

Petri Leppäranta

# ÄLYLIIKENTEEN VAIKUTUS TIERAKENTEISIIN

Kandidaatintyö  
Rakennetun ympäristön tiedekunta  
Tarkastaja: Pauli Kolisoja  
Kesäkuu 2020

# Tiivistelmä

Petri Leppäranta: Älyliikenteen vaikutus tierakenteisiin  
Tampereen yliopisto  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintyö  
Toukokuu 2020

---

Älyliikenne tarkoittaa tietotekniikan integroitumista infrastruktuuriin johtaen kulkuvälineiden, liikenteenohjausjärjestelmien ja kulkuväylien väliseen kommunikointiin. Älyliikenne on liikenneinfrastruktuurin sisällä suuri kasvava trendi, joka on jo nyt vakioinut rooliansa liikenteessä erilaisten ajoa helpottavien järjestelmien avulla, minkä lisäksi lähiaikoina on saatu valmiiksi ensimmäisiä prototyyppisiä tulevaisuuden täysin itseohjautuvista ajoneuvoista. Tämän seurauksista pienemmälle huomiolle on jäänyt liikenteen muutoksen vaikutus tierakenteisiin, minkä takia tämän työn tavoitteena oli tutkia asiaa. Älyliikenteen vaikutusta tienrakenteisiin lähdettiin tutkimaan ensin selvittämällä älyliikenteen ominaisuuksia, minkä jälkeen tutkitaan mahdollisia vaurioita, mitkä lopulta yhdistetään johtopäätöksiksi tapahtuvista muutoksista. Toinen tavoite työllä oli tutkia erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja mahdollisiin havaittuihin ongelmiin. Työ perustuu täysin kirjallisuustutkimukseen, johon käytettyinä aineistoina toimii aiheeseen liittyvät tutkimukset ja artikkelit.

Älyliikennettä käsittelevässä ensimmäisessä osiossa käytiin läpi sen ominaisuuksia, joista lopulta todettiin tierakenteille merkittäviksi muutoksiksi tietokoneen hallitsemat ajolinjat, joiden vaihtelu eri ajoneuvojen välillä on erittäin vähäistä. Ajolinjojen takaa nousevana ongelmana tuli esiin myös esimerkiksi raskaan liikenteen letka-ajossa ilmenevä hyvin lähellä toisiaan peräkkäin ajaminen. Tierakenteiden osuudessa todettiin liikennekuormituksen olevan vaikuttava tekijä lähes jokaisen vaurion syntyyn tai kehittymiseen. Näistä merkittävimmiksi erityisesti ajolinjoista johtuviksi vaurioiksi todettiin verkkohalkeilu ja urautuminen, jotka molemmat pahenivat huomattavasti ajolinjojen supistuessa.

Älyliikenteen ajolinjoista tehdyissä tutkimuksissa todetaan ajolinjojen tiivistyvän noin kolmanneksella nykyisestä tilanteesta, joka samojen tutkimusten mukaan johtaa liikennesäätöalasta seuraavien vaurioiden synnyn nopeutumiseen jopa kymmenillä prosentteilla. Suuri ero havaitaan verkkohalkeilujen ja urautumisien synnyssä, sillä molemmat vauriot kasvavat ja kehittyvät tiehen jatkuvan samaan pisteeseen kohdistuvan liikennesäätöalasta seuraavien vaurioiden synnyn nopeutumiseen jopa kymmenillä prosentteilla. Suuri ero havaitaan verkkohalkeilujen ja urautumisien synnyssä, sillä molemmat vauriot kasvavat ja kehittyvät tiehen jatkuvan samaan pisteeseen kohdistuvan liikennesäätöalasta seuraavien vaurioiden synnyn nopeutumiseen jopa kymmenillä prosentteilla. Erot ovat merkittäviä, ja tutkimusten mukaan vaikutukset alkavat näkymään jo pienen osan liikenteestä ollessa itseohjautuvaa. Merkittäväksi muuttujaksi todettiin raskasliikenne, sillä henkilöautoliikenne näkyy tienpinnassa ainoastaan nastarengaskulutusena.

Ongelmaan löytyy kuitenkin myös ratkaisuja, joista parhaaksi todettiin älyliikenteen ajolinjojen optimoiminen, mikä tarkoittaa tasavertaisesti koko kaistan leveyden hyödyntämistä. Alustavissa tutkimuksissa ajolinjojen optimoinnin seurauksena todetaan pääsevän jopa parempiin tuloksiin kuin nykytilanteessa, mikä tekee ratkaisusta erittäin kannattavan toteuttaa. Älyliikenne tuo ongelmia tierakenteille, mutta esimerkiksi ajolinjojen optimoinnilla tierakenteiden näkökulmasta älyliikenteeseen siirtyminen ei tule olemaan ongelma.

Avainsanat: Älyliikenne, autonominen ajaminen, ajolinjat, urautuminen, verkkohalkeilu, ajolinjojen optimoiminen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. ÄLYLIIKENNE .....	3
2.1    Automatisoitu ajaminen .....	3
2.1.1 Automaattinen ajoneuvo .....	5
2.1.2 Autonominen ajoneuvo .....	5
2.2    Automaatio raskaassa liikenteessä .....	6
2.3    Älyliikenne Suomessa .....	7
2.4    Älyliikenteen tulevaisuus .....	8
3. TIERAKENTEIDEN VAURIOITUMINEN .....	9
3.1    Kuormituskäyttäytyminen .....	10
3.1.1 Palautuva muodonmuutoskäyttäytyminen .....	11
3.1.2 Pysyvä muodonmuutoskäyttäytyminen .....	12
3.2    Vaurioitumistyytit .....	12
3.2.1 Halkeamat .....	12
3.2.2 Epätasaisuus .....	15
3.2.3 Hajoamisvauriot .....	16
4. ÄLYLIIKENTEEN AIHEUTTAMAT RASITUKSET .....	17
4.1    Älyliikenteen aiheuttamat kuormitukset .....	17
4.1.1 Henkilöauto liikenteen aiheuttamat rasitukset .....	19
4.1.2 Raskaan liikenteen aiheuttamat rasitukset .....	20
4.2    Seuraukset .....	20
5. RATKAISUVAIHTOEHTOJA .....	22
5.1    Ajolinjojen hallinta .....	23
5.2    Muut ratkaisut .....	25
5.3    Ratkaisujen yhteenveto .....	26
6. YHTEENVETO .....	27
LÄHTEET .....	29

# 1. JOHDANTO

Liikenne ja liikkumismuodot ovat aina muuttumassa ja kehittymässä alan valtavan kysynnän ja kilpailun takia. Tällä hetkellä suosittuna trendinä liikenteessä muiden vastavien alojen tapaan on koneistuminen, mikä näkyy ihmisten roolin vähentymisenä auton ohjaamisessa ja päätöksenteossa. Trendin suosio perustuu ihmisen ajokokemuksen helpottamiseen ja mukavoittamiseen, ja sen menestyksen seurauksena suuri osa autonvalmistajasta ja oheistuotteiden tuottajista käyttää valtavia määriä rahaa tuotteidensa kehittämiseen vielä itsenäisemmiksi. Ohjaamista ja päätöksentekoa helpottavia laitteita sisältäviä kulkuneuvoja ja muita infrastruktuurin osia kutsutaan älyliikenteeksi. Älyliikenteeseen liittyy valtavasti hyviä puolia, mutta myös haasteita ja ongelmia, joista yhteen tutustutaan enemmän tässä työssä.

Tutkimuksen aihe on älyliikenteen vaikutus tierakenteisiin kohdistuvaan rasitukseen, eli kuinka älyliikenteen suosion jatkuva kasvaminen tulee vaikuttamaan teihin kohdistuvaan kuormitukseen. Aihe liittyy älyliikenteen ominaisuuteen, jossa ajoneuvot liikkuvat tietokoneohjauksella, eli itseohjautuvasti liikenteessä. Tämä johtaa siihen, että ajolinjoista jää puuttumaan ihmiskuskien tuoma inhimillinen vaihtelu, minkä seurauksena yhä useampi ajoneuvo tulee ajamaan samoja uria pitkin. Tämän seurauksena tierakenteet tulevat rasittumaan hyvin paikoittaisesti, mikä tulee tuottamaan haasteita ajoteille nykyisine tierakenteineen.

Pääaiheena tutkimuksessa on tutkia, kuinka merkittäviä rasitusvaikutuksia älyliikenne tulee luomaan tierakenteille erityisesti raskaan liikenteen näkökulmasta. Myös henkilöauto liikennettä tullaan käsittelemään lyhyesti työn ohessa, mutta sen aiheuttamat rasitukset eivät ole yhtä merkittäviä raskaaseen liikenteeseen verrattuna. Lisäksi tutkimukseen kuuluu tutkia mahdollisia tilannetta kehittäviä tai korjaavia toimenpiteitä valmiina ratkaisuina tai pohdintana. Työn tavoitteena on luoda oletetusta ongelmasta selkeä kuva, ja pyrkiä löytämään sille kelvollinen ratkaisu ennaltaehkäisemään suurempia vaurioita.

Tutkimuskysymyksenä, johon työ pyrkii vastaamaan, on ”Kuinka älyliikenne tulee muuttamaan tierakenteisiin kohdistuvia rasituksia?”. Alakysymyksinä aiheelle on yleisesti ”Mitä on älyliikenne?”, ”Millaisia vaurioita samaa uraa ajaminen aiheuttaa tielle?” ja ”Miten ongelma olisi mahdollista ratkaista?”. Alakysymykset antavat pääpiirteisen kuvan

myös tutkimuksen rakenteesta, jossa pyritään osio kerrallaan vastaamaan jokaiseen kysymykseen yllä olevassa järjestyksessä.

Työn alussa käsitellään älyliikenteen käsitettä tarkemmin selittäen sen tarkoitusta, sisältöä ja miksi se on olennaista teiden rasiuksissa. Tämän jälkeen tutustaan teiden rasiuksen aiheuttamiin eri vaurioitumistapoihin, joiden avulla voidaan todeta, millaisia vaurioita älyliikenne tulee lisäämään erityisesti. Älyliikenteen ominaisuuksiin ja teiden vaurioitumisiin tutustumisen jälkeen aiheet yhdistetään, ja niistä voidaan tehdä johtopäätöksiä seurauksista. Lopussa käydään vielä läpi mahdollisia korjaustoimenpiteitä, joiden avulla ongelma voitaisiin ratkaista.

Tutkimusaihe on rajattu käsittelemään tarkasti vain suoraan aiheeseen liittyviä asioita. Älyliikenne on käsitteenä melko laaja, mutta kokonaisuudessaan se käydään läpi vain lyhyesti, sillä tässä tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita vain itseohjautuvuus ominaisuudesta. Tierakenteiden vauriot ovat toinen iso osa-alue, johon kuuluu paljon erilaisia asioita, mutta tutkimuksessa luonnollisesti perehdytään tarkemmin vain vaurioihin, jotka aiheutuvat samaa ajouraa ajavien ajoneuvojen rasiuksesta. Kolmantena rajauksena toimii maantieteellinen rajaus vain Suomen alueelle, minkä vuoksi seurauksia pohditaan vai suomalaisten tierakenteiden näkökulmasta.

Tutkimus suoritetaan aineistopohjaisesti, eli tekstistä löytyvä tieto perustuu valmiiseen kirjallisuuteen, aineistoihin ja tutkimuksiin. Suurin osa aiheesta löytyvästä aineistosta on melko uutta, joten pääpainona lähteinä ovat tutkimukset ja artikkelit, joiden lisäksi myös kansainvälisiin aineistoihin perehdytään tarvittavan tiedon saamiseksi.

Älyliikenteen ollessa kohtalaisen tuore käsite ja käytön ollessa vielä nykypäivänä lähinnä kokeiluasteella aiheesta ei suoraan löydy älyliikenteen näkökulmasta paljoa valmista tutkimustietoa. Älyliikenteen aikakauden lähestyessä, ja itseohjautuvien autojen ollessa nykypäivänä jo lähes liikennevalmiita, tämä aihe on lähitulevaisuudessa erittäin ajankohdainen, ja sen merkitys tulee vain kasvamaan ajan kuluessa. Vaikka valmiita tutkimuksia älyliikenteen näkökulmasta ei juurikaan ole tehty, aiheeseen liittyen löytyy silti valmista tutkimusaineistoa. Esimerkiksi tierakenteisiin kohdistuvia rasiusvaikutuksia peräkkäin ajavilla ajoneuvoilla on tutkittu, ja todettu muutosten olevan merkittäviä autojen ajaessa samoja uria pitkin. Joten vaikka aiheet ei ole älyliikenteen puolesta paljoa tutkittu, niin kaikki olennainen tutkimusaineisto on löydettävissä valmiina.

## 2. ÄLYLIIKENNE

Älyliikenne, josta käytetään yleisesti myös nimeä älykäs liikenne, on laaja käsite, joka sisältää suuren määrän erilaisia liikenteeseen ja liikkumiseen liittyviä ominaisuuksia. Lyhyesti tiivistettynä älyliikenne on tieto- ja viestintäteknologian hyödyntämistä liikennejärjestelmissä (Pursiainen 2009). Käytännössä tämä tarkoittaa tieto- ja viestintäteknologian eri palveluiden integroitumista liikennejärjestelmiin ja kulkuneuvoihin muodostaen yhden yhtenäisen kokonaisuuden (Aho et al. 2017). Yksinkertaisena esimerkkinä älyliikenteestä toimii muun muassa kulkuneuvoon liitetty karttapalvelu.

