittain huomanneet lähestyvää sähköautoa lainkaan tai huomasivat sen vasta aivan lähietäisyydeltä. Tutkimuksessa 14 (39 %) sähköauton kuljettajista kertoi mukauttaneensa ajokäyttäytymistään ja olevansa tarkkaavaisempia jalankulkijoita kohtaan ajoneuvon hiljaisen äänen takia.

Labeye ym. (2016) tutkimuksen pieni aineisto ja itseraportointi tutkimusmenetelmänä tekevät tuloksista heikot. On myös hyvä huomata, että sähköautot ovat muuttuneet tutkimusajankohdasta samoin kuin mahdollisesti

niiden käyttäjäkunta. Labeye ym. (2016) tutkimuksen tulokset eivät ole siis kovin merkittäviä, etenkin nykypäivänä.

Sähköautoihin liittyy teknisiä erityispiirteitä, kuten suurempi kiihtyvyys ja regeneraation hyödyntäminen jarruttamisessa, jotka voisivat vaikuttaa kuljettajien ajokäyttäytymiseen ja onnettomuusriskiin talviajan liikenteessä, kuten liukkailla teillä. Siksi olisi tärkeää tietää sähköautojen kuljettajien ajokäyttäytymisestä talviolosuhteissa, jotka Suomessa ovat tyypillisiä. Kirjallisuushaku ei kuitenkaan löytänyt tutkimuksia, joissa olisi keskitytty sähköautojen ominaisuuksien liikenneturvallisuusvaikutuksiin talvella tai talvissa olosuhteissa.

3.2 Ajosuorite

Tässä luvussa esitetään tutkimuksia, joissa tarkasteltiin sähköautoilla ajavien ajosuoritetta. Onnettomuuksien kertymään ja taustatekijöihin vaikuttaa olennaisesti se, kuinka paljon ja millaisessa liikenneympäristössä ajosuoritetta kertyy.

Feng ym. (2024) tarkastelivat tutkimuksessaan kotitalouksien matkamääriä ja -suoritetta hyödyntäen Yhdysvaltain vuoden 2017 kansallisesta kotitalouksien matkakyselystä saatua dataa. Tutkimuksessa vertailtiin kotitalouksia, joilla oli täyssähköauto, kotitalouksiin, joilla oli polttomoottoriauto. Tutkimuksen tulosten perusteella Kaliforniassa kotitaloudet, joilla oli vain täyssähköauto, ajoivat vähemmän vuosittaisia ajokilometrejä kuin kotitaloudet, joilla oli vain polttomoottoriauto. Lisäksi Kaliforniassa päivittäinen matkustus-aika oli lähes puoli tuntia vähemmän ja matkoja keskimäärin 1,5 vähemmän verrattuna talouksiin, joissa oli polttomoottoriauto. Muissa osavaltiossa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja ajoneuvotyyppien välillä ajokilometreissä päivittäisten matkojen määrässä, matka-ajassa tai matkan kestossa. Feng ym. (2024) arvelevat, että tutkimuksen tuloksiin saattoi vaikuttaa vuoden 2017 latausinfrastruktuurin rajoitteet, jotka saattoivat vähentää täyssähköautotalouksien pitkiä ajomatkoja. Feng ym. (2017) tuloksien yleistettävyys nykypäivään on todennäköisesti melko heikko, sillä nykyisin latausverkko ja täyssähköautojen toimintamatka on parempi (kts. esim. IEA, 2020).

McDonnell ym. (2024) tutkimuksessa (esiteltä edellisessä luvussa 3.1) käytetty Alankomaiden telematiikkatietokanta (125 miljoonaa ajomatkaa 14 642 kaupallisen ajoneuvokannan ajoneuvosta, joista 830 oli täyssähköautoja ja 1 344 hybridisähköautoja) osoitti, että täyssähköautoilla ja hybridisähköautoilla ajetaan keskimäärin vähemmän ajokilometrejä kuin polttomoottoriautoilla. Aineistona tässä olivat kuitenkin kaupallisessa käytössä olevat ajoneuvot.

Bauer (2018) tutkimuksessa tarkasteltiin täyssähköautojen vaikutusta kotitalouksien ajoneuvomäärään ja ajokilometreihin Norjassa. Tutkimus perustui verkkokyselyaineistoon, johon vastanneet rekrytoitiin Norjan ajoneuvorekisterissä olevien uusien autojen (ostettu vuoden 2011 jälkeen) omistajien joukosta. Kysely oli auki maaliskuussa ja huhtikuussa vuonna 2016. Kyselyyn vastanneista 5703 henkilöstä 2333 oli ostanut viimeksi täyssähköauton, 2260 polttomoottoriauton, 100 hybridin ja loput jonkun muun. Bauer (2018) tulosten mukaan täyssähköautojen omistajat raportoivat ajavansa uusilla autoillaan enemmän kuin polttomoottoriautojen omistajat. Tulos korostui erityisesti niissä talouksissa, joissa täyssähköautoa ei hankittu korvaamaan toista ajoneuvoa. Bauer (2018) tutkimus perustui laajaan, mutta jo kohtalaisen vanhaan aineistoon.

Labeye ym. (2016) tutkimuksessa 24 kuljettajaa (67 %) käytti sähköautoa matkoihin, jotka he olivat aiemmin tehneet kävellen tai pyöräillen ennen tutkimusta (tutkimuksessa 36 osallistujaa ajoi sähköautolla kuuden kuukauden ajan Pariisissa raportoiden ajokokemuksensa, kts myös luku 3.1). Liikennejärjestelmän kannalta ei ole toivottavaa, että lyhyitä matkoja tehtäisiin enemmän autolla, mutta toisaalta Labeyen ym. (2016) pienen tutkimuksen pohjalta ei voi tehdä vahvempia päätelmiä siitä, miten sähköautot vaikuttaisivat ajosuoritteeseen.

3.3 Onnettomuusriski ja taustatekijät

Tässä luvussa esitellään täyssähköautojen kuljettajien onnettomuusriskiä käsitelleitä tutkimuksia. Lisäksi huomioidaan kirjallisuudessa esiin nostettuja onnettomuusriskiin vaikuttavia taustatekijöitä. Luvussa pyritään lisäksi vastaamaan tutkimuskirjallisuuden valossa siihen, heikentävätkö sähköautot erityisesti jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden liikenneturvallisuutta. Tähän voisi vaikuttaa sekä sähköautojen hiljainen ääni että niiden tyypillinen kaupunkeihin painottuva käyttöympäristö.

Edwards ym. (2024) tutkivat, kuinka iso riski sähköauton (täyssähköauto tai hybridi, näitä ei eroteltu tutkimuksessa) ja polttomoottoriauton kuljettajilla on olla osallisena jalankulkijan loukkaantumiseen johtaneessa onnettomuudessa Iso-Britanniassa. Erikseen tarkasteltiin loukkaantumiseen johtaneen onnettomuuden riskiä kaupunkialueella ja maanteillä. Tutkimuksessa käytettiin kansallisia tilastoja sekä loukkaantumismääristä että ajoneuvokilometreistä, jotta saatiin vertailukelpoinen kuva eri ajoneuvotyyppien riskeistä vuosilta 2013–2017.

Edwards ym. (2024) tutkimuksen mukaan kyseisellä ajanjaksolla kirjattiin yhteensä 1 653 jalankulkijan loukkaantumiseen johtanutta onnettomuutta, joissa osallisena oli sähköauto (täyssähköauto tai hybridisähköauto), joista 1 559 tapahtui kaupunkiympäristössä. Samalla ajanjaksolla kirjattiin yhteensä 71 666 jalankulkijan loukkaantumiseen johtanutta onnettomuutta,

joissa osallisena oli polttomoottoriauto, joista 63 052 tapahtui kaupunkiympäristössä. Edwards ym. (2024) tutkimuksessa ajoneuvomailien vuodessa arvioitiin olevan 320 (100 milj.) sähköautoille ja 29 896 (100 milj.) polttomoottoriautoille kokonaisuudessaan. Kaupunkiympäristössä luvut olivat 121 (100 milj.) sähköautoille ja 13 182 (100 milj.) polttomoottoriautoille.

Edwards ym. (2024) tutkimuksen mukaan Poisson-regressiota hyödyntäen koko aineiston osalta jalankulkijoiden loukkaantumiseen johtaneiden onnettomuuksien määrä per 100 miljoonaa ajomailia oli 5,16 sähköautoille (95 % luottamusväli 4,92–5,42) ja 2,40 polttomoottoriautoille (95 % luottamusväli 2,38–2,41). Tämän mukaan jalankulkijoiden loukkaantumisriski sähköautojen kanssa oli yli kaksinkertainen polttomoottoriautoihin verrattuna ($RR=2,15$ (95% luottamusväli 2,05–2,26)).

Lisäksi Edwards ym. (2024) tutkimuksen mukaan vain kaupunkiympäristöä tarkastellessa jalankulkijoiden loukkaantumiseen johtaneiden onnettomuuksien määrä per 100 miljoonaa ajomailia oli 12,9 sähköautoille (95 % luottamusväli 12,3–13,5) ja 4,78 polttomoottoriautoille (95 % luottamusväli 4,75–4,82). Tämän mukaan jalankulkijoiden loukkaantumisriski sähköautojen kanssa kaupunkialueilla oli yli kaksi- ja puolikertainen polttomoottoriautoihin verrattuna ($RR=2,69$ (95 % luottamusväli 2,56–2,83)). Edwards ym. (2024). Maaseututeillä ei sen sijaan havaittu merkitsevää eroa sähköautojen ja polttomoottoriautojen onnettomuuksien välillä.

