

# Käytetyn maatalousmuovin keräysvaihtoehtojen kuljetuskustannustehokkuuden arviointi – esimerkialueena Pohjois-Karjala

JONI TEPPONEN & MARKKU TYKKYLÄINEN & TIMO KUMPULA  
*Historia- ja maantieteiden laitos, Itä-Suomen yliopisto*



*Tepponen, Joni & Markku Tykkyläinen & Timo Kumpula (2020). Käytetyn maatalousmuovin keräysvaihtoehtojen kuljetuskustannustehokkuuden arviointi – esimerkialueena Pohjois-Karjala (Assessment of the cost-efficiency of the collection alternatives of used agricultural plastic – North Karelia as an example). Terra 132: 2, 51–67. <https://doi.org/10.30677/terra.89509>*



This study develops and applies a logistic route-optimizing model of the collection of bale wrap waste from farms in North Karelia, Finland. To assess cost-efficiency the model analyzed three collection scenarios for one- and three-year collection intervals by full trailer combination truck and annually by lorry. According to our study the cheapest per tonne cost to collect bale wrap waste is to carry out a collection every third year by full trailer combination truck. In the three-year option the per tonne cost is 54,5 percent of the cost collecting waste by lorry annually and 42,2 percent of the per tonne cost collecting waste by full trailer combination truck annually. To maximize the loading grade of a vehicle only, the collection of waste can be made most efficiently by lorries. The study demonstrates the importance of purposefully selecting the vehicle type and the collection intervals in collecting bulk plastic waste.

Key words: waste logistics, transport cost, bale wrap film, plastic waste collection, scenario, vehicle routing problem, cost-efficient logistics

*Joni Tepponen*, Department of Geographical and Historical Studies, University of Eastern Finland, P. O. Box 111, FI-80101 Joensuu, Finland. E-mail: <[jonte@uef.fi](mailto:jonte@uef.fi)>  
*Markku Tykkyläinen*, Department of Geographical and Historical Studies, University of Eastern Finland, P. O. Box 111, FI-80101 Joensuu, Finland. E-mail: <[markku.tykkylainen@uef.fi](mailto:markku.tykkylainen@uef.fi)>  
*Timo Kumpula*, Department of Geographical and Historical Studies, University of Eastern Finland, P. O. Box 111, FI-80101 Joensuu, Finland. E-mail: <[timo.kumpula@uef.fi](mailto:timo.kumpula@uef.fi)>

Maatalousmuoveja, kuten muitakin muovituotteita, on mahdollista hyödyntää uusiokäytössä. Materiaalien ja tuotteiden kierrättämisen maksimoiminen sekä tuotannosta ja kulutuksesta syntyvien jätemäärien minimoiminen ovat merkittävä osa kiertotaloutta, jossa erilaisten kierrätystä ja uudelleenkäyttöä tehostavien toimenpiteiden käyttöön ottaminen ovat tärkeitä keinoja resurssitehokkuuden lisäämiseksi (Ympäristöhallinto 2013). Maatiloilla käytettyjen ja hyödyntämättömien maatalousmuovien resurssitehokkuutta voidaan olennaisesti parantaa jätemuovin keräyksellä hyötykäyttöön.

Suomessa syntyy vuosittain noin 21 miljoonaa tonnia maatalouden jätettä, josta muovin osuus on noin 12 000 tonnia (Friari ym. 2005: 37). Maatiloilla syntyvä muovijättemäärä on huomattava. Esimerkiksi vuonna 2017 Suomessa kerättiin muovijätteitä

yhteensä noin 35 000 tonnia (Tilastokeskus 2019), joten maatalousmuovit vastasivat määrällisesti noin kolmannesta kaikesta kerätystä muovijätteestä. Merkittävin yksittäinen maatalouden muovijäte-erä ovat niitetyt, murskatun ja esikuivatun nurmirehun paaluksessa käytettävät kiristekalvomuovit, joiden osuus on Friarin ym. (2005: 38) mukaan noin puolet maatalouden muovijätteistä, arviolta 5 000–6 000 tonnia vuodessa. Paalien kiristekalvomuovia valmistetaan lineaarisesta pientiheyspolyeteeni PE-LLD:stä, jota käytetään yhteen paaliin noin puolitoista kiloa.

Maatalousmuovien keräys perustuu tällä hetkellä maksullisiin noutopalveluihin. Jätteen poisvienti on vapaaehtoista. Kun vastuu muovijätteen käsittelystä on maatalousyrittäjillä eikä kierrätykselle ole selkeitä ohjeita, maatalousmuoveille on kehitetty maatiloilla vaihtelevasti erilaisia käyttökohteita ja

hävitystapoja (Rantala & Viljakainen 2010; Erälinna & Järvenpää 2019). Paalien kiristekalvomuovi on maatalousmuoveista kierrätyskelvoinen (Erälinna & Järvenpää 2019: 25), sillä sitä on mahdollista sekä uusiokäyttää että polttaa energiaksi. Kierrätyksen haasteena ovat kuitenkin keräyksen kustannukset, käytetyn paalimuovin likaisuus, kierrätykseen liittyvän tiedon ja tiedotuksen puute sekä neutseellisen paalimuovin edullisuus kierrätyspohjaiseen raaka-aineeseen verrattuna (Erälinna & Järvenpää 2019: 23–24). Paalimuoveja on mahdollista hyödyntää energiana jätteenpolto- tai rinnakkaispolttolaitoksissa, joilla on jätteenpoltoasetuksen (151/2013) mukainen ympäristölupa.

Jätehuollon kustannuksista suuri osa muodostuu jätteen kuljetuksesta, joten säästöjä voidaan saavuttaa jätteenkeräyksen reittejä optimoimalla (Nuortio ym. 2006). Maatalousmuovien keräyksen kuljetuskustannuksia ei juuri ole tutkittu Suomessa, mutta maatalousmuovien keräystä on tehty kokeiluluontoisesti useiden hankkeiden yhteydessä eri puolilla maata. Suurimmaksi kierrätyksen haasteeksi ovat muodostuneet sekä maatalousyrittäjien että kuljetusyritysten näkökulmasta korkeat keräyskustannukset (Erälinna & Järvenpää 2019: 24). Siten keräyksen logistiikkaa kehittämällä ja kustannustehokkuutta lisäämällä on mahdollista parantaa keräyksen kannattavuutta.

