



JÄTEHUOLLON DYNAAMINEN OPTIMOINTI

Dynamic optimization of waste collection

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tuotantotalous kandidaatintyö

2022

Eemil Aspholm

Tarkastaja: Tutkijatohtori Antti Ylä-Kujala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Teknis-luonnontieteellinen

Tuotantotalous

Eemil Aspholm

Jätehuollon dynaaminen optimointi

Tuotantotalouden kandidaatintyö

2022

43 sivua, 12 kuvaa ja 2 taulukkoa

Tarkastaja: Tutkijatohtori Antti Ylä-Kujala

Avainsanat: Jätehuolto, logistiikka, dynaaminen optimointi, simulaatio

Keywords: Waste management, logistics, dynamic optimization, simulation

Jätteiden ja teollisuuden sivuvirtojen keräämisen ja kierrättämisen tärkeys on korostunut maailmassa viimeisen vuosikymmenen aikana. Kierrätysmateriaalien hyödyntäminen uusien tuotteiden raaka-aineena on huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin uusien raaka-aineiden hankinta. Jätteiden noutamisen prosessin tulee kuitenkin olla tehokas, jotta kierrättämisellä haettava hyöty saataisiin maksimoitua.

Informaatio- ja viestintäteknologian kehittyminen on mahdollistanut suuria muutoksia lähes jokaisella toimialalla. Jätehuollon palvelussa teknologian nopea kehittyminen on saanut jätehuollon palveluntarjoajat ja asiakkaat pohtimaan jätehuollon palvelun automatisaatiota sensorien avulla. Etenkin skenaario, jossa jäteastian liitettävä sensori tarkkailisi astian täyttöastetta ja tilaisi tyhjennyksen jäteastian ollessa täynnä, nähtäisiin realistisena askeleena palvelun kehittämisessä.

Tämä kandidaatintyö tutkii sensoripohjaisen, dynaamisesti optimoidun jätehuollonpalvelun vaikutusta jätehuollon logistiikan tehokkuuteen. Työn aihe on lähtöisin Suomen merkittävimmän ympäristöpalveluiden tuottajayritykseltä L&T Ympäristöpalvelut Oy:ltä. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi työhön on sisällytetty tapaustutkimus, reaali maailmaa vastaava tilanne eri skenaarioista simuloimalla jätehuollon palvelua Python-ohjelmointikielen avulla. Simulaation avulla tuotetaan 750 perinteisen, sekä 750 dynaamisen jätehuollon reittiä ja haetaan numeraalisia arvoja dynaamisen ja staattisen jätehuollon palvelun logistiikan tehokkuudelle. Tutkimus osoittaa, että asiakkaan tarpeen eli jäteastian täyttöasteen huomioiminen optimointiprosessissa vaikuttaa negatiivisesti logistiikan tehokkuuteen. Tämän vuoksi, jos dynaaminen jätehuollon optimointimalli otettaisiin käyttöön, olisi tärkeää löytää tasapainotila reitin tehokkuuden ja järjestelmän dynaamisuuden välillä.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

1	Johdanto	4
1.1	Työn tausta.....	4
1.2	Tutkimuskysymykset ja tavoitteet	5
1.3	Työn tutkimusmenetelmät ja rajaukset	6
1.4	Työn rakenne	7
2	Jätehuollon logistiikan optimointiongelma	8
2.1	Optimointiongelman ominaispiirteet	8
2.2	Jätehuollon staattisen optimoinnin mallintaminen	10
2.3	Optimointiongelman Staattiset ratkaisumetodit.....	12
3	Jätehuollon logistiikan dynaaminen optimointi	16
3.1	Dynaaminen ajoneuvon reittioptimointi	16
3.2	Jätehuollon dynaamisen optimoinnin mallintaminen	20
3.3	Optimointiongelman dynaamiset ratkaisumetodit	23
4	Case jätehuollon logistiikan optimointi.....	28
4.1	L&T Ympäristöpalvelut Oy	28
4.2	Reittioptimointiongelman simulaatiot ja avoin data	29
4.3	Dynaamiset tyhjennykset vs Staattiset tyhjennykset	31
4.4	Simulaation tulokset ja vertailu	35
5	Yhteenveto ja johtopäätökset	37
	Lähteet	39

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Jätehuolto ja materiaalien kierrättämisen tärkeys on korostunut entisestään ympäri maailmaa viime vuosikymmenen aikana. Kierrätysmateriaalien uudelleenhyödyntäminen on todettu olevan huomattavasti energiatehokkaampaa ja puhtaampaa verrattuna uusien raaka-aineiden hyödyntämiseen. Tämän takia kierrättäminen on merkittävässä roolissa hidastettaessa ilmastonmuutoksen etenemistä. (Stanford 2022) Kierrättämisen edellytyksenä on tehokas jätehuoltojärjestelmä, jossa jätettä noudetaan jatkuvasti sen tuottajilta jatkojalostusta ja uudelleenhyödyntämistä varten. Jätteen keräämisen ja noutamisen voidaan ajatella olevan yksinkertaista ja ongelmattonta, mutta näin ei kuitenkaan ole. Jätteen noutamiseen liittyvä prosessi on kompleksinen ja siinä täytyy huomioida monta muuttujaa (Karadimas et al. 2007). Nuortio et al. (2006) kuvaakin jätteen keräämisen olevan yksi vaikeimmista operationaalisista ongelmista, jota voidaan yrittää ratkaista. Tästä huolimatta syntyvän jätteen logistiikan hallinta on välttämätöntä kasvavan jätemäärän ja uusiutumattomien luonnonvarojen jälleen käyttämisen kannalta (Bing et al. 2016). Jätteen kerääminen ja kuljettaminen koostaa jopa 70–80 % koko jätehuoltojärjestelmän kustannuksista (Karadimas et al. 2007; Kaza et al. 2018; Tavares et al. 2009; Wu et al. 2020) ja pienilläkin parannuksilla on mahdollista saada aikaan suuria muutoksia jätteen noutamisen tehokkuudessa.

Perinteisellä jätehuollolla viitataan tyypillisesti jätteen keräämisen palveluun, jossa käytetään vakioituja ennalta määritettyjä reittejä, jotka toistetaan aina tiettyinä aikaväleinä (Ramos et al. 2018). Ennalta määritettävyyden vuoksi perinteisessä jätteen keräyksessä jäteastia saattaa olla liian täysi, tyhjä tai jotain tältä väliltä, mikä voidaan katsoa resurssien tehottomaksi hyödyntämiseksi (Melakessou et al. 2020). Tehottomuuteen on pyritty vastaamaan ennustamalla jäteastian täyttymistä datan avulla perustuen joko historialliseen tietoon astian sisällöstä (Nuortio et al. 2006) tai reaaliaikaisella tiedolla jäteastian täyttöasteesta (Faccio et al. 2011). Reaaliaikaisen datan saatavuus ja tieto jäteastian tilasta on tuonut reittioptimointiin uusia ulottuvuuksia. Esimerkiksi Mes (2012) tekemässä tutkimuksessa pohdittiin linkitystä dynaamisten tyhjennysreittien tehokkuuden ja asiakastyytyvyyden välillä. Jätehuollon dynaamista reittioptimointia käsittelevät tutkimukset eivät ole kuitenkaan jääneet ainoastaan teoreettiselle tasolle.

Reaaliaikaisen datan ja dynaamisen optimoinnin avulla tyhjennysreittien pituuksia on saatu lyhennettyä ja kerätyn jätteen määrää kasvatettua verrattuna perinteiseen jätehuollon reititysmaaliin (Mamun et al. 2014; Ramos et al. 2018).

Suomen jätehuoltomarkkinaa tarkastellessa huomataan, että sekä kunnalliset, että yksityiset palveluntarjoajat veloittavat jätehuollosta kaksiosaisen kiinteän tyhjennysmaksun, joka koostuu kuljetus, sekä jätteenkäsittelymaksusta. Jätehuollonpalveluntarjoaja toimittaa asiakkailta kerätyn jätteen jätteenkäsittelylaitokselle, jossa kuljetusyrittystä laskutetaan jätemäärästä käsittelylaitoksen kanssa sovitun hinnaston mukaisesti. Asiakkaalta perittävän jätteenkäsittelymaksun tarkoituksena on kattaa jätteenkäsittelylaitoksen veloitus jätteen loppusijoittamisesta ja jatkokäsittelystä. Kuljetusmaksu puolestaan kattaa jätteen kuljettamisesta ja noutamisesta aiheutuneet kustannukset. Merkittävänä tekijänä kustannusmallissa on se, että asiakkailta veloitettu kiinteä jätteenkäsittelymaksu lasketaan käyttäen astiakohtaista oletuspainoa, eikä astiassa olevan jätteen todellista määrää. (Salmenperä 2019)

Kaksiosaisessa kiinteässä jätemaksussa asiakas maksaa palveluntarjoajalle aina saman hinnan tyhjennyksestä, riippumatta siitä kuinka paljon astiassa on jätettä. Näin ollen jätteen noutamisesta ja kuljettamisesta vastaava yritys tekee enemmän voittoa, jos tyhjennetyt jäteastiat eivät ole täysiä. Aikaisemmissa tutkimuksissa liittyen jätehuollon dynaamiseen optimointiin tavoitteena on tyypillisesti löytää se hetki, jolloin astia on täysi ja tarvitsee tyhjennyksen. Suomen jätehuolto markkinalla asiakkaiden täydet jäteastiat johtaisivat palvelun tarjoamisesta saadun katteen pienentymiseen. Tämän takia kerätyn jätemäärän maksimoiminen ei välttämättä palvele sekä asiakkaan, että palveluntarjoajan näkökulmasta parasta mahdollista ratkaisua ongelmaan. Suomen jätehuoltomarkkinalla jätehuollon dynaamisia ja perinteisiä optimointimetoodeja olisi suotuisaa tarkastella puhtaasti logistiikan tehokkuuden näkökulmasta eli kuinka monta tyhjennystä palveluntarjoaja pystyy suorittamaan tietyssä aikaikkunassa.

1.2 Tutkimuskysymykset ja tavoitteet

Tämä työ keskittyy jätteen keräämisen ongelman logistiikkaan ja reittioptimointiin. Työssä tarkastellaan ja määritellään jätehuollon reittioptimointiongelma, sekä esitellään perinteisiä, että dynaamisia metodeja ongelman ratkaisemiseksi. Jätehuollon reittioptimoinnissa hyödynnetään kahta ajankohtaista reaali maailman skenaariota, jotka ovat lähtöisin toimeksiantaja yritykseltä

L&T Ympäristöpalvelut Oy:ltä. Ensimmäinen skenaario käsittelee perinteistä tapaa järjestää jätehuolto, jossa jäteastoiden tyhjennys suoritetaan säännöllisesti ennalta määritetyissä muuttumattomissa, staattisissa sykleissä. Toisessa skenaariossa jäteastian täyttöastetta seurataan mitalaitteen, sensorin avulla. Sensoripohjaisessa jätehuollossa tyhjennys toteutetaan, kun jätteen määrä ylittää ennalta määritetyn rajan ja sensori lähettää tyhjennyspyynnön. Skenaariot johdattavat meitä työn päätutkimuskysymykseen, joka on:

”Miten siirtyminen staattisesta jätehuollon reittioptimoinnista dynaamiseen reittioptimointiin vaikuttaisi jätehuollon logistiikan tehokkuuteen?”

Vastausta lähetään hakemaan kahden apukysymyksen avulla, joiden tarkoituksena on tukea päätutkimuskysymystä:

”Mitä jätehuollon reitityksen optimointiongelma tarkoittaa?”

”Mitä staattinen ja dynaaminen jätehuollon reittioptimointi tarkoittavat ja minkälaisilla metodeilla optimointia voidaan suorittaa?”

1.3 Työn tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Työ toteutetaan kahdessa osassa kirjallisuuskatsauksena ja tapaustutkimuksena toiselta nimeltään case tutkimuksena. Kirjallisuuskatsauksessa lähteenä käytetään aihepiiriin kannalta olennaista teoria ja tutkimuskirjallisuutta. Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on kerätä aiheeseen liittyvästä menetelmä- ja artikkelikirjallisuudesta olennainen teoria, sekä menetelmät, jota sovelletaan työn loppuosassa. Tapaustutkimuksessa luodaan reaaliympäristöä vastaava simulaatio jätehuollon logistiikan optimoinnista eri skenaarioissa. Simulaatioympäristö luodaan käyttäen Python ohjelmointikieltä ja sen tarjoamia monipuolisia kirjastoja, avoimen lähdekoodin reitityskoneetta (Open Source Routing Machine), sekä Docker ohjelmistoa. Dockerin avulla luodaan instanssi avoimen lähdekoodin reitityskoneesta virtuaaliympäristöön, Docker-konttiin. Python ohjelma hakee Docker-kontin ylläpitämästä avoimesta rajapinnasta tietoa simulaatioon, joka tuottaa numeraalisia arvoja logistiikan tehokkuudelle tapaustutkimuksen eri skenaarioissa.

Tutkimus on rajattu tarkastelemaan ainoastaan jätehuollon logistiikkaa, ja logistiikan tehokkuuden optimointia. Työssä ei yritetä optimoida jätehuollon palvelua kokonaisvaltaisesti huomioiden logistiikan lisäksi kerätyn jätteen laatua, palvelun tarjoamisesta aiheutuvia muita

kustannuksia kuin jäteauton ja työvoiman kustannuksia. Optimointiongelman tapaustutkimuksessa ei huomioida myöskään jäteauton kapasiteettia, kerätyn jätteen määrää tai kapasiteetin vaikutusta jäteauton nopeuteen. Työssä jätehuollon logistiikka on rajattu käsittelemään jätteen noutoa sen tuottajilta ottamatta kantaa jätteen kuljettamiseen tuotantolaitokselta jatkokäsittelyyn. Analytiikan hyödyntämisessä keskitytään simulaatioihin, sekä reaali maailman tilanteiden mallintamiseen hyödyntäen avointa dataa. Tarkoituksena rajauksilla on kohdentaa optimointiongelma vaikuttavimmaksi koettuun osa-alueeseen eli jätteen keräämisen logistiikkaan ja logistiikan tehokkuuden parantamiseen Suomen jätehuoltomarkkinalla.

1.4 Työn rakenne

Työ koostuu viidestä luvusta. Toinen kappale käsittelee jätehuollon logistiikan optimointiongelmaa. Kappaleen alussa tutustutaan geneerisellä tasolla optimointiongelmiin, jonka jälkeen määritellään jätehuollon logistiikan optimointiongelma. Tämän lisäksi toisessa kappaleessa sivutaan suurempaa optimointiongelmien kokonaisuutta, mallinnetaan perinteisen optimoinnin prosessi ja esitellään staattinen ratkaisumetodi jätehuollon logistiikan optimointiongelmaan. Kolmannessa kappaleessa tutustutaan reaaliaikaisen datan mahdollisuuksiin jätehuollon logistiikan optimoinnissa. Kappaleessa käydään läpi dynaamisen ajoneuvonreittioptimoinnin määritelmä, sekä prosessi, jolla dynaamista optimointia suoritetaan. Tämän lisäksi kappaleessa määritellään dynaamisuuden aste ja vasteajan vaikutus optimointiin, sekä metodit kuinka jätehuollon dynaamista optimointia on suoritettu aikaisemmissa tutkimuksissa. Neljäs kappale sisältää yritysintegrointin case tutkimuksen toimeksiantajayrityksestä, sekä simulaation, jossa keskitytään toimeksiantona saadun ongelman ratkaisemiseen. Tarkoituksena case tutkimuksessa on havainnollistaa jätehuollon dynaamisen optimoinnin vaikutusta palvelun tuottamiseen ja saada aikaiseksi vertailukelpoinen tulos logistiikan tehokkuudesta eri optimointimalleissa. Lopuksi johtopäätöksissä koostetaan ja luodaan yhteenveto työn tärkeimmistä havainnoista, sekä pohditaan jatkotutkimusaiheita.

