

Ella Andersson

EDISTYKSELLISEN KULJETTAJAA AVUSTAVAN JÄRJESTELMÄN VAROITUSTEN MODALITEETTI

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaattitutkielma
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Ella Andersson: Edistyksellisen kuljettajaa avustavan järjestelmän varoitusten modaliteetti
Kandidaattitutkielma
Tampereen yliopisto
Tietojenkäsittelytieteiden tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022

Nykyaikaisissa autoissa on toteutettuna edistyksellisen kuljettajaa avustavan järjestelmän eli ADAS-järjestelmän erilaisia ominaisuuksia, jotka avustavat kuljettajaa ajamisessa ja tuovat mukavuutta ajotehtäviin. Ominaisuudet voivat tarjota kuljettajalle tietoa esimerkiksi varoitusten muodossa. Liikenneonnettomuudet aiheuttavat maailmanlaajuisesti suuren määrän vammoja sekä kuolemia, mikä on johtanut tarpeeseen kehittää ADAS-järjestelmä. Suurin osa onnettomuuksista on seurauksia inhimillisistä virheistä, joiden vähentämiseen ADAS-järjestelmä tähtää toiminnallisuuksillaan. Tämä tutkielma käsittelee ADAS-järjestelmän varoitusten antamista kuljettajalle eri aistien välityksellä. Tavoitteena on selvittää, miten kuljettajat reagoivat eri aistien välityksellä annettaviin varoituksiin sekä niiden yhdistelmiin ja tätä kautta saada selville, miten varoituksia tulisi antaa kuljettajalle, jotta ne olisivat samaan aikaan sekä miellyttäviä että tehokkaita. Tavoitteiden pohjalta tutkimuskysymyksiksi muotoutuivat: Mitä eroja on kuljettajien reagoimisessa eri aistimodaliteettien välityksellä annettuihin varoituksiin? Miten varoitukset tulisi antaa kuljettajalle niin että päästäisiin mahdollisimman turvalliseen ajosuoritukseen?

Tutkielman tutkimusmenetelmänä on hyödynnetty kirjallisuuskatsausta, johon on valittu tieteellisiä artikkeleita erilaisista tietokannoista. Lähteitä valikoitiin tutkielmaan niiden laadun sekä julkaisuvuoden perusteella suosien uudempia, Julkaisufoorumi-luokiteltuja ja vertaisarvioituja lähteitä. Lähteiksi valittiin 11 tutkimusartikkelia, joista osassa kuvataan oma empiirinen tutkimus.

Kirjallisuuskatsaus osoitti, että eri aistimodaliteeteilla on ominaispiirteensä, jotka määrittävät niiden vahvuudet ja heikkoudet. Esimerkiksi visuaalisilla varoituksilla on kyky tarjota kuljettajalle yksityiskohtaista tietoa, johon on helppo palata, kun taas auditiviset varoitukset kykenevät ääniärsyksen avulla saamaan kuljettajan reagoimaan nopeasti. Eri aistimodaliteettien kautta on mahdollista välittää kuljettajalle erityyppistä informaatiota ja niiden hyödyntäminen varoitusten antamisessa sopii erilaisiin ajotilanteisiin. Tästä syystä aistimodaliteetin valintaan varoituksissa tulisi kiinnittää huomiota. Varoitusten tehokkuudessa oli myös eroja siinä, annetaanko varoitus unimodaalisena vai multimodaalisena: multimodaaliset varoitukset varoittivat kuljettajia tehokkaammin kuin unimodaaliset. Tutkimustulokset nostivat esille myös sen että, kuvakkeiden avulla voidaan välittää kuljettajalle tietoa tehokkaasti ja että multimodaalisten varoitusten suunnittelussa tulisi kiinnittää huomiota myös signaalien yhteneväisyyteen.

Avainsanat: ADAS-järjestelmä, aistimodaliteetti, kuljettaja, autoilu, ajoavustinjärjestelmä, tilanetietoisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Tutkimusmenetelmä.....	2
3	ADAS-järjestelmä.....	3
3.1	Määritelmä	3
3.2	Ominaisuudet ja automaatiotasot	4
3.3	Aistit ja ajaminen	8
3.4	Kuljettajan käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä	9
4	Unimodaaliset varoitukset	11
4.1	Visuaaliset varoitukset	11
4.2	Auditiiviset varoitukset	12
4.3	Haptiset varoitukset	13
5	Multimodaaliset varoitukset.....	14
5.1	Multimodaalisten varoitusten tehokkuus	14
5.2	Multimodaalisten varoitusten vertailu	16
5.3	Multimodaalisten varoitusten suunnittelu	17
6	Tulosten yhteenveto ja pohdinta	18
6.1	Yhteenveto	18
6.2	Pohdinta	21
6.3	Lopuksi	22
	Lähdeluettelo.....	23

1 Johdanto

Liikenneonnettomuudet aiheuttavat maailmanlaajuisesti suuren määrän kuolemia sekä vammoja. Esimerkiksi Global Status Report on Road Safety -tilastot vuodelta 2018 osoittavat kuinka liikenneonnettomuudet aiheuttavat keskimäärin 20–50 miljoonaa vammaa ja 1,3 miljoonaa kuolemantapausta maailmanlaajuisesti. Suurin osa näistä onnettomuuksista on kuljettajien inhimillisten virheiden aiheuttamia. *Edistyksellinen kuljettajaa avustava järjestelmä* eli *ADAS-järjestelmä* (Advanced Driver Assistance System) kehitettiin vähentämään liikenneonnettomuuksia, ja sen ominaisuudet tähtäävät turvallisuuden ja kuljettajan mukavuuden lisäämiseen erilaisissa ajotehtävissä minimoiden inhimillisten virheiden määrää. (Jayan & Muruganatham, 2020)

Varoitusten suunnittelemiseen ADAS-järjestelmässä on kiinnitettävä paljon huomiota ja tehtävä se huolellisesti, jotta vaarallisilta tilanteilta voitaisiin välttyä liikenteessä. Kuljettajalle pitäisi samaan aikaan tarjota hyvä ajokokemus, jossa varoitukset eivät saisi olla liian häiritseviä. Esimerkiksi liikaa tietoa ei pitäisi tarjota, sillä se voi johtaa kuljettajan hämmentymiseen ja häiriintymiseen. (Baldwin ja muut, 2012). Miten siis tehdä varoituksista samaan aikaan miellyttäviä ja tehokkaita? Varoitusten toteuttamisessa on lukuisia vaihtoehtoja, ja myös ajotilanteet ja -ympäristöt ovat muuttuvia sekä monimutkaisia, joten varoitusten suunnittelutehtävä ei ole helppo (Baldwin ja muut, 2012; Wang ja muut, 2020).

ADAS-järjestelmässä voidaan välittää tietoa kuljettajalle eri *aistimodaliteettien* (sensory modality) välityksellä (Riener, 2010). Tässä tutkielmassa tutkitaankin ADAS-järjestelmän varoitusten esittämistä eri aistien kautta. ADAS-järjestelmän varoitusten suunnittelemisessa on noudatettava huolellisuutta, sillä parhaimmassa tapauksessa ne voivat parantaa liikenneturvallisuutta, mutta toisaalta huonosti suunniteltuina ne voivat olla vaarallisia. Aiheessa on kiehtovaa myös sen psykologinen puoli, sillä varoitusten suunnittelemisessa on otettava huomioon myös ihmisen toiminta ja tiedonkäsittely liikenteessä. Tutkielman tavoitteena on lähdekirjallisuuden perusteella tarkastella, miten kuljettajat reagoivat erilaisiin ADAS-järjestelmän varoituksiin ja minkälaiset varoitukset ovat tehokkaimpia kuljettajan varoittamisessa. Näiden pohjalta pyritään muodostamaan kuva siitä, miten ADAS-järjestelmän varoitukset tulisi suunnitella, jotta ne saisivat aikaan mahdollisimman turvallisen ajosuorituksen. Lisäksi tutkielmassa käsitellään pintapuolisesti sitä, minkälaisiksi kuljettajat kokevat erilaiset varoitukset.

Tutkielmassa tarkastellaan varoituksia kuljettajan näkökulmasta ja tarkastelussa ovat erityisesti eri aistimodaliteetit varoitusten välittäjinä, jolloin tarkastelusta on jätetty pois esimerkiksi varoitusten esittämisen ajoittamiseen, sijaintiin tai keston liittyvät asiat. Lisäksi tutkielman ulkopuolelle jätetään kuljettajat, joilla on rajoitteita jonkun aistin tai aistin käyttämisessä. Tutkielmassa keskitytään aistimodaliteeteista visuaalisen, auditiivisen

sekä haptisen aistimodaliteetin käsittelemiseen. Varoituksia voidaan antaa kuljettajalle yhden aistimodaliteetin välityksellä eli *unimodaalisesti* (unimodal) tai monen aistikana- van kautta samanaikaisesti tai peräkkäin eli *multimodaalisesti* (multimodal) (Riener, 2010, s. 5). Tässä tutkielmassa tarkastellaan molempia tapoja kuljettajan varoittamisessa ja tiedottamisessa.

Luvussa 2 esitellään tutkielman tutkimusmenetelmä eli miten lähteitä on etsitty ja valikoitu tutkielmaan sekä miten niitä on käsitelty ennen niiden hyödyntämistä. Luvussa 3 määritellään ADAS-järjestelmä ja eri aistimodaliteettien käyttäminen kuljettajan varoit- tamisessa sekä tekijöitä, jotka vaikuttavat kuljettajan käyttäytymiseen liikenteessä. Nel- jännessä luvussa käsitellään eri aistimodaliteettien välityksellä annettavien varoitusten te- hokkuutta ja kuljettajien reagoimista niihin sekä vertaillaan eri modaliteetteja varoitusten välittäjinä. Viidennessä luvussa tarkastellaan multimodaalisia varoituksia vertailemalla niitä unimodaalisiin varoituksiin sekä vertailemalla erilaisia multimodaalisia varoituksia keskenään. Viidennessä luvussa käsitellään myös lyhyesti varoitusten suunnittelemista ja keskitytään muun muassa kuvakkeiden käyttöön varoituksissa. Luvussa 6 kootaan yhteen kirjallisuuskatsauksen avulla saatuja tuloksia sekä pohditaan ADAS-järjestelmän mah- dollisia tulevaisuuden tutkimussuuntia.

