



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Liikenneonnettomuuksien alueellinen vaihtelu ja liittymäonnettomuuksiin vaikuttavat tekijät Turussa ja Oulussa

Elli Vikstedt

Maantiede

Pro gradu -tutkielma

Laajuus: 30 op

Ohjaaja: Niina Käyhkö

05.11.2024

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maantiede

Tekijä: Elli Vikstedt

Otsikko: Liikenneonnettomuuksien alueellinen vaihtelu ja liittymäonnettomuuksiin vaikuttavat tekijät Turussa ja Oulussa

Ohjaaja: Niina Käyhkö

Sivumäärä: 65 sivua + liitteet 4 sivua

Päivämäärä: 05.11.2024

Liikenneturvallisuus on yhteiskunnallisesti merkittävä aihe ja turvallisuuden parantaminen vaikuttaa hyvinvoinnin edistämiseen monella eri tasolla. Tieliikenneonnettomuuksista aiheutuu sekä sosiaalisia että taloudellisia kustannuksia ja onnettomuudet kuormittavat myös terveydenhuolto- ja pelastuspalveluita. Suomessa liikenneonnettomuuksien määrä on ollut laskussa, mutta tavoitteena on vähentää onnettomuuksia entisestään ja minimoida liikennekuolemien määrä. Jotta liikenneturvallisuutta voidaan parantaa, on tärkeää tietää missä onnettomuudet tapahtuvat ja mitkä tekijät ovat johtaneet onnettomuuksien syntyyn. Liikenneympäristö on yhteydessä liikenneonnettomuuksiin ja kompleksi liikenneympäristö lisää onnettomuuden riskiä etenkin liittymissä, jotka ovat tieverkoston vaarallisimpia osia.

Tämän tutkielman tavoitteena on tarkastella tieliikenneonnettomuuksien alueellista vaihtelua sekä arvioida liittymäonnettomuuksiin vaikuttavia liikenneympäristön tekijöitä Turussa ja Oulussa. Alueellista onnettomuustiheyttä tarkastellaan paikkatietomenetelmien avulla koko tutkimusalueilla sekä tieverkostojen sisällä. Eri liikenneympäristön tekijöiden yhteyttä onnettomuuksien määrään liittymissä käsitellään yhdistämällä paikkatietotyökaluja ja tilastollista mallinnusta, tarkemmin lineaarista regressioanalyysia. Lisäksi työssä vertaillaan onnettomuuksien alueellista jakautumista sekä eri ympäristömuuttujien merkitystä liittymien turvallisuuteen kaupunkien välillä.

Tutkimustulosten perusteella onnettomuustiheys on suurin keskustassa ja sen läheisyydessä sekä isoimpien liikenneväylien ympärillä molemmissa kaupungeissa. Onnettomuustiheydessä esiintyi kaupunkien välisiä eroja, jotka korreloivat pitkälti asukastiheyden kanssa. Oulussa asutus on levittäytynyt laajemmalle alueelle ja myös onnettomuudet ovat jakautuneet tasaisemmin. Turussa onnettomuudet ovat keskittyneet tiheimmin keskustan läheisyyteen, missä on eniten asukkaita. Tulosten pohjalta voidaan tiivistää, että kompleksi liikenneympäristö, joka vaatii liikenteenkäyttäjiltä paljon havainnointia ja reagointia, lisää onnettomuuden riskiä kaupunkialueen liittymissä. Kompleksia liikenneympäristöä luonnehtivat runsas kaistojen ja liikennemerkkien määrä sekä lyhyet liittymien väliset etäisyydet. Lisäksi onnettomuuksien riskin todettiin kasvavan nopeusrajoitusten noustessa. Tutkielman perusteella käytetyt menetelmät ja niiden yhdistäminen soveltuu hyvin liikenneonnettomuuksien tarkasteluun kaupunkiympäristössä.

Avainsanat: Liikenneturvallisuus, tieliikenneonnettomuus, liikenneympäristö, paikkatieto, hotspot

Master's thesis

Subject: Geography

Author: Elli Vikstedt

Title: Spatial variation in traffic accidents and factors contributing to intersection accidents in Turku and Oulu

Supervisor: Niina Käyhkö

Number of pages: 65 pages + 4 pages of appendices

Date: 05.11.2024

Traffic safety is a significant research topic and improving safety contributes to the promotion of well-being on many levels. Road traffic accidents cause both social and economic costs while also placing a burden on healthcare and emergency services. Although the number of traffic accidents in Finland has been decreasing, the goal is to further reduce accidents and minimize traffic fatalities. In order to improve traffic safety, it is important to understand where accidents occur and what factors contribute to their occurrence. The traffic environment is linked to traffic accidents, and complex traffic environments increase the risk of accidents, particularly at intersections, which are the most dangerous parts of the road network.

The aim of this thesis is to examine the spatial distribution of traffic accidents and to assess the traffic environment factors that affect intersection accidents in Turku and Oulu. The spatial density of accidents is analyzed using GIS methods across the entire study areas as well as within the road networks. The relationship between various traffic environment factors and the number of accidents at intersections is examined by combining GIS tools with statistical modeling, specifically linear regression analysis. Additionally, the study compares the spatial distribution of accidents and the significance of different traffic environment factors for intersection safety between the two cities.

The results indicate that accident density is highest in city centers and their surroundings, as well as around the largest traffic routes in both cities. Differences in accident density between the cities were observed, largely correlating with population density. The population is more spread out in Oulu and accidents are more evenly distributed. In Turku, accidents are more concentrated near the city center where the population density is the highest. Based on the results, it can be summarized that a complex traffic environment requiring extensive observation and reaction from road users increases the risk of accidents at urban intersections. Complex traffic environments can be characterized by a high number of lanes and traffic signs, as well as short distances between intersections. Additionally, the risk of accidents was found to increase with higher speed limits. The study concludes that the methods used along with their combination are well-suited for analyzing traffic accidents in urban environments.

Key words: Traffic safety, road traffic accident, traffic environment, GIS, hotspot

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Teoreettinen viitekehys	9
2.1	Liikenneturvallisuus ja onnettomuustutkimuksen käsitteet	9
2.2	Onnettomuuksiin vaikuttavat tekijät	10
2.3	Onnettomuuskeskittymien tarkastelu	13
2.4	Liittymien vaikutusalueen tarkastelu	15
2.5	Onnettomuuksiin vaikuttavien tekijöiden arviointi tilastollisella mallinnuksella	16
3	Aineistot ja menetelmät	19
3.1	Työnkulku	19
3.2	Tutkimuskaupungit	20
3.3	Tutkimusalueiden rajaus	24
3.4	Aineistot	25
3.5	Kernel Density -analyysit	27
3.6	Liittymäpisteiden tuottaminen	28
3.7	Onnettomuuksien määrän laskenta buffereilla	29
3.8	Liittymäotosten valinta	30
3.9	Ympäristömuuttujien arvojen määrittäminen	31
3.10	Lineaarinen regressiomallinnus	34
4	Tulokset	36
4.1	Onnettomuuksien alueellinen jakautuminen	36
4.2	Liittymäpisteiden sijaintitarkkuus ja tarkasteluun valitut liittymät	39
4.3	Onnettomuuksien määrä ja jakautuminen liittymien vaikutusalueilla	41
4.4	Ympäristömuuttujien jakaumat liittymissä	44
4.5	Ympäristömuuttujien vaikutuksen arviointi onnettomuuksien määrään	47
5	Tulosten tarkastelu	52
5.1	Ympäristömuuttujien vaikutus onnettomuuksiin	52

5.2	Aineistojen saatavuus ja rajoitteet	54
5.3	Menetelmien soveltuvuus	56
5.4	Tulosten merkitys ja jatkotutkimustarpeet	57
6	Johtopäätökset	59
	Kiitokset	60
	Lähteet	61
	Liitteet	66
	Liite 1 Tutkimusalueiden raja	66
	Liite 2 Kaistojen laskennan poikkeustilanteet	68
	Liite 3 Ympäristömuuttujien arvon määrittäminen muiden muuttujien osalta	69

1 Johdanto

Tieliikenne on riskialttein liikennemuoto ja tähän vaikuttavat useat eri taustasyyt, kuten riskinotto, ylinopeus ja turvalaitteiden puutteellinen käyttö (Rekola ym. 2022: 12). Liikenneonnettomuuksien seurauksia ovat esimerkiksi henkilö- ja omaisuusvahingot (Elvik 2004). Maailman terveysjärjestö WHO:n mukaan tieliikenneonnettomuudet ovat maailmanlaajuisesti yleisin kuolinsyy 5–29-vuotiaiden keskuudessa ja 12. yleisin kuolinsyy kaikkia ikäryhmiä tarkasteltaessa (Global status report on road safety 2023). Liikenneturvallisuus on parantunut Suomessa merkittävästi viime vuosikymmenten aikana (Rekola ym. 2022: 68). Euroopan Unionin liikenneturvallisuuden pääsuuntana pidetään nollavisiota, jonka tavoitteena on, että kaikki liikennemuodot olisivat niin turvallisia, että tieliikenteen kuolemien määrä saataisiin vähennettyä nolnaan vuoteen 2050 mennessä (Rekola ym. 2022). Koska jokaisella tienkäyttäjällä tulisi olla oikeus liikenneväylien turvalliseen käyttöön, kehitettävää löytyy.

Jotta liikenneturvallisuutta voidaan parantaa, on keskeistä ymmärtää missä, miten ja milloin onnettomuuksia tapahtuu (Xie & Yan 2008). Liikenneonnettomuuksien tilastoinnilla ja onnettomuusanalyysillä on suuri rooli sekä alueellisessa että paikallisessa tieturvallisuustyössä (Rekola ym. 2022). Paikkatietomenetelmät tarjoavat työkaluja, joilla voidaan tutkia liikenneonnettomuuksien alueellista jakautumista ja paikantaa onnettomuuskeskittymiä (Al-Omari ym. 2020). Yhdistämällä paikkatietoanalytiikkaa ja tilastollisia menetelmiä voidaan tarkastella onnettomuusalttiita kohteita sekä tekijöitä, jotka lisäävät onnettomuuksien määrää (Pritee & Garg 2017). Riskialttiiden tieverkoston osien paikantaminen on tärkeää, jotta liikenneturvallisuustyön resursseja voidaan kohdentaa tieverkoston onnettomuusalttiisiin kohteisiin ja pyrkiä kehittämään niitä esimerkiksi liikenneympäristöä muokkaamalla (Hobday ym. 2017).

Liikenneonnettomuuksien taustalla on liikenteenkäyttäjien virheellinen toiminta liikenteessä, mihin vaikuttavat useat tekijät. Kuskin henkilökohtaisten ominaisuuksien ja päätösten lisäksi liikenneympäristö vaikuttaa liikenteenkäyttäjien toimintaan ja sitä kautta liikenneturvallisuuteen. Liikenneympäristön havainnoinnilla on suuri merkitys turvallisuuden kannalta ja havainnointi vaikeutuu suurissa nopeuksissa (Rekola ym. 2022). Liittymät edustavat tieliikenneverkostojen onnettomuusalttiimpia osia (Oh ym. 2004). Liittymällä tarkoitetaan tieverkoston osaa, jossa kaksi tai useampi liikenneväylää kohtaavat ja jossa siirtyminen liikenneväylältä toiselle on mahdollista (Tasoliittymät: 2001: 8). Liittymien turvallisuuteen vaikuttavia liikenneympäristön tekijöitä ovat esimerkiksi liittymän rakenne (Rekola ym. 2022: 72) sekä liittymien tiheys tieverkostossa (Ojala 2003: 238). Suomen Liikenneturvallisuus-

strategiassa liikenneinfrastruktuurin kehittämistä pidetään yhtenä tärkeimmistä keinoista edistää liikenneturvallisuutta (Rekola ym. 2022: 11). Jotta voidaan selvittää mitkä liikenneympäristön tekijät altistavat onnettomuuksille liittymissä, on tärkeää tutkia onnettomuusalttiiden liittymien yhdistäviä tekijöitä.

Tämän opinnäytteen päätavoitteena on ymmärtää tieverkoston onnettomuuskeskittymien alueellista vaihtelua ja arvioida onnettomuusalttiiden liittymien liikenneympäristön tekijöitä kahdessa suomalaisessa kaupungissa, Turussa ja Oulussa. Tarkasteltavat alueet ovat suhteellisen suuria kaupungeja, koska työn tarkoituksena on keskittyä nimenomaan kaupunkiympäristön tieverkostojen vaarallisimpiin kohtiin, joissa liikenneturvallisuutta tulisi kehittää. Liikenneonnettomuuksia käsitellään seuraavien tutkimuskysymysten kautta:

1. Miten liittymiä ja niiden vaikutusalueiden onnettomuuksia voidaan paikantaa paikkatietomenetelmillä?
2. Mihin onnettomuudet keskittyvät ja miten onnettomuusaltteimmat liittymät jakautuvat alueellisesti Turussa ja Oulussa?
3. Mitkä liikenneympäristön tekijät luonnehtivat onnettomuusalttiita liittymiä Turussa ja Oulussa?

2 Teoreettinen viitekehys

2.1 Liikenneturvallisuus ja onnettomuustutkimuksen käsitteet

Perinteisesti liikenneturvallisuudella tarkoitetaan tieliikenteen turvallisuutta, mutta laajemmin katsottuna se käsittää kaikkien liikennemuotojen turvallisuuden, eikä rajoitu vain tieliikenteeseen (Rekola ym. 2022: 15, 26–27). Liikenneonnettomuudella viitataan liikennetapahtumaan, jossa on ollut osallisena vähintään yksi liikkuva kulkuneuvo, ja mikä on johtanut henkilövahinkoihin, omaisuusvahinkoon tai molempiin (Salli ym. 2008). Onnettomuuksien seurauksia ovat esimerkiksi taloudelliset menetykset, elämänlaadun heikkeneminen ja henkinen ahdinko, mitkä voivat ulottua uhrin lisäksi myös hänen lähipiiriinsä (Liikenneturvallisuus kaavoituksessa 2006: 8). Kun liikenteessä tapahtuu onnettomuus, pyritään selvittämään onnettomuustilanteeseen johtaneita tai sitä edesauttaneita tekijöitä (Roine & Luoma 2009: 9).

Liikenneonnettomuuksien tutkimuksessa on kehitetty erilaisia teorioita, jotka pyrkivät selittämään onnettomuuden syntyyn vaikuttavia tekijöitä (Roine & Luoma 2009: 9). Teorioiden ja onnettomuuksien ymmärtämisen kannalta tärkeitä käsitteitä ovat liikennejärjestelmä, liikenneinfrastruktuuri ja liikenneympäristö. Liikennejärjestelmä koostuu tienkäyttäjistä, ajoneuvoista, liikenneympäristöstä sekä järjestelmän säätelystä, joka kattaa esimerkiksi lait (Roine & Luoma 2009: 13–14). Lisäksi liikenneinfrastruktuuri on tärkeä osa liikennejärjestelmää. Tieliikenteessä liikenneinfrastruktuuri koostuu liikenteen mahdollistavista fyysisistä komponenteista, joihin kuuluu esimerkiksi tiet, valaistus sekä liikenteen hallintalaitteet, kuten liikennevalot (Rodrigue 2020: 8, 128). Liikenneympäristö voidaan käsittää liikenneinfrastruktuuria laajemmin toimintaympäristönä: liikenneympäristöstä puhuttaessa voidaan tarkastella fyysisten komponenttien lisäksi esimerkiksi ajonopeutta ja näkyvyyttä.

Yksi onnettomuustutkimuksessa yleisimmin käytetyimmistä teorioista on järjestelmäteoria. Järjestelmäteorian mukaan onnettomuus voidaan nähdä seurauksena liikennejärjestelmän komponenttien välisen vuorovaikutuksen epäonnistumisesta (Kulmala 2010). Järjestelmäteorian keskeinen ajatus on, että yhtä liikennejärjestelmän osaa ei voida pitää toista tärkeämpänä, vaan järjestelmä tulee nähdä kokonaisuutena toimivan ja turvallisen liikenteen takaamiseksi (Kulmala 2010). Roine ja Luoma (2009: 13) tuovat esille järjestelmäteorian näkökulman, jossa epäonnistumiset liikenteessä johtuvat liikennejärjestelmän heikosta suunnittelusta: virheitä sattuu, koska suunnittelu ei vastaa ihmisten tarpeita ja ominaisuuksia.

Vaikka järjestelmäteoria onkin teorioista eniten hyödynnetty, ihmisen toiminta on kuitenkin muihin liikennejärjestelmän osiin verrattuna hyvin monimutkaista ja tästä syystä järjestelmäajattelun vahvistukseksi on kehitetty käyttäytymisteoria (Roine & Luoma 2009: 16). Onnettomuustilanteessa havainnoinnin lisäksi liikenteen käyttäjän vastuulle jää tiedonkäsittely, päätöksenteko, reagointi ja valintojen toteuttamien käytännössä (Kulmala 2010). Liikenneympäristön kompleksisuus viittaa tiedon määrään, jota liikenteenkäyttäjien tulee prosessoida tietyssä ajassa (Elvik 2004). Kompleksi liikenneympäristö voi siis heikentää liikenneturvallisuutta, koska liikenteenkäyttäjän vastuu kasvaa monimutkaisen toimintaympäristön myötä. Jotta turvallisuutta voidaan edistää liikennejärjestelmän tai liikennekäyttäytymisen näkökulmasta, tulee selvittää mitkä liikenneympäristön ominaisuudet voivat johtaa liikenteenkäyttäjän virheeseen ja heikentää turvallisuutta liikennejärjestelmän eri osissa. On kuitenkin tärkeää huomata, että kaikkia onnettomuuksia ei voi estää vain liikenneympäristöä kehittämällä, sillä onnettomuuksien syntyyn on monia selittäviä tekijöitä (Liikenneturvallisuus kaavoituksessa 2006: 21).

2.2 Onnettomuuksiin vaikuttavat tekijät

Onnettomuustutkimuksessa keskeistä on, että tieliikenneonnettomuudet ovat monisyisiä ja usein ei ole vain yhtä tekijää, johon onnettomuustilanteiden ehkäisyssä pitäisi keskittyä (Kulmala 2010). Yleisesti tieliikenneonnettomuuksien syntyyn vaikuttavat tekijät liittyvät liikenteen ja tien ominaisuuksiin, liikenneympäristöön, tienkäyttäjiin sekä ajoneuvoihin (Wang ym. 2013).

Liikenteenkäyttäjän vastuulla on monia liikenneturvallisuuteen vaikuttavia tekijöitä. Omien ajotaitojen yliarviointi sekä välinpitämättömyys liikennesääntöihin liittyen, kuten ylinopeus, turvalaitteiden käytön puute tai päihteiden käyttö voivat vaikuttaa onnettomuustilanteen syntyyn (Rekola ym. 2022: 17). Liikennesääntöjen noudattamiseen liittyen on tärkeää huomioida, että liikenteessä on myös sellaisia käyttäjäryhmiä, joille liikennesääntöjen yksityiskohdat eivät ole tuttuja, esimerkiksi ajokortittomat henkilöt ja lapset (Ojala 2003: 41). Myös kuskin iän on todettu vaikuttavan onnettomuusriskiin (Mao ym. 2019; Casado-Sanz ym. 2020). Lisäksi onnettomuuden taustalla olevia kuljettajaan liittyviä tekijöitä voivat olla esimerkiksi sairaus, väsymys, mielentila tai alkoholin käyttö (Rekola ym. 2022: 73). Kuljettajan lisäksi myös ajoneuvon ja liikenneympäristön ominaisuuksilla on tärkeä asema vaaratilanteiden kannalta. Älykkäisiin liikennejärjestelmiin kuuluu sekä liikenneinfrastruktuurin osia, kuten päivittyvät nopeusrajoitus- ja varoituskyltit, että kulkuneuvojen

ominaisuuksia, kuten mukautuvat vakionopeudensäätimet, nopeushälyttimet, lukkiutumattomat ABS-jarrut ja alkolukot (Kulmala 2010). Lisäksi ajoneuvojen kehittyneet tutka- ja kameraominaisuudet edistävät turvallisuutta (Wang ym. 2023). Tällaisilla teknisillä ominaisuuksilla voidaan pyrkiä ehkäisemään onnettomuustilanteiden syntyä pienentämällä inhimillisten virheiden mahdollisuutta.

Ajonopeus nähdään yhtenä merkittävimmistä tekijöistä onnettomuustilanteissa. Ajonopeus vaikuttaa negatiivisesti turvallisuuteen, sillä suurissa nopeuksissa vaaratilanteiden havaitseminen sekä niihin reagointi vaikeutuu ja välimatkojen sekä nopeuksien arviointivirheet kasvavat (Rekola ym. 2022). Useimmissa maissa nopeuksien alentaminen ja nopeusrajoitusten noudattamisen edistäminen ovat tärkeimpiä keinoja liikenneturvallisuuden edistämiseksi (Vadeby & Forsman 2016: 164). Ajonopeuden lisäksi liikennemäärä on usein merkittävä tekijä onnettomuustilanteissa (Ojala 2003: 42), ja liikennemäärällä on suuri vaikutus turvallisuuteen etenkin liittymissä (Oh ym. 2004). Liikennemäärän on todettu selittävän onnettomuuksien määrää esimerkiksi Maon ym. (2019) ja Ferkon ym. (2019) tutkimuksissa.

Liikennevirtojen lisäksi sää voi vaikuttaa onnettomuuksien esiintymiseen. Keliolosuhteista esimerkiksi lumi, sateet, tuuli sekä sumu voivat vaikuttaa onnettomuuksien syntyyn (Xie & Yan 2008). Koska tienpinnan kitka pienenee heikolla ajokelillä, on myös ajonopeuden merkitys onnettomuuden synnyssä erityisen suuri kelin ollessa huono (Salli ym. 2008). Säätilan lisäksi myös tienpinnan ominaisuudet ja huoltotoimenpiteet vaikuttavat onnettomuuden riskiin (Salli ym. 2008). Muita ajo-olosuhteisiin liittyviä tekijöitä ovat katuvalaistus ja katujen lämmitys, joilla voidaan pyrkiä parantamaan turvallisuutta (Ojala 2003: 231–232). Säästä johtuva heikko näkyvyys voi vaikuttaa muun liikenteen huomioon lisäksi liikenteenkäyttäjien kykyyn tulkita liikennemerkkejä, mikä voi osaltaan heikentää turvallisuutta (Ferko ym. 2019).

Koska onnettomuudet ovat usein seurausta tahattomasta virheestä liikenteessä, onnettomuuden synty on usein linkitettävissä liikenneympäristöön tai sen virheelliseen arviointiin. Kompleksi liikenneympäristö lisää liikenteenkäyttäjän tarvetta havainnoida ja reagoida liikenteessä. Kaistojen määrä on yksi esimerkki tekijöistä, jotka lisäävät reagoinnin tarvetta: kun kaistoja on enemmän, kuljettaja joutuu vaihtamaan kaistaa useammin ja suunnittelemaan liikkumistaan ennakkoon (Megat-Johari ym. 2018). Esimerkiksi Dixon ym. (2009) totesivat tutkimuksessaan kaistanvaihdon olleen taustasyynä monissa onnettomuustilanteissa, joissa liikenneympäristö oli muutenkin haastava ja tarkkailtavaa oli paljon. Kaistojen määrän lisäksi puutteelliset tiemerkinnot voivat lisätä onnettomuusriskiä (Casado-Sanz ym. 2020)

Liikenneympäristön turvattomuutta tutkitaan usein siellä, missä onnettomuuksia tapahtuu eniten. Liittymät ovat tienkäyttäjien kohtaustilanteita, joissa onnettomuuden riski on suurempi muihin tieverkoston osiin verrattuna (Hobday ym. 2017). Liittymissä liikenteen-käyttäjien havainnoinnin ja reagoinnin merkitys kasvaa. Liittymiä lähestyessä tienkäyttäjä joutuu muun liikenteen havainnoinnin lisäksi kiinnittämään huomiota nopeuden alentamiseen, reagoimaan liikennevaloihin, keskittymään käännöksiin ja samalla tekemään osansa siihen, että liikenne olisi sujuvaa (Oh ym. 2004). Liittymän rakennetta pidetään Rekolan ym. (2022: 72) mukaan yhtenä merkittävistä liikenneympäristön riskitekijöistä onnettomuustilanteissa. Rakenteen lisäksi liittymien välisellä etäisyydellä on merkitystä, sillä liian lyhyet liittymävälit voivat lisätä onnettomuusriskiä etenkin pääväylillä (Ojala 2003: 238). Liittymien määrää rajoittamalla voidaan pyrkiä edistämään liikenneturvallisuutta (Tasoliittymät 2001: 12). Liittymän rakenteen ja etäisyyksien huolellisen suunnittelun lisäksi esimerkiksi liikennevalot ovat yksi keino kehittää liittymien turvallisuutta ja erilaiset tunnistimet mahdollistavat myös liikennevalojen reagoinnin liikenteen vaihteluihin myös reaaliajassa (Ojala 2003: 54, 225).

Liikenneympäristön turvallisuuteen vaikuttaa myös näkyvyys, jota voi rajoittaa esimerkiksi kasvillisuus tai rakennukset, ja huono näkyvyys lisää onnettomuusriskiä erityisesti liittymissä (Ojala 2003: 238, 240) Etenkin kaupunkialueella tienvierustat ovat täynnä erilaisia objekteja, kuten pylviä, vallejia ja puita, mitkä voivat lisätä liikenneympäristön turvattomuutta: jos kuljettaja menettää ajoneuvon hallinnan, myös onnettomuuden vakavuus voi kasvaa törmäysvaaran kautta (Dixon ym. 2009). Tilanpuutteen ja näköesteiden lisäksi liian jyrkkä rinteiden kaltevuus tai käänös voivat lisätä onnettomuusriskiä (Xie & Yan 2008). Toisaalta myös erilaiset heijastavat pinnat voivat lisätä vaaratilanteita puutteellisen näkyvyyden takia (Casado-Sanz ym. 2020). Yksittäisten tekijöiden lisäksi onnettomuusriskiin voivat vaikuttaa myös laajemmat liikenneympäristön ominaisuudet, kuten maankäyttö (Sun ym. 2020).

Sen lisäksi, että onnettomuuksien synty on monimutkaista, yksittäisiinkään onnettomuuksiin vaikuttavien tekijöiden merkitys ei ole aina yksiselitteinen. Esimerkiksi liikenteen teknisiin ominaisuuksiin ja kunnossapitoon liittyen turvallisuutta voidaan pyrkiä parantamaan lisäämällä tien valaistusta, mutta toisaalta valoisat olosuhteet voivat vähentää tien käyttäjien tarkkaavaisuutta liikenteessä (Wang ym. 2013). Yhtä lailla esimerkiksi kaistojen määrää lisäämällä voidaan pyrkiä parantamaan turvallisuutta erottamalla ajolinjat toisistaan, mutta toisaalta kaistan vaihdokset voivat altistaa onnettomuuksille tietyissä tilanteissa.