2 Jätehuollon logistiikan optimointiongelma

Tässä luvussa käsitellään jätehuollon logistiikan optimointiongelmaa sekä perinteisiä ratkaisumetodeja. Ensimmäiseksi määritellään optimointiongelma ja sille tyypilliset ominaisuudet. Sen jälkeen tutkitaan tarkemmin jätehuollon optimointiongelmaa optimointiongelmiille tyypillisten ominaisuuksien kautta. Tämän jälkeen mallinnetaan ongelma hyödyntämällä muita reittioptimointiongelmia, sekä käydään läpi perinteisen ajoneuvon reittioptimoinnin prosessi. Viimeisessä kappaleessa esitellään yksi ongelman perinteisistä ratkaisuista sekä ongelman ratkaisumethodien rajoitteita ja niiden asettamia haasteita.

2.1 Optimointiongelman ominaispiirteet

Optimointiongelma on ongelma, jonka ratkaisussa on tarkoituksena löytää paras vaihtoehto eksponentiaalisesta määrästä ratkaisuja (Edmonds 2008, s. 171). Käytännössä optimoinnilla pyritään löytämään joko maksimi- tai minimiarvo funktiolle, joka reaali maailmassa voi tarkoittaa lyhyintä reittiä tietyn matkan tekemiseen tai suurinta tuottoa palvelun suorittamiselle (Guichard et al. 2016, s. 202). Optimointiprosessin tarkoituksena on varmistaa saatavilla olevien resurssien mahdollisimman tehokas käyttäminen (Zsigraiova et al. 2013). Optimointiongelmissa on Bhatin (2000, s.1–2) mukaan luonnollisesti kolme ominaispiirrettä:

- 1) Toiminnalla on jokin tietty tavoite, tai useita tavoitteita esimerkiksi minimoida toiminnasta aiheutuvat kustannukset
- 2) Päättävöitteen lisäksi on täytettävä muita vaatimuksia tai rajoituksia, kuten ottaa huomioon lait, jotka säätelevät toimintaa.
- 3) On olemassa vaihtoehtoja eli päätösmuuttujia, joiden avulla saavutetaan tavoitteet rajoitukset huomioiden.

Ennen jätehuollon reittioptimoinnin tavoitteiden, rajoitusten ja päätösmuuttujien määrittämistä, selostetaan jätteen keräämisen prosessi sanallisesti. Jäte sijaitsee astioissa tieverkoston varrella. Astioiden koko saattaa vaihdella, mutta astiat ovat tyhjennettävissä takaa lastattavalla jäteautolla. Jäteastiat tulee tyhjentää jäteautoilla, joiden kapasiteettia ei voida ylittää. Mikäli

auto on täynnä ennen reitin loppua, se tulee tyhjentää jätteenkäsittelylaitoksella, joka saattaa sijaita tuotannon toimipisteellä. Tämän jälkeen jäteauto palaa takaisin normaalille tyhjennysreitille. Jätteen noutaminen tapahtuu tyypillisesti arkipäivinä, viikonloppuina jätettä ei noudeta kuin poikkeustapauksissa. Yhteen jäteautoon ei kerätä kuin ainoastaan yhdenlaista jätettä kerrallaan. Alueet, joissa tyhjennyksiä suoritetaan voivat olla tiheästi tai harvaan asuttuja, joka vaikuttaa jäteasioiden etäisyyksiin reitin varrella. Jäteauto lähtee tuotannon toimipisteestä, ajaa tyhjennysreitin läpi, ja palaa takaisin tuotannon toimipisteeseen. (Nuortio et al. 2006)

Kuten voidaan huomata ei jätteen noutamisen prosessi ole suoraviivainen. Jätteen keräämiseen liittyvät ongelmat kategorisoidaan sekä yhdeksi vaikeimmista operatiivisista (Nuortio et al. 2006), että logistisista ongelmista (Markov et al. 2014). Etenkin reitinsuunnittelu ja reittioptimointi jätehuollossa ovat monimutkaisia ja ne sisältävät suhteellisen paljon rajoitteita sekä tavoitteita, mikä johtaa inhimillisiin virheisiin (Delgado-Antequera et al. 2020). Jätteen keräämisen reittioptimoinnin tyypillisimmät tavoitteet ovat reitin lyhentäminen (Sarmah et al. 2019), ajan optimointi (Carlos et al. 2019), kustannuksien alentaminen (Rathore & Sarmah, 2019) ja negatiivisten ympäristövaikutuksien vähentäminen (Ali et al. 2018). Optimointi ei kuitenkaan ole rajoitettu ainoastaan yhteen tavoitteeseen, vaan tavoitteita reittioptimoinnilla on mahdollista olla samanaikaisesti monia, kuten kustannuksien alentaminen ja ympäristöpäästöjen vähentäminen. Monitavoitteisuus asettaa optimointiongelmalle uuden haasteen, sillä tavoitteet voivat olla ristiriidassa keskenään, milloin optimiratkaisulla pyritään löytämään tasapaino asetettujen tavoitteiden välillä. (Delgado-Antequera et al. 2020)

Realistisen optimointiongelman koostamiseksi tulee toiminnalle määrittää rajoitteet, jotka muodostavat reaali maailman rajat tavoitteiden saavuttamiseen (Hannan et al. 2020). Havainnollistavana esimerkkinä rajoituksista on aikaikkunat, eli aikaisin ja myöhäisin kellonaika kun joku tietty asia tulee suorittaa. Aikaikkuna voi koskea esimerkiksi asiakkaan kohdetta, kuljettajan lepotaukoja ja lounastaukoja tai jätteenkäsittelylaitoksien aukioloaikoja. Tilanteessa, jossa jäteauton keräämän jätteen tyhjennyspaikan eli jätteenkäsittelylaitoksen aukioloajat ovat rajoittuneet on tyhjennysreiteillä huomioitava, ettei jätettä voi viedä laitokselle aikaikkunan ulkopuolella. Tällaisessa tapauksessa reittioptimoinnissa tulee huomioida parhain mahdollinen ajankohta jäteauton tyhjentämiselle. (Kim et al. 2006) Muita jätehuollon reittioptimoinnin rajoitteita ovat esimerkiksi jäteauton kapasiteetti, asiakkaan tarve, jätteen tyyppi, työvoiman rajoitteet, ympäristö sekä voimassa olevat lait ja säädökset kuten nopeusrajoitukset (Hannan et al. 2020).

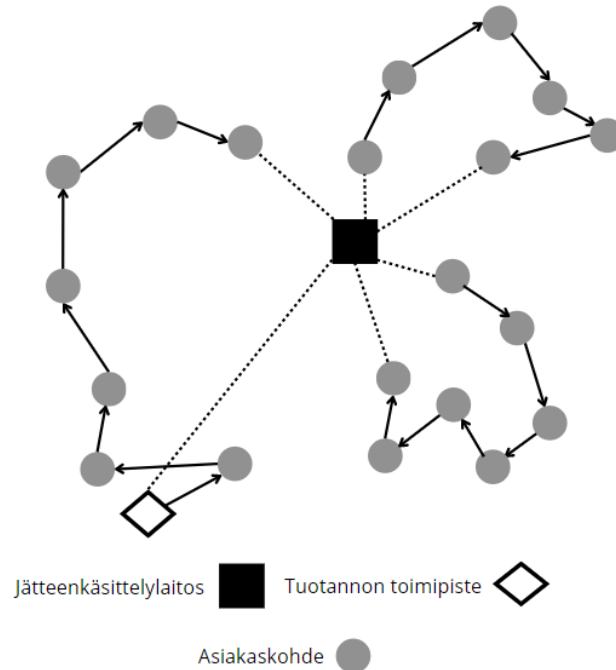
Optimointimuuttujat, eli päätösmuuttujat kuvaavat optimointiongelmassa niitä päätöksiä, joita muuttamalla haluttuun tavoitteeseen päästään. Optimointiongelman tavoite ja päätösmuuttujat ovat tiiviisti linkitettyjä toisiinsa, eikä tavoitteeseen pääsemisen kannalta epäolennaisia päätösmuuttujia ole suotuisaa huomioida optimoinnissa. (Bhat 2000, s. 2) Jätehuollon reittioptimoinnissa päätösmuuttujana voidaan pitää esimerkiksi ajojärjestystä, jossa tyhjennykset suoritetaan, sekä jätteen vähimmäismäärä, joka täytyy ylittyä jokaisessa kohteessa tietyn reitin aikana (Anghinolfi 2013). Jos optimoinnin tavoitteena on valita lyhyin reitti ja reittisuunnittelussa tiedetään kaikkien astioiden väliset etäisyydet, ajojärjestystä muuttamalla on mahdollista lyhentää tyhjennysreitin kokonaispituutta (Mamun et al. 2014).

2.2 Jätehuollon staattisen optimoinnin mallintaminen

Jätteen keräämisen logistiikan optimointiongelma on yksi versio ajoneuvon reititysongelmasta (Vehicle Routing Problem, VRP) (Karadimas 2007; Toth & Vigo 2002, s. 2). Klassisessa ajoneuvon reititysongelmassa pyritään minimoimaan useiden ajoneuvojen logistiikasta aiheutuvat kustannukset tilanteessa, jossa ajoneuvoja lähetetään yhdestä toimipisteestä toimittamaan tavaraa asiakkaille ehtona, että jokaisen asiakkaan luona käy vain yksi ajoneuvo (Johansson 2005). Suurin eroavaisuus ajoneuvon reititysongelmassa ja jätteen keräämisen ongelmassa on se, että jätteen keräämisessä asiakkailta noudetaan toimittamisen sijasta materiaalia, jätettä, joka täytyy toimittaa takaisin toimipisteeseen, josta jäteauto lähtee (Gutierrez et al. 2015).

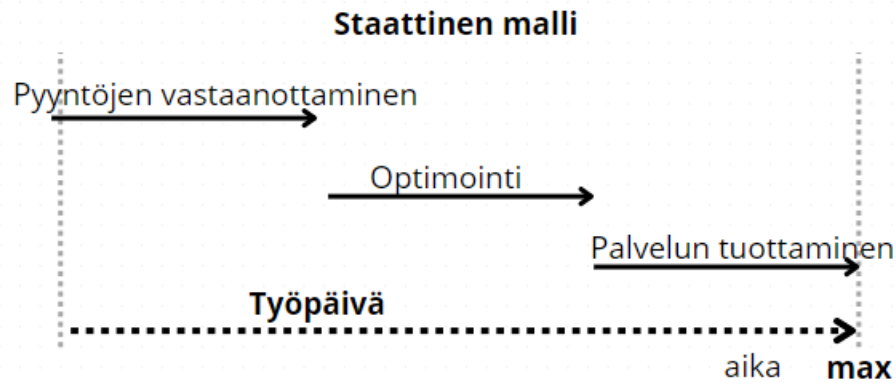
Mikäli jätteen keräämisen reittioptimointiongelmaa pelkistetään eikä optimoinnissa ei huomioidaisi jäteauton kapasiteettia, kerätyn jätteen määrää, aikataulun optimointia tai jäteautojen määrää, voidaan ongelma mallintaa kauppamatkustajan ongelmana (Travelling salesman problem, TSP). Kauppamatkustajan ongelmassa on tarkoituksena löytää kustannustehokkain reitti, joka käy läpi kaikki asiakkaat reitin varrella. Pääasiassa suurin eroavaisuus TSP ja VRP optimointiongelmillä on se, että TSP ongelma kuvaa yksittäisen ajoneuvon reittiä huomioimatta ajoneuvon kapasiteettia, kun VRP ongelmassa kuvataan useiden ajoneuvojen reittejä huomioiden ajoneuvojen kapasiteetti. (Belien et al. 2012) Kysymys katsotaanko jätehuollon reititysongelma VRP vai TSP ongelmaksi liittyy olennaisesti tutkimuksessa asetettuihin tavoitteisiin, sekä huomioitaviin rajoituksiin. Jos optimoinnin tavoitteena olisi puhtaasti yhden jäteauton reitinpituuden minimointi huomioimatta jäteauton kapasiteettia olisi luontevaa mallintaa

jätehuollon reititysongelma TSP ongelmana (Belien et al. 2012). Ajoneuvon reititysongelman sovellus jätteen keräämisen ongelmasta sovellus löytyy havainnollistettuna kuvasta 1.



Kuva 1. Jätteen keräämisen reititysongelma (mukaillen Kim et al. 2006)

Ajoneuvon reititysongelman, sekä jätehuollon reititysongelman samanlaisuuden ansiosta erilaisia ajoneuvonreitittämisessä käytettyjä malleja on mahdollista soveltaa mallinnettaessa jätehuollon reitittämisen prosessia. Staattisessa reitioptimointiongelmassa, kaikki data ja tieto, jota optimoinnissa hyödynnetään, tiedetään etukäteen, eivätkä ajoneuvojen reitit muutu, kun ne ovat suorituksessa. Näin ollen staattinen ajoneuvon reitittäminen koostuu kolmesta eri vaiheesta: pyyntöjen vastaanottamisesta, reittien optimoinnista sekä palvelun tuottamisesta eli reittien suoritukselta. Staattisen optimoinnin vaiheet ovat löytyvät havainnollistettuna kuvasta 2. Jokainen staattisen optimoinnin vaihe on erotettu selvästi toistaan. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei esimerkiksi uusia pyyntöjä vastaanoteta tai huomioida kyseisen työpäivän reitillä, mikäli pyyntöjen vastaanottamisen aika on loppunut ja kyseisen työpäivän reitti on ehditty muodostamaan. (Haijiam et al. 2013, s. 312–314)



Kuva 2. Ajoneuvon staattinen optimointimalli (mukaillen Haijiam et al. 2013, s. 313)

Staattisen reitittämisen prosessi havainnollistaa hyvin perinteisen jätehuollon reitittämisen ominaisuuksia. Samalla periaatteella kuin staattisessa ajoneuvon reitittämisessä, perinteisen jätehuollon reitit suunnitellaan etukäteen ja asiakkaiden luona käydään ennalta määritettyinä aikaväleinä (Ramos et al. 2018). Perinteisessä jätehuollon optimointimallissa asiakkaat sopivat palveluntuottajan kanssa jäteastioiden tyhjentämisestä, esimerkiksi kerran kahdessa viikossa. Jätehuoltopalvelua tarjoava yritys puolestaan suunnittelee reitit perustuen kerättyihin, olemassa oleviin tietoihinsa asiakkaista, kuten sijaintiin ja asiakkaan kanssa sovittuun tyhjennysyyskliin. Kun ajoneuvo on lähtenyt suorittamaan reittiä, ei asiakkaiden pyyntöjä enää vastaanoteta ja uudet tyhjennyspyynnöt siirretään seuraavalle työpäivälle, kun kyseinen reitti ajetaan.

2.3 Optimointiongelman Staattiset ratkaisumetodit

Kauppamatkustajan ongelma (Belien et al. 2012) ja ajoneuvon reititysongelma (Mamun et al. 2014) kuuluvat NP-vaikeisiin ongelmiin, eli ongelmiin, joihin on mahdollista löytää ratkaisu epädeterministisessä polynomiaaliajassa (non-deterministic polynomial-time). NP vaikeus tarkoittaa sitä, että ongelman optimaalisen vastauksen ratkaisuaika kasvaa eksponentiaalisesti jakelupisteiden määrän kasvaessa. (Wang & Lu 2009) Ajoneuvon reititysongelman, sekä kauppatkustajan ongelman NP-vaikeus pätee myös jätehuollon reitioptimointiin, mikä asettaa ongelman ratkaisemiselle haasteen.

