

Niko Kynsijärvi

**STANDARDINTI YHTEISTOIMINNALLISISSA
LIIKENNEJÄRJESTELMISSÄ**



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
INFORMAATIOTEKNOLOGIAN TIEDEKUNTA
2022

TIIVISTELMÄ

Kynsijärvi, Niko

Standardointi yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä

Jyväskylä: Jyväskylän yliopisto, 2022, 28 s.

Tietojärjestelmätiede, kandidaatin tutkielma

Ohjaaja: Kuusio, Ari

Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät ovat viime vuosina alkaneet yleisty-
mään teillä. Euroopassa on nähty ensimmäiset massatuotetut yhteistoiminnal-
lista kommunikaatiota hyödyntävät ajoneuvot. Yhteistoiminnallisuudella liiken-
nejärjestelmät pyrkivät vastaamaan useisiin nykypäivän haasteisiin liikenteessä.
Kuitenkin edelleen alalla on haasteita ratkottavana, jotta yhteistoiminnalliset lii-
kennejärjestelmät saavuttaisivat laajan levinneisyyden. Osa näistä haasteista liit-
tyy yhteistoiminnallisuuden ja yhteensopivuuden varmistamiseen ekosysteem-
missä, joka koostuu laajasta joukosta osapuolia. Tutkielmassa selvitetään stan-
dardoinnin merkitystä yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille, mitä standar-
deja on kehitetty ja mitkä organisaatiot niitä ovat kehittäneet. Tutkielma tehtiin
kirjallisuuskatsauksena, joka perustuu alan tieteellisiin julkaisuihin. Tutkiel-
massa määriteltiin yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät järjestelmiksi, joiden
toiminta perustuu reaaliaikaisen dynaamisen informaation vaihtamiseen ympä-
röivien liikennejärjestelmien välillä. Lisäksi havaittiin, että standardoinnilla on
tärkeä merkitys yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. Tutkielmassa löyde-
tyt standardit jaoteltiin kolmeen kategoriaan, jotka olivat tietoturva-, viesti-
tyyppi- ja kommunikaatiostandardit. Tutkielmassa tunnistettiin lisäksi joukko
merkittäviä standardeja kehittäneitä organisaatioita.

Asiasanat: Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät, ajoneuvojen
kommunikaatio, älyliikenne, standardointi

ABSTRACT

Kynsijärvi, Niko

Standardization in cooperative intelligent transportation systems

Jyväskylä: University of Jyväskylä, 2022, 28 pp.

Information systems science, Bachelor's thesis

Supervisor(s): Kuusio, Ari

Cooperative intelligent transportation systems have gained a momentum in recent years. We have seen in Europe the first mass produced vehicles with the cooperative communication capability. The reason for deploying cooperative intelligent transportation systems is to improve the traffic in many aspects. Still there are issues to be solved to gain mass market deployments all over the world. Some of these issues are related to making sure that the systems are cooperative and interoperable in a large and diverse ecosystem of stakeholders. This study focuses on the significance of standardization for cooperative intelligent transportation systems. Also, the study goes over the standards developed and the organizations that have been developing them. By studying this subject, we can create an understanding of the need for standardization when developing new applications for cooperative intelligent transportation systems. The study is done as a literature review that relies on academic publications from the area of cooperative intelligent transportation systems. Cooperative intelligent transportation systems were identified as systems that exchange real time dynamic information with other nearby systems. The study finds standardization to have significant impact for cooperative intelligent transportation systems. The standard found were categorized to three categories. These were communication, information security and message format. A group of organizations that have developed major standards in the field cooperative intelligent transportation systems were also identified.

Keywords: Cooperative intelligent transportation systems, Vehicular communication, intelligent transport, standardization

KUVIOT

KUVIO 1 Protokollapino ja julkaisun yksi ydinstandardit Euroopassa.....	21
---	----

TAULUKOT

TAULUKKO 1 DSRC-taajuusalueet ja standardit Yhdysvalloissa, Euroopassa ja Japanissa.....	16
TAULUKKO 2 Tutkimuskysymykset- ja tulokset.....	22

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVIOT JA TAULUKOT

1	JOHDANTO.....	6
2	YHTEISTOIMINNALLISET LIIKENNEJÄRJESTELMÄT	9
	2.1 Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät osana älykkäitä liikennejärjestelmiä	9
	2.2 Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimintaperiaate.....	10
	2.3 Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemi ja sen osapuolet.....	11
3	STANDARDIT YHTEISTOIMINNALLISISSA LIIKENNEJÄRJESTELMISSÄ	13
	3.1 Standardointiorganisaatiot.....	13
	3.2 Kommunikaatioprotokollien standardit	15
	3.3 Viestityyppien standardit	18
	3.4 Tietoturvastandardit	19
	3.5 Standardien merkitys yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä ..	20
4	YHTEENVETO	22
	LÄHTEET.....	25

1 JOHDANTO

Viime vuosikymmeninä on tehty suuria harppauksia liikenneturvallisuuden suhteen. Vuoden 2000 jälkeen onkin EU-alueella liikennekuolemien määrä vähentynyt merkittävästi, kuitenkin aivan viime vuosina positiivinen kehitys on pysähtynyt. Siksi esimerkiksi EU on ryhtynyt toimiin ja julkaissut tavoitteekseen saavuttaa vuonna 2050 tilanne, jossa EU-alueella ei satu liikenteessä yhtäkään kuolemaa tai vakavaa onnettomuutta. (Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission), 2020.)

Jotta näihin tavoitteisiin päästäisiin, on tutkittava uusien teknologioiden mahdollistamia ratkaisuja. Yksi tällainen tulevaisuudessa liikenneturvallisuutta lisäävä teknologia on liikennejärjestelmien välinen kommunikaatio (Chen, Jin & Reagan, 2010). Ajoneuvoja, jotka kykenevät kommunikoimaan ympäröiville liikennejärjestelmille kutsutaan verkottuneiksi ajoneuvoiksi ja yhdessä muiden järjestelmien kanssa ne luovat yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät (engl. cooperative intelligent transportation systems, C-ITS) (Traficom, 2022).

Ajoneuvovalmistajat kehittävät aktiivisesti ratkaisuja autonomisten ajoneuvojen toteutukseen. Autonomisella ajoneuvolla tarkoitetaan ajoneuvoa, joka kykenee ajamaan itsenäisesti lähtöpaikasta ennakolta määritettyyn sijaintiin (Gartner, 2022a). Autonomisilta ajoneuvoilta odotetaankin tulevaisuudessa suuria hyötyjä liikenneonnettomuuksien vähenemisessä ja liikenteen sujuvuuden paranemisessa (Hara & Kiyohara, 2018). Yhteistoiminnallisuus tulee olemaan mukana myös autonomisten ajoneuvojen toiminnassa. Ajoneuvolta ajoneuville kommunikaatiolla voidaan autonomisten ajoneuvojen välillä viestittää kriittistä tietoa ajoneuvon omasta liikkeestä, kuten suunta ja nopeus. Ajoneuvon omat sensorit ovat tärkeä väline tiedon tuottamisessa eri toiminallisuuksiin, mutta kuten ihmisillä myös sensoreilla on rajoittunut näkökenttä. Tämän takia ajoneuvojen on kyettävä välittämään havaitsemaansa tietoa myös ympärilleen, jolloin saadaan yhdessä luotua kattavampi näkökenttä (Uzair, 2022). Korkeimmalla autonomian tasolla ajoneuvot pystyvät kommunikoimaan aikomuksiaan toisilleen ja neuvottelemaan keskenään ilman kuljettajan tarvetta puuttua toimintaan. On jopa arvioitu, ettei korkeimman automaation tasoa (SAE 5) voida saavuttaa,

elleivät ajoneuvot kykene kommunikoimaan keskenään ja ympäröivän infrastruktuurin kanssa (Naranjo ym., 2020).

Yhteistoiminnallisilla liikennejärjestelmillä on myös kyky sujuvoittaa liikennettä. Ajoneuvojen kommunikoidessa liikenteenohjausjärjestelmille ja liikennevalojen ohjauskojeille suoraan, voidaan optimoida liikennevirtoja ja priorisoida tiettyjä tienkäyttäjiä. Euroopan Unionin komission tilaaman tutkimuksen mukaan jo vuonna 2030 olisi mahdollista yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien avulla säästää liikenteessä käytettyä aikaa Euroopan Unionin tasolla kaksi miljardia tuntia vuodessa, joka olisi noin kolme prosenttia kaikesta tiellä vietetystä ajasta. (Asselin-Miller ym., 2016.)

Standardit ja standardointi tulevat vastaan yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien kirjallisuudessa varsin usein. Jotta yhteistoiminnallisilla liikennejärjestelmillä voidaan saavuttaa laajoja valtioiden tai yksittäisten toimijoiden rajat ylittäviä toteutuksia, on alan suoritettava ensin standardisointia palveluille ja rajapinnoille (Kousaridas ym., 2020). Standardisoinnilla tarkoitetaan yhteisten hyvien toimintatapojen, käytäntöjen, ratkaisujen ja vaatimusten laatimista (SFS, 2022). Gartnerin informaatioteknologian sanastossa standardi määritellään dokumentiksi, joka suosittelee protokollaa, rajapintaa tai muuta systeemin osa-aluetta (Gartner, 2022b). Dokumentti voi kuvata myös yleisen tason asioita kuten viitekehystä tai mallia.

Tutkielmassa vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin.

- Mitä yhteistoiminnallisilla liikennejärjestelmillä tarkoitetaan?
- Mikä on standardoinnin merkitys yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille?
- Mitä standardeja yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille on kehitetty ja mitkä tahot ovat kehittäneet tämä alan keskeisiä standardeja?