Päätarkoituksena älyliikenteessä on muokata ja kehittää ihmisten liikkumista tekemällä siitä tuottavampaa, turvallisempaa, sujuvampaa, tehokkaampaa ja ympäristöystävällisempää. Älyliikenteessä keskittyminen siis siirretään infrastruktuurista ja tieverkoista matkaketjuihin ja niiden suorittamiseen. (Pursiainen 2009) Tämä tulee tehostamaan yksityisten autoilijoiden elämää huomattavasti, mutta erityisesti tavarankuljetukselle ja raskaalle liikenteelle kyseinen kehityssuunta voi tuoda valtavia hyötyjä sekä taloudellisesti että muillakin osa-alueilla.

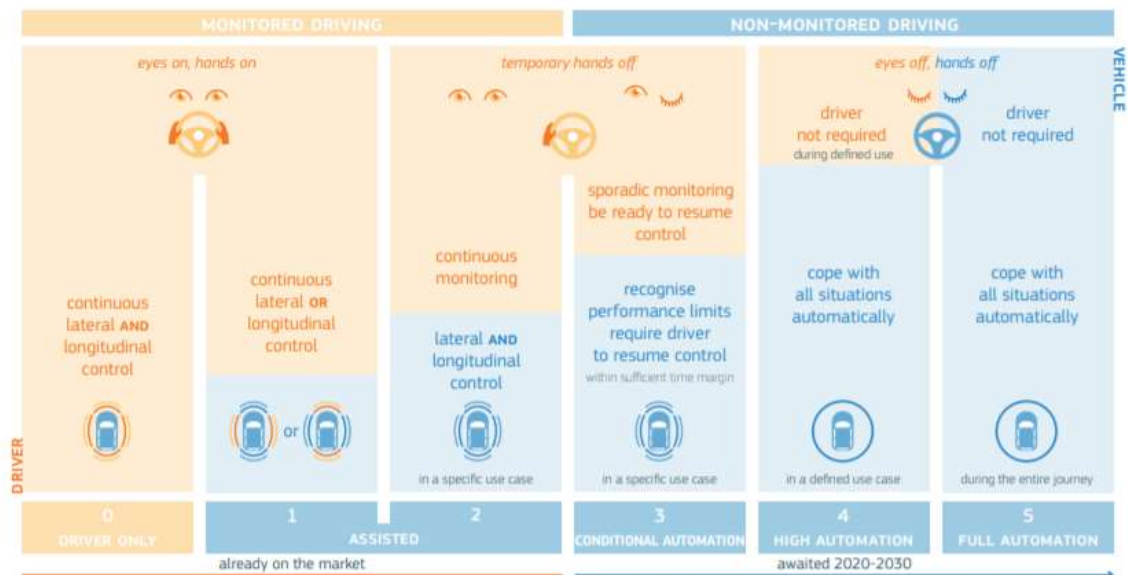
Tieto- ja viestintäteknologian liittämällä kulkuvälineisiin ja liikennejärjestelmiin pyritään pääsemään yllä mainitun kaltaisiin tavoitteisiin siirtämällä yhä useampia toimintoja ihmiseltä tietokoneelle. Koneiden tekemät ratkaisut ovat sujuvampia ja tehokkaampia kuin ihmisten, mikä kehittää liikkumisen tehokkuutta ja antaa resursseja ihmiselle käyttää aikaansa ja keskittymistään tärkeämpiin asioihin. Älyliikenteen merkittävimmät ominaisuudet ovat karttapalvelut, paikannuspalvelut ja kommunikointi muiden kulkuneuvojen ja liikennejärjestelmien kanssa. (Arola & Antikainen 2017) Näiden kolmen avulla ja niitä kehittämällä lähestytään lopullista ratkaisua eli autonomista autoa, jossa kuljettajan ainoa tehtävä on päättää määränpää.

### 2.1 Automatisoitu ajaminen

Automatisoidulla ajamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa auto hoitaa ainakin osittain joidakin ajamisen osa-alueita kuljettajan puolesta (Arola & Antikainen 2017). Tämä on älyliikenteelle merkittävä osa-alue, jota kehitetään koko ajan, minkä lisäksi itseohjautuva ajaminen on myös tämän työn kannalta merkitsevin älyliikenteen ominaisuus. Tällä hetkelle automatisoidun ajamisen kehittäminen on yksi alan suurimmista trendeistä, johon sekä julkinen sektori että suuret autonvalmistaja- ja teknologiayritykset investoivat suuria määriä rahaa (Joint Research Center 2019).

Autojen automatisointi on jakautunut pitkälti kahteen eri lähestymissuuntaan, joista toinen on esimerkiksi Teslan suosima kameroilla ja tutkilla tapahtuva ympäristön seuraaminen. Tässä tapauksessa ympäristöä kartoitetaan ja vaaratilanteilta pyritään välttymään ympäri autoa tapahtuvalla jatkuvalla tutkien ja kameroiden toiminnalla. Toinen lähestymistapa automatisointiin on autojen verkostointi keskenään ja muun infrastruktuurin kanssa. Verkostoitumisteknologia ei yksistään mahdollista autonomisesti ajavaa autoa, mutta se mahdollistaa ajamiskokonaisuuden optimoimisen kommunikoimalla muiden laitteiden kanssa mahdollisista ruuhkista, huonoista olosuhteista ja yleisesti lähellä olevien ajoneuvojen sijainnista. Molemmissa malleissa on lisäksi mukana luonnollisesti paikannus- ja karttapalvelut kulkureittien optimoimiseksi. (Sorokin 2020) Nykypäivänä automaatiota on liikenteessä kulkevissa autoissa ajamista tukevin ominaisuuksina muun muassa kaistavahtina, nopeusvahtina ja automaattijarruna (Arola & Antikainen 2017).

Alla olevassa kuvassa 1 on esitelty amerikkalaisen standardointijärjestön Society of Automotive engineersin määrittelemät kuusi eri tasoa autojen automaatiolle (Joint Research Center 2019). Tasot alkavat tasosta 0, jossa automaatiota ei ole autossa ollenkaan ja päättyvät tasoon 5, jossa auto on täysin automaattinen eli autonominen auto (Arola & Antikainen 2017). Näistä tasoista 0–2 tason autoja on jo markkinoilla ja liikenteessä, 3 tason autot ovat hyvin lähellä normalisoitumista ja tason 5 ajoneuvotkin ovat jo prototyyppiasteella valmiina (Joint Research Center 2019).



**Kuva 1.** Automaattisten autojen SAE-standardointijärjestön kuusitasoinen luokittelu (Joint Research Center 2019, s. 19)

### 2.1.1 Automaattinen ajoneuvo

”Automaattiautolla tarkoitetaan ajoneuvoa, joka kykenee ainakin osin suoriutumaan ajosta ilman kuljettajaa.” (Arola & Antikainen 2017, s.5) Automaattiautoilla tarkoitetaan siis kaikkia kuvan 1 standarditasoille 1–4 sijoitettavia kulkuneuvoja. Lyhyesti automaatiotasojen 1 ja 2 ajoneuvot vaativat kuljettajan täyden huomion ajamiseen, mutta auto hoitaa itsenäisesti joitain ajamisen osa-alueita (Arola & Antikainen 2017). Tasoihin 1 ja 2 sijoittuvia avustavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi kaistavahti, pysäköintititka, nopeudensäätelyavustin ja hätäjarrutoiminto (Sorokin 2020). Automaatiotason 3 ajoneuvot seuraavat ympäristöään ja pystyvät paikoittain ajamaan kokonaan ilman ohjausta, mutta kuljettajan osa on silti edelleen merkittävä. Neljännen automaatiotason autot ovat jo hyvin automatisoituja, ja autot kykenevät hoitamaan itsenäisesti kaikki dynaamisen ajamisen osa-alueet. Viimeiseen tasoon verrattuna tason 4 autot tarvitsevat kuitenkin kuljettajan sisälleen, jonka pitää olla mahdollista ottaa paikoittaisesti auto hallintaansa. (Arola & Antikainen 2017)

Automaation kehittämisen tarkoituksena on älyliikenteen perusajatusten mukaisesti parantaa liikenteen sujuvuutta ja sitä kautta vähentää ajamisen aiheuttamia onnettomuuksia ja päästöjä. Tärkeimpiä muutoksia, joita automaatiolla pyritään kuitenkin tekemään, on lisätä liikenteen turvallisuutta. Tutkimusten mukaan, jopa noin 90% liikenneonnettomuuksista, johtuu kuljettajien inhimillisistä virheistä, minkä takia ohjaamisen siirtämisellä koneelle on merkittävät turvallisuusvaikutukset. Jo pelkästään kolmannen tai neljännen automaatiotason autoilla liikennekuolemien määrä voidaan saada arvioiden mukaan laskemaan jopa 40-80 prosenttia. (Arola & Antikainen 2017)

### 2.1.2 Autonominen ajoneuvo

Autonominen ajoneuvo on nimitys automaatiotason 5 ajoneuvoille, eli täysin automaattisille ajoneuvoille. Eli käytännössä tämä tarkoittaa autoa, joka voi lähteä liikenteeseen ilman kuljettajaa ja valmisteluja, ja selviytyä matkasta perille turvallisesti. (Arola & Antikainen 2017) Autonominen ajoneuvon tulee selvitä kaikista dynaamisen ajamisen osa-alueista kaikissa mahdollisissa olosuhteissa ja ympäristöissä (Sorokin 2020). Autonominen auto voi siis kutsua myös itseohjautuvaksi ajoneuvoksi tai robottiautoksi.

Käytännössä ero 4 automaatiotasoon tulee siitä, että autonominen ajoneuvon tulee pystyä reagoimaan turvallisesti kaikkiin liikenteessä kohdattaviin tilanteisiin ilman valmistautumista. Autonominen auton liikkuminen perustuukin yksin sen omien järjestelmien eli

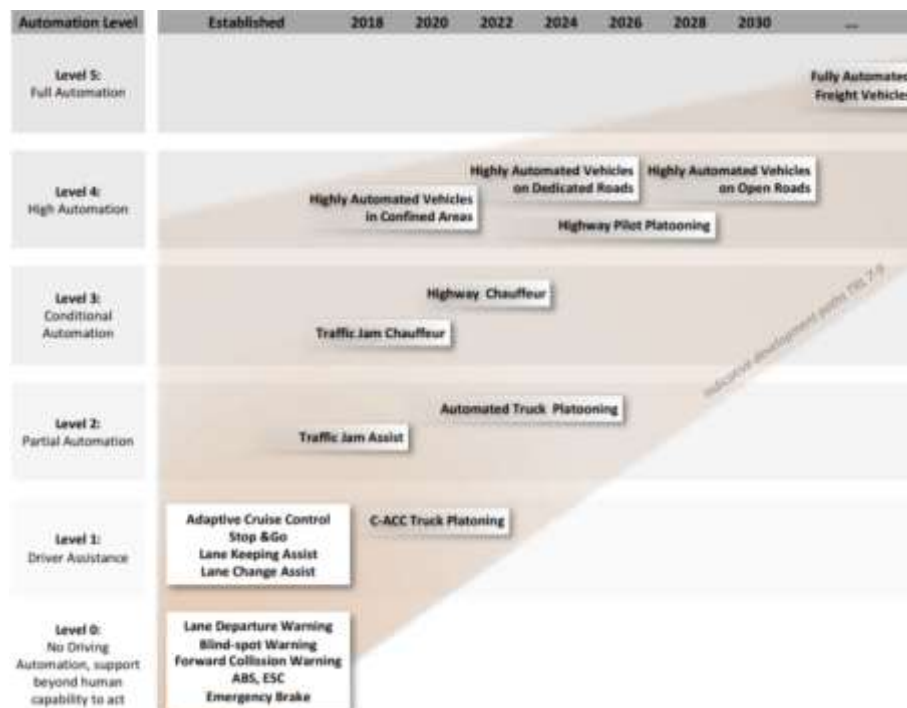


tutkien, anturoiden ja kameroiden antamaan informaatioon, joiden avulla se ohjaa ja suunnistaa kulkuneuvon tehokkainta reittiä turvallisesti perille. (Arola & Antikainen 2017).

## 2.2 Automaatio raskaassa liikenteessä

Raskaalla liikenteellä määritellään yleisesti ajoneuvoyhdistelmiä, kuorma-autoja ja linja-autoja, jotka kattavat Suomen pääväylien liikenteestä yli 10 prosenttia ja vilkkaimmilla väylillä vastaava arvo voi nousta jopa 30 prosenttiin. Linja-autojen osuus ajoista on kuitenkin pieni, joten käytännössä raskas liikenne tarkoittaa ajoneuvoyhdistelmiä ja kuorma-autoja. (Lehtonen 2009) Nämä ovat myös tämän työn kannalta olennaisimpia tutkittavia ajoneuvoja niiden raskauden takia. Erityisesti täyteen lastatut yhdistelmäajoneuvot ovat työn tulosten kannalta merkittäviä.