Tässä artikkelissa tutkimme ja kehitämme maatalousmuovien jätelogistiikan optimointia Pohjois-Karjalassa. Tutkimuskysymyksiämme ovat, kuinka suuriksi keräyksen kuljetuskustannukset muodostuvat, kun muovit kerätään kaikilta lypsy- ja nautakarjatiloilta optimoimalla kuljetusreitit, ja miten keräyksen kustannustehokkuuteen voidaan vaikuttaa harventamalla keräysväliä tai muuttamalla keräyskaluston kuljetuskapasiteettia. Kustannustehokkuuden lisäämistä tutkitaan kolmen skenaarion avulla: paalimuovijäte noudetaan 1) rekalla kerran vuodessa (rekka 1v -skenaario), 2) rekalla joka kolmas vuosi (rekka 3v -skenaario) tai 3) kuorma-autolla kerran vuodessa (kuorma-autoskenario). Niissä testataan paalimuovin keräystiheyden ja keräyksessä käytettävän kuljetuskapasiteetin vaikutuksia keräyksen kustannuksiin. Oletamme tiestön laadun huomioon ottaen, että täysperävaunun kantavuus on 32,5 tonnia ja kuorma-auton kantavuus 10 tonnia. Laskemme paalimuoville keräyksen kuljetuskustannuksiin perustuvat kustannusarviot skenaarioittain. Kustannuslaskelmat ja reititys on tehty seutukunnittain Joensuun, Keski-Karjalan ja Pielisen Karjalan alueilla. Estimoidimme Pohjois-Karjalassa vuonna 2018 muodostuneen paalimuovin määrän maatiiloittain, mihin perustuen logistiikan optimointi suoritetaan.

## Logistiikka ja kuljetuskustannusten muodostuminen

Rossin (2018: 6) mukaan logistiikka voidaan määritellä materiaalivirtojen ohjaamiseksi raaka-aineiden alkulähteiltä loppuasiakkaalle. Jätehuollon logistiikan suunnittelu käsittää jätteenkeräyksen ja -kuljetuksen suunnittelun, eli sen, miten jätteet kerätään jätteen tuottajilta välivarastolle tai jätteenkäsittelypaikalle. Jätteen keräyksen ja kuljetuksen tutkimuksella ja suunnittelulla pyritään tehostamaan jätehuollon toimintaa ja hillitsemään jätehuollon kokonaiskustannuksia (Sahoo ym. 2005; Ghose ym. 2006; Nuortio ym. 2006).

Jätteiden keräys ja kuljetus ovat luonteeltaan kestäviä kuljetuksia. Maantiekuljetuksia voidaan tehdä monenlaisilla ajoneuvoilla riippuen kuljetettavasta materiaalista. Maatalousmuovien tapauksessa muovijätteiden noutoa maatiloilta on toteutettu yleensä täysperävaunurekoilla (Heikkinen 2018; Karvonen 2019). Kuljetuksia ja logistiikkaa suunniteltaessa yritykset pyrkivät hyödyntämään kalustoon sidotun pääoman mahdollisimman tehokkaasti.

Jätteen keräys on työvoimaintensiivisyytensä ja keräykseen tarvittavan kaluston vuoksi jätehuollon kalleimpia osa-alueita (Beliën ym. 2014), joten keräysreittien optimointi vaikuttaa merkittävästi keräyksen kokonaiskustannuksiin. Kuljetusyritysten merkittävimmät kustannustekijät ovat polttoainekustannukset, pääomakustannukset ja henkilöstökustannukset (Tapaninen 2018: 33). Yritykset voivat vaikuttaa tuottavuuteen pyrkimällä laskemaan tonnikohtaisia kuljetuskustannuksia; raskaampien kuorma-autojen ja ajoneuvoyhdistelmien tehokas käyttö alentaa kuljetusten yksikkökustannuksia (Liikennejärjestelmä.fi 2018). Kuljetusten oletetaan olevan sitä tuottavampia, mitä alhaisemmaksi kuljetuskustannukset jäävät suhteessa kerätyn materiaalin määrään. Indikaattorina tälle käytetään kuljetuskustannusten perusteella paalimuoville muodostuvaa keräyksen likimääräistä tonnihintaa eli kustannusestimaattia.

Kuljetusyrityksen kustannukset voidaan jakaa kuljetustyökustannuksiin, kuljetuskaluston kustannuksiin, kuljetusorganisaation kustannuksiin, tavarankäsittelykustannuksiin sekä väyläkustannuksiin (Valtonen 2015: 246–247). Tätä ryhmittelyä hyödynnetään tässä tutkimuksessa, mutta edellä mainituista kustannusluokista huomioidaan ainoastaan kuljetustyökustannukset sekä kuljetuskaluston kustannukset, sillä tutkimus kohdistuu paalimuovien kuljettamisesta syntyviin kustannuksiin. Kuljetustyökustannuksiin sisältyvät kuljettajien palkat ja välilliset palkkakustannukset (Valtonen 2015: 246). Kuljetuskaluston kustannukset on tässä tutkimuksessa jyvitetty kusakin kustannusmuuttujassa joko käytetyn ajan tai kuljetun matkan mukaan tai päiväkustannuksina.

## Jätelogistiikan optimointi paikkatietomenetelmillä

### Reititysongelman ratkaisu

Jätehuollon reitityksen optimoinnissa perusajatuksena on, että asiakkaat, joiden luona vierailaan, jaetaan useamman reitin tai ajoneuvon kesken siten, että reittien kokonaiskustannukset minimoituvat. Reiteillä voidaan tehdä tavaran toimituksia tai noutoja, ja periaatteena on, että kunkin asiakkaan luona käydään vain kerran yhdellä ajoneuvolla.

Sahoon ym. (2005) mukaan ajoneuvon reititysongelman ratkaisuun perustuvan jätehuollon reitinhallintajärjestelmän avulla on onnistuttu Yhdysvalloissa vähentämään keräysreittien määrää ja saamaan aikaan huomattavia säästöjä. Ghose ym. (2006) ovat puolestaan todenneet, että reittioptimointi on tärkeä tekijä jätehuoltoa koskevassa päätöksenteossa, sillä optimoinnin avulla on mahdollista suunnitella tarvittavan kaluston ja henkilöstön määrää sekä keräysten aikatauluja. Monissa jätehuollon tutkimuksissa (esim. Teixeira ym. 2004; Ghose ym. 2006; Nuortio ym. 2006; Arribas ym. 2010; Sulemana ym. 2018) on todettu reittioptimoinnin tuovan säästöjä jätteen keräyksen kustannuksiin ja jätehuollon kokonaiskustannuksiin.

Tutkimuksessamme jätehuollon kuljetuskustannukset minimoitiin *ArcGIS*-ohjelmiston *Network Analyst* -laajennusosan *Vehicle Routing Problem* -työkalun avulla kuten esimerkiksi Kinoben ym. (2015) ja Zsigraiovan ym. (2013) tutkimuksissa on tehty. Tutkimuksessamme jätteen keräyksen reitit optimoitiin keräykseen käytettävän ajan suhteen, minkä Zsigraiova ym. (2013) ovat todenneet tehokkaammaksi optimointitavaksi kuin optimoinnin yksinomaan kuljetun matkan pituuden suhteen. Tiestön rajoitteet, keräyskaluston kapasiteetit ja reitin ajallinen maksimipituus toimivat optimoinnin rajoitteena. Skenaarioissa testattiin kahdenlaisia keräyskaluston kapasiteetteja eli rekkakuljetuksia ja kuorma-autokuljetuksia, sillä keräyskaluston kapasiteetilla on vaikutusta keräyksen kustannustehokkuuteen (Kinobe ym. 2015).