Tutkimuskysymysten raja on tehty koskemaan standardointia yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimialalla. Tutkimuskysymyksiin vastauksia haettaessa käydään läpi yhteistoiminnallisia liikennejärjestelmiä, toimialalle tällä hetkellä kehitettyjä standardeja ja niitä kehittäneitä tahoja. Tutkielman ei ole kuitenkaan tarkoitus asettaa standardeja paremmuusjärjestykseen. Lisäksi tutkielmassa esitellyt standardit on pyritty rajaamaan alan merkittävimpiin standardeihin, eikä tarkoitus ole esittää kattavaa luetteloja maailmalla esiintyvistä standardeista. Esitellyt standardit rajoittuvat maantieteellisesti lähinnä Eurooppaan ja Pohjois-Amerikkaan, koska alan tutkimus on keskittynyt eniten näihin maantieteellisiin alueisiin. Tarkasteltaessa standardointeja tekeviä organisaatioita ei oteta mukaan historian saatossa toteutettuja tutkimus- ja kehityshankkeita, vaan keskitytään nykyisiin merkittävimpiin standardeja määritteleviin organisaatioihin.

Tutkielma toteutetaan kuvailevana kirjallisuuskatsauksena ja lähteinä toimivat tieteelliset artikkelit ja julkaisut. Salminen (2011) määrittelee kuvailevan kirjallisuuskatsauksen yleiskatsaukseksi, joka pohjautuu laajaan aineistoon. Tutkielman tekoon käytetty aineisto on kerätty laajasti eri tietokannoista.

Tutkielman tutkimuskysymykset ovat melko avoimet ja niiden pohjalta muodostuu varsin laaja kuva aiheesta.

Tutkielmassa käytetyt lähteet ovat pääosin peräisin verkossa toimivista tietokannoista. Näitä tietokantoja ovat olleet Google Scholar, IEEE Xplore ja Scopus-tietokannat. Hakusanoina lähteiden etsimiseen käytettiin muun muassa sanoja, kuten "C-ITS standards", "ITS standards", "V2X standards", "Cooperative ITS", "C-ITS deployment" ja "V2X communication". Lähteiksi pyrittiin valitsemaan artikkeleita arvostetuilta julkaisijoilta. Joinain lähteinä ovat toimineet myös erilaiset tutkimusraportit, kuten Euroopan komission raportit. Lähteissä on kuitenkin keskitytty tieteellisiin artikkeleihin ja tunnettujen konferenssien konferenssijulkaisuihin. Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät ovat vielä varsin uusi aihe, jonka takia käytetyt lähteet eivät ole kovinkaan vanhoja. Suurin osa lähdeartikkeleista onkin julkaistu 2010-luvulla. Artikkeleita valittaessa tarkasteltiin myös niiden laatua Julkaisufoorumin ylläpitämän JUFO-luokituksen avulla. Artikkeleja valittaessa pyrittiin ne rajaamaan vain tason 1–3 artikkeleihin, joita voidaan pitää erittäin laadukkaina. Mukana on kuitenkin myös joitain Jufo-luokitus 0-tason artikkeleita ja lisäksi määritelmiä tehdessä on käytetty Gartnerin informaatioteknologian sanaston määritelmiä hyödyksi.

Tutkielma koostuu johdannon ja yhteenvedon lisäksi kahdesta sisältöluvusta. Luvussa kaksi esitellään yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät, avataan niiden toimintaa ja mitä järjestelmiä niihin lasketaan kuuluvaksi. Näin saadaan luotua hyvä käsitys yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien perusteista, jolloin niiden standardeja on helpompi ymmärtää. Luku kolme käsittelee standardeja yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä. Tässä luvussa käydään läpi standardeja eri yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien osa-alueilla, kuten kommunikaatio, viestityypit ja tietoturva. Tässä luvussa myös esitellään standardointia suorittavia tahoja, sekä syvennyttään standardien rooliin yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimialalla. Tutkielman lopuksi kootaan yhteenvedo ja esitetään jatkotutkimusaiheita.

2 YHTEISTOIMINNALLISET LIIKENNEJÄRJESTELMÄT

Tässä luvussa käsitellään yhteistoiminnallisia liikennejärjestelmiä osana älykkäiden liikennejärjestelmien laajaa kokonaisuutta, mutta myös niiden eroavuuksia perinteisiin älykkäisiin liikennejärjestelmiin verrattuna. Lisäksi käsitellään yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimintaperiaatteita, järjestelmien välistä kommunikaatiota ja esitellään erilaiset järjestelmien väliset kommunikaatiotyypit.

2.1 Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät osana älykkäitä liikennejärjestelmiä

Älykkäät liikennejärjestelmät (engl. intelligent transportation systems, ITS) ovat sovelluksia, laitteita ja teknologisia järjestelmiä, joiden avulla pyritään minimoimaan liikenteen hättävää vaikutuksia ja parantamaan turvallisuutta. Käytännössä tämä tarkoittaa päästöjen vähentämistä, ruuhkien minimointia ja turvallisuuden parantamista liikenteessä. (Alonso, Faus, Tormo & Useche, 2022.)

Lisäksi älykkäiden liikennejärjestelmien määritelmään voidaan nähdä kuuluvan tavoite vähentää kuljettajan työmäärää ja mahdollistaa uusia keinoja toteuttaa liikenteen hallintaa (Giannoutakis & Li, 2012). Älykkäät liikennejärjestelmät pyrkivät lisäksi automatisoimaan ajoneuvojen ja infrastruktuurin vuorovaikutusta mahdollistaakseen korkean tason turvallisuussovellukset ja lisätäkseen mukavuutta liikenteessä (Daniel, Paul, Ahmad & Rho, 2016). Nämä älykkäiden liikennejärjestelmien tavoittelemat edut ovat mahdollista saavuttaa toiminnallisuuksilla, jotka pohjautuvat informaatio- ja kommunikaatioteknologioiden tuomiseen liikennejärjestelmiin (Hess ym., 2009). Nykypäivänä älykkäät liikennejärjestelmät ovat kehittyneet monimutkaisiksi järjestelmiksi, jotka integroivat itseensä perinteisten teknologioiden lisäksi uusia nousevia teknologioita, kuten esineiden internet (engl. internet of things, IoT) ja tekoäly (Zhu, ym., 2020). Esineiden internetiksi voidaan katsoa fyysisten laitteiden muodostama verkko,

jossa sisäänrakennetun teknologian avulla kommunikoidaan, havaitaan ja vaikutetaan esineiden sisäisten tilojen tai ympäristön kanssa (Gartner, 2022c). Lisäksi älykkäiden liikennejärjestelmien kyvykkyyksiin voidaan nykyisin lisätä elektroniset sensortechnologiat ja älykkäät ohjausteknologiat (Zhu, Yu, Wang, Ning & Tang, 2019).

Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät ovat osa älykkäitä liikennejärjestelmiä. Erona perinteisten älykkäiden liikennejärjestelmien ja yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien välillä voidaan kuitenkin pitää niiden tarkoitusta. Kun perinteiset älykkäät liikennejärjestelmät keskittyivät tuomaan älyä tienvarsiin ja ajoneuvoihin, yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät taas keskittyvät näiden järjestelmien väliseen kommunikaatioon (Degrande, Vannieuwenborg, Verbrugge & Colle, 2019). Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät tehostavat toimintaansa verrattuna perinteisiin älykkäisiin liikennejärjestelmiin hyödyntämällä saamaansa reaaliaikaista ja dynaamista informaatiota muilta liikennejärjestelmiltä (Sun, Li & Gao, 2016). Yksi esimerkki tällaisesta informaatiosta on ajoneuvojen välittämä informaatio toiminnastaan. Tämä informaatio sisältää tietoja, kuten ajoneuvon sijainti, nopeus, kiihtyvyyys ja suunta (Eze. E, Zhang, Liu & Eze. J, 2016).

2.2 Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimintaperiaate

Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien keskeiseksi toiminnaksi voidaan nähdä tiedon tarjoaminen kuljettajille tieliikenteessä käyttämällä ajoneuvojen ja muiden liikennejärjestelmien välistä kommunikaatiota (engl. vehicle to all, V2X). Kommunikaatiossa välitettävä informaatio voi olla usean eri toimijan luomaa, kuten tieinfrastruktuurin, liikennekeskusten tai muiden ajoneuvojen tuottamaa. (Naranjo ym., 2020.)

Sun ym. (2016) kuvaavat artikkelissaan yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimintaa järjestelmien mahdollistamaksi kommunikaatioksi, jossa ajoneuvo keskustelee muille ajoneuvoille ja tieinfrastruktuurille. Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien välinen kommunikaatio pitää sisällään ajoneuvojen keskinäisen kommunikoinnin (engl. vehicle to vehicle, V2V), ajoneuvojen ja infrastruktuurin välisen kommunikoinnin (engl. vehicle to infrastructure, V2I) ja ajoneuvojen ja jalankulkijoiden välisen kommunikoinnin (engl. vehicle to pedestrian, V2P) (Hamida, Noura & Znaidi, 2015; Kiela ym., 2020). Lisäksi ajoneuvot saattavat kommunikoida tietoverkkojen tai palvelimien kanssa (engl. vehicle to network, V2N) (Kiela ym., 2020).

Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien välinen kommunikaatio voidaan toteuttaa kahdella eri päätävällä, lyhyen kantaman suoralla kommunikaatiolla tai hyödyntäen olemassa olevia matkapuhelinverkkoja (Lu, Blokpoel, Funfrocken & Castells, 2018). Lyhyen kantaman suora kommunikaatio eri liikennejärjestelmien välillä vaatii kuitenkin toimiakseen tietynlaisen teknologisen varustelun. Jotta kommunikaatio tienvarsiyksiköiden (engl. road side unit, RSU) ja ajoneuvojen välillä voidaan toteuttaa, on ajoneuvo oltava varusteltuna

radiorajapinnalla tai ajoneuvoyksiköllä (engl. on board unit, OBU) (Zeadally, Hunt, Chen, Irwin & Hassan, 2012). Tienvarsiyksiköt ovat runkoverkkoon yhdistettyjä laitteita, jotka sijoitellaan teiden varsille strategisille sijainneilla. Niiden tehtävä on avustaa tehokasta, luotettavaa ja nopeaa kommunikaatiota, käyttämällä lyhyen kantaman suoraa kommunikaatioteknologiaa (Eze ym., 2016). Toisin kuin strategisesti sijoitellut ja fyysisesti tievarteen asennetut tienvarsiyksiköt, ajoneuvoyksiköt ovat sijoitettuna ajoneuvoon itseensä (Fernandes, Rufino, Alam & Ferreira, 2018). Ajoneuvoyksiköt mahdollistavat ajoneuvolle kyvykkyyden jakaa havaitsemaansa informaatiota muille liikennejärjestelmille langattomasti (Sedar ym., 2021). Tienvarsiyksiköiden ja ajoneuvoyksiköiden avulla voidaan tiedonvaihtoa eri liikennejärjestelmien välillä suorittaa langattomasti lyhyen kantaman kommunikaatiolla.

Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toinen kommunikaatio vaihtoehto on matkapuhelinverkkojen kautta tapahtuva tiedonvaihto. Varsinkin uuden sukupolven 5G-teknologia mahdollistaa suuret tietomäärät, pienen viiveen ja korkean tason luotettavuuden (Festag, 2015). Käyttämällä olemassa olevia matkapuhelinverkkoja voidaan yhdistää paljon tienvarsi-infrastruktuuria V2I kommunikaatioon nopealla aikataululla käyttöönoton alkaessa (Asselin-Miller ym., 2016). Matkapuhelinverkkojen yli tapahtuvan kommunikaation soveltuvuutta tiettyihin turvallisuussovelluksiin on kuitenkin epäilty. Tämä johtuu kyseisten sovellusten vaatimasta äärimmäisen pienestä latenssista (Uzair, 2022). Tähän haasteeseen vastaamaan 3GPP (The 3rd Generation Partnership Project) kuitenkin kehitti LTE (long term evolution) standardin. Myös 5G-teknologia pyrkii vastaamaan tähän vaatimukseen ja matkapuhelinverkkotarjoajat keskittyvätkin tarjoamaan yhä luotettavampaa tiedonvälitystä pienemmällä latenssilla (Kousaridas ym., 2020).

Standardoinnin osalta matkapuhelinverkkojen yli tapahtuva kommunikaatio on jäänyt osittain vähemmälle huomiolle. Lu ym. (2018) esittävät syyksi tälle kommunikaation luonteen. Matkapuhelinverkkoja hyödynnettäessä voidaan teknisesti rakentaa samalle alueelle useampi eri järjestelmä. Kuitenkaan useamman rinnakkaisen järjestelmän olemassaolo ei palvele loppukäyttäjän käyttökokemusta tai resurssien tehokasta käyttöä. (Lu ym., 2018.)

2.3 Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemi ja sen osapuolet

Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät koostuvat useista eri järjestelmistä, jotka kommunikoivat keskenään. Tämä tarkoittaa, että yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemiin liittyy monia eri osapuolia. Sun ym. (2016) määrittelevät ekosysteemin osapuoleksi yksilön, ryhmän tai organisaation, jolla on osuus tai yhteys kyseiseen järjestelmään. Malone ja Soekrolla (2019) esittävät artikkelissaan ekosysteemin osapuoliksi kuuluvan seuraavat osapuolet: tieoperaattorit, ajoneuvovalmistajat, vakuutusyhtiöt, jälkimarkkinoilla asennettavien laitteiden

valmistajat, palveluntarjoajat, tiedontuottajat, tienvarsilaitteiden valmistajat ja matkapuhelinverkko-operaattorit. Kuitenkin yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemi voidaan nähdä vielä laajempaan. Tähän voidaan nähdä edellä esiteltyjen osapuolten lisäksi yksityiset tienkäyttäjät, liikennepalveluiden tarjoajat, viranomaisajoneuvot, alkuperäiset laitevalmistajat (engl. original equipment manufacturer, OEM), ajoneuvon sisäisten laitteiden valmistajat, sovelluskehittäjät ja lait säätävät tieviranomaiset (Sun ym., 2016).

Ekosysteemin koostuessa useista eri osapuolista, on eri osapuolilla erilaiset intressit toimintaansa. Esimerkiksi investointeja suunnitteleville toimijoille, kuten julkisen sektorin toimijat, yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien markkinapenetraatio on merkittävä tekijä päätöksen teossa (Degrande ym., 2019). Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemin koostuessa suuresta ja monipuolisesta joukosta osapuolia, on julkisen sektorin toimijoiden rooli avainasemassa (Weiß, 2011). Myös yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien liiketoiminnassa tulee ottaa huomioon osapuolten moninaisuus. Liiketoimintamallien tulisi löytää tasapaino, joka tuottaa lisäarvoa, mutta samaan aikaan huolehtii hyötyjen tasapuolisesta jakautumisesta osapuolten kesken (Giannoutakis & Li, 2012). Juuri eri osapuolten suuri määrä ja keskenään erilaiset intressit ovat kuitenkin suurimpia haasteita yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien tuomisessa laajasti liikenteeseen (Giannoutakis & Li, 2012; Malone & Soekroella, 2019).

3 STANDARDIT YHTEISTOIMINNALLISISSA LIIKENNEJÄRJESTELMISSÄ

Tässä luvussa käydään läpi standardeja yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä ja niitä kehittäneitä organisaatioita. Ensimmäisessä alaluvussa käsitellään alan merkittäviä standardeja kehittäviä organisaatioita ja vastataan kolmanteen tutkimuskysymykseen. Seuraavat alaluvut keskittyvät vastaamaan toiseen tutkimuskysymykseen: mitä standardeja yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille on kehitetty ja mitkä tahot ovat kehittäneet tämä alan keskeisiä standardeja? Lisäksi luvussa esitellään uusia, vielä kehityksen alla olevia tulevaisuuden standardeja.

3.1 Standardointiorganisaatiot

Ensimmäiset tutkimushankkeet Euroopassa yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien alalla suoritettiin jo 1980-luvulla ja pelkästään vuoden 2000 jälkeen on Euroopassa järjestetty yli 40 yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien hanketta (Festag, 2014). Näiden hankkeiden aikana on syntynyt valtavasti tietoa, jota on voitu myöhemmin hyödyntää standardeja luodessa.

Euroopassa yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien standardeja luovat pääsääntöisesti kaksi organisaatioita. Nämä organisaatiot ovat European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ja European Committee for Standardization (CEN). Näiden kahden Euroopan laajuisen standardointiorganisaation lisäksi on valtioilla omia kansallisia standardointiorganisaatioita. (Festag, 2014.)

Myös ajoneuvovalmistajat ovat havainneet tarpeen yhteistyölle standardien kehityksessä. Tämän seurauksena alun perin saksalaiset ajoneuvovalmistajat perustivat voittoa tavoittelemattoman organisaation nimeltä Car 2 Car Communication Consortium (C2C-CC), johon myöhemmin liittyi mukaan yrityksiä ympäri Eurooppaa ja eri toimialoilta. C2C-CC:n tavoitteeksi asetettiin harmonisoida eurooppalaisten yhteistoiminnallisten ajoneuvojen hankkeiden tuloksia ja

määritellä alalle standardeja ajoneuvoilta muille yhteistoiminnallisille järjestelmille kommunikointiin. (Weiß, 2011.)

Artikkelissaan Weiß (2011) listaa syitä, miksi C2C-CC:n ponnistelut älykäden liikennejärjestelmien standardoinnissa siirrettiin viralliseen ETSI:n suorittamaan standardointiprosessiin. Samalla lista esittää, mitä hyötyjä suuren virallisen standardointiorganisaation suorittama prosessi tuo standardille. Virallisen standardointiorganisaation tuomiksi hyödyiksi Weiß (2011) esittää:

- Standardit ovat kasvavissa määrin osa eurooppalaista lainsäädäntöä. Suurien virallisten standardointiorganisaatioiden standardeilla on enemmän vaikutusvaltaa, kuin alan luomilla omilla standardeilla.
- Mahdollisimman monen osapuolen osallistaminen standardin kehitykseen lisää yleistä hyväksyntää standardille.
- Monessa valtiossa julkisia ostokilpailutuksia tehdessä vaaditaan järjestelmiä täyttämään tietyt kansainväliset standardit.

Kansainvälisistä standardointiorganisaatioista yksi merkittävimmistä yhteistoiminnallisten ajoneuvojen alalla on ISO (International Standards Organization). ISO:n luoma työryhmä on suorittanut merkittäviä ponnisteluja eri langattomien kommunikaatioteknologioiden yhteistoimivuuden eteen (Eze ym., 2016). Lisäksi yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille otettiin ISO OSI-referenssimalli käyttöön kattamaan horisontaaliset kerrokset pääsyteknologioille (engl. access technologies) ja vertikaaliset entiteetit hallinnalle ja turvallisuudelle (Festag, 2014).

IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) on organisaatio, joka on kehittänyt lukuisia standardeja yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. IEEE:tä voidaan pitää hyvin tunnettuna organisaationa yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien standardien määrittelyssä (Bae, Simpson, Foo & Pieprzyk, 2019). IEEE:n julkaisemiin yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien standardeihin kuuluu muun muassa tutkielman muissa luvuissa käsitellyjä standardeja, kuten IEEE 802.11p ja IEEE 1609.2. IEEE on myös mukana kehittämässä uusia kommunikaatiostandardeja yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille vastaamaan tulevaisuuden sovellusten tarpeisiin (Naik ym., 2019).

3GPP (3rd Generation Partnership Project) on seitsemän telekommunikaatiostandardeja kehittävän järjestön yhteenliittymä (3GPP, 2022). 3GPP on vastuussa C-V2X-standardin kehityksestä ja se hallinnoikin kyseistä standardia ottamalla huomioon eri sidosryhmien tarpeet (Kiela ym., 2020). 3GPP kehittää standardeja julkaisemalla uusia julkaisuversioita. Matkapuhelinverkkoihin perustuva kommunikaatio nousi varteenotettavaksi vaihtoehdoksi ajoneuvojen kommunikointiin 3GPP:n julkaisuversioiden 12 ja 13 mukana (Zeadally ym., 2020). Julkaisuversiossa 16 3GPP esitteli uuden version matkapuhelinverkkoon perustuvasta standardista, mikä hyödyntää uutta 5G New Radio (NR) -rajapintaa (Garcia ym., 2021; Naik ym., 2019).

3.2 Kommunikaatioprotokollien standardit

Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien kommunikaatio voidaan toteuttaa kahdella eri päätävällä. Nämä kaksi tapaa ovat lyhyen kantaman suora kommunikaatio ja pitkän kantaman matkapuhelinverkkoja hyödyntävä kommunikaatio (Lu ym., 2018). Lyhyen kantaman kommunikaatio voidaan jakaa vielä useampaan eri standardiin pohjautuvaan teknologiaan. Alun perin yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien lyhyen kantaman kommunikaatioon oli kehitetty kaksi vaihtoehtoista standardia. Ensimmäinen näistä pohjautui yleisen WLAN-standardin IEEE 802.11 (engl. wireless local area network) pohjalta laadittuun IEEE 802.11p -standardiin (Festag, 2015; Lu ym., 2018). Standardi tunnetaan Euroopassa myös nimellä ITS-G5 ja Yhdysvalloissa nimellä WAVE (engl. wireless access for the vehicular environment). Toinen vaihtoehtoinen standardi IEEE 802.11p:lle on 3GPP:n kehittämä C-V2X-standardi (Zeadally, Javed & Hamida, 2020).

On kuitenkin havaittu, että nämä kaksi standardia tarvitsevat kehitystä, jotta ne vastaisivat paremmin yhteistoiminnallisen kommunikaation asettamiin vaatimuksiin. Tämän kehityksen seurauksena ovatkin syntyneet IEEE 802.11bd ja 5G NR-V2X -standardit. (Uzair, 2022.)

IEEE 802.11p on vuonna 2010 hyväksytty standardi, joka pohjautuu yleiseen IEEE 802.11 WLAN -standardiin (Zeadally ym., 2020). Standardi omaa joukon ominaisuuksia, jotka tekevät siitä varteenotettavan vaihtoehdon ajoneuvojen yhteistoiminnalliseen kommunikaatioon (Arena, Pau & Severino, 2020). IEEE 802.11p pohjaisissa järjestelmissä lähettimet lähettävät ympärilleen tietyin väliajoin sanomaa, jota ympäröivät järjestelmät voivat vastaanottaa. Kommunikaation etäisyys on yleensä joissain sadoissa metrimetrissä ja siksi tietoa voidaan välittää vain lähistöllä olevien järjestelmien kesken (Vinel, 2012). Vaikka IEEE 802.11p pohjautuu alkuperäiseen IEEE 802.11 WLAN -standardiin, on sitä jouduttu muokkaamaan sopimaan ajoneuvojen väliseen kommunikaatioon (Arena ym., 2020; Zeadally ym., 2020). Standardin piti mahdollistaa vielä nopeampi ja tehokkaampi kommunikaatio, varsinkin kun kommunikaatio saattaa tapahtua suurissa nopeuksissa, jolloin kommunikaatiossa tapahtuviin toimintoihin jäävä aika on vähäinen (Arena ym., 2020). Standardi operoi 5.9 GHz:n taajuusalueella ja tarjoaa varsin pienen latenssin, mikä tekee siitä potentiaalisen vaihtoehdon yhteistoiminnallisten ajoneuvojen väliseen kommunikaatioon (Festag, 2015).

DSRC (direct short-range communication) on Yhdysvaltojen kansallisen kommunikaatiokomission (engl. federal communication commission, FCC) ehdottama standardi. Standardia varten varattiin Yhdysvalloissa vuonna 1999 75 MHz kaistanleveyttä 5.9 GHz:n taajuudelta (5.850 – 5.925 GHz) tukemaan ajoneuvojen keskinäistä kommunikaatiota, sekä ajoneuvojen ja infrastruktuurin välistä kommunikaatiota (Arena ym., 2020). DSRC:lle ei kuitenkaan ole olemassa globaalia tarkkaa määritelmää, vaan sillä yleensä tarkoitetaan liikennejärjestelmien välistä langattoman kommunikaation teknologiaa (Abboud, Omar & Zhuang, 2016). DSRC määrittelee käytännössä raamit kommunikaatiolle, joka

sitten voidaan toteuttaa eri teknologisilla vaihtoehdoilla ja radiotaajuusalueilla. Nämä taajuusalueet taas vaihtelevat alueittain maailmassa, mikä asettaa haasteita yhteistoiminnalle näiden alueiden välillä (Abboud ym., 2016). Seuraavassa taulukossa (TAULUKKO 1) esitettyinä taajuusalueet ja alueen DSRC-standardit Yhdysvalloissa, Euroopassa ja Japanissa.

TAULUKKO 1 DSRC-taajuusalueet ja standardit Yhdysvalloissa, Euroopassa ja Japanissa (Abboud ym., 2016).

Region	Band (MHz)	Channelization	In-use or allocated	Applications	Standard	Scope
North America	902-928 ^d	Uplink/downlink channels for active and backscatter systems [12]	In-use	Electronic toll collection and commercial and non-commercial vehicle applications [13]	ASTM E2158-01	Physical (PHY) layer
					[14]	Data link layer
	5850-5925	One 10 MHz control channel, six 10 MHz service channels, and one 5 MHz channel (held in reserve) [15]	Allocated	Road safety, passenger infotainment, manufacturer services, and vehicle traffic optimization applications [5]-[7]	IEEE 1609.0	System architecture
					IEEE 1609.2	Security services
					IEEE 1609.3	Logical link control (LLC), network, and transport layers
					IEEE 1609.4	Multi-channel operation
					IEEE 1609.11	Electronic payment
IEEE 1609.12	Identifier allocation					
IEEE 802.11-2012	PHY and medium access control (MAC) layers					
Europe	5470-5725 ^b (ITS-G5C)	Dynamic frequency selection (DFS) of a 10 MHz or 20 MHz service channel [16]	Allocated	ITS applications based on V2I communications [16]	ETSI EN 302 571	Requirements for operation in the 5855-5925 MHz band
					ETSI EN 300 674-1	Requirements for operation in the 5795-5815 MHz band
					ETSI ES 202 663 (ITS-G5)	PHY and MAC layers
	5795-5815	Four 5 MHz channels [17]	In-use	Road transport and traffic telematics [18]	ETSI EN 302 665	Communication architecture
					ETSI EN 302 636-3	Network architecture
					ETSI EN 302 636-4-1	Geographical routing functionality
					ETSI TS 102 636-4-2	Geographical routing based on ITS-G5
	5855-5925	One 10 MHz control channel and six 10 MHz service channels [19]	Allocated	Non-safety applications [5855-5875 MHz (ITS-G5B)], safety applications [5875-5905 MHz (ITS-G5A)], and future ITS applications (5905-5925 MHz) [19]	ETSI EN 302 636-6-1	Transmission of IPv6 packets using geographical routing
					ETSI EN 302 636-5-1	Transport layer
					ETSI EN 302 637-2	Format and handling of cooperative awareness messages (CAMs)
ETSI EN 302 637-3	Format and handling of decentralized environmental notification messages (DENMs)					
Japan	755.5-764.5	Single channel [20]	Allocated	Safety applications [20]	ARIB STD-T109	PHY, data link, application, and IVC-RVC layers ^e
					ARIB STD-T55	PHY, data link, and application layers ^e
	5770-5850 ^d	Seven uplink and seven downlink 5 MHz channels [21]	In-use	Toll collection, passenger entertainment, and information provisioning regarding road conditions, local events, and emergent disasters [22], [23]	ARIB STD-T75	
					ARIB STD-T88	Application interface for deploying non-IP applications based on ARIB STD-T88 and ARIB STD-T75

ETSI ITS-G5 on ETSI:n luoma standardi, mikä pohjautuu aikaisemmin käsiteltyyn IEEE 802.11p -standardiin (Randriamasy, Cabani, Chafouk & Fremont, 2019). Standardi operoi 5.9 GHz:n taajuusalueella, joka on jaettu osiin A:sta D:hen (Festag, 2015). ITS-G5A 30 MHz taajudella on omistettu turvallisuutta ja liikenteen sujuvuutta parantaville sovelluksille. ITS-G5B omaa 20 MHz taajuden sovelluksille jotka eivät liity varsinaisesti turvallisuuteen ja ITS-G5C jakaa RLAN (engl. radio local area network) kaistan. ITS-G5D taas on varattu tulevaisuuden sovellusten käyttöön (Festag, 2015; Randriamasy ym., 2019). Euroopassa allokoitujen taajuksien käyttöä säädellään standardeilla, jotta voidaan varmistaa radiolaitteiston yhteensopivuus lakien asettamien direktiivien kanssa (Festag, 2014).