Raskaaseen liikenteeseen pätee samat automaatiotasot kuin henkilöautoliikenteeseen, ja tekniikoiltaan molemmat käyttävät samoja ajamista avustavia laitteita. Jo nykypäivänä rekkaliikenne käyttää esimerkiksi toistensa kanssa kommunikointia, nopeuden ja ajolinjan säätimiä, tutkia ja muita jo edellisessä osiossa mainittuja ominaisuuksia. Lisäksi muutamilla suljetuilla alueilla tapahtuvassa liikenteessä on jo otettu kokeiluun täysin itsestään ajavia rekkoja. (Graeter et al. 2017) Alla olevaan kuvaan 2 on hahmoteltu automaatiotasojen kehittymisen aikatauluja ja ominaisuuksia raskaalle liikenteelle.



**Kuva 2.** Raskaan liikenteen automaatiotasojen kehitys (Graeter et al. 2017, s.14)

Näiden yleisesti kaikissa automaattisissa autoissa olevien ominaisuuksien lisäksi ras-kaaseen liikenteeseen on kehitteillä merkittävä uusi ominaisuus, jota kutsutaan letka-ajoksi tai saattueajoksi. Tämä koskee liikenteessä kulkevia rekkoja, jotka letka-ajotilassa ajaisivat liikenteessä peräkkäin letkassa ensimmäisen rekan ohjauksessa. Tämä mah-dollistaa liikenteen sujuvuuden parantumisen, päästöjen vähentymisen, kaluston käytön tehokkuuden parantamisen ja kuljettajien lepuuttamisen ajon aikana. Tulevaisuudessa tavoitteena on, että kuljettajia ei tarvittaisi enää ollenkaan muissa kuin ensimmäisessä autossa, joka johdattaisi koko saattueen perille yksin. Viimeisessä vaiheessa kuljettajaa ei olisi enää edes ensimmäisessä autossa, vaan kaikki liikkuminen tapahtuisi autonomi-sesti. (Pöyskö et al. 2016)

Letka-ajo on vielä kehitysvaiheessa, ja sen toteuttamiseen liittyy useita ongelmia, joista ehdottomasti yksi on tämä työn aiheen mukainen, eli kuinka tierakenne kestää rekkalet-koja. Täydessä letka-ajossa useita painavia rekkoja kulkee hyvin pienessä ajassa jo-nossa saman tieleikkauksen läpi, mikä aiheuttaa erittäin suuren rasituksen tierakenteille, joiden kestokyvystä ei ole vielä tämänkaltaiselle kuormitukselle varmuutta. Huomioitavaa kuitenkin on, että ainakaan nykyisellään ei yli kahden rekan letkoja ole järkevää sijoittaa normaaliin liikenteeseen, vaan ne tarvitsisivat kokonaan omat kulkuväylät liikenteen su-juvuuden ylläpitämiseksi (Pöyskö et al. 2016).

### **2.3 Älyliikenne Suomessa**

Suomi on älyliikenteelle hyvin potentiaalinen maa pitkine etäisyyksineen ja kehittyneellä tietoverkolla ja sitä koskevalla lainsäädännöllä (Aho et al. 2017). Kattava ja kehittynyt tietoverkko ja sitä koskeva lainsäädäntö mahdollistavat älyliikenteen kokeilua, ja pitkät välimatkat ja kohtuullisen rauhalliset kulkuväylät luovat älyliikenteellä tarpeen ja helpot olosuhteet Suomeen. Näiden asioiden takia Suomi onkin älyliikennettä kehittävästä maista kärkipäässä, ja täällä on suoritettu useita aiheeseen liittyviä kokeiluja kuten robot-tibusseja kokeilukäytössä ja itseohjautuvien autojen selviytymistä talviolosuhteissa (Arola & Antikainen 2017).

Suomi tarjoaa kokonaisuudessaan hyvät mahdollisuudet älyliikenteelle tulevaisuudessa, jossa ainoana ongelma kohtina ovat vanhentuva tieverkko ja vaikeat sääolosuhteet. Li-säksi lainsäädäntö tarvitsee vielä uudistusta, jotta lopullinen täysi käyttöönotto voidaan toteuttaa, kun teknologia on kehittynyt tarvittavaan pisteeseen, mutta todennäköistä on, että Suomi tulee olemaan kehityksen etulinjassa. Tämän takia olisikin tärkeää, että Suo-men tieverkko ja infrastruktuuri olisi tarpeeksi kehittynyt muutokseen sen kestämiseksi.

## 2.4 Älyliikenteen tulevaisuus

Vaikka älyliikenne on jo nykypäivänä merkittävä osa liikennejärjestelmää, sen aikakausi on kuitenkin vasta alkamassa. Suuri osa älyliikenteen teknologiasta on vasta kehitys tai kokeiluvaiheessa, minkä seurauksena on mahdotonta arvioida milloin ja miten älyliikenne tulee lyömään itsensä lopullisesti läpi. Arvioiden mukaan kuitenkin jo 2020- luvulla automaattiset autot tulevat lopullisesti markkinoille ja 2050- luvulla merkittävä osa autokannasta olisi jo täysin autonomisia autoja. (Joint Research Center 2019) Nämä ovat kuitenkin vain arvioita ja vielä tällä hetkellä aikataulu on hyvin epävarma.

Kokonaisuudessa älyliikenteen tulevaisuuden trendit ovat kuitenkin infrastruktuurin kehittäminen, lainsäädännöllisten ongelmien ratkominen, innovoimien ja kokeilutoiminnan aktivoiminen (Arola & Antikainen 2017). Näiden ongelmien ratkettua, ja kehitystoiminnan saavutettua tietyn pisteen, älyliikenne saadaan vihdoin kokonaan käyttöön, mutta tähän tarvittava aika on yksi alan suurimmista kysymyksistä tällä hetkellä. Monien asiantuntijoiden ja valmistajien mukaan tämä aika on kuitenkin yllättävän lähellä.

### 3. TIERAKENTEIDEN VAURIOITUMINEN

Tierakenteen vaurioitumisella tarkoitetaan tierakenteelle tapahtuvaa pysyvää muutosta, joka heikentää sen toimivuutta ja käytettävyyttä. Tierakenteen käyttäytymiseen rasituksessa vaikuttaa sen ominaisuudet, kuormitukset ja olosuhteet. Vaurioituminen tapahtuu tierakenteisiin kohdistuvasta liiallisesta kuormituksia, joita aiheuttaa liikenne, ilmasto ja rakenteen oma paino. Todellisuudessa rasitukset tapahtuvat yleensä näiden yhdistelmänä ja keskenään ne vahvistavat toistensa vaikutuksia. (Belt et al. 2002)

Tierakenteisiin muodostuneet vauriot voidaan jakaa syntytapansa mukaisesti kahteen eri luokkaan, eli ympäristökuormituksista ja liikennekuormituksista syntyneisiin vaurioihin. Molemmissa tapauksissa syntymätavasta huolimatta vauriot voivat kuitenkin olla täysin samanlaisia. (Anttila 2019, Ehrola 1996 mukaan) Rakenteiden oman painon luoma kuormitus tulee merkittäväksi alusrakenteen laadun muuttuessa tai siirryttäessä pehmeikölle. (Belt et al. 2002) Käytännössä onnistuneella suunnittelulla ja valmistuksella rakenteiden oman painon ei tulisi tuottaa vaurioita tierakenteisiin, minkä takia lähtökohteisesti merkittävänä pidetään vain ympäristö- ja liikennekuormitusta.

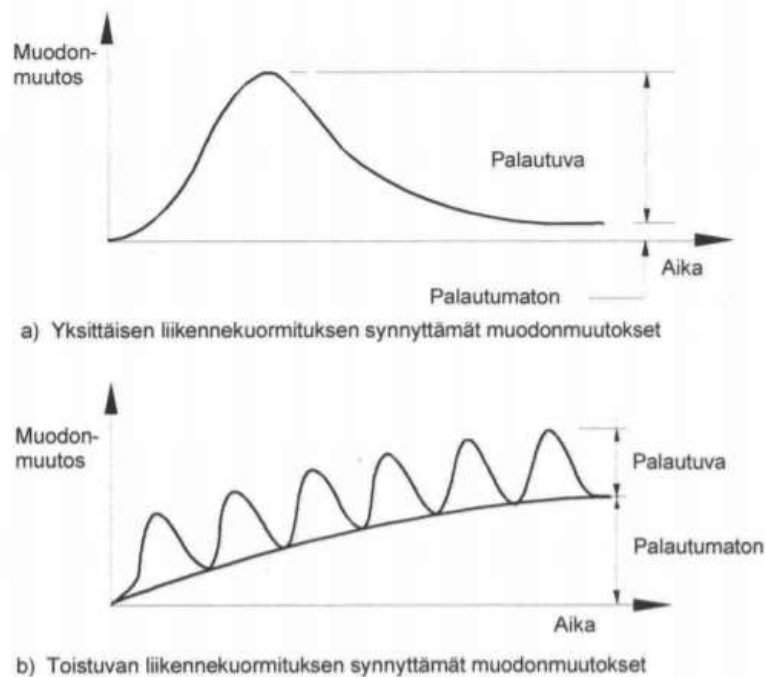
Liikennekuormitus on yleisesti luonteeltaan lyhytaikaista, vaihtelevaa ja toistuvaa. Liikenteestä johtuva kuormitus johtuu raskaiden ajoneuvojen luomasta painosta ja nastarenkaiden aiheuttamasta kulutuksesta. (Belt et al. 2002) Liikenteen aiheuttamat vauriot tierakenteille ovat perinteisesti verkkohalkeilu ja nastarenkaiden aiheuttamana urautuminen. Liikennekuormituksen aiheuttamaan vaurioitumiseen johtaa yleensä suunnittelussa liian pieneksi arvioitu liikennemäärä, tai suunnitellun kestämisajan päätyminen. (Anttila 2019, Ehrola 1996 mukaan)

Ympäristökuormitukset ovat luonteeltaan vaihtelevia, hitaita ja vuoden ajasta riippuvia. Tierakenteita kuormittavia ympäristön aiheuttamia olosuhteita on muun muassa lämpötila, kosteus ja routaolosuhteet. (Belt et al. 2002) Yleisimpiä ympäristökuormituksesta johtuvia vaurioita ovat routanousut, roudan sulamisesta johtuva rakenteiden kantavuuden aleneminen, lämpötilamuutosten aiheuttamat väsymyshalkeamat ja pakkashalkeamat. Ympäristökuormituksen aiheuttamat vauriot näkyvät tyypillisimmin siis halkeamina ja epätasaisuuksien lisääntymisillä. (Anttila 2019, Ehrola 1996 mukaan) Suomessa ympäristökuormitusten aiheuttamat vauriot kattavat merkittävän osan kaikista teiden vaurioitumisista.

### 3.1 Kuormituskäyttäytyminen

Tien kuormituskäyttäytymisellä tarkoitetaan tierakenteiden reagoimista kuormitukseen, eli vaurioiden tapahtumista ja kehittymistä. Kuormituskäyttäytymistä voidaan jakaa pitkän ja lyhyen aikavälin kuormitushistorian ja siitä johtuvan käyttäytymisen tutkimiseksi, mitä voidaan tutkia myös myöhemmin kerrottavaan tapaan, eli palautuvan ja pysyvän muodonmuutoksen käyttäytymisenä. Asiaa on tutkittu muun muassa Väyläviraston vuosina 2015–2018 tekemillä tutkimuksilla yli 76-tonnin HCT-yhdistelmien vaikutuksista tierakenteisiin (Vuorimies et al. 2018; Vuorimies et al. 2019).

Alla olevaan kuvaan 3 on havainnoitu liikennekuormituksen aiheuttaman muodonmuutuskäyttäytymisen olennaisin piirre, eli kuormituksesta aiheutuvan muodonmuutoksen palautuminen. Tärkeää tässä on, että palautuminen ei ole ikinä täydellistä, minkä takia muutokset ovat lopulta suuria, kuten kuvan 3 kuvaaja b esittää. Tierakenteisiin muodonmuutoksia aiheuttava liikennekuormitus koostuu lähes yksinomaan raskaasta liikenteestä, jonka kuormituksen suuruuteen vaikuttaa muun muassa akselipainosta, akselimäärästä, yhdistelmän kokonaispainosta, rengaspaineista, nopeudesta, renkaiden tyyppistä, jousituksesta, akselistosta, ajolinjoista ja muista tekijöistä johtuva dynaaminen kuormitus (Kurki 2019, Ehrola 1996 mukaan).