Ajoneuvon reititysongelman (VRP) käytännön sovellukset sisältävät monia erilaisia reitittämistä koskevia rajoituksia, ja Laporten (2009: 408) mukaan erilaisten variaatioiden myötä VRP voidaan käsittää yhden ongelman sijasta useista rajoitteista ja säännöksistä koostuvana ongelmakokonaisuutena. Tämän tutkimuksen tutkimusongelma vastaakin tyypiltään lähinnä kapasiteettirajoitetun ajoneuvon reititysongelmaa CVRP:ia (*Capacitated Vehicle Routing Problem*). Siinä keskenään identtisille ajoneuvoille on määritelty kapasiteettirajoitukset, eli esimerkiksi maksimikuorma tai työtuntien enim-

mäismäärä, jotka otetaan huomioon reittejä muodostettaessa (Toth & Vigo 2003: 335). CVRP vastaa pitkälti klassista VRP:ia (Laporte 2009: 408). Sitä ovat hyödyntäneet jätehuollon tutkimuksissaan esimerkiksi Akhtar ym. (2017), Assaf ja Saleh (2017) sekä Hannan ym. (2018).

Ajoneuvon reititysongelma on yksinkertaisesta perusajatuksestaan huolimatta yksi vaikeimmista ja samalla yksi tärkeimmistä kombinatorisista optimointiongelmistä, joka voidaan ratkaista eksakteilla metodeilla vain sen helpoimmissa tapauksissa (Toth & Vigo 2003: 335). Sitä on tutkittu 1960-luvulta lähtien ja sen ratkaisuun on kehitetty useita menetelmiä, jotka voidaan jakaa pääpiirteissään eksakteihin, heuristisiin sekä metaheuristisiin menetelmiin (Laporte 2009). Tässä tutkimuksessa ajoneuvon reititysongelman ratkaisuun käytetty *ArcGIS*-ohjelmiston *Vehicle Routing Problem* -työkalu hyödyntää ongelman ratkaisussa lyhyimpien reittien muodostamiseen origin-destination -kustannusmatriisia ja Esrin kehittämää, tabu search -heuristiikkaan perustuvaa metaheuristiikkaa (Esri 2019). Metaheuristiset menetelmät on kehitetty vaikeiden optimointiongelmiensa ratkaisemiseksi. Ne pyrkivät löytämään lupaavimmat ratkaisut yhdistämällä useita menetelmiä ja uudelleen aiemmin muodostuneita ratkaisuja (Anbuudayasankar ym. 2014: 16). Metaheurististen menetelmien etuna on se, että niillä saavutetaan yleensä laadukkaampia ratkaisuja perinteisiin heuristisiin menetelmiin verrattuna (Anbuudayasankar ym. 2014: 16).

### Kustannustehokkuus – malli kustannusskenaarioille

Zsigraiovan ym. (2013) tutkimusta mukaillen tässä tutkimuksessa muodostettiin jätteenkeräyksen kustannuslaskentaa varten kustannusyhtälöt, jotka sisältävät sekä keräykseen käytettyyn aikaan että reiteillä kuljetun matkan pituuteen liittyvät kuljetuskustannukset. Erona Zsigraiovan ym. (2013) tutkimukseen mallissamme huomioidaan matka-ajan ja matkan pituuteen liittyvien kustannuksien lisäksi myös kuljetuskaluston kiinteät kustannukset. Kiinteät kustannukset korkojen ja poistojen osalta jyvitetään käytetyn matka-ajan perusteella kuljetuskustannuksiin reiteille. Käyttövoimavero, vakuutukset, tavaraliikennelupamaksu ja katsastusmaksut jyvitetään kuljetuskustannuksiin päivämaksuina. Tarkemmat tiedot kustannuksista on esitetty aineistoja ja tutkimuksen toteutusta käsittelevässä osiossa.

Paalimuovin keräyksestä yhdellä keräysreitillä  $k$  muodostuvat kuljetuskustannukset ( $rc$ ) voidaan esittää muodossa:

$$rc_k = c_{f,k} + c_{t,k} + c_{d,k}, \quad (1)$$

jossa  $c_{f,k}$  on kiinteät kustannukset (€),  $c_{t,k}$  on matka-aikaan (min) liittyvät kustannukset (€) ja  $c_{d,k}$  on matkan pituuteen (km) liittyvät kustannukset (€) reitillä  $k$ .

Yhden reitin  $k$  kiinteät ajopäiväkohtaiset kustannukset ( $c_j$ ) lasketaan yhtälöllä:

$$c_{f,k} = c_{kvv,k} + c_{v,k} + c_{l,k} + c_{k,k}, \quad (2)$$

jossa  $c_{kvv,k}$  on auton käyttövoimavero (€),  $c_{v,k}$  on auton ja perävaunun vakuutukset (€),  $c_{l,k}$  on jätteenkeräykseen liittyvä tavaraliikennelupamaksu (€) ja  $c_{k,k}$  on kaluston katsastusmaksut (€) reitillä  $k$ .

Yhden reitin  $k$  matka-aikaan (min) perustuvat kustannukset ( $c_t$ ) lasketaan yhtälöllä:

$$c_{t,k} = (c_{sp,k} + c_{vp,k} + c_{p,k} + c_{kk,k}) t_k, \quad (3)$$

jossa  $c_{sp,k}$  on kuljettajan suorat palkkakustannukset (€/min),  $c_{vp,i}$  on kuljettajan välilliset palkkakustannukset (€/min),  $c_{p,k}$  on auton poistokustannukset (€/min),  $c_{kk,k}$  on auton korkokustannukset (€/min) ja  $t_k$  on reittiin käytetty kokonaisaika (min) reitillä  $k$ .

Yhden reitin  $k$  matkan pituuteen (km) perustuvat kustannukset ( $c_d$ ) lasketaan yhtälöllä:

$$c_{d,k} = (c_{pa,k} + c_{va,k} + c_{m,k}) d_k, \quad (4)$$

jossa  $c_{pa,k}$  on polttoainekustannukset (€/km),  $c_{va,k}$  on voiteluainekustannukset (€/km),  $c_{m,k}$  on rengas-, huolto- ja korjauskustannukset (€/km) ja  $d_k$  on kuljettu matka (km) reitillä  $k$ .

Keräyksen kokonaiskustannukset ( $tc$ ) saavat näin muodon:

$$tc = \sum_k (c_{f,k} + c_{t,k} + c_{d,k}), \quad (5)$$

jossa  $c_{f,k}$  on kiinteät kustannukset (€),  $c_{t,k}$  on matka-aikaan perustuvat kustannukset (€) ja  $c_{d,k}$  on matkan pituuteen perustuvat kustannukset (€) reitillä  $k$ .