Edwards ym. (2024) arvelevat, että tutkimuksen tulokset voisivat johtua esimerkiksi siitä, että jalankulkijat eivät kuule sähköautoja kaupunkiolosuhteissa yhtä hyvin kuin polttomoottoriautoja. Sähköautoja voisivat myös ajaa nuoremmat ja kokemattomammat kuljettajat. Näiden arvelujen todenperäisyyttä ei kuitenkaan varsinaisesti tutkittu tässä tutkimuksessa.

McDonnell ym. (2024) tutkimuksessa tarkasteltiin kaupallisten ajoneuvojen kuljettajien liikennevakuutuksesta korvattuja onnettomuuksia aiheutettujen (kuljettajan ajoneuvon vakuutuksesta maksettiin vastapuolen vauriot) ja ei-aiheutettujen onnettomuuksien osalta Alankomaista ajalta tammikuusta lokakuuhun 2022. Analyysissä tarkasteltiin erikseen täyssähköautojen, hybridisähköautojen ja polttomoottoriautojen kuljettajia. Analyysissä hyödynnettiin myös telematiikkatietoja ajosuoritteesta (ks. luku 3.2) yhdistäen nämä tiedot vakuutuskorvaustietoihin. Vertaillen eroja eri ajoneuvoryhmien välillä analyysissä hyödyttiin logistista regressioanalyysiä. Tulosten mukaan täyssähköautojen kuljettajilla oli yli 20 % suurempi todennäköisyys aiheuttaa vakuutuskorvauksiin johtanut onnettomuus verrattuna polttomoottoriautojen kuljettajiin (kerroin 0,21, $p < 0,05$, josta laskien odds ratio = $\exp(0,21) \approx 1,23$, eli 23 %). Hybridisähköautojen kuljettajien kohdalla ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa verrattuna polttomoottoriautojen kuljettajiin (kerroin 0,09, $p = 0,28$). Logistisessa mallissa

huomioitiin myös kaupunkiajossa tapahtuneen ajosuoritteen määrä, eikä se vaikuttanut tuloksiin.

Wu ym. (2011) analysoivat jalankulkija- ja pyöräilijäonnettomuuksia 16 Yhdysvaltain osavaltiossa vuosilta 2000–2008. Käytetyssä tilastossa oli tiedot yhteensä 24 297 onnettomuudesta (joista 186 jalankulkijaonnettomuuksia ja 116 pyöräilijäonnettomuuksia), jossa oli osallisena hybridisähköauto ja 1 001 100 onnettomuudesta (joista 5 699 jalankulkijaonnettomuuksia ja 3 052 pyöräilijäonnettomuuksia), jossa oli osallisena polttomoottoriauto. Tutkimuksessa käytetyt ajoneuvot olivat Honda- ja Toyota-malleja, jotka olivat vuosimallia 2000 tai uudempia. Wu ym. (2011) tutkimuksessa onnettomuusriski laskettiin jalankulkijaonnettomuuksien osuutena kaikista onnettomuuksista ja tarkastelemalla suhteellisen riskiä (odds ratio) sähköautojen ja polttomoottoriautojen välillä.

Wu ym. (2011) tulosten mukaan hybridiautojen kuljettajilla oli 35 % (OR=1,35, 95 % luottamusväli 1,16–1,56) suurempi todennäköisyys olla osallisena jalankulkijaonnettomuuksissa ja lähes 60 % (OR=1,57, 95 % luottamusväli 1,30–1,89) suurempi todennäköisyys olla osallisena pyöräilijäonnettomuuksissa verrattuna polttomoottoriautojen kuljettajiin. Lisäksi hybridiautokuljettajilla oli noin 40 % (OR=1,39, $p < 0,01$) suurempi riski jalankulkijaonnettomuuksiin alueilla, joilla nopeusrajoitus on enintään 56 km/h, ja lähes 70 % (OR=1,66, 95% luottamusväli 1,34–2,05) suurempi riski hitaissa ajotilanteissa (kääntyminen, peruutus, hidastaminen/pysähtyminen, liikkeellelähtö sekä pysäköintialueelle ajo ja sieltä poistuminen). Yli 56 km/h nopeusrajoituksilla ei havaittu eroa jalankulkijaonnettomuuksien osalta hybridiautojen ja polttomoottoriautojen kuljettajien välillä. Wu ym. (2011) tutkimuksessa havaittiin myös, että hybridiautojen kuljettajilla oli noin 30 % suurempi todennäköisyys pyöräilijäonnettomuuksiin matalan ajonopeuden ajotilanteissa. Wu ym. (2011) arvelevat, että suurempi onnettomuusriski alhaisilla nopeuksilla voi johtua hybridiautojen hiljaisemmasta toiminnasta polttomoottoriautoihin verrattuna, mikä heikentää jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden mahdollisuutta havaita ajoneuvo. Varmempia päätelmiä Wu ym. (2011) tuloksia selittävistä tekijöistä ei voi kuitenkaan tehdä. On myös hyvä huomata, että Wu ym. (2011) tutkimuksessa tarkasteltiin hybridisähköautoja, ei täyssähköautoja. Tutkimus otettiin mukaan katsaukseen, koska oletettiin, että sen tulokset kertovat myös jotain täyssähköautojen onnettomuusriskistä erityisesti suojaamattomien tienkäyttäjien kanssa. Toki myös tutkimuksen vanhempi ikä heikentää sen merkitystä.

Karaaslan ym. (2018) tutkimuksessa hyödynnettiin simulaatioita tarkasteltaessa sähköautojen vaikutuksia jalankulkijoiden liikenneturvallisuuteen. Tutkimuksessa keskityttiin erityisesti mahdollisiin riskeihin, jotka voisivat liittyä sähköautojen hiljaiseen toimintaan alhaisilla nopeuksilla. Tutkimuksessa hyödynnettiin agenttipohjaista mallinnusmenetelmää AnyLogic-

ohjelmistolla simuloimaan oikean maailmaan signaalisoitua risteystä. Simulaatio sisälsi useita osia, kuten agenttien luomisen ja käyttäytymisen, dynaamiset parametrit kuten liikennevirta, ympäristön ääni- ja valaistusolosuhteet sekä kolaritapahtumien määrittelyn. Mallissa otettiin huomioon muun muassa se, kuinka kaukaa jalankulkijat voivat kuulla ajoneuvon äänen ja kuinka nopeasti ajoneuvo voi pysähtyä, jotta voitiin arvioida, kuinka suuri riski sähköautoihin voisi liittyä verrattuna polttomoottoriautoihin. Kaasalan ym. (2018) tulosten mukaan sähköautot aiheuttavat suuremman riskin jalankulkijoille kuin polttomoottoriautot erilaisissa liikenneympäristön ääni- ja valaistusolosuhteissa, erityisesti silloin, kun ympäristön äänitasot ovat korkeat ja valaistus on heikko.

Liu ym. (2022) tutkimuksessa käytettiin tieliikenneonnettomuusaineistoa Norjasta vuosilta 2011–2018 tarkastellessa niiden onnettomuuksien taustatekijöitä, joissa oli osallisena sähköauto (mukaan lukien täyssähköautot ja ladattavat hybridit). Onnettomuusaineistossa oli tiedot 35 441 polttomoottoriautojen onnettomuudesta ja 342 sähköautojen onnettomuudesta (täyssähköautot ja ladattavat hybridit yhteensä, erillisiä lukumääriä ei ilmoitettu). Liu ym. (2022) mukaan 50,9 % sähköautojen onnettomuuksista tapahtui kaupunkiteillä, kun vastaava osuus polttomoottoriautojen osalta oli 33,4 %. Nopeusrajoitukseltaan alle 80 km/h teillä tapahtuneiden onnettomuuksien osuus oli polttomoottoriautoilla 66,5 % ja sähköautoilla 80,7 %, kun taas 80 km/h tai korkeamman nopeusrajoituksen teillä tapahtuneiden onnettomuuksien osuus oli polttomoottoriautoilla 32,5 % ja sähköautoilla 19,3 %. Tutkijat havaitsivat, että 31,5 % sähköautojen onnettomuuksista sisälsi pyöräilijöitä tai jalankulkijoita, kun taas polttomoottoriautoilla vastaava luku oli 20,3 %. Onnettomuudet, joissa oli osallisena jalankulkijan tai pyöräilijän lisäksi sähköauto, olivat tutkimuksen mukaan yleensä vähemmän vakavia kuin onnettomuudet, joissa oli osallisena polttomoottoriauto.

Harmillisesti Liu ym. (2022) tutkimuksessa ei erikseen tarkasteltu niiden onnettomuuksien määriä, joissa oli jalankulkijoita ja pyöräilijöitä, kaupunkiteillä ja niiden ulkopuolella. On yleisesti tiedossa, että jalankulkijoita ja pyöräilijöitä kohtaa useammin kaupunkiympäristössä, jossa myös nopeudet ovat useammin matalampia. Se, että sähköauto-onnettomuuksissa oli useammin osallisena jalankulkijoita ja pyöräilijöitä, joiden vammat olivat kuitenkin vähemmän vakavia, voisi selittyä sillä, että sähköautojen onnettomuuksia ylipäättään oli enemmän kaupunkiteillä.