2.3 Onnettomuuskeskittymien tarkastelu

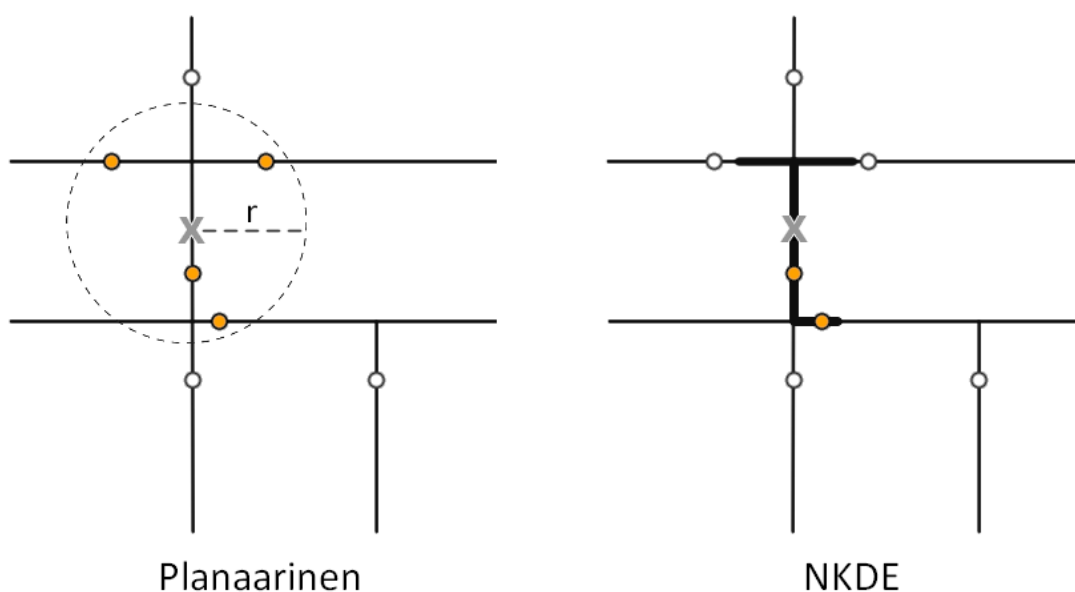
Onnettomuudet ovat harvoin sattumanvaraisia tilallisessa ja ajallisessa tarkastelussa: useimmiten onnettomuudet ovat klusteroituneet eli ne muodostavat hotspotteja (Xie & Yan 2008). Hotspot-termillä viitataan alueeseen, jossa onnettomuuksia esiintyy tiheästi (Srikanth & Srikanth 2020). Liikenneonnettomuuksien osalta hotspoteilla tarkoitetaan yleensä tiettyä tieosuutta, jossa onnettomuuksien määrä on korkea (Pritee & Garg 2017). Onnettomuuksien hotspotteja tarkastelemalla voidaan tuottaa tietoa onnettomuuksiin johtaneista syistä ja esimerkiksi liikenneympäristön ominaisuuksista onnettomuustiheissä sijainneissa (Al-Omari ym. 2020). Useat onnettomuustutkimuksissa käytetyt paikkatietomenetelmät perustuvat nimenomaan hotspottien tarkasteluun ja yksi käytetyimmistä menetelmistä on Kernel Density -analyysi (Ferreira-Vanegas ym. 2022).

Kernel Density Estimation- eli lyhennettynä KDE-analyysi pohjautuu pistemäisten kohteiden laskemiseen, jonka perusteella luodaan pisteiden tiheysarviota kuvaava jatkuva pinta (Harirforoush & Bellalite 2016). Analyysi pohjautuu K-funktioon, jossa tarkastelupisteen ympärillä olevia onnettomuuspisteitä käytetään tiheysarvion laskentaan ympäröivän ”naapuruston” avulla: mitä lähempänä onnettomuuspiste on tarkastelupistettä, sitä suurempi painotus onnettomuuspisteellä on tiheysarviossa (Xie & Yan 2008). Suurella naapuruston koolla voidaan tehdä hotspottien tarkastelua laajemmassa skaalassa, ja paikallisempaa onnettomuustiheyden tarkastelua varten kannattaa valita pienempi naapuruston koko (Xie & Yan 2008). Naapurusto kuvaa siis alueen kokoa, jolta onnettomuudet huomioidaan jokaisen tarkastelupisteen kohdalla laskennassa. Analyysiin tulee valita naapuruston koon lisäksi solukoko, joka vaikuttaa lopputuloksen selkeyteen ja resoluutioon (Srikanth & Srikanth 2020). Parametrit tulee aina valita tapauskohtaisesti datan ja tutkimusalueen mukaan. Analyysin tuloksena on visuaalinen esitys alueen onnettomuustiheydestä, missä onnettomuuksien tiheysarviota kuvataan tyypillisesti käyttämällä eri värejä (Srikanth & Srikanth 2020).

Perinteisesti Kernel Density -analyysia hyödynnetään planaarisesti. Planaarisessa analyysissä onnettomuuksia tarkastellaan euklidisten etäisyyksien avulla tarkastelupisteestä eli linnuntietä pitkin (Zheng 2023). Onnettomuustiheys määritetään ja sitä painotetaan sen mukaan, mikä on onnettomuuspisteiden välinen euklidinen etäisyys: mitä lyhempi välimatka tarkastelupisteen ja onnettomuuspisteen välillä on linnuntietä pitkin, sitä suuremmaksi tiheysarvio kasvaa (Zheng ym. 2023). Planaarisen Kernel Density -analyysin tuloksena ovat vyöhykkeet, jotka kuvaavat onnettomuustiheyttä koko alueella (Zheng ym. 2023).

Planaarisen Kernel Density -analyysin lisäksi menetelmää voidaan hyödyntää myös verkostossa. Verkostomuotoisen NKDE-analyysin (Network Kernel Density Estimation) avulla voidaan kartoittaa tarkemmin verkostomaisen alueen eri osien hotspotteja (Zheng ym. 2023). Planaarista tarkastelua voidaan ajatella kaksiulotteisena, kun taas NKDE-analyysin tarkastelu tapahtuu ikään kuin yksiulotteisesti, esimerkiksi tieverkon osaa pitkin, nimenomaan siellä missä onnettomuudet tapahtuvat (Shahi ym. 2023). Planaarisessa analyysissä onnettomuuksien tiheysarvio lasketaan ympäröivien pisteiden perusteella myös niiltä alueilta, joissa onnettomuuksia ei tapahdu. Planaarisessa versiossa onnettomuuksia tarkastellaan siis pinta-alayksikön alueella tietyllä etäisyydellä tarkastelupisteestä, kun taas NKDE-versiossa tarkastelu tapahtuu tieverkoston osaa kohti. NKDE-analyysissä onnettomuuspuisteiden tarkastelu etäisyys määrittyy tieverkostoa pitkin, eikä euklidisen etäisyyden avulla (Xie & Yan 2008).

Planaarisen ja verkostomuotoisen Kernel Density -menetelmän eroa havainnollistetaan kuvassa 1, jossa mustat viivat kuvastavat tieverkostoa ja ympyräpisteet onnettomuuksien sijainteja. Kuvassa vasemmalla näkyy esimerkki tilanteesta, jossa onnettomuuksia tarkastellaan perinteisesti planaarisella Kernel Density -analyysillä. Oranssit pisteet kuvastavat niitä onnettomuuksia, jotka huomioidaan onnettomuuksien tiheysarvion laskemiseen pisteessä X, kun tarkastelualue on ympyrä, jonka säde on r (katkoviivoilla kuvattu ympyrä kuvassa). Valkoiset pisteet taas kuvaavat niitä onnettomuuksia, jotka jäävät tiheyslaskennan naapuruston ulkopuolelle pisteessä X, koska ne ovat r :n avulla määritellyn ympyrän ulkopuolella.



Kuva 1. Planaarisen Kernel Density- (vas.) ja verkostomuotoisen NKDE-analyysin (oik.) erot tiheysarvion laskennassa (mukaillen Xie & Yan 2008: 398).

Kuvan 1 oikealla puolella tiheyslaskenta tapahtuu tieverkoston sisällä. Oranssit pisteet ovat jälleen niitä onnettomuuksia, joita käytetään onnettomuuksien tiheysarvion määrittämiseen pisteessä X ja valkoiset ovat vastaavasti pisteen X tarkastelun ulkopuolelle jääviä onnettomuuksia. Tarkastelualue on ympyrän sijaan lihavoitu osa tieverkostoa pisteen X ympärillä, mikä on määritetty etäisyytenä tieverkostoa pitkin. Erona planaariseseen tarkasteluun on se, että tarkastelualue ei sisällä lainkaan tieverkoston ulkopuolelle ulottuvaa aluetta, vaan tarkastelussa onkin pelkästään tieverkoston tietty osa. Vasemmassa ja oikeassa esimerkissä on analyysimenetelmän lisäksi erona myös lopputulos. Koska NKDE-menetelmässä tarkasteluetaisyys määritetään tieverkostoa pitkin, pisteen X laskennassa huomioitavia onnettomuus pisteitä on kaksi vähemmän kuin planaarisessa esimerkissä. NKDE-menetelmällä pystyttiin määrittämään tarkemmin haluttu alue, jolta pisteitä huomioidaan onnettomuuksien tiheysarvioon. Käytettävän analyysimenetelmän lisäksi molemmissa tapauksissa käytettävien parametrien määrittelyllä on suuri vaikutus analyysin lopputulokseen.

Zhengin ym. (2023) mukaan NKDE-analyysi sopii hotspottien tarkasteluun pienemmässä mittakaavassa, koska tällöin euklidisen etäisyyden ja verkostoa pitkin mitatun etäisyyden ero korostuu. NKDE-analyysin käyttöä suositellaan etenkin, jos on tarve saada tarkkaa tietoa liittymistä tai tieverkoston eri osista (Shahi ym. 2023). Xie ja Yan (2008) huomauttavat, että verkostomuotoisen analyysimenetelmän etuna on se, että se ei kata alueita varsinaisen tapahtuma-alueen (esim. tieverkosto) ulkopuolelta. Kuvan 1 esimerkissä verkostomuotoisella tarkastelussa pystyttiin rajaamaan laskentaetaisyyttä tarkemmin, jolloin lopputuloksesta on helpompi paikantaa esimerkiksi onnettomuusalttiita liittymiä tai muita tieverkoston osia verkoston sisällä. Lisäksi verkostomuotoisen analyysin lopputuloksesta voi olla helpompi hahmottaa onnettomuushotspottien sijoittumista, sillä se peittää taustakartan vain tieverkoston osalta. Planaarisen ja verkostotyypin analyysin tuloksia toisiinsa vertaamalla voidaan saada vielä tarkempaa tietoa onnettomuuskeskittymistä (Zheng ym. 2023).

2.4 Liittymien vaikutusalueen tarkastelu

Jos onnettomuustutkimusta tehdään liittymissä, onnettomuusmäärää voidaan tarkastella liittymien vaikutusalueiden sisällä. Bufferianalyysia on hyödynnetty etenkin liittymäonnettomuuksiin keskittyneessä onnettomuustutkimuksessa. Liittymäpisteiden ympärille voidaan luoda liittymien vaikutusalueita kuvaavat bufferit, joiden sisältä lasketaan onnettomuuksien määrä liittymän alueella (Megat-Johari ym. 2018). Bufferien avulla voidaan myös määrittää ympäristömuuttujien arvoja liittymien vaikutusalueilla, mitä voidaan

myöhemmin hyödyntää onnettomuuksien määrän ja ympäristömuuttujien välisen suhteen tarkastelussa tilastollisella mallinnuksella (Megat-Johari ym. 2018).

Tyypillisesti hyödynnetään pyöreitä, ympyrän muotoisia buffereita. Kokeilemalla eri bufferikokoja voidaan tutkia onnettomuuksien yhteyttä liikenneympäristöön eri mittakaavoissa (Megat-Johari ym. 2018). Bufferin tulisi olla riittävän iso siten, että se kattaa koko liittymän rakenteen, vaikka liittymä olisikin monikaistainen. Toisaalta liian suuri bufferikoko voi johtaa siihen, että bufferi ei kuvasta liittymän todellista vaikutusaluetta ja ympäristömuuttujien vaihtelu bufferissa ei välttämättä vaikuta liittymän toimintaan. Erilaisia bufferikokoja on hyödynnetty kaupunkiympäristön liittymäonnettomuuksien tarkastelussa. Esimerkiksi Al-Omari ym. (2020) käyttivät tutkimuksessaan 50 m säteen pyöreitä buffereita kuvaamaan liittymien vaikutusalueita niiden keskipisteiden ympärillä. Pienempien 20 m bufferien todettiin toimivan hyvin Kangin ym. (2019) tutkimuksessa. Megat-Johari ym. (2018) testasivat tutkimuksessaan eri bufferikokojen toimintaa ja 15–30 m bufferit osoittautuivat parhaiten toimiviksi ympäristömuuttujien ja onnettomuusmäärän tarkastelussa kaupunkiympäristössä. Bufferien koko tulee aina suhteuttaa tutkittavien liittymien kokoon ja rakenteeseen.

Toisiaan leikkaavat bufferit voivat tuottaa haasteita liittymäonnettomuuksien tilastollisessa mallinnuksessa, jossa tarkasteltavat kohteet nähdään usein itsenäisinä, toisistaan riippumattomina yksikköinä (Kang 2019). Tästä syystä esimerkiksi liittymien väliset etäisyydet tutkimusalueella voivat vaikuttaa bufferien koon valintaan ja mahdollinen liittymien buffereiden päällekkäisyys tulisi huomioida tuloksissa. Haasteita voi aiheuttaa myös se, jos tutkimusalueella on hyvin vaihtelevat liittymävälit. Tällaisessa tapauksessa tiheille liittymäväleille riittävän pieni bufferikoko voi olla liian pieni kattamaan esimerkiksi ison, monikaistaisen liittymän vaikutusaluetta samalla tutkimusalueella.

2.5 Onnettomuuksiin vaikuttavien tekijöiden arviointi tilastollisella mallinnuksella

Tilastollisen mallinnuksen avulla voidaan tutkia onnettomuuksien määrän ja vakavuuden sekä onnettomuuksia selittävien muuttujien suhdetta (Ferreira-Vanegas ym. 2022). Tilastolliset mallit mahdollistavat onnettomuustiheyden mallintamisen tai ennustamisen huomioiden aluekohtaisesti vaihtelevat ominaisuudet, kuten liikenneympäristön vaihtelut (Megat-Johari ym. 2018). Yksi onnettomuustutkimuksessa käytetyimmistä tilastollisen mallinnuksen menetelmistä on regressiomallinnus (Ferreira-Vanegas ym. 2022).

Regressioanalyysin avulla voidaan tutkia esimerkiksi eri liikenneympäristön tekijöiden vaikutusta onnettomuuksien esiintymiseen (Pritee & Garg 2017). Onnettomuustutkimuksessa regressiomallinnuksen vastemuuttujana eli selitettävänä muuttujana toimii tyypillisesti onnettomuudet, joita voidaan onnettomuuksien määrän lisäksi mitata esimerkiksi kuolleisuuden avulla (Pritee & Garg 2017). Onnettomuuksia selittäviä muuttujia voivat olla esimerkiksi ajonopeus, liikennemäärä tai kuskin ikä (Ferreira–Vanegas ym. 2022). Regressioanalyysin avulla tuotettu malli ei kerro vaikutussuhteen suuntaa, eli vaikuttaako selitettävä muuttuja vastemuuttujaan vai toisinpäin, ja tästä syystä muuttujien valinta on tärkeää tehdä teorian ja kirjallisuuden perusteella (Kaakinen & Ellonen 2021a). Lineaarisen regressioanalyysin perusoletuksena on, että vastemuuttujan ja selittävien muuttujien väliset yhteydet ovat lineaarisia (Kaakinen & Ellonen 2021b). Selittävien muuttujien muunnosten avulla voidaan kuitenkin tarkastella myös mahdollisia epälineaarisia yhteyksiä: muunnoksia voidaan tehdä esimerkiksi korottamalla selittävän muuttujan arvot toiseen potenssiin tai käyttää neliöjuuri- tai logaritmimuunnosta (Kaakinen & Ellonen 2021b).

Lineaarisen regressiomallin toimivuutta voidaan arvioida esimerkiksi selitysasteen, regressiokertoimien sekä tilastollisesta merkitsevyydestä kertovien p-arvojen avulla. Mallin selitysastetta kuvataan R^2 -luvulla, joka kertoo kuinka suuren osan vastemuuttujan vaihtelusta mallin selittävät muuttujat kykenevät selittämään (Pritee & Garg 2017). Käytännössä selitysaste kuvaa siis mallin toimivuutta sen muuttujien selityskyvyn perusteella. Koska selittävien muuttujien lisääminen malliin nostaa mallin selitysastetta, vaikka vaikutus ei olisikaan todellinen, ei R^2 -luku sovellu sellaisenaan useiden mallien vertailuun (Kaakinen & Ellonen 2021a). Korjattu R^2 -luku (engl. R^2 adjusted) ottaa huomioon mallin muuttujien lukumäärän, milloin usean mallin tuloksia voidaan vertailla keskenään (Kaakinen & Ellonen 2021a). Jos tutkittavaa ilmiötä selittäviä muuttujia on paljon, R^2 -arvoa voidaan käyttää myös muuttujien vallinnassa vertailemalla eri muuttujakombinaatioita sisältävien mallien selitysasteita keskenään (Taanila 2020).

Lineaarisen regressiomallin tilastollista merkitsevyyttä kokonaisuutena voidaan mitata regressioanalyysiin kuuluvan F-testin p-arvon avulla: jos p-arvo on alle 0,05, mallia voidaan pitää tilastollisesti merkitsevänä (Taanila 2020). Myös selittävien muuttujien tilastollista merkitsevyyttä voidaan arvioida p-arvojen avulla. Jos lineaarisen regressiomallin yksittäisen muuttujien p-arvot ovat alle 0,05, muuttujat voidaan nähdä tilastollisesti merkitsevänä ja ne voidaan sisällyttää malliin (Taanila 2020). Jos muuttujan valinnalle on vahva teoriapohja, malliin voidaan sisällyttää myös muuttujia, joiden p-arvo on hieman yli 0,05 raja-arvon (Taanila

2020). Lisäksi mallin toimivuutta voidaan arvioida mallin virhearvojen avulla. Yksi regressiomallinnuksessa käytetyistä virhearvoista on RMSE eli keskineliövirheen neliöjuuri (engl. Root Mean Square Error), joka kuvaa regressiomallin ennustamien arvojen ja havaittujen vastemuuttujan arvojen eroa. RMSE-arvolla voidaan siis arvioida mallin ennustetarkkuutta.

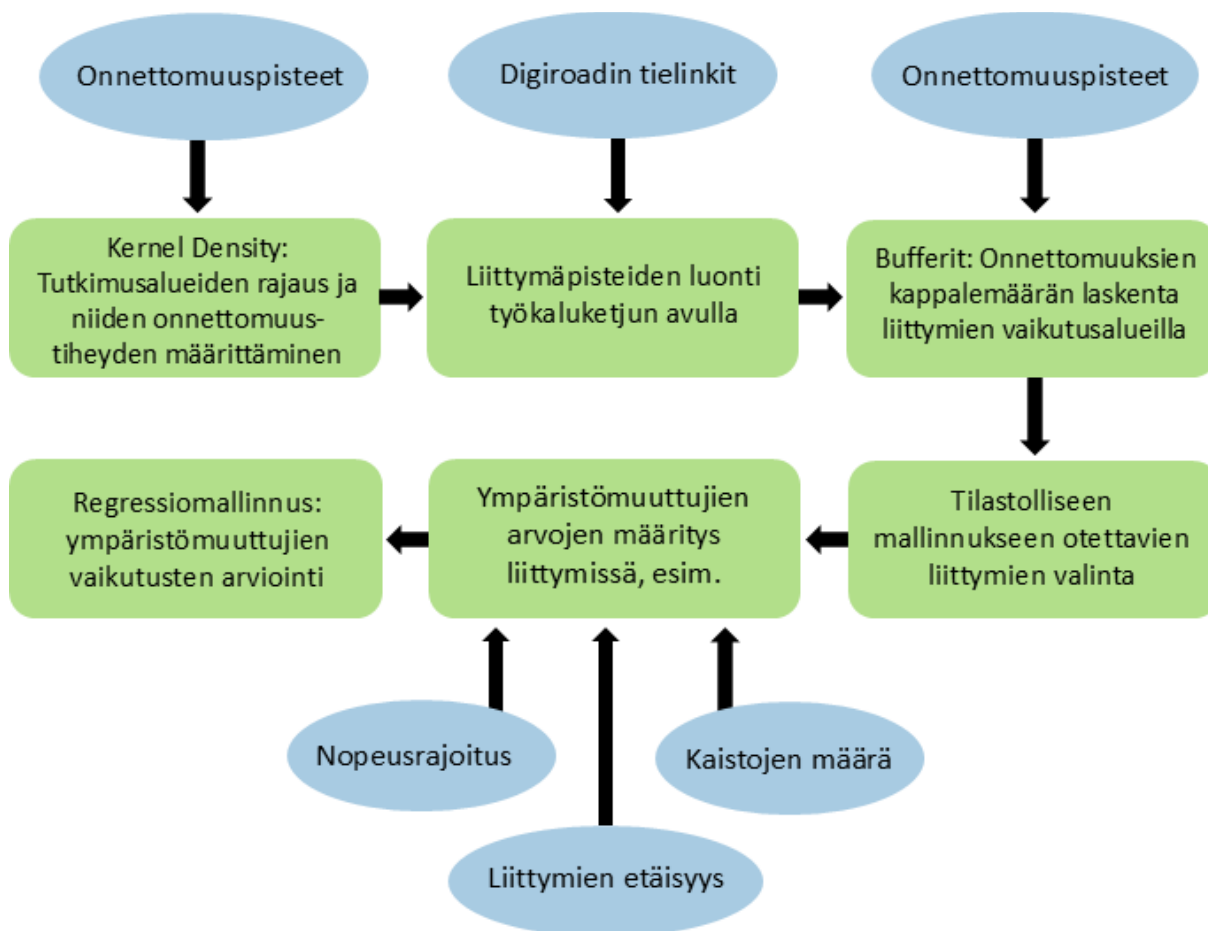
Mallin regressiokertoimien avulla voidaan tarkastella, kuinka paljon ympäristömuuttujat selittävät vastemuuttujan vaihtelua eli onnettomuuksia ja sitä, vaikuttaako tarkasteltava tekijä vastemuuttujaan nostavasti vai laskevasti (Pritee & Garg 2017). Muuttujan regressiokerroin kuvaa sitä, kuinka monella yksiköllä vastemuuttujan arvo muuttuu mallissa, jos selittävän muuttujan arvoja kasvatetaan yhdellä yksiköllä (Kaakinen & Ellonen 2021a). Käytännössä regressiokerroin kuvaa siis sitä, kuinka suuri vaikutus selitettävällä muuttujalla on vastemuuttujaan. Selittävien muuttujien painoarvoa on usein vaikea arvioida pelkästään regressiokertoimien avulla, sillä eri suuruusluokkaa olevien muuttujien kertoimet eivät ole keskenään vertailukelpoisia (Taanila 2020). Standardoitujen regressiokertoimien avulla voidaan vertailla eri muuttujien merkitystä vastemuuttujaan, sillä ne huomioivat muuttujien vaihteluvälin (Taanila 2020). Standardoitu regressiokerroin perustuu muuttujien yksiköiden sijaan keskihajontoihin: se kertoo, kuinka monen keskihajonnan verran vastemuuttujan arvo muuttuu, jos selittävän muuttujan arvo kasvaa yhdellä keskihajonnalla (Kaakinen & Ellonen 2021a).

Mallin toimivuuden lisäksi regressiomallinnuksessa on tärkeää huomioida multikollineaarisuuden mahdollisuus. Jos ilmiötä selittävät muuttujat ovat yhteydessä toisiinsa, voi muuttujien välinen liian suuri korrelaatio aiheuttaa mallille multikollineaarisuusongelman, mikä vaikuttaa negatiivisesti mallin luotettavuuteen (Kaakinen ja Ellonen 2021b). Onnettomuuksiin liittyvistä muuttujista esimerkiksi nopeus, liikennemäärä ja ruuhkaisuus ovat toisiinsa linkittyviä tekijöitä, mikä tulee huomioida muuttujien valinnassa ja mallinnuksessa (Wang ym. 2013). Yksi keino arvioida mallin muuttujien multikollineaarisuutta on VIF-kerroin (engl. Variance Inflation Factor), jonka käytetty raja-arvo vaihtelee, mutta usein hyvänä VIF-kertoimen arvona pidetään alle 5–6 jääviä arvoja (Kaakinen & Ellonen 2021b).

3 Aineistot ja menetelmät

3.1 Työnkulku

Tutkielman työvaiheiden kulku on esitetty kuvassa 2. Tutkielma koostui useasta eri vaiheesta, joista lähes kaikissa hyödynnettiin paikkatietotyökaluja. Kaikki paikkatietoanalyysit suoritettiin ArcGIS Pro -paikkatieto-ohjelmistossa (versio 3.2.2). Aluksi määritettiin tutkimusalueet onnettomuustiheyden perusteella. Tutkimusalueiden sisällä tehtiin tarkempi onnettomuustiheyden laskenta Kernel Density -analyysillä. Seuraavaksi muodostettiin työkaluketju, jonka avulla luotiin liittymäpisteet tieaineistosta. Liittymille luotiin buffereita käyttäen vaikutusalueet, joiden avulla laskettiin onnettomuuksien määrä liittymissä. Tämän jälkeen valittiin liittymät, jotka otettiin mukaan tilastollisen mallinnukseen ja määritettiin onnettomuuksia selittävien ympäristömuuttujien arvot näissä liittymissä. Lopuksi tarkasteltiin ympäristömuuttujien vaikutusta onnettomuuksien määrään tilastollisen mallinnuksen, tarkemmin lineaarisen regressioanalyysin, avulla. Regressiomallinnuksen tulosten perusteella arvioitiin onnettomuuksien määrään vaikuttavia tekijöitä molemmilla tutkimusalueilla.



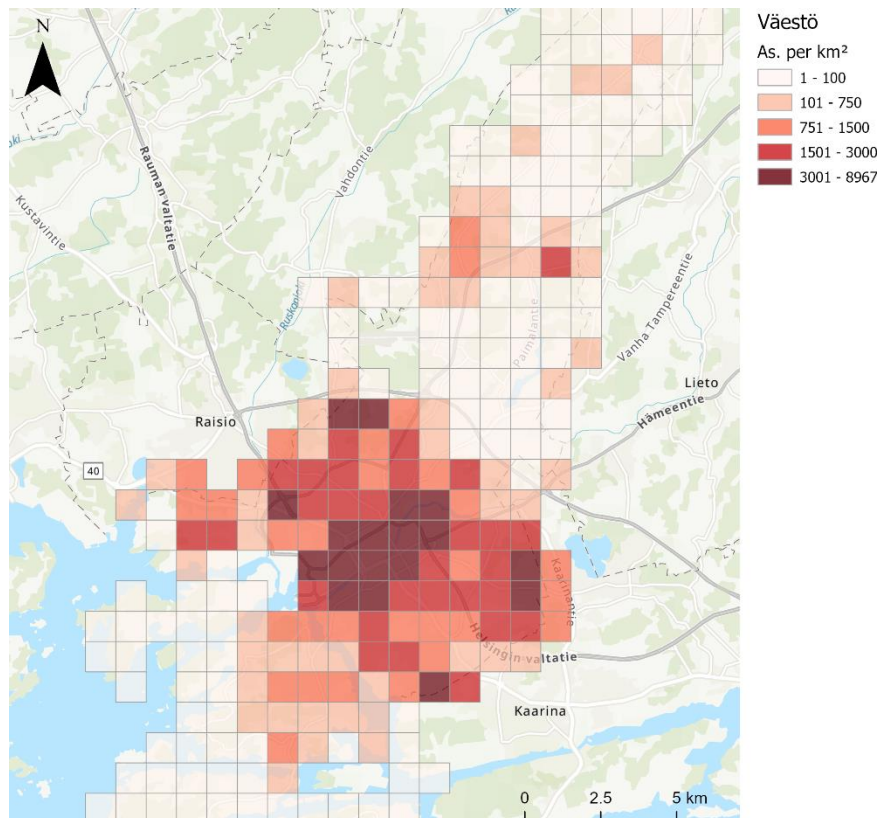
Kuva 2. Tutkielmassa käytettyjen menetelmien vaiheet.