**Kuva 3.** Teiden kuormituskäyttäytyminen (Belt et al. 2002, Brown 1993 mukaan, s. 28)

Väyläviraston raskaan liikenteen aiheuttaman muodonmuutoksen tutkimuksissa todettiin liikennekuormituksen aiheuttamasta palautuvasta ja palautumattomasta muodonmuutoksesta seuraavia asioita. Tierakenteen laatu on merkittävä tekijä muodonmuutosten

suuruudessa, jonka lisäksi myös pohjamaan kantavuus vaikuttaa asiaan. Paksu päällyskerros ja kantava pohjamaa pitivät tierakenteiden muodonmuutuskäyttäytymisen odotetun laisena, kun taas ohuen päällyskerroksen ja heikon pohjamaan omaavat tiet kokivat huomattavasti suurempia muodonmuutoksia. Lisäksi tutkimuksissa todettiin, että muodonmuutokset ovat suurempia, jos sama kuormitus ylittää tieleikkauksen lyhyessä ajassa verrattuna siihen, että sama massa jaettiin tasaisille aikaväleille. Tässä muodonmuutoksessa tierakenteiden laatu todettiin erityisen merkittäväksi. Muodonmuutosten todettiin myös kasvavan samoja ajolinjoja ajettaessa, ja käänteisesti muodonmuutosten todettiin kumoavan toisensa, jos peräkkäisten ajoneuvojen ajolinjat kulkivat vierekkäin eivätkä peräkkäin. Lisäksi sääolosuhteiden todettiin vaikuttavan muodonmuutosten suuruuteen. (Vuorimies et al. 2018; Vuorimies et al. 2019)

Ympäristökuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset tapahtuvat yleensä ajan kanssa rakenteiden väsymisen takia, mutta esimerkiksi routanousujen tai liiallisten vesimäärien aiheuttamat sortumat voivat tapahtua hyvin nopeasti. Ympäristökuormitusten luomien vaurioiden ollessa yleisesti halkeamia, tai rakennekerrosten kantavuuteen vaikuttavia muutoksia, nämä muodonmuutokset ovat yleisesti aina luonteeltaan palautumattomia.

### **3.1.1 Palautuva muodonmuutuskäyttäytyminen**

Palautuva muodonmuutuskäyttäytyminen tarkoittaa tilannetta, jossa tiehen syntynyt muodonmuutos palautuu ajan kanssa takaisin alkutilanteeseen. Tämä tarkoittaa käytännössä raskaassa kuormituksessa tapahtuvaa tierakenteiden painumista tai tiivistymistä, mikä kuormituksen hävittyä palautuu alkuperäiseen olotilaansa. Kuormitusten lukumäärän kasvaessa palautuvan muodonmuutoksen osuus koko muodonmuutoksesta kasvaa, kunnes tiettyyn kuormituspisteeseen päästäessä, muodonmuutos on lähes kokonaan palautuvaa (Belt et al. 2002). Tämä huomataan myös kuvan 3 kuvaajasta b, jossa muodonmuutuskäyrä lähestyy suoraa kuormituskertojen kasvaessa.

Palautuvaa muodonmuutosta tapahtuu huomattavasti enemmän jäykissä ja tiiviissä tierakenteissa, minkä kaltaiseen tilanteeseen useimmiten päästään hyvällä rakentamisella ja muutamilla kuormituskerroilla. Myös tierakenteiden kosteudella on suuri vaikutus muodonmuutosten palautuvuuteen. Mitä kosteampi tierakenne on, sitä suurempi osa muodonmuutoksesta on pysyvää. Merkittävä tekijä on myös tierakenteiden kiviaineksen muoto ja pinta, jotka vaikuttavat muodonmuutoksen suuruuteen ja luonteeseen. (Belt et al. 2002)

### 3.1.2 Pysyvä muodonmuutoskäyttäytyminen

Pysyvä muodonmuutos on tierakenteelle tapahtuvaa muodonmuutosta, joka ei palaudu kuormituksen loputtua takaisin. Yleisesti tämä johtuu löysien tierakenteiden tiivistymisestä, joka edellä mainitun mukaisesti kuormituskertojen lisääntyessä vähenee. Pysyviä muodonmuutoksia voi syntyä kaikkiin tien rakennekerrokseen, mitkä heijastuvat aina tien pintaan poikittais- tai pitkittäissuuntaisena epätasaisuutena. Pysyvien muodonmuutosten syntymiseen vaikuttaa muun muassa jännitystila, kuormitusten määrä, kosteusolosuhteet, jännityshistoria, materiaalin tiiviys ja materiaalin rakeisuus ja kiviaines. (Belt et al. 2002)

Tutkimusten mukaan tiet, joilla on ohuet päällysrakenteet ovat huomattavasti herkempiä pysyville muodonmuutoksille kuormituksen siirtyessä paikoittaisempaan kantavaan kerrokseen. Vastaavasti paksu ja jäykkä päällysrakenne jakaa kuorman laajemmalle alueelle, minkä takia pysyvät muodonmuutokset tämän kaltaisilla tierakenteilla on huomattavasti pienempiä. Suomessa päällysrakenteet ovat perinteisesti melko paksuja, minkä takia suurella osalla tieverkkoa pysyvät muodonmuutokset eivät tuota suuria ongelmia. (Belt et al. 2002) Myös Väyläviraston vuosina 2015–2018 tekemät tutkimukset aiheesta ovat päätyneet samaan johtotulokseen päällysrakenteen paksuuden vaikutuksesta pysyviin muodonmuutoksiin (Vuorimies et al. 2018; Vuorimies et al. 2019).

## 3.2 Vaurioitumistyytit

Tien pinnalla näkyvät vauriot voidaan luokitella kolmeen eri päätyyppiin, jotka ovat halkeamat, epätasaisuus ja hajoamisvauriot (Belt et al. 2002). Vaikka vauriot havaitaan yleisesti päällysteestä, niiden syyt löytyvät enimmäkseen tien alemmista rakennekerroksista. Tierakenteen vaurioituminen johtuu yleensä liian suuresta kuormituksesta, rakenteen tiivistymisestä, plastisista muodonmuutoksista, nastarengaskulutuksesta, epätasaisesta routimisesta, routanousuista, kosteudesta tierakenteessa, puutteellisesta kuivutuksesta tai virheistä rakentamisessa. Usein vaurioiden syntymiseen johtaa monen edellä mainitun tekijän summa. (Laitinen et al. 2017)

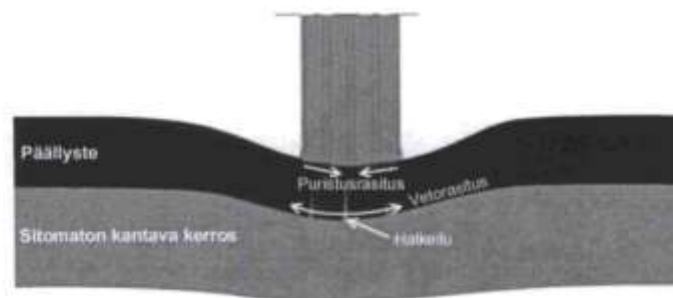
### 3.2.1 Halkeamat

Halkeamat tarkoittavat nimensä mukaisesti halkeamia tien päällysrakenteissa. Halkeamia esiintyy tiestössä muun muassa poikkihalkeamana, pituushalkeamana, vinohalkeamana, verkkohalkeamana ja saumahalkeamana. Yleisimpiä syitä tien päällysrakenteiden halkeilulle on routiminen, painuminen, lämpötilamuutoksiin liittyvät jännitykset ja raskaan liikenteen aiheuttama liikennekuormitus. (Belt et al. 2002) Tämän työn kannalta

tärkein halkeamatyyppi on verkkohalkeama, joka syntyy liiallisen liikennekuormituksen seurauksena.

Halkeamien kannalta tärkeänä ilmiönä toimii myös niin sanottu heijastushalkeilu. Tämä tarkoittaa tierakenteen alemmissa kerroksissa olevien halkeamien kulkeutumista tien pintaan eli päällysrakenteisiin. Heijastushalkeilu voi esiintyä pinnassa poikittais-, pitkitäis-, vino- tai verkkohalkeamana, joista selkeimmin tätä esiintyy poikittaishalkeamissa. Yleisimmin ilmiötä tavataan teillä, joilla on suoritettu uudelleenpäällystyks vanhan päälle tai hydraulisella sideaineella sidotulla kantavalla kerroksella. (Anttila 2019, Ehrola 1996 mukaan) Heijastushalkeilun yleisenä aiheuttajana toimii lämpötilamuutosten aiheuttamat jännitykset ja halkeilujen kulkeutumisessa päällysrakenteisiin liikennekuormitus on yleensä suurimpana osatekijänä (Belt et al. 2002).

Alla olevaan kuvaan 4 on esitelty pääajatus liikennekuormituksen aiheuttamasta päällysrakenteen väsymyksestä, mikä lopulta johtaa halkeamiin. Väsymisen aiheuttaa tiellä kulkeva kulkuneuvo, joka massansa takia renkaidensa kautta aiheuttaa taipuman tien päällysrakenteeseen. Kuvassa 4 tämä on esitetty korostetusti, mutta ajatus on sama myös oikeassa tilanteessa. Oikeiden kulkuneuvojen aiheuttama taipuma on alle yhden millimetrin luokkaa ja tässäkin tulee huomioida, että ainoastaan raskasliikenne aiheuttaa tarpeeksi merkittävää taipumaa vaurioiden syntymiseksi. Päällysrakenteen taipuminen aiheuttaa kuvan 4 mukaisesti päällysteen yläpintaan puristusrasitusta ja alapintaan vetorasitusta, mitä päällysrakenne ei kestä, vaan se alkaa halkeilla. Huomioitavaa on, että tämä ei tapahdu yhden kulkuneuvon takia, vaan pitkän ajan ja lukemattomien kuormituskertojen seurauksena, jotka väsyttävät päällysrakennetta, mikä johtaa lopulta alapohjan halkeiluun ja myöhemmin koko päällysteen paksuiseen halkeamaan. (Belt et al. 2002, Ehrola 1996 mukaan) Tärkeää on myös huomioida kuvasta 4 pois jääneet vetojännitykset, jotka syntyvät päällysteen pintaan taipuman aiheuttaman kuopan reunoille, jotka aiheuttavat yhtä lailla päällysteen väsymystä ja halkeilua.



**Kuva 4.** Liikennekuormituksen aiheuttamat rasitukset ja väsymisvauriot asfalttipäällysteelle. (Belt et al. 2002, s. 41)



Kuvassa 4 kuvatun renkaan aiheuttaman taipuman vetojännitysten aiheuttama halkeilu voi esiintyä tiessä sekä pitkittäis-, että poikittaishalkeamina, sillä asfaltti taipuu myös toisessa suunnassa renkaan mukana. Poikkisuuntainen muodonmuutos ja halkeilu on kuitenkin yleensä suurempaa, sillä sitä kuormitetaan pidemmän aikaa. (Belt et al. 2002) Alkuvaiheessa väsyminen alkaa näkyä sidotun kerroksen pohjaan syntyvinä pitkittäissuuntaisina hiushalkeamina ajourien kohdille. Kuormitus määrien lisääntyessä hiushalkeamat lisääntyvät ja kasvavat, ja lopulta muodostavat hiushalkeamaverkkoja. Halkeamien lisääntyessä pinnan jäykkyys pienenee, mikä johtaa halkeamien kasvamisen lisääntymiseen ja lopulta halkeama kasvaa niin suureksi, että se näkyy pinnalla asti. (Belt et al. 2002, Ehrola 1996 mukaan) Tien pinnalla väsymisvauriot esiintyvät usein pitkittäissuuntaisina halkeamina ajourien pohjalla, jossa vetojännitys on suurimmillaan. Kuormitusten jatkuessa halkeamat jatkavat leviämistä ja lisääntymistä kiihtyvällä tahdilla ja myös poikittaissuuntaisia halkeamia alkaa syntyään, minkä seurauksena syntyy verkkoa muodostavia halkeamaryppäitä, eli verkkohalkeilua. (Belt et al. 2002)

Verkkohalkeamia esiintyy eniten ohutpäällysteisillä teillä, ja teillä, joilla pinnan alapuolella oleva materiaali on huonolaatuista. Suomessa verkkohalkeilu on melko yleistä, mutta niiden määrää vähentää nastarengaskulutuksen aiheuttamasta urautumisesta johtuva päällysteiden melko tiheä uusiminen. (Belt et al. 2002)

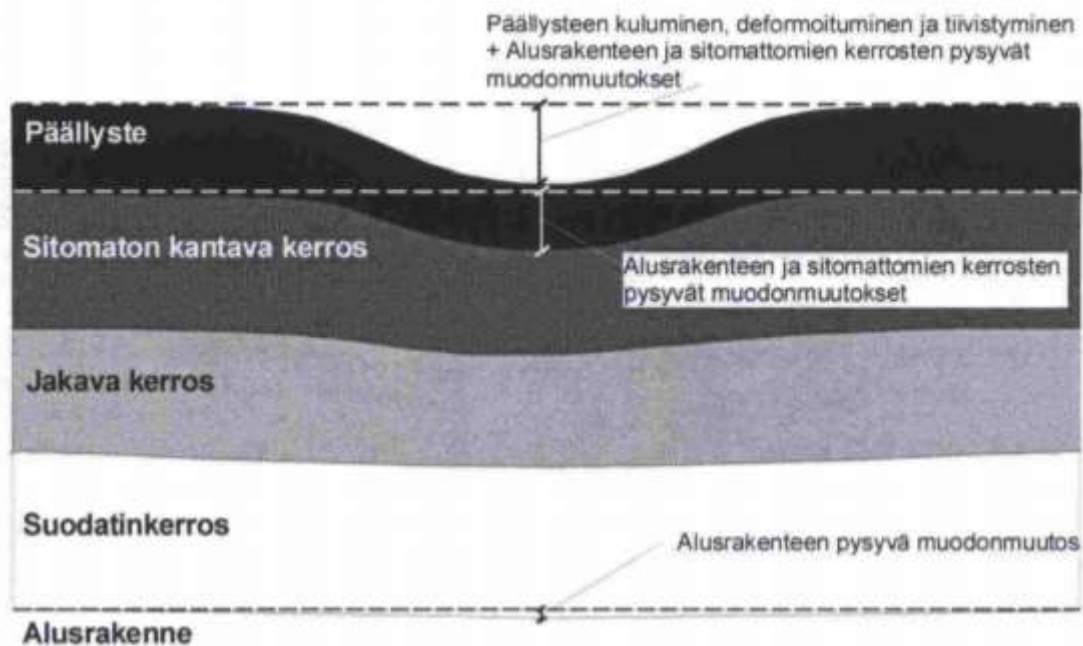
Toinen Suomessa hyvin yleinen halkeamia aiheuttava tekijä on routanousut, joiden aiheuttamat halkeamat voivat esiintyä pituus-, poikittais- tai vinosuunnassa, eli missä suunnassa tahansa. Routanousujen aiheuttamissa halkeamissa erityisen ongelmallista on, että halkeamat jatkuvat usein päällysrakenteen lisäksi syväälle tierakenteisiin saakka. Routanousut aiheuttavat halkeamia tierakenteisiin epätasaisella routimisellaan, minkä seurauksena tierakenteisiin syntyy taipumia ja vetojännityksiä, jotka johtavat halkeamiin. Suurimmillaan routanousu on yleensä tien keskikohdassa, johon usein myös syntyy halkeamia. Suurien tien poikkileikkauksen korkeuksien vaihteluiden seurauksena toinen tyypillinen halkeilukohta roudan takia on teiden reunat. (Belt et al. 2002)