Jätehuollon logistiikan optimoinnin kannalta NP-vaikeus voidaan asettaa seuraavasti: mitä enemmän jäteastioita reitillä on, sitä suurempi määrä muodostuu mahdollisia ajoreittejä mistä paras mahdollinen eli tyypillisesti lyhyin reitti tulee löytää. NP-vaikeiden ongelmien ratkaisemiseen tarkoitettut metodit voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan, tarkkoihin ja heuristisiin menetelmiin. Tarkat metodit viittaavat lähestymistapaan, jossa tarkoituksena on löytää optimaalinen eli paras mahdollinen ratkaisu. Tarkka metodi on tehokas keino ratkaista optimointiongelma, mikäli ongelman ratkaiseminen on mahdollista polynomiaalisessa ajassa. Heuristinen menetelmä viittaa puolestaan metodiin, joka ei pyri löytämään optimaalista ratkaisua, vaan ratkaisun, joka on todella lähellä optimaalista ratkaisua järkevässä aikaikkunassa. Vaikka optimaalisen ratkaisun löytäminen olisikin käytännössä mahdollista tarkalla algoritmilla, kestäisi se monimutkaisessa ongelmassa tarpeettoman kauan eli eksponentiaalisen määrän aikaa. Tästä syystä ongelman NP-vaikeus asettaa ratkaisemiseen haasteen, sillä kukaan ei ole löytänyt tehokasta algoritmia eli menetelmää ongelman optimaaliseen ratkaisemiseen. NP-vaikeiden ongelmien ratkaisemisessa tyydytäänkin useasti ratkaisuun, joka on mahdollista tuottaa lyhyessä ajassa, ja joka on lähellä optimaalista ratkaisua. (Paschos 2016)

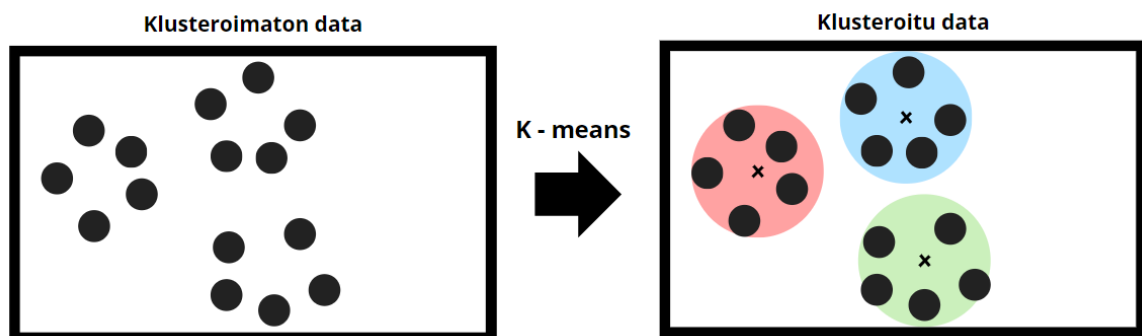
Yksi heuristinen tapa suorittaa reittioptimointi on kaksivaiheisella metodilla: klusteroida jäteastiat samankaltaisuuden perusteella ja sen jälkeen luoda reitti lyhyin reitti jokaiseen klusteriin (Hannan et al. 2020). Reaalimaailmassa kaupungit koostuvat useimmiten tiheistä, sekä harvemmistä asumiskeskittymistä, jotka ovat jakautuneet kaupungin sisälle. Kussakin asumiskeskittymässä on sekä yritys, että kuluttaja asiakkaita, jotka tarvitsevat tyhjennyksen jäteastiallensa. Klusteroimalla asiakkaat voimme jakaa jäteastiat sijaintinsa perusteella alueisiin niin, että ne ovat keskimäärin mahdollisimman lähellä kuulumansa klusterin keskipistettä. Klusteroinnin tavoitteena on siis jakaa suurempi asiakasmassa pienempiin ryhmittymiin eli klustereihin perustuen esimerkiksi asiakkaan sijaintiin, niin että samalla alueella sijaitsevat asiakkaat kuuluvat samaan alueeseen. Klusteroinnin jälkeen tietyn klusterin asiakkaiden välille luodaan lyhyin mahdollinen reitti, joka käy läpi kaikki asiakkaat reitin varrella. (Hannan et al. 2020)

Steinbach et al. (2000) mukaan yksi suosituimmista klusteroinnissa käytettävistä algoritmeista on K:n keskiarvon klusterointimenetelmä (K-means). K-means klusterointi tekniikka koostuu pääasiassa neljästä eri vaiheesta (Steinbach et al. 2000):

1. Valitaan K-määrä keskipisteitä määrittämään aloitustilannetta
2. Jaetaan muut pisteet niin, että ne kuuluvat lähimpään keskipisteeseen

3. Lasketaan jokaiselle keskittymälle uusi keskipiste
4. Toistetaan vaiheita 2 ja 3 kunnes keskipisteiden sijainti ei muutu

Käytännössä K-means klusterointitekniikalla on mahdollista jakaa esimerkiksi kartalle sijoitetut kordinaattipisteet rajattuihin alueisiin, niin että jokainen kordinaattipiste kuuluu alueeseen, joka sisältää vain lähekkäisiä kordinaattipisteitä (Kim et al. 2006). K-means algoritmin löytyy havainnollistettuna kuvasta 3. Suuren asiakasmassan klusteroimisen jälkeen lyhyimmän reitin luominen on tehokkaampaa, kun klusterin sisälle muodostetun reitin muodostamisessa tarkasteltavien reittipisteiden määrä on pienempi ja kohteet ovat jo valmiiksi lähellä toisiaan verrattuna klusteroimattomaan tilanteeseen, jossa otoskoko on suurempi ja kohteet kauempana toisistaan.



Kuva 3. K-means klusterointi (mukaiillen Jeffares 2019)

Yksi lyhyimmän reitin löytämiseen tarkoitettu tehokas metodi on nimeltään simuloitu jäähditys (Simulated Annealing, SA). Simuloitu jäähditys on paikalliseen hakuun perustuva menetelmä, joka on saanut analogiansa fysikaalisesta ilmiöstä. Paikalliseen hakuun perustuvat menetit pyrkivät löytämään ratkaisun, joka sisältää parhaan arvon valittuihin kriteereihin nähden tarkastelussa ympäristössä. Algoritmi toistaa kyseistä toimenpidettä niin kauan, kunnes aiemmin saatua ratkaisua ei ole mahdollista parantaa. Hyödyntämällä systemaattisesti paikallisen haun prosessia algoritmin on mahdollista löytää paikallinen optimiratkaisu ongelmaan. Jotta algoritmi ei jäisi kuitenkaan jumiin paikalliseen optimiin tulee metodissa hyödyntää vastauksen monipuolistamiseen tarkoitettuja strategioita. Simuloidussa jäähdityksessä monipuolistamisstrategian tarkoituksena on sallia muutokset, jotka kasvattavat todennäköisyyttä huonontaa ratkaisun arvoa mahdollistaakseen uuden paikallisen optimin löytämiseen. Hyvän arvion saamiseksi

optimaalisesta ratkaisusta, on kannattavaa aloittaa paikallisen optimin haku säännöllisesti uudelleen aiemmin saadusta hyväksytystä ratkaisusta. (Fermani et al. 2020, s. 65–66)

Jätehuollon logistiikan optimoinnissa simuloidun jäähtymisen algoritmi rakentaa ensin yhden ratkaisun, joka saadaan lisäämällä asiakkaita reitille. Tämän jälkeen ratkaisua aletaan parantamaan paikallisen haun prosessilla muuttamalla reitillä olevien asiakkaiden järjestystä tai pilkkomalla reitti palasiin ja vaihtamalla palasten ajojärjestystä. Kun parempi ratkaisu on löydetty, algoritmi yrittää parantaa ratkaisua entisestään muuttamalla yhden tai useamman kohteen ajojärjestystä päästäkseen parempaan ratkaisuun verrattuna aiempaan paikalliseen optimiin. Mikäli reittejä on monia, algoritmin on mahdollista siirtää asiakkaita reitiltä toiselle aiempaa paremman ratkaisun löytämiseksi. Tämä prosessi toistetaan, kunnes optimointia varten suotava aika on päättynyt. Lopputuloksena algoritmin avulla saadaan optimoinnin tavoitteen mukainen tyhjennysreitti jäteauton suoritettavaksi (Fermani et al. 2020, s. 65–67).

3 Jätehuollon logistiikan dynaaminen optimointi

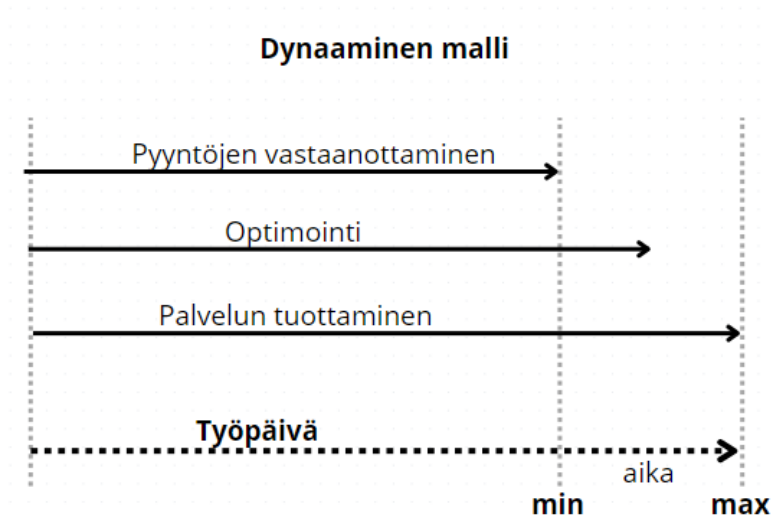
Tässä kappaleessa käsitellään jätehuollon dynaamista reittioptimointia. Ensin määritellään ajoneuvon dynaaminen reittioptimointi tunnistamalla sille ominaisia piirteitä ja vertaamalla sitä staattiseen eli perinteiseen reittioptimointiin. Kappaleessa käydään läpi dynaamisen reittioptimoinnin prosessi, dynaamisuuden aste, sekä minkälainen vaikutus dynaamisuudella on reittioptimoinnin tavoitteeseen. Tämän jälkeen tutustutaan tarkemmin dynaamiseen reittioptimointiin jätehuollon keräyspalvelussa. Alaluvussa tarkastellaan jätehuollon dynaamista reittioptimointimallia, dynaamisuuden asteen vaikutusta, metodeja ja dynaamisen optimoinnin saavutuksia jätehuollon reittioptimoinnissa. Lopuksi esitellään aikaisemmissa tutkimuksissa saatuja tuloksia sekä dynaamisesta ja staattisesta jätehuollon optimoinnista.

3.1 Dynaaminen ajoneuvon reittioptimointi

Kuten jätehuollon palvelu, myös monet muut reaali maailman reititysongelmat sisältävät dynaamisia eli muuttuvia elementtejä. Ongelmien dynaamisuus johtaa reititysongelmissa siihen, että reitittämisen kannalta olennainen tieto on usein tuntematonta tai epäluotettavaa reittien suunnittelun aikana. Tieto, jota olisi tarvittu saadaan palvelun suorittamisen aikana tai kun palvelu on suoritettu. Teknologian nopea kehittyminen, sekä harppaukset kommunikaatio ja informaatioteknologiassa mahdollistavat datan keräämisen ja reitittämisen reaaliajassa. Pelkkä reaaliaikainen tiedon saatavuus ei kuitenkaan ratkaise ongelmaa, vaan tiedon saatavuuden lisääntyessä tarve reaaliaikaista tietoa vastaanottaville optimointimenetelmille ja malleille kasvaa. Reaaliaikaista dataa hyödyntävien reittioptimointimetodien ja prosessien tarve korostuu etenkin jakelualan yrityksistä, joissa logistiikka perustuu korkean reaktiivisuuden kysyntään. (Hajjam et al. 2013, s. 309–310)

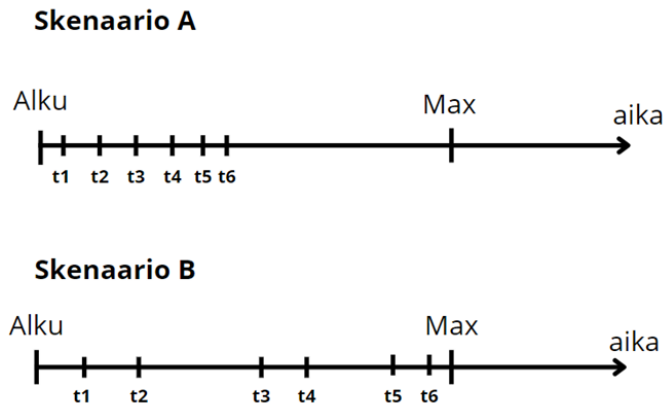
Jätehuollon dynaamisen reitittämisen kannalta on tärkeää ensin ymmärtää dynaamisen reitittämisen prosessi, joka löytyy havainnollistettuna kuvasta 4. Staattisessa ajoneuvon reitittämässä oletuksena on, että tiedämme ennalta asiakkaat, jonka luona ajoneuvon täytyy reitin aikana käydä. Dynaamisessa optimointimallissa näin ei kuitenkaan aina ole. Etenkin reaaliaikaisissa jakelujärjestelmissä uudet ja muuttuneet asiakkaiden pyynnöt saapuvat jatkuvalla syötöllä

satunnaisessa ajassa. Pyyntöjen saavuttua niistä optimoidaan uusia reittejä tai ne sisällytetään jo suorituksessa oleville reiteille. Dynaaminen järjestelmä kykenee siis vastaamaan muuttuvaan asiakkaan tarpeeseen. Dynaaminen optimointiprosessi on jatkuvassa suorituksessa ja prosessin eri vaiheita suoritetaan päällekkäin suunnitteluajanjakson, esimerkiksi yhden työpäivän aikana. (Hajjam et al. 2013, s. 313) Prosessin jatkuvuus mahdollistaa liikkuvan ajoneuvon reitin uudelleen optimoinnin huomioiden asiakkaalta tullut pyyntö reaaliajassa. Reaaliaikainen optimointi vaatii kuitenkin reaaliaikaista tietoa ajoneuvon sijainnista sekä tehokkaan teknisen järjestelmän, jotta uusia kohteita on mahdollista määrittää reitillä olevalle ajoneuvolle. (Pillac et al. 2013)



Kuva 4. Dynaaminen optimointimalli (mukaillen Haijjam et al. 2013, s. 313)

Dynaamisessa optimointimallissa merkityksellinen ominaisuus on dynaamisuuden aste. Dynaamisuuden aste voidaan Ichoua et al. (2013) mukaan jakaa kahteen ulottuvuuteen: muutosten tiheyteen ja pyyntöjen kiireellisyyteen. Havainnollistaaksemme dynaamisuuden astetta verrataan pyyntöjä, jotka saapuvat järjestelmään suunnittelujakson alussa, sekä pyyntöjä, jotka saapuvat hajautetusti suunnittelujakson aikana kuvassa 5. Kaaviossa alku tarkoittaa suunnittelujakson alkamisajankohtaa eli esimerkiksi työpäivän alkamista ja max suunnitteluajan päättymistä eli työvuoron loppumista.