C-V2X (cellular vehicle to all) on 3GPP:n kehittämä standardi yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. Standardi on ensimmäinen matkapuhelinverkkoon perustuva standardi, mikä mahdollistaa suoran langattoman kommunikaation (Molina-Masegosa, Sepulcere & Gozalvez, 2019).

C-V2X mahdollistaa lyhyen kantaman suoran kommunikaation järjestelmien välillä PC5 nimisen rajapinnan avulla ja suuremman etäisyyden kommunikaation matkapuhelinverkkoasemien kautta Uu-rajapintaa käyttäen (Uzair, 2022; Vukadinovic ym., 2018). Tämä kyvykkyys suoraan kommunikaatioon saavutettiin 3GPP:n julkaisemassa versiossa 14. C-V2X-standardi nousee usein esiin WLAN-pohjaisten IEEE 802.11p ja ETSI ITS G5 -standardien vaihtoehtoisena ratkaisuna yhteistoiminnallisen kommunikaation toteutukseen. Yksi syy tähän vastakkainasetteluun C-V2X:n ja WLAN pohjaisten standardien välillä liittyy siihen, että nämä standardit operoivat samalla 5.9 GHz:n taajusalueella (Uzair, 2022). Lisäksi nämä samaa toiminnallisuutta käsittelevät standardit kilpailevat markkina-asemastaan yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien yleisenä kommunikaatiostandardina.

Tällä hetkellä lyhyen kantaman suorista kommunikaatiostandardeista IEEE 802.11p pohjaiset standardit ovat olleet pidempään käytössä, kun taas 3GPP:n kehittämä LTE (long term evolution) pohjainen C-V2X on varsin uusi standardi. (Uzair, 2022.)

Jotta standardit vastaisivat paremmin yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien asettamiin vaatimuksiin, on alettu kehittämään uusia standardeja. Niin WLAN-pohjaiset standardit, kuin myös matkapuhelinverkkoon perustuvat standardit ovat kehityksen kohteena. (Naik, Choudhury & Park, 2019.)

Vastauksena nykyisten standardien puutteisiin vuonna 2018 IEEE muodosti uuden ryhmän nimeltä IEEE 802.11 Next Generation V2X, jonka tuloksena vuonna 2019 syntyi IEEE 802.11bd työryhmä (Naik ym., 2019). IEEE 802.11bd on aikaisemmasta standardista IEEE 802.11p kehitetty seuraava versio, mikä pyrkii tarjoamaan entistä paremman yhteyden ja pienemmän latenssin (Uzair, 2022). Lisäksi uudelta 802.11bd-standardilta vaadittiin taaksepäin yhteensopivuutta vanhojen jo käytössä olevien 802.11p pohjaisten liikennejärjestelmien kanssa (Naik ym., 2019; Torgunakov, Loginov & Khorov, 2022). Uudelle standardille asetettiin alkuvaiheessa seuraavat vaatimukset: kyky saavuttaa kaksinkertainen suoritusteho verrattuna 802.11p-standardiin aina 500 km/h suhteelliseen nopeuteen asti, ainakin yksi toimintatila jossa uusi standardi tuplaa 802.11p-standardin maksimitoimintaetäisyyden ja ainakin yksi tapa ajoneuvojen paikannuksen toteutukseen (Naik ym., 2019). Lisäksi 802.11bd mahdollistaa operoinnin myös 60 GHz:n taajudella entisen 5.9 GHz:n taajuuden lisäksi (Torgunakov ym., 2022). Tämä 60 GHz:n taajuusalue mahdollistaa erittäin tehokkaan kommunikaation lyhyillä etäisyyksillä (Torgunakov ym., 2022). Uusi 802.11bd-standardi on siis kehittyneempi versio nykyisestä 802.11p-standardista, mutta sen toiminta perustuu edelleen samaan periaatteeseen kuin 802.11p-standardin (Uzair, 2022). Uusi standardi lähettää edelleen WLAN tapaan tietoa ympärilleen, josta kyvykkäällä vastaanottimella varustetut järjestelmät voivat sitä vastaanottaa.

NR-V2X on 3GPP:n työstämä uusi paranneltu standardi verrattuna vanhaan LTE-pohjaiseen C-V2X-standardiin. Standardi on osa kuudettatoista julkaisuversiota ja se perustuu 5G NR -standardiin, joka oli osa 3GPP:n

viidettätoista julkaisuversiota (Naik ym., 2019; Uzair, 2022). Uudella NR-V2X-standardilla pyritään vastamaan uusien tulevaisuuden yhteistoiminnallisten sovelluksien vaatimuksiin. Nämä sovellukset tulevat tarvitsemaan entistä paremman palvelunlaadun (engl. quality of service, QoS) ja joissain käyttötapauksissa jopa alle viiden millisekunnin latenssin (Naik ym., 2019). NR-V2X-standardi sisältää niin kutsutun reunalinkin (engl. side link), joka mahdollistaa suoran kommunikaation käyttäjien laitteiden (engl. user equipment) välillä (Garcia ym., 2021; Naik ym., 2019). Garcia ym. (2021) määrittelevät edellä mainituiksi laitteiksi tienvarsi-asemat ja jalankulkijoiden mobiilipäätteet. NR-V2X on ensimmäinen standardi, mikä käyttää 5G NR air -rajapintaa reunalinkin kautta toteutettavaan suoraan kommunikaatioon (Garcia ym., 2021). NR-V2X -standardin on tarkoitus täydentää LTE C-V2X -standardia. Tarkoitus on mahdollistaa korkeampi automaation taso ja monimutkaisemmat käyttötapaukset (Garcia ym., 2021). On kuitenkin esitetty ettei uusi standardi korvaisi täysin LTE C-V2X -standardia, vaan molemmat voisivat olla toiminnassa samalla alueella samanaikaisesti (Naik ym., 2019). Naik ym. (2019) mukaan tällainen tilanne voisi olla mahdollinen, jos uusilla ajoneuvoilla olisi kyvykkyydet toteuttaa molemmat standardit samanaikaisesti.

3.3 Viestityyppien standardit

Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät vaihtavat keskenään reaaliaikaista ja erittäin dynaamista informaatiota (Sun ym., 2016). Tässä tiedonvaihdossa liikkuva informaatio on standardoidussa formaatissa ja sen muoto riippuu tarkoituksesta käyttötapauksesta (Naranjo ym., 2020). ETSI onkin standardoinut useita yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien viestityyppejä, jotka kaikki suorittavat tiettyä tarkoitusta.

ETSI:n standardoimiin viesteihin kuuluvat DENM (decentralized environmental notification message), CAM (cooperative awareness message), SPAT (signal phase and time) ja MAP (map data) (Naranjo ym., 2020). Näiden standardien lisäksi on SAE (Society of Automotive Engineers) julkaissut standardin BSM (basic safety message) viestityypille (Charpentier, Slamnik-Krijestorac & Marguez-Barja, 2022). Festag (2014) esittelee edellä mainittujen viestityyppien lisäksi viestityypit risteysalueen etuuskien pyytämiseen (engl. signal request message, SRM), myöntämiseen (engl. signal status message, SSM), ajoneuvodatan keräämiseen (engl. probe vehicle data, PVD, PDM) ja informaation tuomiseen ajoneuvoon (engl. in-vehicle information, IVI). Näitä viestityyppejä standardoidaan CEN TC 278 ja ISO TC 204 teknisissä komiteoissa (Festag, 2014).

CAM on ETSI EN 302 637-2 -standardissa määriteltävä viestityyppi, jonka tarkoitus on julkaista reaaliaikaista informaatiota lähettävästä järjestelmästä ympärilleen säännöllisesti (Festag, 2014; Naranjo ym., 2020). Vaihtamalla CAM-viestejä yhteistoiminnallisen liikennejärjestelmät voivat luoda yhteistoiminnallisen tilannekuvan ympäröivästä tilanteesta. CAM-viesti koostuu kahdesta pakollisesta osiosta ja kahdesta tarvittaessa lisättävästä osiosta (Charpentier ym., 2022).

Nämä tarvittaessa lisättävät osiot ovat yleensä lisättyjä viestiin riippuen lähettävän järjestelmän roolista (Festag, 2014). CAM-viestin lähetys taajuus vaihtelee lähettävän järjestelmän dynaamisesta tilasta ja se voi olla välillä 1 – 10 viestiä sekunnissa (Festag, 2014).

Myös DENM-viesti on ETSI:n standardoima viestityyppi, jonka avulla viestitään havaituista vaarallisista tilanteista lähistöllä oleville järjestelmille (Kousaridas ym., 2020). Lisäksi DENM-viestillä voidaan viestiä havaitusta tilanteesta, joka mahdollisesti vaikuttaa yleiseen liikennetilanteeseen (Moso ym., 2021). DENM-viestin formaatti ja datan muoto löytyvät ETSI EN 302 637-3 -standardista (Naranjo ym., 2020).