3.2 Tutkimuskaupungit

Tutkielman kohteiksi valittiin Turku ja Oulu, koska haluttiin vertailla onnettomuuksien alueellista keskittymistä ja ympäristömuuttujien vaikutusta kahdessa eri kaupungissa. Vertailemalla asukasmäärältään lähes samankokoisia, mutta kaupunkirakenteeltaan ja pinta-alaltaan eroavia kaupunkeja pyrittiin saamaan vahvistusta onnettomuuksiin vaikuttavien tekijöiden merkittävydestä myös yhden tutkimusalueen ulkopuolella. Tarkoituksena oli selvittää, miten kaupunkien eroavaisuudet vaikuttavat onnettomuustiheyteen ja eroaako onnettomuuksien jakautuminen esimerkiksi keskusta-alueiden ympärillä. Valinta perustui myös siihen, että kaupungeissa ei ole raitiovaunuliikennettä, sillä raitiovaunulinjojen kanssa risteävät ajoväylät eivät ole täysin vertailukelpoisia muiden liittymien kanssa. Lisäksi suurista kaupungeista on usein saatavilla kattavasti avoimia kaupunkiympäristöön ja liikenteeseen liittyviä paikkatietoaineistoja. Lisäksi paikallistuntemus tuki näiden kohteiden valintaa.

Turku on Suomen vanhin kaupunki, joka sijaitsee Varsinais-Suomen maakunnassa Lounais-Suomessa. Turku on Varsinais-Suomen maakuntakeskus ja sen naapurikuntiin kuuluvat Aura, Kaarina, Lieto, Masku, Mynämäki, Naantali, Nousiainen, Parainen, Pöytyä, Raisio sekä Rusko. Kaupungin maapinta-ala on 246 km², jonka lisäksi alueella on sisävesiä vajaat 3,5 km². Turku on rakentunut Aurajoen varteen, mikä luo kaupungille tärkeän jokivarsimaiseman.

Turku on asukasluvun mukaan Suomen 6. suurin kunta ja vuoden 2023 asukasluku oli 201 863 (Kuntien avainluvut 2023). Asukastiheys on 821,8 asukasta / km², mikä tekee Turusta Suomen 8. tiheimmin asutun kunnan (Kuntien avainluvut 2023 & Pinta-alat kunnittain 1.1.2024). Kuvassa 3 on esitetty Turun asukastiheys kartalla, josta on rajattu pois kaupungin aivan pohjoisin ja eteläisin osa. Asukastiheys on selkeästi suurin keskustan ympärillä jokaiseen ilmansuuntaan. Kaikista isoimmat asutuskeskittymät sijaitsevat ydinkeskustassa ja sen läheisyydessä Aurajoen eteläpuolella. Suuri osa väestöstä on keskittynyt Turun kehätien eteläpuolelle, jossa myös palveluiden määrä on suuri.

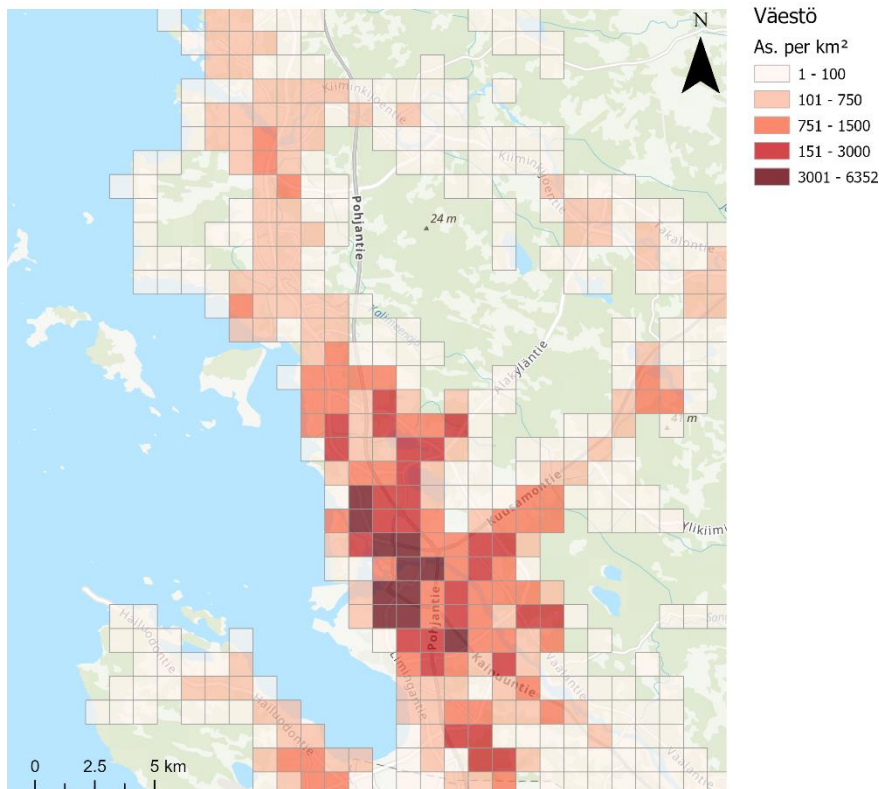


Kuva 3. Turun asukastiheys vuonna 2023. Asukastiheys on suurin keskustassa ja sitä ympäröivillä alueilla Turun kehätien eteläpuolella.

Oulu on Pohjois-Pohjanmaan kaupunki, joka sijaitsee Pohjanlahden rannalla. Oulu on Pohjois-Pohjanmaan maakuntakeskus ja Oulun kaupunkiseudun isoin kaupunki (Larinkari & Varis 2013). Naapurikuntiin kuuluvat Ii pohjoisessa, Pudasjärvi ja Utajärvi idässä, Lumijoki, Liminka, Tyrnävä, Kempele ja Muhos etelässä sekä Hailuodon saari kaupungin länsipuolella. Kaupungin maapinta-ala on 3000 km², minkä lisäksi sisävesiä on noin 80 km² (Pinta-alat kunnittain 1.1.2024). Oulun pinta-ala on siis 12-kertainen Turkuun verrattuna.

Asukasluvultaan Oulu on Suomen 5. suurin kunta ja vuonna 2023 asukasmäärä oli 214 633 (Kuntien avainluvut 2023). Oulun asukastiheys on 72,2 asukasta / km² eli kaupungin asukastiheys on melko harva asukasluvultaan suureksi kaupungiksi (Kuntien avainluvut 2023 & Pinta-alat kunnittain 1.1.2024). Oulussa asutus on levittäytynyt laajalle alueelle ja kaupungin rajojen sisällä on paljon harvaanasuttua seutua. Oulun asukasluku ja pinta-ala kasvoivat merkittävästi vuonna 2013, kun Haukipudas, Kiiminki, Oulunsalo ja Yli-Ii yhdistyivät Ouluun kuntaliitoksessa (Larinkari & Varis 2013). Vaikka Oulu on asukasmäärältään Turkuu suurempi, Turun asukastiheys on yli kymmenkertainen Oulun nähden. Kuvan 4 kartassa on esitetty Oulun asukastiheys alueelta, josta on rajattu pois Yli-Iin ja Ylikiimingin suuralueet. Kartasta nähdään,

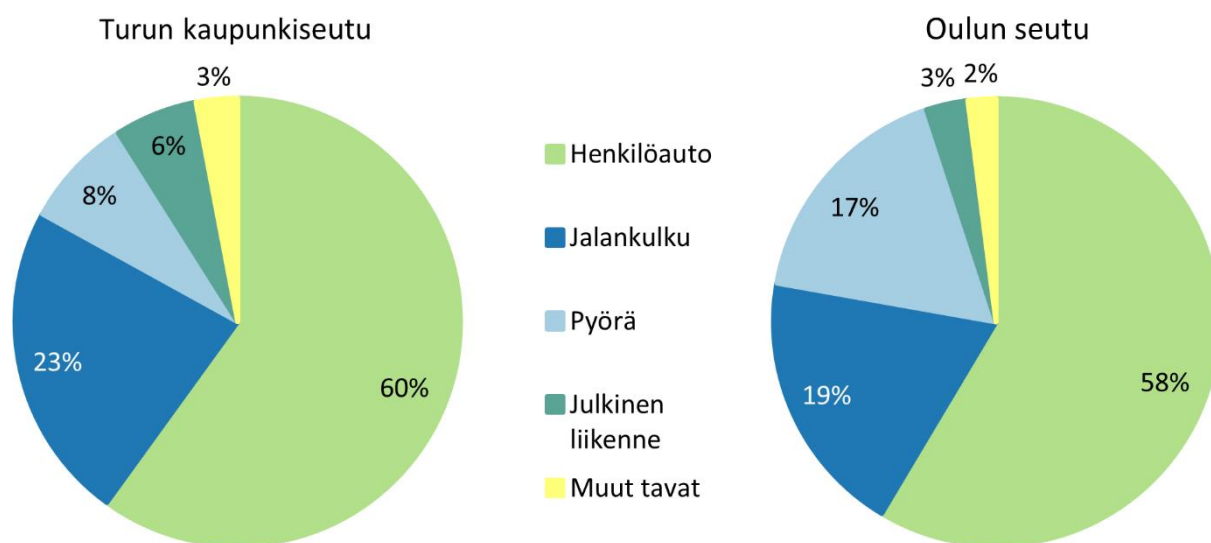
että asutus on keskittynyt Oulun kaupungin alueella isoimpien liikenneväylien, kuten Pohjantien, ympärille ja kaikista tiheimmät väestökeskittymät ovat keskustassa ja sen läheisyydessä. Laaja, melko yhtenäinen tiheän asutuksen alue ulottuu pohjois-eteläsuunnassa Pateniemestä Kaakkuriin ja Oulujoen suistoalueelta Hiukkavaaraan asti. Tällä alueella on merkittävien liikenneväylien lisäksi runsaasti palveluita sekä teollisuutta.



Kuva 4. Oulun asukastiheys vuonna 2023. Suuret asutuskeskittymät sijoittuvat keskustan ympärille ja isoimpien liikenneväylien kuten Pohjantien läheisyyteen.

Yksityisautoilun rooli henkilöliikenteessä on suuri molemmissa tutkimuskaupungeissa. Traficomien tilastojen mukaan henkilöautojen määrä Turussa 2024 oli 100 205 (LOA 2024). Kun määrä suhteutetaan asukaslukuun, saadaan henkilöautojen määräksi 496 autoa 1000 asukasta kohden. Yleistäen voidaan siis sanoa, että lähes joka toisella turkulaisella on oma henkilöauto käytössä. Oulussa oli vuonna 2024 123 824 rekisteröityä henkilöautoa (LOA 2024). Asukasmäärään suhteutettuna henkilöautojen määrä on noin 577 autoa 1000 asukasta kohden. Oulussa henkilöautojen määrä asukaslukua kohden on siis merkittävästi Turkuu suurempi. Valtakunnallisella tasolla autojen määrä Oulussa ylittää myös asukasluvultaan suuremmat kaupungit Helsingin, Espoon ja Tampereen (LOA 2024 & Kuntien avainluvut 2023).

Traficomin Henkilöliikennetutkimuksessa on tarkastelu kulkumuotojen osuuksia tehdyistä matkoista suurten kaupunkien läheisyydessä (HLT 2021). Tutkimuksen mukaiset kulkumuotojakaumat on esitetty kuvassa 5. Turussa tarkastelualueena on Turun kaupunkiseutu, johon kuuluu lähikunnat Aura, Kaarina, Lieto, Masku, Mynämäki, Naantali, Nousiainen, Paimio, Parainen, Raisio, Rusko sekä Sauvo. Selkeästi suurin kulkumuoto Turun alueella on henkilöautoilu ja henkilöautolla kuskina sekä matkustajana tehdyt matkat kattavat 60 % kaikista alueen matkoista (kuva 5). Jalankulun osuus on lähes neljäsosa ja pyöräilyn osuus on 8 %. Turussa ainoa julkisen liikenteen kulkumuoto on bussi ja se on osuus matkoista kattaa 6 % alueen matkoista. Oulun alueen kulkumuotojakaumaa on tutkittu Oulun seudulla, johon kuuluu Oulun lisäksi Hailuoto, Ii Kempele, Liminka, Lumijoki, Muhos ja Tyrnävä. Tutkimuksen mukaan 58 % alueen matkoista tehdään henkilöautolla joko kuskina tai matkustajana (kuva 5). Henkilöautoilun osuus alueilla oli siis lähes sama, vaikka Oulussa autojen määrä asukaslukua kohden on huomattavasti suurempi. Oulun seudulla pyöräilyn osuus on 17 %, mikä vastaa valtakunnallisesti suurinta osuutta pyöräillä tehdyistä matkoista (HTL 2021). Oulussa julkisen liikenteen välineenä toimii bussi ja julkisen liikenteen osuus tehdyistä matkoista on vain 3 %.



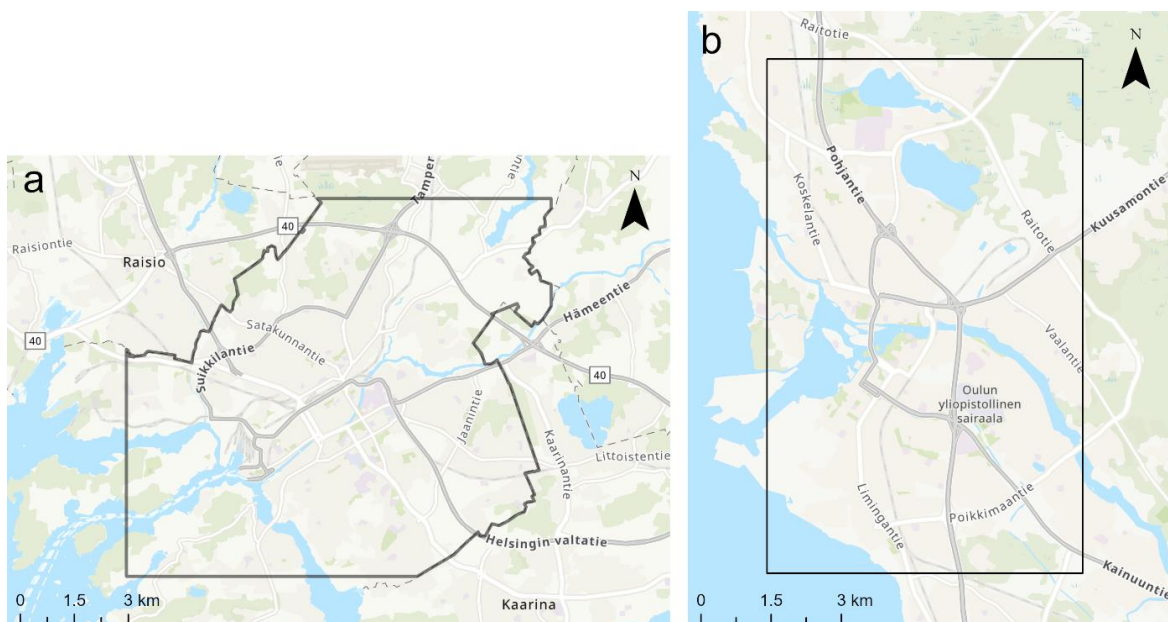
Kuva 5. Henkilöliikennemukaiset kulkumuotojakaumat Turun kaupunkiseudulla ja Oulun seudulla. Molemmilla alueilla alueille henkilöautojen osuus on suuri, noin 60 % kaikista alueiden matkoista. Tiedot: HLT 2021.

Turussa liikenteen pääväyliä ovat E18 kuuluva Turun kehätie, Raumantie, Tampereen valtatie ja Helsingin valtatie. Henkilöliikenteelle tärkeimpiin katuihin keskustan alueella kuuluvat esimerkiksi Helsinginkatu – Ratapihankatu, Puistokatu, Koulukatu sekä Itäinen Pitkäkatu – Strårlamminkatu (Turun keskustan kaupunkikuva 2017). Oulun merkittävimmät liikenneväylät ovat moottoritienä toimiva Pohjantie, joka osana Nelostietä halkoo kaupunkia pohjois-

eteläsuunnassa sekä Pohjantietä risteävät Kuusamontie ja Kainuuntie. Keskustassa tärkeitä pääkatuja ovat esimerkiksi Torikatu, Saaristonkatu, Uusikatu, Rautatienkatu ja Puistokatu (Oulun keskusta-alueiden kaupunkikuvaselvitys 2012). Keskustan liikenteen merkittävin solmukohta on Pokkisen puiston yhteydessä oleva sisääntulo, jota pitkin liikenne virtaa Tuirasta Merikoskensilta pitkin keskustaan (Oulun keskusta-alueiden kaupunkikuvaselvitys 2012).

3.3 Tutkimusalueiden rajaus

Liikenneonnettomuuksien tarkastelu haluttiin kohdentaa sinne, missä onnettomuuksien määrä on korkea, joten tutkimusalueiden rajaukset tehtiin onnettomuuksien tiheysanalyysin perusteella. Tutkimusalueiden rajaus on kuvattu liitteessä 1. Tutkimusalueet on esitetty kuvan 6 kartoissa. Turun aluerajaus ulottuu tasaisesti keskustan jokaiselle puolelle muodostaen tutkimusalueen, jonka pinta-ala on 98 km² (kuva 6a). Tutkimusalue on rajattu Turun kuntarajaan. Alue ulottuu pohjoisessa lentokentän eteläpuolelle ja etelässä Skanssi–Uittamon suuralueelle rajoittuen Hirvensalon saaren pohjoisosaan. Lännessä alueen raja kulkee Pansion ja Pernon kohdalta ja osa Ruissalosta kuuluu alueeseen. Idässä tutkimusalue rajautuu kuntarajaan. Oulun tutkimusalue ulottuu pohjois-eteläsuunnassa Kuivasjärven pohjoispuolelta Höyhtyälle ja Kaukovainiolle asti muodostaen 74 km² alueen (kuva 6b). Lännessä alue rajoittuu Pateniemeen ja suurin osa Koskelan suuralueesta sekä keskustan luoteispuolella sijaitsevasta Hietasaaresta kuuluu tutkimusalueeseen. Idän suuntaan alue kattaa Myllyjojan ja Oulunsuun suuralueet sekä osan Ruskon teollisuusalueesta.



Kuva 6. Onnettomuustiheyden perusteella määritetyt tutkimusalueet. a) Turun tutkimusalueen rajaus. b) Oulun tutkimusalueen rajaus.

3.4 Aineistot

Tutkielmassa käytetyt aineistot koostuvat erilaisista paikkatietoaineistoista. Pääasiallisina aineistoina toimii Väyläviraston Digiroad -tieaineisto sekä Tilastokeskuksen tieliikenneonnettomuudet. Muita aineistoja hyödynnettiin liittymien liikenneympäristön muuttujien määrittämisessä sekä tausta-aineistona. Käytetyt aineistot on listattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Tutkielmassa käytetyt aineistot.

Aineisto	Tuottaja ja vuosi	Kuvaus	Lähde
Digiroad	Väylävirasto 2022	Suomen tie- ja katutietojärjestelmä, joka sisältää tieverkoston paikkatiedon lisäksi liikenteen ominaisuustietoja.	Paituli-latauspalvelu
Tieliikenneonnettomuudet	Tilastokeskus 2011–2021	Henkilövahinkoon johtaneet poliisille ilmoitetut tieliikenteen onnettomuudet vuosilta 2011–2021.	Tilastokeskuksen tieliikenneonnettomuuksien WFS-rajapinta (talvi 2024)
Ilmakuvat	Turun kaupunki 2022 & 2021	Kaupunkien uusimmat ilmakuvat.	Turun WMS-rajapinta (syksy 2024)
	Oulun kaupunki 2022 & 2020		Oulun WMS-rajapinta (syksy 2024)
Liikennemerkkit	Turun kaupunki 2024	Liikennemerkkien sijainnit pistetietona.	Turun OGC API-rajapinta (syksy 2024)
	Oulun kaupunki 2024		Oulun kaupungin Yhdyskunta- ja ympäristöpalvelut
Väestöruudut	Tilastokeskus 2023	Asukasmäärä 1 x 1 km ruuduissa.	Paituli-latauspalvelu

Digiroad on Väyläviraston ylläpitämä Suomen kansallinen tie- ja katutietojärjestelmä, joka koostu useista eri tietolajeista (Digiroad: tietolajien kuvaus 2022). Tietojärjestelmään on koottu Suomen tie- ja katuverkoston keskilinjageometriat sekä erilaisia viivamaisia ja pistemäisiä ominaisuustietoja (Digiroad: tietolajien kuvaus 2022). Käytännössä keskilinjageometria eli tielinkki kuvaa teiden keskilinjain sijaintia viivamaisena paikkatietona. Digiroad-aineistosta hyödynnettiin vuoden 2022 versiota Shapefile K-muodossa, jossa viivamaiset tietolajit on muodostettu siten, että tietolajia kuvaava viiva katkeaa minkä tahansa ominaisuustiedon muuttuessa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi tien toiminnallisen luokan

muuttuessa tielinkki katkeaa ja kahden liittymän välillä voi olla useita eri tielinkkejä. Digiroadista on erikseen ladattavissa myös tielinkkien solmukohtat, jotka ovat tielinkkien päissä olevia pisteitä (Digiroad: tietolajien kuvaus 2022). Nämä solmupisteet eivät kuitenkaan vastaa liittymiä, koska solmu muodostuu mihin tahansa sellaiseen kohtaan, jossa jokin tielinkin ominaisuustieto vaihtuu. Tämän takia liittymät luotiin itse hyödyntämällä Digiroadin tielinkkejä.

Tielinkkien lisäksi Digiroadista hyödynnettiin nopeusrajoitustietoja, tien toiminnallista luokkaa sekä pysäkkien tietoja. Tien toiminnallinen luokka kuvaa liikenneväylän tärkeyttä liikenneverkostossa sekä väylän palvelutasoa liikenteen kannalta. Joukkoliikenteen pysäkit ovat Digiroadissa pistemäisenä tietona. Pisteistä poimittiin paikallisen joukkoliikenteen pysäkit valitsemalla ne kohteet, joiden ylläpitäjä on kunta. Digiroadin tielinkit on saatavilla koko Suomesta, mutta ominaisuustietojen saatavuus vaihtelee maantieteellisesti ja osaa tiedoista ylläpidetään vain tietyillä tieluokilla (Digiroad: tietolajien kuvaus 2022). Esimerkiksi liikennemäärä eli keskimääräinen vuorokausiliikenne olisi ollut liikenneonnettomuuksien kannalta tärkeä tietolaji, mutta se on saatavilla pääasiassa maanteiltä ja isoimmilta kaduilta. Lisäksi kaistojen määrä Digiroadissa on saatavilla vain rajoitetuilta teiltä ja se ei sisällä esimerkiksi ryhmittymiskaistoja liittymissä (Digiroad: tietolajien kuvaus 2022). Myös tien valaistus olisi voinut olla hyödyllinen muuttuja tutkielmassa, mutta tietolajin kattavuus rajoittuu maanteihin ja suurimpiin katuihin.

Onnettomuusaineistona hyödynnettiin Tilastokeskuksen tieliikenneonnettomuuksia. Aineisto kattaa kaikki henkilövahinkoon johtaneet tieliikenneonnettomuudet, jotka on tulleet poliisin tietoon ja sitä kautta Tilastokeskukselle (Tieliikenneonnettomuustilasto). Aineisto sisältää onnettomuuspisteet paikkatietona sekä erilaisia ominaisuustietoja. Onnettomuuksista on saatavilla esimerkiksi onnettomuuden vakavuuteen, onnettomuustyyppiin, ajankohtaan sekä osallisten kulkuneuvojen määrään liittyviä tietoja (Tieliikenneonnettomuustilasto). Yksityisyysyistä onnettomuuden tarkka päivä ei ole saatavilla avoimesti, vaan aineisto sisältää onnettomuuden ajankohdan vuoden, kuukauden sekä kellonajan tunnin tarkkuudella.

Liikennemerkkien sijainnit saatiin paikkatietoaineistona kaupungeilta. Turun aineisto ladattiin OGC API -rajapinnasta ja Oulun aineisto saatiin sähköpostitse kaupungilta. Aineistojen liikennemerkkit sisälsivät erilaisia kieltoja, varoituksia sekä ohjeita liikenteenkäyttäjälle. Lisäksi merkkeihin kuuluivat opasteet, joilla kuvataan mihin liikenneväylä tai kaista johtaa. Aineistot eivät sisältäneet tienviittoja. Pääosin jokainen merkki on aineistossa erillisenä pisteenä, vaikka

merkit sijaitsisivat samassa liikennepylväässä. Oulun aineistossa osa samassa pylvästä olevista merkeistä oli aineistossa vain yhtenä pisteenä, mutta tarkempaa aineistoa ei ollut saatavilla ja pääosin merkkien määrä vastasi todellisuutta. Liikennemerkkejä käyttämällä pyrittiin tuomaan esille liikenneympäristön kompleksisuutta. Mitä enemmän liikennemerkkejä liittymässä on, sitä enemmän havainnointia ja reagointia se vaatii liikenteenkäyttäjiltä.

3.5 Kernel Density -analyysit

Onnettomuuspisteille suoritettiin tutkimusalueiden sisällä planaarin Kernel Density -tiheysanalyysi, jonka avulla tarkasteltiin onnettomuuksien alueellista jakautumista tutkimusalueilla. Analyysin tuloksesta voitiin paikantaa alueellisia hotspotteja, joissa onnettomuuksien määrä oli korkea. Kernel Density -analyysi suoritettiin Calculate Density -työkalulla käyttäen 500 m naapurustokokoa ja 10 m solukokoa. Tuloksena oli onnettomuustiheyden arvio tutkimusalueilla.

Jotta tieverkostosta voitiin paikantaa tarkemmin onnettomuusalttiita kohtia, onnettomuuksille tehtiin lisäksi verkostomuotoinen Network Kernel Density -analyysi. NKDE-analyysi ei kuulu paikkatieto-ohjelmistojen valmiisiin työkaluihin, joten analyysiin sovellettiin erillistä SANET-työkalupakettia (versio SANET Standalone 1.0 beta). SANET on japanilaisen Atsuyuki Okaben ja hänen työryhmänsä kehittämä työkalupaketti, joka sisältää erilaisia analyysityökaluja verkostomuotoisen paikkatietodatan käsittelyyn (SANET Manual). SANET-työkalupaketti soveltuu minkä tahansa verkostodatan ja pistemäisten kohteiden tutkimiseen ja yksi sen sovelluskohteista on liikenneonnettomuuksien tiheysanalyysi (SANET Manual). Työkalupaketti on avoimesti saatavilla ei-kaupalliseen käyttöön, mutta sen lataamiseen vaaditaan lisenssiavain. Lisenssiavain hankittiin sähköpostitse Atsuyuki Okabelta. Lisätietoa työkalupaketista ja sen sovelluskohteista löytyy osoitteesta: <http://sanet.csis.u-tokyo.ac.jp>.

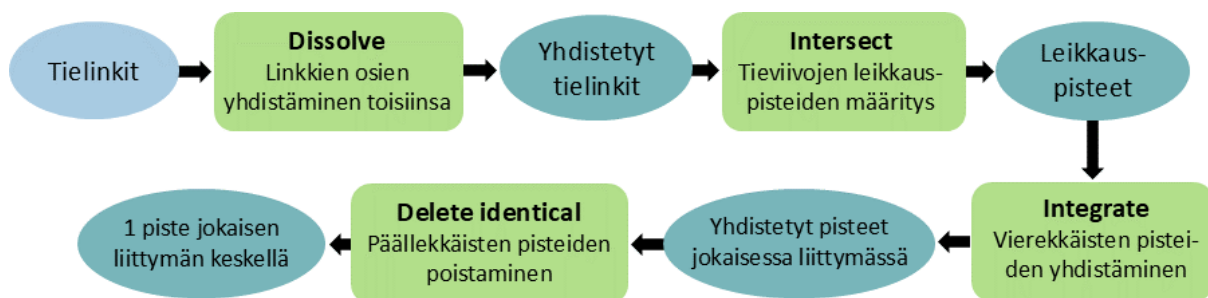
SANET-työkalupaketti koostuu useista eri analyysityökaluista, joista yksi on verkostomuotoinen Kernel Density- eli NKDE-analyysi (SANET Manual). Analyysin lähtöaineistona käytettiin onnettomuuspisteitä sekä Digiroadin tielinkeistä muodostuvaa tieverkostoa, jonka sisällä tiheyslaskenta tapahtuu. Analyysi suoritettiin käyttämällä 100 m tarkasteluetäisyyttä ja 30 m solukokoa. Tuloksena on viivamuotoinen tieverkosto, joka sisältää tiedon onnettomuustiheydestä verkoston eri osissa. SANETin NKDE-analyysin tulostasoa visualisoitiin ArcGIS Pro:ssa. Koska verkostomuotoinen tiheysanalyysi sopii hyvin onnettomuustiheyden käsittelyyn pienemmässä mittakaavassa, NKDE-analyysin tuloksia tarkasteltiin tutkimusalueita pienemmiltä alueilta kaupunkien keskustojen läheisyydessä.