Kuva 5. (mukaillen Larsen et al. 2008, s. 204)

Dynaamisuuuden eroavaisuus ilmenee käytännössä siten, että reitinsuunnittelijalla on pidempi aika suunnitella ja optimoida reittiä alussa saapuneiden pyyntöjen osalta. Tilanteessa, jossa kaikki pyynnöt saapuisivat heti suunnittelujakson alussa, eikä tieto muuttuisi optimoimisen jälkeen, voidaan järjestelmän dynaamisuus luokitella jopa osittain staattiseksi. Hajautetusti tulleiden pyyntöjen dynaamisuus on puolestaan huomattavasti suurempi. Kun reitittämisen prosessi on käynnissä ja uusia pyyntöjä saapuu järjestelmään, täytyy suunnittelujakson lopussa tulleiden pyyntöjen aiheuttama muutos ottaa huomioon optimoinnissa. Hajautuneiden pyyntöjen tapauksessa optimoinnin viimeisin versio suoritetaan juuri ennen palvelun tuottamista, jolloin optimointiin hyödynnettävä aika on rajallinen. Kun kaikki pyynnöt tulevat työpäivän alussa, ei muutoksia kerran tehtyyn suunnitteluun ja optimointiin tarvita. Oletusarvona esitellyssä tilanteessa on, että suunnittelun alussa tulleiden pyyntöjen reitti olisi lyhyempi verrattuna enemmän ajallisesti jakautuneiden pyyntöjen reittiin. (Larsen et al. 2008, s. 204)

Muutosten tiheyden lisäksi pyyntöjen kiireellisyys vaikuttaa olennaisesti reitittämisen dynaamisuuteen. Pyyntöjen kiireellisyys voidaan tulkita asiakkaalle annettuna palvelulupauksena, eli vasteaikana, jolloin asiakkaalta tullut pyyntö on toteutettu niin kuin asiakas on pyytänyt. Palvelulupaus on sekä yritys, että toimialakohtainen, mutta lähtökohtaisesti pyynnön lähettänyt asiakas haluaa palvelua mahdollisimman nopeasti pyynnön lähettämisen jälkeen (Larsen et al. 2008, s. 203–205). Asiakkaan tahtotila ja yrityksen intressit eivät välttämättä aina kohtaa. Esimerkiksi tilanne, jossa asiakas pyytää täydelle jäteastialle tyhjennystä, asiakas haluaa, että palvelu suoritetaan nopealla aikataululla ennen kuin astia pursuaa yli ja aiheuttaa hänelle harmia. Jos palvelua tarjoavan yrityksen reitioptimoinnin ainoana tavoitteena on mahdollisimman lyhyt vasteaika, ei optimointi tuota reitin tehokkuuden kannalta optimaalista ratkaisua.

Esimerkiksi tilanteessa, jossa aiemmin saapunut pyyntö jätteastian tyhjentämisestä, olisi päivän aikana ainoa palveluntarjoajalle tullut tyhjennyspyyntö. Yhden jätteastian tyhjentämisestä saatava maksu ei todennäköisesti kattaisi toiminnasta aiheutuvia kustannuksia. Toiminnan kannattamattomuuden lisäksi jäteauton aiheuttamat pakokaasupäästöt aiheuttaisivat todennäköisesti enemmän haittaa ympäristölle kuin yksi ylipursuava jätettä. Tämän vuoksi pyyntöjen suorittamiseen on tyypillisesti asetettu realistinen vasteaika, kuten palvelun suorittaminen seuraavan päivän aikana tai 48 tunnin sisällä pyynnön saapumisesta.

Palvelun vasteaika on ominaisuus, joka havainnollistaa erinomaisesti järjestelmän dynaamisuutta. Skenaario, jossa vasteaika on pitkä, esimerkiksi viikko, voidaan tulkita dynaamisuudeltaan alhaiseksi, lähes staattiseksi. Pitkä vasteaika mahdollistaa pitemmän ajanjakson reittien suunnittelemiselle ja optimoinnille, minkä vuoksi tilanne vastaa osittain staattisen reitittämisen periaatteita. Vastakohtana pitkälle vasteajalle on tilanne, jossa vasteaika on todella lyhyt ja dynaamisuuden aste on suuri, kun suunnittelulle ja optimoinnille ei käytännössä ole aikaa. (Hajjam et al. 2013, s. 313)

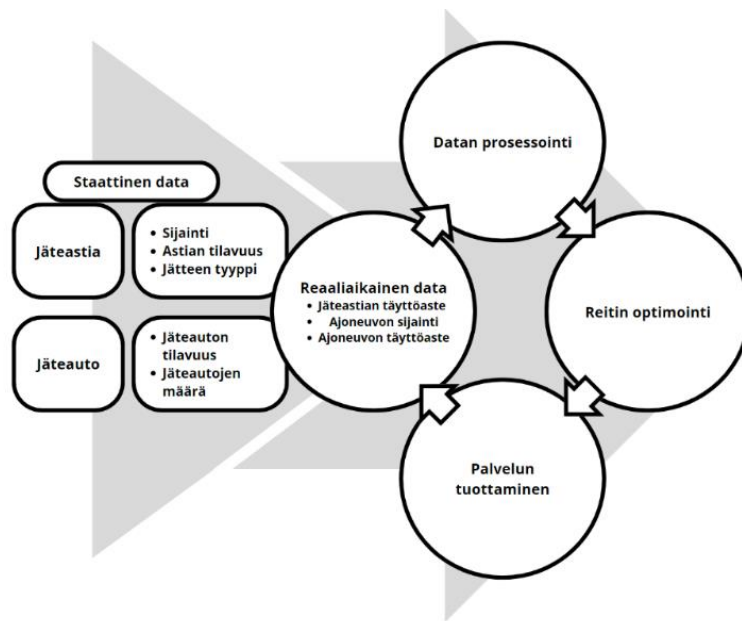
Dynaamiset reititysongelmat edellyttävät päätöksen tekemistä nopealla vasteajalla, minkä vuoksi reaktiivisuus kompensoi osittain tehdyn päätöksen laatua. Aika, jota staattisessa järjestelmässä käytetään päätöksien tekemiseen, korvataan dynaamisessa prosessissa järjestelmän kyvyllä vastata nopeihin palvelutarpeen muutoksiin. Vaatimus reagoida nopeasti asiakkaan pyyntöihin vaikuttaa olennaisesti optimointiongelman tavoitteeseen. Staattisen reitioptimoinnin menetelmät tyypillisesti keskittyvät matkan kustannuksien minimointiin, kun dynaamisessa reitioptimoinnissa keskiössä on asiakkaan tarve ja vasteajan optimointi. (Hajjam et al. 2013 s. 313–315; Larsen et al. 2008, s. 205) Toisaalta dynaamisessa mallissa asiakkaan tarpeiden muuttuessa myös ongelman optimaalinen ratkaisu on muuttuva, eikä kerran tuotetun ratkaisun optimaalisuudelle ole takeita tulevaisuudessa (Nguyen et al. 2012). Jotta palvelun tuottaminen dynaamisessa ajoneuvon reitioptimoinnissa pysyisi kannattavana, on erittäin tärkeää löytää tasapaino vasteajan eli dynaamisuuden ja reitin tehokkuuden välillä (Hajjam et al. 2013, s. 314–315).

3.2 Jätehuollon dynaamisen optimoinnin mallintaminen

Jätehuollon reittioptimoinnissa perinteiset menetelmät ovat perustuneet vakioaikaväleihin ajettaviin, ennalta määritettyihin reitteihin ilman luotettavaa tietoa jäteastian täyttöasteesta. Perinteisessä jätehuollossa päätöksenteko on siis täysin empiiristä, eikä se ota huomioon palvelun oikeaan tarpeeseen liittyvää tietoa, kuten esimerkiksi reaaliaikaista dataa jäteastian täyttöastetta. Ennalta määritetyillä tyhjennysreiteillä osa jäteastioista saattaa pursuta jätteestä, kun samaan aikaan osa astioista on mahdollisesti tyhjillään. Liian myöhäinen tai aikainen jäteastian tyhjentäminen johtaa tyytymättömiin asiakkaisiin ja lisääntyneisiin kustannuksiin, etenkin jos jätettä pääsee lähellä olevaan ympäristöön. Tämän takia perinteistä jätehuollon optimointia kritisoidaan ja sen katsotaan olevan kaukana täydellisyydestä. (Asimakopoulos et al. 2015)

Jäteastian täyttymisen nopeus riippuu useista tekijöistä, kuten asukasmäärästä, jäteastian jakamisesta usean talouden kesken, juhlapyhistä, tapahtumista, elämäntavasta ja vuodenajasta. Tämän takia jätteen keräämisen ongelma, jossa huomioidaan palvelun tarve, eli jäteastian jätteen määrä on stokastinen luonteeltaan. (Nuortio et al. 2006) Stokastiset prosessit mallintavat jonkin satunnaisilmiön kehittymistä ajan edetessä (Nurmiainen 2021), joka jätehuollon tapauksessa liittyy jäteastian täyttymisen nopeuteen. Vaikka jätehuollon palveluntarvetta on haasteellista ennustaa, dynaamisen optimoinnin ja reaaliaikaisen datan avulla on mahdollista löytää ajan kohta, kun astia on tarpeeksi täysi ja vaatii tyhjennyksen.

Jätehuollon dynaamista optimointia varten Faccio et al. (2011) ovat kehittäneet teoreettisen reaaliaikaiseen dataan perustuva teoreettisen jätehuollon reititysmallin, joka löytyy kuvasta 6. Reititysmallin syöttötiedot jakautuvat kahteen eri luokkaan: staattiseen- ja reaaliaikaiseen dataan. Staattiseksi dataksi luokitellaan esimerkiksi tieto asiakkaiden sijainnista, jäteastian tilavuudesta, jätteen tyypistä, ajoneuvon jättesäiliön tilavuus. Reaaliaikainen data puolestaan sisältää tiedon jäteastian täyttöasteesta, jäteastian painosta, ajoneuvon sijainnista, sekä ajoneuvon täyttöasteesta. (Faccio et al. 2011)

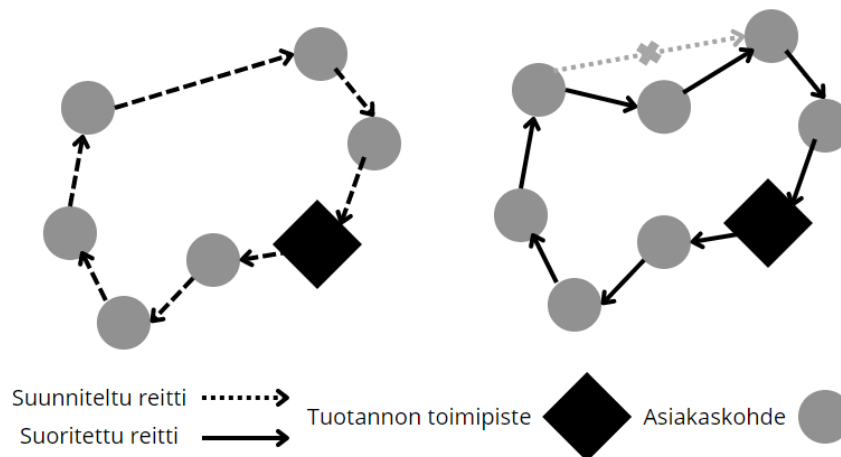


Kuva 6. Reaaliaikaiseen dataan perustuva jätehuollon optimointiprosessi (mukaillen Faccio et al. 2011)

Jäteastian painon ja kapasiteetin mittaamisessa käytetään kahden tyyppisiä sensoreita: jäteastian kannen sisäpuolelle, sekä jäteastian pohjalle liitettävä sensori. Kannen sisäpuolella olevan sensorin tarkoituksena on mitata jäteastian kapasiteetin täyttöastetta ja pohjalle liitettävä sensori jäteastian sisällä olevan materiaalin painoa. (Catania & Ventura 2014) Jäteauton sijaintiin perustuva data saadaan kerättyä GPS paikantimella (Melakessou et al. 2020) ja jäteauton täyttöaste tilavuusanturin avulla (Faccio et al. 2011).

Ensimmäisenä vaiheena dynaamisessa mallissa on staattisten tietojen syöttäminen, kuten jäteastioiden sijainnit ja tilavuudet eri asiakaskohteissa, sekä jätteen tyyppi, jota reitillä kerätään esimerkiksi suoraan yrityksen tietokannasta. Lisäksi syötetään muut vakioidut tiedot, kuten jäteauton maksimikapasiteetti ja käytössä olevien jäteautojen määrä. Reaaliaikaista dataa syötetään järjestelmään tyypillisesti automaatiolla, hakemalla se datan lähteistä reaaliaikaisesti tai ennalta määritetyissä sykleissä. Datan saapuesssa järjestelmään tai jäteauton tyhjentäessä astian optimointiprosessi käynnistyy ja järjestelmä luo uuden optimaalisen reitin, joka sisältää sekä aiemmat suorittamattomat, että saapuneet tyhjennyspyynnöt. (Faccio et al. 2011)

Jäteauton suorittama tyhjennysreitti on reaaliaikaisessa optimointimallissa jatkuvassa muutoksessa. Reitti, jota jäteauto lähti suorittamaan vastaa kaikissa skenaarioissa jäteauton lopullista reittiä. Jäteauton dynaaminen reitti on havainnollistettu kuvassa 7. Jatkuvan reitin optimoinnin ja reaaliaikaisen tiedonsiirron avulla palvelun tarjoaja kykenee vastaamaan asiakkaiden muuttuvaan tarpeeseen nopealla aikavälillä. Käytännössä järjestelmä, joka kykenee käsittelemään sekä reaaliaikaista, että staattista dataa reitioptimoinnissa pystyy lisäämään uusia kohteita, sekä poistamaan kohteita riippuen, kuinka täynnä kohteen jäteastia on. Poistamalla tarpeettomat kohteet, sekä minimoimalla tyhjennysreitin pituuden, sekä ajan, joka reitin suorittamiseen kuuluu, on reaaliaikaisen järjestelmän mahdollista tuottaa optimaalinen ratkaisu jätehuollon reititysongelmaan. (Faccio et al. 2011)



Kuva 7. Reaaliaikainen muutos jäteauton reitillä (Mukaiillen Pillac et al. 2013)

Jatkuvassa muutoksessa toimiva jätehuollon dynaaminen optimointimalli ei suinkaan ole ainoa tapa hyödyntää dynaamista optimointimallia jätehuollon palvelussa. Varianssi dynaamisen optimoinnin hyödyntämisessä johtuu aiemmin käsitellystä dynaamisuuden asteesta, vasteajasta, sekä palvelulupauksesta. Vaikka jätteen jatkuva noutaminen onkin yksi toimivan yhteiskunnan kulmakivistä, jätehuollon palvelu koetaan harvoin niin kriittiseksi, että reitittämistä tulisi suorittaa reaaliajassa. Havainnollistaaksemme dynaamisuuden aiheuttamaa variaatiota vertailemme kahta jätehuollon dynaamisen optimoinnin mallia: Faccio et al. (2011) ja Gutierrez et al. (2015).

Faccio et al. (2011) esittelemässä mallissa uuden tyhjennyspyynnön tai astian tyhjennyksen jälkeen dynaamisen optimoinnin prosessi käynnistyy ja järjestelmä laskee jäteautolle uuden

optimaalisen reitin. Gutierrez et al. (2015) jätehuollon dynaamisen optimoinnin mallissa järjestelmä kerää dataa samoin kuin Faccio et al. (2011) malli, mutta reitin suunnitteleminen tapahtuu vain niille astioille, jotka ovat päivittäisen reittioptimoinnin hetkellä ylittävät järjestelmään asetetun vähimmäistäyttöasteen. Tästä syystä Gutierrez et al. (2015) hyödyntämässä optimointimallissa jäteastian täytyessä datan keräämisen jälkeen on mahdollista, että astia ehtii pursuta, ennen tyhjennyksen saapumista. Vaikka Gutierrez et al. (2015) mallissa optimointi tapahtuu ainoastaan kerran päivässä, on malli silti dynaaminen, sillä se huomioi päivittäisellä tasolla muuttuvan asiakastarpeen.