Lu ym. (2018) esittävät kuitenkin kritiikkiä lyhyen kantaman yhteyksissä välitettävien viestin standardeista. Heidän mukaansa viestit sisältävät liian paljon optionaalisia elementtejä ja riskin tulkita näitä elementtejä eri lailla. Ratkaisuna tähän ongelmaan on lähdetty kehittämään viestien profilointia. Profiloinnissa kuvataan viestityypin elementtejä, jotta ne olisivat helpommin tulkittavissa ja osoitetaan selkeästi mitkä elementit ovat pakollisia sisällyttää viestiin. (Lu ym., 2018.)

3.4 Tietoturvastandardit

Kuten aiemmissa luvuissa kerrottiin, yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät perustavat toimintansa tiedonvaihtoon muiden järjestelmien kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että järjestelmät yhdessä tuottavat ja prosessoivat suuria määriä tietoa. Jotta yhteistoiminnallisilla liikennejärjestelmillä voidaan varoittaa ajoneuvoa tai kuljettajaa, on tiedon oltava ajantasaista ja luotettavaa (Eze ym., 2016). Liikennetilanteissa väärä informaatio voi johtaa vakaviin onnettomuuksiin, tai jopa aiheuttaa henkilövahinkoja. Koska yhteistoiminnallinen kommunikaatio toteutetaan langattomasti, kohdistuu siihen lukuisia tietoturvauhkia, jotka voivat johtaa vakaviin onnettomuuksiin (Hamida ym., 2015). Tämän takia tietoturva on olennainen osa yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien kehitystä.

Älykkäille liikennejärjestelmille on kehitetty kaksi merkittävää tietoturvastandardia (Fernandes ym., 2018). Nämä standardit ovat nimeltään IEEE 1609.2 ja ETSI ITS turvallisuus -standardit (engl. ETSI ITS security standards). Bae ym. (2019) nostavat ETSI ITS -turvallisuusstandardeista esiin varsinkin standardin ETSI TS 103 097. Standardeista IEEE 1609.2 on alun perin peräisin Yhdysvalloista ja ETSI ITS -standardit sijoittuvat Eurooppaan (Bae ym., 2019; Fernandes ym., 2018).

IEEE 1609.2 on IEEE:n kehittämä standardi kuvamaan sovellusten ja hallintaviestin turvallisuutta ja sen toiminta perustuu autentikointi- ja kryptausalgoritmien määrittelyyn (Bae ym., 2019). IEEE 1609.2 kehityksessä on pyritty huomioimaan ajoneuvojen rajallinen prosessointikyky ja siksi autentikoinnista on haluttu laskennallisesti kevyt (Bae ym., 2019). IEEE 1609.2 -standardi noudattaa ECDSA (elliptic curve digital signature algorithm) algoritmia turvaamaan

yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien välillä vaihdettavien viestien aitouden ja eheyden (Fernandes ym., 2018).

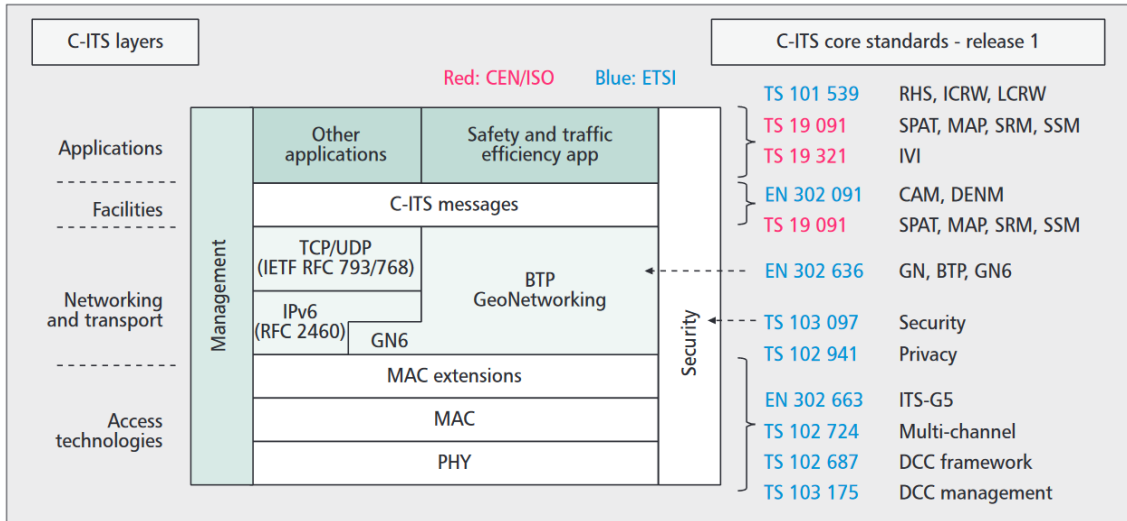
ETSI ITS -turvallisuusstandardit ovat joukko standardeja, joilla pyritään turvaamaan tietoturva yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä ja älykkäissä liikennejärjestelmissä. ETSI ITS -turvallisuusstandardit ovat jaettu kahteen osaan, jotka ovat tekniset raportit ja tekniset spesifikaatiot. (Fernandes ym., 2018.)

3.5 Standardien merkitys yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä

Yhteistoiminnalliset liikennejärjestelmät, kuten muutkin älykkäät liikennejärjestelmät hyödyntävät standardeja toiminnassaan. Standardeja voidaankin pitää vaatimuksena tieto- ja viestintäteknologiaa hyödyntävien järjestelmien leviämiseksi (Hess ym., 2009). Kuten luvussa 2.3 esiteltiin, koostuu yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemi laajasta joukosta osapuolia. Osapuolten laaja joukko on yksi ajureista standardoinnin edistämiseksi. Standardoinnilla pyritään varmistamaan eri teknologiavalmistajien komponenttien ja järjestelmien yhteensopivuus (Hess ym., 2009). Festag (2015) laajentaa ajoneuvojen langattoman kommunikoinnin standardoinnin hyötyihin kuuluvan yhteensopivuuden lisäksi regulaation ja lainsäädännön tukemisen, laajempien markkinoiden luomisen, kuluttajien luottamuksen lisäämisen, pienemmät tuotekehityskustannukset ja kilpailun lisäämisen eri toimittajien kesken.

Standardoinnin merkitystä yhteistoiminnallisissa liikennejärjestelmissä voidaan pitää välttämättömänä (Festag, 2014). Varsinkin kansainväliset standardit, jotka mahdollistavat eri järjestelmien välisen kommunikaation järjestelmätoimittajasta riippumatta ovat välttämättömiä (Festag, 2014, 2015). Järjestelmien välinen yhteistoiminnallisuus on mahdollista vain, jos ne pystyvät keräämään ja vaihtamaan informaatiota ympäriltään. Tämänkaltainen toiminta on mahdollista saavuttaa vain käyttämällä kansainvälisesti määriteltyjä standardeja (Kiela ym., 2020).

Standardoinnin merkitys on tunnustettu myös viranomaisten toimesta. Vuonna 2010 Euroopan komissio julisti mandaatin kehittää yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien toimintaan yhdenmukaisen vähimmäisjoukon standardeja (Festag, 2014). Tieviranomaisten ja yksityisten teknologiatoimittajien vahva yhteistoiminta onkin tarpeellista, jotta saadaan luotua laajoja ja yleisiä kommunikatiostandardeja (Martínez de Aragón, Alonso-Zarate & Laya, 2018). Edellä mainitun Euroopan komission mandaatin seurauksena syntyi niin kutsuttu joukko julkaisun yksi standardeja (engl. Release 1) yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille Euroopassa. Seuraavassa kuviossa (KUVIO 1) esitettynä protokollapino ja julkaisun yksi ydinstandardit Euroopassa.



KUVIO 1 Protokollapino ja julkaisun yksi ydinstandardit Euroopassa (Festag, 2014).

Standardit ovat isossa roolissa myös autonomisten ajoneuvojen tuomisessa markkinoille. Onnistuakseen autonomiset ajoneuvot vaativat kyvykkyyden yhteistoiminnallisuuteen. Yhteistoiminnallisuus taas edellyttää turvallista ja luotettavaa kommunikaatiota (Uzair, 2022). Uzair ym. (2022) esittääkin, että kaikki standardointiin liittyvät haasteet tulee olla ratkaistu, jotta voidaan saavuttaa maksimaaliset hyödyt ajoneuvoilta kaikille kommunikoinnissa (engl. vehicle to all, V2X) ja tuoda autonomiset ajoneuvot laajaan käyttöön.

4 YHTEENVETO

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin yhteistoiminnallisia liikennejärjestelmiä ja erityisesti niihin liittyvää standardointia. Tutkielmassa esiteltiin yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien määritelmä, niiden eroavuus perinteisiin älykkäisiin liikennejärjestelmiin, niiden toimintaperiaate ja käytiin läpi niihin liittyvät merkittävimmät standardit. Tutkielmassa esiteltiin myös merkittävimmät standardointia suorittaneet organisaatiot.

Yhteistoiminnallisiksi liikennejärjestelmiksi tutkielmassa määriteltiin eri lähteistä kerätyn tiedon perusteella liikennejärjestelmät, joiden toiminta perustuu kommunikaatioon muiden liikennejärjestelmien kanssa. Tutkielmassa myös havaittiin, ettei yhteistoiminnallista liikennejärjestelmää voi rajata vain ajoneuvoihin, vaan siihen täytyy voida nähdä muutkin liikennejärjestelmät, jotka tämän kommunikaation toteuttavat.