Liu ym. (2022) tutkimuksen tulosten mukaan sähköauto-onnettomuuksista 7,6 % tapahtui lumisilla tai jäisillä teillä, kun taas polttomoottoriautojen kohdalla osuus oli 14,8 %. Liu ym. (2022) arvelevat, että tämä saattaa johtua sähköautojen vähäisemmästä käytöstä kylmissä lämpötiloissa, koska akun suorituskyky heikkenee tällaisissa olosuhteissa. Tosin Norjassa talvisää on melko leuto, eikä kylmyyden merkitys akun kantamalle ole välttämättä kovin merkittävä.

Hou ym. (2023) tutkimuksessa hyödynnettiin samaa norjalaista aineistoa kuin Liu ym. (2022) tutkimuksessa, mutta vuosilta 2020 ja 2021. Myös Hou ym. (2023) mukaan suurin osa sähköauto-onnettomuuksista tapahtuu kaupunkialueilla ja teillä, joilla nopeusrajoitus oli 80 km/h tai alle, ruuhka-aikoina arkisin. Hou ym. (2023) sähköauto-onnettomuuksista 34,6 % oli peräänajoja, mikä teki niistä yleisimmän sähköautojen onnettomuustyyppin. Hou ym. (2023) tutkimuksessa ei täsmennetty, onko sähköauton kuljettaja näissä onnettomuuksissa se, joka ajaa toisen perään vai siinä ajoneuvossa, jonka perään ajetaan. Peräänajojen yleisyys voisi liittyä siihen, että sähköautoilla ajetaan paljon kaupunkiympäristössä. Hou ym. (2023) artikkelissa ei kuitenkaan kontrolloitu tätä tekijää.

Hou ym. (2023) pyrkivät myös tunnistamaan tärkeimmät tekijät, jotka vaikuttavat sähköautojen onnettomuuden kokoon eli siihen, kuinka monta liikenneyksikköä onnettomuuteen osallistui. Tutkijat havaitsivat, että tärkeimmät sähköautojen onnettomuuden kokoon vaikuttavat tekijät olivat vuorokaudenaika, nopeusrajoitus ja keskikaiteen olemassaolo. Sähköautojen onnettomuuksien koko oli suurempi päiväsaikaan (kuin yöllä), korkean nopeuden teillä (verrattuna matalan ja keskitason nopeuden teihin) sekä teillä, joilla on keskikaide (verrattuna teihin ilman keskikaidetta).

Onnettomuusriskiä tarkastellessa olisi myös tärkeää pyrkiä selvittämään, millaiset kuljettajaryhmät käyttävät sähköautoja. Aiemmissa tutkimuksissa on todettu yhteys matalan sosioekonomisen aseman ja liikenneonnettomuusriskin välillä (Chen ym., 2010; Lee ym., 2014). Myös esimerkiksi ikä ja sukupuoli vaikuttavat riskiin. Singh ym. (2020) meta-analyysissä tutkittiin sähköautojen kuluttajakäytön vaikutustekijöitä hyödyntäen 211 tutkimusta, jotka oli julkaistu vuosina 2009–2019. Tarkastelluissa tutkimuksissa todettiin, että sähköautoihin siirtyvät todennäköisemmin nuoret ja keskiikäiset hyvin koulutetut miehet. Halukkuus siirtyä sähköautoon oli positiivisesti yhteydessä ympäristöasenteisiin ja -huoliin. Singh ym. (2020) meta-analyysin mukaan myös turvallisuus on listattu yhdeksi sähköauton käyttöönottoon myötävaikuttavista tekijöistä.

3.4 Teknisten vikojen turvallisuusvaikutukset

Tässä luvussa tarkastellaan mahdollisia liikenneturvallisuushaasteita, jotka ovat yhteydessä sähköautoteknologiaan ja voivat syntyä tavallisen ajon aikana ilman kolaritilannetta. Näitä voivat olla esimerkiksi akkuviat, maasulut ja sähkömoottorin toimintahäiriöt. Lisäksi luvussa esitetään joitakin autonvalmistajien toteuttamia toimenpiteitä näiden riskien vähentämiseksi.

Sun ym. (2020) kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin eri maissa tapahtuneita sähköautojen tulipaloja. Tutkijat havaitsivat, että litiumioniakkujen pääasiallinen vikasyy on niin sanottu lämpöryntäys (thermal runaway). Tämä tarkoittaa, että akussa alkaa hallitsematon eksotermien

ketjureaktio, joka vapauttaa runsaasti lämpöä. Ketjureaktio johtaa usein savun, kipinöiden ja liekkien muodostumiseen, ja kun se leviää koko akkupaketin läpi, sen hallitseminen on hyvin vaikeaa, ja siksi sammutus vaatii suuria määriä palosammutusainetta. Vaikka alkuperäinen tulipalo on saatu hallintaan, akkupaketit voivat syttyä uudelleen, jos niissä on jäljellä energiaa. Siksi akkuvahingon sattuessa sähköajoneuvojen tulisi olla eristettynä muista ajoneuvoista, rakennuksista ja syttyvistä materiaaleista. Sun ym. (2020) katsauksessa todettiin, että vaikka litiumioniakkujen palamislämpö on pienempi kuin bensiinin, sähköauton akkupaketti on paljon raskaampi kuin polttomoottoriauton bensiinisäiliössä oleva polttoainemäärä. Kirjoittajien mukaan sähköauton akkupaketin tulipalossa voi vapautua jopa kaksinkertainen määrä lämpöenergiaa verrattuna polttomoottoriauton bensiinisäiliön tulipaloon, kun molemmat ajoneuvot on ladattu tai tankattu tarjomaan saman ajomatkan. Sun ym. (2020) katsauksen tulosten perusteella sähköautojen akkupalot eivät aina liity liikenneonnettomuuksiin. Litiumioniakkujen spontaani syttyminen voi tapahtua myös latauksen aikana, ajon aikana tai kun auto oli pysäköitynä.

Guerrero ym. (2020) tutkimuksen mukaan sähköautot ovat myös alttiita maasululle, joka tapahtuu, kun yksi auton tasavirta- tai vaihtovirtapiirin navoista kytkeytyy tahattomasti ajoneuvon runkoon tai maahan. Tämä voi johtua eristyksen heikkenemisestä, tien pinnan aiheuttamista tärinäistä, jyrkistä käännoksista, onnettomuuksista tai komponenttien, kuten vetomoottorin, kulumisesta. Maasulku, jossa vain yksi napa on maadoittunut, ei yleensä ole vaarallinen, koska se ei aiheuta suurta vikavirtaa, sillä suora maadoituspolkua ei ole. Pitkäaikainen käyttö tässä tilassa voi kuitenkin johtaa toiseen maasulkuun, jossa molemmat navat ovat maadoittuneet, mikä voi aiheuttaa oikosulun. Tämä voi puolestaan johtaa ajoneuvon järjestelmien toimintahäiriöihin ja tehon menetykseen, joilla voi olla liikenneturvallisuusvaikutuksia. Oikosulku voi myös johtaa komponenttien vaurioitumiseen ja tulipaloon.

Koch ym. (2023) kuvailivat tutkimuksessaan sähköauton invertteriä (traction inverter, vastaa sähkömoottorin väännön hallinnasta) yhdeksi sähköauton vikaherkimmistä osista. Tutkijat toteavat, että vetoinvertterin toimintahäiriöt voivat aiheuttaa vakavia liikenneturvallisuusriskejä, koska ne voivat johtaa yllättäviin ja hallitsemattomiin liikkeisiin ja kiihdytyksiin. Tämä voi vaarantaa sekä sähköauton matkustajat että muut tienkäyttäjät.

Nykyaikaisissa sähköautoissa on kuitenkin usein käytössä erilaisia tapoja ja toimenpiteitä riskien hallitsemiseksi. Niillä voidaan ehkäistä esimerkiksi akkupaloja. Esimerkiksi Justen & Schöneburg (2011) kuvaavat tutkimuksessaan Mercedes-Benzin valmistamien sähköautomallien turvaominaisuuksia. Niihin kuuluvat jatkuva oikosulkujen ja toimintahäiriöiden seuranta, akkujen jäähdytysjärjestelmät, laajenemistila sekä turvaventtiili, joka vapauttaa akuston ylimääräisen paineen lämpökarkaamisen aikana syntyvistä

kaasuista, ennen kuin syttyminen tapahtuu. Tällaiset tekniikat autoissa voivat auttaa varmistamaan akkujen vakauden ja ehkäistä siten tulipaloja.

3.5 Törmäysturvallisuus

Tässä luvussa esitetään tutkimuksia sähköautojen törmäysturvallisuudesta. Tutkimuksissa tarkastellaan, miten sähköautojen suurempi massa vaikuttaa onnettomuuksien seurauksiin, sekä akkujen ja suurjännitejärjestelmien turvallisuusvaikutuksia ja muita keskeisiä tekijöitä, jotka vaikuttavat turvallisuuteen sähköautojen onnettomuustilanteissa.

3.5.1 Massan vaikutus onnettomuuksien seurauksiin

Sähköautojen akut painavat tyypillisesti yli 500 kg, minkä seurauksena sähköautot ovat yleensä 10–20 % raskaampia kuin polttomoottoriautot (Yu ym., 2024). Timmersin ja Achtenin tutkimuksessa (2016) todetaan, että pidemmän toimintamatkan saavuttamiseksi sähköautoihin tullaan tarvitsemaan yhä suurempia ja raskaampia akkuja, mikä puolestaan edellyttää vahvempaa rakennetta. Vertailemalla yhdeksän automallin moottorivaihtoehtoja Timmers & Achten (2016) havaitsivat, että sähköautot painoivat keskimäärin 24 % enemmän kuin vastaavat polttomoottoriautot.