Eroavaisuus tarkastelluissa dynaamisissa malleissa liittyy olennaisesti palvelun vasteaikaan. Gutierrez et al. (2015) optimointimallissa vasteajaksi voidaan todeta yhdeksi päiväksi reittisuunnittelun ja optimoinnin tapahtuen ainoastaan kerran päivässä. Faccio et al. (2011) optimointimallin vasteaika on huomattavasti lyhyempi mallin reitittäessä uuden kohteen välittömästi tyhjennysreitille astian täytyessä yli asetetun rajan. Vaikka kummatkin optimointimallit ovatkin dynaamisia, voidaan Faccio et al. (2011) malli olevan korkean dynaamisuuden reittioptimointimalli ja Gutierrez et al. (2015) alhaisen dynaamisuuden reittioptimointimalli. Asiakkaan näkökulmasta optimointimallin tarjoama lyhyt vasteaika, voidaan kokea parannuksena palveluun (Pillac et al. 2012), mutta optimoinnin reaktiivisuus vaikuttaa olennaisesti resurssien tehokkaaseen hyödyntämiseen. Pidemmällä suunnittelulla on mahdollista vähentää merkittävästi reitin suorittamisesta aiheutuvia kustannuksia (Ghiani et al. 2003). Reitin ajamisesta aiheutuneet kustannukset ovat verrannolliset reitin pituuteen ja kestoon, jotka ovat merkittäviä tekijöitä myös logistiikan tehokkuudessa. Tästä syystä jätehuollon dynaamisessa optimoinnissa olisi tärkeää löytää tasapaino asiakkaalle luvatussa vasteajan, sekä reitin tehokkuuden välillä.

3.3 Optimointiongelman dynaamiset ratkaisumetodit

Dynaamisessa optimoinnissa reitittämisen kannalta olennaista dataa saadaan ajan kuluessa, minkä vuoksi lopullinen reitti on mahdollisesti tiedossa vasta suunnittelujakson loppuessa. Tarkat optimointimenetelmät perustuvat optimaalisen reitin suunnitteleamiseen saatavilla oleviin tietoihin perustuen. Tiedon lisääntyessä tarkka menetelmä ei takaa ratkaisun optimaalisuutta. Tämän vuoksi useimmat dynaamiset reittioptimointimenetelmät perustuvat tyypillisesti heuristisiin metodeihin, jotka kykenevät laskemaan nopealla aikavälillä uuden optimaalisen ratkaisun muuttuvaan ongelmaan nykytilaan. Korkean dynaamisuuden optimointimetodit kohtaavatkin

haasteen, kun data on saattanut ehtiä jo vaihtua ennen ratkaisun löytymistä. Dynaamiset reitioptimointimetodit voidaan jakaa kahteen eri kategoriaan säännölliseen uudelleenoptimointiin, sekä jatkuvaan uudelleenoptimointiin. (Pillac et al. 2013)

Säännölliseen uudelleenoptimointiin perustuva metodi alkaa tyypillisesti työpäivän alussa, tuottamalla ensimmäisen optimoidun reitin perustuen kyseisellä hetkellä saatavissa olevaan dataan samalla tavalla kuin staattisen reitioptimoinnin metodeissa. Päivän kuluessa eteenpäin optimointiprosessi suoritetaan ennalta määritetyissä sykleissä perustuen uusimpaan dataan asiakkaiden tarpeesta. Säännöllisen uudelleenoptimoinnin yhtenä etuna onkin se, että se voi perustua samoihin algoritmeihin kuin staattinen reitioptimointi huomioiden samalla asiakkaiden tarpeen kerätyn datan avulla. (Pillac et al. 2013) Jätehuollon palvelun näkökulmasta voisimme siis hyödyntää aiemmin esiteltyä simuloitua jäähdytyksen algoritmia. Eroavaisuus staattiseen reitittämiseen tulisi siinä, että säännöllisen uudelleenoptimoinnin reitit optimoitaisiin päivittäin ja ne sisältäisivät ainoastaan ne jäteastiat, jotka olisivat täynnä kerätyn datan perusteella.

Jatkuvaan uudelleenoptimointiin perustuvat menetelmät suorittavat optimointiprosessia jatkuvasti päivän kuluessa ja ylläpitävät tietoa aiemmista hyvistä ratkaisuista mukautuvassa muistissa. Kun saatavilla oleva data muuttuu, käynnistyy järjestelmässä päätöksentekoprosessi, joka yhdistää muistissa olevan tiedon aiemmasta ratkaisusta sekä muuttuneen datan uusimman reitin luomiseksi. Etuna jatkuvassa uudelleenoptimoinnissa on se, että optimointimalli maksimoi järjestelmän laskentakapasiteetin mahdollistaakseen monimutkaisemman toteutuksen. Toisaalta jatkuvassa uudelleenoptimointimallissa ajoneuvon reitti on jatkuvassa muutoksessa, eikä kuljettaja tiedä seuraavaa määränpäättä ennen kuin se on suorittanut aiemman reittipisteen. (Pillac et al. 2013)

Vaikka jätehuollon palvelu on kriittinen yhteiskunnan toimivuuden kannalta, ei palveluntarjoajien antama vasteaika jätteiden noutamiselle alita yhtä vuorokautta. Mikäli jäteauton reitillä olisi vain muutama jäteastia, saattaisi palvelun tuottamisesta aiheutuvat ympäristöpäästöt aiheuttaa suuremman haitan ympäristölle, kuin muutama täysi jäteastia. Tästä syystä jatkuva uudelleenoptimointi ja ainoastaan vasteajan minimoiminen, eivät mahdollisesti tuota parhainta mahdollista ratkaisua jätehuollon palvelussa.

Jatkuvan optimointimallin sijaan jätehuollon dynaamiseen optimoinnissa on kehitetty metodi, joka pyrkii ennustamaan jäteastioiden täyttymisen nopeutta hyödyntäen sekä historiallista, että reaaliaikaista dataa. Määrittämällä ennalta asiakkaat, joiden jäteastiat täyttyvät seuraavan

vuorokauden on mahdollista saavuttaa jatkuvan optimointimallin vasteaika ilman jatkuvia reit-timuunnoksia. Havainnollistaaksemme ennustavan dynaamisen mallin esittelemme Ramos et al. (2018) jätehuollon dynaamisen optimoinnin metodin.

Ramos et al. (2018) älykkään jätehuollon lähestymistapa toimii valitsemalla ne jäteastiat, jotka päivän aikana tulee tyhjentää maksimoiden tyhjentämisestä saatava tuotto. Optimointimallissa määritetään riskinotto-kyky, joka kuvaa maksimimäärää jäteastioita, jotka voivat täytyä liikaa päivän aikana. Tämän lisäksi asetetaan maksimiaika minkä täynnä oleva astia voi olla täynnä, sekä astian pienin täyttöaste, jonka astian tulee ylittää ennen tyhjennystä. Esimerkiksi maksimissaan 10 % astioista voi täytyä liikaa ja jos astia on täynnä se voi maksimissaan odottaa kaksi tuntia tyhjennystä. Jäteauton reittioptimointi puolestaan tapahtuu kahdessa vaiheessa: tyhjennettävien astioiden valitseminen ja reitin optimointi. Astioiden valitseminen tapahtuu hyödyntämällä reaaliaikaista, sekä historiallista dataa jäteastian täyttymisen nopeudesta. Kerä-tyn datan avulla muodostetaan ennustemalli, joka löytää ne jäteastiat, jotka datan perusteella olisivat aivan täynnä päivän päätteeksi, jos astioita ei tyhjennettäisi kyseisenä päivänä. Ennus-temallin avulla päivän tyhjennysreitille saadaan astiat, jotka eivät pystyisi odottamaan seuraa-vaan reitin suoritusajankohtaan. Astioiden valitsemisen jälkeen suoritetaan päivän reitin muo-dostaminen. (Ramos et al. 2018)

Ramos et al. (2018) dynaamisen optimoinnin mallissa hyödynnetään tarkkaa metodologia, lineaa-rista sekalukuoptimointia (Mixed Integer Linear Programming, MILP) lyhyimmän reitin luo-miseen, sekä heuristista menetelmää tyhjennettävien jäteastioiden määrittämiseen. Tarkan me-netelmän käyttäminen on Ramos et al. (2018) mallissa perusteltua, sillä kyseisessä tutkimuk-sessa ei testata optimointijärjestelmän kykyä vastata jatkuvaan muutokseen, vaan vertaillaan dynaamisen ja staattisen jätehuollon optimoinnin avulla saavutettuja tuloksia muuttumatto-massa tutkimusympäristössä. Lineaarinen sekalukuoptimointi viittaa matemaattiseen mallin-nustapaan monimutkaisien, kombinatoristen optimointitehtävien ratkaisemiseksi. Linearisessa sekalukuoptimoinnissa optimoinnin tavoitteet, sekä rajoitukset voidaan esittää päätösmuuttu-jien avulla lineaarisina funktioina, joista osa on määritetty kokonaislukurajoitteisiksi. (Della Croce 2014)

Ramos et al. (2018) optimoinnin tavoitefunktio maksimoi palvelun tarjoamisesta saadun tuoton, joka koostuu kerätystä jätteestä saaduista tuloista, sekä jätteen kuljettamisesta ja keräämisestä aiheutuneista kustannuksista. Keräämisen kustannukset esitetään lineaarisena funktiona jäteau-tojen ajaman kilometrimäärän sekä ajoneuvon käytöstä aiheutuvien kustannuksien mukaan.

Toisin sanoen, mitä pidempi tyhjennysreitti on, sitä suurempi on tyhjennysreitin suorittamisesta aiheutuneet kustannukset. Päätösmuuttujat Ramos et al. (2018) mallissa esitetään binäärisinä muuttujina tai positiivisina kokonaislukumuuttujina. Binäärinen muuttuja viittaa tyypillisesti totuusarvoon tosi tai epätosi tai numeraalisesti ilmaistuna 1 tai 0 (Karabiber 2022). Binäärinen muuttuja kuvaa tässä tapauksessa sitä onko reitillä oleva jäteastia tyhjennetty vai ei. Positiivinen kokonaislukumuuttuja seuraa kerättyä jätemäärää ja jäteauton jäljellä olevaa kapasiteettia. Binääri-, sekä kokonaislukumuuttujien avulla on mahdollista luoda reitti, jossa jäteauton keräämälle jätemäärälle ja reitin pituudelle löydetään optimiarvot, mikä johtaa palvelun tarjoamisesta saadun tuoton maksimointiin. (Ramos et al. 2018)

Dynaamisen reitittämisen tuloksien ylivertaisuus verrattuna perinteiseen, staattiseen reitittämiseen tulee esiin useista tutkimuksista (Faccio et al. 2011; Mamun et al. 2014; Ramos et al. 2018) Dynaamisella jätehuollon reitittämällä on saavutettu esimerkiksi parempaa voittoa, lyhyempiä jäteautojen reittejä, sekä pienennettyä kaluston käyttöasteprosenttia (Ramos et al. 2018). Toisaalta tutkimustuloksia löytyy myös staattisen jätehuollon reitittämisen puolesta (Anghinolfi et al. 2013; Gutierrez et al. 2015). Esimerkiksi Gutierrez et al. (2015) suorittamassa tutkimuksessa staattisessa reitittämisessä ajatut kilometrit ja kokonaisajoaika, sekä palvelun tuottamisesta aiheutuneet kustannukset olivat pienemmät verrattuna dynaamiseen malliin.

Huomionarvoisena tekijänä aiemmissa tutkimuksissa on optimoinnin tavoite, joka vaikuttaa olennaisesti optimaaliseen ratkaisun määrittämiseen. Esimerkiksi staattinen optimointi saattaa tuottaa lyhyemmän reitin, mutta dynaaminen optimointi kykenee puolestaan lyhentämään sekä reitin pituutta ja samalla kasvattamaan kerätyn jätteen määrää. Vaikka selkeää voittajaa ei aiemmista tutkimuksista ei löydy, teknologian kehityksen myötä reaaliaikainen data ja dynaaminen optimointi nähdään suurena mahdollisuutena jätehuollon tehokkuuden parantamiselle. Yhteen-veto aiemmin käsiteltyjen tutkimuksien lähestymistavoista, metodeista, tavoitteista sekä tulok-sista on koostettu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Yhteenveto jätehuollon dynaamisen ja staattisen reittioptimoinnin vertailevista tutkimuksista

Lähestymistapa	Algoritmi - Metodi	Tavoite	Tulokset	Lähde
Tarkka (Matemaattinen mallintaminen)	Lineaarinen kokonaislukuoptimointi (MILP)	Minimoida jäteautojen reittien pituus	Dynaaminen reitittäminen tuottaa paremman ratkaisun	Mamun et al. (2014)
Heuristinen	Lähimmän naapurin menetelmä (NN)	Kustannusten optimointi	Optimoiminen tuottaa tehokkaamman ratkaisun verrattuna perinteiseen reitittämiseen	Faccio et al. (2011)
Heuristinen	K:n keskiarvon klusterointi + simuloitu hehkutus (K-means + SA)	Minimoida kestoja ja käytettyjen resurssien määrää. Maksimoida reitin tiivyyttä, sekä jakaa työmäärä tasaisesti.	Klusterointi ja simuloitu hehkutus tuottivat parhaimmat tulokset	Kim et al. (2006)
Tarkka (Matemaattinen mallintaminen) + Heuristinen	Lineaarinen sekalukuoptimointi (ILP)	Maksimoida palvelun tarjoamisesta saatu tuotto	Dynaaminen optimointimalli tuottaa paremman tuloksen verrattuna staattiseen malliin.	Ramos et al. (2018)
Heuristinen	Lyhyimmän polun puu + geneettinen algoritmi + K:n keskiarvon klusterointimenetelmä (SPST + GA + K-means)	Reitin pituuden minimoiminen, tyhjennysviiveen ja ylitäysien jäteastioiden määrän minimoiminen	Staattinen jätehuollon optimointi oli tehokkaampaa, mutta dynaamisessa jäteastiat eivät päässeet täyttymään liika.	Gutierrez et al. (2015)
Tarkka (Matemaattinen mallintaminen)	Lineaarinen kokonaislukuoptimointi (MILP)	Maksimoida palvelun tuotto minimoimalla kustannuksien summa ja maksimoimalla jätteen kierrättäminen	Dynaamisessa optimoinnissa tyhjennyksistä aiheutuneet kustannukset olivat suuremmat kuin nykyisessä mallissa palvelusta saatu voitto pienempi.	Anglofi et al. (2013)

4 Case jätehuollon logistiikan optimointi

Tässä luvussa käsitellään jätehuollon logistiikan dynaamista ja staattista optimointia case esimerkin avulla. Ensimmäiseksi esitteellään tapaustutkimuksen toimeksiantajayritys L&T Ympäristöpalvelut Oy:n. Tämän jälkeen tutustutaan case esimerkkiin määrittelemällä reittioptimointiongelman simulaation ja avoimen datan, jota tapaustutkimuksessa käytetään. Kolmannessa alaluvussa luodaan ja määritellään simulaatio, sekä staattisesta, että dynaamisesta optimoinnista ja tuotetaan numeraaliset arvot logistiikan tehokkuudelle. Viimeisenä esitellään simulaation aikana tuotetut logistiikan tehokkuutta mittaavat arvot, sekä vertaillaan arvoja keskenään.

4.1 L&T Ympäristöpalvelut Oy

Lassila & Tikanoja on 1905 perustettu suomalainen Helsingin pörssiin listautunut kiertotalouden palveluyritys, joka harjoittaa liiketoimintaa Suomessa ja Ruotsissa. Vuonna 2021 Lassila & Tikanoja työllisti 8389 henkilöä, joista n. 83, 5 % työskenteli Suomessa ja loput 16,5 % Ruotsissa. Yrityksen tavoitteena on tehdä kiertotaloudesta totta. Tähän L&T pyrkii tarjoamalla asiakkaille monipuolisesti erilaisia keinoja rakentaa tulevaisuuden kestävä kasvua pohjautuen kiertotalouteen ja sen avaamiin mahdollisuuksiin. L&T koostuu neljästä eri liiketoimintalueesta: Ympäristöpalveluista, Teollisuuspalveluista, Kiinteistöpalveluista sekä Kiinteistöpalveluista Ruotsissa. (Lassila & Tikanoja 2022a, Lassila & Tikanoja 2022b) Tämän työn kannalta olennaisimpana liiketoimintalueena on L&T Ympäristöpalvelut Oy.