Tien päällysrakenteiden halkeamia Suomen olosuhteissa aiheuttaa myös pakkaskatkot, eli päällysteen lämpötilan alenemisesta johtuva halkeilu. Pakkashalkeamat syntyvät päällysteen pintaan lämpötilanmuutoksista johtuvien vetojännitysten seurauksena, mistä ne lämpötilanmuutosten kasvamisen seurauksena leviävät päällysteen läpi aina päällysteen alla oleviin kerroksiin asti. Yleensä pakkaskatkot esiintyvät tien poikittaissuuntaisina halkeamina tasaisin välimatkoin. (Belt et al. 2002, Ehrola 1996 mukaan) Pakkashalkeamat ovat päällysteiden kannalta siinä mielessä ongelmallisia, että päinvastoin muihin halkeamiin nähden pakkashalkeamia tapahtuu herkemmin jäykemmille päällysrakenteille (Belt et al. 2002).

### 3.2.2 Epätasaisuus

Tierakenteen epätasaisuus tarkoittaa tienpinnan muutosta alkuperäisasemastaan aiheuttaen tien pintaan epätasaisuutta. Epätasaisuutta esiintyy tienpinnassa halkeamien tapaan pituus- ja poikittaissuunnassa. Pituussuuntainen epätasaisuus syntyy useimmiten epätasaisten painumien ja routanousujen seurauksena ja se esiintyy yleensä erilaisina heittoina ja painaumina. Poikkisuuntainen epätasaisuus taas esiintyy useimmiten urautumisena, harjanteen muodostumisella ajourien väliin, reunapainumina, tien kallistumisina ja tiepenkereen latistumisina. (Laitinen et al. 2017)

Ehdottomasti yleisin epätasaisuuden esiintymismuoto Suomessa on poikittaissuuntaista epätasaisuutta aiheuttava teiden urautuminen. Tätä on myös esitelty alla olevassa kuvassa 5. Kuvan mukaisesti urautumista aiheuttaa kaksi tekijää, eli päällysteen kuluminen ja alusrakenteen ja sitomattomien kerrosten pysyvät muodonmuutokset. (Belt et al. 2002) Muodonmuutokset ja urautumisesta johtuva epätasaisuus syntyvät aina ajourille, sillä ne aiheutuvat liikennekuormituksesta.



**Kuva 5.** *Urautumisen aiheuttavat tekijät (Belt et al. 2002, s. 46)*

Urautumisessa päällysteen kuluminen johtuu yleensä Suomessa nastarenkaiden aiheuttamasta kulutuksesta, jonka suuruus riippuu liikennemäärästä, renkaiden nastoituksesta ja erityisesti päällysteen runkokiviaineesta. Nastarenkaiden aiheuttama kuluminen yksistään aiheuttaa tiehen jyrkkäreunaisia uria. Lisäksi päällysteessä tapahtuu liikennekuormituksen seurauksena plastista deformaatiota ja tiivistymistä, jotka synnyttävät päällysteeseen pysyvää muodonmuutosta. Plastinen deformatuminen tarkoittaa päällysteen ma-

teriallin siirtymistä sivuun raskaan kuormituksen seurauksena, mikä yhdistettynä kuormituksesta seuraavaan päällysteen tiivistymiseen ja nastarengaskulutukseen aiheuttaa päällysteen urautumisen. Lisäksi tähän lisätään vielä raskaan liikenteen aiheuttama pysyvä muodonmuutos eli tiivistyminen jakavassa ja kantavassa kerroksessa, jotka yhdessä muodostavat kuvan 5 mukaisen uran. (Belt et al. 2002)

Muut poikittaissuuntaiset epätasaisuudet johtuvat useimmiten pohjamaan tai rakenteiden painumista. Reunapainumien syynä leveillä teillä on yleensä konsolidaatiopainuma ja kapeilla teillä reunan alhaisesta kantavuudesta tai liian jyrkästä luiskasta. Tienkallistuma johtuu samankaltaisesti reunojen eri suuruista painumista ja tiepenkereen latis-tuminen johtuu harjakaltevan tien keskiosan reunoja suuremmasta painumasta. (Laitinen et al. 2002)

Pituussuuntainen epätasaisuus näkyy teillä enimmäkseen tierakenteen oman painon aiheuttamina painumina ja epätasaisina routanousuina, joista routanousut ovat Suomessa hyvin yleisimpiä pituussuuntaisen epätasaisuuden aiheuttaja. Painumien pääaiheuttajana toimii yleensä heikko alusrakenne, mutta myös alusrakennemateriaalin tai olosuh-teiden vaihtelu, tierakenteen epäjatkuvuuskohtat ja päällysrakenteen epähomogeeni-suus. Pituussuuntaista muodonmuutosta lisäävänä tekijänä toimii useimmiten liikennekuormitus, joka kasvattaa kuormituksellaan jo valmiiksi syntyneitä epätasaisuuksia. Pi-tuussuuntaisen epätasaisuuden suurimpana ehkäisijänä toimii oikea oppinen tien raken-taminen ja paksun päällystekerroksen käyttäminen. (Belt et al. 2002)

### **3.2.3 Hajoamisvauriot**

Päällysteen hajoamisvauriot esiintyvät yleensä reikinä ja purkaumina tierakenteissa. Nämä johtuvat yleensä päällystemassan puutteellisista ominaisuuksista, kuten side- ja kiviaineiden heikoista sidoksista. Purkauma tarkoittaa sideaineen pettämistä, minkä seu-rauksena tien pinnasta irtoaa kokonaisia kiviainesrakeita, ja reikä taas on pitkälle tiera-kenteessa kehittynyt purkauma. (Belt et al. 2002)

Purkaumaan johtaa heikko kivi- ja sideainesten sidos, minkä syynä voi olla muun mu-assa kivirakeiden pinnalla ollut pölykerros sitoutumisvaiheessa, liian pieni asfalttimassa hienoainepitoisuus, päällysteen lajittuneisuus, liian pieni sideainepitoisuus, ikääntynyt si-deaine ja liiallinen kosteus päällystekerroksessa. Purkauman synnyttyä nastarenkaiden aiheuttama kulutus on usein merkittävä purkaumaa kasvattava tekijä. Purkaumien vält-tämiseen auttaa oikeaoppinen rakentaminen ja hyvän päällystemassan käyttö, sillä pur-kaumat johtuvat aina rakennusvirheistä tai huonosta materiaalista. (Riikonen 2014)

## 4. ÄLYLIIKENTEEEN AIHEUTTAMAT RASITUKSET

Älyliikenteeseen sisältyy tällä hetkellä monia ongelmia, joita ei ole vielä päästy juurikaan tutkimaan normaalienkaan liikenteeseen tarvittavien ominaisuuksien puolesta, suurempien automaatiotasojen kulkuneuvojen ollessa vielä kehitysvaiheessa. Tämän takia myös tässä työssä tutkittava älyliikenteen vaikutus tierakenteiden näkökulmasta on vielä vähäisten tutkimusten tasolla, minkä seurauksena rasitusvaikutukset joudutaan oletta-  
maan asiaa sivuavien tutkimusten ja simulaatioiden perusteella. Osa seurauksista on pääteltävissä vanhojen tutkimusten perusteella, mutta kaikkia seurauksia ei voida täysin tietää ennen autonomisten autojen laajempaa käyttöönottoa.

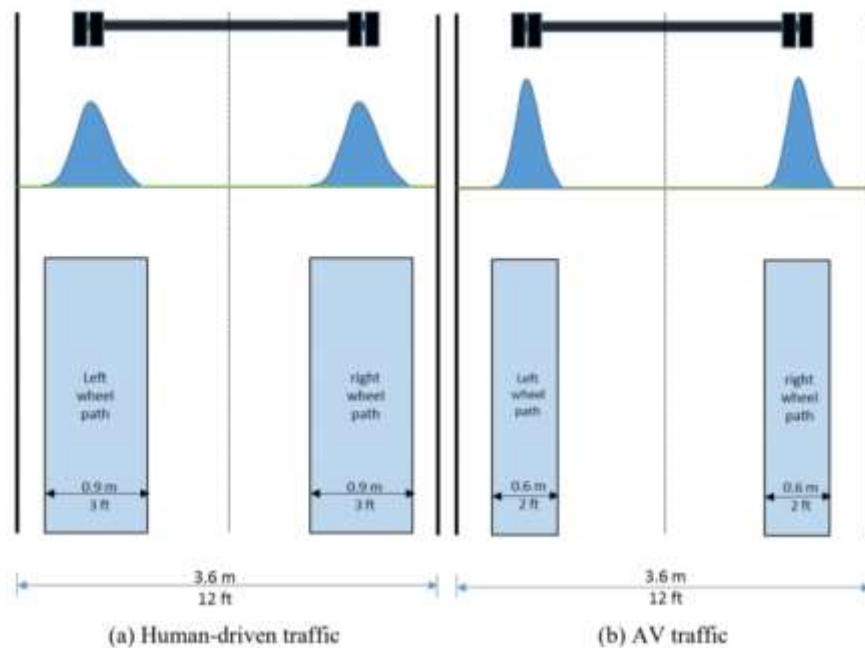
Tiettyjä päätelmiä älyliikenteen aiheuttamista seurauksista voidaan kuitenkin tehdä yhdistelemällä edellä tutkittuja älyliikenteen ominaisuuksia ja teiden vaurioitumistyyppettä, joista voidaan suoraan todeta liikennekuormituksista johtuvien vaurioiden lisääntymistä tierakenteille. Lisäksi raskaanliikenteen samoja ajolinjoja pitkin ajavien autojen aiheuttamista muodonmuutoksista tierakenteisiin koskevasta Väyläviraston tutkimuksista vuosina 2015–2018 saadaan tuloksia, joita voidaan suoraan käyttää älyliikenteen aiheuttamien kuormitusten tutkimiseen (Vuorimies et al. 2018; Vuorimies et al. 2019). Suoraa tutkimustietoa löytyy myös muun muassa Texas A&M Transportation instituutin tutkimuksesta automaattisten ajoneuvojen ajolinjojen vaihtelun optimoinnista saadaan kattavaa tutkimustietoa aiheesta, ja myös mahdollisesta ratkaisusta (Zhou et al. 2019).

### 4.1 Älyliikenteen aiheuttamat kuormitukset

Älyliikenteestä aiheutuvan kuormituksen voidaan termin laajasta aiheisällöstä huolimatta todeta johtuvan yksinomaan kulkuneuvojen painosta, joka kulkeutuu normaalin auton tapaan renkaiden kautta tierakenteisiin. Ja koska automaattiset tai autonomiset autot eivät ole normaaleja autoja painavampia, muutos kuormitukseen tulee autojen ajamistyylisestä ja ajolinjoista. Tämän lisäksi automaattiset ja autonomiset autot ajavat autoja siistimmin esimerkiksi tasaisemmillä jarrutuksilla kuin ihmiset, minkä seurauksena voidaan todeta ainoan merkittävän automaation tuoman muutoksen kuormitukseen olevan ajolinjat.