Tutkielmassa havaittiin, että standardeilla on tärkeä rooli yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien harmonisoinnissa ja yhteensopivuuden varmistamisessa. Tähän havaintoon vaikuttaa tarkasteltujen artikkelien perusteella tieto siitä, että informaatio- ja kommunikaatioteknologiaa hyödyntävien järjestelmien laajamittaisen leviämisen kannalta standardointi on tärkeässä roolissa. Yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien ekosysteemi määriteltiin tutkielmassa laajaksi ja monipuoliseksi joukoksi osapuolia, joiden yhteistoiminnan mahdollistamiseksi tarvitaan standardointia. Varsinkin kansainvälisten standardien merkitys yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille korostui. Tutkielmassa myös havaittiin yhteistoiminnallisen kommunikaation standardoinnin tarve autonomisten ajoneuvojen käyttötapauksissa. Ilman standardointia oltaisiin helposti tilanteessa, jossa alalla olisi useita päällekkäisiä ratkaisuja eri toimijoilta. Tällöin yhteistoiminnallisuus rajoittuisi vain pieniin keskenään yhteensopiviin järjestelmiin.

Tutkielmassa tunnistettiin laaja joukko standardeja yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. Nämä standardit jaoteltiin tutkielmassa kolmeen joukkoon, jotka olivat kommunikaatio, viestityyppi ja tietoturva. Näistä kolmesta joukosta esiteltiin merkittävimmät nykyiset standardit, sekä yhä kehityksen alla olevat tulevaisuuden standardit.

Seuraavassa taulukossa (TAULUKKO 2) kerättynä yhteen tutkielman tutkimuskysymykset- ja tulokset.

TAULUKKO 2 Tutkimuskysymykset- ja tulokset

Tutkimuskysymykset	Tutkimustulokset
Mitä yhteistoiminnallisilla liikennejärjestelmillä tarkoitetaan?	Liikennejärjestelmiä, jotka kykenevät kommunikoimaan dynaamista informaatiota ympäröiville liikennejärjestelmille reaaliaikaisesti.
Mikä on standardoinnin merkitys yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille?	Standardit ovat tärkeässä asemassa yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. Varsinkin kansainväliset standardit nousevat esiin.

<p>Mitä standardeja yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille on kehitetty ja mitkä tahot ovat kehittäneet tämä alan keskeisiä standardeja?</p>	<p>Kommunikaatiostandardeista merkittävimmät ovat IEEE 802.11p, ETSI ITS G5, DSRC ja LTE C-V2X. Lisäksi kehityksen alla on uusia standardeja. Tietoturvastandardeista esiin nousivat IEEE 1609.2 ja ETSI ITS -turvallisuusstandardit. Merkittäviä standardoituja viestityyppejä ovat CAM, DENM, BSM, SPAT, MAP, SRM, SSM, IVI ja PVD. Standardeja ovat kehittäneet kansainväliset organisaatiot, kuten ETSI, CEN, IEEE, ISO, C2C-CC ja 3GPP.</p>
---	--

Merkittävimpinä kommunikaatiostandardeina nousivat esiin WLAN-tekniikkaan ja matkapuhelinverkkoihin pohjautuvat standardit. Näistä ensimmäiseen joukkoon lueteltiin IEEE 802.11p, ETSI ITS G5 ja IEEE 802.11bd. Matkapuhelinverkkoon pohjautuvista standardeista esiin nousivat taas LTE C-V2X ja NR V2X-standardit. Standardeista IEEE 802.11p ja NR V2X ovat uusimpia kehityksen alla olevia standardeja.

Keskeisiä tietoturvastandardeja ovat IEEE 1609.2 -standardi, sekä ETSI ITS -turvallisuusstandardit. Tuloksista kävi ilmi myös tietoturvastandardien kriittisyys yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. Yhtenä pohjimmaisena syynä yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille nähtiin turvallisuuden lisääminen, mutta tämän mahdollistamiseksi on myös järjestelmän itsensä oltava turvallinen.

Viestityyppien standardeihin lueteltiin joukko ETSI:n standardoimia viestityyppejä, sekä SAE:n standardoima viestityyppi. ETSI:n standardoimiin viestityyppeihin kuuluivat CAM-, SPAT-, MAP- ja DENM-viestityypit. SAE:n standardoima viestityyppi on nimeltään BSM. Lisäksi tutkielmassa löydettiin joukko CEN- ja ISO-organisaatioiden alla toimivien teknisten komiteoiden standardoimia viestityyppejä. Viestityyppien standardointi todettiin tärkeäksi osaksi standardisointia. Tutkielmassa löydettiin kuitenkin myös kritiikkiä viestityyppien standardointia kohtaan. Kritiikki kohdistui viestien kenttien tulkinvaraisuuteen, joka saattaa aiheuttaa väärinymmärryksiä eri toimijoiden kesken. Tämä ongelma tulisi tulevaisuudessa ottaa alalla huomioon uusia viestistandardeja kehitettäessä.

Yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille merkittäviä standardeja kehittäviksi organisaatioksi löydettiin tutkielmassa joukko kansainvälisiä organisaatioita. Euroopassa nousi esiin varsinkin ETSI- ja CEN-organisaatiot. Muita tutkielman havaitsemia organisaatioita olivat ISO, 3GPP, IEEE ja C2C-CC. Näistä organisaatioista käytiin lisäksi läpi niiden merkittävimmät panoksensa yhteistoiminnallisten liikennejärjestelmien standardointiin. Tutkielma myös havainnollisti kansainvälisten ja tunnettujen standardointiorganisaatioiden merkitystä. Käyttämällä näitä kansainvälisiä organisaatioita on mahdollista saavuttaa etuja standardoinnissa verrattuna pieniin ala- tai maakohtaisiin standardeihin.

Tutkielman tuloksien pohjalta voidaan päätellä tarve tulevaisuudessa kehittää standardointia yhteistoiminnallisille liikennejärjestelmille. Voidaan myös havaita, kuinka suuri joukko standardeja vaaditaan tällaisten järjestelmien

toteutukseen. Tulokset viittaavat myös suurten ja tunnettujen standardointiorganisaatioiden kasvavaan rooliin alalla.

Tutkielman luotettavuuteen vaikuttaa usea tekijä. Tämän tutkielman luotettavuutta lisää sen teossa käytetty laaja otos aineistosta lähdemateriaalina. Lisäksi luotettavuutta parantaa se, että tutkielman aineistoksi on kerätty hyvälaatuisia akateemisia artikkeleita. Aineiston laatua voidaan mitata muun muassa niiden JUFO-luokituksella, joka on aineiston artikkeleissa keskimäärin tasoa yksi ja kaksi. Tasoa yksi voidaan pitää perustasona ja tasoa kaksi taas johtavan tason julkaisuna. Lisäksi aineistoon kuuluu usea tason kolme artikkeli, joka tarkoittaa asteikon korkeinta laatutasoa. Tutkielmassa on kuvattu sen tekoon käytetty aineisto ja on nähtävissä yhteys tulosten ja aineiston välillä. Tulokset ovat johdettuja lähdeaineistosta ja tämä voidaan havaita lähdeviittauksista. Tutkielman prosessi ja aineisto on kuvattu, jolloin tutkielman toistettavuus voidaan todeta.

Tämän tutkielman tarkoituksena ei ole toimia katsauksena maailman jokaiseen yhteistoiminnallisiin liikennejärjestelmiin liittyvään standardiin. Tutkielma rajoittuikin käsittelemään alan kannalta merkittävimpiä standardeja ja organisaatioita. Tutkielmassa keskityttiin myös maantieteellisesti Eurooppaan ja Yhdysvaltoihin. Tulevaisuudessa voisi yksi tutkielman aihe olla perehtyä esimerkiksi Aasiassa merkittävimpiin standardeihin. Kuitenkin monet esitellyistä standardeista ja organisaatioista ovat kansainvälisiä, joten tutkielma ei rajoitu täysin vain Eurooppaan ja Yhdysvaltoihin. Tutkielma myös tarjosi lukijalleen katsauksen yhteistoiminnallisiin liikennejärjestelmiin kokonaisuutena ja pyrki avaamaan niiden toimintaa. Tutkielma ei pyrkinyt vertaamaan eri standardien suorituskykyä ja yksi tutkimuksen aihe tulevaisuudessa voisikin olla verrata samaa tarkoituserää toteuttavien standardien suorituskykyä toisiinsa. Esimerkkinä tästä voisi olla WLAN-pohjaiset standardit verrattuna matkapuhelinverkkoon pohjautuviin standardeihin.