Kirjallisuuskatsauksessa ei löydetty tutkimuksia, joissa olisi tarkasteltu nimenomaan sähköautojen massan vaikutusta liikenneturvallisuuteen. Ajoneuvon massan vaikutusta onnettomuuksien seurauksiin yleisellä tasolla voi arvioida hyödyntämällä esim. Elvik ym. (2009) kirjallisuuskatsauksen tuloksia, jossa tarkasteltiin ajoneuvon massan vaikutusta liikenneonnettomuuksissa syntyviin loukkaantumisiin. Elvik ym. (2009) toteaa aiemman tutkimuksen pohjalta, että matkustajien loukkaantumisen riski pienenee, kun ajoneuvon massa kasvaa: verrattaessa alle 850 kg painavia ajoneuvoja yli 1 500 kg painaviin ajoneuvoihin, raskaampien ajoneuvojen matkustajien loukkaantumisriskin todettiin olevan noin puolet kevyempien ajoneuvojen riskistä. Sen sijaan raskaammat ajoneuvot aiheuttivat muille tienkäyttäjille noin 75 % suuremman loukkaantumisriskin kuin kevyemmät ajoneuvot. Elvikin ym. (2009) tuloksia tulee kuitenkin yleistää nykypäivän sähköautoihin hyvin varauksella, sillä nykypäivän autoissa myös turvarakenteet ovat kehittyneet, millä on vaikutusta onnettomuuksien seurauksiin.

3.5.2 Akkujen ja suurjännitejärjestelmien vaikutus onnettomuuksien seurauksiin

Gong ym. (2022) analysoivat sähkötekniikkaan perustuen sähköauto-onnettomuuksiin liittyviä riskejä ja luokittelivat neljä erityisesti sähköautoihin liittyvää riskikategoriaa: sähköiskut, ihon syöpyminen, myrkytys ja palovammat. Tutkijoiden mukaan sähköiskut ovat erityinen huolenaihe sähköauto-onnettomuuksissa, koska suurjännitekomponentit voivat paljastua tai sähköeristysmateriaalit rikkoutua, mikä aiheuttaa vaaraa sekä matkustajille että pelastushenkilöstölle. Sähköauton akuston vaurioituminen

onnettomuudessa voi johtaa elektrolyytin vuotamiseen, joka voi aiheuttaa ihon syöpymisen suoran kosketuksen tai höyryjen hengittämisen kautta ja sisältää riskin myrkytykselle. Lisäksi akkukennojen lämpökarkaaminen voi johtaa tulipaloihin ja räjähdyksiin, jotka altistavat kuljettajat ja matkustajat sekä pelastushenkilöstön palovammoille ja myrkyllisille kaasuille.

Sähköautojen onnettomuuksiin liittyvien riskien vähentämiseksi Justen & Schöneburg (2011) kuvaavat konferenssijulkaisussa riskienhallintatoimenpiteitä, jotka Mercedes-Benz on ottanut käyttöön. Niihin kuuluvat esimerkiksi korkealajuusteräksestä valmistettu akuston kotelointi, iskuja vaimentava geeli akkukennoille sekä automaattinen suurjännitekatkaisu ja purku onnettomuustilanteissa. Myös sähkökaapeleiden ylimääräinen eristys vähentää rikkoutumisriskiä onnettomuuksissa ja siten myös sähköiskujen riskiä matkustajille ja pelastushenkilöstölle. Lisäksi akut voidaan sijoittaa suhteessa kuljettajiin ja matkustajiin ns. "turva-alueelle" törmäysenergiaa vaimentavien rakenteiden sijaan, jotta akun vaurioituminen vältetään onnettomuustilanteessa.

3.5.3 Yleinen törmäysturvallisuus

Yu ym. (2024) tutkimuksessa verrattiin kuljettajien ja matkustajien loukkaantumisten vakavuutta sähköauto-onnettomuuksissa ja polttomoottoriauto-onnettomuuksissa. Tutkimuksessa käytettiin tietoja 42 121 poliisin kirjaamasta liikenneonnettomuudesta Yhdysvalloissa vuosilta 2020–2021, joista 2 668 onnettomuudessa oli osallisena sähköauto. Tutkimuksessa hyödynnettiin parivalintamenetelmää (matched-pair sampling method), jossa sähköautojen onnettomuuksia verrattiin vastaaviin polttomoottoriautoihin samanlaisissa onnettomuusolosuhteissa. Onnettomuudet yhdistettiin perustuen tietoihin turvavöiden käytöstä, turvatyynyjen laukeamisesta sekä matkustajien sinkoutumisesta ulos autosta onnettomuushetkellä ja/tai ajoneuvon kaatumisesta. Esimerkiksi ajoneuvon ikää, kokoa tai muita turvalaitteita ei tarkasteltu. Myöskään ajoneuvon nopeutta ennen törmäystä ei huomioitu analyysissä. Lopullinen tutkimusaineisto sisälsi 2 668 sähköauto-onnettomuutta (tapaukset) ja 2 668 vastaavaa polttomoottoriauto-onnettomuutta (verrokit), eli yhteensä 5 336 onnettomuutta.

Yu ym. (2024) tulosten perusteella sähköautoissa matkustavat henkilöt saavat onnettomuudessa todennäköisemmin vakavia vammoja, esimerkiksi liikuntakyvyttömyyteen johtavia ja kuolemaan johtavia vammoja, verrattuna polttomoottoriautoissa matkustaviin. Tutkijat esittävät, että tämä johtuu ajoneuvotason tekijöistä. Kuitenkaan ajoneuvojen ominaisuuksia ei tarkemmin tutkittu, joka on tämän tutkimuksen heikkous. Sähköautot ovat yleensä uudempia ja mahdollisesti siten paremmilla turvavarusteilla varustettuja kuin polttomoottoriautot. Täten voisi olettaa, että tulos olisi ollut vielä merkitsevämpi, jos ajoneuvojen ominaisuudet olisi huomioitu tutkimusmenetelmässä.

Toisenlaisiin tuloksiin kuin Yu ym. (2024), päädyttiin Mechante ym. (2022) tutkimuksessa, jossa vertailtiin sähköautojen (mukaan lukien akkukäyttöiset ja ladattavat hybridit) ja polttomoottoriautojen kohtaamisonnettomuuksissa tapahtuneiden kuolemantapausten ja vakavien loukkaantumisten määriä hyödyntäen onnettomuustietokantaa, joka sisälsi Espanjan poliisin raportoimia onnettomuuksia vuosilta 2016–2022. Tutkimusaineisto sisälsi 1 971 sähköautojen onnettomuutta ja 27 591 polttomoottoriautojen onnettomuutta kaupunkialueilla ja 916 sähköautojen onnettomuutta ja 35 764 polttomoottoriautojen onnettomuutta kaupunkialueiden ulkopuolella. Tutkimuksessa analysoitiin onnettomuuksia, joissa oli osallisena enintään kolme vuotta vanhoja ajoneuvoja ja joissa kaikki matkustajat käyttivät turvavöitä. Tutkimuksessa tarkasteltiin vain kuljettajien ja matkustajien loukkaantumisia. Ajonopeutta ennen törmäystä ei huomioitu.

Mechante ym. (2022) tutkimuksen mukaan kuljettajan tai matkustajan riskissä kuolla tai loukkaantua vakavasti onnettomuudessa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa sähkö- ja polttomoottoriauto-onnettomuuksien välillä.

Tulosten ero Mechante ym. (2022) ja Yu ym. (2024) tutkimusten välillä voi johtua eroista käytetyissä menetelmissä ja tietolähteissä. Yu ym. (2024) tutkimuksessa Yhdysvalloista käytettiin parivalintamenetelmää, mikä johti pienempään mutta tarkemmin kontrolloituun otokseen (olettaen, että menetelmässä itsessään ei ole ongelmia). Mechante ym. (2022) tutkimuksessa puolestaan on rajoituksia esimerkiksi aineiston puuttuvien tietojen takia. Tämä johti laajempiin luottamusväleihin ja tilastollisen voiman heikkenemiseen, vaikka Mechante ym. (2022) otoskoko olikin suurempi kuin Yu ym. (2024) tutkimuksessa.

Liu ym. (2022) tutkimus, joka käsiteltiin aiemmin luvussa 3.3, ei myöskään löytänyt tilastollisesti merkittävää eroa sähköautojen ja polttomoottoriautojen välillä onnettomuuksien vakavuudessa. Päätelmä tehtiin käyttämällä Pearsonin khiin neliö -testiä, jolla tutkijat vertasivat sähköautojen ja polttomoottoriautojen onnettomuuksien vakavuusjakaumaa Norjassa käytetyllä viisiportaisella vakavuusasteikolla. Liu ym. (2022) tuloksissa ei tarkasteltu erikseen kuljettajien ja matkustajien loukkaantumisriskiä ja jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden loukkaantumisriskiä törmäyksessä. Ajonopeutta ennen törmäystä ei kontrolloitu.