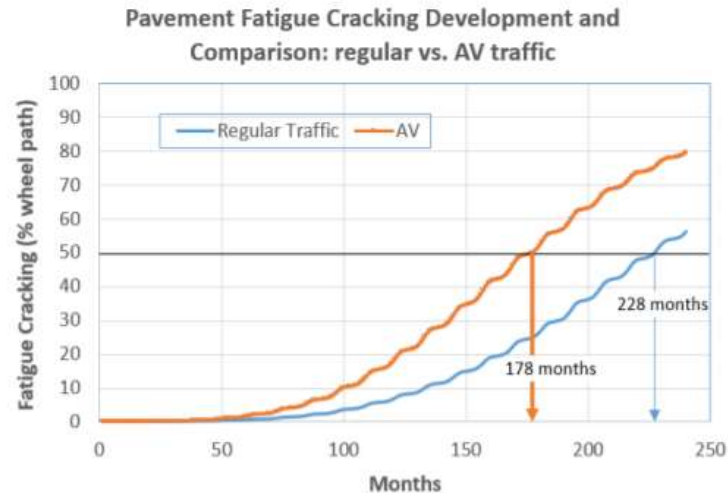
Ajolinjat ovat kuitenkin osoittautuneet useiden tutkimusten perusteella merkittäväksi tekijäksi erityisesti päällysteiden eliniän vaikuttajana. Suuri osa nykyisistä kulkuväylistä on suunniteltu kestävään ihmisohjattua liikennettä, jossa ajolinjat heittelevät huomattavasti toisistaan. Automaattisten autojen toimesta niiden ajolinjat tulevat supistumaan kapealle

alalle, ja jopa täysin identtiseksi, minkä seurauksena kulutus tulee kasvamaan valtavasti, ja esimerkiksi urautuminen voi tutkimuksien mukaan lisääntyä jopa 25–45 prosentilla. (Noorvand et al. 2017) Alla olevassa kuvassa 6 on esitelty ihmisohjattun ja itseohjautuvien ajoneuvojen arvioitua ajolinjojen vaihtelua. Kuten kuvasta huomataan ajolinjat tulevat supistumaan noin kolmanneksella, mikä lisää paikoittaista kuormitusta merkittävästi. Lisäksi itseohjautuvien ajoneuvojen ajolinjat ovat huomattavasti keskittyneimpiä ja niiden sivusuuntainen vaeltelu on jopa kolme kertaa ihmisohjattua pienempää (Zhou et al. 2019).

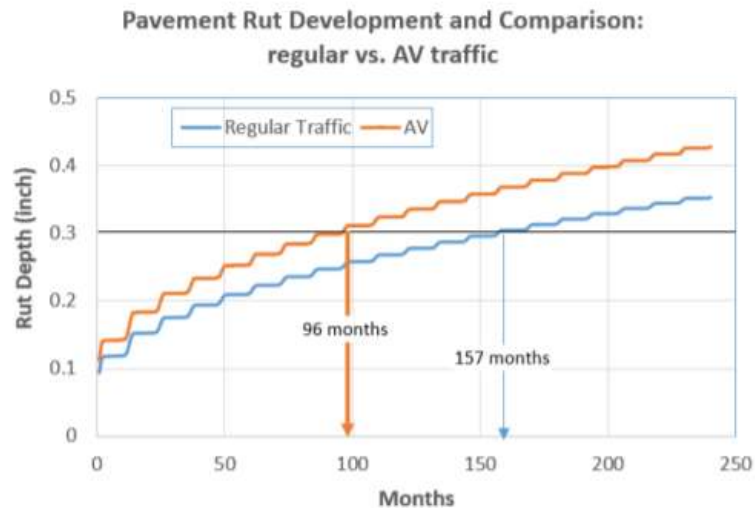


**Kuva 6.** Ihmisohjattujen ja itseohjautuvien raskaiden ajoneuvojen ajolinjojen vaihtelu (Zhou et al. 2019, s. 4)

Kuvissa 7 ja 8 on esitelty autonomiseen liikenteeseen siirtymisen aiheuttamasta tien kulumisen nopeutumisesta Virginia Tech Transportation instituutin tutkimusten mukaisesti. Kuvassa 7 esitellään tien väsymishalkeilua, mikä johtaa myöhäisemmässä vaiheessa verkkohalkeiluun. Kuvan mukaisesti autonominen liikenne saavuttaa 50 prosentin kriittisen väsymishalkeilu pisteen 22 prosenttia normaalia liikennettä aikaisemmin, mikä kyseisen kuvaajan tilanteessa tarkoittaa yli 4 vuoden eroa. Kuvan 8 urautumista kuvaavat kuvaajat näyttävät samankaltaisia tuloksia, sillä 7,5 mm syvän uran syntymiseen autonomiselta liikenteeltä meni jopa 39 prosenttia vähemmän aikaa. Kyseinen 7,5 mm ura on turvalliseen ajamiseen sallittu suurin ura Amerikassa. (Zhou et al. 2019) Vastaavan laista selvää arvoa ei Suomesta löydy, vaan urat voivat vähemmän merkittävillä teillä kasvaa merkittävästi suuremmiksi.



**Kuva 7.** Päällysteen väsyminen normaalin liikenteen ja itseohjautuvan liikenteen kulutuksessa (Zhou et al. 2019, s. 11)



**Kuva 8.** Päällysteen urautuminen normaalin liikenteen ja itseohjautuvan liikenteen kulutuksessa (Zhou et al. 2019, s. 11)

#### 4.1.1 Henkilöautoliikenteen aiheuttamat rasitukset

Henkilöautoliikenteen ja muiden kevyempien kulkuneuvojen massan aiheuttama kuormitus tierakenteille on niin pieni, että ainoa merkittävä näiden aiheuttama rasitus on nastarenkaiden aiheuttama kuluma. Nastarengaskulutus on kuitenkin Suomessa merkittävä tekijä urautumisen syntymisessä, purkaumien kasvattamisessa ja reikien synnyttämisessä, minkä takia myös henkilöauto liikenne tulee huomioida älyliikenteen vaikutuksia pohdittaessa (Riikonen 2014). Jokainen edellä mainittu seuraus tulee muiden tapaan kasvamaan merkitykseltään ajolinjojen hajonnan kaventuessa älyliikenteen seurauksena, mikä tulee ajan kanssa näkymään suurina ongelmina päällysteiden pinnoissa.

Henkilöautoliikenteessä merkittävää on sen raskaaseen liikenteeseen verrattuna suuri ylitysten määrä, joka johtaa ajallaan ongelmien syntymiseen. Lisäksi henkilöautoliikenteelle ominaista on myös sen laajuus, jolla se rasittaa koko Suomen tiestöä, kun taas raskas liikenne rasittaa suurimmaksi osaksi vain pääväyliä ja muutamia muita merkittäviä reittejä. Henkilöautoliikenteen vaikutustakaan ei voi siis jättää täysin huomioimatta, sillä sen vaikutukset tulevat näkymään hitaasti, mutta laajasti.

#### **4.1.2 Raskaan liikenteen aiheuttamat rasitukset**

Raskaan liikenteen kuormitus tierakenteille on henkilöautoliikenteeseen verrattuna merkittävä suuren massan seurauksena ja suurin osa syntyvistä vaurioista johtuu niiden aiheuttamasta rasituksista. Suurimpia raskaan liikenteen aiheuttamia vaurioita tierakenteille ovat verkkohalkeamat, painumat ja urautuminen, minkä lisäksi raskas liikenne toimii lähes jokaista vauriotyyppiä kasvattavana tekijänä. Raskaan liikenteen aiheuttamat muodonmuutokset tapahtuvat lähes aina pitkällä aikavälillä useiden ylitysten seurauksena, missä älyliikenteen lisääminen kulkuvälineisiin nopeuttaisi muodonmuutosten syntymistä selvästi ajolinjojen kaventuessa.

Yksi suurimpia mahdollisia pysyvien muodonmuutosten aiheuttajia olisi raskaalle liikenteelle suunniteltu letka-ajo ominaisuus, sillä Väyläviraston tutkimuksissa todettiin saman massamäärän aiheuttavan huomattavasti suuremman pysyvän muodonmuutoksen sen ylittäessä piste lyhyellä aikavälillä toisistaan (Vuorimies et al. 2018; Vuorimies et al. 2019). Tämä tarkoittaa sitä, että letka-ajo tilanteessa, jossa useampi raskas ajoneuvo kulkee jonossa samoja ajolinjoja pitkin, aiheutuva pysyvä muodonmuutos tierakenteisiin on suurempi normaali tilanteeseen verrattuna. Ja vaikka letka-ajo nykyisellään voikin sisältää vain enintään kaksi kulkuvälinettä, se on sama määrä, jolla Väylävirasto teki tutkimuksensa ja saavutti edellä mainitun tuloksen. Letkan pituuden kasvattaminen vain lisää syntyvine muodonmuutosten suuruutta, joten voidaan todeta, että Suomen tieverkosto ei nykyisellään kestä letka-ajoa suuremmalla volyyymilla.

## **4.2 Seuraukset**

Käytännössä liikennekuormitus aiheuttaa vauriota tierakenteille toistoilla, joiden tiheyttä ja merkittävyyttä itseohjautuvat ajoneuvot tulevat lisäämään ajolinjojen kapenemisella. Tämän seurauksena liikennekuormituksen tällä hetkellä aiheuttamat vauriot tulevat nopeutumaan ja laajenemaan, ellei asiaan keksitä ratkaisua. Tyypillisin seuraus samoja ajolinjoja ajavasta liikenteestä on kuvan 5 mukainen urautuminen, johon liittyy sekä raskaan liikenteen aiheuttama painuma kantaviin rakenteisiin ja päällysteeseen, että nastarenkaiden aiheuttama kuluma. Kuvan kaltaisiin kohtiin syntyy päällysteeseen tyypillisesti

myös verkkohalkeilua. Lisäksi ajolinjojen kaventuminen toimii päällysteen purkaumia lisäävänä tekijänä. Nämä ovat vakavia vaurioita tierakenteille, joiden korjaaminen vaatii suuria toimenpiteitä, joiden lisääntymiseen ei nykyisellä teiden korjaukseen annettavalla rahoituksella olisi varaa.

Luonnollisesti älyliikenne tulee johtamaan myös infrastruktuurin uudistamiseen ja tierakenteiden ja päällysteiden uudistamiseen ja esimerkiksi letka-ajon täysmittaisen hyödyn mahdollistamiseksi saatetaan valmistaa täysin omia kaistoja ja reittejä vain tätä toimintoa varten. Joten vaikka älyliikenne tulee nykyisellään lisäämään tierakenteen rasituksia, kehitys tulee näkymään myös tierakenteissa ja infrastruktuurissa kokonaisuudessa, mikä muokataan kestävämmän uudenlaista liikennettä.



## 5. RATKAISUVAIHTOEHTOJA

Älyliikenteen tuoma autonominen ajaminen johtaa liikenteen ajolinjojen supistumisen kautta huomattaviin tierakenteen rasitusten ja vaurioiden lisääntymiseen. Urautumisen arvioidaan kasvavan jopa 25–45 prosenttia ja myös kuvan 7 mukaisesti väsymishalkeilun kehittyminen tulee nopeutumaan huomattavasti ja kriittisiin suuruuksiin päätyminen nopeutuu noin 22 prosenttia (Zhou et al. 2019). Nämä lukemat ovat merkittäviä, minkä takia ongelmaan on tärkeää keksiä ratkaisu ennen automaattisten autojen vahvaa yleistymistä liikenteessä, mihin voi kuitenkin erilaisten arvioiden mukaan kulua 15–30 vuotta (Joint Research Center 2019). Huomioitavaa kuitenkin on, että älyliikenteen vaikutus kuormitukseen alkaa näkyä jo älyliikenteen viedessä 10 prosenttia kaikesta liikenteestä (Noorvand et al. 2017).

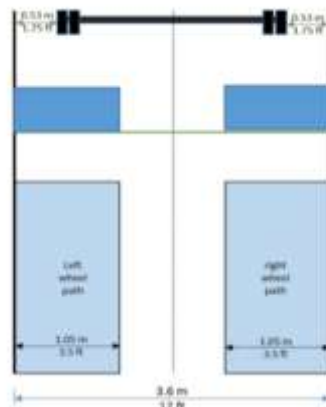
Ongelmat johtuvat automaattisten autojen koneen ohjaustavasta, joka koneille tyypillisesti ohjaa kaikkia kulkuvälineitä samoja optimoituja ajouria pitkin kaistan koko leveyttä hyödyntämättä. Tämä kohdistaa liikennekuormituksen rasitukset hyvin suppealle alalle tien poikkileikkauksesta, mikä johtaa suurempiin ja nopeammin kehittyviin painumiin, uriin ja väsymishalkeamiin tierakenteissa. Lisäksi yhtenevien ajolinjojen vaikutus tulee kertautumaan huomattavasti raskaan liikenteen niin sanotussa letka-ajo ominaisuudessa, jossa useampi raskas ajoneuvo ajaa letkassa ensimmäisenä kulkevan kulkuvälineen ohjauksessa. Ongelma tässä on raskaiden ajoneuvojen kulkeminen hyvin lähelläkin jonossa, joka Väyläviraston vuosina 2015–2018 tekemien tutkimusten mukaan lisää painumien syntymistä verrattuna tilanteeseen, jossa samat raskaat ajoneuvot ylittävät saman pisteen huomattavasti erillään toisista (Vuorimies et al. 2018; Vuorimies et al. 2019).

Koska aihe ei ole vielä ajankohtainen, ratkaisujen kehittämistä suuremmassa mittakaavassa ei ole vielä aloitettu. Lisäksi älyliikenteen osalta keskittymisen kohdistuessa lähinnä teknologian kehitykseen, lupa-asioihin ja eettisiin kysymyksiin, tierakenteiden rasituksen lisääntyminen on jäänyt pienelle huomiolle. Joitakin ratkaisuja asiaan kuitenkin on alettu kehitellä, joista etulinjassa toimii ajolinjojen ohjelmoinnin muuntelu, mutta ratkaisuja löytyisi myös tierakenteiden muuntelusta. Mahdollisena tekijänä toimii myös aina teknologian kehityksen arvaamattomuus, mikä voisi rajuimmassa tilanteissa johtaa jopa tavaraliikenteen kuljetustapojen muutokseen. Nykyarvioilla kuitenkin raskaan liikenteen osuus tavarankuljetuksesta ei tule juurikaan muuttumaan lähivuosina, ja kuljetusmäärät tulevat luultavasti vain lisääntymään (Luukkonen et al. 2012).