Kustannusestimaatti kerätylle paalimuoville saadaan puolestaan yhtälöllä:

$$ce = \frac{tc}{\sum_m q_{p,m}} = \frac{\sum_i (c_{f,k} + c_{t,k} + c_{d,k})}{\sum_m q_{p,m}}, \quad (6)$$

jossa  $ce$  on kerätyn paalimuovin keräyksen kustannusestimaatti (€/tn),  $tc$  on keräyksen kokonaiskuljetuskustannus (€) ja  $q_{p,m}$  on paalimuovin määrä kiloina (kg) maatilalla  $m$  (tn). Muuttujat ja niiden kertoimien arvot on koottu taulukkoon 3.

## Aineistot ja tutkimuksen toteutus

Vuonna 2018 noin neljä prosenttia koko Suomen maatalous- ja puutarhayrityksistä sijaitsi Pohjois-Karjalassa (Tilastotietokanta 2019a). Pohjois-Karjalan maatalouden päätuotantosuuntana on nautakarjavaltainen kotieläintalous. Se on Suomen viidenneksi suurin maidon ja naudanlihan tuottaja (Pohjois-Karjalan ELY-keskus 2013: 6).

Ruokaviraston maatalo-aineisto vuodelta 2018 kattaa kaikki Pohjois-Karjalan maatilat, joilla oli nautaeläimiä joulukuun alussa vuonna 2018. Aineisto sisältää yhteensä 615 maatalon koordinaattitiedot sekä tiedon karjan määrästä ja tilan päätuotantosuunnasta. Tiloista poimittiin tätä tutkimusta varten lypsykarjaloutta, lihanautojen kasvatusta sekä muuta nautakarjaloutta harjoittavat yksiköt, joita oli aineistossa yhteensä 593. Rajaus tehtiin siitä syystä, että ainoastaan lypsy- ja nautakarjaloilla paalimuovijätettä syntyy merkittävästi (Friari ym. 2005: 44). Aineistoa hyödynnetään maatilojen sijainnin määrittämisessä. Tietoja nautakarjan määrästä hyödynnetään estimoitaessa tiloilla syntyvää paalimuovijätteen määrää.

Pohjois-Karjalan tieverkosto on kattava. Vain yhden saarella sijaitsevan maatilan reititys oli tehtävä mahdollisimman lähelle maatilan sijaintia. Tutkimuksessa tehtävissä verkostoanalyysissä hyödynnetään Väyläviraston Digiroad-tieaineistoa, joka sisältää Suomen tie- ja katuverkon keskilinjageometrian sekä olennaisimmat ominaisuustiedot (Väylävirasto 2019). Aineisto sisältää myös teiden nopeusrajoitukset, joita on mahdollista käyttää sellaisenaan verkostoanalyysissä. Tässä tutkimuksessa kuljetusajoneuvon enimmäisnopeus on 80 kilometriä tunnissa, joka on kuorma-autojen ajoneuvo-kohtainen enimmäisnopeus. Mallinnuksessa on otettu huomioon, että ajonepeuksiin vaikuttavat erilaiset hidasteet ja ajo-olosuhteet, ja siksi tieluokille on määritetty toiminnalliset nopeudet (taulukko 1). Tutkimuksessa käytettävät nopeusparametrit mukailevat Esri Finlandin (2015) Suomen tie- ja katuverkkoaineistossa käytettyjä teiden toiminnalliseen luokkaan perustuvia nopeuksia. Tutkimuksen tieaineisto sisältää myös kaksi lossiyhteyttä, joiden nopeudeksi määritettiin kymmenen kilometriä tunnissa. Mukana olevat lossiyhteydet ovat myös painorajoitettuja, sillä ne pystyvät kuljettamaan kuormaa kerrallaan korkeintaan 60 tonnia (FinFerries 2017a, 2017b). Näiden nopeusmääritysten lisäksi tieverkostossa on huomioitu ajoneuvo-kohtaiset rajoitukset, kiinteät esterekennelmat sekä kuorma-auton paino- ja korkeusrajoitukset (taulukko 2). Lisäksi tieaineistosta poistettiin kuljetuksiin toiminnalliselta luokal-

taan sopimattomat tiet, joita tässä tapauksessa ovat ajopolut ja kevyenliikenteenväylät. Liikenneolosuhteiden odotetaan olevan aina samanlaisia, jotta reitit ovat keskenään vertailukelpoiset. Pohjois-Karjalassa ei juuri ole ruuhkia, jotka vaikuttavat merkittävästi ajoaikoihin.

Taulukko 1. Tieaineistossa käytetyt nopeusrajoitukset tien toiminnallisen luokan perusteella.

Table 1. Speed limits used in road data based on the functional class of the road.

| <b>Tieluokka</b><br><i>Road class</i> | <b>Taajamassa</b><br><i>In population centre</i>                       | <b>Taajaman ulkopuolella</b><br><i>Outside of population centre</i> | <b>Nopeus km/h</b><br><i>Velocity km/h</i> |
|---------------------------------------|--|---|--|
| 1                                     | Seudullinen pääkatu<br><i>Regional main road</i>                       | Valtatie<br><i>Highway</i>  | 76   |
| 2                                     | Seudullinen pääkatu<br><i>Regional main road</i>                       | Kantatie<br><i>Main road</i>  | 76   |
| 3                                     | Seudullinen / Alueellinen pääkatu<br><i>Regional / areal main road</i> | Seututie<br><i>Regional road</i>                                    | 65   |
| 4                                     | Kokoojakatu<br><i>Collector road</i>                                   | Yhdystie<br><i>Connecting road</i>                                  | 48   |
| 5                                     | Liityntäkatu<br><i>Access road</i>                                     | Tärkeä yksityistie<br><i>Essential private road</i>                 | 40   |
| 6                                     |  | Muu yksityistie<br><i>Other private road</i>                        | 30   |

Taulukko 2. Digiroad-tieaineiston Pohjois-Karjalassa sisältämät esteet, jotka on huomioitu tutkimuksen analyyseissä.