3.6 Liittymäpisteiden tuottaminen

Koska liittymistä ei ollut saatavilla valmista paikkatietoaineistoa, liittymäpisteet luotiin Digiroadin tielinkkien avulla. Tielinkeistä poistettiin aluksi ne linkit, joiden liittymiä ei haluttu mukaan tarkasteluun. Linkeistä poistettiin toiminnallisen luokan ominaisuustiedon perusteella luokat 6, 7 ja 8 eli muut yksityistiet, ajopolut sekä kävelyn ja pyöräilyn väylät. Näin liittymätarkastelusta saatiin karsittua esimerkiksi teollisuusalueiden yksityisteiden, sorateiden ja kevyen liikenteen väylien risteyspisteet, mitkä eivät olleet merkittäviä kaupunkiympäristön moottoriajoneuvojen onnettomuuksien kannalta.

Liittymäpisteet luotiin ketjuttamalla ArcGIS Pro:n paikkatietotyökaluja. ArcGIS ModelBuilder mahdollistaa työkaluketjujen automatisoinnin, jolloin useita eri työkaluja ei tarvitse suorittaa erikseen. Myös työkalujen eri parametrien kokeilu onnistuu yksinkertaisemmin, kun manuaalisen työn määrä vähenee. Työvaiheet automatisoidaan lisäämällä analyysityökalut malliin ja linkittämällä ne toisiinsa oikeassa järjestyksessä. Kun työkalun liittyy osaksi ketjua, tulee valita työkalujen aineistot ja parametrit. ModelBuilderin hyötynä on myös se, että samat työvaiheet voidaan toistaa eri aineistoille vain lähdeaineistot vaihtamalla. Näin voidaan toteuttaa useamman eri tutkimusalueen vertailua yksinkertaisesti, kun työvaiheiden suorittaminen on automatisoitu.

Kuvassa 7 on esitetty vuokaavio ArcGIS ModelBuilderilla luodusta työkaluketjusta, jonka avulla liittymäpisteet määritettiin Digiroadin tielinkkejä hyödyntäen. Lähtöaineistoja olivat Turun ja Oulun tielinkit Shapefile-muodossa. Dissolve-työkalun avulla tielinkkien osat yhdistettiin aluksi toisiinsa. Digiroadin tielinkeissä ominaisuustiedon muuttuminen katkaisee linkin ja Dissolve-työkalun avulla tällaiset liittymien välillä sijaitsevat erilliset tielinkit sulautettiin yhteen. Tuloksena on tieverkostoa kuvaava taso, joka sisältää viivamuodossa tieosuudet, jotka leikkautuvat liittymien kohdista.



Kuva 7. ArcGIS Modelbuilderin avulla luodun automatisoidun työkaluketjun vaiheet. Työkaluketjun avulla Digiroadin tielinkeistä muodostettiin liittymäpisteet yhdistämällä eri paikkatietotyökaluja.

Seuraavaksi tieviivojen leikkauspisteet määritettiin Intersect-työkalulla. Koska yhteen liittymään johtaa useita tielinkkejä, tässä vaiheessa leikkauspisteet-tasossa on useita pisteitä, jotka voivat sijaita myös eri puolilla liittymää. Integrate-työkalulla jokaisen liittymän vierekkäiset pisteet yhdistettiin samaan sijaintiin liittymän keskelle. Työkalun XY Tolerance -parametrin arvo kuvaa etäisyyttä, jonka sisällä toisistaan olevat pisteet yhdistetään yhteen sijaintiin, joka määrittyy näiden pisteiden keskelle. Parametrin arvoksi kokeiltiin 5–50 metriä, ja 10 m etäisyys osoittautui parhaiten toimivaksi. 10 m etäisyyttä käyttäen eri puolilla liittymää sijaitsevat pisteet saatiin yhdistettyä samaan sijaintiin ilman, että toisiaan lähellä olevat erilliset liittymät tai parkkipaikkojen sisääntulot olisivat yhdistyneet yhdeksi pisteeksi, mikä ilmeni ongelmana suurempia parametrin arvoja käytettäessä. Integate-työkalun tuloksena oli päivitetty liittymätaso, joka sisältää tielinkkien leikkauspisteet keskellä liittymää. Tässä vaiheessa liittymissä oli useampia päällekkäisiä pisteitä riippuen siitä, kuinka monta tielinkkiä kohtaa liittymässä eli kuinka monen tieviivan leikkauspisteet on määritetty. ModelBuilderin työkaluketjun viimeisen vaiheen eli Delete Identical -työkalun avulla poistettiin päällekkäiset pisteet. Työkaluketjun lopputuloksena on Shapefile-muotoinen pistetaso, joka sisältää yhden pisteen jokaisen liittymän keskellä. Suuri osa liittymistä, joita ei haluttu tarkasteluun mukaan saatiin karsittua poistamalla tielinkkejä etukäteen niiden toiminnallisen luokan perusteella. Näin tehtiin esimerkiksi sorateiden osalta, mutta kaikkien liittymien kohdalla tämä ei ollut mahdollista. Näihin kuului ramppityyppiset liittymäratkaisut esimerkiksi valtateilla. Ramppiliittymät poistettiin manuaalisesti ennen liittymien valintaa otokseen, koska niiden määrä oli kohtuullinen ja ne olivat helposti paikannettavissa.

3.7 Onnettomuuksien määrän laskenta buffereilla

Onnettomuuksien määrät liittymissä laskettiin liittymien vaikutusalueita kuvaavien bufferien avulla. Buffer-työkalun avulla tutkimusalueiden liittymäpisteille luotiin liittymien vaikutusalueita kuvaavat ympyränmuotoiset bufferit, joiden säteeksi kokeiltiin arvoja 15–50 m välillä. Bufferikoon kokeilu perustui aiempaan onnettomuustutkimukseen sekä oletukseen siitä, että mallinnettavista liittymistä merkittävän osan oletettiin sijaitsevan keskusta-alueella tai muilla tiheään rakennetuilla alueilla. Parhaaksi osoittautui 30 m bufferikoko, joka kattoi liittymän oletetun vaikutusalueen suurimmassa osassa liittymistä, joihin aiherajaus kohdistui. Oulun ja Turun ruutukaava-alueella lyhimät liittymävälit ovat noin 50–70 m, mutta buffereissa ei esiintynyt merkittäviä päällekkäisyyksiä onnettomuuksien laskennan kannalta. Onnettomuus pisteiden määrä liittymien vaikutusalueiden sisällä laskettiin Summarize Within -työkalun avulla. Työkalu laskee pisteiden määrän jokaisen bufferin sisällä sijainnin

perusteella. Kun onnettomuuksien kappalemäärä liittymien vaikutusalueella oli selvillä, onnettomuuksien määrät liitettiin bufferitasosta liittymäpisteisiin Join-työkalan avulla.

3.8 Liittymäotosten valinta

Koska osa tutkielman ympäristömuuttujista vaatii manuaalista työtä muuttujien arvojen määrittämisen osalta, tutkielman tilastolliseen mallinnukseen valittiin otokset liittymäpisteistä. Liittymien määräksi valikoitui 100 liittymää kaupunkia kohden, sillä 100 liittymässä manuaalisen työn määrä oli kohtuullinen. Tämän otoskoko arvioitiin riittävän suureksi edustamaan tutkimusalueiden liittymiä. Liittymien tarkastelua haluttiin kohdentaa onnettomuusaltteimpiin liittymiin, mutta ympäristömuuttujien arvioinnin kannalta oli tärkeää, että otoksessa on mukana myös liittymiä, joissa ei ole onnettomuuksia. Otokseen päädyttiin valitsemaan molemmista kaupungeista 50 onnettomuusaltteinta liittymää onnettomuuksien kappalemäärään perusteella ja 50 liittymää satunnaisotoksella.

Liittymät asetettiin suuruusjärjestykseen onnettomuuksien määrän perusteella ja valittiin 50 liittymää, joissa on eniten onnettomuuksia. Onnettomuuksien kappalemäärät eivät menneet tasan 50 liittymän otoksen kannalta, joten loput liittymät arvottiin niistä, joissa onnettomuuksien määrä oli sama. Esimerkiksi Turussa 43 liittymässä onnettomuuksia oli 5–17 kappaletta, jonka lisäksi otokseen arvottiin 7 liittymää niistä, joissa onnettomuuksia oli 4 kappaletta. Jäljelle jääneistä liittymistä muodostettiin satunnaisotos, johon otettiin mukaan 50 liittymää. Käytännössä arvotuissa liittymissä voi siis olla liittymiä, joissa ei ole onnettomuuksia sekä liittymiä, joiden vaikutusalueella on muutamia onnettomuuksia. Satunnaisotosten avulla saatiin katettua tutkimusalueita tasaisemmin, sillä suuri osa onnettomuusalttiista liittymistä sijoittui keskusta-alueiden läheisyyteen. Lisäksi satunnaisotannalla saatiin tuotua hajontaa ympäristömuuttujiin, kuten kaistojen määrään ja liittymien väliseen etäisyyteen.

Vaikka valtaosa liittymistä, joita ei haluttu sisällyttää regressiomallinnukseen oli karsittu etukäteen, liittymäpisteissä oli vielä kaksi poikkeusta. Parkkipaikkojen ja ajoväylien leikkauspisteitä ei haluttu mallinnukseen, jos pisteessä ei ristennyt useampi ajoväylä parkkipaikan sisääntulon lisäksi. Koska parkkipaikkojen määrä tutkimusalueilla oli suuri, tällaisten pisteiden poistaminen etukäteen olisi vaatinut liiallisesti manuaalista työtä. Asuinalueiden teillä esiintyy cul-de-sac -tyyppisiä kääntymispaikkoja, jotka muodostuivat liittymäpisteeksi, jos tien päässä on erilliset tielinkit. Parkkipaikkojen ja cul-de-sac -rakenteiden osalta toimittiin siten, että jos otokseen valittu piste osui tällaiseen paikkaan, sen tilalle valittiin uusi liittymä.

3.9 Ympäristömuuttujien arvojen määrittäminen

Tilastollisessa mallinnuksessa käytettävät ympäristömuuttujat valittiin pohjautuen liikenneturvallisuustutkimuksen kirjallisuuteen. Kirjallisuuteen tutustuttaessa keskityttiin autoteiden liittymäonnettomuuksiin sekä niihin liikenneympäristön tekijöihin, jotka altistavat onnettomuuksille kaupunkiympäristössä. Kun mahdolliset ympäristömuuttujat oli valittu, niiden arvot määritettiin tarkasteluun valituissa liittymissä. Muuttujien arvot määritettiin käyttämällä erilaisia paikkatietoaineistoja ja paikkatietotyökaluja. Seuraavaksi kuvataan miten nopeusrajoitus, liittymien välinen etäisyys, liittymän etäisyys bussipysäkkiin, kaistojen määrä sekä liikennemerkkien määrä laskettiin liittymissä.

Jotta nopeusrajoitusta voitiin käyttää muuttujana regressiomallinnuksessa, tarvittiin yksi nopeusrajoitusta kuvaava arvo jokaiselle liittymälle. Tämä määritettiin laskemalla liittymään johtavien tielinkkien nopeuksien keskiarvo. Nopeusrajoitusten keskiarvon laskentaan käytettiin onnettomuuksien laskennan tapaan buffereita. Bufferianalyysillä mahdollistettiin nopeusrajoitusten keskiarvon määrittäminen myös sellaisissa liittymärakenteissa, joissa kaikki liittymän tielinkit eivät leikkaa toisiaan liittymän keskipisteessä. Koska onnettomuuksien laskennassa käytettyjen 30 m bufferien kanssa ei ollut ongelmia bufferien päällekkäisyydessä otoksien liittymissä, samaa bufferikokoa voitiin hyödyntää nopeusrajoitusten laskennassa. Liittymien nopeusrajoitustiedot yhdistettiin buffereihin Spatial join -työkalun avulla käyttämällä intersect-valintaa, jonka avulla bufferia leikkaavat nopeusrajoitusviivat liitettiin bufferiin. Summary Statistics -työkalulla ryhmiteltiin jokaiseen liittymään johtavat nopeusrajoitusviivat bufferin ID:tä käyttäen ja laskettiin näiden viivojen ominaisuustiedon keskiarvo. Tuloksena oli liittymien nopeusrajoitusten keskiarvot sisältävä taulukko, jonka tiedot liitettiin edelleen liittymäpisteisiin ja näin jokaiselle liittymäpisteelle saatiin määritettyä liittymän vaikutusalueen tielinkkien nopeusrajoitusten keskiarvo.

Seuraavaksi määritettiin liittymän etäisyys lähimpään liittymään. Koska liittymien etäisyys toisiinsa haluttiin laskea tieverkostoa pitkin, laskenta tuli tehdä verkostomuodossa. Toinen vaihtoehto olisi ollut toteuttaa laskenta perinteisesti lähimpien kohteiden laskennassa käytetyllä Near-työkalulla, mutta se olisi tuottanut etäisyydet linnuntietä pitkin. Koska liikenteen havainnoinnin kannalta liittymien etäisyydellä on merkitystä nimenomaan ajoväyliä pitkin, päädyttiin käyttämään verkostomuotoista laskentaa. Network Dataset on Esrin verkostomuotoinen dataformaatti, joka sisältää verkoston viivat, tässä tapauksessa tiet sekä verkoston solmukohtat, eli liittymät, joiden kautta tieltä toiselle siirtyminen on mahdollista. Network

Datasetin muodostamiseen käytettiin samaa tielinkkiaineistoa kuin liittymäpisteiden luomiseen, eli aineistosta oli poistettu etukäteen esimerkiksi soratiet ja kevyen liikenteen väylät. Network Datasetin luonti aloitettiin luomalla Feature Dataset, jonka sisälle tuotiin tielinkit. Feature Datasettiin luotiin uusi Network Dataset, jonka lähteenä käytettiin tielinkkejä. Digiroadin tielinkit eivät sisällä korkeustietoa linkin molemmista päistä eli linkkejä ei voitu yhdistää toisiinsa korkeustiedon perusteella, joten tieverkosto muodostettiin ilman Z-koordinaattia. Tästä johtuen esimerkiksi sillat eivät muodostuneet verkostoon täysin oikein, koska sillan ylittävä tielinkki yhdistyi verkostossa sillan alittavaan tielinkkiin. Tarkasteltaviin otoksiin ei kuulunut liittymiä, joissa tämä vaikuttaisi etäisyyden laskentaan, joten Z-koordinaattien puuttuminen ei ollut ongelma.

Liittymien lyhin etäisyys seuraavaan liittymään laskettiin verkostoaineistosta käyttäen OD Cost Matrix -formaattia. OD Cost Matrix on Esrin dataformaatti, jolla voidaan laskea kustannuksia lähtöpaikkojen ja kohteiden välillä käyttäen yksikkönä etäisyyttä tai matka-aikaa. Formaatin pakollisina lähtöaineistoina ovat verkostomuotoinen data sekä lähtöpaikat ja kohteet. OD Cost Matrix -tason aineistoiksi asetettiin luotu Network Dataset ja sekä lähtöpaikoiksi että kohteiksi asetettiin tutkimusalueiden kaikki liittymäpisteet. Lopputuloksena oli viivat, jotka näyttävät minkä liittymien välillä lyhin etäisyys on. Viivamuotoisen datan attribuuttitietoihin sisältyi tieto siitä, kuinka suuri on lyhin etäisyys seuraavaan liittymään tieverkostoa pitkin sekä kyseisten liittymien ID-numerot. ID-numeroiden avulla etäisyydet yhdistettiin liittymäpisteisiin Join-työkalulla. Lopputuloksessa jokaisella liittymäpisteellä oli attribuuttitieto siitä, kuinka pitkä etäisyys seuraavaan liittymään on tieverkostoa pitkin.

Seuraavana määritettiin liittymien etäisyys lähimpään bussipysäkkiin. Bussipysäkkien etäisyydet laskettiin Near-työkalun avulla linnuntietä pitkin, koska valtaosassa otoksien liittymäpisteitä lähin bussipysäkki sijaitsee samalla tiellä kuin liittymä. Verkostomuotoiselle etäisyyslaskennalle ei siis ollut tarvetta, koska etäisyys tieverkostoa pitkin olisi ollut lähes sama kuin linnuntietä pitkin laskettuna. Near-työkalu laskee lyhimät etäisyydet kahden tason välillä. Työkalun lähtöaineistoiksi määritettiin liittymät sekä paikallisliikenteen bussipysäkit, ja analyysin tuloksena oli jokaiselle liittymälle laskettu lyhin etäisyys bussipysäkille.

Kaistoista ei ollut saatavilla valmista paikkatietoaineistoa, joten kaistojen määrät tuotettiin manuaalisesti. Tarkasteltavien liittymien kaistojen määrät laskettiin manuaalisesti käyttäen apuna ilmakuvia sekä Google Street View -palvelua. Turusta hyödynnettiin uusimpia ilmakuvia vuosilta 2022 ja 2021 ja Oulusta vuosilta 2022 sekä 2020. Epäselvissä tapauksissa, kuten

kuluneiden tiemerkintöjen, kasvillisuuden tai varjojen kohdalla kaistojen laskentaan käytettiin apuna Google Street View -palvelua. Street View tarjoaa autolla kuvatun 360-katunäkymän, joka on vapaasti liikuteltavissa (Google Maps Street View). Lopuksi ilmakuvien ja Street View -palvelun avulla lasketut kaistojen määrät lisättiin liittymäpisteiden attribuuttitietoihin.

Liittymien kaistat määritettiin bufferien sisältä, eli jos kaista erkaantui ajoväylästä yli 30 m päässä liittymän keskipisteestä, sitä ei huomioitu laskennassa. Kaistojen määrä laskettiin siten, että jokainen liittymään johtava kaista laskettiin erikseen. Eri tienhaaroissa sijaitsevat kaistat laskettiin siis erillisiksi kaistoiksi, vaikka sama ajolinja jatkuisi liittymän toisella puolella. Esimerkiksi liittymän yli jatkuva suora kaista laskettiin kahdeksi kaistaksi. Kun kaistat laskettiin jokaisesta tienhaarasta erikseen, tarkastelu sisällytti kaiken suuntaiset huomioitavat liikennevirrat. Jos suoraan ajavien kaista eri tienhaaroissa olisi laskettu vain kerran, tarkastelu ei olisi ottanut mukaan huomioinnin tarvetta suoraan ajavien edessä sekä takana oleville ajoneuvoille. Kuvassa 8 on esitetty kaksi esimerkkiä kaistojen laskennasta, kuvassa 8a laskettujen kaistojen määrä on 10 ja kuvassa 8b määrä on 19. Esimerkiksi kuvan 8a kolmihaaraisessa liittymässä kuvan vasemman yläkulman tienhaarasta laskettiin kolme kaistaa, oikeasta alkukulmasta neljä ja risteävästä tienhaarasta kolme. Kaistojen määrän laskennassa tehtiin muutamia poikkeuksia esimerkiksi asuinalueiden liittymissä, joissa ei ole varsinaisia kaistoja. Laskennan poikkeukset on kuvattu liitteessä 2.



Kuva 8. Esimerkit liittymien kaistojen määrän laskemisesta ilmakuvasta Oulussa. a) Kolmihaarainen liittymä, jossa kaistojen määräksi laskettiin 10. b) Neliharainen liittymä, jossa kaistoja on jopa neljä rinnakkain samansuuntaiselle liikenteelle. Liittymästä laskettiin yhteensä 19 kaistaa.

Liikennemerkkien määrällä haluttiin kuvata liikenneympäristön kompleksisuutta liittymissä. Liikennemerkkien määrä liittymien vaikutusalueilla laskettiin Summarize Within -työkalun avulla. Työkalun lähtöaineistoksi annettiin liittymien bufferit sekä liikennemerkkien pistetaso.

Analyysin tuloksena oli bufferitaso, joka sisältää liikennemerkkien kappalemäärän jokaisen bufferin sisällä. Nämä arvot liitettiin liittymäpisteisiin Join-työkalulla. Edellä mainittujen muuttujien lisäksi määritettiin muiden mahdollisten onnettomuuksia selittävien muuttujien arvot liittymissä. Näihin muuttujiin kuului puiden tiheys, pinnan kaltevuus, tien toiminnallinen luokka, asutuksen ja palveluiden maanpeiteluokat, rakennusten osuus sekä asukasmäärä. Nämä muuttujat eivät päätyneet regressiomallinnuksen tuloksiin tilastollisen merkitsevyyden puutteen takia, mutta muuttujien arvojen määrittäminen sekä aineistolähteet on kuvattu liitteessä 3.

3.10 Lineaarinen regressiomallinnus

Ympäristömuuttujien ja onnettomuuksien määrän yhteyttä liittymissä tarkasteltiin lineaarisen regressiomallinnuksella. Alkuvalmisteluna muunnettiin Excel-muotoon liittymäpisteiden attribuuttitaulukko, joka sisälsi liittymien onnettomuusmäärät sekä ympäristömuuttujien arvot. Regressiomallinnus toteutettiin tilasto-ohjelmisto SPSS:n avulla (versio 27.0.1.0) käyttäen vastemuuttujana onnettomuuksien kappalemäärää liittymän vaikutusalueella. Mallinnus tehtiin käyttäen SPSS:n Enter-metodia, joka sisällyttää malliin kaikki sille annetut selittävät muuttujat. Regressioanalyysillä tehtiin useita eri malleja muodostamalla mahdollisista selittävästä muuttujista kolmen ja neljän muuttujan kombinaatioita. Selittävät muuttujat, joista mallit muodostettiin, valittiin teoriapohjan ja aineistojen saatavuuden perusteella. Malleissa käytetyt muuttujat on koottu muuttujien sisällön mukaan kuvaan 9. Kaikki selittävät muuttujat olivat määrällisiä eikä binäärisiä muuttujia käytetty. Selittävien muuttujien arvoja muunnettiin neliöön korottamisen, luonnollisen logaritmin (ln) sekä neliöjuuren avulla, jotta voitaisiin löytää myös mahdollisia epälineaarisia suhteita muuttujien ja onnettomuuksien määrän välillä.

Liikenneympäristön fyysiset elementit	Tien hallinta	Etäisyydet	Urbaanit tekijät
<ul style="list-style-type: none"> - Kaistojen määrä - Liikennemerkkien määrä - Istutettujen puiden lukumäärä - Pinnan kaltevuus (keskiarvo) 	<ul style="list-style-type: none"> - Nopeusrajoitus (keskiarvo) - Tien toiminnallinen luokka (keskiarvo) 	<ul style="list-style-type: none"> - Etäisyys lähimpään liittymään - Etäisyys lähimmälle bussipysäkille 	<ul style="list-style-type: none"> - Corine-maanpeiteaineisto: asutuksen ja palveluiden osuus - Rakennusten osuus - Asukasmäärä (1km x 1km ruudut)

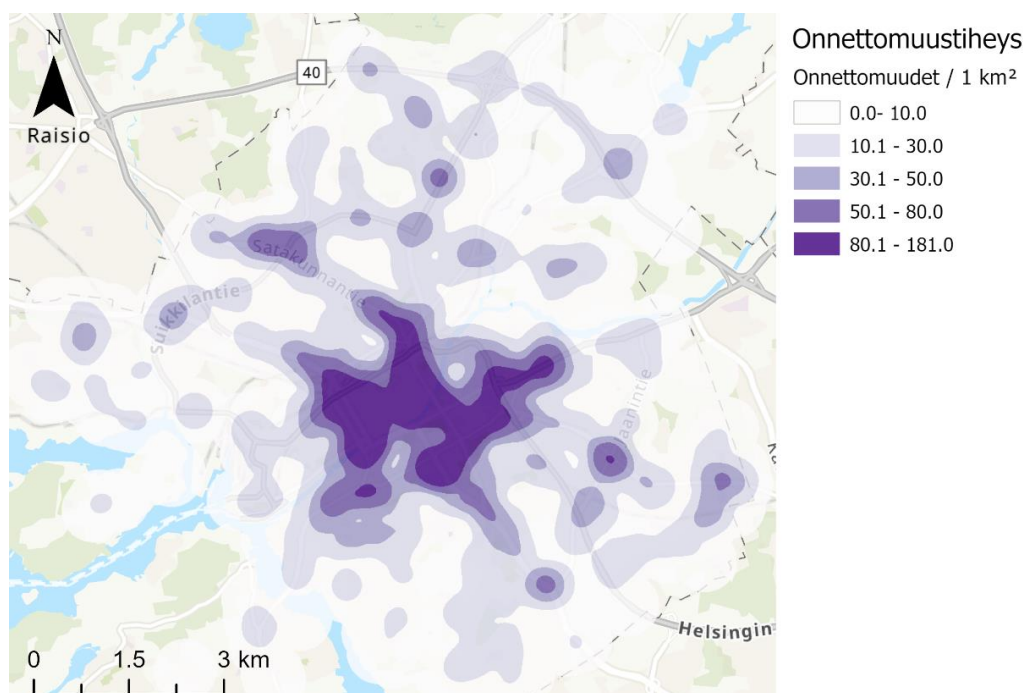
Kuva 9. Regressiomallinnuksessa käytetyt selittävät muuttujat niiden sisällön mukaan jaoteltuna. Muuttujista valittiin 3 ja 4 muuttujan kombinaatioita, joista muodostettiin lineaariset regressiomallit.

Regressiomallien tulosten perusteella valittiin kaksi toimivinta mallia molemmilta tutkimusalueilta mallien ja niiden muuttujien tilastollisten tunnuslukujen perusteella. Valinta tehtiin mallin selitysasteen sekä mallin ja muuttujien tilastollisesta merkitsevyydestä kertovien p-arvojen perusteella. Näiden neljän mallin avulla arvioitiin onnettomuuksien määrään vaikuttavia liikenneympäristön tekijöitä liittymissä. SPSS:n tuottamien regressioanalyysin tulosten lisäksi malleille laskettiin Excelissä RMSE-virhearvo, joka kuvaa keskineliösumman neliöjuurta (eng. Root Mean Square Error). RMSE-arvo pohjautuu todellisen onnettomuusmäärän ja mallin ennustaman onnettomuusmäärän eroon ja pieni RMSE-arvo viittaa mallin hyvään ennustetarkkuuteen. Malleja vertailemalla tehtiin johtopäätökset siitä, millä tekijöillä on eniten vaikutusta onnettomuuksien määrään liittymissä ja eroaako ympäristömuuttujien vaikutus eri tutkimusalueilla.