2 Tutkimusmenetelmä

Tämän tutkielman tutkimusmenetelmänä on kirjallisuuskatsaus, johon on valikoitu tie- teellisiä lähteitä erilaisista tietokannoista. Tietokannat, joista on etsitty tähän tutkielmaan lähdekirjallisuutta, ovat ACM Digital Library, SpringerLink, Andor, Google Scholar sekä PsycArticles (Ovid). Osa tähän tutkielmaan valikoituneista lähteistä on löydetty löydet- tyjen lähteiden lähdeluetteloista. Kun lähteitä etsittiin, tulosten rajaamisessa käytettiin eniten lähteen päiväyksen mukaan rajaamista niin, että löydetäisiin mahdollisimman uu- sia lähteitä. Lähteitä ei kuitenkaan aina rajattu vuosiluvun perusteella, sillä tavoitteena oli myös valita lähteitä niiden laadun perusteella ja näin saada lähteitä, joihin on viitattu mo- nesti ja jotka ovat vertaisarvioituja. Myös Julkaisufoorumi-luokittelua hyödynnettiin apuna lähteiden laadun tarkistamisessa.

Lähteitä etsittäessä hakusanoina käytettiin erilaisia yhdistelmiä sanoista ADAS, ad- vanced driver assistance systems, warnings, warning, visual, auditory, auditive, haptic, multimodal, multisensor, unimodal, modality, sensory feedback, design sekä human fac- tors. Käytössä olivat lisäksi sanat overview ja guidelines, kun tarkoituksena oli etsiä läh- teitä liittyen itse ADAS-järjestelmään.

Kaikki tutkielmaan valikoituneet lähteet eivät kuvanneet tietyn tutkimuksen toteutta- mista vaan osa oli yleiskatsauksia ja osa sisälsi esimerkiksi käsitteiden määrittelyitä ja

suunnitteluohjeita. Lähteiden valitsemisessa kiinnitettiin paljon huomiota lähteiden otsikoihin, tiivistelmiin sekä artikkelien tutkimustuloksiin, joiden perusteella lähteitä valikoitiin. Tutkimusartikkeleita valikoitiin esimerkiksi sen perusteella, tutkitaanko artikkelissa haluttua aistimodaliteettia tai ylipäättänsä varoitusten aistimodaliteettia tai tutkitaanko multimodaalisia vai unimodaalisia varoituksia. Lähteitä pyrittiin valikoimaan myös niin, että kaikkia aistimodaliteetteja voitaisiin käsitellä yhtä paljon. Kun tavoitteena oli etsiä lähteitä liittyen itse ADAS-järjestelmään, lähteitä suodatettiin sen perusteella, puhutaanko lähteissä ylipäättänsä ADAS-järjestelmästä ja kuinka laajasti lähteessä kerrotaan ADAS-järjestelmästä ja sen ominaisuuksista.

Aineiston analysoimisessa lähteiden olennaisia kohtia korostettiin ja niistä kirjoitettiin muistiinpanoja. Tutkimusartikkelien analysoimisessa keskityttiin eniten tutkimusten tuloksiin, mutta myös jonkun verran tutkimusasetelmaan sekä tutkimuksen toteutukseen. Lähteissä käsiteltiin paljon erilaisia teemoja liittyen kuljettajaa avustaviin järjestelmiin ja esille nousivat esimerkiksi teemat, jotka koskivat erilaisia kuljettajia, ADAS-järjestelmän kehitystä ja teknologiaa sekä ihmisen tiedonkäsittelyä liikenteessä. Aineiston tarkastelemisessa keskityttiin kuitenkin enimmäkseen aistimodaliteetteihin sekä ADAS-järjestelmän perustoiminnallisuuksiin liittyviin teemoihin.

3 ADAS-järjestelmä

Tässä luvussa määritellään tarkemmin ADAS-järjestelmä sekä sen ominaisuudet. Ominaisuuksien kategorisoimisessa hyödynnetään kahta lähtökohdiltaan erilaista luokittelua. Belmonte ja kumppanit (2021) jakavat ADAS-järjestelmän ominaisuudet niiden ominaisuuksityyppien mukaan, kun taas Jayan ja Murugantham (2020) luokittelevat ominaisuuksia perustuen niiden automaatiotasoihin. Lisäksi tässä luvussa käsitellään aistikanavia, joiden kautta tietoa voidaan välittää ADAS-järjestelmässä, sekä tekijöitä, jotka vaikuttavat kuljettajan käyttäytymiseen liikenteessä.

3.1 Määritelmä

ADAS-järjestelmällä tarkoitetaan edistyksellistä kuljettajaa avustavaa järjestelmää, joka on suunniteltu avustamaan kuljettajaa ajamisessa. ADAS-järjestelmä hyödyntää avustamisessa ympäristöantureita, joilla se pyrkii avustamaan kuljettajaa mahdollisten vaarallisten liikennetilanteiden tunnistamisessa ja niihin reagoimisessa ja näin parantamaan kuljettajan mukavuutta sekä liikenneturvallisuutta (Belmonte ja muut, 2021). Nykyään ADAS-järjestelmä hyödyntää toiminnallisuuksissaan antureita, kuten Radar (Radio Detection and Ranging) -järjestelmää, LIDAR (Light Detection and Ranging) -menetelmää, kameraa sekä ultraääniantureita. Elektroninen ohjausyksikkö (ECU) välittää antureiden

syötteisiin perustuvan tiedon kuljettajalle esimerkiksi varoitusten avulla, tai ottaa sivuttaisen tai pitkittäisen kontrollin hallintaansa tavoitteenaan palauttaa ajoneuvo turvallisemmalle alueelle. (Jayan & Muruganatham, 2020)

Weller ja Schlag (2015) määrittelevät edistykselliset kuljettajaa avustavat järjestelmät järjestelmiksi, jotka ottavat haltuunsa tai automatisoivat kuljettajan kognition keskeisimmät osat, kuten havaitsemisen ja sen arvioimisen mitä havaitaan. ADAS-varustettua autoa kutsutaan yleisesti nimellä ”älykäs ajoneuvo”, koska ADAS pystyy jopa itsenäisesti puuttamaan asioihin (Belmonte ja muut, 2021). Pelkästään tietyn toiminnon automaattinen toteuttaminen ei kuitenkaan ole kuljettajan aistien ja tiedonkäsittelyn avustamista eikä siten kuulu kuljettajaa avustavien järjestelmien määritelmään (Weller & Schlag, 2015). Wellerin ja Schlagin (2015) mukaan ADAS-järjestelmä tarvitsee siis rinnalleen kuljettajan suorittamaan ajotehtäviä, mutta jo osittainen automaatio muuttaa kuljettajan roolia. Jayan ja Muruganatham (2020) esittelevät kaksi automaatiotasoluokittelua, joiden mukaan automaatiotaso määrittää sen, kuinka paljon järjestelmä tarvitsee ihmistä ajotehtävissä. Automaatiotasoluokitteluiden mukaan järjestelmä on enemmän riippuvainen kuljettajasta alimmilla automaatiotasooilla kuin ylimmillä. Sen vuoksi ADAS-järjestelmän ominaisuudet ovat alimpien tasojen ominaisuuksia. Automaatiotasoja käsitellään tarkemmin vielä luvussa 3.2.

Oikein suunniteltuna ADAS-järjestelmän pitäisi parantaa ajoneuvon turvallisuutta, ajosuoritusta sekä liikenneturvallisuutta. ADAS-järjestelmä on kehitetty automatisoimaan, sopeuttamaan sekä parantamaan ajoneuvojärjestelmiä parempaan ajamiseen ja turvallisuuteen ja näin ehkäisemään onnettomuuksia sekä kolareita. (Belmonte ja muut, 2021)

3.2 Ominaisuudet ja automaatiotasot

ADAS-järjestelmän turvallisuusominaisuudet hyödyntävät teknologioita, jotka varoittavat kuljettajaa mahdollisista ongelmista tai ehkäisevät kolareita ottamalla käyttöön suoja-keinoja sekä ottamalla ajoneuvon hallintaansa, kun taas osa turvallisuusominaisuuksista tarjoaa apua muun muassa jarruttamiseen, valaistukseen, kaistalla pysymiseen sekä kuolleeseen kulman tarkkailemiseen. (Belmonte ja muut, 2021)

Ensimmäinen kuljettajaa avustava järjestelmä oli lukkiutumaton jarrujärjestelmä (ABS), joka esiteltiin noin 70 vuotta sitten ja joka auttoi estämään ajoneuvon pyörien lukkiutumista. ABS-jarruja seurasi elektronisen vakionopeudensäätimen kehittäminen 1960-luvun lopulla, josta kehittyi loppujen lopuksi mukautuva vakionopeudensäädinjärjestelmä. (Jayan & Muruganatham, 2020)

Belmonte ja kumppanit (2021) jakavat ADAS-järjestelmän ominaisuudet kuuteen eri luokkaan, jotka ovat pitkittäissuuntainen kontrolli, sivusuuntainen kontrolli, pysäköintiavustinjärjestelmät, valaistusavustinjärjestelmät, suosittelujärjestelmät sekä kuljettajalle tarjottava informaatio. Pitkittäissuuntaiseen kontrolliin kuuluu esimerkiksi mukautuva

vakionopeudensäädin ja sivusuuntaiseen kontrolliin muun muassa kaista-apu (lane assist). Näitä ominaisuuksia on jo toteutettu nykyaikaisissa autoissa, esimerkiksi Fecher ja Hoffmann (2015) esittelevät Audin vuoden 2011 ”Audi Active Lane Assist” -järjestelmän, joka auttaa kuljettajaa pysymään kaistalla. Kyseinen järjestelmä varoittaa kuljettajaa puuttamalla ohjaukseen ennen kaistalta poistumista tai avustaa kuljettajaa pysymään kaistalla ohjaustoimenpiteiden avulla.