Table 2. The restrictions in North Karelia in the Digiroad data that have been considered in the analysis.

| <b>Este</b><br><i>Obstacle</i>  | <b>Kuvaus</b><br><i>Description</i>  | <b>Lukumäärä</b><br><i>Number</i> |
|---|--|-----------------------------------|
| Kiinteät esteet<br><i>Physical obstacles</i>  | Fyysinen este, joka estää tieosuuden kautta kulkemisen.<br><i>Physical barrier, that blocks the passage of a road.</i>   | 2624                              |
| Kielletty ajoneuvo<br><i>Forbidden passage and vehicle</i>  | Tiet, joilla läpiajo kielletty sekä tiet, joilla kiellettyjä ajoneuvoja ovat moottoriajoneuvot, ajoneuvot, kuorma-autot ja ajoneuvoyhdistelmät.<br><i>Roads forbidden to pass and roads for which motor vehicles, vehicles, lorries and vehicle combinations are prohibited.</i> | 435                               |
| Suurin sallittu korkeus<br><i>Maximum permitted height</i>  | Tiet, joilla ajoneuvon suurin sallittu korkeus on pienempi kuin 4,4 metriä.<br><i>Roads where the maximum permissible height of the vehicle is less than 4.4 meters.</i>   | 24                                |
| Suurin sallittu ajoneuvon massa<br><i>Maximum allowed mass of the vehicle</i>                         | Tiet, joilla ajoneuvon suurin sallittu massa on 25 tonnia tai vähemmän.<br><i>Roads with a maximum authorized vehicle mass of 25 tonnes or less.</i>   | 20                                |
| Suurin sallittu yhdistelmäajoneuvon massa<br><i>Maximum permitted mass of the combination vehicle</i> | Tiet, joilla yhdistelmän suurin sallittu massa on 40 tonnia tai vähemmän (Ei huomioida kuorma-autoskenarioissa).<br><i>Roads with a maximum permissible mass of the combination is 40 tonnes or less (Not considered in the lorry scenario).</i>                                 | 2                                 |

Kuljetuskustannukset on mallissa luokiteltu kuljetustyökustannuksiin ja kuljetuskaluston kustannuksiin. Kuljetustyökustannuksiin kuuluvat palkkakustannukset on laskettu kuorma-autoalan työehtosopimuksen (AKT 2019) perusteella. Kustannuslaskemissa käytetään keskiarvoa eri kokemusvuosien palkoista. Kuljetustyökustannuksiin kuuluvat välilliset palkkakustannukset on laskettu suorien palkkakustannusten perusteella (Valtonen 2015). Kuljetuskaluston poistot ja korkokulut sekä polttoainekustannukset perus-

tuvat Liikenneviraston julkaisemiin tie- ja rautatieliikenteen hankearvioinnin yksikköarvoihin (Liikennevirasto 2015). Voiteluainekustannukset on laskettu polttoainekustannusten perusteella (Valtonen 2015). Kuljetuskaluston päiväkohtaisesti jyvitettyt kustannukset perustuvat vakuutusyhtiöiltä (Heikkilä 2019; Kauppinen 2019; Tamsi 2019), katsastusyrytyksiltä (Lahti 2019; Nykänen 2019) ja liikenne- ja viestintävirasto Traficomilta (Traficom 2019a; Traficom 2019b) saatuihin kustannustietoihin.

Taulukko 3. Kustannusmallissa käytetyt muuttujien kertoimet.

Table 3. Parameters in the cost model.

(Rekka = Full trailer combination truck, Kuorma-auto = Lorry, pv = day.)

| <b>Kerroin</b><br><i>Parameter</i> | <b>Kertoimien kuvaus</b><br><i>Description of parameters</i>                         | <b>Kertoimet skenaarioittain</b><br><i>Parameters for variable by scenario</i> |
|------------------------------------|--|--|
| C <sub>kvv</sub>                   | Kuorma-auton käyttövoimavero<br><i>Tax on driving power for vehicle</i>              | Rekka 1v ja rekka 3v: 2,405 €/pv<br>Kuorma-auto: 1,2950 €/pv                   |
| C <sub>l</sub>                     | Tavaraliikennelupa<br><i>Freight transport permit</i>                                | 0,0288 €/pv  |
| C <sub>k</sub>                     | Kaluston katsastusmaksut<br><i>Fleet inspection fee</i>                              | Rekka 1v ja rekka 3v: 1,7486 €/pv<br>Kuorma-auto: 0,9973 €/pv                  |
| C <sub>v</sub>                     | Vakuutusmaksut<br><i>Insurances</i>  | Rekka 1v ja rekka 3v: 18,7671 €/pv<br>Kuorma-auto: 15,7534 €/pv                |
| C <sub>sp</sub>                    | Suorat palkkakustannukset<br><i>Direct labour costs</i>                              | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,2390 €/min<br>Kuorma-auto: 0,2252 €/min                |
| C <sub>vp</sub>                    | Välilliset palkkakustannukset<br><i>Indirect labour costs</i>                        | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,1733 €/min<br>Kuorma-auto: 0,1633 €/min                |
| C <sub>p</sub>                     | Poistokustannukset (arvonaleneminen)<br><i>Depreciation</i>                          | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,1520 €/min<br>Kuorma-auto: 0,1125 €/min                |
| C <sub>kk</sub>                    | Korkokustannukset<br><i>Interest charge</i>  | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,0242 €/min<br>Kuorma-auto: 0,0235 €/min                |
| C <sub>pa</sub>                    | Polttoainekustannukset<br><i>Fuel costs</i>  | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,5409 €/km<br>Kuorma-auto: 0,2770 €/km                  |
| C <sub>va</sub>                    | Voiteluainekustannukset<br><i>Lubricant costs</i>                                    | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,0487 €/km<br>Kuorma-auto: 0,0249 €/km                  |
| C <sub>m</sub>                     | Rengas- huolto- ja korjaus kustannukset<br><i>Costs of tyres, service and repair</i> | Rekka 1v ja rekka 3v: 0,2551 €/km<br>Kuorma-auto: 0,2135 €/km                  |

Jäteasemien koordinaattitiedot saatiin Pohjois-Karjalassa toimivalta jätehuolto-yhtiö Puhas Oy:ltä. Paalimuovijätteen vastaanottaa Joensuussa sijaitseva Kontiosuon jätekeskus, jolla on ainoana Pohjois-Karjalan jäteasemana riittävä käsittelykapasiteetti kerätyille muovijätteelle. Kaluston varikon oletetaan myös sijaitsevan jätekeskukseen yhteydessä.