LÄHTEET

- Abboud, K., Omar, H. A., & Zhuang, W. (2016). Interworking of DSRC and Cellular Network Technologies for V2X Communications: A Survey. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(12), 9457–9470. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2591558>
- Alonso, F., Faus, M., Tormo, M. T., & Useche, S. A. (2022). Could Technology and Intelligent Transport Systems Help Improve Mobility in an Emerging Country? Challenges, Opportunities, Gaps and Other Evidence from the Caribbean. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app12094759>
- Arena, F., Pau, G., & Severino, A. (2020). A Review on IEEE 802.11p for Intelligent Transportation Systems. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 9(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/jsan9020022>
- Asselin-Miller, N., Biedka, M., Gibson, G., Kirsch, F., Hill, N., White, B., & Uddin, K. (2016). Study on the Deployment of C-ITS in Europe: Final Report. 2016, 1, 218.
- Bae, M. A. R., Simpson, L., Foo, E., & Pieprzyk, J. (2019). Broadcast Authentication in Latency-Critical Applications: On the Efficiency of IEEE 1609.2. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(12), 11577–11587. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2945339>
- Charpentier, V., Slamnik-Krijestorac, N., & Marquez-Barja, J. (2022). Assessing the impact of CAM messages in vehicular communications in real highway environments. *IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, 1–2. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798036>
- Chen, R., Jin, W.-L., & Regan, A. (2010). Broadcasting Safety Information in Vehicular Networks: Issues and Approaches. *IEEE Network*, 24, 20–25. <https://doi.org/10.1109/MNET.2010.5395779>
- Daniel, A., Paul, A., Ahmad, A., & Rho, S. (2016). Cooperative Intelligence of Vehicles for Intelligent Transportation Systems (ITS). *Wireless Personal Communications*, 87(2), 461–484. <https://doi.org/10.1007/s11277-015-3078-7>
- Definition of Autonomous Vehicles—Gartner Information Technology Glossary.* (ei pvm.). Gartner. Noudettu 2. joulukuuta 2022, osoitteesta <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/autonomous-vehicles>
- Definition of Internet Of Things (iot)—Gartner Information Technology Glossary.* (ei pvm.). Gartner. Noudettu 17. marraskuuta 2022, osoitteesta <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/internet-of-things>
- Definition of Standard—Gartner Information Technology Glossary.* (ei pvm.). Gartner. Noudettu 17. marraskuuta 2022, osoitteesta <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/standard>
- Degrande, T., Vannieuwenborg, F., Verbrugge, S., & Colle, D. (2019). Adoption of Cooperative Intelligent Transport Systems in Flemish passenger cars: A review of European Policy Options. 2019 CTTE-FITCE: Smart Cities & Information and Communication Technology (CTTE-FITCE), 1–6. <https://doi.org/10.1109/CTTE-FITCE.2019.8894817>

- Directorate-General for Mobility and Transport (European Commission). (2020). *Next steps towards 'Vision Zero': EU road safety policy framework 2021 2030*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/391271>
- Eze, E. C., Zhang, S.-J., Liu, E.-J., & Eze, J. C. (2016). Advances in vehicular ad-hoc networks (VANETs): Challenges and road-map for future development. *International Journal of Automation and Computing*, 13(1), 1–18. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11633-015-0913-y>
- Fernandes, B., Rufino, J., Alam, M., & Ferreira, J. (2018). Implementation and Analysis of IEEE and ETSI Security Standards for Vehicular Communications. *Mobile Networks and Applications*, 23(3), 469–478. <https://doi.org/10.1007/s11036-018-1019-x>
- Festag, A. (2014). Cooperative intelligent transport systems standards in europe. *IEEE Communications Magazine*, 52(12), 166–172. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979970>
- Festag, A. (2015). Standards for vehicular communication—From IEEE 802.11p to 5G. *E & i Elektrotechnik Und Informationstechnik*, 132(7), 409–416. <https://doi.org/10.1007/s00502-015-0343-0>
- Garcia, M. H. C., Molina-Galan, A., Boban, M., Gozalvez, J., Coll-Perales, B., Şahin, T., & Kousaridas, A. (2021). A Tutorial on 5G NR V2X Communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(3), 1972–2026. <https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3057017>
- Giannoutakis, K., & Li, F. (2012). Making a Business Case for Intelligent Transport Systems: A Holistic Business Model Framework. *Transport Reviews*, 32. <https://doi.org/10.1080/01441647.2012.740096>
- Hamida, E. B., Noura, H., & Znaidi, W. (2015). Security of Cooperative Intelligent Transport Systems: Standards, Threats Analysis and Cryptographic Countermeasures. *Electronics*, 4(3), Art. 3. <https://doi.org/10.3390/electronics4030380>
- Hara, T., & Kiyohara, R. (2018). Vehicle approaching model for T-junction during transition to autonomous vehicles. *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 304–309. <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2018.8343130>
- Hess, S., Segarra, G., Evensen, K., Festag, A., Weber, T., Cadzow, S., Arndt, M., & Wiles, A. (2009). Towards standards for sustainable ITS in Europe. *ITS World Congress*.
- Introducing 3GPP*. (ei pvm.). 3GPP. Noudettu 19. marraskuuta 2022, osoitteesta <https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp>
- Kiela, K., Barzdenas, V., Jurgo, M., Macaitis, V., Rafanavicius, J., Vasjanov, A., Kladovcikov, L., & Navickas, R. (2020). Review of V2X–IoT Standards and Frameworks for ITS Applications. *Applied Sciences*, 10(12), 4314. <https://doi.org/10.3390/app10124314>
- Kousaridas, A., Schimpe, A., Euler, S., Vilajosana, X., Fallgren, M., Landi, G., Moscatelli, F., Barmponakis, S., Vázquez-Gallego, F., Sedar, R., Silva, R., Dizambourg, L., Wendt, S., Muehleisen, M., Eckert, K., Härrä, J., & Alonso-Zarate, J. (2020). 5G cross-border operation for connected and automated mobility: Challenges and solutions. *Future Internet*, 12(1). Scopus. <https://doi.org/10.3390/fi12010005>

- Lu, M., Blokpoel, R., Funfroeken, M., & Castells, J. (2018). Open architecture for internet-based C-ITS services. *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 7–13. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569941>
- Malone, K. M., & Soekroella, A. M. G. (2019). Estimating benefits of C-ITS deployment, when legacy roadside systems are present. *IET Intelligent Transport Systems*, *13*(5), 915–924. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5119>
- Martínez de Aragón, B., Alonso-Zarate, J., & Laya, A. (2018). How connectivity is transforming the automotive ecosystem. *Internet Technology Letters*, *1*(1), e14. <https://doi.org/10.1002/itl2.14>
- Molina-Masegosa, R., Sepulcre, M., & Gozalvez, J. (2019). Geo-Based Scheduling for C-V2X Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *68*(9), 8397–8407. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2924698>
- Moso, J. C., Cormier, S., Fouchal, H., de Runz, C., Wandeto, J. M., & Aniss, H. (2021). Road Speed Signatures from C-ITS messages. *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500949>
- Naik, G., Choudhury, B., & Park, J.-M. (2019). IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications. *IEEE Access*, *7*, 70169–70184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919489>
- Naranjo, J. E., Jiménez, F., Gómez, A., Valle, A., González, J., & Cruz, A. (2020). Integration of C-ITS in Autonomous Driving. *2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 27–32. <https://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304727>
- Randriamasy, M., Cabani, A., Chafouk, H., & Fremont, G. (2019). Geolocation Process to Perform the Electronic Toll Collection Using the ITS-G5 Technology. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *68*(9), 8570–8582. <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2931883>
- Salminen, A. (2011). *Mikä kirjallisuuskatsaus? : Johdatus kirjallisuuskatsauksen tyyppeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin*. Vaasan yliopisto. <https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/7961>
- Sedar, R., Vázquez-Gallego, F., Casellas, R., Vilalta, R., Muñoz, R., Silva, R., Dizambourg, L., Barciela, A. E. F., Vilajosana, X., Datta, S. K., Härrilä, J., & Alonso-Zarate, J. (2021). Standards-compliant multi-protocol on-board unit for the evaluation of connected and automated mobility services in multi-vendor environments†. *Sensors*, *21*(6), 1–20. Scopus. <https://doi.org/10.3390/s21062090>
- Sun, L., Li, Y., & Gao, J. (2016). Architecture and Application Research of Cooperative Intelligent Transport Systems. *Procedia Engineering*, *137*, 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.312>
- Tiedätkö mikä on standardi?* (ei pvm.). SFS. Noudettu 16. lokakuuta 2022, osoitteesta <https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/>
- Torgunakov, V., Loginov, V., & Khorov, E. (2022). A Study of Channel Bonding in IEEE 802.11bd Networks. *IEEE Access*, *10*, 25514–25533. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3155814>
- Uzair, M. (2022). Vehicular Wireless Communication Standards: Challenges and Comparison. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, *13*(5), 379–397. Scopus. <https://doi.org/10.32985/Ijeces.13.5.6>
- Verkottunut ja automatisoituva tieliikenne*. (ei pvm.). Traficom. Noudettu 25. syyskuuta 2022, osoitteesta

- <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/liikennejarjestelma/verkottunut-ja-automatisoituva-tieliikenne>
- Vinel, A. (2012). 3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications? *IEEE Wireless Communications Letters*, 1(2), 125–128.
<https://doi.org/10.1109/WCL.2012.022012.120073>
- Vukadinovic, V., Bakowski, K., Marsch, P., Garcia, I. D., Xu, H., Sybis, M., Sroka, P., Wesolowski, K., Lister, D., & Thibault, I. (2018). 3GPP C-V2X and IEEE 802.11p for Vehicle-to-Vehicle communications in highway platooning scenarios. *Ad Hoc Networks*, 74, 17–29.
<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.03.004>
- Weiß, C. (2011). V2X communication in Europe – From research projects towards standardization and field testing of vehicle communication technology. *Computer Networks*, 55(14), 3103–3119.
<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.03.016>
- Zeadally, S., Hunt, R., Chen, Y.-S., Irwin, A., & Hassan, A. (2012). Vehicular ad hoc networks (VANETS): Status, results, and challenges. *Telecommunication Systems*, 50(4), 217–241. <https://doi.org/10.1007/s11235-010-9400-5>
- Zeadally, S., Javed, M. A., & Hamida, E. B. (2020). Vehicular Communications for ITS: Standardization and Challenges. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4(1), 11–17. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1900044>
- Zhu, F., Lv, Y., Chen, Y., Wang, X., Xiong, G., & Wang, F.-Y. (2020). Parallel Transportation Systems: Toward IoT-Enabled Smart Urban Traffic Control and Management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 21(10), 4063–4071. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2934991>
- Zhu, L., Yu, F. R., Wang, Y., Ning, B., & Tang, T. (2019). Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(1), 383–398.
<https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2815678>