Kuljettajaa avustavat järjestelmät voivat tulkita ajotilanteita joskus väärin, ja Taloustaito-lehti nostaa muun muassa Mercedes-Benzin A-sarjan uuden mallin kaistavahdin vaarallisen toiminnan. Kyseinen kaistavahti sai kritiikkiä sen rajusta toiminnasta, sillä mikäli ajoneuvo kulkeutui tien reunaviivan päälle, järjestelmä jarrutti tienpuoleisia pyöriä niin, että tuloksena oli äkkinäinen jarrutus kovasta vauhdista. Rajun liikkeen syynä oli se, että ajoneuvon kulkukulman oli muututtava 4–10 metrin matkalla, mikä vaatii kovemmalla vauhdilla äkkinäisemmän jarrutuksen. Myös mukautuva vakionopeudensäädin voi aiheuttaa vaaratilanteita, jos se tulkitsee ajoympäristöä väärin. Mukautuva vakionopeudensäädin voi reagoida väärin esimerkiksi ohitustilanteessa, kun pitäisi ajaa lähemmäs ohitettavaa ajoneuvoa ennen ohitusta. Järjestelmä voi tulkita tilanteen niin, että ajoneuvo on törmäämässä edellä olevaan ajoneuvoon ja tästä syystä aktivoi jarrutuksen, millä voi olla vaarallisiakin seurauksia. Kuljettajaa avustavien järjestelmien aiheuttamia vaarallisia tilanteita voidaan ehkäistä sillä, että kuljettaja tuntee autonsa ominaisuudet sekä on tarkkaavainen ajamisen aikana. (Taloustaito, 2019)

Pysäköintiavustinjärjestelmiin puolestaan lukeutuu pysäköinnin apu-pilotti (park pilot) ja valaistusavustinsovelluksista esimerkkinä on valoapu (light assist). Suosittelevuussovelluksista voidaan mainita esimerkkinä sovellus, joka ehdottaa kuljettajalle taukoa. Sovellukset, jotka tarjoavat kuljettajalle informaatiota, voivat esimerkiksi näyttää kuljettajalle jonkun liikennemerkin, kuten nopeusrajoitusmerkin. (Belmonte ja muut, 2021)

ADAS-järjestelmän toiminnallisuudet voidaan jakaa kategorioihin myös automaatio- tasojen perusteella. Sekä National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) -virasto että Society of Automobile Engineers (SAE) -järjestö ovat määritelleet automatisoiduille ajoneuvoille omat automaatiotasonsa, joissa ajoneuvon automaatio on sitä suurempaa, mitä suurempi tason numero on. NHTSA-viraston automaatiotasoluokittelussa automaatiotasot määritellään 0-tasosta 4-tasolle, jossa neljäs taso tarkoittaa täysin automatisoitua ajoneuvoa. Puolestaan SAE-järjestön luokittelussa tasoja on 0-tasosta 5-tasoon. Molemmissa määrittelyissä kolme ensimmäistä tasoa ovat samat, mutta SAE-järjestön luokittelussa NHTSA-luokittelun täysin automatisoitu taso 4 jaettiin tasoihin 4 ja 5. SAE luokittelun tasoista tasot 1 ja 2 toteutetaan ajoneuvoissa lähitulevaisuudessa. Taulukossa 1 esitellään tarkemmin ajamisen automaatiotasot ja kuvataan, mitä tehtäviä ihmiskuljettaja ja järjestelmä suorittavat ja miten vastuu jakaantuu kummallekin eri automaatiotasossa. (Jayan & Muruganatham, 2020)

Taulukko 1. SAE- ja NHTSA-luokitteluiden automaatiotasot. Taulukko on muokattu ja täydennetty lähteestä (Jayan & Muruganatham, 2020).

SAE-taso (NHTSA-taso)	SAE-tason nimi	SAE-tason kuvaus	Ohjauksen, jarrutuksen ja kiihdytyksen toteuttaminen	Ympäristön tarkkailu	Esimerkkejä ominaisuuksista
0 (0)	ei automaatiota	Kuljettaja suorittaa ajo- tehtäviä itsenäisesti, mutta saa järjestelmältä tietoa ympäristöstä.	ihmiskuljettaja	ihmiskuljettaja	kaistavahti ja etutör- mäysvaroitukset
1 (1)	kuljettajan avustaminen	Kuljettajalla on kontrolli ajoneuvosta, mutta ajoneuvo hyödyntää erilaisia kuljettajaa avustavia toiminnallisuuksia.	ihmiskuljettaja ja järjestelmä	ihmiskuljettaja	lukkiutumattomat jarrut ja mukautuva vakionopeudensäädin
2 (2)	osittainen automaatio	Ajoneuvo kykenee ottamaan hallinnan pitkittäisesti ja sivuttaisesti samaan aikaan, mutta kuljettajan on kuitenkin pysyttävä mukana ajamisessa sekä ympäristön tarkkailemisessa.	järjestelmä	ihmiskuljettaja	automaattinen pysäköinti ja ruuhka-apu
3 (3)	ehdollinen automaatio	Järjestelmä hoitaa ympäristön tarkkailemisen ja ajoneuvon ohjaamisen sekä hallitsemisen, mutta tarvittaessa varoittaa kuljettajaa ottamaan kontrollin haltuunsa.	järjestelmä	järjestelmä	-
4 (3/4)	korkea automaatio	Ajoneuvo kykenee suorittamaan kaikki toiminnallisuudet kaikissa tilanteissa ilman kuljettajan osallistumista niihin.	järjestelmä	järjestelmä	automaattinen pysäköintipalvelu
5 (3/4)	täysi automaatio	Ajoneuvo ei tarvitse kuljettajan toimenpiteitä vaan pystyy suorittamaan kaikenlaisia toimintoja erilaisissa ajo-olosuhteissa.	järjestelmä	järjestelmä	liikenne-ruuhkien tunnistaminen

Taulukossa 1 on koottu yhteen myös esimerkkejä eri automaatiotasoihin liittyvistä ajoneuvon ominaisuuksista. SAE-tason 0 ominaisuuksiksi on lueteltu kaistavahti sekä etutörmäysvaroitin. Näiden lisäksi tason 0 ominaisuuksiin kuuluvat pysäköintitunnistin, liikennemerkkien tunnistus, kuolleen kulman tunnistus sekä Surround View-järjestelmä. Esimerkiksi etutörmäysvaroitussjärjestelmät varoittavat kuljettajaa mahdollisesta törmäyksestä, joka voi aiheutua ajoneuvon edessä olevasta esteestä. Etutörmäysvaroitussjärjestelmät hyödyntävät keskikantaman tutka-antureita ja enteenpäin katsovaa kameraa havaitsemaan kohteita, ja kun välimatka kyseisiin kohteisiin pienenee liikaa, etutörmäysvaroitussjärjestelmät varoittavat kuljettajaa tavoitteenaan saada kuljettaja toimimaan, niin että kolarilta vältyttäisiin. Etutörmäysvaroitussjärjestelmä hyödyntää kuljettajan varoittamisessa akustiikkaa, visuaalisia näyttöjä tai muita varoitussignaaleja. (Jayan & Murugantham, 2020)

SAE-luokittelun tason 1 ominaisuuksiin puolestaan lukeutuvat lukkiutumattomat jarrut, luistonestojärjestelmä, mukautuva vakionopeudensäädin, automaattinen hätäjarrutusavustin, kaistanpitoavustin sekä kaistan keskitys. Esimerkiksi mukautuva vakionopeudensäädin kontrolloi ajoneuvon nopeutta pitämällä samaan aikaan turvavälin edellä olevaan ajoneuvoon. Mukautuva vakionopeudensäädin hyödyntää radar- ja kamerasensoreita, joiden sulautetusta datasta järjestelmä tunnistaa kohteen, kohteen suhteellisen nopeuden sekä kohteen suhteellisen etäisyyden, minkä jälkeen elektroninen ohjausyksikkö vaatii järjestelmää joko kiihdyttämään tai hidastamaan ajoneuvoa. Mikäli edessä ei ole ajoneuvoa, mukautuva vakionopeudensäädin säätelee nopeutta perustuen asetettuun nopeuteen, ja kun ajoneuvo on edessä, nopeus hidastetaan edessä olevan ajoneuvon tasolle ja sopivaa turvaetäisyyttä pidetään automaattisesti. (Jayan & Murugantham, 2020)

SAE-tason 2 ominaisuuksia ovat valtatieapu, automaattinen pysäköinti sekä ruuhkaapu. Esimerkiksi automaattinen pysäköinti avustaa kuljettajaa ajoneuvon taskupysäköinnissä, kohtisuoraan pysäköinnissä sekä vinottaisessa pysäköinnissä. Pysäköinnin avustamisessa järjestelmä kontrolloi ajoneuvon nopeutta ja ohjausta saadakseen oikeanlaisen reitin. Järjestelmä hyödyntää nopeuden ja ohjauksen määrittämisessä dataa ympäristöstä, jota saadaan ultraäänisensoreiden sekä kameran kautta. SAE-luokittelun tason 3 ominaisuuksien kohdalla on viiva taulukossa 1, sillä yleensä suurin osa alkuperäisistä laitevalmistajista ohittaa tason 3 automaation, koska kontrollin siirtäminen järjestelmältä kuljettajalle on vaarallista. (Jayan & Murugantham, 2020; Weller & Schlag, 2015)

Jayan ja Murugantham (2020) mainitsevat tason 4 ominaisuudeksi automaattisen pysäköintipalvelun ja tason 5 kohdalla he eivät nimeä mitään erityistä toiminnallisuutta, mutta tuovat esille, että tason 5 ominaisuudet kykenevät esimerkiksi liikenneruuhkien tunnistamiseen. Tasoilla 4 ja 5 kuljettajan ei tarvitse suorittaa mitään toimenpiteitä, minkä takia tutkielmassa ei käsitellä kyseisiin tasoihin liittyviä asioita.

3.3 Aistit ja ajaminen

Ihminen vastaanottaa aisti-informaatiota aistielimiensä kautta, joilla on erilaiset herkkyydet sekä toiminta-alueet. Ihmisen aistikanavat voidaan jakaa viiteen luokkaan, jotka ovat visuaalinen, auditiiivinen, haptinen, haju- sekä makuaistikanava. Haptinen aistikanava jakaantuu vielä taktiiliin ja kinesteettiseen havaitsemiseen. Taktiililla aistikanavalla viitataan tarkemmin tuntoaistiin ja kinesteettisellä kanavalla asennon ja liikkeen aistimiseen. (Fecher & Hoffmann, 2015)

Näkö-, kuulo- ja tuntoaistia hyödynnetään useimmiten antamaan merkkejä ja huomauttamaan kuljettajaa auton sisäisissä sovelluksissa, sillä niiden on todettu soveltuvan varoittamiseen ja informointiin parhaiten verrattuna muihin aisteihin. Näkö- ja kuuloaistia käytetään kuljettajan tiedottamisessa vielä enemmän verrattuna tuntoaistiin, mutta tuntoaistin hyödyntämisessä yhdessä muiden modaliteettien kanssa on huomattu olevan paljon potentiaalia. (Riener, 2010, s. 14–17)

Informaatiota voidaan välittää kuljettajalle monin eri keinoin aistikanavien kautta: visuaalista tietoa voidaan välittää esimerkiksi tekstillä, korostuksella tai symboleilla, auditiiivista tietoa äänenä tai sanallisena viestinä ja taktiilista tietoa voimapalautteen tai värähtelyn avulla (Burke ja muut, 2006; Baldwin ja muut, 2012). Taulukossa 2 on esitettyä tutkielman eri aistimodaliteetteja käsittelevä lähdekirjallisuus ja merkittynä, mitä aistimodaliteetteja mikäkin lähde käsittelee sekä käsittelee lähde multimodaalisen tai unimodaalisen tiedon välittämistä kuljettajalle. Taulukossa on merkittynä tähdellä ne lähteet, joissa on toteutettu tutkimus ja näiden lähteiden yhteydessä merkityt aiheet ovat aiheita, joita lähde tutkii.

Taulukko 2. Aistimodaliteetteja käsittelevän lähdekirjallisuuden jaottelu modaliteettien perusteella. Tähdellä merkityissä lähteissä kuvataan oma empiirinen tutkimus.