L&T Ympäristöpalvelut on liikevaihdollaan mitattuna L&T:n suurin toimiala ja yhtiö on myös saavuttanut markkinajohtajuuden ympäristöpalveluiden toimialalla. L&T kuvaa ympäristöpalveluiden tarkoituksen palauttaa asiakkaiden materiaalit takaisin kiertoon mahdollisimman korkealla jalostusasteella. Ympäristöpalvelujen toimiala sisältää jätehuollon, kierrättämisen ja ympäristötuotteiden palveluita. L&T Ympäristöpalveluiden kannalta merkityksellinen ympäristöpalvelujen markkina sisältää jätteiden keräämisen, sekä käsittelyn kierrätysasemilla, minkä jälkeen suurin osa jätteestä saadaan palautettua uusiokäyttöön. (Lassila & Tikanoja 2022b; Lassila & Tikanoja 2022c)

Ympäristöpalvelujen toimialalla ja etenkin jätehuollossa kilpailijoiden välisten tuotteiden ja palveluiden eroavaisuus on vähäistä. Yrityksien kilpailuvalttina tähän mennessä on toiminut hinnan lisäksi asiantuntijuus, sekä palvelun saatavuus ympäri Suomea. L&T Ympäristöpalveluilla on markkinoilla kattavin palveluverkosto ja yritys kykeneekin tuottamaan palveluita kaikkialla Suomessa. Nopea teknologian kehittyminen ja tiedolla johtaminen nähdään mahdollisuutena koko toimialalla. Dynaaminen reitittäminen ja sensorien asettaminen jäteastioihin olisi realistinen seuraava askel palvelun kehittämisessä. Ennen suuria investointeja on kuitenkin tärkeää tutkia uuden teknologian tuomia muutoksia liiketoimintaan, kuten esimerkiksi jätehuollon palvelun tuottamiseen operatiivisella tasolla.

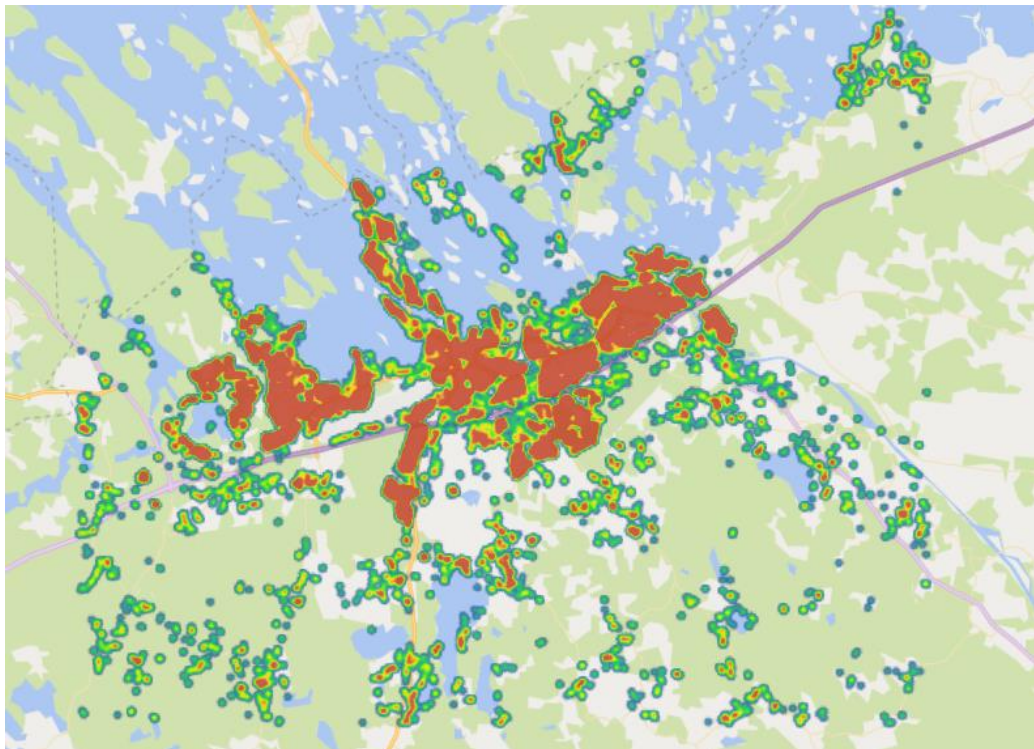
4.2 Reititöptimointiongelman simulaatit ja avoin data

Dynaamisen jätehuollon reitittämisen testaaminen reaali maailmassa, vaatisi merkittäviä investointeja infrastruktuurin pystyttämiseen eli sensorien hankkimiseen ja liittämiseen jäteastioihin. Kaluston ja teknologian hankkimisen lisäksi Suomen ympäristöolosuhteet asettaisivat myös omat haasteensa sensorien toiminnalle etenkin vuodenaikojen lämpötilavaihtelujen muodossa. Vaikka dynaamisen ja staattisen reitittämisen vertaileminen on tämän työn viitekehyksissä mahdotonta reaali maailmassa, on meidän mahdollista luoda reaali maailmaa vastaava systeemi, simulaatio eri skenaarioiden välistä vertailua varten. Simulaatit ovat erinomainen työkalu monimutkaisien reaali maailman järjestelmien arvioimiseen, joita ei voida analysoida analyttisesti ja joissa testaaminen reaali maailmassa on mahdotonta tai liian kallista. Simulaatiossa hyödynnetään tietokonetta arvioimaan reaali maailman mallin numeerista dataa, jota kerätään haluttujen todellisuutta vastaavien ominaisuuksien arvioimiseksi. (Law et al. 2007, s. 1)

Simulaation edellytyksenä on datan saatavuus. Jätehuollon palvelun näkökulmasta olennainen tieto sekä tuotetussa simulaatiossa, että reaali maailmassa on asiakkaan sijainti. Ilman tietoa jäteastioiden sijainnista on sekä optimointia, että palvelun tuottamista mahdotonta suorittaa. Reaali maailmassa jätehuollon palvelua tarjoava yritys tietää asiakkaidensa sijainnit, mutta oikean asiakasdatan hyödyntäminen tämän työn simulaatiossa ei ole mahdollista tietosuojalakien ja asetusten vuoksi. Jotta saisimme simulaation vastaamaan mahdollisimman läheltä reaali maailman tilannetta jätehuollon palvelusta, voimme hyödyntää avointa dataa. Avoin data määritellään tiedoksi, joka on kaikkien saatavilla, hyödynnettävissä, muokattavissa, sekä jaettavissa. Avointa dataa voidaan hyödyntää mihin tahansa käyttötarkoitukseen datan hyödyntäjä sitä

haluaa käyttää, oli tarkoituksena sitten kaupallinen tai tutkimuskäyttö. (The World Bank 2022) Avoimen datan käyttäminen soveltuu tähän simulaatioon erinomaisesti, sillä sen avulla voidaan turvata, ettei luottamuksellisia tietoja pääse vuotamaan verkkoon.

Simulaatiossa hyödynnettävä avoin data on kerätty Väestötietojärjestelmästä ja se sisältää taulukon Suomalaisten rakennusten osoitetietoja. Avoimen datan taulukosta löytyvät sekä osoitteiden nimet, postinumerot, sekä WGS84-koordinaatit eli rakennuksen pituus, sekä leveyssuuntaiset koordinaattitiedot. Aineiston viimeisin päivitysjankkohta on 14.11.2022 ja se sisältää kyseisellä hetkellä voimassa olleet keskeneräisten sekä valmiiden rakennusten tiedot. (Kirjalainen 2022). Simulaatiota varten aineisto on rajattu osoitetietoihin, jotka sijaitsevat Etelä-Karjalan maakunnassa, Lappeenrannan kaupungin alueella. Datasta on siivottu pois kaikki ne rakennukset, jotka sijaitsevat sellaisessa saarella, johon ei pääse tieverkostoa pitkin. Simulaatiossa käytettävien osoitetietojen data on havainnollistettu lämpökarttana kuvassa 8. Lämpökartassa punainen väri havainnollistaa alueita, jotka ovat asumiskeskittymiä ja vihreä väri kuvaa yksittäisiä rakennuksia.



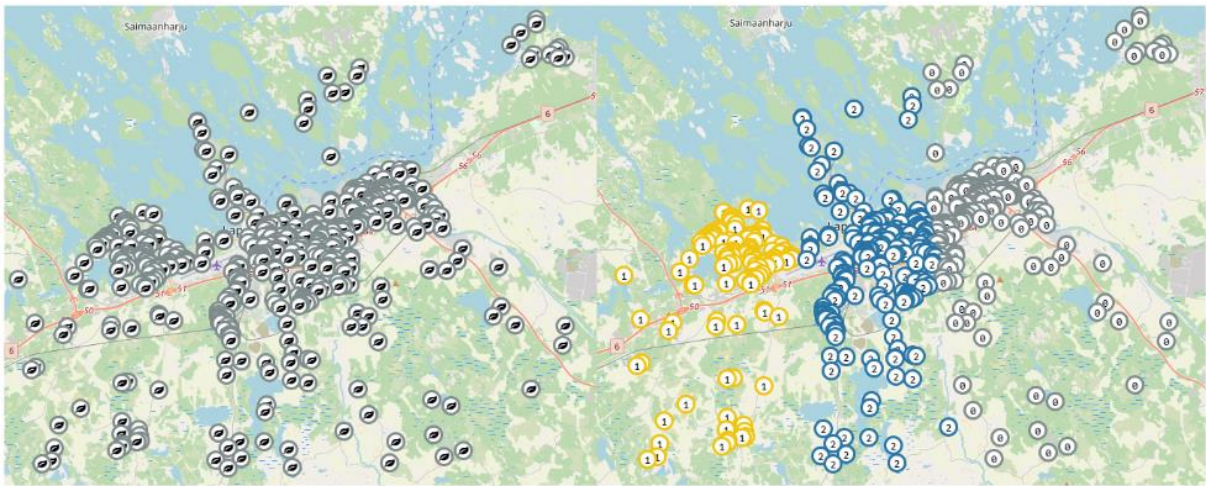
Kuva 8. Lämpökartta avoimen datan osoitetiedoista Lappeenrannassa

4.3 Dynaamiset tyhjennykset vs Staattiset tyhjennykset

Case simulaatiossa jätehuollon logistiikan optimointiongelmaa käsitellään kauppamatkustajan ongelmana (Travelling salesman problem, TSP). Tämä on perusteltua, sillä etenkin Suomessa jätehuollon palveluntarjoajalle optimi tilanne on se, jossa jäteauto pystyy tyhjentämään mahdollisimman monta jäteastiaa annetussa aikaikkunassa. Hypoteesina sensoripohjaiselle optimoinnille on, että kerätyn jätteen määrä kasvaa, kun palvelun tuottaminen pohjautuisi tietoon jäteastian sisällöstä. Suomen jätehuoltomarkkinalla asiakkaalta laskutetaan kuitenkin aina saman verran jätehuollon palvelusta, riippumatta siitä kuinka paljon jäteastiassa on jätettä, mikä asettaa entistä suuremman arvon tyhjennyksien tehokkuuden tarkastelulle. Simulaation ulkopuolelle rajataan kerättävän jätteen määrä ja jäteauton kapasiteetti, sekä tyhjennysajankohtien optimoiminen. Simulaatiossa ei myöskään huomioida optimaalista klusterien määrää. Tavoitteena simulaatiossa on löytää lyhyin mahdollinen reitti, joka käy läpi kaikki reitillä olevat asiakaskohteet. Rajoituksina simulaatiossa huomioidaan tieverkoston asettamat rajoitukset, liikennesäännöt, kuten yksisuuntaiset kadut. Jäteauton sallitaan kuitenkin tekevän U-käännöksiä, sillä useimmiten auto pystyy kääntymään ympäri asiakkaan pihassa, mikäli seuraava asiakaskohde olisi toisessa ajosuunnassa. Päätösmuuttujana reitittämisessä toimii tyhjennysjärjestys, eli se järjestys, jossa jäteauto käy läpi asiakaskohteet ja palaa takaisin tuotannon toimipisteelle.

Reaalimaailmaa vastaava case tutkimus simulaatio on tuotettu hyödyntämällä Python ohjelmointikieltä, Docker ohjelmistoa, sekä avoimeen lähdekoodiin perustuvaa reitityskonetta (Open Source Routing Machine, OSRM). Python simulaation lähdekoodi on löydettävissä GitHub arkistosta (Aspholm, 2022). Simulaation ensimmäisenä vaiheena noudetaan rakennuksien sijaintitiedot Lappeenrannan kaupungin alueelta erillisestä .csv tiedostosta, joka sisältää n. 19 tuhatta osoitetietoa. Reaalimaailmassa yhden kaupungin alueella toimii vain harvoin yksi jätehuollon palveluntarjoaja. Tämän takia 19 tuhatta rakennusta ei myöskään ole solmineet saman palveluntarjoajan kanssa sopimusta jätteen noutamisesta. Lisäksi osalla rakennuksista saattaa olla yhteinen jätepiste toisen yhtiön kanssa, minkä takia todellinen asiakkaiden määrä ei vastaa rakennusten määrää. Simulaatiossa oletetaan, että jätehuoltopalvelua tarjoavalla yrityksellä on yhteensä 500 erinäistä jätehuoltosopimusta Lappeenrannan alueella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaikista 19000 tuhannesta rakennuksesta valitaan satunnaisotannalla 500 kohdetta, jotka kuuluvat simulaation jätehuoltopalvelujen piiriin.

Staattisessa jätehuollon palvelun simulaatiossa hyödynnetään aiemmin käsiteltyä teoreettista optimointimallia klusterointi ensin ja reititys sitten. Kaikki 500 kohdetta klusteroidaan kolmeen eri klusteriin ja jokainen klusteri sisältää vähintään 75 asiakaskohdetta. Klusteroimisen tarkoituksena on vastata hyvin lähelle todellista jätehuollon reitittämistä, jossa eri kaupunginosiin sijoittuneet asiakkaat reititetään samoille jäteastioiden tyhjennysreiteille. Lappeenrannan tapauksessa klusteroiminen käy ilmi kuvasta 9. Kuvassa on esitetty kaikki jätehuollon asiakkaat vasemmassa kuvassa, sekä klusteroitu tilanne oikeassa kuvassa, jossa värikoodit ja numerot havainnollistavat kohteiden kuulumista tiettyyn klusteriin, josta jäteauton reitti muodostetaan.