Gong ym. (2022) tutkimuksessa arvioitiin ajoneuvojen tekniikan analysoinnin perusteella, että sähköautot tarjoavat mekaanisen rakenteensa puolesta saman turvallisuustason törmäyksissä kuin polttomoottoriautot. Molemmat autotyypit on suunniteltu törmäysenergiaa vaimentavilla rakenteilla auton etu- ja takaosassa sekä kuljettajien ja matkustajien ns. "turva-alueilla."

4 Johtopäätökset

Tässä raportissa tehty kirjallisuuskatsaus tarjoaa tietoa sähköautoihin liittyvien tekijöiden liikenneturvallisuusvaikutuksista. Johtopäätökset-luvussa esitetään, millaista tutkimuskirjallisuutta katsauksessa löytyi ja mitä siitä voi päätellä sekä mitä pitäisi tutkia vielä lisää. Lisäksi arvioidaan tulosten soveltuvuutta Suomeen.

4.1 Kuljettajien ajokäyttäytyminen

Katsaukseen löydettiin kolme tutkimusta ajokäyttäytymisestä. McDonnell ym. (2024) tutkimus perustui kaupallisten autojen telematiikkatietoihin Alankomaista vuodelta 2022, Labeye ym. (2016) tutkimus kuljettajien itse-raportoituuihin tietoihin 6 kuukauden tutkimusajankohdan ajalta Ranskasta ja Wang ym. (2020) tutkimus Yhdysvalloissa vuonna 2016 kerättyyn kyselyaineistoon.

McDonnell ym. (2024) tutkimuksen tuloksen mukaan kaupallisessa käytössä olevia täyssähköautoja ajavilla kuljettajilla on tyypillisesti vähemmän äkillisiä jarrutuksia, kiihdytyksiä ja ylinopeutta kuin polttomoottorikuljettajilla. Tässä tutkimuksessa aineisto on melko uusi ja tutkimusmenetelmä monia muita menetelmiä luotettavampi. Tutkimuksen keskeinen puute on se, että tulokset eivät koske yksityisautoilijoita eikä tutkimuksessa myöskään raportoitu tai kontrolloitu ajoneuvoryhmien kuljettajien demografisia tietoja.

Wang ym. (2020) vuoden 2016 kyselytutkimuksen tulosten mukaan yhdysvaltalaiset täyssähköautojen kuljettajat raportoivat, että heidän ajotapansa oli muuttunut nykyisen auton hankinnan jälkeen keskimäärin maltillisemmaksi niin ajonopeuden kuin kiihdytysten ja jarrutusten kohdalla verrattuna polttomoottoriautojen kuljettajien vastauksiin. Wang ym. (2020) tuloksien relevanssia arvioitaessa on hyvä huomioida, että kyselyiden tuloksiin liittyy aina epävarmuutta, sillä vastaajat voivat esimerkiksi ”kaunistella” vastauksiaan. Voinee syystä kyseenalaistaa, kuinka hyvin tulokset kertovat nykyisten suomalaisten sähköautokuljettajien ajotavasta, sillä Wang ym. (2020) tutkimustulokset ovat lähes 9 vuotta vanhoja ja Yhdysvalloista, joissa kuljettajien ajotapa voi olla erilainen kuin meillä.

Labeye ym. (2016) tutkimukseen osallistui 36 täyssähköauton kuljettajaa, joista osa kertoi mukauttaneensa ajokäyttäytymistään vähemmän aggressiiviseksi ja olevansa tarkkaavaisempia jalankulkijoita kohtaan ajoneuvon hiljaisen äänen takia. Tutkimuksen tulokset perustuvat pieneen koekuljettajajoukkoon ja heidän itseraportoimiinsa tuloksiin. Tutkimusaineisto on myös jo melko vanha.

Sähköautoilla on teknisiä erityispiirteitä, kuten välitön vääntö ja regeneraatio, jotka voivat vaikuttaa ajotapaan liukkailla teillä talvisin. Myös

ikkunoiden huurtuminen talvisin voi olla erityisesti sähköautoihin liittyvä haaste, sillä sähköauton moottori ei lämmitä auton sisätilaa samalla tavalla kuin polttomoottoriautoissa. Kuitenkaan sähköautojen erityispiirteiden vaikutuksesta kuljettajien ajokäyttäytymiseen talvisissa olosuhteissa ei löydetty yhtään tutkimusta.

Yhteenvetona sähköautojen kuljettajien ajokäyttäytymiseen liittyvästä tutkimuksesta voi todeta, että sen pohjalta ei voi juuri vetää johtopäätöksiä suomalaisten sähköautoilijoiden ajokäyttäytymisestä nykypäivänä. Löydettyissä tutkimuksissa oli heikkoutena tutkimusmenetelmä ja vanha aineisto (Labeye ym., 2016; Wang ym., 2020) tai tutkimuksen kohderyhmä ei ollut yksityisautoilijat (McDonnell ym., 2024). Tulevissa tutkimuksissa olisi tärkeää tarkastella sähköautojen vaikutusta kuljettajien ajokäyttäytymiseen – erityisesti talvisissa olosuhteissa, jotta olisi tietoa mahdollisista turvallisuusriskeistä. Suomessa voisi esimerkiksi selvittää mahdollisuutta kerätä McDonnell ym. (2024) tutkimuksen kaltainen telematiikkatietokanta yksityissä sähköautoilijoista talvi- ja kesäaikana tai harkita jonkin muun kokeellisen aselman hyödyntämistä. Myös helpommin toteutettava kyselytutkimus voisi kertoa suomalaisten sähköautoilijoiden ajokäyttäytymisestä, vaikka - kuten edellä todettu – kyselytutkimuksiin liittyy omat haasteensa.

4.2 Ajosuorite

Ajosuorite vaikuttaa suoraan onnettomuuksien kertymään (Nilsson, 2004) ja on siksi tärkeä tekijä tarkasteltaessa liikenneturvallisuusvaikutuksia. Kirjallisuuskatsaukseen sisällytettiin neljä tutkimusta sähköautojen ajosuoritteesta: Kuljettajien ajokäyttäytyminen -luvussa esiteltujen McDonnell ym. (2024) ja Wang ym. (2020) tutkimusten lisäksi tarkasteltiin Norjassa vuonna 2016 tehtyä kyselytutkimusta (Bauer, 2018) sekä tutkimusta, joka perustui Yhdysvaltojen kansallisen kotitalouksien matkakyselyn aineistoon vuodelta 2017 (Feng ym., 2024).

McDonnell ym. (2024) tutkimus viittaa siihen, että kaupallisessa käytössä olevien sähköautojen kuljettajien keskimääräiset ajokilometrit ovat alhaisemmat kuin polttomoottoriautojen kuljettajien perustuen ajoneuvoista kerättyihin tietoihin. Feng ym. (2024) tutkimuksen mukaan (perustuen yhdysvaltalaiseen aineistoon vuodelta 2017) Kaliforniassa sähköautotalouksien ajokilometrit olivat matalammat, mutta muissa osavaltiossa ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa verrattuna polttomoottoriautotalouksiin. Puolestaan Bauer (2018) vuoden 2016 tutkimuksen mukaan norjalaiset uusien sähköautojen omistajat raportoivat ajavansa sähköauton hankinnan jälkeen enemmän ajokilometrejä kuin uusien polttomoottoriautojen omistajat. Labeye ym. (2016) koekuljettajien itseraportoituihin tuloksiin perustuvan tutkimuksen mukaan sähköautoilla ajettiin enemmän lyhyitä matkoja kuin polttomoottoriautoilla.

Katsaukseen sisällytettyjen tutkimusten tekijät spekuloiivat tulosten viittavan siihen, että sähköautojen edullisemmat polttoainekustannukset ajokilometriä kohti voisivat lisätä niiden käyttöä joissakin tilanteissa - kuitenkin mahdollisesti akun toimintasäde voisi puolestaan rajoittaa sähköauton käyttöä toisissa tilanteissa.

McDonnell ym. (2024) tutkimuksessa ei tarkasteltu yksityiskäytössä, vaan kaupallisessa käytössä olevia ajoneuvoja. On mahdollista, että sähköautoja on valikoitunut erilaisiin käyttötarkoituksiin kuin polttomoottoriautoja, mutta tutkimusartikkelissa ei kuvattu tarkemmin tätä kaupallista käyttöä.

Sähköautojen vaikutus ajosuoritteeseen nykypäivänä jää epävarmaksi ole-massa olevan tutkimuskirjallisuuden valossa. Löydetyt tutkimukset olivat jo verrattain vanhoja, perustuivat pieneen aineistoon, kyselytutkimuksiin tai itseraportoituihin tuloksiin. On hyvä huomata, että niin latausverkko kuin täyssähköautojen toimintamatka (IEA, 2022) on kehittynyt alkuvuosis-taan.

Tarvittaisiin vielä lisää tutkimusta sähköautojen käytöstä ja vaikutuksesta ajosuoritteeseen, jotta niiden käyttöön liittyvistä tavoista voitaisiin sanoa tarkemmin. Suomessa tallennetaan katsastuksen yhteydessä mittariluke-mia, mutta haaste on se, että yksityiskäytössä olevat autot tulevat ensim-mäiseen määräaikaikatsastukseen vasta neljän vuoden iässä. Sähköauto-jen osuutta liikenteestä kaupungeissa ja niiden ulkopuolella voisi mahdolli-sesti arvioida myös rekisteritunnusten keräämisellä katujen ja teiden var-ressa tai parkkipaikkalaskennalla. Myös kyselytutkimuksella voisi selvittää suomalaisten sähköautoilijoiden ajotottumuksia.