Tutkimuksessa kehitetty kustannusmalli muodostettiin ArcGIS 10.4 -ohjelmiston ModelBuilder -työkalulla, joka mahdollistaa mallien luomisen erilaisten paikkatietoanalyysien suorittamiseksi. Kustannusmallin verkostoanalyysit suoritettiin Network Analyst -laajennusosan Vehicle Routing Problem -menetelmän avulla, joka perustuu ajallisesti optimaalisten reittien laskemiseen. Opti-

mointiongelma voidaan kuvata verkkona  $G = (M, A)$ , johon kuuluu solmujen joukko  $M$  ja solmut yhdistävien välien joukko  $A$ . Muovin keräykseen osallistuvia maatiloja kuvataan joukolla  $M$ , jossa  $M = \{0, 1, 2, \dots, n\}$ , ja jossa 0 kuvaa reittien lähtö- ja päättymispisteenä toimivaa jäteasemaa. Joukko  $A$  on määritelty siten, että  $A = \{(i, j) : i, j \in M\}$ . Optimointia varten määritellään myös matriisi  $T$ , joka sisältää maatilojen  $i$  ja  $j$  välisen matka-ajaltaan lyhyimmän reitin maatilalta  $i$  maatilalle  $j$   $\{\forall i, j\}$ . Oletetaan myös, että  $K = 1, 2, \dots, k$  on identtisten keräyksien ajoneuvojen määrä, joka voidaan tässä tapauksessa ajatella myös keräykseen tarvittavien keräysreittien lukumääränä. Määritellään myös, että  $x_{ijk}$  saa arvon 1, jos maatilalta  $i$  kuljetaan suoraan maatilalle  $j$ , ja muussa tapauksessa 0. Näin ollen tässä tutkimuksessa tehtävä optimoinnin tavoitefunktio voidaan kuvata minimointifunktion avulla:

$$\text{Min} \sum_{k \in K} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} t_{ij} x_{ijk} \quad (7)$$

Ajoneuvon reititysongelman ratkaisu monimutkaistuu maatilojen määrän kasvaessa. Tutkimuksessa analyysit ja kustannuslaskenta suoritettiin seutukunnittain, jolloin ongelma oli yksinkertaisempi ratkaista. Samalla vähennettiin mahdollisia käytetyn metaheuristiikan tuomia epäloogisuuksia keräysreittien luonnissa.

Onnistunutta reitioptimointia varten *Vehicle Routing Problem* -menetelmä vaatii ajoneuvon kuljetuskapasiteetin ja reitin ajallisen maksimipituuden määrittämistä ratkaisun rajoitteina. Reitityksessä käytettävän kaluston tiedot perustuvat Kuusakoski Oy:ltä ja Fortum Oy:ltä saatuihin tietoihin paalimuovien noudossa käytössä olleesta kalustosta. Maatalousmuovien nouto toteutetaan nykyisin nostureilla varustetuilla täysperävau-nurekoilla, joihin mahtuu kuormaa noin 30–35 tonnia eli noin 110–120 kuutiometriä (Heikkinen 2018; Karvonen 2019). Näiden tietojen perusteella täysperävau-nurekan kuljetuskapasiteetiksi on tässä tutkimuksessa määritetty 32,5 tonnia ja perävau-nuttoman kuorma-auton 10 tonnia. Kaluston kuljetuskapasiteettia voi kuitenkin rajoittaa kerätävän muovin tilavuus. Kuusakoski Oy:ltä saatujen tietojen perusteella kuivassa säilytetyn paalimuovin ominaispaino on noin 200 kg/m<sup>3</sup> ja ulkona suojaamatta säilytetyn paalimuovin ominaispaino 400–600 kg/m<sup>3</sup> (Heikkinen 2019). Tutkimusta varten ei ole tiedossa, miten muoveja säilytetään kullakin maatilalla, joten tässä tapauksessa käytetään edellä mainittujen arvojen keskiarvoa 350 kg/m<sup>3</sup>. Kaluston kuljetuskapasiteetti on analyysissä määritetty painon perusteella.

Reittien ajalliseksi maksimipituudeksi määritettiin työehtosopimuksen mukaisesti yhdeksän tuntia (540 minuuttia), josta taukojen osuus on puolitoista tuntia (90 minuuttia) (AKT 2019). Jokaisen reitin alkuun on varattu viisi minuuttia lähtövalmisteluja varten. Yhdeksän tunnin työaikaan sisällytetään kuorman lastausajat maatioilla ja kuorman purku aika jäteasemalla. Maatioilla käytettävä lastausaika on määritelty laskemalla noudettavan paalimuovin tilavuus (m<sup>3</sup>), joka vastaa käytännössä lastaukseen käytettävää aikaa (min), sillä Heikkisen (2019) mukaan paalimuovin lastaukseen kuluu aikaa noin yksi minuutti kuutiometriä kohden.

Yksittäisellä maatilalla lastaukseen käytettävä aika laskettiin yhtälöllä:

$$t_{l,m} = q_{l,m} = \frac{q_{p,m}}{r} \quad (8)$$

jossa  $t_{l,m}$  on maatilalla  $m$  lastaukseen käytettävä aika,  $q_{l,m}$  on maatilalla  $m$  muodostuvan paalimuovijätteen tilavuus kuutiolina (m<sup>3</sup>),  $q_{p,m}$  on paalimuovijätteen määrä kiloissa (kg) maatilalla  $m$ , ja  $r$  on paalimuovin ominaispaino (kg/m<sup>3</sup>). Tiloilla, joilla kerättävää muovia on vain pieniä määriä, jää estimoitu lastausaika kuitenkin epärealistisen lyhyeksi. Tästä syystä jokaisen tilan lastausaikaan on lisätty viisi minuuttia, joka oletettavasti kuluu esimerkiksi kaluston kääntämiseen tilalla sekä muihin lastaukseen liittyviin toimiin. Lastaukseen käytettävä kokonaisaika ( $t_l$ ) tilalla  $m$  on laskettu yhtälön 9 mukaisesti, jossa  $t_{l,m}$  on tilan  $m$  paalimuovin tilavuuden (m<sup>3</sup>) perusteella arvioitu lastausaika, johon lisätään viisi minuuttia.

$$t_{l,m} = t_{l,m} + 5 \quad (9)$$

Lastauksen tavoin mallissa määritetään jokaisella reitillä kerätyn muovin purku aika jäteasemalla. Lastin purku aika riippuu reitillä kerätystä muovin määrästä eli reitityksen tuloksista, mutta purku aika tulee määrittää malliin ennen reitityksen suorittamista. Tämän takia kaikille saman seutukunnan keräysreiteille on määritetty sama purku aika perustuen seutukunnan reiteillä keskimäärin kerättyyn muovin määrään. Lastien purku aikoja määrittäessä on käytetty oletusta, että purkamiseen kuluu aikaa lastauksen tavoin noin yksi minuutti kuutiometriä kohden (Heikkinen 2019).

VRP-työkaluun täytyy määrittää jokaisen reitin päiväkohtaiset sekä aikaan (min) ja matkaan (km) perustuvat kustannukset. Ne kuvaavat tutkimuksemme kolmessa skenaarioissa käytettävän kaluston kuluja. Kustannusmallista (yhtälöt 2, 3, ja 4 ja taulukko 3) aggregoidut kertoimet on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Keräysväli, kuormauskapasiteetti sekä eri kustannustyyppien kustannuskertoimet eri skenaarioissa.

Table 4. Collection intervals, loading capacity and cost factors for different cost types in different scenarios.