Tutkimusartikkeli	Visuaalinen aistimodaliteetti	Auditiivinen aistimodaliteetti	Haptinen aistimodaliteetti	Unimodaaliset varoitukset	Multimodaaliset varoitukset
Baldwin ja muut (2012)	x	x	x	x	x
Bertoldi & Filgueiras (2010)	x	x	x	x	x
Biondi ja muut (2017) *		x	x	x	x
Burke ja muut (2006) *	x	x	x	x	x
De Rosario ja muut (2010) *	x		x	x	
Fecher & Hoffmann (2015)	x	x	x	x	
Ho ja muut (2007) *		x	x	x	x
Maag ja muut (2015) *	x		x	x	
Riener (2010)	x	x	x	x	x
Wang ja muut (2020) *	x	x		x	
Wang ja muut (2022) *	x	x		x	x

Ajaminen kuormittaa eniten visuaalista aistikanavaa, sillä suurin osa tiedosta saapuu kuljettajalle visuaalisen aistikanavan kautta visuaalisen tiedon osuuden ollessa 80–90 % kaikesta kuljettajan vastaanottamasta aisti-informaatiosta. Ajoneuvon ajaminen edellyttää kuljettajalta tarkkaavaisuuden suuntaamista tiehen ja ympäristöön, jotta niissä olevia muutoksia ja toimintaa pystyisi havaitsemaan. Toiseksi suurin osa kuljettajan vastaanottamasta tiedosta on auditiivista tietoa ja sen osuus kuljettajan vastaanottamasta aisti-informaatiosta on noin 15 %. (Riener, 2010, s. 15–17)

3.4 Kuljettajan käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä

Weller ja Schlag (2015) tuovat esille ihmisen tiedonkäsittelyä liikenteessä ja esittelevät tekijöitä, jotka vaikuttavat kuljettajan käyttäytymiseen sekä ajosuoritukseen. Yksi kuljettajaan vaikuttavista tekijöistä on kuljettajan kuormittuneisuus, jolla kuvataan sitä, kuinka paljon vaivaa jokin tehtävä vaatii. Yksi esimerkki korkeasta kuormittuneisuudesta on liikenteessä ajaminen, sillä se kuormittaa merkittävästi kuljettajan näköaistia, ja kuormittuneisuus on korkea etenkin ruuhkaisessa liikenteessä ajettaessa (Biondi ja muut, 2017).

Ylikuormittuneisuuden voi aiheuttaa myös huonosti suunniteltu ADAS-järjestelmä, mikäli kuljettaja ymmärtää väärin järjestelmän toimintaperiaatteet tai järjestelmä luo uudenlaisia vaatimuksia (Weller & Schlag, 2015). Jos ADAS-järjestelmä esittää liikaa tietoa kuljettajalle samanaikaisesti, liiallinen tiedon määrä voi häiritä ja hämmentää kuljettajaa ja johtaa kuljettajan mentaaliseen ylikuormittumiseen (Baldwin ja muut, 2012).

Tehtävän vaativuustasoa voidaan arvioida myös sen aiheuttaman stressin avulla, sillä tehtävän vaikeustaso on yhteydessä tehtävän aiheuttaman stressin määrään. Tehtävän sisältämä kokonaisstressin määrä on niiden stressitekijöiden summa, jota ympäristöolosuhteet ja tehtävät vaativat. Stressiä ja kuormittuneisuutta ei voida kuitenkaan pitää samoina asioina, sillä samat stressitekijät voivat johtaa eritasoihin kuormitukseen riippuen kuljettajan hyödynnettävissä olevista voimavaroista. ADAS-järjestelmillä pystytään laskemaan kuljettajan kuormittuneisuutta, mutta tällöin ongelmaksi voi muodostua alikuormittuneisuus, mikä ylikuormittuneisuuden tavoin voi johtaa ajosuorituksen heikentymiseen. Sekä ylikuormittuneisuutta että alikuormittuneisuutta olisi siis vältettävä, mikäli halutaan varmistua kuljettajan hyvästä ajosuorituksesta. (Weller & Schlag, 2015)

Myös tilannetietoisuus on liikenteessä ajettaessa kuljettajan käyttäytymiseen vaikuttava tekijä, ja kyseisellä termillä viitataan elementtien havaitsemiseen ja niiden merkityksen ymmärtämiseen ympäristössä sekä niiden aseman ymmärtämiseen tulevaisuudessa. Tilannetietoisuus koostuu kolmesta hierarkkisesta tasosta, jotka ovat tilanteen havaitseminen, tilanteen ymmärtäminen sekä tulevaisuuden ennakoiminen. Jokainen taso on tärkeä, sillä ilman alinten tasojen tilannetietoisuutta kuljettaja ei pysty myöskään saavuttamaan ylimpien tasojen tilannetietoisuutta. (Weller & Schlag, 2015)

ADAS-järjestelmä kykenee avustamaan kuljettajaa kaikilla tilannetietoisuuden tasoilla esimerkiksi esittämällä tilanteeseen liittyvää tietoa nopeuttaen kuljettajan reagoimista ja saaden kuljettaja reagoimaan oikealla tavalla (Wang ja muut, 2022; Weller & Schlag, 2015). Järjestelmä voi myös heikentää kuljettajan tilannetietoisuutta esimerkiksi esittämällä väärää, liikaa tai liian vähän tietoa tai esittämällä tiedon väärään aikaan. Tällaiset tilanteet, joissa järjestelmä suuntaa kuljettajan tarkkaavaisuuden epäolennaisiin asioihin, voivat aiheuttaa vaarallisiakin ongelmia, sillä tarkkaavaisuuden ollessa muualla olennaiset asiat jäävät huomaamatta. Näin ollen tarkkaavaisuuden käsite on myös olennainen tarkastellessa kuljettajan suoritusta liikenteessä. (Weller & Schlag, 2015)

Mentaaliset mallit ovat mentaalisia representaatioita, jotka ovat yksilöiden muodostamia käsityksiä jostain järjestelmästä tai tehtävästä ja jotka perustuvat aiempiin kokemuksiin sekä havaintoihin nykyhetkestä. Mentaalisia malleja pystytään hyödyntämään nopeasti ja kognitiivisia resursseja kuormittamatta, sillä niiden käyttäminen tapahtuu usein tiedostamatta. Lisäksi mallit suuntaavat yksilön tarkkaavaisuutta automaattisesti olennaisiin ärsykkeisiin mahdollistaen tarkkaavaisuusresurssien tehokkaamman käytön. Näiden vuoksi mentaalisilla malleilla on positiivinen vaikutus järjestelmien tehokkaaseen

käyttöön. Yksilön mentaaliset mallit voivat kuitenkin olla virheellisiä tai vajaita, jolloin ne voivat johtaa yksilön virheelliseen käyttäytymiseen, tai myös virheelliset tai väärin tulkitut signaalit ympäristöstä voivat aktivoida väärän mentaalisen mallin. (Weller & Schlag, 2015)

4 Unimodaaliset varoitukset

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin unimodaalisia varoituksia ja keskitytään visuaalisten, auditiivisten sekä haptisten varoitusten tarkastelemiseen. Luku tuo esille kuljettajien reaktioita eri aistien välityksellä annettuihin varoituksiin sekä eri modaliteettien vahvuuksia ja heikkouksia kuljettajan varoittamisessa.

4.1 Visuaaliset varoitukset

Wang ja kumppanit (2020) vertailivat tutkimuksessaan auditiivisiä ja visuaalisia neuvoantavia liikennetietojärjestelmiä kuljettajien reaktioiden perusteella. Koehenkilöt ajoivat ajosimulaattorissa kolmessa erilaisessa ajotilanteessa. Sekä visuaaliset että auditiiviset varoitukset kykenivät parantamaan kuljettajan ajosuoritusta, mutta aistimodaliteeteilla oli myös erilaisia vaikutuksia kuljettajan reagoimiseen. Tutkimuksessa visuaalisena varoituksena käytettiin kuvaa, jossa oli esitettynä ajoneuvo ja sitä ympäröivä alue oli jaettu vyöhykkeisiin. Vyöhykkeissä esiintyi erilaisia värejä ja symboleita, jotka viestivät kuljettajalle muista tienkäyttäjistä, niiden suunnasta, läheisyydestä sekä tyypistä. Visuaaliset varoitukset saivat kuljettajan ajamaan tehokkaasti ja ne pystyivät tarjoamaan kuljettajalle tietoa monella eri tasolla eli tarjoamaan informaatiota, neuvoa-antavaa tietoa sekä varoituksia, mikä on yhteydessä parempaan tilannetietoisuuteen. Parempi tilannetietoisuus puolestaan mahdollistaa sen, että kuljettaja pystyy paremmin ennakoimaan tulevaisuuden tilanteita ja reagoimaan vaaroihin etukäteen.

Wangin ja kumppaneiden (2020) tutkimus toi esille, kuinka ajotilanteella on vaikutusta varoituksen tehokkuuteen, sillä visuaaliset varoitukset osoittivat paremman tehokkuuden monimutkaisissa tilanteissa verrattuna auditiivisiin varoituksiin sekä yksinkertaisiin tilanteisiin. Lisäksi visuaalisilla varoituksilla pystytään viestimään selkeästi, mitä tapahtuu niillä alueilla, jonne kuljettaja ei katso. Kuljettajat kokevat visuaaliset varoitukset helpommin ymmärrettäviksi kuin auditiiviset varoitukset, mikä on yhteydessä varoituksen hyväksymiseen (Wang ja muut, 2022). Visuaalisten varoitusten kyky esittää selkeää tietoa kuljettajalle toimii parhaiten silloin, kun kuljettajalla on tarpeeksi aikaa yhdistää visuaalisen varoituksen informaatio auton ympärillä olevaan fyysiseen ympäristöön (Wang ja muut, 2020). Toisin kuin esimerkiksi auditiiviset varoitukset, visuaaliset varoitukset ovat pysyviä, jolloin kuljettajan on helppo palata niihin ja tarkistaa niiden tarjoama informaatiota (Wang ja muut, 2022). Visuaaliset varoitukset sopivatkin hyvin tilanteisiin, joissa kuljettajan täytyy palata turvallisuustietoon jatkuvasti ja toistuvasti (Baldwin ja muut, 2012).

Visuaalisten varoitusten heikkoutena on kuitenkin se, että ne jakavat saman kognitiivisen resurssin ajotehtävän kanssa ja tämän vuoksi riski kuljettajan ylikuormittuneisuudesta kasvaa. Ratkaisuna kyseiseen ongelmaan on hyödyntää muita aistimodalityetteja tiedon välittämisessä kuljettajalle. (Wang ja muut, 2020)

Visuaaliset varoitukset eivät myöskään saa aikaan yhtä nopeita reaktioita kuin haptiset tai auditiiviset varoitukset, mikä kävi ilmi tutkimuksista, jotka De Rosario ja kumppanit (2010) sekä Wang ja kumppanit (2020) toteuttivat. Huonosti suunniteltuina visuaaliset varoitukset voivat jopa hidastaa kuljettajan reaktioaikaa, minkä Wang ja kumppanit (2022) osoittivat tutkimuksessaan. Kyseiseen tutkimukseen perehdytään tarkemmin luvussa 5.3.