4 Tulokset

4.1 Onnettomuuksien alueellinen jakautuminen

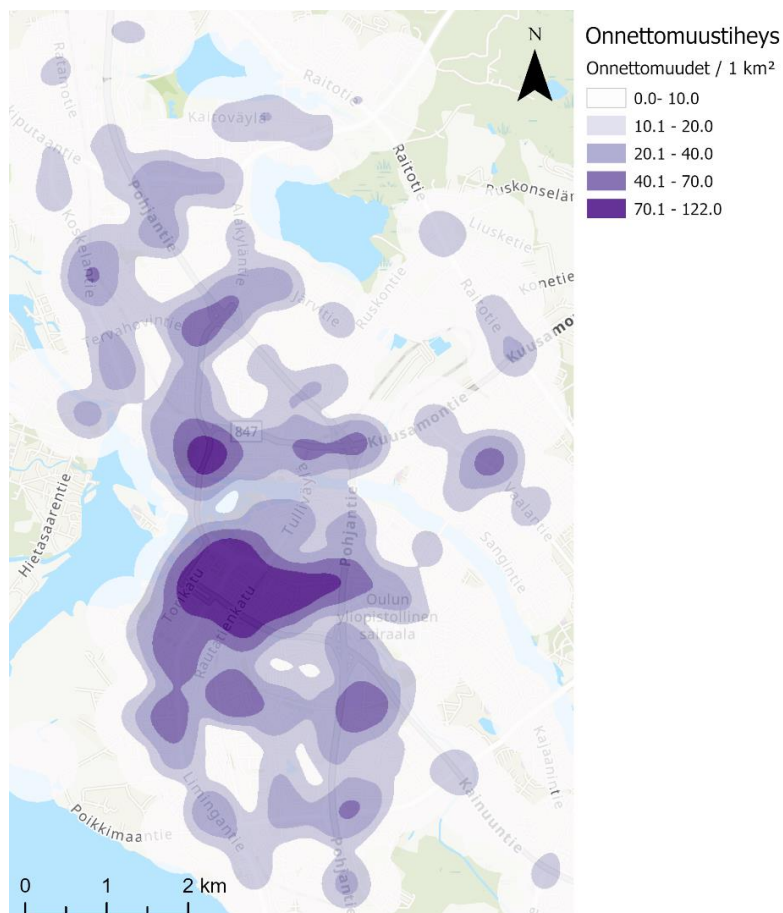
Kuvan 10 kartassa on näkyvissä Turun tutkimusalueen onnettomuustiheys planaarisella Kernel Density -analyysillä laskettuna. Kartasta erottuu selkeästi keskustan onnettomuustiheä vyöhyke, jonka muoto mukailee alueen pääliikenneväyliä. Tällä vyöhykkeellä onnettomuustiheys vaihteli noin 80 ja 181 onnettomuuden välillä / km². Ydinkeskustan lisäksi eniten onnettomuuksia oli Itäisen keskustan ja Kupittaaan alueella. Keskustan ulkopuolella onnettomuudet olivat jakautuneet lähinnä isojen liikenneväylien ympärille, esimerkiksi Satakunnantiellä onnettomuustiheys oli suuri sekä keskustan päässä että Länsikeskuksessa. Lisäksi onnettomuushotspotteja oli tunnistettavissa esimerkiksi Martin ja Itäharjun alueilta.



Kuva 10. Onnettomuustiheys Turun tutkimusalueella Kernel Density -analyysillä määritettynä (naapuruston koko 500 m, solukoko 10 m).

Oulun tutkimusalueen Kernel Density -analyysin tulos on esitetty kuvassa 11. Tiheimmät onnettomuuskeskittymät olivat asettuneet pääliikenneväylien varteen ja etenkin väylien liittymäkohtiin. Kartasta erottuu selkeästi tihein onnettomuuskeskittymä keskustan alueella, joka ulottuu keskustan länsireunasta Raksilaan saakka. Onnettomuuksien määrä tällä vyöhykkeellä vaihteli 70 ja 122 onnettomuuden välillä / km². Toinen onnettomuuksien tiheä hotspot on tunnistettavissa keskustan pohjoispuolelta Tuirasta, missä useat liikenneväylät risteävät. Lisäksi onnettomuushotspotteja sijaitsi esimerkiksi Limingantullissa, Kaukovainiolla

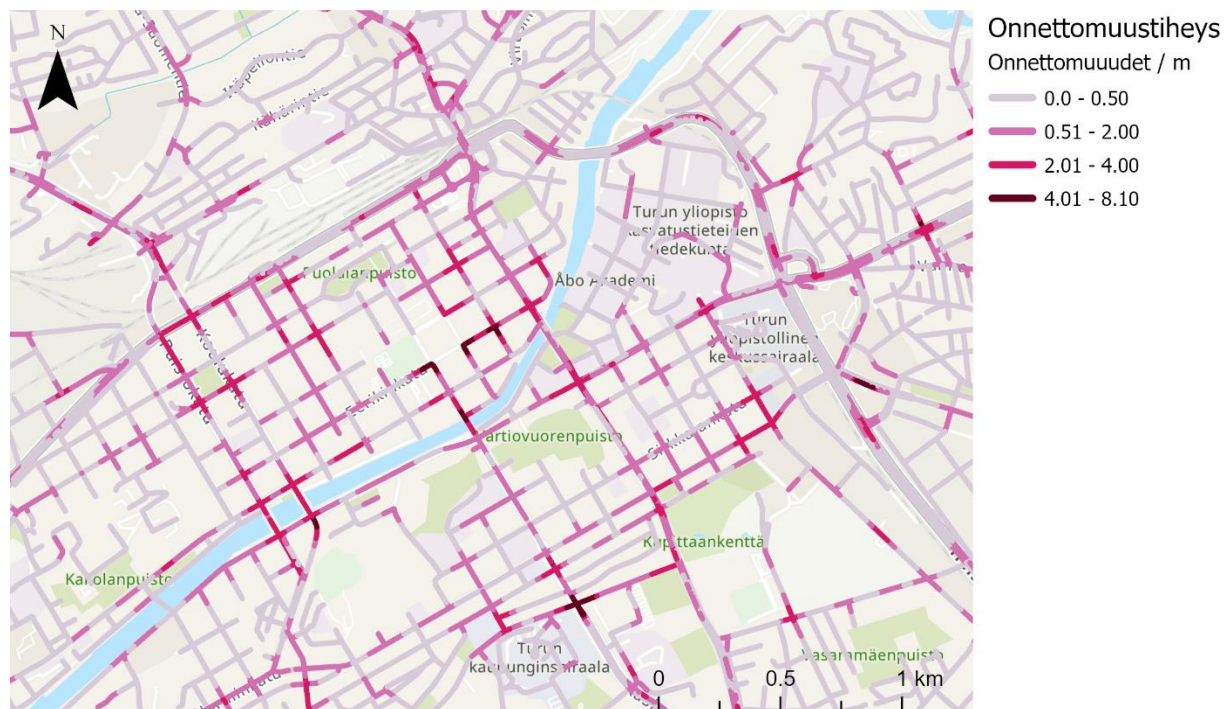
ja Kuusamontien sekä Pohjantien liittymän ja ”Miljoonamontun” yhteydessä. Oulun tutkimusalueella onnettomuudet olivat jakautuneet tasaisemmin laajalle alueelle, joten kartan vyöhykkeet ovat yhtenäisempiä. Analyysin tuloksissa on huomioitava, että tutkimusalueiden karttojen tiheysluokittelut eivät ole samat. Oulun tutkimusalueella onnettomuudet olivat jakautuneet hieman tasaisemmin ja Turussa hotspottien onnettomuustiheys oli suurempi. Luokittelulla pyrittiin esittämään onnettomuuksien vaihtelua aineiston sisällä ja koska onnettomuuksien tiheydet olivat eri suuruusluokkaa, myös luokittelussa on eroja.



Kuva 11. Onnettomuustiheys Oulun tutkimusalueella Kernel Density -analyysillä määritettynä (naapuruston koko 500 m, solukoko 10 m).

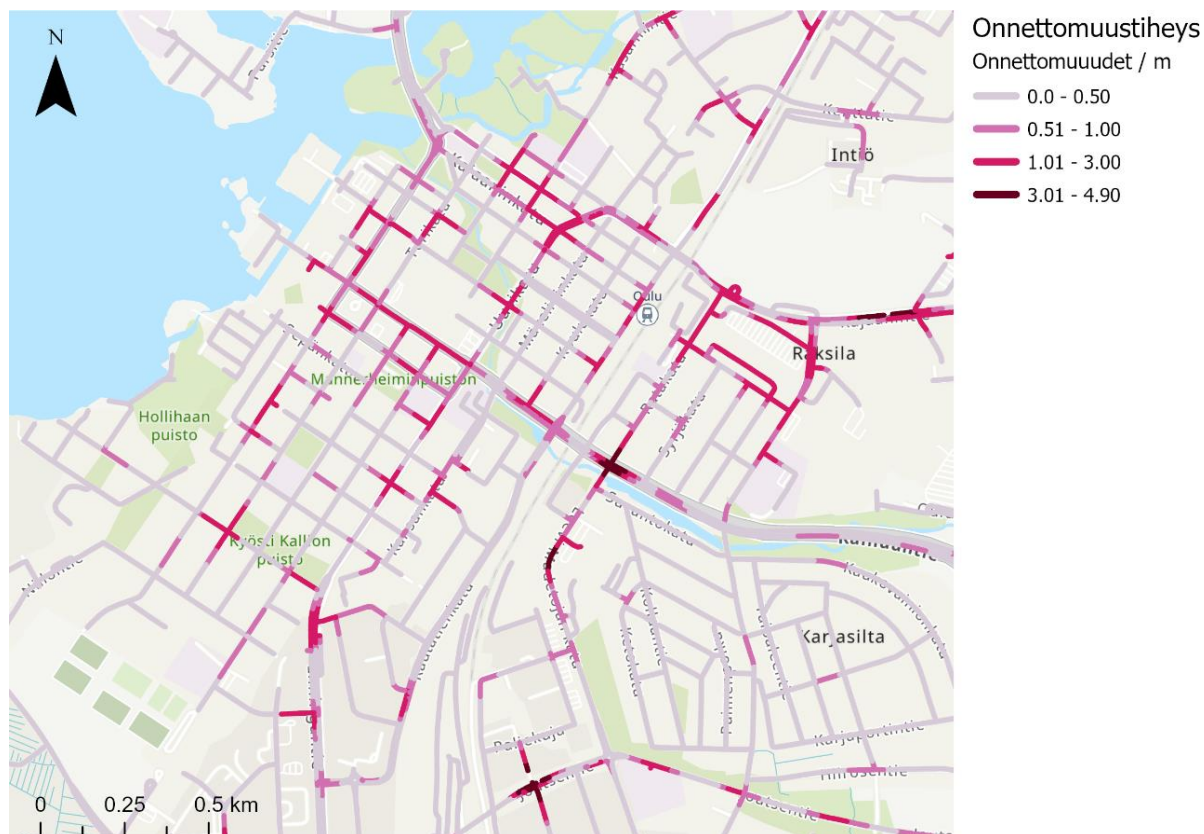
Verkostomuotoinen tiheysanalyysi sopii hyvin pienemmän mittakaavan tarkasteluun. Kuvan 12 kartassa näkyy NKDE-analyysillä laskettu onnettomuustiheys tieverkoston sisällä Turun keskustan lähetyvillä. Onnettomuustiheys oli suuri etenkin pääkaduilla, kuten Hämeenkadulla, Uudenmaankadulla sekä Kaskenkadulla. Monilla tiheästi liikennöidyillä kaduilla onnettomuustiheys oli suuri koko kadun pituudelta ja onnettomuusaltiita liittymiä oli useita samojen katujen varressa. Onnettomuuksia oli tiheässä ydinkeskustan kaduilla ja etenkin Kauppatorin läheisyydessä, esimerkiksi Brahenkadulla ja Eerikinkadun itäosassa. Lisäksi

Puistokadun ja Koulukadun alueella keskustan länsiosassa oli suuri onnettomuustiheys. Ydinkeskustan ulkopuolelta kartasta erottuu selkeästi Turun onnettomuusalttein liittymä Kaskenkadun ja Kunnallissairaalan tien risteyskohdassa Kupittaalla kartan eteläreunassa. Lisäksi Kupittaan Tiedepuisto erottuu kartalta onnettomuushotspotina.



Kuva 12. NKDE-analyysillä laskettu onnettomuustiheys tieverkoston sisällä Turun keskustan läheisyydessä (tarkasteluetaisyys 100 m, solukoko 30 m).

Oulun verkostomuotoisen tiheysanalyysin tulokset on esitetty kuvan 13 kartassa. Oulun ydinkeskustassa onnettomuustiheys oli korkea etenkin pääkaduilla, kuten Saaristokadulla ja Uusikadulla. Myös Lävistäjä ja sen läheiset katualueet ydinkeskustan pohjoisosassa erottuvat kartasta onnettomuushotspotteina. Koulukadulla ja Mäkelininkadulla onnettomuustiheys oli lähellä nollaa, vaikka kadut sijaitsevatkin ydinkeskustassa. Yllättävästi Pokkisenpuiston alue keskustan pohjoisessa sisääntulossa ei edustanut onnettomuustiheintä aluetta, vaikka Pokkitörmä onkin liikenneympäristöltään haastava etenkin talvisin liittymäalueenn suuren kaltevuuden vuoksi. Onnettomuustiheys ei ollut kaikista suurin ydinkeskustassa. Tiheimmät onnettomuushotspotit sijoittuivat Oulun kahteen onnettomuusalttiimpaan liittymään: Kainuuntien ja Ratakadun – Leevi Madetojan kadun risteyskohtaan kartan keskiosassa sekä Joutsentien ja Paljetien liittymään Limingantullissa, kartan eteläreunassa. Lisäksi onnettomuustiheys oli korkea ydinkeskustan itäpuolella Raksilan alueella markettien sekä Energia Areenan läheisyydessä. Oulussa onnettomuustiheydet olivat hotspoteissa pienempiä kuin Turun tutkimusalueella myös verkostomuotoisessa Kernel Density -analyysissä.



Kuva 13. NKDE-analysillä laskettu onnettomuustiheys tieverkoston sisällä Oulun keskustan läheisyydessä (tarkasteluetaisyys 100 m, solukoko 30 m).

4.2 Liittymäpisteiden sijaintitarkkuus ja tarkasteluun valitut liittymät

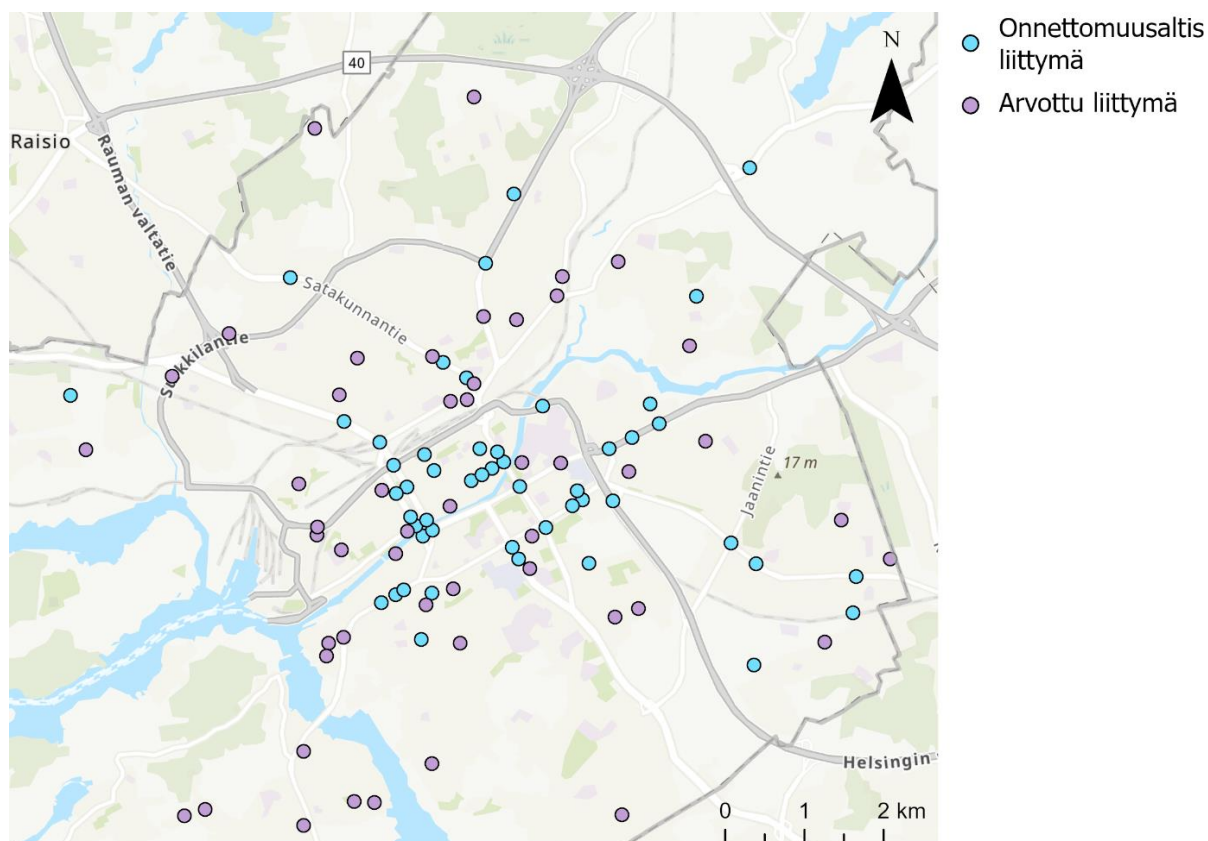
Työkaluketjun tuottaman liittymäpistetason laatu oli yleisesti todella hyvä. Etenkin perinteisissä kolmi- ja nelihaarisissa liittymissä pisteet osuivat tarkalleen liittymän keskelle. Kuvassa 14 näkyy liittymäpisteiden sijaintitarkkuus Oulun keskustassa. Kuvasta 14b nähdään, että liittymäpisteet osuvat liittymän keskikohtaan, vaikka tie koostuisi kahdesta tielinkistä.



Kuva 14. Tielinkit ja työkaluketjulla muodostetut liittymäpisteet Oulun keskustassa. a) Liittymäpisteet, joiden tiet koostuivat yhdestä linkistä. b) Liittymäpisteet, joissa oli useampia tielinkkejä samalla tiellä.

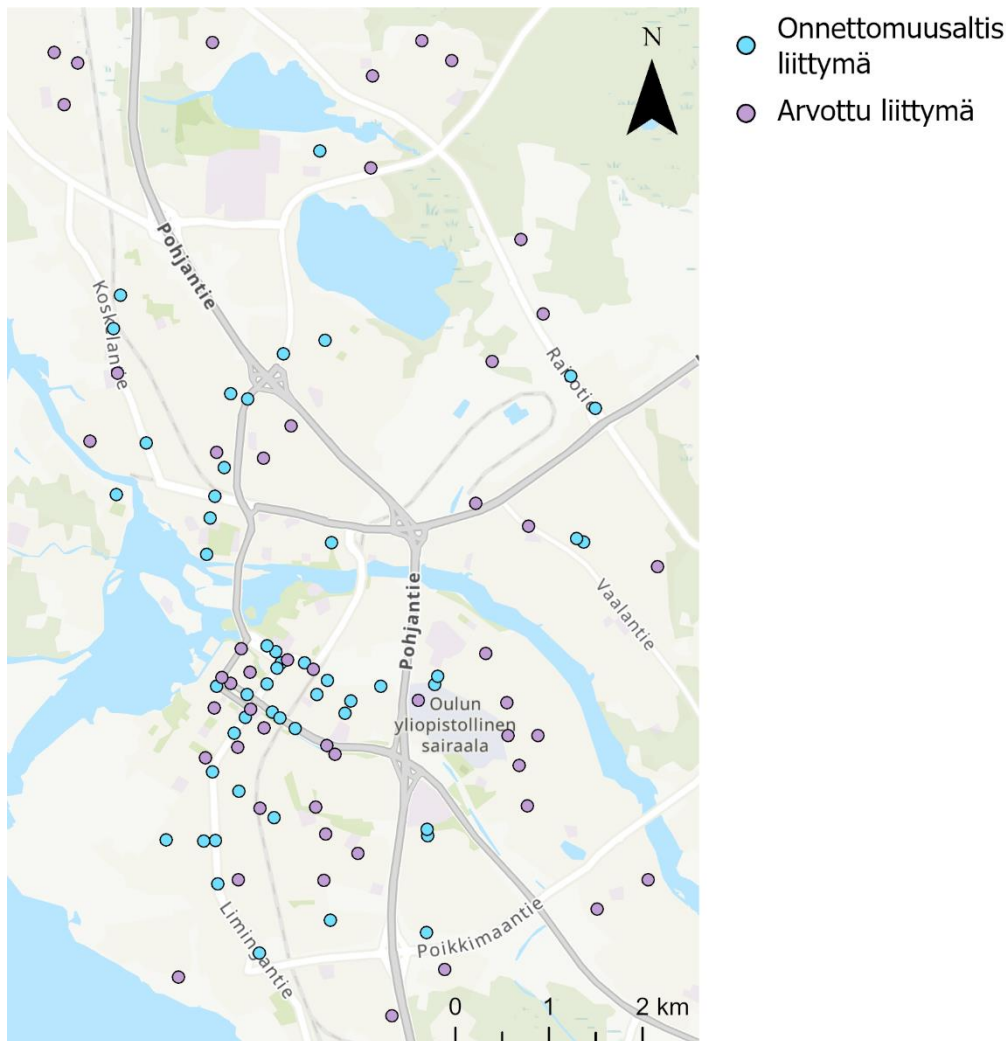
Vaikka liittymien sijaintitarkkuus oli hyvä valtaosassa liittymiä, osalle pisteistä tehtiin korjauksia. Työkaluketjun Integrate-työkalun parametrit valittiin niin, että lähekkäiset liittymät eivät yhdistyisi samaan pisteeseen. Tästä syystä pisteet eivät muodostuneet liittymän keskelle liikenneympyröissä. Tielinkkien linkkityyppi-ominaisuustiedon avulla paikannettiin liikenneympyrät ja pisteet korjattiin liittymän keskelle. Osa isompien teiden erotelluista kaistoista koostuu erillisistä tielinkeistä, jonka takia linkkien yhdistymiskohtiin liittymien ulkopuolelle muodostui pisteitä muutamissa kohdissa. Nämä pisteet poistettiin ennen tarkempaa tarkastelua.

Kun liittymäpisteet oli muodostettu, valittiin tilastollisen mallinnuksen otokseen 100 liittymää molemmilta tutkimusalueilta. Turun tutkimusalueella tarkasteluun valitut liittymät keskittyivät selkeästi keskustan läheisyyteen (kuva 15). Onnettomuusalttiit liittymät on kuvattu kartassa sinisellä ja satunnaisesti valitut liittymät violetilla. Valtaosa onnettomuusalttiista liittymistä sijaitsi keskustan alueella, mutta keskustan ympärillä oli runsaasti myös satunnaisesti valittuja liittymiä. Lisäksi molempia liittymäpisteitä oli useita isojen ajoväylien, kuten Satakunnantien, Hämeentien ja Littoistentien varrella. Keskustan ulkopuolella oli enemmän satunnaisesti valittuja pisteitä. Vähiten edustettuna oli tutkimusalueen pohjoisosa ja Ruissalon saari, mutta toisaalta näissä osissa on paljon yksityisteitä, joiden liittymät eivät ole mukana tutkielmassa.



Kuva 15. Tarkasteltavien liittymien jakautumien Turun tutkimusalueella. Onnettomuusalttiita liittymiä on eniten keskustassa ja arvottu liittymäpisteet ovat jakautuneet tasaisemmin tutkimusalueella.

Oulun tutkimusalueelta valitut liittymäpisteet on esitetty kuvassa 16. Suuri osa liittymistä sijoittui keskustaan tai sen läheisyyteen, ja vähiten liittymiä oli tutkimusalueen pohjoisosassa. Länsi-itäsuunnassa liittymät keskittyivät selkeästi alueen länsiosaan ja lähes 70 % liittymistä sijaitsi Pohjantien länsipuolella. Keskustan lisäksi esimerkiksi Raksilassa, Tuirassa ja Koskelassa oli useampia liittymiä. Tutkimusalueella heikosti edustettuna oli Linnanmaan alue Kuivasjärven eteläpuolella, missä sijaitsee yliopisto ja runsaasti muita palveluita.



Kuva 16. Tarkasteltavien liittymien jakautuminen Oulun tutkimusalueella. Keskustassa on runsaasti sekä onnettomuusalttiita että arvottuja liittymiä. Valtaosa liittymistä sijoittuu Pohjantien länsipuolelle.

4.3 Onnettomuuksien määrä ja jakautuminen liittymien vaikutusalueilla

Turun tutkimusalueella onnettomuuksia oli tarkastelujakson 2011–2021 aikana 1556 kappaletta. Tutkimusalueen 1556 onnettomuudesta 335 sijoittui tarkasteluun valittujen 100 liittymän vaikutusalueelle. Satunnaisesti valituissa liittymissä onnettomuuksia oli 0–4

kappaletta. Onnettomuuksien määrä Turun onnettomuusalttiissa liittymissä vaihteli 4 ja 17 onnettomuuden välillä. Valtaosa onnettomuusalttiista liittymistä oli nelihaaraisia liittymiä ja onnettomuuksien määrä oli korkea etenkin monikaistaisissa liittymissä, kun taas satunnaisesti valituista liittymistä suuri osa oli kolmihaaraisia.

Kaikista eniten onnettomuuksia oli Kaskenkadun ja Kunnallissairaalan tien liittymässä, jonka vaikutusalueella oli 17 onnettomuutta (kuva 17a). Onnettomuuksien määrä oli erityisen korkea myös Jaanintien ja Kalevantien liittymässä Itäharjun Prisman vieressä, jossa oli 11 onnettomuutta tarkasteluajalta (kuva 17b). Molemmat liittymät sijaitsevat ison marketin läheisyydessä ja liikennemäärät ovat oletetusti suuria. Näissä liittymissä onnettomuudet olivat keskittyneet pääosin liittymän keskiosaan konfliktipisteisiin eli kohtiin, jossa eri suuntaiset liikennevirrat kohtaavat. Liittymiä yhdisti myös monikaistaisuus molemmilla risteävillä ajoväylillä. Kaskenkadun ja Kunnallissairaalan tien liittymän ympärillä oli runsaasti isoja lehtipuita, jotka voivat heikentää näkyvyyttä etenkin kasvukauden aikana. Lisäksi onnettomuuksien määrä oli suuri esimerkiksi Hämeentien ja Halistentien – Tammitien liittymässä Nummessa, jossa onnettomuuksia oli seitsemän tarkastelujakson aikana. Turun onnettomuusalttiissa liittymissä ei ollut havaittavissa onnettomuuksien keskittymistä liittymän tiettyyn kohtaan, vaan onnettomuudet sijoittuivat joko liittymän keskiosaan tai tasaisesti liittymän eri osiin.

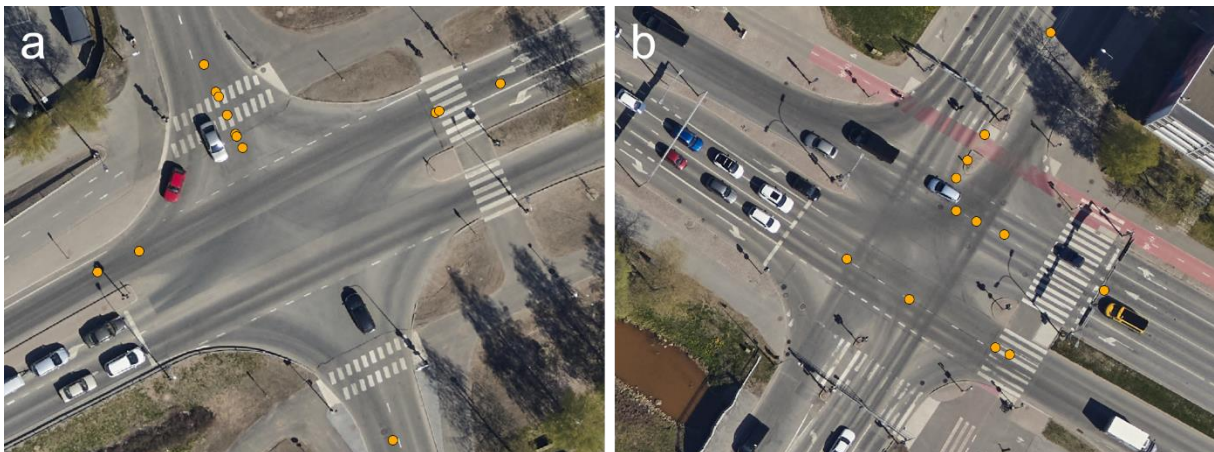


Kuva 17. Turun onnettomuusalttiimmat liittymät. a) Kaskenkadun ja Kunnallissairaalan tien liittymässä onnettomuudet olivat keskittyneet liittymän keskiosaan. b) Jaanintien ja Kalevantien liittymässä onnettomuuspaikkoja oli tasaisesti laajan liittymän eri kaistoilla.