## 5.1 Ajolinjojen hallinta

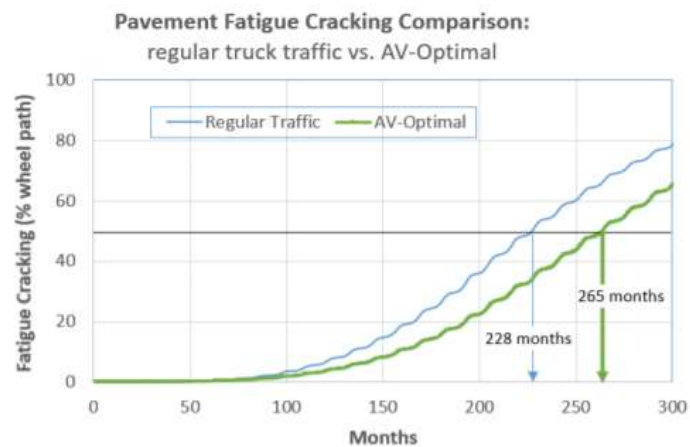
Luonnollisin ratkaisu älyliikenteen aiheuttaman kulutuksen neutralisointiin on ajolinjojen ohjelmointi kulkemaan toisistaan poikkeavia reittejä. Tämän kaltaiseen ratkaisuun löytyykin jo tutkimuksia ja alustavia ohjelmointeja, joista saadut tulokset ovat erittäin lupaavia. Erityisesti Virginia Tech Transportation instituutin tutkimukset automaattisten ajoneuvojen ajolinjojen satunnaistamisesta antavat lupaavia tuloksia jopa päällysteiden kestävien kasvattamisesta (Zhou et al. 2019). Myös Väylävirasto päätyi samanlaisiin tuloksiin tutkimuksissaan todeten: ”Autonomisella rekalla, jonka ajolinjoja poikkeutetaan suhteessa toisiin autonomisiin rekkoihin, saatetaan päästä jopa parempaan tilanteeseen kuin ihmisen ajaessa riippuen ajolinjojen poikkeutukseen valituista ohjelmoinneista.” (Vuorimies et al. 2018, s. 96).

Ajatuksena älyliikenteen ajolinjojen muokkaamisella eriäviksi toisistaan perustuu tierakenteiden painumisen ominaisuuteen, jossa päällysteaine painumisen lisäksi siirtyy renkaan painon alta sen sivuille luoden uran molemmille puolille kohoumaa tiehen. Kun seuraava ajoneuvo kulkee edellisen ajouran vierestä, urat jälleen tasoittuvat johtaen pidemmän päällysteen säilymistä. (Vuorimies et al. 2018) Alla oleva kuva 9 kuvaa Virginia Tech Transportation instituutin käyttämä ajolinjojen vaihtelu optimoiduille ajolinjoille autonomisilla autoilla (Zhou et al. 2019). Kun kuvaa 9 vertaa kuvaan 6 huomataan, että optimoidussa tilanteessa autonomiset ajoneuvot hyödyntäisivät itseasiassa ihmisohjattuja ajoneuvoja leveämpää osaa kaistasta. Lisäksi ihmisten ohjaamat ajoneuvot vaihtelusta huolimatta suosivat yleensä tiettyä osaa tiestä, joten optimoitujen autonomisten ajoneuvojen ajolinjojen vaihtelu toisi huomattavaa kevennystä tien päällysrakenteille (Noorvand et al. 2017).

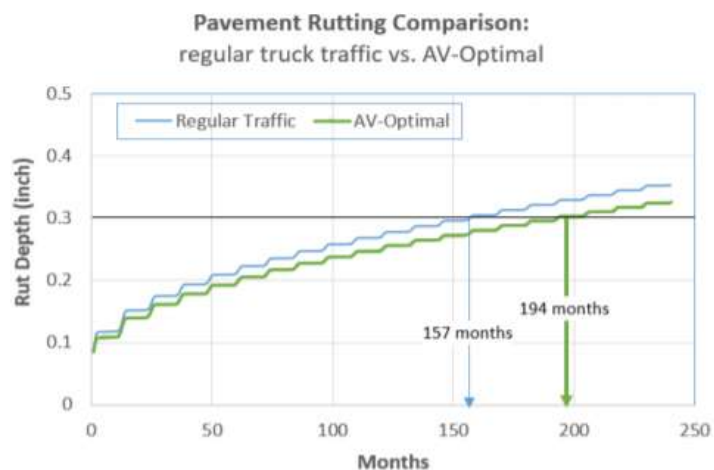


**Kuva 9.** Optimoitujen autonomisten ajoneuvojen ajolinjojen vaihtelu (Zhou et al. 2019, s. 9)

Kuvat 10 ja 11 esittelevät autonomisten ajoneuvojen optimoitujen ajolinjojen tuoman hyödyn tien päällysrakenteille. Kuvan 10 mukaisen väsymishalkeilun kriittisen pisteen saavuttaminen viivästyy noin 16 prosentilla ja ero autonomisiin autoihin ilman optimoituja ajolinjoja on jopa 49 prosenttia pienempi. Vastaavasti kuvan 11 mukaisesti suurin sallittu ura syvyys saavutetaan 24 prosenttia myöhemmin ja ero autonomisiin kulkuneuvoihin ilman optimointia on 102 prosenttia. (Zhou et al. 2019) Kuten luvuista huomataan, ajolinjojen koneellinen optimointi olisi merkittävä asia nykyiseen tilanteeseen verraten ja verrattuna tilanteeseen, jossa itseohjautuvat autot valtaavat liikenteen ilman kontrollia se olisi äärimmäisen merkittävä parannus.



**Kuva 10.** Normaalien liikenteen ja optimoidun autonomisen liikenteen aiheuttama väsymishalkeilu (Zhou et al. 2019, s. 15)



**Kuva 11.** Normaalien liikenteen ja optimoidun autonomisen liikenteen aiheuttama urautuminen (Zhou et al. 2019, s. 15)

Koko kaistaa hyödyntävä ajolinjojen tasainen levittäminen mahdollistaa suuria parannuksia nykytilanteeseen, sillä yksi optimoitu autonominen kulkuneuvo vastaa 0,65 normaalin kulkuneuvon ylitystä urautumisen kannalta ja 0,81 ylitystä väsymishalkeilun kannalta. Vastaavat arvot älyliikenteelle, jossa ajolinjat ovat keskittyneet pienelle alueelle on 2,1–2,3 urautumiselle ja 1,27–1,15 väsymishalkeilulle verrattuna ihmisohjattuihin ajoneuvoihin. Tämä mahdollistaa tie- ja päällysrakenteiden pidemmän keston ja jopa päällysrakenteiden keventämisen. Kun suuri osa liikenteestä on ajolinjoiltaan optimoituja autonomisia kulkuneuvoja, tien päällystettä voidaan ohentaa jopa 30 prosenttia, mikä taas pienentää rakennus- ja huoltokustannuksia. (Noorvand et al. 2017)

Autonomisten ajoneuvojen ajolinjojen optimoiminen on yksinkertainen ja tehokas ratkaisu, minkä takia se on myös todennäköisin ratkaisu älyliikenteen tuoman lisärasituksen luomaan ongelmaan. Lisäksi jo pelkästään nykyiseen ihmisohjattuun liikenteeseenkin verrattuna ratkaisu on niin paljon tehokkaampi, että se kannattaisi ottaa käyttöön. Myös ominaisuuden lisäämiseen tarvittava tekniikka on jo olemassa, mikä tekee ratkaisusta täysin mahdollisen ja todennäköisen toteutettavan. Ainut ongelma on, että täyden hyödyn saaminen vaatisi kommunikointi kulkuneuvojen välillä eikä vain ajolinjojen satunnaistamista, minkä saavuttaminen voi olla haastavaa. Ratkaisuna tämä on kuitenkin niin tehokas, että se tulee varmasti käyttöön jossain muodossa ajallaan.

## 5.2 Muut ratkaisut

Toinen mahdollinen älyliikenteen kuormitukseen auttava ratkaisu on tierakenteiden muuttaminen. Käytännössä tämä tarkoittaisi päällysrakenteen jäykistämistä, paksuntamista ja kantavan kerroksen vahventamista. Käytännössä tämä olisi mahdollista toteuttaa vain ajolinjoille eikä koko tien leveydelle, mikä tekisi uudistuksesta kevyemmän, mutta kustannukset olisivat silti valtavat. Suositummilla pääväylillä ratkaisu voisi kuitenkin olla pidemmän päälle kannattava ja toteutettavissa.

Käytännöllisempi ratkaisu asiaan olisi kuitenkin rakentaa kokonaan uusia teitä tai kais-toja erityisesti itseohjautuvaa raskasta liikennettä varten, jolloin voitaisiin jo rakennusvaiheessa rakentaa tie, joka kestää raskasta liikennettä myös suppeilla ajolinjoilla. Erityisen hyödyllistä tämä olisi letka-ajo ominaisuuden kannalta, missä letkojen pituuksia päästäisiin kasvattamaan vapaasti muun liikenteen puuttuessa. Omien kaistojen tekeminen olisi kuitenkin kannattavaa vain vilkkaille väylille, minkä takia suuri osa Suomen tiestöstä, jossa kulkee paljon raskasta liikennettä, jäisi ilman ratkaisua. Toisaalta tämä ratkaisu taas vapauttaisi muuta tiestöä raskaalta liikenteeltä, mikä parantaisi niiden kestoa merkittävästi. Toteutettavuudeltaan omien ajoreittien luominen raskaalle liikenteelle olisi kallista mutta kuitenkin mahdollista ja kannattavampaa kuin koko tieverkoston uusiminen.

Yksi mahdollisuus tierakenteisiin kohdistuvien rasiutusten vähentämiseen on myös renkaiden leventäminen tai niin sanottujen paripyörien käyttäminen. Myös akselien lisääminen ja akselimassojen pienentäminen keventäisi kuormitusten suuruutta raskaan liikenteen vaikutuksista. Lisäksi renkaan ja päällysteen kosketuspinnan suuruuteen vaikuttaa rengaspaineet, joiden pienentäminen kasvattaa kosketuspinta-alaa ja sitä kautta pienentää kuormitusta. (Kurki 2019, Haakana 2014 mukaan) Edellä mainitut asiat ovat esimerkkejä, joilla erityisesti raskaanliikenteen ajoneuvojen aiheuttamia liikennekuormituksia saataisiin vähennettyä, mutta yksistään nämä eivät riittäisi ongelman ratkaisemiseen. Akselimassojen lieventäminen ja renkaiden leventäminen ovat kuitenkin asioita, joihin kannattaisi muiden parannusten yhteydessä ryhtyä kuormitusten keventämisen lisäämiseksi.

### **5.3 Ratkaisujen yhteenveto**

Ratkaisuja ongelmaan on useampia, mutta käytännössä ajolinjojen optimoiminen on selvästi yksinkertaisin, tehokkain ja halvin ratkaisu. Omien ajoteiden tai kaistojen rakentaminen älyliikenteelle on tietyille väleille järkevää letka-ajo ominaisuuden täyden hyödyntämisen mahdollistamiseksi liikenteen sujuvuutta pilaamatta, mutta laajassa mittakaavassa se on erittäin raskas ja kallis hanke. Ajoneuvojen rakenteen muokkaaminen esimerkiksi renkaita leventämällä olisi myös kannattava hanke yleisessä kuvassa, mutta se ei yksin riittäisi korjaamaan ongelmaa.

Yksinomaan tierakenteen näkökulmasta ajolinjojen optimoiminen on tehokkainta koko Suomen ja myös maailman mittakaavassa. Ajolinjojen optimoinnin tehokkuus ja helppous tekee siitä ehdottomasti parhaan ja toteutuskelpoisimman ratkaisun, jota kannattaisi lähteä ajamaan eteenpäin myös autonvalmistajien keskuudessa. Vaikka ajolinjojen optimointi on ehdottomasti paras vaihtoehto nykyisessä tilanteessa ja ympäristössä, teknologian yllättävät kehitysaskelleet voivat muokata tilannetta paljon nopeallakin aikavälillä, ja tulevaisuudessa voi ilmestyä uusi vielä parempi ratkaisu.

## 6. YHTEENVETO

Työssä lähdettiin tutkimaan älyliikenteen aiheuttamaa rasisitusta tierakenteisiin nykytilanteeseen verrattuna. Koska aiheesta ei ole suuria määriä valmista tietoa, aihetta lähdettiin tutkimaan valmiita tietoja yhdistämällä tutustumalla ensin älyliikenteeseen ja sen ominaisuuksiin ja tierakenteiden tyypillisiin vaurioihin. Löydetyt ja todetut muutokset olivat odotetun laisia ja vastasivat myös löydettyjä valmiita tuloksia. Työn tavoitteena oli myös löytää mahdollisia ratkaisuja oletettuun ongelmaan.