4.2 Auditiiviset varoitukset

Wang ja kumppanit (2020) toivat tutkimuksessaan esille myös auditiivisten varoitusten vahvuuksia ja heikkouksia kuljettajan varoittamisessa ja tiedottamisessa. Tutkimuksessa auditiivisena varoituksena käytettiin spatiaalista ääntä, joka viesti kuljettajalle mihin suuntaan muut tienkäyttäjät liikkuvat ja mikä on niiden riskitaso. Esimerkiksi jos toinen auto lähti ohittamaan koehenkilön ajoneuvoa sen takaa ja vasemmalta puolelta, auditiivisen varoituksen ääni lähti takaapäin ja tuli koko ajan lähemmäs ja ohitti vasemmalta puolelta samalla tavoin kuin ohittava auto olisi liikkunut. Auditiiviset varoitukset saivat kuljettajan reagoimaan nopeammin kuin visuaaliset varoitukset, ja tätä selittää äänen kyky vetää kuljettajan huomio puoleensa sekä suunnata kuljettajan tarkkaavaisuutta haluttuihin asioihin.

Wangin ja kumppaneiden (2020) tutkimus osoitti kuitenkin kuljettajien hyötyvän auditiivisistä varoituksista enemmän yksinkertaisissa kuin monimutkaisissa tilanteissa. Monimutkaisilla tilanteilla tarkoitetaan esimerkiksi tilannetta, jossa kaksi autoa on ohittamassa kuljettajan ajoneuvoa. Tällöin sekä järjestelmän että kuljettajan on vaikea erottaa äänten tarkkaa suuntaa toisistaan ja näin havaita eroa kahden ajoneuvon äänien välillä, sillä kahden ajoneuvon välinen kulma on niin pieni. Tutkimuksessa yksinkertaisella tilanteella viitattiin esimerkiksi tilanteeseen, jossa jalankulkija kävelee autotielle jonkun kohteen takaa eli kuljettaja ei kykene havaitsemaan jalankulkijaa ennen kuin jalankulkija on autotiellä. Kyseisessä tilanteessa kuljettaja pystyy nopeasti havaitsemaan ja yhdistämään äänimerkin sen varoittamaan kohteeseen, mikä mahdollistaa nopean reagoinnin. Auditiivisia varoituksia pitäisi hyödyntää silloin, kun kuljettajan toimia vaaditaan välittömästi (Bertoldi & Filgueiras, 2010).

Auditiivisten varoitusten heikkoutena voidaan nähdä se, että niiden esittämään informaatioon ei voida palata yhtä helposti kuin esimerkiksi visuaaliseen informaatioon (Wang ja muut, 2022). Myös mikäli auditiivinen varoitus esitetään puheen muodossa, kuljettajan on kuunneltava varoitus loppuun asti, jotta hän ei tulkitsisi varoitusta väärin (Riener, 2010, s. 15). Lisäksi auditiiviset varoitukset voivat saada kuljettajassa aikaan

ärsyyntymistä, mikä voi johtaa siihen, että kuljettajat lopettavat ADAS-järjestelmän käytön (Biondi ja muut, 2017). Kuljettaja voi kokea auditiivisen varoituksen ärsyttäväksi esimerkiksi siitä syystä, että se häiritsee muuta auditiivista toimintaa, kuten musiikin kuuntelemista (Riener, 2010, s. 15). Toisaalta ympäristössä oleva melu voi laskea auditiivisten varoitusten tehokkuutta ja varsinkin silloin, jos ne vaativat spatiaalisten vihjeiden kuuntelua (Riener, 2010, s. 15; Baldwin ja muut, 2012).

Myös muiden aistimodaliteettien kohdalla voidaan puhua niiden tehon heikkenemisestä tietyissä ajo-olosuhteissa. Esimerkiksi haptisten varoitusten kyvyt kuljettajan varoittamisessa voivat heikentyä ajettaessa epätasaisessa maastossa. (Baldwin ja muut, 2012)

4.3 Haptiset varoitukset

De Rosario ja kumppanit (2010) vertailivat tutkimuksessaan värähtelevän ja visuaalisen varoituksen tehokkuuden eroa etutörmäysvaroituksissa. Tutkimuksessa tutkimushenkilöille lähetettiin tärinäsignaaleja haptisen kaasupolkimen välityksellä, jonka signaalit vaihtelivat taajuudeltaan sekä voimakkuudeltaan. Visuaalisena varoituksena toimi symboli, joka oli sijoitettu simulaattorin näytön alakulmaan. Haptiset varoitukset suoriutuivat visuaalisia varoituksia paremmin törmäyksen varoittamisessa. Muun muassa jarrutusreaktioaika oli parempi haptisilla varoituksilla. Varoituksen tehokkuuteen vaikuttivat myös haptisen varoituksen värähdyslaajuus sekä taajuus siten, että mitä voimakkaampi ja nopeampi haptinen signaali oli, sitä parempi oli kuljettajien jarrutusreaktioaika.

Myös Maag ja kumppanit (2015) tutkivat haptisia varoituksia vertaamalla niitä visuaalisiin varoituksiin törmäyksen estämisessä. Erona edellisessä kappaleessa esiteltyyn tutkimukseen Maag ja kumppanit (2015) esittivät haptisen varoituksen ohjauspyörän kautta ja visuaalisen varoituksen HUD-näytössä eli heijastusnäytössä. Ohjauspyörä kommunikoi kuljettajalle, mihin suuntaan ohjauspyörää tulee kääntää välttyäkseen uhalta, mutta se ennemmin tönäisi kuljettajaa ajamaan oikein kuin itsenäisesti ohjasi ajoneuvoa. Tutkimuksessa ohjauspyörän ohjausliikkeestä käytetään nimitystä auton ele (car gesture).

Verrattuna tutkimukseen, jonka De Rosario ja kumppanit (2010) suorittivat, Maag ja kumppanit (2015) saivat selville, että visuaalisen ja haptisen varoituksen väliset tehokkuuserot eivät ole niin selkeitä. Ohjauspyörän kautta välitetty varoitus osoitti paremman sivuttaissuuntaisen ajoreaktion kuin visuaalinen varoitus, mutta kuljettajat kuitenkin suosivat selkeästi enemmän visuaalisia varoituksia kuin ohjauspyörän kautta annettuja varoituksia. Kuljettajat kokivat visuaaliset varoitukset vähemmän häiritseviksi ja kokivat, että ne jättävät päätöksenteon sopivasta toimenpiteestä kuljettajalle. Ohjauspyörän kautta annetuilla eleillä oli yleisesti alhaisempi turvallisuusetu kuin visuaalisilla varoituksilla. Turvallisuusetua mitattiin vähimmäisetäisyydellä uhkaan. Ohjauspyörän eleiden vahvuudeksi osoittautui ajoneuvon ohjaaminen tehokkaasti pois päin uhasta, ja tämä on hyödyllistä erityisesti tilanteissa, joissa vaaditaan nopeaa reagoimista uhkiin.

Tutkimusten tuloksista voidaan nähdä, kuinka haptiset varoitukset pystyvät tehokkaasti herättämään kuljettajan huomion, ohjaamaan kuljettajaa oikean toiminnan suorittamiseen sekä näin parantamaan reaktioaikaa. Kun haptiset varoitukset ohjaavat tiettyyn toimintaan ne ovat tehokkaita lisäämään turvaetäisyyttä jo silloin, kun kuljettaja vasta analysoi tilannetta. (Maag ja muut, 2015) Haptiset varoitukset ovat tehokkaita varoittamaan myös kuljettajia, joilla ei ole tietoa varoituksista etukäteen, mikä osoittaa haptisten varoitusten kyvyn viestiä kuljettajalle tehokkaasti siitä, mikä liike kuljettajan tulisi suorittaa (De Rosario ja muut, 2010). Burke ja kumppanit (2006) esittävät selityksenä haptisen palautteen tuottamille nopeille reaktioajoille, että ihmisen elimistöllä on luonnollinen taipumus reagoida nopeasti haptisiin ärsykkeisiin.

Haptisten varoitusten vahvuutena on myös se, että haptista aistikanavaa käytetään ajamisen aikana vähemmän verrattuna visuaaliseen ja auditiiviseen aistikanavaan. Kuten edellä kerrottiin, noin 80 % aisti-informaatiosta välittyy visuaalisen aistikanavan kautta ja noin 15 % auditiivisen aistikanavan kautta, mikä puoltaisi haptisten varoitusten nykyistä laajempaa käyttöä (Bertoldi & Filgueiras, 2010). Auton eleiden edut tulevat vielä enemmän esille, kun kuljettajan visuaalinen kuormitus kasvaa. Lisäksi haptista tietoa voidaan välittää kuljettajalle ilman, että hälytetään tai häiritään muita matkustajia. (Maag ja muut, 2015)

Tutkimukset ovat osoittaneet haptisten varoitusten paremman tehokkuuden verrattuna visuaalisiin varoituksiin, mutta puolestaan verrattuna auditiivisiin varoituksiin varoitusten tehokkuuserot riippuvat kontekstista. Puheena esitetyt auditiiviset varoitukset pystyvät tuottamaan ja välittämään kattavampaa tietoa kuin haptiset varoitukset, joten ne voivat olla hyödyllisempiä esimerkiksi tilanteissa, joissa kuljettajaa pitää informoida jostain asiasta tarkasti. (De Rosario ja muut, 2010) Haptisten varoitusten huonona puolena voidaankin nähdä niiden huono kyky esittää monimutkaista tietoa kuljettajalle (Maag ja muut, 2015). Haptiset varoitukset ovat puolestaan tehokkaampia varoittamaan kuljettajia tilanteissa, joissa kuljettajalta vaaditaan nopeaa reagointia tai joissa kuljettaja ei tunne tai tiedä varoituksista etukäteen (De Rosario ja muut, 2010).

5 Multimodaaliset varoitukset

Tässä luvussa käsitellään multimodaalisten varoitusten vahvuuksia sekä eroja verrattuna unimodaalisiin varoituksiin. Lisäksi vertaillaan erilaisia multimodaalisia varoituksia keskenään ja perehdytään tekijöihin, joita tulisi ottaa huomioon suunniteltaessa ADAS-järjestelmän varoituksia.