4.3 Onnettomuusriski ja taustatekijät

Katsaukseen löydettiin viisi tutkimusta, joissa käsiteltiin sähköautojen kul-jettajien onnettomuusriskiä ja onnettomuuksien taustatekijöitä. Tutkimuk-set perustuivat onnettomuustilastoihin – lukuun ottamatta Karaaslan ym. (2018) tutkimusta, joka perustui risteysalueen simulointeihin. Tilastoihin perustuvissa tutkimuksissa oli tietoa Norjan (Hou ym., 2023; Liu ym., 2022), Yhdysvaltojen (Wu ym., 2011) ja Iso-Britannian (Edwards ym., 2024) tieliikenneonnettomuuksista.

Kolmessa tutkimuksessa tarkasteltiin onnettomuuksia, joissa oli jalankulki-joita ja pyöräilijöitä osallisena (Edwards ym., 2024; Wu ym., 2011; Liu ym. 2022). Näiden tutkimusten tulokset viittasivat siihen, että nämä onnetto-muudet ovat tyypillisempi sähköautoille kuin polttomoottoriautoille. Tutki-musten mukaan sähköauto-onnettomuudet tapahtuvat myös usein kaupun-kiympäristössä (Hou ym., 2023; Liu ym., 2022) ja arkipäivisin (Hou ym., 2023), jolloin tyypillisesti kohtaa jalankulkijoita ja pyöräilijöitä. Sähköauto-kuljettajien suurempi ajosuorite kaupunkiympäristössä voisi siis selittää

suurempaa jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden osuutta sähköautojen onnettomuuksissa. Kuitenkin Edwards ym. (2024) tutkimustulokset viittasivat siihen, että sähköautojen riski olla osallisena jalankulkijoiden loukkaantumiseen johtavassa onnettomuudessa oli kohonnut nimenomaan kaupunkialueilla verrattuna polttomootoriautojen kuljettajiin. Myös Wu ym. (2011) tutkimuksen tuloksen mukaan jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden riski oli kohonnut erityisesti matalampien nopeusrajoitusten alueilla. Liu ym. (2022) tutkimuksessa ei erikseen tarkasteltu onnettomuuksien määriä kaupunkiteillä ja kaupunkien ulkopuolella.

Myös McDonnell ym. (2024) tulokset viittaavat siihen, että sähköautojen kuljettajilla (vrt polttomootoriajoneuvojen kuljettajiin) on suurempi todennäköisyys aiheuttaa onnettomuus, jossa he ovat vastuullisia vakuutuskorvausten maksamisesta. McDonnell ym. (2024) tutkimuksessa huomioitiin myös kaupunkiajossa tapahtuneen ajosuoritteen määrä, eikä se vaikuttanut tuloksiin. McDonnell ym. (2024) tutkimuksessa ei tosin tarkasteltu erikseen, mitä vastapuolia sähköauto-onnettomuuksissa oli.

Jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden suurempaa osuutta sähköauto-onnettomuuksissa voisi selittää sähköautojen hiljainen toiminta, jonka takia autoa olisi vaikeampi havaita. Tätä tukee Karaaslan ym. (2018) tulokset, joiden mukaan sähköautot aiheuttavat suuremman riskin jalankulkijoille kuin polttomootoriautot erilaisissa liikenneympäristön ääni- ja valaistusolosuhteissa.

Olemassa oleva tutkimus viittaa siihen, että sähköauto-onnettomuudet painottuvat kaupunkiympäristöön, missä myös mahdollisesti suurin osa sähköautojen ajosuoritteesta tehdään. Vaikka suurempi altistus kaupunkiympäristössä kontrolloidaan, jalankulkijoiden ja pyöräilijöiden osuus onnettomuuden uhreina vaikuttaa silti olevan kohonnut sähköauto-onnettomuuksissa. Suojaamattomien tienkäyttäjien onnettomuusriskiä koskevien päätelmien tueksi tulisi kuitenkin olla enemmän tietoa onnettomuuksien syistä. Asiaa voisi tutkia esimerkiksi haastatteleamalla sähköautojen kanssa onnettomuudessa tai läheltä-piti-tilanteessa olleita jalankulkijoita ja pyöräilijöitä tai kokeellisen tutkimusasetelman avulla. On myös hyvä huomata, että EU-asetuksen mukaisesti vuodesta 2019 lähtien uusissa sähköautoissa pakollisena on ollut AVAS-järjestelmä (Acoustic Vehicle Alert System). Vuodesta 2021 lähtien se on ollut pakollinen kaikissa sähköautoissa. AVAS-järjestelmä tuottaa ääntä, joka varoittaa lähestyvistä autosta, kun auton nopeus on alle 20 km/h. Tässä katsauksessa mukana olleissa tutkimuksissa todennäköisesti useimmissa sähköautoissa ei vielä ole ollut AVAS-järjestelmää.

Vain yhdessä tämän katsauksen tutkimuksessa tarkasteltiin onnettomuusmääriä erityisesti talvissa olosuhteissa (Liu ym., 2022). Sen mukaan sähköauto-onnettomuuksia tapahtui harvemmin talvissa olosuhteissa verrattuna polttomootoriauto-onnettomuuksiin. Yhden tutkimuksen pohjalta, jossa ei

myöskään kontrolloitu altistusta, ei voi tehdä johtopäätöksiä sähköautojen onnettomuusriskistä talvissa olosuhteissa. Tulos voisi viitata siihen, että sähköautojen onnettomuusriski liukkailla teillä olisi matalampi kuin polttomoottoriautoilla. Tämä voi johtua myös siitä, että sähköautot ovat uudempia kuin polttomoottoriautot ja niissä olisi esimerkiksi enemmän kuljettajaa avustavia järjestelmiä. Tarvittaisiin lisää tutkimusta, jotta sähköautojen onnettomuusriskistä talvisissa olosuhteissa voisi tehdä päätelmiä.

Kun arvioidaan eri ajoneuvoryhmien onnettomuusriskin eroja, olisi hyvä huomioida, millaiset kuljettajaryhmät eri ajoneuvoilla ajavat. Tätä ei kuitenkaan kontrolloitu tähän katsaukseen sisällytetyissä tutkimuksissa. Sähköautojen omistajiin liittyviä sosiodemografisia tekijöitä tarkastelleen kirjallisuuskatsauksen mukaan sähköauton kuljettaja on usein keski-ikäinen, hyvin koulutettu ja mies (Singh ym., 2020). Tulevissa onnettomuusriskiä tarkastelevissa tutkimuksissa olisi hyvä kontrolloida paremmin mahdolliset erot kuljettajaryhmien välillä. Samalla tulisi huomioida, että kuljettajaryhmien välisten mahdollisten erojen lisäksi sähköautot ovat usein myös uudempia ja uusissa autoissa on usein enemmän kuljettajaa avustavia järjestelmiä, jotka vähentävät onnettomuusriskiä.

Tulevissa tutkimuksissa olisi tärkeää tarkastella sähköautojen onnettomuusriskiä Suomessa, sillä olemassa olevien tutkimusten kautta siitä ei voi tehdä siitä varmoja johtopäätöksiä. Myös onnettomuusriskiin vaikuttavista tekijöistä olisi tärkeää saada lisää tietoa. Suomessa esimerkiksi Onnettomuustietoinstituutin liikennevahinkoaineistossa on tietoa sähköautojen liikennevakuutuksesta korvatuista vahingoista. Tästä tilastosta sähköautojen onnettomuusriskiä voisi arvioida aiheuttajien ja vastapuolien suhteen kautta (ns. quasi-induced exposure -menetelmä) myös erikseen kesä-/talvikaudella sekä eri liikenneympäristöissä -kontrolloiden myös kuljettajiin ja ajoneuvoihin liittyviä tekijöitä (esim. ikä). Liikennevahinkoaineistossa on kuitenkin se haaste, että edellä mainittua vertailua ei voi tehdä niiden onnettomuuksien osalta, joissa on jalankulkijoita pyöräilijöitä osallisena, sillä niissä moottoriajoneuvon kuljettaja on aina kirjattu aiheuttajaksi. Mahdollisuutta hyödyntää myös muita suomalaisia aineistoja onnettomuusriskin arviossa tulisi selvittää.

4.4 Teknisten vikojen turvallisuusvaikutukset

Katsaukseen sisällytettiin neljä tutkimusta, joissa tarkasteltiin sähköautojen teknisten vikojen turvallisuusvaikutuksia. Kolmessa tutkimuksessa kuvattiin liikenneturvallisuusriskeihin liittyviä teknisiä vikoja, kuten akkupaloja (Sun ym., 2020), maasulkuvikoja (Guerrero ym., 2020) ja invertterivikoja (Koch ym., 2023). Neljäs tarkasteltu tutkimus (Justen & Schöneburg, 2011) esittelee keinoja, joita on otettu käyttöön sähköautojen suunnittelussa teknisiin vikoihin liittyvien riskien vähentämiseksi.

Tekniset viat litiumioniakuissa ovat yleinen syy sähköautojen tulipaloihin. Yleisin näistä vioista on lämpöryntäys (Sun ym., 2020). Lämpöryntäys aiheuttaa akkukennoissa ketjureaktion, joka voi tuottaa lämpöä, savua, kipinöitä ja liekkejä. Tulipaloja voivat aiheuttaa myös maasulut. Ne voivat syntyä, kun eristys heikkenee, tien tärinä kuormittaa akkuja, tehdään jyrkkiä käännöksiä, tapahtuu onnettomuuksia tai komponentit kuluvat (Guerrero ym., 2020).