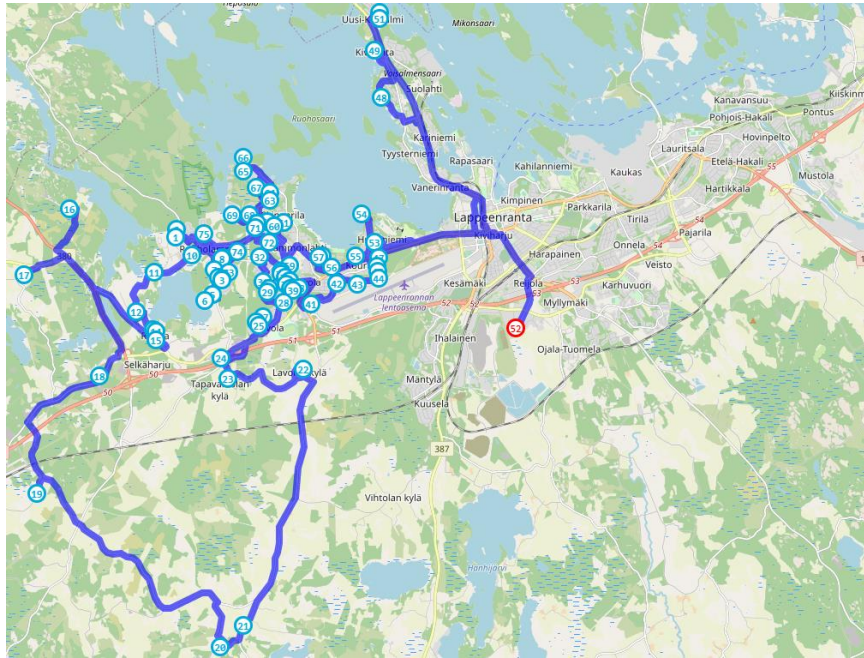


Kuva 9. Asiakaskohteiden klusteroiminen

Dynaamisen ja staattisen asetelman vertailtavuuden vuoksi, sekä tietokoneen laskentakapasiteetin asettaman rajoitteen vuoksi simulaatiossa tyhjennysreitit sisältävät aina 75 asiakaskohdetta. Staattisessa asetelmassa kiinteä asiakasmäärä näkyy siten, että reitille poimitaan ne 75 asiakasta samasta klusterista, joiden kanssa jätehuoltoyritys on sopinut tyhjennyksen kyseisenä päivänä. Kun kohteet on valittu, suoritetaan reitioptimointi hyödyntäen simuloidun hehkutuksen algoritmia.

Simuloidun hehkutuksen algoritmi luo lyhyimmän reitin perustuen annettuun kaksiulotteiseen taulukkoon, etäisyysmatriisiin. Etäisyysmatriisi sisältää ajoneuvolla nopeimmin ajettavan kohteiden välisen etäisyyden, joka ei aina vastaa lyhyintä etäisyyttä. Etäisyysmatriisi saadaan kutsumalla avoimen lähdekoodin reitityskoneen (OSRM) luodun instanssin rajapintaa sisällyttämällä kutsuun jokaisen kohteen koordinaattipisteet. Etäisyysmatriisin avulla simuloidun hehkutuksen algoritmi pystyy tuottamaan lähes optimaalisen ajojärjestyksen, jossa kohteet tulisi

ajaa läpi, jotta reitin kokonaispituus olisi mahdollisimman lyhyt. Esimerkki staattisen reittioptimoinnin avulla tuotetusta tyhjennysreitistä löytyy kuvasta 10. Kuvassa punaisella merkityssä kohteessa sijaitsee L&T Ympäristöpalveluiden toimipiste Lappeenrannan kaupungissa.



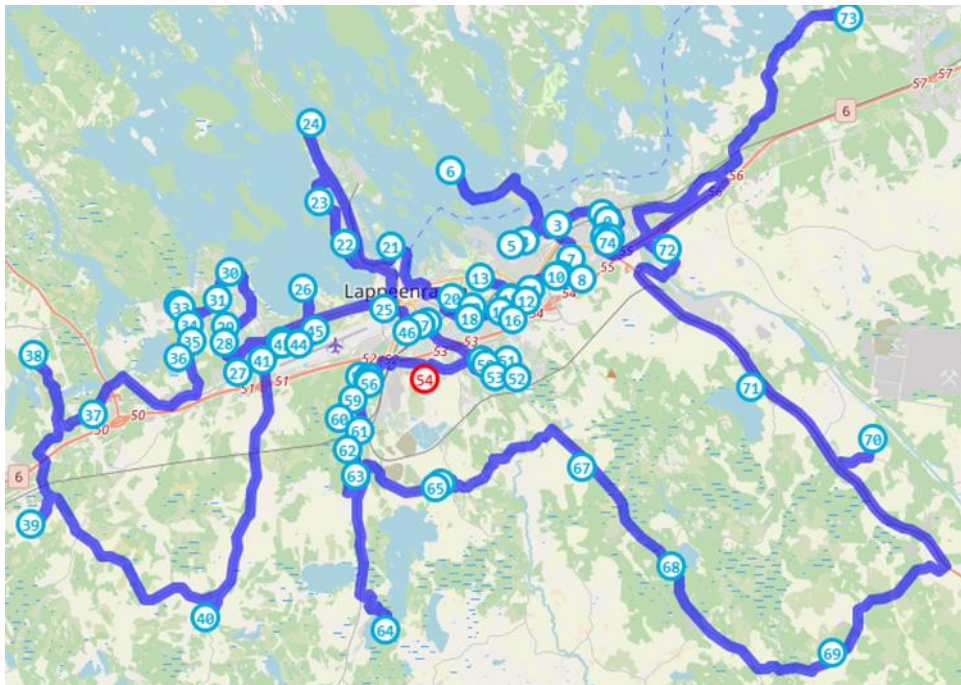
Kuva 10. Staattisen reittioptimoinnin tuottama jäteastioiden tyhjennysreitti

Kuten aikaisemmin todettiin, jäteastian täyttymisnopeus on riippuvainen useasta satunnaisuuttajasta ja käytännössä jokaisen kohteen jäteastia täyttyy eri nopeudella. Dynaamisessa optimointimallin kulmakivenä oli jäteastioihin asetettu sensori, jonka tarkoituksena on hälyttää, kun astia on täyttynyt esimerkiksi 80 %. Reaalimaailmassa tyhjennyksen tarvitsevia astioita ilmestyy siis satunnaisesti ympäri kaupunkia. Simulaatiossa dynaamista tilannetta voidaan mallintaa siten, että kohteet, joiden välille lyhyin reitti muodostetaan, valitaan satunnaisesti kaikista asiakaskohteista. Simulaatiossa tämä tarkoittaa, että reittioptimointia varten valitaan satunnaisesti 75 asiakaskohdetta, jossa jäteastia on hälyttänyt astian olevan täynnä kaikista 500 kohteesta.

Simuloitu dynaaminen skenaario perustuu oletukseen siitä, että asiakkaille on annettu palvelulupaus tyhjennyksen suorittamisesta 24 tunnin sisällä, kun astia on täyttynyt. Palvelulupauksen vuoksi dynaamisessa mallissa kohteiden klusterointi pienempiin alueisiin ei käytännössä ole mahdollista. Dynaamisen mallin klusterointi vaatisi, että tarpeeksi monta jäteastiaa samalta alueelta hälyttäisi tyhjennyksen tarpeesta saman päivän sisällä. Tällaisen tilanteen

todennäköisyys olisi kohtalaisen pieni. Tilanteessa, jossa asiakkaiden määrä on todella suuri tai palvelulupaus tarpeeksi pitkä, on dynaamisessa reitioptimoinnissa käytännössä mahdollista klusteroida asiakkaat ennen reitittämistä.

Simulaation avulla tuotetuista tyhjennysreiteistä voidaan huomata, että dynaamisessa skenaariossa satunnaisotanta kaikista asiakaskohteista johtaa siihen, että kohteet ovat lähtökohtaisesti kauempana toisistaan, esimerkiksi kuva 11. Lappeenrannan tapauksessa dynaamisella tyhjennysreitillä saattaa olla asiakaskohteita sekä Lauritsalasta, Myllymäestä, Ruoholammesta, että Sammonlahdesta. Punaisella merkityssä kohteessa sijaitsee L&T Ympäristöpalveluiden toimipiste Lappeenrannan kaupungissa.



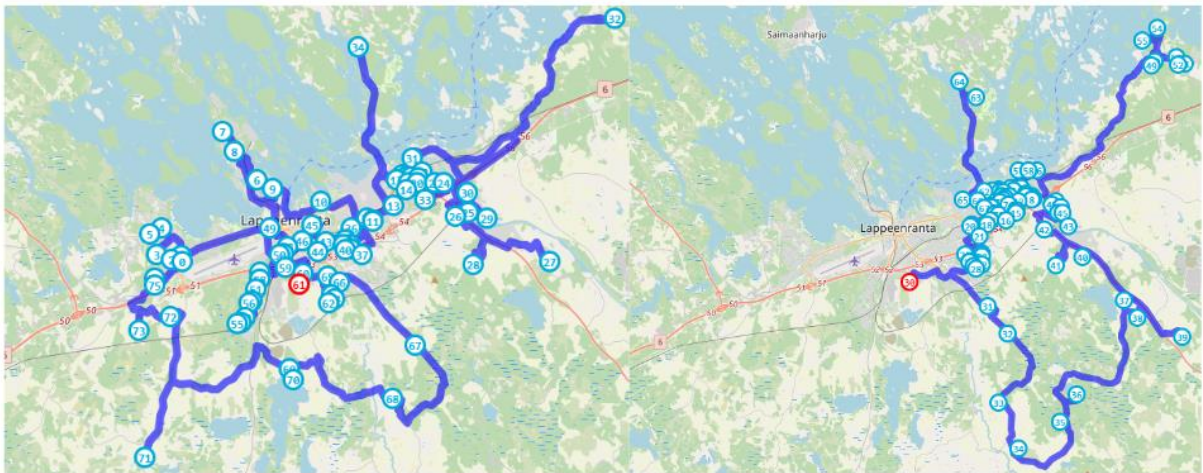
Kuva 11. Dynaamisen reitioptimoinnin tuottama jäteastioiden tyhjennysreitti

Simulaation dynaamisessa optimoinnissa hyödynnettiin säännöllisen uudelleenoptimoinnin periaatteita. Jokainen uusi reitti vastaa tietyn työpäivän aikana ajettavaa reittiä. Optimoinnin sykli on 24 tuntia, joka vastaa simuloidussa tilanteessa asiakkaalle annettua palvelulupausa. Lyhyimmän reitin etsimiseen dynaamisessa skenaariossa käytetään simuloitua hehkutusta, joka tuottaa lähes optimaalisen ajojärjestyksen asiakaskohteiden läpikäymiseen. Vaikka dynaaminen skenaario ei tässä tutkimuksessa vastaakaan täysin reaaliaikaista reititysjärjestelmää, antaa se viitteitä siitä, millainen vaikutus palvelun tuottamiselle olisi dynaamisessa mallissa verrattuna perinteiseen jätehuollon reitittämiseen.

4.4 Simulaation tulokset ja vertailu

Simulaatiossa reittioptimointia suoritettiin yhteensä 1500 kertaa, 750 dynaamisista, sekä 750 staattista jätehuollon reittiä. Optimointi suoritettiin niin, että kaikista osoitteista, eli 19000 osoitetiedosta valittiin 500 kohdetta, jotka kuuluvat jätehuollon palvelun pariin. Staattisessa menetelmässä 500 kohteesta muodostettiin 3 klusteria perustuen kohteiden sijaintiin. Jokaisessa klusterissa muodostettiin 10 tyhjennysreittiä eli yhteensä 30 reittiä per simulaatio. Dynaamisessa skenaariossa kohteiden klusteroiminen jätettiin välistä ja 500 kohteesta muodostettiin 30 reittiä. Tätä menetelmää toistettiin yhteensä 25 kertaa hakemalla aina uudet 500 kohdetta 19000 kohteen kokonaismäärästä.

Simulaation tuloksien avulla laskettiin keskimääräinen reitin pituus, sekä nopeus dynaamisessa, sekä staattisessa skenaariossa hyödyntäen simulaatiossa tuotettua tietoa reittien pituuksista ja kestoista. Vertailu dynaamisen ja staattisen mallin välillä aloitettiin tarkastelemalla silmämääräisesti simulaatiossa tuotettuja reittikarttoja. Tarkastelussa huomataan selkeä reittien pituuskien eroavaisuus dynaamisen ja staattisen jätehuollon reittioptimoinnissa. Yhden simulaatiokerran tulos löytyy kuvasta 12, jossa dynaamisen optimoinnin tuottama reitti on vasemmalla ja oikealla staattisen optimoinnin tuottama tyhjennysreitti.



Kuva 12. Dynaaminen ja staattinen jätehuollon tyhjennysreitti

Lähtökohtaisesti dynaamisen optimoinnin periaatteiden mukaisesti optimoidut reitit ovat pidempiä verrattuna perinteisen jätehuollon reitittämiseen. Tämä selittyy sillä, että dynaamisessa mallissa asiakkaiden tyhjennyspyynnöt saapuvat suuremmalta alueelta. Palvelulupauksen takia palveluntarjoajalla ei ole mahdollista odottaa dynaamisessa mallissa, että reittipisteitä olisi

enemmän ennen tyhjennyksien suorittamista. Jos dynaamisessa mallissa tyhjennuspyyntöjä tulisi enemmän, olisi meidän mahdollista luoda useampi reitti ja yhden reitin pituus todennäköisesti lyhentyisi. Silmämääräisesti tehty havainto vahventuu tarkastellessa myös taulukosta 2 löytyvää dataa dynaamisessa ja staattisessa optimoinnissa. Arvot taulukossa ovat keskiarvoja, jotka ovat laskettu yksittäisten reittien tuottamista tuloksista.

Taulukko 2. Simulaation tulokset

Keskiarvo	Pituus [km]	Nopeus [km/h]	Ajoaika [h]	Kesto (tyhjennys + ajo) [h]	Tyhjennystä tunnissa [kpl/h]
Staattinen	113.00	31.02	3.64	4.89	16
Dynaaminen	177.42	33.26	5.34	6.59	11

Taulukossa 2. ajoneuvon keskimääräinen nopeus on laskettu käyttämällä tietoa reitin ajoajasta ja reitin pituudesta. Kokonaiskesto palvelun suorittamiselle on laskettu lisäämällä jokaiseen reitillä olevaan pysähdykseen vakioitu tyhjennysaika 60 sekuntia, jonka tarkoituksena on kuvata jäteastian tyhjennyksessä kestävää aikaa. Tuloksista voidaan huomata, että staattisen optimoinnin avulla tuotetut tyhjennysreitit ovat pituudeltaan 64 % ja kestoltaan 74 % lyhyempiä verrattuna dynaamiseen optimointiin. Reittien pituuksien, keston ja keskinopeuden avulla meidän on mahdollista laskea tyhjennyksien tehokkuudelle mittari jakamalla reitillä olevien tyhjennyksien määrä 75 kappaletta reitin kestolla kaavan (1) mukaisesti. Tuloksista huomataan, että tyhjennysreittien tehokkuus on keskimäärin huonompi dynaamisessa optimoinnissa verrattuna staattiseen reittioptimointiin.

$$\text{Tyhjennystä tunnissa } \left(\frac{\text{kpl}}{\text{h}}\right) = \frac{\text{Tyhjennyksien määrä (kpl)}}{\text{Käytetyt tunnit (h)}} \quad (1)$$

Mielenkiintoisena huomiona tuloksissa on se, että dynaamisessa jätehuoltomallissa jäteauton keskinopeus on suurempi verrattuna staattiseen reitittämiseen. Dynaamisessa mallissa jäteastioiden välisten etäisyyksien kasvaessa jäteauton on mahdollista ajaa katuja pitkin, jossa nopeusrajoitukset ovat korkeammat, mitä pienemmillä kaduilla asumiskeskittymien sisällä. Muutaman arvon korkeammalla reitin keskinopeudella dynaaminen jätehuollonoptimointi ei kuitenkaan yletä samalle tehokkuuden tasolle kuin staattinen jätehuollon optimointi.

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Edistykselliset harppaukset informaatio- ja viestintäteknologiassa mahdollistavat datan keräämisen ja ajoneuvojen reitittämisen reaaliajassa. Nopea teknologian kehittyminen on herättänyt mielenkiintoa sekä jätehuollon asiakkaisissa, että palveluntarjoajissa. Etenkin tarpeeseen perustuvat jätetyhjennykset, jossa sensori tarkkailisi jäteastian tilaa ja lähettäisi tyhjennyspyynnön palveluntarjoajalle, kun astia on täynnä, nähdään realistisena kehityskohtena tulevaisuuden jätehuoltoon. Muutettaessa perinteisen jätehuoltomallin reaaliaikaista dataa ja dynaamisen optimoinnin hyödyntävää kokonaisuutta tulisi dynaamisen optimoinnin vaikutuksia nykyiseen liiketoimintamalliin tutkia perusteellisesti.