(Rekka = Full trailer combination truck, Kuorma-auto = Lorry.)

| Skenaario          | Keräysväli               | Kuormauskapasiteetti | Kiinteät kustannukset   | Aikaan perustuvat kustannukset | Matkaan perustuvat kustannukset |
|--------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Scenario           | Collection interval, yr. | Loading capacity     | Fixed costs, (pv = day) | Time costs                     | Distance costs                  |
| <b>Rekka 1v</b>    | 1 vuotta                 | 32,5 tn              | 22,9495 €/pv            | 0,5885 €/min                   | 0,8447 €/km                     |
| <b>Rekka 3v</b>    | 3 vuotta                 | 32,5 tn              | 22,9495 €/pv            | 0,5885 €/min                   | 0,8447 €/km                     |
| <b>Kuorma-auto</b> | 1 vuotta                 | 10 tn                | 18,0745 €/pv            | 0,5245 €/min                   | 0,5154 €/km                     |

Paalimuovin keräystä varten ei ole tällä hetkellä olemassa toimivaa keräysjärjestelmää, johon vertailua voidaan tehdä. Niinpä ensimmäistä skenaariota (rekka 1v) pidettiin perustilanteena, johon muita skenaarioita verrataan. Ensimmäisessä skenaariossa oletettiin, että paalimuovit haetaan maatiloilta kerran vuodessa, kerättävän muovin määrä vastaa vuoden aikana muodostuvaa muovijätteen määrää ja keräykseen käytetään nykyisin paalimuovin noutopalveluissa käytettävää kalustoa.

Kun tavoitteena oli löytää mahdollisimman kustannustehokkaita ja samalla käytäntöön soveltuvia ratkaisuja, tutkittiin toisen skenaarion eli rekka 3v-skenaarion avulla, onko keräyksen kustannustehokkuutta mahdollista parantaa keräysväliä harventamalla. Skenaariossa oletettiin, että keräysväliä harvennetaan vuosittaisista keräyksistä kolmen vuoden välein tapahtuviin keräyksiin, ja testattiin kuinka suuriksi kuljetuskustannukset muodostuvat muuttuneessa tilanteessa. Skenaarion oletus perustuu siihen, että harventamalla keräysväliä kerralla kuljetettavan muovin määrä kasvaa, jolloin rekan kuormausastekin eli kuorman painon suhde rekan kantavuuteen kasvaa ja keräyksestä tulee kannattavampaa täysperävaunurekoilla. Skenaarion oletusta tukee esimerkiksi Kinoben ym. (2015) tutkimus, jossa suuremmalla keräyskalustolla oli mahdollista vähentää tarvittavien keräysreittien määrää, reiteillä kuljettavaa matkaa ja reitteihin käytettävää aikaa.

Kolmannessa skenaariossa eli kuorma-autoskenaariorissa tutkittiin, onko keräyksessä mahdollista saavuttaa säästöjä, jos keräystiheys säilytetään samana kuin ensimmäisessä skenaariossa, mutta keräysauton kuljetuskapasiteettia pienennetään huomattavasti (taulukko 4). Skenaario perustuu havaintoon, että maakunnan alueella vuosittain muodostuva jätemäärä jää sen verran alhaiseksi, että täysperävaunukalusto on tarpeettoman suuri-kapasiteettista vuosittain toteuttavaan keräykseen.

Kaluston kuljetuskapasiteettia pienentämällä saadaan parannettua ajoneuvojen kuormausastetta ja pienemmällä kalustolla myös kaluston kustannukset jäävät alhaisemmaksi.

Jätteenkeräystä reititettäessä on tarpeen estimoida kultakin asiakkaalta noudettava jätteen määrä. Aiemmissa jätehuoltoä käsittelevissä tutkimuksissa yksittäisillä asiakkailla muodostuvaa jätemäärää on monesti arvioitu aiempiin keräystietoihin perustuen esimerkiksi päivittäin muodostuvan keskimääräisen jätemäärän perusteella (Ghose ym. 2006) tai kunnittain muodostuvan jätemäärän perusteella (Teixeira ym. 2004). Kattavan paalimuovin keräysjärjestelmän Suomesta puuttuessa tässä tutkimuksessa ei voitu hyödyntää aiempiin keräyksiin perustuvia tuloksia. Maatiloilla muodostuvasta paalimuovin määrästä ei myöskään tietävästi ole kerätty muisakaan yhteyksissä maatilakohtaista tietoa, joten tässä tutkimuksessa estimoitii maatilakohtainen paalimuovin määrä muovin vuosimyyntistä. Yhtä nautaa kohti syntyvä muovijättemäärä lasketaan jakamalla Suomessa myytävän paalimuovin määrä Suomen nautaeläinten määrällä. Paalimuovin vuosittaiset markkinat ovat Raniplast Oy:n mukaan 7 000 tonnia (Furu 2019). Nautoja oli Suomessa vuoden 2018 joulukuun alussa yhteensä 859 377 (Tilastotietokanta 2019b). Yhtä nautaa kohden muodostuvan muovin määrän perusteella estimoidaan maatilakohtaiset jätemuovimäärät perustuen Ruokaviraston maatala-aineistoon Pohjois-Karjalasta. Maatilakohtaiset vuosittaiset paalimuovin määrät estimoitiiin kaavalla:

$$q_{p,m} = \frac{p}{c} q_{c,m}, \quad (10)$$

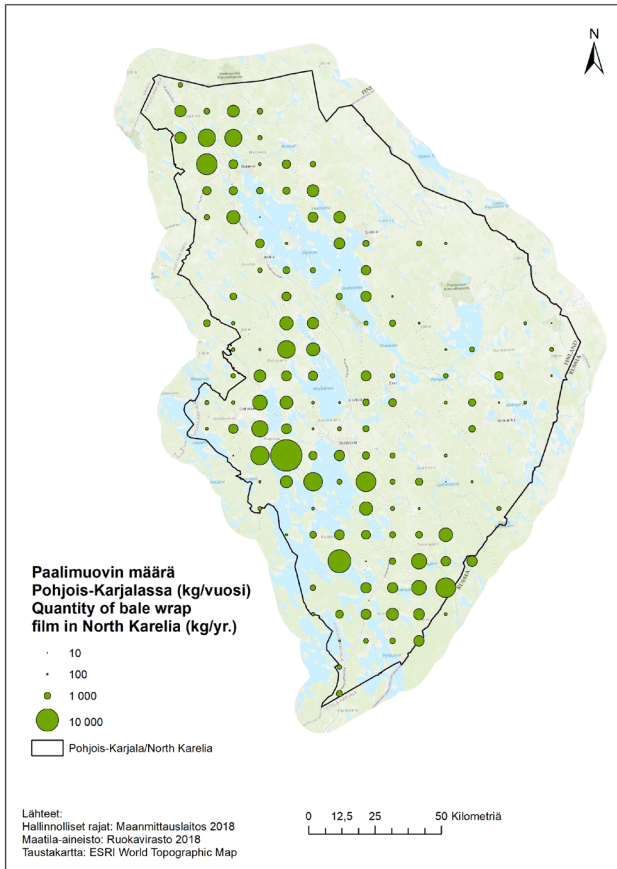
jossa  $q_{p,m}$  on maatilalla  $m$  muodostuvan paalimuovijätteen määrä tonneina,  $p$  on Suomessa vuosittain myyty paalimuovin määrä tonneina,  $c$  on nautojen määrä Suomessa ja  $q_{c,m}$  on maatalan  $m$  nautamäärä.