Sähköautojen voimansiirron invertteri on vikaherkkä osa. Sen viat voivat vaarantaa liikenneturvallisuuden, sillä ne voivat aiheuttaa äkillisiä ja hallitsemattomia liikkeitä ja kiihdytyksiä. Tämä lisää riskejä sekä auton matkustajille että muille tienkäyttäjille (Koch ym., 2023).

Vaikka tähän katsaukseen löydetty tutkimukset kuvaavat yksityiskohtaisesti sähköautojen mahdollisia teknisiä vikoja, ne eivät tarjoa riittävästi tietoa tapausten yleisyydestä. Jatkotutkimusten tulisi keskittyä selvittämään, kuinka todennäköistä on, että sähköauto kohtaa katsauksessa kuvattuja vikoja elinkaarensa aikana sekä vikojen aiheuttamia seurauksia.

On myös tiedossa, että ajoneuvovalmistajat ovat ottaneet käyttöön useita riskienhallintatoimia, kuten korkealujuusteräksisiä akkusuoja, akkukennojen iskua vaimentavaa geeliä, jatkuvaa oikosulkujen ja toimintahäiriöiden seuranta sekä sähköjohtojen lisäeristettä (Justen & Schöneburg, 2011). Ajoneuvovalmistajia tulisi kannustaa jatkossakin kehittämään sähköautojen teknistä turvallisuutta.

4.5 Törmäysturvallisuus

Katsaukseen löydettiin seitsemän tutkimusta sähköautojen törmäysturvallisuudesta. Kolme tutkimusta vertasi onnettomuuksien vakavuutta täyssähköautojen ja polttomoottoriautojen välillä hyödyntäen todellisia onnettomuustietoja, jotka oli saatu Norjan (Liu ym., 2022), Yhdysvaltojen (Yu ym., 2024) ja Espanjan (Mechante ym., 2022) tietokannoista. Timmersin ja Achtenin (2016) tutkimus arvioi sähköautojen ja polttomoottoriautojen painoeroja, kun taas Elvik ym. (2009) tutkimusta hyödynnettiin tarkastellessa yleisesti, miten ajoneuvon massa vaikuttaa loukkaantumisriskiin onnettomuudessa. Gong ym. (2022) tarkasteli onnettomuustilanteissa korkeajännitejärjestelmien ja akkujen mahdollisia riskejä. Justenin ja Schöneburgin (2011) tutkimusta hyödyttiin kuvatessa valmistajien toteuttamia keinoja Gong ym. (2022) esittämien riskien vähentämiseksi.

Tutkimuksissa ilmeni ristiriitaisia tuloksia onnettomuuksien seurauksista. Yu ym. (2024) tutkimuksen perusteella sähköautojen matkustajien vammat ovat yleensä vakavampia kuin polttomoottoriautojen matkustajilla, kun taas Mechante ym. (2022) ja Liu ym. (2022) eivät löytäneet tilastollisesti merkittäviä eroja sähkö- ja polttomoottoriautojen onnettomuuksien

vakavuudessa. Yu ym. (2024) ja Mechante ym. (2022) tutkimuksessa tarkasteltiin vain kuljettajien ja matkustajien seurauksia onnettomuuksissa. Liu ym. (2022) tutkimuksessa onnettomuuksien seurauksia ajoneuvojen sisällä ja ulkona oleville henkilöille ei tarkasteltu erikseen.

Gong ym. (2022) tutkimuksen mukaan rakenteen osalta sähköautot ovat samalla tasolla kuin polttomoottoriautot törmäysturvallisuudessa. Molemmissa ajoneuvotyypeissä on etu- ja takarakenteet, jotka vaimentavat törmäysvoimaa, sekä matkustajien suoja-alueet. Sähköautojen akut sijoitetaan usein ns. suoja-alueisiin, jotta ne pysyisivät vahingoittumina onnettomuuksissa (Justen & Schöneburg, 2011).

Sähköautot ovat yleensä 10–20 % raskaampia kuin polttomoottoriautot (Yu ym., 2024). Tässä katsauksessa ei löydetty tutkimuksia, joissa olisi tarkastelu nimenomaan sähköautojen massan vaikutusta liikenneturvallisuuteen. Yleisesti on esitetty, että törmäystilanteissa matkustajien loukkaantumisen riski pienenee ajoneuvon massan kasvaessa - kuitenkin muiden tienkäyttäjien riski loukkaantua vakavammin onnettomuustilanteessa kasvaa ajoneuvon massan myötä (Elvik ym., 2009). Tarvittaisiin tutkimustuloksia erityisesti sähköautojen massan vaikutuksesta, jotta asiasta uusien sähköautojen kohdalla voisi sanoa varmemmin. Törmäysturvallisuuteen vaikuttavat massan lisäksi myös esimerkiksi turvavarusteet ja auton rakenne.

Sähköautojen onnettomuuksiin liittyviä vaaroja ovat sähköiskut, ihon syöpyminen tai muu vaurioituminen, myrkytys ja palovammat (Gong ym., 2022). Lämpöryntäys akuissa voi johtaa tulipaloihin ja räjähdyksiin, mikä altistaa matkustajat ja pelastajat palovammoille ja myrkyllisille savuille.

Yleisesti voi todeta, että vaikka olemassa oleva kirjallisuus tunnistaa ja kuvaava sähköautojen törmäysturvallisuuteen liittyviä riskejä, tarvitaan lisätutkimuksia niiden todennäköisyyden selvittämiseksi ja myös varautumis- ja estämistoimenpiteiden kehittämiseksi.

Olemassa olevat tulokset ovat ristiriitaisia sen suhteen ovatko sähköauto-onnettomuuksissa seuraukset matkustajille vakavampia vai lievempiä. Sähköautojen törmäysturvallisuudesta niissä onnettomuuksissa, joissa on jalankulkijoita tai pyöräilijöitä osallisena, ei tarkempaa tutkimustietoa löytenyt. Mahdollisuutta tutkia törmäysturvallisuutta suomalaisia onnettomuusaineistoja hyödyntäen olisi hyvä selvittää. Tällöin myös ajonopeus ennen törmäystä olisi tärkeä kontrolloida – se oli jäänyt tekemättä tässä katsauksessa mukana olleissa tutkimuksissa.

4.6 Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa toteutettiin kirjallisuuskatsaus sähköautojen liikenneturvallisuudesta. Liikenteen sähköistyminen etenee Suomessa ja samalla sähköautojen onnettomuusmäärät ovat kasvussa.

Liikenneturvallisuusvaikutusten ymmärtäminen ja ennakointi on tärkeää. Katsauksessa pyrittiin löytämään tietoa eri näkökulmista, kuten sähköauto-kuljettajien ajokäyttäytymisestä, ajosuoritteesta, onnettomuusriskistä sekä sähköautojen teknisistä vioista ja törmäysturvallisuudesta.

Kuljettajien ajokäyttäytymisestä löydettiin vain kolme tutkimusta, joista kaksi perustui itseraportointiin ja yksi telematiikkatietoihin kaupallisen autokannan ajoneuvoista. Kirjallisuus viittaa siihen, että sähköautojen kuljettajat saattavat noudattaa polttomoottoriautojen kuljettajiin verrattuna maltillisempaa ja pehmeämpää ajotapaa. Tutkimusten pohjalta ei voi juuri vetää johtopäätöksiä suomalaisten sähköautoilijoiden ajokäyttäytymisestä nykypäivänä. Sähköautojen vaikutuksesta ajokäyttäytymiseen talvisissa olosuhteissa ei löytynyt yhtään tutkimusta.

Myöskään tähän katsaukseen sisällytetyt neljä tutkimusta ajosuoritteesta eivät juuri kerro nykypäivän suomalaisten yksityissähköautoilijoiden ajokilometreistä tai matkamääristä. Löydetyt tutkimukset olivat jo verrattain vanhoja, perustuivat pieneen aineistoon, itseraportoituihin tuloksiin tai niissä tarkasteltiin kaupallisessa käytössä olevia ajoneuvoja.

Sähköautoilun onnettomuusriskiä tarkasteltiin viidessä tutkimuksessa. Tutkimusten mukaan sähköauto-onnettomuudet painottuvat kaupunkiympäristöön – jossa mahdollisesti myös suurin osa ajosuoritteesta tehdään. Tulokset antavat jonkinasteista tukea sille, että onnettomuudet, joissa on jalan-kulkijoita ja pyöräilijöitä osallisena, ovat tyypillisempiä sähköauto- kuin polttomoottoriautokuljettajille. On kuitenkin tärkeä huomata, että todennäköisesti katsauksessa mukana olleissa tutkimuksissa useimmissa sähköautoissa ei vielä ollut AVAS-järjestelmää, joka saattaa nykypäivänä parantaa suojaamattomien tienkäyttäjien liikenneturvallisuutta. Yleisesti voi todeta, että onnettomuusriskiä tarkastelleissa tutkimuksissa oli puutteita taustatekijöiden kontrolloimisessa (kuljettajan ja ajoneuvon ominaisuudet ja/tai liikenneympäristö).