Oulun tutkimusalueella onnettomuuksien määrä 2011–2021 oli 840, joista 200 onnettomuutta sijoittui valittuihin liittymiin. Pyöräilyn suuri osuus Oulun alueen kulkumuotojakaumasta näkyi myös onnettomuuksissa, sillä pyöräilijä oli osallisena 37 % kaikista tutkimusalueen

onnettomuuksista, kun Turussa vastaava osuus oli alle 30 %. Satunnaisesti valituissa liittymissä onnettomuuksia oli 0–2 ja onnettomuusaltiissa liittymissä määrä vaihteli 2 ja 13 onnettomuuden välillä. Onnettomuusaltiisiin liittymiin kuului sekä kolmi- että nelihaaraisia liittymiä. Kaikista vaarallisimpia liittymiä olivat monikaistaiset nelihaaraiset liittymät.

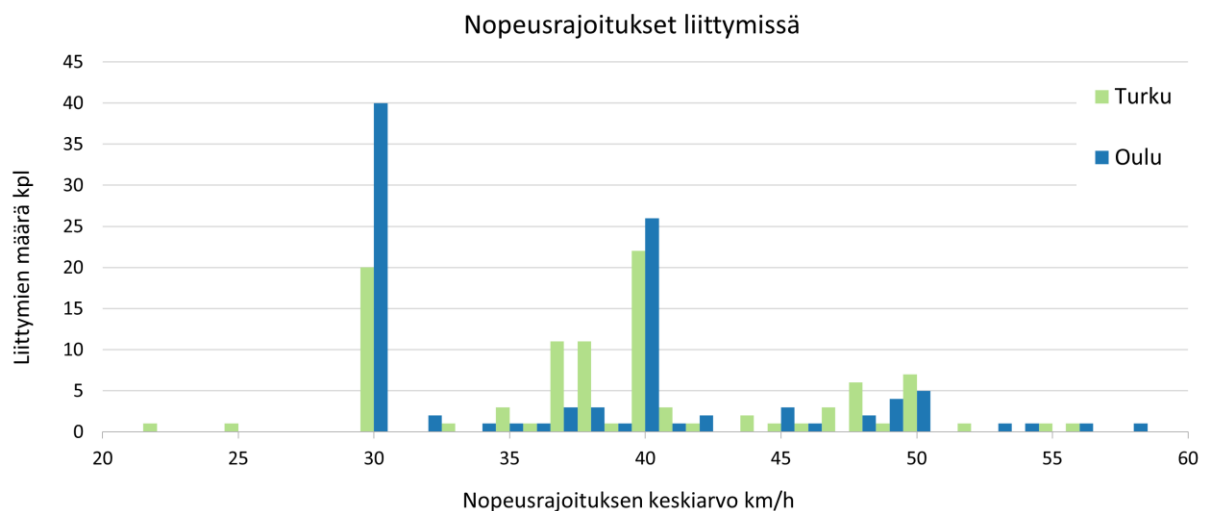
Kappalemäärältään Oulun onnettomuusalttiin liittymä oli Joutsentien ja Paljetien risteyskohta Karjasillalla, jonka vaikutusalueella oli 13 onnettomuutta tarkastelujakson aikana (kuva 18a). Liittymä sijaitsee Joutsensillan kupeessa ja lännestä saavuttaessa liittymään johtaa merkittävä alamäki Joutsensillalta. Suurimmassa osassa liittymän onnettomuuksista osallisena oli myös pyöräilijä. Toiseksi eniten onnettomuuksia oli Kainuuntien ja Ratakadun – Leevi Madetojan kadun liittymässä Raksilassa, jossa onnettomuus pisteitä oli 11 (kuva 18b). Raksilan liittymä on monikaistainen molempien risteävien teiden osalta, mutta Karjasillan liittymässä Paljetiellä on vain yksi kaista ajosuuntaa kohden. Molemmat liittymät sijaitsevat ostoskeskuksen tai isojen markettien lähellä. Näissä liittymissä oli selkeästi huomattavissa onnettomuuksien keskittymien tiettyyn kohtaan liittymän vaikutusalueella. Joutsentien ja Paljetien liittymässä valtaosa onnettomuuksista oli tapahtunut pohjoisessa tienhaarassa (kuva 18a). Raksilan onnettomuusaltiissa liittymässä useat onnettomuudet olivat sijoittuneet peräkkäin liittymän pohjoisosaan kohtaan, jossa eri suuntaiset liikennevirrat risteävät (18b). Lisäksi tässä kohdassa on liikenteenjakaaja, jonka eri puolilla oli sattunut onnettomuuksia. Kolmannella sijalla onnettomuuksien määrässä oli Raksilassa sijaitseva Kajaanintien ja hautuumaan itäisen parkkipaikan risteyskohta, jossa onnettomuuksia oli seitsemän kappaletta.



Kuva 18. Oulun tutkimusalueen onnettomuusalttiimmat liittymät onnettomuuksien kappalemäärän mukaan. a) Joutsentien ja Paljetien liittymän vaikutusalueella oli 17 onnettomuutta, joista suurin osa oli keskittynyt liittymän pohjoisosaan. b) Kainuuntien ja Ratakadun – Leevi Madetojan kadun liittymän 11 onnettomuutta olivat sijoittuneet peräkkäin liittymän pohjoisosaan.

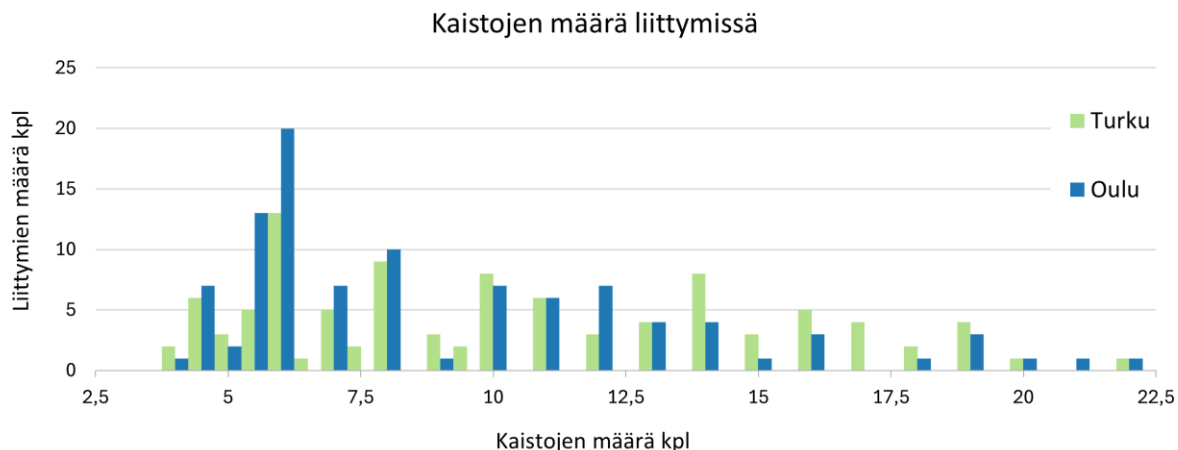
4.4 Ympäristömuuttujien jakaumat liittymissä

Muuttujien jakaumalla on merkitystä tilastollisen mallinnuksen tulokselle, joten seuraavana tarkastellaan eri ympäristömuuttujien jakaumia liittymissä. Kuvassa 19 on nähtävissä nopeusrajoitusten keskiarvon jakautuminen Turun ja Oulun otosten liittymissä. Oulun liittymissä valtaosa keskiarvoista oli 30 km/h tai 40 km/h, kun taas Turussa nopeusrajoitusten keskiarvot olivat jakautuneet tasaisemmin. Turun otoksessa teiden nopeusrajoituksissa oli siis enemmän vaihtelua liittymien vaikutusalueiden sisällä. Molemmissa kaupungeissa nopeusrajoitusten keskiarvot sijoittuivat kuitenkin pääosin välille 30–50 km/h.



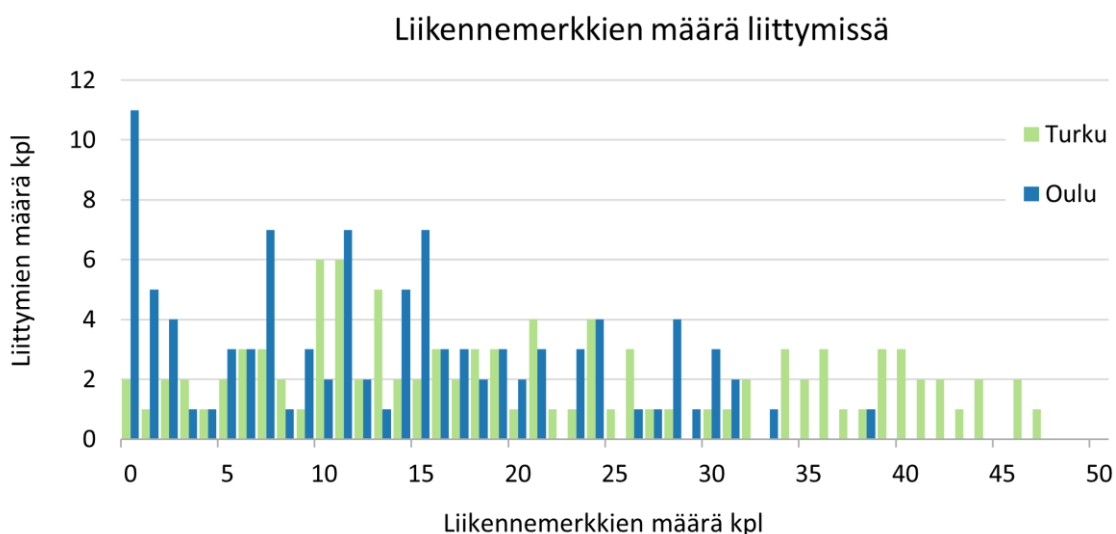
Kuva 19. Liittymien nopeusrajoitusten keskiarvo Turun ja Oulun tarkasteltavissa liittymissä. Keskiarvo on määritetty liittymän vaikutusalueen tielinkkien nopeusrajoitusten keskiarvona.

Kaistojen määrät olivat jakautuneet melko samalla tavalla molemmilla kaupungeissa (kuva 20). Suurimmat erot voidaan huomata monikaistaisten liittymien määrässä: Turun otoksessa oli enemmän liittymiä, joiden laskettu kaistojen määrä oli yli 15. Vastaavasti Oulussa oli runsaasti liittymiä, joissa kaistojen määrä vaihteli 4,5–6 välillä. Nämä olivat suurilta osin asuinalueiden pieniä liittymiä, joissa ei ole varsinaisia erilisiä kaistoja eri suuntaiselle liikenteelle ja osa ajolinjoista on laskettu puolikkaina kaistoina. Molempien tutkimusalueiden otoksiin kuului kuitenkin sekä monikaistaisia, että yksikaistaisia liittymiä.



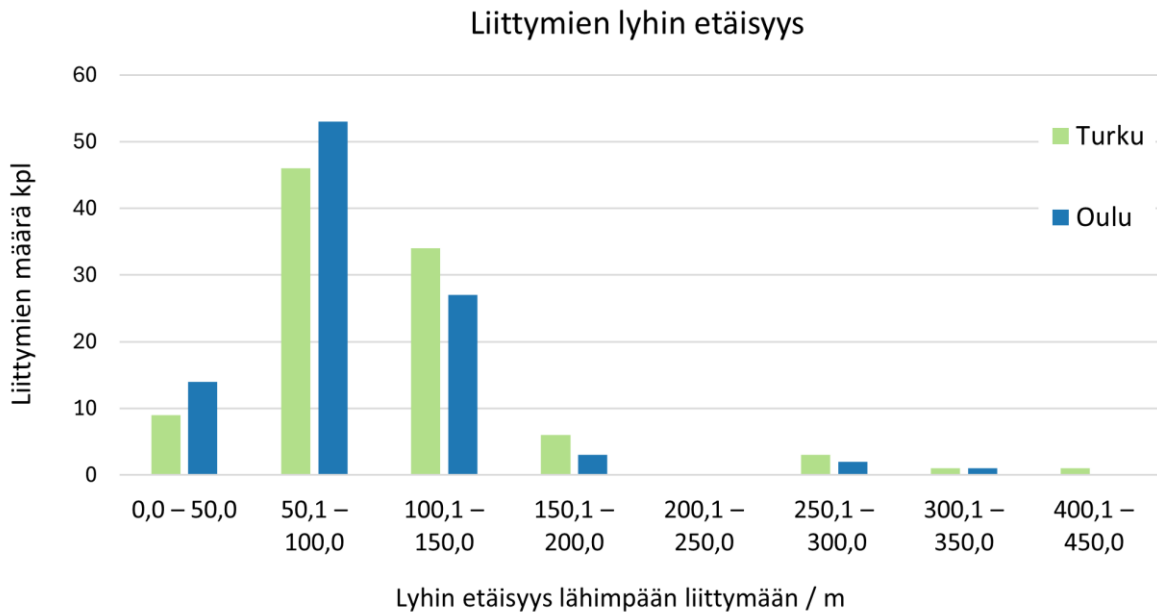
Kuva 20. Laskettu kaistojen määrä Turun ja Oulun tarkasteltavissa liittymissä. Oulussa oli enemmän liittymiä, joissa kaistojen määrä on pieni ja Turussa monikaistaisia liittymiä oli Oulun otosta enemmän.

Liikennemerkkien määrä tarkastelluissa liittymissä on esitetty kuvan 21 diagrammissa. Turun liittymissä oli useita kohteita, joissa on yli 30 liikennemerkkiä. Tämä selittyy sillä, että Turun otoksessa oli enemmän monikaistaisia liittymiä (kuva 20), joissa on runsaasti erilaisia liikennemerkkejä. Vastaavasti Oulun otoksessa oli enemmän liittymiä, joissa merkkien määrä jäi alle 10. Yli 40 liikennemerkin liittymiä ei kuulu Oulun otokseen. Tähän voi vaikuttaa liittymien otoksen lisäksi se, että Oulun aineistossa kaikkia samassa pylväässä olevia liikennemerkkejä ei oltu eritelty omiksi pisteiksi. Molempien tutkimusalueiden otoksessa liikennemerkkien jakaumassa oli kuitenkin selkeää vaihtelua, joten muuttuja soveltuu hyvin käytettäväksi lineaarisen regressiomallinnuksen selittävänä muuttujana.



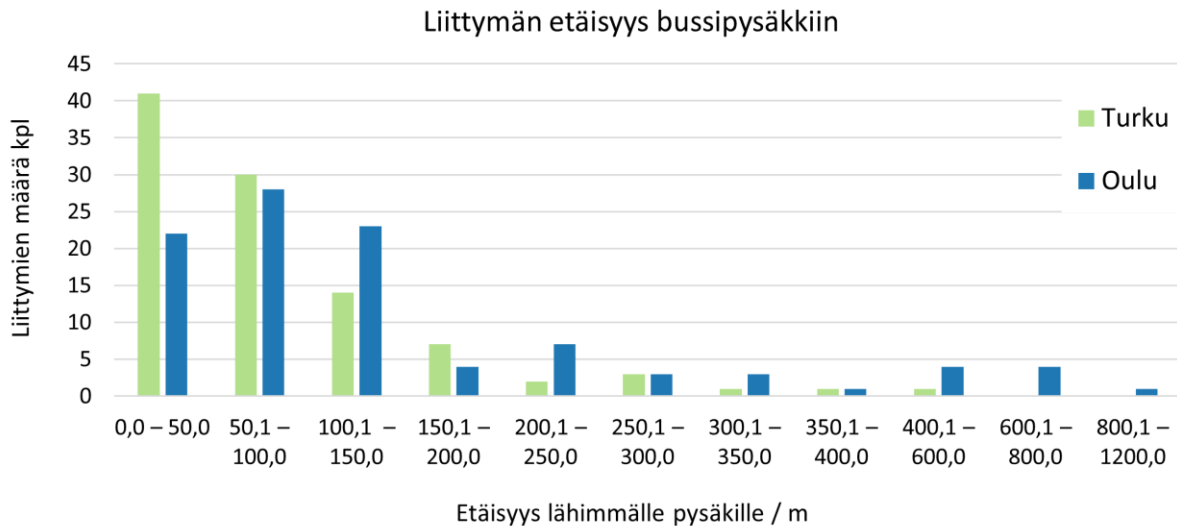
Kuva 21. Liikennemerkkien määrä Turun ja Oulun tarkastelluissa liittymissä. Oulussa oli enemmän liittymiä, joissa liikennemerkkien määrä on pieni ja Turussa on useita liittymiä, joissa liikennemerkkejä oli yli 30 kappaletta.

Liittymien etäisyydet olivat jakautuneet tutkimusalueiden otosten välillä hyvin samankaltaisesti (kuva 22). Muuttuja kuvaa lyhintä etäisyyttä seuraavaan liittymään. Sekä Turun että Oulun liittymäpisteissä oli eniten 50–100 m liittymävälejä. Myös 100–150 m etäisyydellä toisesta liittymästä olevia pisteitä oli runsaasti. Molempien tutkimusalueiden otoksissa oli vähiten yli 250 m etäisyydellä toisesta liittymästä olevia pisteitä, joten otoksien liittymät sijaitsivat pääosin alueilla, joissa on melko tiheät liittymävälit.



Kuva 22. Liittymien etäisyydet lähimpään liittymään Turun ja Oulun tarkasteltavissa liittymissä 50 m tarkkuudella. Etäisyydet olivat jakautuneet samankaltaisesti molempien tutkimusalueiden liittymissä.

Liittymien välisten etäisyyksien lisäksi tarkasteltiin liittymän etäisyyttä lähimpään bussipysäkkiin. Muuttujan jakauma tutkimusalueilla on esitetty kuvassa 23. Molempien tutkimusalueilla suurimmassa osassa liittymissä etäisyys bussipysäkille oli 0–150 m. Tutkimusalueiden välillä oli kuitenkin myös merkittäviä eroja: Oulun otokseen kuului useita liittymäpisteitä, joissa etäisyys pysäkille oli yli 400 metriä. Kaikista pisin matka bussipysäkille liittymästä oli yli kilometrin. Korkeat etäisyydet sijaitsivat suurilta osin liittymiin, jotka sijaitsivat asuinalueilla, joissa bussipysäkkejä on harvemmassa.



Kuva 23. Liittymien etäisyydet lähimmälle bussipysäkillä Turun ja Oulun tarkastelluissa liittymäpisteissä. Suurimmassa osassa liittymiä etäisyydet olivat 0–150 m, mutta Oulussa oli myös useita liittymiä, joissa etäisyys pysäkillä on yli 400 metriä.

4.5 Ympäristömuuttujien vaikutuksen arviointi onnettomuuksien määrään

Tarkasteluun otetut mallit valittiin mallin selitysasteen sekä mallin ja muuttujien tilastollisesta merkitsevyydestä kertovien p-arvojen perusteella. Molemmilta tutkimusalueilta valittiin yksi kolmen ja yksi neljän selittävän muuttujan malli. Tarkastelussa on siis yhteensä neljä mallia, joiden ympäristömuuttujat on listattu taulukossa 2. Taulukkoon on merkitty muuttujien kohdalle myös mahdolliset muunnokset, joilla saavutettiin toimivin malli. Esimerkiksi neliöön korottamisella on voitu korostaa muuttujien arvojen välisiä eroja. Mallit A ja B ovat Turun tutkimusalueelta ja niiden yhteisiä muuttujia ovat nopeusrajoitus, liikennemerkkien määrä sekä liittymien etäisyys. Lisäksi mallissa B on neljäntenä muuttujana kaistojen määrä. Oulun malleissa C ja D yhteisiä muuttujia ovat nopeusrajoitus, liikennemerkki ja kaistojen määrä. Mallin D neljäs muuttuja on etäisyys lähimpään bussipysäkkiin. Toimivimmat mallit saavutettiin siis käyttämällä eri tutkimusalueilla eri ympäristömuuttujia: liittymän etäisyys lähimpään liittymään oli osana toimivimpia malleja vain Turussa ja etäisyys bussipysäkkiin vain Oulussa.

Taulukko 2. Mallien muuttujat ja tilastolliset tunnusluvut

Malli ja muuttujat	R ²	Korjattu R ²	F-testin p-arvo	RMSE
Malli A (Turku): Nopeusrajoitus ² Liikennemerkki Liittymien etäisyys ²	0,49	0,48	< 0,001	2,73
Malli B (Turku): Nopeusrajoitus ² Liikennemerkki Liittymien etäisyys ² Kaistat ln	0,51	0,49	< 0,001	1,77
Malli C (Oulu): Nopeusrajoitus ln Liikennemerkki Kaistat ln	0,46	0,44	< 0,001	1,68
Malli D (Oulu) Nopeusrajoitus ln Liikennemerkki Kaistat ln Etäisyys bussipysäkkiin ln	0,49	0,46	< 0,001	1,63

Regressiomallien toimivuutta kuvaavat tilastolliset tunnusluvut on koottu taulukkoon 2. Turussa mallien selitysasteet korjatun R²-arvon mukaan olivat mallille A 0,48 ja mallille B 0,49. Mallien selitysasteet olivat siis lähes samat, vaikka mallissa A selittäviä muuttujia oli kolme ja mallissa B muuttujien määrä oli neljä. Mallin B selitysaste oli hieman parempi ja muuttujat pystyivät selittämään 49 % onnettomuuksien määrän vaihtelusta. Molemmissa malleissa F-testin p-arvo oli alle 0,001, eli malleja voidaan pitää kokonaisuudessaan tilastollisesti merkittävänä. Mallien toimivuus eroaa eniten RMSE-virhearvon perusteella, mikä kuvaa mallin ennustetarkkuutta. RMSE-arvo oli kolmen muuttujan mallissa huomattavasti korkeampi, mallin A virhearvo oli 2,73 onnettomuutta ja mallissa B se oli 1,77.

Oulussa mallin C selitysaste oli 0,44 ja mallille D 0,46 (taulukko 2). Mallin D muuttujilla selitysaste oli siis hieman korkeampi: muuttujat pystyivät selittämään 46 % onnettomuuksien määrän vaihtelusta tarkastelluissa liittymissä. Molemmat mallit voidaan tulkita F-testin p-arvon perusteella tilastollisesti merkitseviksi, koska arvo oli molemmissa malleissa alle 0,001. Mallin ennustetarkkuus oli parempi neljän muuttujan D-mallissa, jonka virhe oli keskimäärin 1,63 onnettomuutta.

Mallien selittävien muuttujien tilastolliset tunnusluvut on koottu taulukkoon 3. Turun mallissa A kaikkia muuttujia voidaan pitää p-arvojen perusteella tilastollisesti merkitsevinä. Liittymien

etäisyyden p-arvo oli 0,045, mikä oli korkeampi kuin mallin muilla muuttujilla. P-arvo jäi silti alle yleisesti käytetyn 0,05 raja-arvon, joten myös liittymien etäisyys voidaan tulkita merkitseväksi muuttujaksi mallissa. Standardoitujen regressiokertoimien perusteella selkeästi suurin vaikutus onnettomuuksien määrän vaihteluun oli liikennemerkeillä, jonka kerroin oli 0,65. Kyseisellä muuttujalla oli myös korkein tilastollinen merkitsevyys. Liikennemerkkien määrän tavallinen regressiokerroin oli 0,160 eli kun merkkien määrä liittymässä kasvaa yhdellä, mallin ennustama onnettomuuksien määrä kasvaa 0,16 onnettomuudella. Nopeusrajoituksen ja liittymien etäisyyden vaikutus oli keskenään lähes samaa suuruusluokkaa (stand. kertoimet 0,20 ja -0,16), mutta liittymien etäisyyden kerroin oli negatiivinen. Tämä tarkoittaa, että liittymien etäisyyden kasvu vaikutti laskevasti onnettomuuksien määrään.

Taulukko 3. Mallien muuttujien tilastolliset tunnusluvut

Malli ja muuttujat		Regressiokerroin	Standardoitu regressiokerroin	p-arvo	VIF
Malli A Turku	Nopeusrajoitus ²	0,001	0,20	0,011	1,12
	Liikennemerkit	0,160	0,65	> 0,001	1,13
	Liittymien etäisyys ²	-2,38 × 10 ⁻⁵	-0,16	0,045	1,11
Malli B Turku	Nopeusrajoitus ²	0,001	0,13	0,125	1,35
	Liikennemerkit	0,120	0,49	< 0,001	2,39
	Liittymien etäisyys ²	-2,28 × 10 ⁻⁵	-0,15	0,051	1,12
	Kaistat ln	1,713	0,24	0,045	2,75
Malli C Oulu	Nopeusrajoitus ln	3,774	0,32	> 0,001	1,20
	Liikennemerkit	0,087	0,37	> 0,001	1,70
	Kaistat ln	1,373	0,26	0,012	1,85
Malli D Oulu	Nopeusrajoitus ln	4,004	0,34	> 0,001	1,21
	Liikennemerkit	0,071	0,30	0,003	1,84
	Kaistat ln	1,284	0,24	0,017	1,86
	Etäisyys bussipysäkkiin ln	-0,479	-0,19	0,020	1,21

Mallissa B tilastollisesti merkitsevin muuttuja oli liikennemerkkien määrä. Kaistojen määrän ja liittymien etäisyyden p-arvot olivat 0,045 ja 0,051, mitkä ovat lähellä 0,05 raja-arvoa, joten

muuttajat voidaan todeta tilastollisesti riittävän merkitseviksi. Nopeusrajoituksen p-arvo oli 0,125, mikä ylittää reilusti raja-arvon, joten muuttuja ei ole yhtä merkitsevä. Liikennemerkkien standardoitu regressiokerroin oli 0,49, mikä on selkeästi suurin kerroin mallin muuttujista eli liikennemerkkien määrällä oli suurin vaikutus onnettomuuksien määrän vaihteluun mallissa. Kaistojen määrällä oli toiseksi suurin vaikutus onnettomuuksien määrään. Nopeusrajoituksen ja liittymien etäisyyden standardoidut regressiokertoimet olivat samaa suuruusluokkaa (0,13 ja -0,15), mutta liittymien etäisyyden kerroin oli jälleen negatiivinen eli etäisyyden kasvu vaikuttaa negatiivisesti onnettomuuksien määrään.

Turun molempien mallien muuttujien VIF-arvot jäivät alle yleisesti käytetyn raja-arvon ($VIF < 5$), minkä perusteella muuttujien keskinäinen korrelaatio ei aiheuttanut malleille liiallista multikollinearisuutta. Mallissa B liikennemerkkien ja kaistojen määrän välinen korrelaatio oli VIF-kertoimien perusteella hieman korkeampi kuin muilla muuttujilla, mutta VIF-arvot jäivät silti reilusti alle raja-arvon. Malli B oli selityksasteen ja virhearvon perusteella mallia A toimivampi, mutta mallissa B kaikki muuttajat eivät olleet tilastollisesti yhtä merkitseviä kuin mallissa A. Mallien tulosten perusteella nopeusrajoituksen, liikennemerkkien ja kaistojen määrän sekä liittymien välisen lyhimmän etäisyyden voidaan todeta vaikuttavan onnettomuuksien määrään Turun tutkimusalueella.