Tämän tutkielman tarkoituksena oli selvittää millainen vaikutus jätehuollon logistiikan tehokkuuteen olisi, jos palveluntarjoaja siirtyy perinteisestä, staattisesta reittioptimoinnista dynaamiseen jätehuollon optimointiin. Aihetta tutkittiin yhden pääkysymyksen ja kahden alatutkimuskysymyksen avulla. Työn alatutkimuskysymykset ja vastaukset voidaan asettaa seuraavanlaisesti:

”Mitä jätehuollon reitityksen optimointiongelma tarkoittaa?”

Vastausta kysymykseen rakennetaan tutustumalla jätehuollon optimointiongelmaan, havainnollistamalla ongelman kompleksisuutta, sekä jätehuollon optimointiongelmalle tyypillisiä tavoitteita ja rajoituksia. Työssä todetaan, että jätehuollon optimointiongelmassa on tarkoituksena löytää se tyhjennysreitinvariaatio, joka tuottaa parhaimman ratkaisun huomioituihin rajoituksiin ja tavoitteeseen nähden.

”Mitä staattinen ja dynaaminen jätehuollon reittioptimointi tarkoittavat ja minkälaisilla metodeilla optimointia voidaan suorittaa?”

Työssä tunnistettiin staattisen optimoinnin prosessin kolme eri vaihetta, pyyntöjen vastaanottamisen, optimoimisen ja palvelun tuottaminen. Staattisessa mallissa palvelun tuottaminen oli myös hyvin ennalta määritettyä, eikä optimointiprosessi kykene huomioimaan muutoksia, mikäli tyhjennysreittiä oli lähdetty suorittamaan. Suurimpana haasteellisuutena perinteisessä jätehuollon optimoinnissa oli se, ettei palveluntarjoajalla ollut varmaa tietoa jäteastian sisällöstä ennen kuin palvelu oli suoritettu ja jäteastia tyhjennetty. Tyhjennykset perustuivat asiakkaan ja palveluntarjoajan näkemykseen siitä, kuinka usein asiakkaan jäteastia tulisi tyhjentää.

Dynaaminen jätehuollon optimoinnin vahvuutena nähtiin se, että malli kykenee vastaamaan muuttuvaan asiakkaan tarpeeseen huomioimalla jäteastian täyttöasteen suunniteltaessa jäteauton tyhjennysreittiä. Jäteastia tekee automaattisesti tyhjennyspyynnön palveluntarjoajalle aina kun jäteastian täyttöaste ylittää ennalta määritetyn rajan. Dynaamisessa mallissa optimointiprosessi kykenee huomioimaan muutokset reaaliajassa tyhjennysreittien muodostamisessa. Tutkimuksessa kävi myös ilmi, että asiakkaan näkökulmasta dynaaminen optimointi nähtiin mahdollisena parannuksena palveluun, etenkin kun tarpeettomat tyhjennyskäynnit jätettäisiin välistä.

Staattisen ja dynaamisen optimoinnin prosessien määrittämisen lisäksi työssä perehdyttiin syvällisemmin K-Means klusterointiin, simuloitun jäädytyksen algoritmiin, sekä lineaariseen sekalukuoptimointiin, joilla jätehuollon optimointia on suoritettu aiemmissä tutkimuksissa.

Alatutkimuskysymyksien avulla, saimme selville vastauksen työn päätutkimuskysymykseen, mikä voidaan asettaa seuraavanlaisesti:

”Miten siirtyminen staattisesta jätehuollon reittioptimoinnista dynaamiseen reittioptimointiin vaikuttaisi jätehuollon logistiikan tehokkuuteen?”

Työssä saatiin selville, että staattisessa optimoinnissa pidemmällä suunnittelulla on mahdollista vähentää merkittävästi toiminnan kustannuksia ja parantaa reitin tehokkuutta. Dynaamisessa optimoinnissa osa suunnitteluun käytetystä ajasta käytetään muuttuvan asiakastarpeen huomioimiseen, mikä vaikuttaa logistiikan tehokkuuteen. Jos dynaaminen jätehuollon palvelu otettaisiin käyttöön, tulisi optimoinnissa löytää tasapaino järjestelmän reaktiivisuuden, sekä reitin tehokkuuden välillä.

Simulaatiossa tuotetut numeraaliset arvot logistiikan tehokkuudelle dynaamisessa ja staattisessa jätehuollon palvelussa on yhtenevä aiemman havainnon kanssa. Staattisessa jätehuollon optimoinnissa pidemmällä reittisuunnittelulla on mahdollista tuottaa tehokkaampia tyhjennysreittejä verrattuna dynaamiseen jätehuollon optimointiin. Dynaamisessa mallissa tyhjennyspyyntöjä saapuu satunnaisesti eri puolilta kaupunkia, joka kasvattaa tyhjennysreitin pituutta. Jos jäteastioita voidaan tyhjentää ottamatta kantaa siihen, kuinka paljon astiassa on jätettä, on optimoinnin avulla mahdollista tuottaa tehokkaampia reittejä. Mielenkiintoisena jatkotutkimuksen aiheena olisi tutkia dynaamista ja staattista jätehuollon optimointia kustannustehokaimman reitin näkökulmasta. Etenkin jos asiakkaalta noudetusta jätteestä laskutettaisiin kiinteä tyhjennys, sekä astian tyhjennyksen aikana määritetty jätemaksu astian todellisen punnitun painon mukaisesti.

Lähteet

- Ali, M., Marvuglia, A., Geng, Y., Chaudhry, N. & Khokhar, S. (2018). Emergy based carbon footprinting of household solid waste management scenarios in Pakistan. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 131, s. 283-296.
- Anghinolfi, D., Paolucci, M., Robba, M. & Taramasso, A.C. (2013) A dynamic optimization model for solid waste recycling. *Waste Management*. Vol. 33 (2), s. 287-296.
- Asimakopoulos, G., Christodoulou, S., Gizas, A., Triantafillou, V., Tzimas, G., Viennas, E., Gialelis, J., Karadimas, D. & Papalambrou, A. (2015). Towards a dynamic waste collection management system using real-time and forecasted data. *Proceedings of the 16th international conference on engineering applications of neural networks (INNS)*. s. 1-9.
- Aspholm, E. 2022, Dynamic waste collection simulation. [Tietokoneohjelma]. [Viitattu 08.12.2022]. Saatavissa: https://github.com/EemilAsp/Dynamic_waste_collection
- Bhatti, M.A. (2000) *Practical Optimization Methods: With Mathematica® Applications*, Springer Science & Business Media, 729 s.
- Bing, X., Bloemhof, J.M., Ramos, T.R.P., Barbosa-Povoa, A.P., Wong, C.Y. & van der Vorst, J.G. (2016) Research challenges in municipal solid waste logistics management. *Waste Management*. Vol. 48, s. 584-592.
- Carlos, M., Gallardo, A., Edo-Alcón, N. & Abaso, J.R. (2019) Influence of the municipal solid waste collection system on the time spent at a collection point: a case study. *Sustainability*. Vol. 11 (22), s. 6481-.
- Catania, V. & Ventura, D. (2014) An approach for monitoring and smart planning of urban solid waste management using smart-M3 platform. *Proceedings of 15th conference of open innovations association FRUCTIEEE*. s. 24-31.
- Delgado-Antequera, L., Caballero, R., Sánchez-Oro, J., Colmenar, J.M. & Martí, R. (2020) Iterated greedy with variable neighborhood search for a multiobjective waste collection problem. *Expert Systems with Applications*. Vol. 145, s. 113101-.

- Della Croce, F. (2014) Mixed Integer Linear Programming Models for Combinatorial Optimization Problems. *Concepts of Combinatorial Optimization*. s. 101-133.
- Edmonds, J. (2008) How to Think About Algorithms, Cambridge University Press, New York, 464 s.
- Faccio, M., Persona, A. & Zanin, G. (2011) Waste collection multi objective model with real time traceability data. *Waste Management*. Vol. 31 (12), s. 2391-2405.
- Fermani, M., Rossit, D.G. & Toncovich, A. (2020) A simulated annealing algorithm for solving a routing problem in the context of municipal solid waste collection. *International Conference of Production Research–Americas, Springer*. s. 63-76.
- Ghiani, G., Guerriero, F., Laporte, G. & Musmanno, R. (2003) Real-time vehicle routing: Solution concepts, algorithms and parallel computing strategies. *European Journal of Operational Research*. Vol. 151 (1), s. 1-11.
- Guichard, D., Koblitz, N. & Keisler, J. (2016) Calculus Early Transcendentals. 658 s.
- Gutierrez, J.M., Jensen, M., Henius, M. & Riaz, T. (2015) Smart waste collection system based on location intelligence. *Procedia Computer Science*. Vol. 61, s. 120-127.
- Hajjam, A., Créput, J. & Koukam, A. (2013) From the TSP to the dynamic VRP: an application of neural networks in population based metaheuristic. *Metaheuristics for dynamic optimization, Springer*. Vol. 433, s. 309-339.
- Hannan, M.A., Hossain Lipu, M.S., Akhtar, M., Begum, R.A., Al Mamun, M.A., Hussain, A., Mia, M.S. & Basri, H. (2020) Solid waste collection optimization objectives, constraints, modeling approaches, and their challenges toward achieving sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 277, s. 123557-.
- Ichoua, S., Gendreau, M. & Potvin, J. (2007) Planned route optimization for real-time vehicle routing. *Dynamic Fleet Management*. s. 1-18.
- Jeffares, A. (2009) K-means: A complete introduction. [Verkkoaineisto]. [viitattu 26.10.2022]. Saatavissa: <https://towardsdatascience.com/k-means-a-complete-introduction-1702af9cd8c>
- Johansson, O.M. (2006) The effect of dynamic scheduling and routing in a solid waste management system. *Waste Management*. Vol. 26 (8), s. 875-885.

Karabiber, F. (2022) Binary Variable. [Blogi]. [Viitattu 29.10.2022]. Saatavissa: <https://www.learnatasci.com/glossary/binary-variable/>

Karadimas, N.V., Papatzelou, K. & Loumos, V.G. (2007) Optimal solid waste collection routes identified by the ant colony system algorithm. *Waste Management & Research*. Vol. 25 (2), s. 139-147.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. & Van Woerden, F. (2018) What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. *World Bank Publications*. 295 s.

Kim, B., Kim, S. & Sahoo, S. (2006) Waste collection vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*. Vol. 33 (12), s. 3624–3642.

Kirjalainen, E. (2022) Suomalaisten rakennusten osoitteet, postinumerot ja WGS84-koordinaatit. [Verkkoaineisto]. [viitattu: 16.11.2022]. saatavissa: <https://www.avoindata.fi/data/fi/data-set/postcodes>

Larsen, A., Madsen, O.B. & Solomon, M.M. (2008) Recent developments in dynamic vehicle routing systems. *The vehicle routing problem: Latest advances and new challenges*. s. 199-218.

Lassila & Tikanoja (2022a) L&T:n Strategiatarina. [Verkkoaineisto]. [viitattu 22.10.2022]. Saatavissa: <https://www.lt.fi/fi/yrittys/strategiamme>

Lassila & Tikanoja (2022b) L&T sijoituskohteena. [Verkkoaineisto]. [viitattu 12.10.2022]. Saatavissa: <https://www.lt.fi/fi/sijoittajat/lt-sijoituskohteena>

Lassila & Tikanoja (2022c) L&T sijoituskohteena. [Verkkoaineisto]. [viitattu 08.11.2022]. Saatavissa: <https://www.lt.fi/fi/yrittys/liiketoiminta-alueemme/ymparistopalvelut>

Law, A.M., Kelton, W.D. & Kelton, W.D. (2007) Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill, New York. 800 s.

Mamun, M. A. A., Hannan, M. A., Hussain, A., & Basri, H. (2014) Real time bin status monitoring for solid waste collection route optimization. *5th Brunei International Conference on Engineering and Technology*. 2014 Stevenage, UK: IET. s. 1-6.

Markov, I., Varone, S. & Bierlaire, M. (2014) Vehicle routing for a complex waste collection problem. *14th Swiss Transport Research Conference*. s. 1-27.

- Melakessou, F., Kugener, P., Alnaffakh, N., Faye, S. & Khadraoui, D. (2020) Heterogeneous sensing data analysis for commercial waste collection. *Sensors*. Vol. 20 (4), s. 978-.
- Mes, M. (2012) Using simulation to assess the opportunities of dynamic waste collection. *Use cases of discrete event simulation*, Springer. s. 277-307.
- Nguyen, T.T., Yang, S. & Branke, J. (2012) Evolutionary dynamic optimization: A survey of the state of the art. *Swarm and Evolutionary Computation*. Vol. 6, s. 1-24.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H. & Bräysy, O. (2006) Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications*. Vol. 30 (2), s. 223-232.
- Nurmiainen, T. (2021) Esimerkkejä stokastisista prosesseista ja niiden hyödyntäminen lukio-opetuksessa. Diplomityö. Helsingin yliopisto, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta. Helsinki. s. 1-38.
- Paschos, V.T. (2016) An overview on polynomial approximation of NP-hard problems. *Yugoslav Journal of Operations Research*. Vol. 19 (1), s. 1-38.
- Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C. & Medaglia, A.L. (2013) A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*. Vol. 225 (1), s. 1-11.
- Ramos, T.R.P., de Morais, C.S. & Barbosa-Póvoa, A.P. (2018) The smart waste collection routing problem: Alternative operational management approaches. *Expert Systems with Applications*. Vol. 103, s. 146-158.
- Rathore, P. & Sarmah, S.P. (2019) Modeling transfer station locations considering source separation of solid waste in urban centers: A case study of Bilaspur city, India. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 211, s. 44-60.
- Salmenperä, H., Dahlbo, H., Turunen, S., Ukkonen, A., Hämäläinen, T., Nummela, E., Ojala, S., Haavisto, T., Laaksonen, J. & Vanhatalo, M. (2019) Punnitukseen perustuva kotitalouksien jätemaksujärjestelmä: Toteuttajan tietopaketti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 08.12.2022]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161293>.
- Stanford University. (2022) Frequently Asked Questions: Benefits of Recycling. [Verkkosivu] [Viitattu 22.10.2022]. Saatavissa: <https://lbre.stanford.edu/pssistanford-recycling/frequently-asked-questions/frequently-asked-questions-benefits-recycling>

Steinbach, M., Karypis, G. & Kumar, V. (2000) A comparison of document clustering techniques. s. 1-20.

Tavares, G., Zsigraiova, Z., Semiao, V. & Carvalho, M.G. (2009) Optimisation of MSW collection routes for minimum fuel consumption using 3D GIS modelling. *Waste management, Elmsford*. Vol. 29 (3), s. 1176-1185.

The World Bank (2022) Open Data Essentials. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.11.2022]. saatavissa: <http://opendatatoolkit.worldbank.org/en/essentials.html>

Toth, P. & Vigo, D. (2002) The vehicle routing problem. *SIAM*. 386 s.

Wang, C. & Lu, J. (2009) A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems. *Expert Systems with Applications*. Vol. 36 (2), s. 2921-2936.

Wu, H., Tao, F. & Yang, B. (2020) Optimization of Vehicle Routing for Waste Collection and Transportation. *International journal of environmental research and public health*. Vol. 17 (14), s. 4963-.

Zsigraiova, Z., Semiao, V. & Beijoco, F. (2013) Operation costs and pollutant emissions reduction by definition of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal. *Waste management Elmsford*. Vol. 33 (4), s. 793-806.