Tutkimukset kuvaavat kattavasti sähköautojen mahdollisia teknisiä vikoja, joilla voi olla liikenneturvallisuusvaikutuksia. Kuitenkaan vikojen yleisyydestä ei löytynyt tutkimusta. Lisäksi akkujen asentaminen tekee sähköautoista painavampia, jolla voi olla liikenneturvallisuusvaikutuksia, mutta nimenomaan tätä tarkastelleita tutkimuksia ei löytynyt myöskään. Katsaukseen löydettiin seitsemän tutkimusta sähköautojen törmäysturvallisuudesta. Niiden tulokset olivat kuitenkin keskenään ristiriitaisia ja suojaamattomien tienkäyttäjien osalta puutteellisia.

Tähän kirjallisuuskatsaukseen ei löydetty tutkimuksia, joissa olisi hyödynnetty suomalaisia aineistoja. Myöskään ei löydetty tutkimuksia, joissa olisi tarkasteltu sähköautojen turvallisuuteen talviolosuhteissa vaikuttavia tekijöitä.

Olemassa olevan tutkimuksen valossa ei voi sanoa, tuleeko sähköautojen yleistyminen parantamaan vai huonontamaan liikenneturvallisuutta Suomessa. Tulevissa tutkimuksissa olisi tärkeää pyrkiä arvioimaan sähköautojen liikenneturvallisuutta Suomessa eri liikenneympäristöissä ja vuodenaikoina. Tällöin tulisi huomioida, millaiset kuljettajaryhmät käyttävät sähköautoja (demografiset ja sosioekonomiset tekijät sekä mahdolliset asenteet) ja huomioida myös autojen ominaisuudet (ikä, koko, lisävarusteet), kun sähköautoja verrataan polttomoottoriautoihin. Sähköautojen teknisten vikojen yleisyydestä ja turvallisuusvaikutuksista tulisi saada lisää tietoa. Törmysturvallisuudesta olisi ehkä mahdollista hankkia tietoa Suomesta onnettomuustilastojen kautta. Kyselyt ja/tai kokeelliset tutkimukset voisivat valottaa sähköautojen vaikutusta ajokäyttäytymiseen ja ajosuoritteeseen. Yhteenvetona voi todeta, että sähköautoilun liikenneturvallisuutta tulisi - ja myös esimerkiksi olemassa olevien tilastojen avulla voisi - tutkia lisää Suomessa.

5 Lähteet

- Bauer, G. (2018). The impact of battery electric vehicles on vehicle purchase and driving behavior in Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 239–258. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2017.12.011>
- Chen, H. Y., Ivers, R. Q., Martiniuk, A. L. C., Boufous, S., Senserrick, T., Woodward, M., Stevenson, M., & Norton, R. (2010). Socioeconomic status and risk of car crash injury, independent of place of residence and driving exposure: results from the DRIVE Study. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 64(11), 998–1003. <https://doi.org/10.1136/jech.2009.091496>
- Edwards, P. J., Moore, S., & Higgins, C. (2024). Pedestrian safety on the road to net zero: cross-sectional study of collisions with electric and hybrid-electric cars in Great Britain. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 78(8), 487–492. <https://doi.org/10.1136/jech-2024-221902>
- Elvik, R., Høye, A., Vaa, T., & Sørensen, M. (2009). Vehicle design and protective devices. Teoksessa *The Handbook of Road Safety Measures* (ss. 543–731). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/9781848552517-010>
- Euroopan komissio. (2020). *Next steps towards 'Vision Zero': EU road safety policy framework 2021-2030*. <https://doi.org/10.2832/261629>
- Euroopan komissio. (2023, lokakuuta 9). *55-valmiuspaketti on keskeisiltä osiltaan valmis – EU ylittämässä vuoden 2030 tavoitteet*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/ip_23_4754
- Feng, Y., Saphores, J. D., Nixon, H., & Ramirez Ibarra, M. (2024). Battery Electric Vehicles: Travel Characteristics of Early Adopters. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 4263*, 16(10), 4263. <https://doi.org/10.3390/SU16104263>
- Gong, C., Liu, J., Han, Y., Hu, Y., Yu, H., & Zeng, R. (2022). Safety of Electric Vehicles in Crash Conditions: A Review of Hazards to Occupants, Regulatory Activities, and Technical Support. *IEEE Transactions on Transportation*

Electrification, 8(3), 3870–3883.

<https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3136126>

Guerrero, J. M., Navarro, G., Platero, C. A., Tian, P., & Blazquez, F. (2020). A Novel Ground Fault Detection Method for Electric Vehicle Powertrains Based on a Grounding Resistor Voltage Analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5), 4934–4944.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3000965>

Hou, X., Su, M., Liu, C., Li, Y., & Ma, Q. (2023). Examination of the Factors Influencing the Electric Vehicle Accident Size in Norway (2020–2021). *World Electric Vehicle Journal 2024, Vol. 15, Page 3*, 15(1), 3.
<https://doi.org/10.3390/WEVJ15010003>

IEA (2022). Evolution of average range of electric vehicles by powertrain, 2010–2021: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/evolution-of-average-range-of-electric-vehicles-by-powertrain-2010-2021> (haettu 5.12.2024)

Justen, R., & Schöneburg, R. (2011). Crash Safety of Hybrid- And Battery Electric Vehicles. *22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*.
<https://trid.trb.org/View/1360444>

Karaaslan, E., Noori, M., Lee, J., Wang, L., Tatari, O., & Abdel-Aty, M. (2018). Modeling the effect of electric vehicle adoption on pedestrian traffic safety: An agent-based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 198–210.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.05.026>

Koch, A., Brauer, J., & Falkenstein, J. (2023). Detection of Torque Security Problems Based on the Torsion of Side Shafts in Electrified Vehicles. *World Electric Vehicle Journal 2023, Vol. 14, Page 151*, 14(6), 151.
<https://doi.org/10.3390/WEVJ14060151>

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>

Labeye, E., Hugot, M., Brusque, C., & Regan, M. A. (2016). The electric vehicle: A new driving experience involving specific skills and rules. *Transportation Research Part F*:

Traffic Psychology and Behaviour, 37, 27–40.
<https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.11.008>

Lee, J. S., Lee, W. Y., Noh, M. S., & Khang, Y. H. (2014). Does a geographical context of deprivation affect differences in injury mortality? A multilevel analysis in South Korean adults residing in metropolitan cities. *J Epidemiol Community Health*, 68(5), 457–465.
<https://doi.org/10.1136/JECH-2013-203082>

Liikennevakuutuskeskus (2024). Liikennevakuutuskeskus - Liikennevakuutuksen riskitutkimus - Liikennevakuutuksen riskitutkimus ajoneuvoryhmittäin: <https://www.lvkn.fi/liikennevakuutuskeskus/lvkn-tilastot-ja-raportit/liikennevakuutuksen-riskitutkimukset/>.

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2021). *Valtakunnallinen liikennejärjestelmäsuunnitelma vuosille 2021–2032*. Valtioneuvosto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-749-2>

Liu, C., Zhao, L., & Lu, C. (2022). Exploration of the characteristics and trends of electric vehicle crashes: a case study in Norway. *European Transport Research Review*, 14(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00529-2>

McDonnell, K., Sheehan, B., Murphy, F., & Guillen, M. (2024). Are electric vehicles riskier? A comparative study of driving behaviour and insurance claims for internal combustion engine, hybrid and electric vehicles. *Accident Analysis & Prevention*, 207, 107761.
<https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107761>

Mechante, L. F. S., de Argila Lorente, C. M., & Lopez-Valdes, F. (2022). A pilot analysis of crash severity of electric passenger cars in Spain (2016–2020). *Traffic Injury Prevention*, 23(sup1).
<https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2125230>

Nilsson, G. (2004). *Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety* [Doctoral thesis, Lund Institute of Technology].
<https://lup.lub.lu.se/search/ws/files/4394446/1693353.pdf>

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.

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-746-4>

Singh, V., Singh, V., & Vaibhav, S. (2020). A review and simple meta-analysis of factors influencing adoption of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 86, 102436. <https://doi.org/10.1016/J.TRD.2020.102436>

Sun, P., Bisschop, R., Niu, H., & Huang, X. (2020). A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*, 56(4), 1361–1410. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>

Tilastokeskus. (2024, helmikuuta 21). *Autojen ensirekisteröinnit käyttövoiman mukaan*. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__merek/statfin_merek_pxt_11ck.px/

Timmers, V. R. J. H., & Achten, P. A. J. (2016). Non-exhaust PM emissions from electric vehicles. *Atmospheric Environment*, 134, 10–17. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2016.03.017>

Wang, G., Makino, K., Harmandayan, A., & Wu, X. (2020). Eco-driving behaviors of electric vehicle users: A survey study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102188. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.11.017>

Wu, J., Austin, R., & Chen, C.-L. (2011). *Incidence Rates of Pedestrian And Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles: An Update. (DOT HS 811 526)*. <https://trid.trb.org/View/1128262>

Yu, Q., Ma, L., & Yan, X. (2024). Modeling occupant injury severities for electric-vehicle-involved crashes using a vehicle-accident bi-layered correlative framework with matched-pair sampling. *Accident Analysis & Prevention*, 199, 107499. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107499>

Liikenne- ja viestintävirasto Traficom

PL 320, 00059 TRAFICOM

p. 029 534 5000

traficom.fi

ISBN 978-952-311-000-0

ISSN 2669-8781 (verkkojulkaisu)

TRAFICOM
Liikenne- ja viestintävirasto