Oulussa mallin C kolme muuttujaa olivat p-arvojen perusteella tilastollisesti hyvin merkitseviä: korkein p-arvo oli kaistojen määrällä (0,012) ja nopeusrajoituksen ja liikennemerkkien p-arvot olivat vielä pienempiä, hyvin lähellä nollaa (taulukko 3). Suurin vaikutus onnettomuuksiin oli liikennemerkkien määrällä, jonka standardoitu regressiokerroin oli 0,37. Myös nopeusrajoituksella ja kaistojen määrällä oli vahva yhteysonnettomuuksien määrään (stand. kertoimet 0,32 ja 0,26).

Neljän muuttujan D-mallissa muuttujien p-arvot olivat jakautuneet siten, että kaksi muuttujista oli tilastollisesti todella merkittäviä. Nopeusrajoituksen ja liikennemerkkien p-arvo jäi alle 0,001. Myös kaistojen määrä ja etäisyys bussipysäkkiin olivat p-arvojen perusteella tilastollisesti merkitseviä muuttujia. Standardoitujen regressiokertoimien suuruus oli jakautunut mallissa D samankaltaisesti kuin muuttujien p-arvot. Suurin vaikutus onnettomuuksien määrään oli nopeusrajoituksella ja liikennemerkkien määrän vaikutus oli standardoidun regressiokertoimen perusteella lähes yhtä suuri (stand. kertoimet 0,34 ja 0,30). Kaistojen määrän ja bussipysäkin etäisyyden vaikutus oli hieman pienempi, mutta muuttujilla oli

kuitenkin selkeä yhteys onnettomuuksien määrän vaihteluun malleissa. Etäisyys bussipysäkkiin vaikutti onnettomuuksien määrään laskevasti ja kaistojen määrä nousevasti.

Muuttujien VIF-arvot jäivät molemmissa Oulun malleissa alhaisiksi: kaikkien muuttujien VIF-kertoimet olivat alle 1,5, mikä on reilusti alle raja-arvon. Malleissa ei siis VIF-kertoimien perusteella esiintynyt merkittävää multikollinearisuutta, joka voisi heikentää mallien luotettavuutta. Mallissa C muuttujien tilastolliset merkitsevyydet olivat hieman korkeampia. Selitysaste oli kuitenkin neljän muuttujan mallissa D (0,45) kuin kolmen muuttujan mallissa C (0,40). Lisäksi mallin D virhearvo oli hieman pienempi. Mallit C ja D toimivat molemmat kohtuullisen hyvin ja tilastollisten tunnuslukujen perusteella molempien mallien ympäristömuuttujat sopivat mallintamaan onnettomuuksien määrän vaihtelua Oulun tutkimusalueella. Mallinnuksen voidaan siis todeta onnistuneen kahdella eri muuttujakombinaatiolla, jotka ovat mallin C osalta nopeusrajoitus, liikennemerkkien määrä sekä kaistojen määrä ja mallin D osalta nopeusrajoitus, liikennemerkkien määrä, kaistojen määrä sekä etäisyys bussipysäkkiin.

Tien toiminnallinen luokka saatiin muuttujana tilastollisesti merkitsevälle tasolle Oulussa käyttäen muina selittävinä muuttujina nopeusrajoitusta, liikennemerkkien määrää ja etäisyyttä bussipysäkkiin. Tämä malli oli kuitenkin selitysasteeltaan heikompi kuin malli D, joten sitä ei valittu tarkempaan tarkasteluun. Tämän perusteella voidaan kuitenkin tehdä päätelmä siitä, että toiminnallisella luokalla oli yhteys onnettomuuksien määrään Oulun tutkimusalueella. Puiden määrä, pinnan kaltevuus, asutuksen ja palveluiden osuus, rakennusten osuus, sekä asukasmäärä eivät osoittautuneet tilastollisesti merkitseviksi kummallakaan tutkimusalueilla kokeilluista muuttujakombinaatioista, minkä vuoksi ne jäivät pois tarkasteltavista malleista.

5 Tulosten tarkastelu

5.1 Ympäristömuuttujien vaikutus onnettomuuksiin

Kun verrataan eri tutkimusalueen malleja, voidaan todeta, että Turun tutkimusalueella mallin selitysasteet olivat hieman korkeampia. Toisaalta Oulun malleissa ympäristömuuttujien tilastollinen merkitsevyys oli korkeampi ja virhearvot olivat pienempiä. Molempien tutkimusalueiden mallien selitysasteet voidaan todeta kohtuullisen hyviksi, kun otetaan huomioon tutkittavan ilmiön monimutkaisuus ja useat taustatekijät. Tutkielmassa käsiteltiin vain rajattu määrä regressiomallien tuloksia, joten kaikkia onnettomuuksiin vaikuttavia tekijöitä ei voitu käsitellä tarkemmin tuloksissa. Tarkasteltujen mallien ulkopuolelle jääneistä muuttujista tien liikenteellistä tärkeyttä kuvaava toiminnallinen luokka oli tilastollisesti merkittävä tietyllä muuttujakombinaatiolla Oulun tutkimusalueella, mutta mallin toimivisuus jäi silti alhaisemmaksi kuin esitellyissä malleissa.

Turun tutkimusalueen malleissa osa ympäristömuuttujien tilastollisesta merkitsevyydestä kertovista p-arvoista ylitti yleisesti käytetyn 0,05 raja-arvon. Liikenneonnettomuudet ovat kuitenkin monimutkainen ilmiö, mikä vaikuttaa mallintamiseen ja onnettomuustutkimuksessa on käytetty myös korkeampia raja-arvoja tilastollisesti merkittävien muuttujien arviointiin. Esimerkiksi Çelik ja Senger (2014) totesivat tutkimuksessaan onnettomuuksien kannalta merkittäväksi tekijöiksi myös marginaalisella tasolla tilastollisesti merkittävät muuttujat, joiden p-arvo oli 0,05–0,10. Myös Casado-Sanz ym. (2020) katsoivat tutkimuksessaan tilastollisesti merkitseviksi ympäristömuuttujat, joiden p-arvo jäi alle 0,10. Muuttujien, joiden p-arvo oli lähellä tai hieman yli raja-arvon 0,05, voidaan siis arvioida olevan tilastollisesti riittävän merkitseviä. Mallissa B nopeusrajoituksen p-arvo oli 0,125, mutta muuttuja oli muissa malleissa tilastollisesti erittäin merkitsevä, joten nopeusrajoituksella ja onnettomuuksien määrällä voidaan todeta olevan selkeä yhteys tutkituissa liittymissä.

Tuloksia tarkastellessa on tärkeä huomioida, että selittävän muuttujan p-arvo ja siitä johdettu tilastollinen merkitsevyys riippuu myös muista mallin muuttujista (Taanila 2020). Tulosten perustella ei siis voida hylätä oletusta siitä, etteikö joku kokeilluista muuttujista voisi vaikuttaa vahvasti onnettomuuksien määrään. Voi siis olla, että esimerkiksi liittymien välinen etäisyys Oulussa tai liittymän etäisyys bussipysäkkiin Turussa olisivat olleet merkitseviä muuttujia mallissa, joka sisältäisi muita kuin tässä tutkielmassa kokeiltuja muuttujia. Lisäksi esimerkiksi asuinalueiden ja palveluiden osuus liittymien vaikutusalueesta ei osoittautunut merkitseväksi

muuttujaksi kummallakaan tutkimusalueella, sen yhteys onnettomuuksien määrään olisi voinut olla vahvempi joidenkin muiden muuttujien kanssa.

Mallien muuttujien lisäksi tuloksiin vaikutti liittymien otanta ja muuttujien jakaumat valituissa liittymissä. Molempien tutkimusalueiden liittymäotokset sisälsivät noin 20 % kaikista tutkimusalueiden onnettomuuksista, joten otosta voidaan pitää onnettomuuksien määrän kannalta edustavana. Oulun tutkimusalueella liittymien etäisyys ei saavuttanut tilastollista merkitsevyyttä, vaikka Turussa etäisyyden ja onnettomuuksien välillä oli selkeä yhteys. Tämä voi selittyä ainakin osittain liittymien otannalla, sillä aiemmassa tutkimuksessa liittymien lyhyiden välien on todettu vaikuttavan onnettomuuksien määrään kaupunkiympäristössä (Sun ym. 2020). Vaikka onnettomuusalttiiden liittymien ja satunnaisotoksen yhdistämisellä pyrittiin siihen, että valitut 100 liittymää edustaisivat tutkimusaluetta monipuolisesti, otos ei kuitenkaan kata kaikkia ympäristömuuttujien vaihteluita alueilla. Liittymän etäisyyden jakauma tutkimusalueiden otosten välillä oli melko tasainen, mutta muuttujan absoluuttiset arvot eivät välttämättä riitä todistamaan muuttujan ja onnettomuuksien määrän suhdetta. Etenkin Oulun tutkimusalueen pohjoisosassa asuinalueilla oli satunnaisesti valittuja pienempiä liittymiä, joissa liittymävälit ovat lyhyitä, vaikka liikennemäärä on matala ja onnettomuuksia ei ole. Tämä voi vaikuttaa osaltaan siihen, että liittymien etäisyys ei korreloinut onnettomuuksien määrään. Toisaalta voi olla, että liittymien välinen lyhin etäisyys olisi saatu merkittäväksi muuttujaksi jollain toisella muuttujakombinaatiolla.

Vastaavasti Turun tutkimusalueella liittymän etäisyys bussipysäkkiin ei sisältynyt tilastollisesti merkitseviin malleihin, vaikka Oulussa se oli osana neljän muuttujan mallia. Tämä voi johtua bussipysäkkien todellisen vaikutuksen lisäksi myös otoksesta, jonka liittymiä käsiteltiin. Voi olla että, otoksen ulkopuolella bussipysäkkien etäisyyden ja onnettomuuksien välinen yhteys olisi löytynyt. Turun tutkimusalueella bussipysäkin etäisyyden jakauma liittymissä oli erilainen kuin Oulussa. Oulun otokseen kuului useita liittymiä, joista oli yli 400 m etäisyys bussipysäkille, kun taas Turussa suurin osa liittymistä sijaitsi lähellä pysäkkejä. Voi olla, että muuttujan epätasainen jakauma on vaikuttanut siihen, että muuttujan ja onnettomuuksien määrän välillä ei havaittu yhteyttä. Toisaalta bussipysäkin etäisyys ei välttämättä vaikuta suoraan onnettomuuksien määrään. Bussipysäkki voi sijaita lähellä liittymää, vaikka se ei varsinaisesti aiheuttaisi vaaratilanteita liittymän läheisyydessä.

Onnettomuuksiin vaikuttavat liikenneympäristön tekijät olivat yhtenäisiä aiemman onnettomuustutkimuksen kanssa. Nopeusrajoitus oli mukana kaikissa tarkastelluissa malleissa.

Ajonopeutta pidetään yleisesti yhtenä tärkeimmistä onnettomuuksien syntyyn vaikuttavista tekijöistä ja ajonopeudella on todettu olevan suuri vaikutus onnettomuusriskiin esimerkiksi Ferkon ym. (2019), Hobdayn ym. (2017) ja Maon ym. (2019) tutkimuksissa. Kompleksia liikenneympäristöä luonnehtivat esimerkiksi monikaistaisuus, liikennemerkkien suuri määrä ja tiheät liittymävälit. Useissa onnettomuustutkimuksissa on havaittu, että monikaistaiset liittymät lisäävät onnettomuusriskiä kaupunkiympäristössä (Chen ym. 2022, Dixon ym. 2009, Megat-Johari ym. 2018). Liikennemerkkien määrä vaikuttaa kompleksisuuden kautta liikenteenkäyttäjien havainnointiin ja reagointiin liikenteessä, ja Elvik (2004) on todennut, että kompleksin liikenneympäristön merkitys kasvaa etenkin tiivisti rakennetuissa kaupunkiympäristöissä. Toisaalta liikennemerkkien määrän vaikutus ei ole yksiselitteinen. Ferko ym. (2019) huomauttavat, että puutteelliset ohjeistukset liikennemerkkien osalta voivat lisätä onnettomuusriskiä. Turun tutkimusalueella liittymien välisen etäisyyden havaittiin vaikuttavan onnettomuuksien määrään. Vastaavanlaisia tuloksia on raportoitu esimerkiksi Megat-Joharin ym. (2018) ja Sunin ym. (2020) tutkimuksissa. Tulosten perusteella nopeusrajoituksen, liikennemerkkien sekä kaistojen määrän, liittymien välisen etäisyyden ja liittymän etäisyyden bussipysäkkiin voidaan todeta vaikuttavan liittymäonnettomuuksien määrään ja tuloksen osoittavat liikenneympäristön kompleksisuuden lisäävän onnettomuuden riskiä liittymien vaikutusalueilla.

5.2 Aineistojen saatavuus ja rajoitteet

Tutkielmassa käytettyjen ympäristömuuttujien valintaa rajoitti aineistojen saatavuus. Liikennemäärä on onnettomuustutkimuksessa yleisesti käytetty muuttuja, jonka on todettu vaikuttavan merkittävästi onnettomuuksien määrään (Casado-Sanz ym. 2020; Oh ym. 2004). Liikennemäärä ei kuitenkaan ollut saatavilla tarvittavilta teiltä, minkä vuoksi se piti jättää pois tutkielmasta. Kaupunkilaisten liikkumisen määrää kokeiltiin tuoda mallinnukseen asukasmäärän kautta. Avoimesti saatavan aineiston resoluutiolla (1 km x 1 km ruudut) asukasmäärä ei osoittautunut merkitseväksi muuttujaksi, vaikka asukastiheyskarttojen ja onnettomuustiheyden tulokset vaikuttivat korreloivan suurilta osin keskenään. Toisaalta voi olla, että asutus ja onnettomuudet jakautuvat laajalla tarkastelutasolla samankaltaisesti, mutta paikallisella tasolla onnettomuushotspotit eivät noudata asutuskeskittymien alueellista jakautumista.

Yksi käytettyjen aineistojen isoimmista rajoituksista oli onnettomuusaineiston tapahtuma-ajankohtien saatavuus. Onnettomuuksista oli saatavilla tapahtuman vuosi, kuukausi ja

kellonaika tunnin tarkkuudella. Koska onnettomuuksista ei ollut tiedossa tarkkaa viikonpäivää, onnettomuuksien tarkastelussa ei voitu tutkia esimerkiksi liikeneruuhkien ja onnettomuuksien välistä yhteyttä. Liikeneruuhkien ajat vaihtelevat viikonpäivien välillä ja Henkilöliikennetutkimuksen mukaan suomalaiset tekevät henkilöautolla eniten matkoja arkisin 14–16 välillä ja viikonloppuisin 11–15 välillä (HLT 2021). Jos onnettomuuksien tarkat päivät saataisiin käyttöön, olisi mielenkiintoista tutkia myös keliolosuhteiden vaikutusta onnettomuuksiin. Tällä tavalla voitaisiin tarkastella esimerkiksi äkillisten säätilan muutosten, kuten tulvien tai rankkasateiden vaikutusta onnettomuuksiin ja tutkia lisääntykö esimerkiksi suistumisen tai peräänajon riski merkittävästi liukkaalla ajokelillä.

Tilastokeskuksen onnettomuusaineisto sisältää runsaasti onnettomuuksien ominaisuustietoja, joita voisi hyödyntää laajemmin jatkotutkimuksessa. Onnettomuustyyppiä hyödyntämällä voitaisiin tarkastella esimerkiksi kääntyvien ajoneuvojen onnettomuuksia ja näin paikantaa liittymiä, joiden liikennejärjestelyitä voitaisiin muuttaa lisäämällä kääntyvien kaista tai muuttamalla liikennevalojen toimintaa liittymässä. Lisäksi tieliikenneonnettomuustilasto sisältää onnettomuuksissa osallisten kulkuneuvojen lukumäärän. Sähköpotkulaudat ovat lisääntyneet jatkuvasti viime vuosina ja niiden osuus onnettomuuksissa olisi ollut kiinnostava tarkastelukohde, mutta sähköpotkulaudat kuuluvat aineistossa pyöräilijöiden luokkaan, eli niitä ei voitu tarkastella erillisenä kulkuneuvoluokkana.

Tuloksia tarkastellessa tulee huomata, että onnettomuusaineisto on vuosilta 2011–2021, mutta Digiroadin tielinkit ovat vuodelta 2022. Onnettomuus piste on siis voitu yhdistää liittymän vaikutusalueelle, vaikka onnettomuuden tapahtumahetkellä liittymä ei olisi sijainnut samalla paikalla. Lisäksi on tärkeää huomioida, että tutkielmassa onnettomuusalttiiksi määritettyjen liittymien onnettomuudet on laskettu koko aineistojen ajallisen kattavuuden ajalta. Liikenneympäristöt ovat voineet muuttua ja tiedostettuihin vaaranpaikkoihin on voitu tehdä korjaustöitä turvallisuuden parantamiseksi. Esimerkiksi Turussa Kaskenkadun ja Kunnallissairaalan tien onnettomuusalttiin liittymän turvallisuutta on pyritty parantamaan vuonna 2021 muuttamalla kaistajärjestelyitä ja lisäämällä erillinen nuolivalo vasemmalle kääntyvälle liikenteelle (Laurikko 2021). Myös Oulun vaarallisessa Joutsentien ja Paljetien liittymässä on pyritty ehkäisemään onnettomuuksia muokkaamalla liikenneympäristöä selkeämmäksi. Liittymään lisättiin liikennevalot vuonna 2021 ja samalla tehtiin useita toimia turvallisuuden edistämiseksi: suojatietä ja bussipysäkkiä siirrettiin, kevyenliikenteen väylää muutettiin ja valaistusta siirrettiin lähemmäs kulkuväyliä (Rättilä 2021). Liittymässä oli ennen STOP-merkki, jonka noudattamisessa tehtiin jatkuvasti rikkeitä (Rättilä 2021). Tutkielman ja

onnettomuusaineiston perusteella ei voida vielä sanoa, ovatko korjaustoimenpiteet vaikuttaneet onnettomuuksien määrän vähenemiseen.

5.3 Menetelmien soveltuvuus

Bufferianalyysin käyttö onnettomuuksien laskennassa rajasi liittymän vaikutusalueen 30 m etäisyydelle liittymän keskipisteestä huolimatta liittymän rakenteesta. Tutkimusalueet olivat monimuotoisia liittymien rakenteiden ja etäisyyksien suhteen, minkä vuoksi bufferikoon kanssa tehtiin kompromissi ja valittiin bufferikoko, joka toimii hyvin suurimmalla osalla tutkimusalueiden liittymistä, joita haluttiin tarkastella. Moottoriteiden isot liittymäalueet ja rampit jätettiin tietoisesti pois tutkielman aiherajauksesta, koska onnettomuuksien luonne suurissa nopeuksissa eroaa merkittävästi kaupunkialueen liittymistä. Toisaalta tarkasteltaviin liittymäpisteisiin sisältyi muutamia valtateiden liittymiä, joiden vaikutusalueiden onnettomuuksien määrät ovat voineet jäädä todellista pienemmäksi, koska 30 m bufferi ei todennäköisesti kata laajempien liittymien vaikutusalueita kokonaan. Yksi mahdollisuus olisi ollut käyttää eri bufferikokoja eri tyyppisille liittymille, mutta tässä tapauksessa jokaisen liittymän vaikutusalue tulisi määrittää erikseen.

Tutkielmassa luodun työkaluketjun tuottamien liittymäpisteiden sijaintitarkkuus oli pääosin hyvä, mutta data vaati jälkikäsitteilyä ennen liittymien tarkempaa tarkastelua. Esimerkiksi muutamia kaistojen yhdistymiskohtien pisteitä liittymien ulkopuolella piti poistaa jälkikäteen, joten aineisto ei ollut sellaisenaan käyttövalmis liittymäien tarkasteluun. Jälkikäsitteilyn tarve johtui pääosin Digiroadin tielinkkien rakenteesta. Menetelmäketjun rajoitteista huolimatta työkalut soveltuvat minkä tahansa verkostomuotoisen aineiston risteyspisteiden paikantamiseen, kun huomioidaan pisteiden välien vaihtelu. Menetelmää voitaisiin soveltaa myös maanalaisten verkostojen, kuten vesijohtoverkon tai erilaisten kaapelien risteyspisteiden määrittämisessä, jos risteyspisteitä ei ole saatavilla.

SANET-työkalupaketin avulla tuotettu verkostomuotoinen NKDE-analyysi soveltui hyvin tieverkoston vaarallisten osien paikantamiseen. NKDE-analyysi ei ole tutkimusmenetelmänä yhtä tunnettu ja hyödynnetty kuin perinteinen planaarin Kernel Density -analyysi, mutta NKDE-analyysi osoittautui erittäin toimivaksi paikallisen tason onnettomuustiheyden tarkastelussa. Atsuyuki Okaben tiimin kehittämä SANET-työkalupaketti on yksi yleisimmistä NKDE-analyysin käyttömahdollisuuksista kansainvälisissä onnettomuustutkimuksissa ja sen käyttö sujui vaivatta. NKDE-analyysillä on monia sovelluskohteita: menetelmän avulla voidaan onnettomuusalttiiden liittymien lisäksi paikantaa vaarallisia tieosuuksia tai kokonaisia katuja,

joihin liikenneturvallisuutta voitaisiin kohdentaa. Lisäksi NKDE-analyysillä on useita muita sovelluskohteita: sitä voidaan käyttää esimerkiksi palveluiden, kuten kauppojen tiheyden määrittämiseen katujen varsilla (SANET Manual 2020).

5.4 Tulosten merkitys ja jatkotutkimustarpeet

Koska onnettomuuksiin vaikuttavia tekijöitä on useita, jatkotutkimuksessa voitaisiin kokeilla yhä useamman muuttujan selittäviä malleja sekä eri liikenneturvallisuuden teorioihin liittyvien muuttujien sisällyttämistä samaan malliin. Esimerkiksi Çelik ja Senger (2014) yhdistivät tutkimuksessaan muuttujia sekä liikenneympäristöön että liikennekäyttäytymiseen liittyen: onnettomuusmallinnuksen muuttujina olivat esimerkiksi tien geometriset tekijät, kuskin ikä sekä ajoneuvotyyppi. Toisaalta jatkotutkimuksessa mallinnuksessa voitaisiin tarkastella myös liikenneympäristön vaikutusta eri näkökulmista. Laserkeilausaineistojen avulla voitaisiin tuoda näkyvyyden vaikutus osaksi mallinnusta Viewshed-analyysillä, sillä laserkeilausaineistot sisältävät kolmiulotteisessa muodossa tiedon esimerkiksi kasvillisuuden, pylväiden ja rakennusten sijainnista.

Jatkotutkimuksessa olisi tärkeää sisällyttää tieverkoston tarkasteluun mahdollisuuksien mukaan liikennemäärä, jotta voitaisiin arvioida tarkemmin liittymien turvallisuutta. Esimerkiksi kaistojen määrä on usein korkea siellä, missä liikennettä on runsaasti. Kaistoja lisäämällä pyritään usein selkeyttämään liikennejärjestelyitä ja vähentämään eri suuntaisten liikennevirtojen konfliktipisteitä liittymissä, joissa liikennemäärät ovat korkeita. Kaistojen määrä itsessään ei siis riitä kertomaan liittymän vaarallisuudesta, vaan kaistoja lisäämällä on todellisuudessa voitu edistää turvallisuutta siellä, missä liikennemäärä on suuri. Kulmala (2010) huomauttaa, että jokaisessa tieverkoston osassa riski onnettomuudelle on erilainen, joten ohjaamalla liikennettä eri luokkiin kuuluville teille voidaan vaikuttaa liikennemäärän kautta turvallisuuteen. Jos monikaistainen liittymä on onnettomuusherkkä, voidaan siis arvioida, edistäisikö liikennevirtojen ohjaaminen muille väylille liittymän turvallisuutta. Tutkielman tulokset ovat rajoittuneet käytettyihin aineistoihin ja tulosten sovelluskohteita arvioitaessa on tärkeä huomioida myös muut turvallisuuteen vaikuttavat tekijät, kuten liikennemäärä.

Jatkossa voitaisiin tutkia myös tekoälyn ja syväoppimisen hyödyntämistä liittymien kartoituksessa. Syväoppimista ja satelliittikuvia on hyödynnetty liittymien automatisoituun paikantamiseen esimerkiksi Eltaherin ym. (2023) tutkimuksessa. Monimuotoiset liittymärakenteet kuitenkin vaikeuttavat liittymien tunnistamista, joka voi vaikuttaa tulosten sijaintitarkkuuteen (Eltaher ym. 2023). Vastaavanlaisilla menetelmillä voitaisiin kokeilla myös

muiden aineistojen tuottamista, kuten kaistojen määrän laskentaa tai liittymien hidastelementtien paikantamista. Sen lisäksi että liittymän monikaistaisuuden on todettu lisäävän onnettomuusriskiä, myös puutteellisilla tai kuluneilla kaistamerkinnoilla voi olla vaikutus vaaratilanteiden syntyyn. Jatkotutkimuksessa voitaisiin kokeilla myös liittymien luokittelua kaistamerkintöjen laadun mukaan hyödyntämällä satelliittikuvia ja syväoppimista.

Tutkielmassa yhdistettiin useita eri menetelmiä onnettomuuksien määrän tarkastelussa: onnettomuustiheyttä tarkasteltiin planaarisena ja verkostomuotoisen Kernel Density -tiheysanalyysin avulla, ja bufferianalyysillä laskettiin onnettomuuksien kappalemäärät liittymien vaikutusalueilla. Yhdistämällä menetelmiä saatiin tarkempia tuloksia onnettomuuksien määrän vaihteluista eri mittakaavoissa. Tutkielman tuloksia voidaan hyödyntää liikennesuunnittelussa sekä liikenneturvallisuuksissa kohdentamalla resursseja korkean riskin alueille. Etenkin NKDE-analyysin tuloksista voidaan tunnistaa paikallisella tasolla onnettomuusalttiita tieverkoston osia tai kokonaisia katuja, joihin resursseja tulisi kohdistaa. Lisäksi tutkielman tuloksia voitaisiin hyödyntää yhdistelemällä samoja menetelmiä muilla tutkimusalueilla.

Tilastollisen mallinnuksen tuloksista voidaan tunnistaa liikenneympäristön tekijöitä, jotka altistavat liittymäonnettomuuksille ja huomioida nämä tekijät liittymien rakenteen, turvalaitteiden sekä opasteiden suunnittelussa. Dun ym. (2023) mukaan liikenneturvallisuutta tulisi arvioida laajassa aikaulottuvuudessa: turvallisuus tulisi nähdä osana prosessia alusta alkaen tien suunnitteluvaiheesta tien käyttöön ja kunnossapitoon sekä mahdollisiin muutostöihin asti. Jos onnettomuusalttiit liittymät ovat jo tiedossa, tulosten avulla voidaan arvioida, miten liittymän turvallisuutta voitaisiin parantaa esimerkiksi korjaustöillä. Tuloksia voitaisiin hyödyntää olemassa olevien teiden ja liittymien lisäksi myös uusien alueiden suunnittelussa, jotta voitaisiin välttää vaarallisiksi todetut liikennejärjestelyt. Tulosten yhteiskunnallinen merkitys on vahva, koska liikenneturvallisuutta edistämällä voidaan sujuvoittaa liikennettä ja parantaa liikenneturvallisuutta eri tarkastelutasoilla.

6 Johtopäätökset

Liikenneympäristön kompleksisuudella on yhteys kaupunkiympäristön liittymäonnettomuuksien määrään, sillä monimutkaiset liittymäjärjestelyt lisäävät liikenteenkäyttäjän vastuuta nopean havainnoinnin ja reagoinnin tarpeen kasvaessa. Kompleksia liikenneympäristöä liittymissä luonnehtivat esimerkiksi suuri kaistojen ja liikennemerkkien määrä sekä tiheät liittymävälit. Lisäksi kompleksin liikenneympäristön merkitys kasvaa korkeissa ajonopeuksissa. Nämä tekijät tulisi huomioida liikennesuunnittelussa, jotta liikenneympäristöistä voitaisiin rakentaa liikenteenkäyttäjien kannalta selkeitä ja turvallisia.