Älyliikenteen tutkimuksissa todettiin siihen kuuluvan suuren määrän eri ominaisuuksia tutkalla toimivista liikennevaloista itseohjautuviin autoihin. Rakenteellisesti älyliikenne ei kuitenkaan tuo mukanaan kulkuvälineisiin suuria muutoksia, minkä takia tierakenteisiin vaikuttavaksi tärkeäksi muutokseksi voidaan todeta ajolinjat. Ihmisohjeistetut kulkuvälineet kulkevat ihmisen ohjaamia ajolinjoja, jotka vaihtelevat toisistaan inhimillisten ominaisuuksiensa seurauksena, mikä puolestaan vaikuttaa tiehen kohdistuviin rasisituksiin. Kun ajolinjat määräytyvät älyliikenteen seurauksena koneen valitsemana, niiden välinen vaihtelu supistuu huomattavasti ja suurin osa automaattiohjatuista ajoneuvoista ajaa samaa optimoitua ajolinjaa kaistaan nähden.

Tierakenteiden kuormituskäyttämiseen ja vauriomekanismeihin tutustumisessa todettiin älyliikenteen vaikuttavan vain liikennekuormitukseen, jonka pohjalta lähdettiin tutkimaan sen aiheuttamia vaurioita. Liikennekuormitus toimii synnyttävänä tai kasvattavana tekijänä lähes jokaisessa tienvaurioitumistyyppissä, sillä vauriot tapahtuvat yleensä usean kuormittavan tekijän yhdistelmän vaikutuksesta. Pääosin liikennekuormituksesta syntyviä vaurioita ovat päällysteen verkkohalkeama ja tien urautuminen. Nämä esiintyvät monesti yhdessä, sillä uran pohjalle syntyy helposti verkkohalkeamia. Molemmat vauriot syntyvät ja kasvavat saman pisteen ylittävien kulkuvälineiden aiheuttaman liikennekuormituksen takia, mikä tarkoittaa ajolinjojen vaihtelun supistumisen vaikuttavan suoraan verkkohalkeilun ja urautumisen syntyyn ja kasvuun.

Tierakenteiden kuormituskäyttämisestä tärkeäksi nousi myös tien pysyvä- ja palautuva muodonmuutos. Auton tai erityisesti raskaan kulkuneuvon ylityksen seurauksena tapahtuu tiehen aina painuma eli muodonmuutos, joka tietyn ajan päästä palautuu lähes normaaliksi ja vain pieni osa muodonmuutoksesta jää pysyväksi. Tähän mekanismiin perustuu myös urautumisen synty, eli useiden ylitysten aiheuttamien pysyvien muodonmuutosten summa. Tärkeää kuitenkin on, että jos seuraava kuormitus tapahtuu ennen vanhan muodonmuutoksen palautumista yhteenlaskettu pysyvä muodonmuutos kasvaa

verrattuna tilanteeseen, jossa samat kuormitukset olisivat tapahtuneet pidemmän ajanjakson välein. Älyliikenteen mukana suunnitteilla oleva raskaan liikenteen letka-ajon ominaisuus, eli useiden rekkojen jono, jota ohjataan ensimmäisestä rekasta, johtaisi tierakenteet valtavaan rasitukseen tämän ominaisuuden seurauksena.

Artikkelien ja valmiiden aiheesta löytyvien tutkimusten perusteella voidaan todeta, että älyliikenteen tuleminen liikenteeseen tulee rasittamaan tierakenteita supistuvan ajolinjojen vaihtelun takia, minkä vaikutus lisäksi vielä kertautuu esimerkiksi letka-ajon kaltaisissa ominaisuuksissa. Amerikkalaisessa aihetta tutkivassa tutkimuksessa todettiin älyliikenteen saavuttavan kriittinen väsymishalkeilu eli verkkohalkeilu piste 22 prosenttia nykyistä aiemmin ja Amerikassa suurin sallittu urautumissyvyys saavutettiin jopa 39 prosenttia nykyistä nopeammin. Huomioitavaa on, että Amerikassa kyseinen urautumissyvyys on 7,5 mm ja Suomessa vastaava arvo on pääväylillä 13 mm ja muilla teillä vielä suurempi, joten nämä arvot saavutetaan suhteutetusti vielä nopeammin. Suomen olosuhteissa merkittävä lisätekijä urautumisen ja purkaumien syntyyn on talvella syntyvä nastarengaskulutus, joka kuluttaa päällysteitä huomattavasti ja nopeuttaa urautumisen syntyä. Nastarengaskulutuksella ominaista on se, että myös henkilöautoliikenne synnyttää sitä, sillä muut vauriot syntyvät lähes poikkeuksetta raskaan liikenteen vaikutuksesta.

Ratkaisuvaihtoehtojen etsimisessä todettiin jo pienen kehityksen ja tutkimisen alla ollut autonomisten autojen ajolinjojen optimoinnin olevan helppo ja tehokas ratkaisu ongelmaan muihin mahdollisuuksiin verrattuna. Älyliikenteen ajolinjojen optimoinnissa autot ohjelmoidaan hyödyntämään tasapainoisesti kaistaa sen koko leveydeltä, mikä vähentää paikoittaista rasittumista huomattavasti. Ajolinjojen optimoinnin lopputulos on niin merkittävä, että se kasvattaa tien ikää jopa nykyiseenkin verrattuna, eli se kääntää koko ongelman toiseen suuntaan. Älyliikenteen ajolinjojen optimoiminen on yksinkertainen ja erittäin tehokas ratkaisu teiden elinajan kasvattamiseen ratkaisuttomaan ja nykyiseen tilanteeseen verrattuna. Ainut este optimoinnin lisäämiselle tällä hetkellä on, että auton valmistajat eivät juurikaan sen lisäämisestä hyödy eikä sitä myöskään heiltä vaadita, minkä takia koko ratkaisu on tällä hetkellä vain simulaation tasolla.

Älyliikenne nykyisessä muodossaan tulee aiheuttamaan merkittävää liikennekuormituksen lisäystä tierakenteille, mikä tulee lyhentämään tierakenteiden kestoa useilla vuosilla. Ongelma on siis merkittävä, mutta se on jäänyt pienemmälle huomiolle älyliikenteeseen kohdistuvien suurempien ongelmien takia. Ongelmaan löytyy kuitenkin ratkaisuja, joista käytännöllisin on ajolinjojen ohjelmoiminen eroamaan toisistaan yhdistymisen sijaan, joka yksistään kadottaisi koko ongelman ja jopa parantaisi tierakenteiden kestoa. Älyliikenteen muka tulee siis ongelmia, mutta myös ratkaisuja, kunhan ne huomioidaan ajoissa.

## LÄHTEET

- Aho, E., Lyly, L. & Mero, I. (2017). Liikenne- ja viestintäarkkitehtuuri 2030 ja 2050, Raportit ja selitykset 7/2017. Liikenne- ja viestintäministeriö. Saatavissa (viitattu 12.2.2020):<http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79795/Raportit%20ja%20selvitykset%207-2017.pdf>
- Anttila, A. (2019). Tien vauriotyypit ja korjausmenetelmät, Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Saatavilla (viitattu 5.3.2020): [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168991/Anttila\\_Aleksi.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/168991/Anttila_Aleksi.pdf?sequence=2)
- Arola, T. & Antikainen, P. (2017). Liikenteen automaation ja robotiikan kehittämistoimenpiteiden tiekartta 2017–2019, julkaisuja 10/2017. Liikenne- ja viestintäministeriö. Saatavissa (viitattu 12.2.2020): <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79868/10-2017%20Liikenteen%20automaation%20ja%20robotiikan%20kehittamistoimenpiteiden%20tiekartta%202017-2019.pdf>
- Belt, J., Lämsä, V., Savolainen, M. & Ehrola, E. (2002). Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto, Tiehallinnon selvityksiä 15/2002. Tiehallinto. Saatavilla (viitattu 5.3.2020): <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/139074/4276tie.pdf?sequence=1>
- Graeter, A., Rosenquist, M., Steiger, E. & Kulmala, R. (2017). Automated driving roadmap. ERTRAC. Saatavilla (viitattu 20.2.2020): [https://www.ertrac.org/uploads/images/ERTRAC\\_Automated\\_Driving\\_2017.pdf](https://www.ertrac.org/uploads/images/ERTRAC_Automated_Driving_2017.pdf)
- Joint Research Center (2019). The future of road transport: Implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility, EUR 29748 EN. Publications Office of the European Union. pp. 19–25. Saatavissa (viitattu 13.2.2020):<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/future-road-transport>
- Kurki, A. (2019). Liikennekuormituksen vaikutukset tierakenteeseen eri vuodenaikoina, Diplomityö. Tampereen yliopisto. Saatavilla (viitattu 5.3.2020): <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/118681/KurkiAltti.pdf?sequence=2>
- Laitinen, K., Mansikkamäki, J., Mattila, J., Vesterinen, H., Savolainen, L. & Pikkuharju, M. (2017). Tierakenteen ja maaperän kantokyky selvitykset, Toimintamalli raskaissa maantiekuljetuksissa, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 4/2017. Liikennevirasto. Saatavilla (viitattu 5.3.2020): [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134184/lts\\_2017-04\\_978-952-317-352-1.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134184/lts_2017-04_978-952-317-352-1.pdf?sequence=2)



Lehtonen, S. (2009). Raskaan liikenteen määrän vaikutus kaksikaistaisten teiden liikenteen sujuvuuteen, Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 10/2009. Tiehallinto. Saatavilla (viitattu 3.3.2020): [https://julkaisut.vayla.fi/pdf2/4000688-v-raskaan\\_liikenteen\\_maaran\\_vaikutus\\_sujuvuuteen.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf2/4000688-v-raskaan_liikenteen_maaran_vaikutus_sujuvuuteen.pdf)

Luukkonen, T., Mäkelä, T., Pöllänen, M., Kalenoja, H., Mäntynen, J. & Rantala, J. (2012). Henkilö- ja tavaraliikenteen kehityskuva 2035, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 36/2012. Liikennevirasto. Saatavilla (viitattu 6.4.2020): [https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts\\_2012-36\\_henkilo\\_ja\\_tavaraliikenteen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lts_2012-36_henkilo_ja_tavaraliikenteen_web.pdf)

Noorvand, H., Karnati, G. & Underwood, S. (2017). Autonomous vehicles: An assessment of the implication on truck positioning on flexible pavement performance and design. Transportation Research Record. Saatavilla (viitattu 24.3.2020): [https://www.researchgate.net/publication/314224638\\_Autonomous\\_Vehicles\\_Assessment\\_of\\_the\\_Implications\\_of\\_Truck\\_Positioning\\_on\\_Flexible\\_Pavement\\_Performance\\_and\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/314224638_Autonomous_Vehicles_Assessment_of_the_Implications_of_Truck_Positioning_on_Flexible_Pavement_Performance_and_Design)

Pursiainen, H. (2009). Kansallinen älyliikenteen strategia: Selvitysmiehen ehdotus. Liikenne- ja viestintäministeriö. Saatavissa (viitattu 12.2.2020):<https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/future-road-transport>

Pöyskö, T., Hurskainen, E., Lapp, T. & Vaarala, H. (2016). Automaatio ja digitalisaatio logistiikassa, kehitysnäkymiä Suomessa ja maailmalla, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 41/2016. Liikenne- ja viestintäministeriö. Saatavilla (viitattu 20.2.2020): [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/124788/lts\\_2016-41\\_978-952-317-307-1.pdf?sequence=2](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/124788/lts_2016-41_978-952-317-307-1.pdf?sequence=2)

Riikonen, M. (2014). Telimassojen korottamisen vaikutus tierakenteen vasteisiin-laskennallinen tarkastelu, Diplomityö. Aalto yliopisto. Saatavilla (viitattu 23.3.2020): <https://core.ac.uk/download/pdf/80711626.pdf>

Sorokin, H. (2020). Autonomisen ajamisen nykytila ja tulevaisuuden näkymät, Insinööri-työ. Metropolia. Saatavissa (viitattu 13.2.2020):[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/279684/sorokin\\_henri.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/279684/sorokin_henri.pdf?sequence=2)

Vuorimies, N., Kalliainen, A., Rossi, J., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P. & Saarenketo, T. (2018). Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuosina 2015–2017, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 63/2018. Liikennevirasto. Saatavilla (viitattu 15.3.2020): [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/165324/LTS%2063-2018\\_978-952-317-652-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/165324/LTS%2063-2018_978-952-317-652-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Vuorimies, N., Kurki, A., Kolisoja, P., Varin, P. & Saarenketo, T. (2019). Tierakenteen rasittuminen yli 76 tonnin HCT-yhdistelmien koekuormituksissa vuonna 2018, Väyläviraston tutkimuksia 17/2019. Väylävirasto. Saatavilla (viitattu 5.3.2020): [https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/173131/vt\\_2019-17\\_978-952-317-735-2.pdf?sequence=1](https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/173131/vt_2019-17_978-952-317-735-2.pdf?sequence=1)

Zhou, F., Hu, S., Xue, W. & Flintsch, G. (2019). Optimizing the lateral wandering of automated vehicles to improve roadway safety and pavement life. Texas A&M Transportation institute. Saatavilla (viitattu 24.3.2020): [https://www.vtti.vt.edu/utc/safe-d/wp-content/uploads/2019/12/02-008\\_Final-Research-Report\\_Final.pdf](https://www.vtti.vt.edu/utc/safe-d/wp-content/uploads/2019/12/02-008_Final-Research-Report_Final.pdf)