5.1 Multimodaalisten varoitusten tehokkuus

Ho ja muut (2007) tutkivat multimodaalisia varoituksia mahdollisen törmäyksen varoittamisessa, ja tulokset osoittivat multimodaalisten varoitusten paremman tehokkuuden verrattuna unimodaalisiin varoituksiin, sillä testihenkilöiden jarrutusreaktio oli parempi

multimodaalisille varoituksille. Multimodaalisena varoituksena käytettiin värähtelevän varoituksen ja auditiivisen varoituksen yhdistelmää, ja samat varoitustyyppit olivat myös unimodaalisina. Myös Wang ja muut (2022) saivat tutkimuksellaan selville, että multimodaalinen varoitus on yhteydessä parempaan ajosuoritukseen. Tutkimuksessa tutkittiin auditiivisten ja visuaalisten varoitusten kuvakkeiden vaikutusta varoitusten tunnistamiseen ja reaktioaikaan. Kuljettajille annettiin visuaalisia ja auditiivisiä varoituksia unimodaalisina sekä multimodaalisina. Kaikkiin multimodaalisiin varoituksiin oli yhteydessä parempi jarrutusreaktioaika kuin unimodaalisiin varoituksiin. Burke ja kumppanit (2006) vertasivat myös multimodaalisia varoituksia unimodaalisiin ja nostivat esille esimerkiksi sen, että multimodaalisilla varoituksilla voidaan vähentää visuaalisen aistikanavan kuormittuneisuutta jakamalla vastuuta myös muille aistikanaville ja näin vähentää kognitiivisen prosessoinnin ponnisteluja.

Yhtenä selityksenä multimodaalisten varoitusten tehokkuuteen voi olla se, että kuljettajat kokevat varoitukset kiireellisiksi, kun varoituksia esitetään monen aistikanavan kautta (Wang ja muut, 2022; Biondi ja muut, 2017). Multimodaalisia varoituksia tulisikin hyödyntää vain hätätilanteissa, joissa tarvitaan äkkinäisiä liikkeitä onnettomuuden välttämiseksi (Biondi ja muut, 2017). Toiseksi mahdolliseksi selitykseksi tutkijat ehdottavat, että multimodaalinen varoitus voi olla kuljettajalle luotettavampi kuin unimodaalinen (Wang ja muut, 2022). Ylimääräiset modaliteetit nimittäin toimivat kuljettajalle tiedonlähteinä ja varmistavat toisiaan, jolloin kuljettaja voi olla luottavaisempi ja seurauksena on kuljettajan nopeampi reagoiminen (Wang ja muut, 2022; Baldwin ja muut, 2012). Monien aistimodaliiteettien hyödyntäminen varoituksissa mahdollistaa myös eri aistimodaliiteettien hyvien ominaisuuksien yhdistämisen (Ho ja muut, 2007).

Biondi ja kumppanit (2017) osoittivat multimodaalisten varoitusten paremman tehokkuuden myös haastavissa ajo-olosuhteissa. Tutkimuksessa käytettiin varoitustyyppinä värähtelevää varoitusta ja auditiivista varoitusta, joita välitettiin koehenkilöille sekä unimodaalisina että multimodaalisina ja testattiin myös tilanteita, joissa varoituksia ei annettu ollenkaan. Tutkimuksessa tutkittiin, miten puhelimeen puhuminen sekä liikennetilanne vaikuttavat testihenkilöiden reaktioaikaan eli henkilöt puhuivat puhelimeen tai eivät käyttäneet puhelinta sekä ajoivat rauhallisessa liikenneympäristössä tai korkean liikennetiheyden ympäristössä. Multimodaaliset varoitukset suoriutuivat kuljettajan varoitamisesta kaikissa olosuhteissa paremmin kuin unimodaaliset. Kun arvioitiin multimodaalisten varoitusten tehokkuutta erilaisissa ajotilanteissa, liikennetiheys ei vaikuttanut siihen, kuinka nopeasti kuljettajat reagoivat multimodaalisiin varoituksiin, mutta kun puhelimeen ei puhuttu, multimodaaliset varoitukset saivat aikaan nopeampia reaktioita kuin tilanteissa, joissa puhelimeen puhuttiin.

Olosuhteiden erilaista vaikutusta multimodaalisten varoitusten tehokkuuteen selittää se, että puhelimeen puhuminen on luonteeltaan kognitiivinen tehtävä, kun taas korkean

liikennetiheyden tilanne kuormittaa vain visuaalisesti. Näyttäisi siis olevan niin, että multimodaalisten, ei-visuaalisten ärsykkeiden esittämisellä voi olla edistävää vaikutus havaitsemisen vaiheessa. Tilanne, jossa kuljettaja puhui puhelimeen ajamisen aikana, osoitti myös multimodaalisten varoitusten kyvyn varoittaa kuljettajaa silloinkin, kun kuljettaja ei ole keskittynyt ajotehtävän suorittamiseen vaan suorittaa samanaikaisesti jotain toisista tehtäviä. (Biondi ja muut, 2017)

5.2 Multimodaalisten varoitusten vertailu

Wang ja kumppanit (2022) luettelevat audiovisuaalisen multimodaalisen varoituksen vahvuuksia. Visuaaliset ja auditiiviset varoitukset kykenevät esittämään tarkempaa tietoa verrattuna haptisiin signaaleihin, ja audiovisuaalisten varoitusten etuna on myös auditiivisten signaaleiden kyky herättää kuljettajan huomio ja kasvattaa kuljettajien havaitsemaa kiireellisyyttä samalla, kun visuaaliset signaalit esittävät tarkempaa tietoa. Lisäksi audiovisuaaliset varoitukset ovat tehokkaita onnettomuuksien estämisessä sekä ovat saaneet hyväksyntää myös kuljettajilta. Myös Wang ja kumppanit (2020) nostavat esille visuaalisten ja auditiivisten varoitusten yhdistämisen, sillä kyseiset aistimodalityetit täydentävät toisiaan: auditiiviset varoitukset kiinnittävät tehokkaasti kuljettajan huomion ja visuaaliset varoitukset kykenevät viestimään paremmin, mitä ympäristössä tapahtuu.

Burke ja kumppanit (2006) vertailivat meta-analyysissään visuaalis-auditiivista ja visuaalis-taktiilia palautetta unimodaaliseen visuaaliseen palautteeseen ja saivat selville, että kyseiset multimodaaliset varoitukset sopivat erilaisiin tilanteisiin ja tehtävien suorittamiseen. Varsinkin kuljettajan kuormittuneisuus vaikutti varoitusten tehokkuuteen. Tutkimustulokset osoittivat visuaalis-auditiivisen palautteen toimivan paremmin yksittäisen tehtävän suorittamisessa, jossa kuljettajan kuormittumistila oli normaali, kun taas visuaalis-taktiili palaute suoriutui paremmin korkean kuormituksen tilassa, jossa kuljettaja suoritti monta tehtävää samanaikaisesti. Visuaalis-auditiivisen ja visuaalis-taktiilin palautteen aiheuttamat kuormittavuudet selittävät palautteiden soveltuvuutta erilaisiin tilanteisiin. Näyttäisi siltä, että visuaalinen ja auditorinen kanava lisäävät kuljettajan kokemaa kuormittavuutta ja sopivat tämän vuoksi yhdistettyinä matalan kuormittavuuden tilanteisiin. Sen sijaan taktiilit palautteet näyttävät pystyvän vähentämään kuormittavuutta, minkä takia ne sisältyvät paremmin korkean kuormituksen tilanteisiin.

Burken ja kumppanien (2006) tutkimuksessa visuaalis-auditiiviset palautteet suoriutuivat unimodaalisia visuaalisia varoituksia paremmin kuljettajan huomion kiinnittämisessä ja olivat tämän vuoksi yhteydessä parempiin reaktioaikoihin sekä ajosuorituksen paranemiseen. Verrattaessa visuaalis-taktiilia palautetta visuaaliseen palautteeseen taktiilin palautteen aikaansaama reaktio kuljettajan kehossa saattaa selittää kyseisen multimodaalisen varoituksen tehokkuutta. Vaikuttaa myös siltä, että taktiili palaute kykenee vähentämään kognitiivista prosessointia, joka liittyy paikan ja suunnan prosessointiin.

5.3 Multimodaalisten varoitusten suunnittelu

Kuvakkeiden hyödyntämisellä ADAS-järjestelmän varoituksissa on varoitusten modaliiteetin ohella vaikutusta varoituksen tehokkuuteen. *Kytkenän vaikutuksella* (mapping effect) tarkoitetaan varoitusten yhteydessä sitä, että varoitus on tehokkaampi, kun se liittyy tarkasti todelliseen elämään. Varoitus pystytään kytkemään todelliseen elämään erilaisten kuvakkeiden avulla, joilla pystytään kuvastamaan jotain tapahtumia tai fyysisesti todellisia esineitä, mistä kuljettaja pystyy päättämään mitä ympäristössä tapahtuu. Kuvakkeiden avulla varoitukset pystyvät viestimään kuljettajalle tapahtumiin liittyvää tietoa ja näin parantamaan tilannetietoisuutta sekä reagoimista. (Wang ja muut, 2022)

Wangin ja kumppanien (2022) tutkimustulokset osoittivat, että varoitusten kuvakkeilla oli vaikutusta varoitusten tehokkuuteen, sillä korkean kytkenän auditiiviset varoitukset paransivat ajosuoritusta verrattuna alhaisen kytkenän auditiivisiin varoituksiin. Lisäksi kuljettajat kokivat korkean kytkenän auditiiviset varoitukset myös hyödyllisemmiksi. Korkean kytkenän varoituksilla viitataan tutkimuksessa sellaisiin varoituksiin, jotka kuvaavat selkeästi asiaa, josta varoitetaan ja puolestaan matalan kytkenän varoitukset kuvaavat heikommin varoitettavaa asiaa. Tutkimuksessa korkean kytkenän auditiivisena varoituksena käytettiin esimerkiksi moottoripyörän ääntä, jos moottoripyörä oli tulossa auton eteen. Alhaisen kytkenän varoituksena samassa tilanteessa toimi ”piip”-ääni. Myös Bertoldi ja Filgueiras (2010) esittävät kuinka auditiiviset puhevaroitukset sekä auditiiviset symbolit saavat aikaan kuljettajissa parempia reaktioita kuin abstraktit äänet.

Wangin ja kumppaneiden (2022) tutkimuksessa visuaaliset varoitukset, joilla oli korkea kytkenän vaikutus, eivät kuitenkaan osoittaneet yhtä hyviä tuloksia kuin korkean kytkenän auditiiviset varoitukset. Korkeamman kytkenän visuaaliset varoitukset olivat monimutkaisempia ja kuljettajat kiinnittivät usein liikaa huomiota visuaalisten varoitusten grafiikoihin eivätkä varoitukset tällöin ohjanneet kuljettajan huomiota oikeisiin asioihin. Data kuljettajien silmänliikkeistä paljastaa, kuinka kuljettajat käyttivät enemmän aikaa monimutkaisempien visuaalisten varoitusten hahmottamiseen. Korkean kytkenän visuaalisina varoituksina Wangin ja kumppaneiden (2022) tutkimuksessa käytettiin tilanekuvia, joissa näkyi mistä vaarasta on kyse. Esimerkiksi moottoripyörän kulkiessa ajoneuvon eteen visuaalinen varoitus sisälsi kuvan moottoripyörästä sekä kuljettajan ajoneuvosta ja sen, miten ne ovat sijoittuneena toisiinsa nähden. Matalan kytkenän visuaalisena varoituksena toimi jokaisessa ajotilanteessa kolmio, jonka sisällä oli huutomerkki.