Lisäksi liittymien paikantamistarkkuuden perusteella voidaan todeta, että tutkielmassa käytetty automatisoitu paikkatietotyökaluketju sopii tieverkoston tai muun verkostomuotoisen aineiston risteyspisteiden paikantamiseen, kun paikalliset vaihtelut esimerkiksi liittymäväleissä ja liittymien rakenteessa otetaan huomioon. Vastaavanlaisesta työkalujen yhdistämisestä ja automatisoinnista voi olla hyötyä tilanteissa, joissa liittymäaineistoa ei ole saatavilla.

Erlaisia paikkatietomenetelmiä hyödyntämällä voidaan saada tietoa onnettomuushotspoteista eri mittakaavoissa ja menetelmien tuloksia voidaan hyödyntää tieturvallisuuden edistämässä laajassa aikaikkunassa liikennejärjestelyiden suunnittelusta korjaustöihin asti. Etenkin verkostomuotoinen NKDE-analyysi soveltuu hyvin liikenneonnettomuuksien paikalliseen tarkasteluun ja menetelmän avulla voidaan paikantaa vaarallisia tieosuuksia tai liittymiä, joihin liikenneturvallisuuden resursseja tulisi kohdentaa. Yhdistämällä paikkatietomenetelmiä ja tilastollista mallinnusta voidaan tuottaa tärkeää tietoa liikenneonnettomuuksiin vaikuttavista tekijöiden ja tuloksia voidaan hyödyntää liikenneturvallisuustyössä sekä liikennesuunnittelussa.

Kiitokset

Haluan esittää kiitokset työni ohjaajalle Niina Käyhkölle, joka oli tukena tutkielman eri vaiheissa suunnittelusta loppuun saakka. Lisäksi haluan kiittää Turun kaupunkia työn tukemisesta apurahalla, joka myönnettiin Turun kaupunkitutkimusohjelmaan liittyvän Pro Gradu -tutkielman tekemiseen.

Lähteet

- Al-Omari, A., Shatnawi, N., Khedaywi, T. & Miqdady, T. (2020). Prediction of traffic accidents hotspots using fuzzy logic and GIS. *Applied Geomatics* 12 149–161. <https://doi.org/10.1007/s12518-019-00290-7>
- Casado-Sanz, N., Guirao, B. & Attard, M. (2020). Analysis of the risk factors affecting the severity of traffic accidents on Spanish crosstown roads: The driver's perspective. *Sustainability* 12(6) <https://doi.org/10.3390/su12062237>
- Chen, M., Zhou, L., Choo, S. & Lee, H. (2022). Analysis of risk factors affecting urban truck traffic accident severity in Korea. *Sustainability* 14(5) <https://doi.org/10.3390/su14052901>
- Çelik, A. & Senger, Ö. (2014). Risk factors affecting fatal versus non-fatal road traffic accidents: The case of Kars province, Turkey. *International Journal for Traffic and Transport Engineering* 4(3) 339–351. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2014.4\(3\).07](https://doi.org/10.7708/ijtte.2014.4(3).07)
- Digiroad: tietolajien kuvaus 2022. Väyläviraston julkaisuja. <https://vayla.fi/vaylista/aineistot/digiroad/aineisto/aineistojulkaisut>
- Dixon, K., Liebler, M. & Hunter, M. (2009). Urban roadside safety cluster-crash evaluation. *Transportation Research Record* 2120 74–81. <https://doi.org/10.3141/2120-08>
- Du, Z., Deng, M., Lyu, N. & Wang, Y. (2023). A review of road safety evaluation methods based on driving behavior. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* 10(5) 743–761. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.07.005>
- Eltaher, F., Miralles-Pechuán, L., Courtney, J. & Mckeever, S. (2023). Detecting road intersections from satellite images using convolutional neural networks. *Proceedings of the 38th ACM/SIGAPP Symposium on Applied Computing* 495–498. <https://doi.org/10.1145/3555776.3578728>
- Elvik, R. (2004). To what extent can theory account for the findings of road safety evaluation studies? *Accident Analysis and Prevention* 36(5) 841–849. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2003.08.003>
- Ferko, M., Stažnik, A., Modrić, M. & Dijanić, H. (2019). The impact of traffic sign quality on the frequency of traffic accidents. *Promet-Traffic & Transportation* 31(5) 549–558 <https://doi.org/10.7307/ptt.v31i5.3023>
- Ferreira-Vanegas, C., Vélez, J. & Guiselle, G. (2022). Analytical methods and determinants of frequency and severity of road accidents: A 20-year systematic literature review. *Journal of Advanced Transportation* 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/7239464>

- Global status report on road safety 2023. (2023). World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>
- Google Maps Street View. Hyödynnetty 15.–16.10.2024. <https://www.google.com/streetview/>
- Harirforoursh, H. & Bellalite, L. (2016). A new integrated GIS-based analysis to detect hotspots: A case study of the city of Sherbrooke. *Accident Analysis and Prevention* 130 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.08.015>
- HLT 2021 = Henkilöliikennetutkimus 2021. Traficom, 2023. *Traficomin tutkimuksia ja selvityksiä* 1/2023. <https://www.traficom.fi/fi/julkaisut/henkiloliikennetutkimus-2021-suomalaisten-liikkuminen>
- Hobday, M., Chow, K., Meuleners, L. & Argus, F. (2017). Identification of high risk metropolitan intersection sites in Perth, Australia. *Accident Analysis and Prevention* 106 336–340. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.07.009>
- Kaakinen, M. & Ellonen, N. (2021a). Regressioanalyysi. Teoksessa Kvantitatiivisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Yhteiskuntatieteellinen tietoaarkisto, Tampere. Viitattu 17.10.2024. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/regressio/analyysi>
- Kaakinen, M. & Ellonen, N. (2021b). Regressiomallin arviointi. Teoksessa Kvantitatiivisen tutkimuksen verkkokäsikirja. Yhteiskuntatieteellinen tietoaarkisto, Tampere. Viitattu 17.10.2024. <https://www.fsd.tuni.fi/fi/palvelut/menetelmaopetus/kvanti/regressio/arviointi/>
- Kang, M., Moudon, A., Kim, H., & Boyle, L. (2019). Intersections and non-intersections: A protocol for identifying pedestrian crash risk locations in GIS. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(19). <https://doi.org/10.3390/ijerph16193565>
- Kulmala, R. (2010). Ex-ante assessment of the safety effects of intelligent transport systems. *Accident Analysis and Prevention* 42 1359–1369. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2010.03.001>
- Kuntien avainluvut 2023. Tilastokeskus. Viitattu 22.09.2024. https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/Kuntien_avainluvut
- Larinkari, M. & Varis, M. (2013). Oulun maisemaselvitys. Oulun kaupungin Yhdyskunta- ja ympäristöpalvelut. <https://www.ouka.fi/kaavoitus/selvitykset-ohjelmat-ja-seminaarit>
- Laurikko, J. (2021). Turun vaarallisinta risteystä tehdään turvallisemmaksi – Kaskenkadun ja Kunnallissairaalan tien risteystyömaa haittaa tänään liikennettä. Turun Sanomat 25.10.2021. <https://www.ts.fi/uutiset/5463131>

- Liikenneturvallisuus kaavoituksessa* (2006). Ympäristöministeriö. *Ympäristöhallinnon ohjeita* 1/2006. Edita Prima Oy, Helsinki.
<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10138/41539>
- LOA 2024 Liikennekäytössä olevat ajoneuvot ajoneuvoluokittain ja kunnittain 30.6.2024. Traficom, 2024. <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>
- Mao, X., Yuan, C., Gan, J. & Zhang, S. (2019). Risk factors affecting traffic accidents at urban weaving sections: Evidence from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph16091542>
- Megat-Johari, M., Bazargani, B., Kirsch, T., Barrette, T. & Savolainen, P. (2018) An examination of the safety of signalized intersections in consideration of nearby access points. *Transportation Research Record* 2672(17) 11–21.
<https://doi.org/10.1177/0361198118795997>
- Oh, J., Washington, S. & Choi, K. (2005). Development of accident prediction models for rural highway intersections. *Transportation Research Record* 1897 18–27.
<https://doi.org/10.3141/1897-03>
- Ojala, K. (2003). *Liikenne yhdyskunnan suunnittelussa*. Ympäristöministeriö. Rakennustieto Oy, Helsinki.
- Oulun keskusta-alueiden kaupunkikuvaselvitys. (2012). Eriksson Arkkitehdit Oy, Destia.
<https://www.ouka.fi/kulttuuriymparisto>
- Pinta-alat kunnittain 1.1.2024. Maanmittauslaitos. Viitattu 22.09.2024.
<https://www.maanmittauslaitos.fi/tietoa-maanmittauslaitoksesta/organisaatio/tilastot>
- Pritee, K. & Garg, R. (2017). Cloud based spatial visualization with statistical approach for road accidents. *Spatial Information Research* 25(6), 825–835
<https://doi.org/10.1007/s41324-017-0148-9>
- Rekola, M., Kolinen, L., Asikainen, E., Heliste, L., Immonen, E., Starck, M., ... & Johansson, S. (2022). Liikenneturvallisuusstrategia. *Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja* 3/2022. Valtioneuvoston julkaisuarkisto Valto, Helsinki.
<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163951>
- Rodrigue J. (2020). *The geography of transport systems*. 5p. Routledge, Lontoo.
doi.org/10.4324/9780429346323
- Roine M. & Luoma J. (2009). Liikenneturvallisuustoiminnan lähestymistavat. *VTT Tiedotteita* 2477. <https://cris.vtt.fi/en/publications/liikenneturvallisuustoiminnan-lahestymistavat>

- Rättilä, M. (2021). Paljetien ja Joutsentien liittymä saa liikennevalot – risteys on yksi Oulun vaarallisimmista. Kaleva 19.01.2021. <https://www.kaleva.fi/paljetien-ja-joutsentien-liittyma-saa-liikennevalo/3275653>
- Salli, R., Lintusaari, M., Tiikkaja, H. & Pöllänen, M. (2008). Keliolosuhteet ja henkilöautoliikenteen riskit. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere.
- SANET Manual (2020). SANET: Spatial Analysis along Networks: User guide / Manual for SANET Standalone. http://sanet.csis.u-tokyo.ac.jp/download/manual_standalone.pdf
- Shahi, S., Brussel, M. & Grigolon, A. (2023). Spatial analysis of road traffic crashes and user based assessment of road safety: A case study of Rotterdam. *Traffic Injury Prevention* 24(7) 567–576. <https://doi.org/10.1080/15389588.2023.2234530>
- Srikanth, L. & Srikanth, I. (2020). A Case study on Kernel Density Estimation and hotspot analysis methods in traffic safety management. *2020 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)* 99–104. <https://doi.org/10.1109/comsnets48256.2020.9027448>
- Sun, Y., Wang, Y., Yuan, K., Chan, T. & Huang, Y. (2020). Discovering spatio-temporal clusters of road collisions using the method of fast Bayesian model-based cluster detection. *Sustainability* 12(20) <https://doi.org/10.3390/su12208681>
- Taanila, A. (2020). Lineaariset regressiomallit. Viitattu 17.10.2024. <https://taanila.fi/regressio.pdf>
- Tasoliittymät (2001). Tiehallinto. *Tiehallinnon julkaisut*. Edita Prima Oy, Helsinki. <https://www.doria.fi/handle/10024/133508>
- Tieliikenneonnettomuustilasto. Suomen virallinen tilasto (SVT), Tilastokeskus. Viitattu 24.10.2024. <https://stat.fi/tilasto/ton>
- Turun keskustan kaupunkikuva. (2017). Turun kaupungin ympäristötoimialan kaupunkisuunnittelu. <https://www.turku.fi/asuminen-ja-ymparisto/kaupunkisuunnittelu/yleiskaavoitus/yleiskaava-2029/yleiskaavan-2029>
- Wang, C., Quddus, M. & Ison, S. (2013). The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction. *Safety Science* 57 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.02.012>
- Vadeby, A. & Forsman, Å. (2016). Speed distribution and traffic safety measures. Teoksessa Yannis, G. & Cohen, S. (toim.) *Traffic Safety* 163–176. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119307853.ch11>

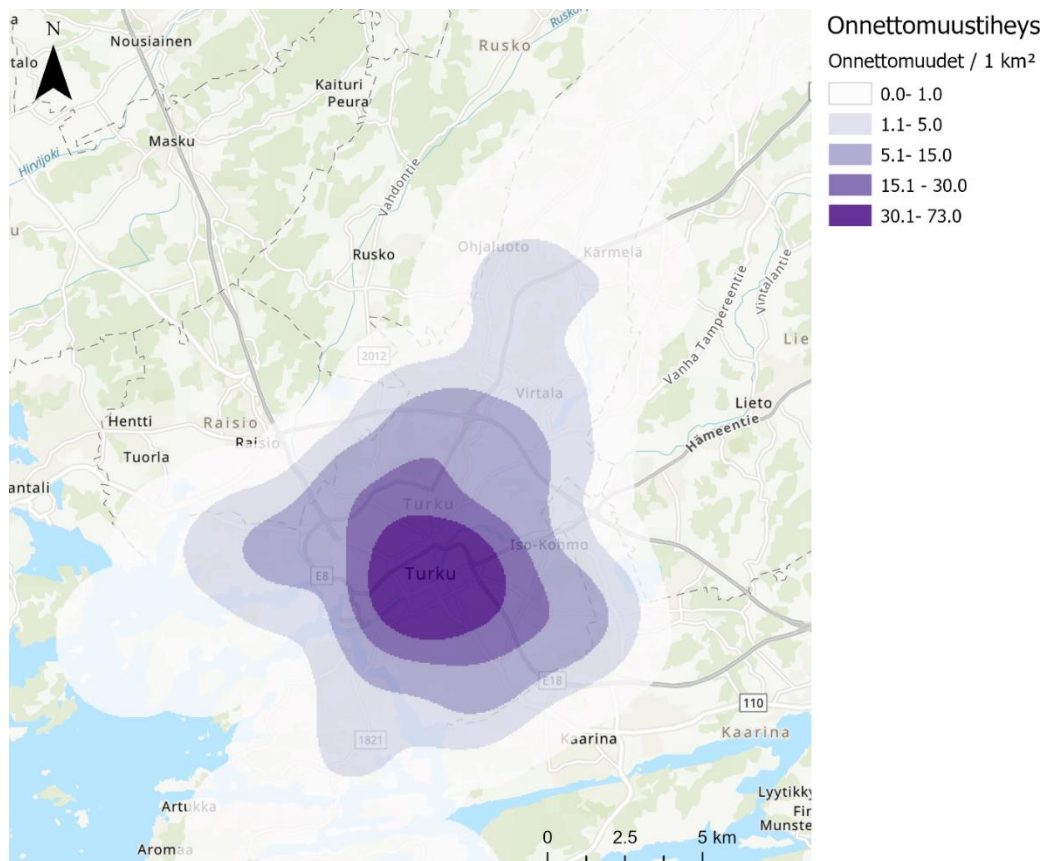
- Xie, Z. & Yan, J. (2008). Kernel Density Estimation of traffic accidents in a network space. *Computers, Environments and Urban Systems* 32(5): 396–406
<https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2008.05.001>
- Zheng, M., Zhu, L., Zhan, W., Zhu, F., Sun, Z. & Li, L. (2023). Network space analysis-based identification of road traffic accident hotspots: A case study. *International Journal of Crashworthiness* 28(1) 108–115. <https://doi.org/10.1080/13588265.2022.2109446>

Liitteet

Liite 1 Tutkimusalueiden raja

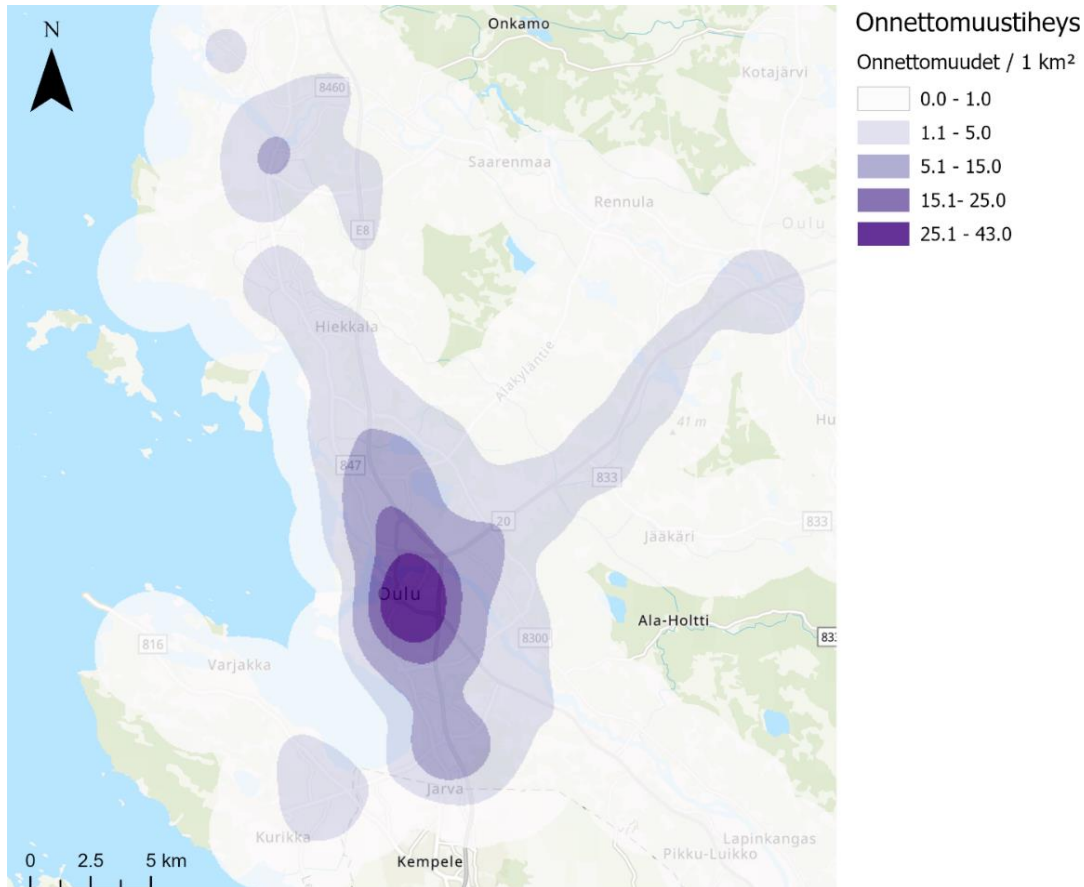
Tutkimusalueet rajattiin kaupunkien onnettomuustiheyden perusteella käyttäen planaarisista Kernel Density analyysiä. Tämän tarkoituksena oli saada laaja, alueellinen käsitys onnettomuustiheydestä kaupunkien alueella, jotta tarkastelu voidaan kohdistaa niille alueille, joissa onnettomuuksia tapahtuu eniten. Näin tutkimusalueilta saatiin karsittua harvaan asutut alueet, joissa ei ole merkittäviä onnettomuuskeskittymiä. Analyysiin käytettiin Tilastokeskuksen onnettomuuspisteitä koko kaupunkien alueilta. Suurimittakaavainen Kernel Density -analyysi suoritettiin Calculate Density -työkalun avulla käyttäen naapuruston kokona 2,5 km ja solukokona 50 m.

Kuvassa 24 on nähtävillä analyysin tulostaso Turussa. Eniten onnettomuuksia on keskustassa ja sen ympärillä, siellä missä myös asukastiheys on korkein. Onnettomuuksien määrä kasvaa tasaisesti keskustasta poispäin ja Turun kapeassa pohjoisosassa sekä eteläosan saaristossa onnettomuustiheys on lähellä nollaa. Keskustan alueella onnettomuuksien tiheysarvio vaihtelee 30–73 onnettomuuden välillä / km².



Kuva 24. Onnettomuuksien alueellinen tiheysarvio Turun alueella.

Oulun tutkimusalueen rajauksessa käytetty Kernel Density -analyysin tulos on esitetty kuvassa 25. Onnettomuuksien tiheys on suurin keskustassa ja sen läheisyydessä, ja keskustan onnettomuushotspotin tiheysarvio vaihtelee välillä 25–43 onnettomuutta /km². Suurimmat onnettomuuskeskittymät ovat sijoittuneet pohjois-eteläsuuntaan moottoritien suuntaisesti.



Kuva 25. Onnettomuuksien alueellinen tiheysarvio Oulun alueella.

Kuvien 24 ja 25 tulostasojen perusteella rajattiin molemmista kaupungeista vyöhykkeet, joissa onnettomuuksien tiheysarvio oli yli 5 onnettomuutta / km². Tämä vyöhyke näkyy kartalla kolmena tummimpana violetin sävynä. Vyöhykkeiden bounding box -laatikoista muodostettiin molemmille kaupungille tutkimusalueiden rajaukset. Turussa osa bounding boxista oli naapurikuntien alueella, joten reunat leikattiin Turun kuntarajoihin. Oulussa vyöhykkeen pohjoisosassa oli pieni onnettomuuskeskittymä Haukiputaalla, jossa onnettomuustiheys oli yli 5 onnettomuutta / km². Tämä jätettiin pois tutkimusalueen rajauksesta, koska se ei ollut yhtenäinen muuhun vyöhykkeeseen nähden. Lisäksi alueesta rajattiin pois vyöhykkeen eteläkärki, jossa oli vain moottoritien onnettomuuksia, jotka eivät kuulu tämän tutkielman tarkasteluun. Lopulliset tutkimusalueiden rajaukset ovat nähtävillä kuvassa 6.

Liite 2 Kaistojen laskennan poikkeustilanteet

Jotta kaistojen määrä kuvastaisi mahdollisimman hyvin liittymien kompleksisuutta, kaistojen laskennassa tehtiin muutamia poikkeuksia. Laskennassa poikkeuksena olivat tiet, joissa ei ole tiemerkeitä tai varsinaisia kaistoja eikä tienjakajia. Tällaisia ovat rakennuksien pihoihin johtavat tiet asuinalueilla ja kyseisten teiden liittymät eivät ole vertailukelpoisia isompien ajoväylien liittymiin. Vaikka tielle mahtuisikin kaksi autoa rinnakkain, ajolinjaa joudutaan usein muuttamaan, jos vastaan tulee auto, koska molemmille kulkuneuvoille ei ole omaa kaistaa varattuna. Tästä syystä edellä kuvattujen teiden liittymissä laskenta toteutettiin eri tavalla. Yhden tiehaaran kaistojen määräksi määritettiin 1,5, mikäli ajaminen on sallittua molempiin suuntiin. Tämä tarkoittaa sitä, että kolmihaaraisessa liittymässä kaistojen määräksi asetettiin 4,5 ja nelihaarisessa 6, mikäli yhdessäkään tienhaarassa ei ole erillisiä kaistoja. Kuvassa 26 on esitetty tämän poikkeustilanteen vaikutus kaistojen määrän laskentaan erilaisissa kolmehaaraisissa liittymissä.



Kuva 26. Kaistojen määrän laskenta ja poikkeustilanteet kolmihaaraisessa liittymässä.

- a) Kolmihaarainen liittymä, jossa on erilliset kaistat: kaistojen määräksi laskettu 6.
- b) Asuinalueen kolmihaarainen liittymä, jossa ei ole lainkaan erillisiä kaistoja: kaistojen määräksi laskettu 4,5.
- c) Asuinalueen kolmihaarainen liittymä, jossa toisella tiellä on erilliset kaistat: kaistojen määräksi laskettu 5,5.

Muita poikkeuksia laskennassa olivat parkkipaikalle johtavat sisääntulot, bussipysäkkien levikkeet, kävelykadut sekä pyöräkaistat. Joissakin liittymissä oli risteävien ajoväylien lisäksi parkkipaikalle johtava ajoväylä. Parkkipaikalle johtava tieosuus laskettiin yhdeksi kaistaksi, sillä sisääntuloissa ei varsinaisesti ole kahta kaistaa, eikä niissä tyypillisesti mahdu olemaan kahta ajoneuvoa samanaikaisesti. Asuinalueiden pihoihin, kuten omakotitalojen pihaan johtavia ajoväyliä ei huomioitu kaistojen määrässä. Lisäksi muutamat kävelykadut ja bussipysäkkien levikkeet jätettiin pois kaistojen määrän laskennasta. Muutamien liittymien ajoväylillä oli pyöräkaistoja, jotka huomioitiin laskennassa puolikkaina kaistoina.

Liite 3 Ympäristömuuttujien arvon määrittäminen muiden muuttujien osalta

Mahdollisia onnettomuuksiin vaikuttavia liikenneympäristön muuttujia oli useita ja kaikki eivät päätyneet tilastollisesti merkittäviin malleihin regressioanalyysin tuloksissa. Tässä liitteessä on kuvattu niiden muuttujien arvojen määrittäminen, joita kokeiltiin sisällyttää lineaarisiin regressiomalleihin eri muuttujakombinaatioilla, mutta mallin selitysasteen tai muuttujien heikon tilastollisen merkitsevyyden takia mallien toimivuus jäi heikoksi.

Liittymien näkyvyyttä yritettiin havainnollistaa käyttämällä muuttujana liittymien vaikutusalueen puita. Esimerkiksi Turun kaupungin puut löytyy kaupungin OGC API -rajapinnasta. Puiden sijaintipisteille tehtiin tiheysanalyysi, jonka tuloksen arvot liitettiin liittymäpisteisiin. Fyysistä liikenneympäristöä tarkasteltiin myös pinnan kaltevuutta kuvaavalla muuttujalla. Kaltevuuden keskiarvo liittymien vaikutusalueella määritettiin Maanmittauslaitoksen 2 x 2 m korkeusmallista. Kaltevuuden keskiarvot liitettiin liittymäpisteisiin Extact Values to Point -työkalulla.

Koska teiden liikennemäärää ei ollut saatavilla, Digiroad-tieaineiston toiminnallista luokkaa hyödyntämällä pyrittiin kuvaamaan liittymään johtavien teiden tärkeyttä sekä väylän palvelutasoa liikenteen kannalta. Karsitun tieaineiston toiminnallisen luokan arvot vaihtelivat välillä 1–5 siten, että 1 kuvaa tieverkoston pääteitä Suomen tasolla ja 5 kuvaa paikallisen tason liityntäkatua. Vaikka alkuperäisen aineiston arvot eivät ole jatkuvia, arvot laskevat tasaisesti ja seuraavan luokan tie on aina edellistä pienempi. Liittymään johtavista tielinkeistä laskettiin toiminnallisen luokan mediaani arvo, jotta saataisiin kokonaiskäsitys siitä, millaisessa kohtaa tieverkostoa liittymä sijaitsee. Toiminnallinen luokka määritettiin samaan tapaan kuin nopeusrajoitusten keskiarvo, mutta keskiarvon sijaan valittiin tielinkkien mediaani. Tätä toiminnallisen luokan mediaania käytettiin ympäristömuuttujana mallinnuksessa.

Urbaaneja tekijöitä arvioitiin kolmen eri aineiston avulla. Liittymien maanpeitettä käsiteltiin rasterimuotoisen Corine-maanpeiteaineiston avulla. Aineisto on saatavilla esimerkiksi Syken latauspalvelusta. Corine-aineistosta valittiin asutuksen ja palveluiden maanpeiteluokat, joiden arvioitiin vaikuttavan onnettomuuksiin. Zonal Statistics -työkalulla laskettiin luokkien yhteinen summa liittymien bufferien sisällä ja tätä summaa käytettiin muuttujana regressiomallinnuksessa. Erillisenä muuttujana käytettiin rakennusten pinta-alaa bufferien sisällä. Laskenta tehtiin Summarize Within -työkalulla bufferien sisällä käyttäen Maanmittauslaitoksen Maastotietokannan rakennusaineistoa. Lisäksi muuttujana hyödynnettiin asukasmäärää, jonka arvot liitettiin Spatial Join -työkalulla liittymiin Tilastokeskuksen 1 x 1 km väestöruuduista.