Vaikka Wangin ja kumppaneiden (2022) korkean kytkenän visuaaliset varoitukset eivät parantaneet kuljettajan ajosuoritusta samalla tavoin kuin auditiiviset korkean kytkenän varoitukset, kuvakkeilla on kuitenkin todettu olevan visuaalisten varoitusten tapauksessa vaikutusta siihen, miten kuljettajat kiinnittävät huomiota varoituksiin. Nimitäin kuvakkeita sisältävät visuaaliset varoitukset vetävät kuljettajien huomiota puoleensa todennäköisemmin kuin visuaaliset varoitukset, joissa kuvakkeita ei ole (Baldwin ja

muut, 2012). Wangin ja kumppaneiden (2022) tutkimuksessa visuaalisina symboleina käytettiin kuvakkeita, jotka olivat monimutkaisempia kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, mikä saattaa selittää visuaalisten korkean kytkennän varoitusten huonoa suoriutumista tutkimuksessa.

Multimodaalisten varoitusten esittämisessä on myös otettava huomioon se, miten eri aistien välityksellä saapuvat signaalit saadaan toimimaan tehokkaasti yhdessä. Multimodaaliset varoitukset pystyvät herättämään kuljettajan huomion haastavissakin olosuhteissa, niin kuin aiemmin mainitussa Biondin ja kumppaneiden (2017) tutkimuksessa saatiin selville, mutta tämä vaatii unimodaalisten varoitussignaalien esittämistä samasta spatioalisesta suunnasta. Mikäli varoitussignaalit tulevat eri suunnista, voi tämä huonontaa multimodaalisten varoitusten etua vetää kuljettajan huomion itseensä. (Baldwin ja muut, 2012) Wang ja kumppanit (2022) esittävät artikkelissaan käsitteen *multimodaalinen yhteensopimattomuus* (multimodal mismatch), jolla viitataan siihen, että unimodaaliset varoitukset eivät ole yhteneväisiä keskenään, mikä voi johtaa multimodaalisten varoitusten tehokkuuden huonontumiseen ja konflikteihin käyttäjän tiedonkäsittelyssä.

6 Tulosten yhteenveto ja pohdinta

Kirjallisuuskatsaus osoitti visuaalisella, auditiivisella sekä haptisella aistimodaliteetilla olevan omanlaisensa vahvuudet ja heikkoudet, minkä takia ne suoriutuvat eri tavoin erilaisissa ajotilanteissa kuljettajan varoittamisessa. Tässä luvussa kootaan yhteen kirjallisuuskatsauksen tuloksia sekä pohditaan ADAS-järjestelmän tulevaisuuden tutkimustyötä.

6.1 Yhteenveto

Aistimodaliteeteilla näyttäisi olevan ADAS-järjestelmässä eroja kuljettajan varoittamisessa, sillä kuljettajat käyttäytyvät eri tavoin riippuen siitä, minkä aistikanavan kautta varoitus välitetään. Taulukkoon 3 on koottu eri aistikanavien kautta välitettyjen varoitusten vahvuuksia sekä heikkouksia. Kuljettajilla on myös omat subjektiiviset mielipiteensä eri aistikanavien kautta välitetyistä varoituksista. Eri aistikanavien kautta pystytään välittämään kuljettajalle erityyppistä tietoa, minkä vuoksi visuaalisilla, auditiivisilla ja haptisilla varoituksilla on omat vahvuudet ja heikkoudet. Mikään aistimodaliteetti ei siis ole yleisesti muita aistimodaliteetteja tehokkaampi, vaan modaliteetteja voidaan vertailla ennemminkin ajotilanteiden perusteella.

Taulukko 3. Yhteenveto eri aistimodaliteettien kautta välitettyjen varoitusten ominaisuuksista.

Varoituksen aistimodaliteetti	Vahvuudet	Heikkoudet
visuaalinen	pysyvyys, monimutkaisen tiedon esittäminen, hyvä ymmärrettävyys, kuljettajien hyväksyntä	lisää kuormitusta näköaistille, eivät saa aikaan yhtä nopeita reaktioita kuin auditiiiviset tai haptiset varoitukset
auditiiivinen	kuljettajan nopea reagoiminen, kuuloaisti ei niin kuormittuneena ajamisen aikana	häipyvä, kuljettajan ärsyyntyminen, huono kyky esittää monimutkaista tietoa
haptinen	kuljettajan nopea reagoiminen, hyvä kyky ohjata oikeisiin liikkeisiin, ei häiritse muita matkustajia, tuntoaisti ei niin kuormittuneena ajamisen aikana	häipyvä, kuljettajan ärsyyntyminen, huono kyky esittää monimutkaista tietoa

Visuaaliset varoitukset suoriutuvat hyvin monimutkaisen ja tarkan tiedon esittämisessä kuljettajalle niin, että kuljettajan on helppo ymmärtää visuaalisen tiedon merkitys ja yhdistää annettu varoitus ympäristöön. Visuaalisten varoitusten käytön huonona puolelta on puolestaan se, että näköaistia käytetään jo paljon ajosuorituksen aikana, minkä takia näköaistia uhkaa ylikuormittuminen, mikäli näköaistia täytyy hyödyntää myös varoitusten havainnoimiseen. Tämän vuoksi visuaaliset varoitukset tulisi suunnitella huolellisesti, sillä monimutkaisina ne voivat johtaa siihen, että kuljettajan pitää tulkita niitä pidemmän aikaa, jolloin kuljettajan katse on myös kauemmin pois tiestä.

Kuuloaistia käytetään ajamisen aikana vähemmän kuin näköaistia ja tästä syystä auditiiiviset varoitukset tarjoavat vaihtoehdoisen kanavan varoitusten välittämiseksi. Tutkimustulokset osoittivat, että auditiiiviset varoitukset kykenivät saamaan aikaan nopeita reaktioaikoja, sillä auditiiiviset varoitukset pystyivät tehokkaasti kiinnittämään kuljettajan huomion oikeisiin asioihin. Auditiiivisten varoitusten tehokkuutta selittää niiden tuottama ääniärsyke, joka suoriutuu hyvin kuljettajan huomion herättämisessä.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella auditiiivisilla ja haptisilla varoituksilla vaikuttaisi olevan samantyyppisiä ominaisuuksia. Auditiiivisten varoitusten tavoin haptiset varoitukset pystyivät tuottamaan hyviä reaktioaikoja verrattuna visuaalisiin varoituksiin, mikä selittyy haptisten varoitusten kyvyllä ohjata kuljettajan elimistöä tehokkaasti oikeaan liikkeeseen. Haptiset varoitukset eivät pysty välittämään kuljettajalle kuitenkaan niin monimutkaista tietoa kuin visuaaliset varoitukset, mikä voidaan nähdä niiden heikkoutena. Auditiiivisilla varoituksilla voidaan esittää tarkempaa tietoa kuin haptisilla esimerkiksi puheen avulla, mutta ongelmaksi voi tällöin muodostua se, että kuljettaja ei pysty palaa-

maan auditiivisiin varoituksiin ja tarkistamaan varoitusta. Toisaalta kuljettajat voivat kokea äänen tai värähtelyn myös liian häiritseväksi tai ärsyttäväksi, mikä laskee varoituksen miellyttävyyttä.

Yhtenä asiana varoitusten suunnittelussa tulisi huomioida erilaisten varoitusten soveltuminen erilaisiin ajotilanteisiin. Esimerkiksi tilanteissa, joissa vaaditaan kuljettajalta nopeaa reagoimista, voitaisiin käyttää auditiivisia tai haptisia varoituksia, kun tiedetään, että ne saavat kuljettajan reagoimaan nopeammin verrattuna visuaalisiin varoituksiin. Lisäksi jokaisen aistimodaliteetin kohdalla voidaan pohtia sitä, miten tietoa tulisi välittää kuljettajalle niin, että varoitukset ovat mahdollisimman tehokkaita ja miellyttäviä. Visuaalisen aistimodaliteetin kohdalla varoitusten ei pitäisi olla liian monimutkaisia, kun taas auditiivisen aistimodaliteetin osalta varoitukset voivat aiheuttaa kuljettajassa ärsyyntymistä, mikä voi johtaa kuljettajan ajosuorituksen häiriintymiseen.

Kirjallisuuskatsaus sisälsi lisäksi multimodaalisten varoitusten tarkastelua, ja eri aistimodaliteettien kautta saapuvien varoitusten yhdistäminen yhdeksi varoitukseksi on osoittautunut monissa tutkimuksissa paremmaksi vaihtoehdoksi kuin varoituksen välittäminen yhden aistikanavan kautta. Syitä multimodaalisten varoitusten paremmalle tehokkuudelle ovat kuormituksen jakaminen eri aistikanaville sekä niiden kokeminen kiireellisimmiksi ja luotettavimmiksi. Multimodaaliset varoitukset ovat tehokkaita kiinnittämään kuljettajan huomion ja toimimaan tehokkaasti myös silloin, kun kuljettaja on samaan aikaan ajamisen aikana suorittamassa jotain muuta kognitiivista tehtävää.

Taulukossa 4 on koottu yhteen sellaiset tutkimuslähteet, joissa suoritettiin jokin tutkimus sekä näiden tutkimusten tutkimusasetelmia ja tuloksia. Tutkimusten kohdalla taulukossa on tummemman sinisellä taustalla merkitty varoitus tai varoitukset, jotka suoriutuivat kuljettajan varoittamisessa parhaiten, ja vaaleammalla taustavärillä varoitukset, joista ei lähteissä mainittu kumpi olisi tehokkaampi.

Taulukko 4. Yhteenveto lähdekirjallisuuden tutkimuksista sekä varoitusten suoriutumista niissä.

Lähde	Varoitus 1	Varoitus 2	Varoitus 3	Muuttujat testitilanteissa	Varoituksen tyyppi
Biondi ja muut (2017)	auditiivinen	haptinen	auditiivinen haptinen	puhelimeen puhuminen, liikennetiheys	etutörmäysvaroitusta
Burke ja muut (2006)	visuaalinen	visuaalinen auditiivinen	visuaalinen haptinen	tehtävän taso, tehtävän tyyppi, kuormittavuus	-
De Rosario ja muut (2010)	visuaalinen	haptinen	-	haptisen varoituksen amplitudi ja taajuus	etutörmäysvaroitusta
Ho ja muut (2007)	auditiivinen	haptinen	auditiivinen haptinen	radio-ohjelma, edellä ajavan jarruvalot	etu- ja takatörmäysvaroitusta
Maag ja muut (2015)	visuaalinen	haptinen	-	uhan tyyppi, uhan liike, uhan sivuttaisuuntainen sijainti, uhan suunta	neuvoa-antavat varoitusjärjestelmät (uhasta varoittaminen)
Wang ja muut (2020)	visuaalinen	auditiivinen	-	ajotilanteet: tienkäyttäjien määrä ja tyyppi, kriittisyys	neuvoa antavat liikennetietojärjestelmät (uhasta varoittaminen)
Wang ja muut (2022)	visuaalinen	auditiivinen	visuaalinen auditiivinen	varoitusten kytkennät, ajotilanne	etutörmäysvaroitusta

6.2 Pohdinta

Koska multimodaaliset varoitukset ovat osoittaneet paremman kyvykkyyden kuljettajan varoittamisessa kuin unimodaaliset varoitukset, niiden tutkimisen jatkaminen tulevaisuudessa on tarpeellista (Burke ja muut, 2006). Tutkimuskohteina voisivat olla esimerkiksi tässä tutkielmassakin tarkasteltu kuvakkeiden käyttö varoituksissa sekä multimodaalisten varoitusten signaalien yhteneväisyys, kun tiedetään, että ne ovat tekijöitä, joilla on vaikutusta multimodaalisten varoitusten tehokkuuteen. Multimodaalisten varoitusten yhteydessä voitaisiin pohtia myös siitä, mitä aistimodalityetteja tulisi yhdistää, sillä eri aistimodalityettien yhdistelmät suoriutuvat eri lailla erilaisissa ajotilanteissa (Burke ja muut, 2006).

Todelliset ajotilanteet voivat kuitenkin olla monimutkaisia, mikä vaikeuttaa varoitusten valikoimista tilanteeseen sopivaksi. Varoitusten testaaminen monimutkaisemmissa ajotilanteissa onkin mahdollinen suunta ADAS-järjestelmän tutkimiseen tulevaisuudessa

(Wang ja muut, 2020). Myös ajotilanteiden muuttuminen liikenteessä asettaa omanlaisensa haasteet varoitusten suunnittelemiseen. Biondi ja kumppanit (2017) esittelevät *muokautuvan varoituksen* (adaptive warning) käsitteen, jolla viitataan varoituksiin, joiden ominaisuudet muuttuvat ajotilanteeseen sopivaksi esimerkiksi sen perusteella, minkä tyyppinen uhka on. Kyseiset varoitukset voisivat olla mahdollinen ratkaisu varoitusten miellyttävyyden sekä tehokkuuden lisäämiseen tulevaisuudessa.

Kaikki tämän tutkielman tarkastelussa olleet tutkimukset (taulukko 4) toteutettiin ajosimulaattorissa, joten tutkimustulosten arvioimisessa olisi tarpeen ottaa huomioon, että tulokset eivät välttämättä päde todellisiin ajotilanteisiin liikenteessä. Tästä syystä kirjallisuuskatsauksen tuloksia tulisikin arvioida kriittisesti ennen kun niitä sovelletaan esimerkiksi ADAS-järjestelmän kehittämiseen. Jo Burke ja kumppanit (2006) nostivat esiin, että tulevaisuudessa tutkimusta olisi hyvä toteuttaa enemmän myös todellisissa liikennetilanteissa tai tilanteissa, jotka ovat mahdollisimman lähellä todellisia liikennetilanteita, jotta voitaisiin saada realistisempaa dataa erilaisten varoitusten toimivuudesta. Kun tutkimusdata on realistisempaa ja monipuolisempaa, myös ADAS-järjestelmän kehitys hyötyy tutkimustyöstä enemmän.

Esimerkiksi Orlovskan ja kumppanit (2020) saivat kenttätutkimuksessaan selville, että ADAS-järjestelmän suorituskyky, kuljettajan käyttäytyminen sekä ajokonteksti linkittyvät toisiinsa. Tutkimustulokset osoittivat muun muassa sen, että ADAS-järjestelmän toiminnalla on vaikutusta siihen, hyväksyykö kuljettaja järjestelmän toiminnan ja haluaako hän käyttää sitä. Mikäli ADAS-järjestelmä ei käyttäydy kuljettajan haluamalla tavalla, seurauksena voi olla ADAS-järjestelmän käskyjen ohittaminen tai järjestelmän kytkeminen pois päältä. Orlovskan ja kumppaneiden (2020) tutkimus on kuitenkin rajattu pois tästä tutkielmasta, sillä tutkimuksessa on eri tarkastelutaso.

Realistisempaa tutkimusdataa saataisiin myös tutkimalla enemmän erilaisten kuljettajien reaktioita ADAS-järjestelmän erityyppisiin varoituksiin. Lähdekirjallisuuden tutkimuksissa tarkasteltiin henkilöitä, joiden aistit toimivat normaalisti, ja he olivat myös suhteellisen nuoria. Tämän vuoksi olisi tarpeen huomioida myös se, että kirjallisuuskatsauksen tulokset eivät välttämättä ole verrattavissa kaikkien kuljettajien reaktioihin tutkimuksen koetilanteita vastaavissa tilanteissa. Esimerkiksi joillain kuljettajilla saattaa olla rajoitteita, joiden vuoksi reagoiminen eri aistien kautta tulevaan tietoon voi erota merkittävästi siitä, miten henkilö, jolla aistit toimivat normaalisti, reagoi kyseisiin varoituksiin. Tulevaisuudessa olisi siksi hyvä pohtia, miten suunnitella varoitukset niin, että ne ovat tehokkaita kaikenlaisille kuljettajille.

6.3 Lopuksi

Valitsin tutkielman tarkastelunäkökulmaksi kuljettajan näkökulman, sillä kuljettajan käyttäytyminen ja psykologiset prosessit täytyy ottaa huomioon ADAS-järjestelmää tar-

kastellessa ja tutkittaessa. ADAS-järjestelmässä on jo nyt monia turvallisuutta ja mukavuutta lisääviä ominaisuuksia, mutta niiden suunnitteleminen ja kehittäminen ei ole yksinkertaista. Kirjallisuuskatsaus nosti esille aistimodaliteetin sekä ajotilanteiden vaikutuksen varoitusten tehokkuuteen, mutta itse ajotilanteet sisältävät monia muuttuvia tekijöitä, ja myös varoituksilla on muita ominaisuuksia, jotka pitää ottaa huomioon ADAS-järjestelmän varoitusten suunnittelemisessa.

Lähdeluettelo

- Baldwin, C. L., Spence, C., Bliss, J. P., Brill, J. C., Wogalter, M. S., Mayhorn, C. B., & Ferris, T. K. (2012). Multimodal cueing: The relative benefits of the auditory, visual, and tactile channels in complex environments. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 56(1), 1431–1435. <https://doi.org/10.1177/1071181312561404>
- Belmonte, F. J., Martin, S., Sancristobal, E., Ruiperez-Valiente, J. A., & Castro, M. (2021). Overview of embedded systems to build reliable and safe ADAS and AD Systems. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 13(4), 239–250. <https://doi.org/10.1109/MITS.2019.2953543>
- Bertoldi, E. & Filgueiras, L. (2010). Multimodal Advanced Driver Assistance Systems: an overview. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Multimodal Interfaces for Automotive Applications*, 2–5. <https://doi.org/10.1145/2002368.2002370>
- Biondi, F., Strayer, D. L., Rossi, R., Gastaldi, M., & Mulatti, C. (2017). Advanced Driver Assistance Systems: Using multimodal redundant warnings to enhance road safety. *Applied Ergonomics*, 58, 238–244. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.06.016>
- Burke, J., Prewett, M., Gray, A., Yang, L., Stilson, F., Coovert, M., Elliot, L., & Redden, E. (2006). Comparing the effects of visual-auditory and visual-tactile feedback on user performance: A meta-analysis. *Proceedings of the 8th International Conference on Multimodal Interfaces*, 108–117. <https://doi.org/10.1145/1180995.1181017>
- De Rosario, H., Louredo, M., Díaz, I., Soler, A., Gil, J. J., Solaz, J. S., & Jornet, J. (2010). Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic pedal. *Transportation Research. Part F, Traffic Psychology and Behaviour*, 13(2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2009.11.003>
- Fecher, N. & Hoffmann, J. (2015). Driver warning elements. In Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., & Singer, C. (eds). *Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort* (pp. 857–870). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12352-3_37
- Ho, C., Reed, N., & Spence, C. (2007). Multisensory in-car warning signals for collision avoidance. *Human Factors*, 49(6), 1107–1114. <https://doi.org/10.1518/001872007X249965>
- Jayan, K. & Muruganatham, B. (2020). Advanced Driver Assistance System technologies and its challenges toward the development of autonomous vehicle. In Dash, S.S., Das, S., and Panigrahi, B.K. (eds). *Intelligent Computing and*

- Applications.*-(Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1172, pp. 55–72). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5566-4_6
- Maag, C., Schneider, N., Lübbecke, T., Weisswange, T. H., & Goerick, C. (2015). Car Gestures – advisory warning using additional steering wheel angles. *Accident Analysis and Prevention*, 83, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2015.07.020>
- Orlovska, J., Novakazi, F., Lars-Ola, B., Karlsson, M., Wickman, C., & Söderberg, R. (2020). Effects of the driving context on the usage of Automated Driver Assistance Systems (ADAS) -naturalistic driving study for ADAS evaluation. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 4, 100093–. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100093>
- Riener, A. (2010). *Sensor-Actuator Supported Implicit Interaction in Driver Assistance Systems* (1st ed. 2010.). Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9777-0>
- Taloustaito. (2019). *Uuden auton avustimen raju reaktio voi johtaa kolariin.* <https://www.taloustaito.fi/vapaalla/uuden-auton-avustimen-raju-reaktio-voi-johtaa-kolariin/#54f8d939> (Haettu 1.5.2022)
- Wang, M., Liao, Y., Lyckvi, S. L., & Chen, F. (2020). How drivers respond to visual vs. auditory information in advisory traffic information systems. *Behaviour & Information Technology*, 39(12), 1308–1319. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2019.1667439>
- Wang, Y., Wu, B., Ma, S., Wang, D., Gan, T., Liu, H., & Yang, Z. (2022). Effect of mapping characteristic on audiovisual warning: Evidence from a simulated driving study. *Applied Ergonomics*, 99, 103638–103638. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103638>
- Weller, G., & Schlag, B. (2015). Behavioral aspects of Driver Assistance Systems. In Winner, H., Hakuli, S., Lotz, F., & Singer, C. (eds). *Handbook of Driver Assistance Systems: Basic Information, Components and Systems for Active Safety and Comfort* (pp. 91–107). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12352-3_5