## Tulokset

Estimointiin perustuen Pohjois-Karjalassa muodostuu vuosittain paalimuovijätettä yhteensä 246,5 tonnia (kuva 1), eli keskimäärin jätemuovia muodostuu yhdellä tilalla 0,4 tonnia vuodessa. Tilakohtaiset nautamäärät vaihtelivat 1–867 naudan välillä ja näin ollen vuosittain muodostuvan paalimuovin määrä

vaihtelee tilakohtaisesti noin 8–7 000 kilon välillä. Rekka 3v -skenaariota varten laskettiin myös kolmen vuoden aikana muodostuva paalimuovin määrä. Kolmessa vuodessa muovia muodostuu kolminkertainen määrä eli koko Pohjois-Karjalassa yhteensä 739,5 tonnia ja keskimäärin 1,2 tonnia yhdellä tilalla. Tänä aikana muodostuva paalimuovin määrä vaihtelee tiloilla 24–21 000 kilon välillä.



Kuva 1. Vuoden aikana Pohjois-Karjalassa muodostuvan paalimuovijätteen alueellinen jakautuminen. Muovin määrä on keskitetty 10 x 10 km -ruudukolle ja estimointi on tehty vuodelle 2018.

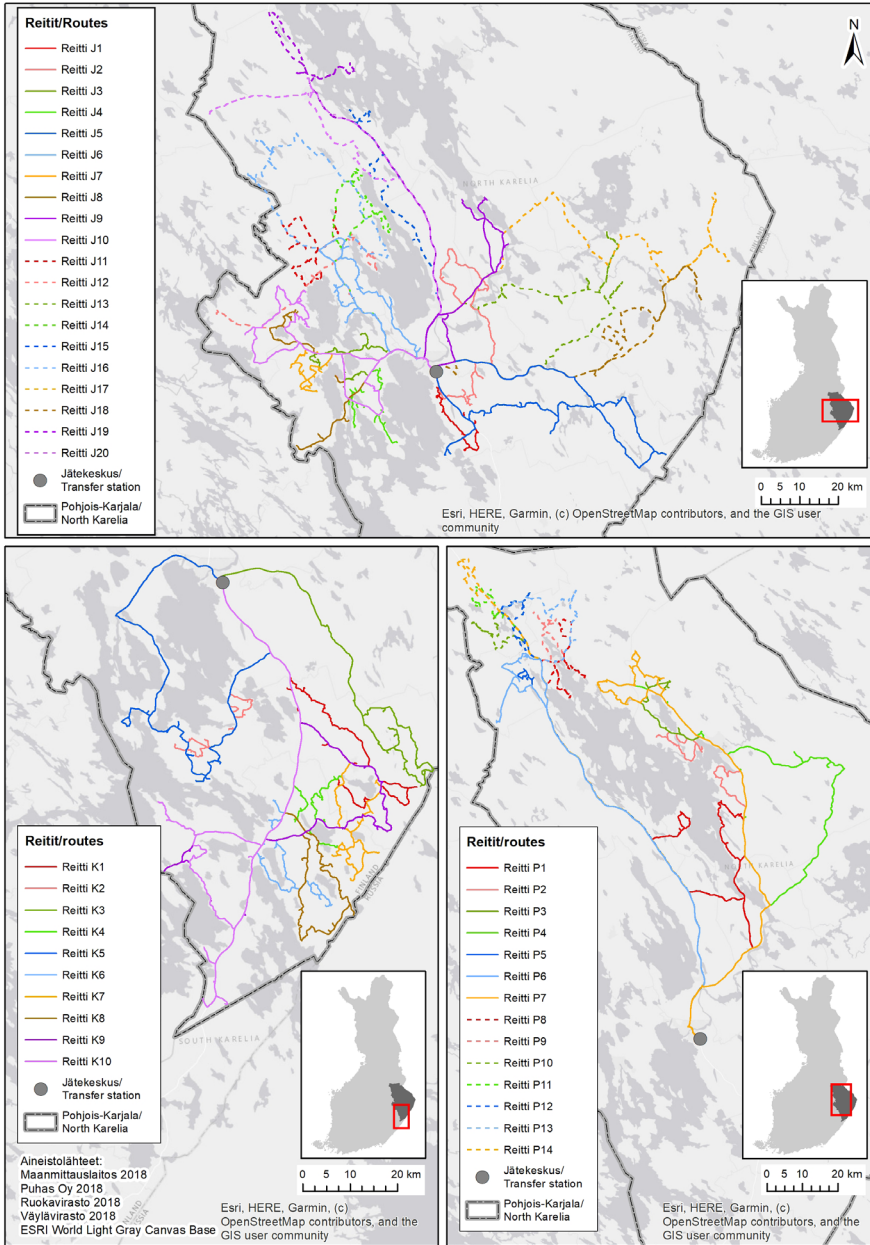
*Figure 1. Geospatial distribution of bale wrap plastic waste in North Karelia during the year. The amount of plastic is centered on a 10 x 10 km grid and the estimation is done for 2018.*

Vuositasolla paalimuovin keräyksestä muodostuvat kuljetuskustannukset ovat 16 357 euroa (taulukko 5), kun muovi kerätään Pohjois-Karjalan kaikilta lypsy- ja nautakarjatiloilta täysperävaunurekoilla kerran vuodessa. Yhden vuosittaisen keräyksen toteuttamiseen tarvitaan yhteensä 33 keräysreittiä, joista 14 reittiä sijoittuu Joensuun seudulle, 11 reittiä Pielisen Karjalaan ja 8 Keski-Karjalaan.

Keräysreitien pituus on keskimäärin 264 kilometriä, mutta reittien pituudet vaihtelevat jonkin verran. Yhdellä reitillä paalimuovi noudetaan keskimäärin 18 maatilalta. Kun otetaan huomioon ainoastaan mallin laskemat keräyksestä muodostuvat kuljetuskustannukset, paalimuovin keräyksen kus-

tannusestimaatti on keskimäärin 66 euroa tonnilta. Kerättävän muovin määrä ja keräyskustannus vaihtelevat reiteittäin, mutta keskimäärin yhdeltä reitiltä kerätään 7,5 tonnia muovia ja täysperävaunurekan kuormausaste on keskimäärin noin 23 prosenttia.

Toisessa rekkaskenaariossa keräystiheyden harventaminen pienentää keräyksen kokonaiskustannuksia vuositasolla noin 58 prosenttia rekka 1v -skenaarioon verrattuna (taulukot 5 ja 6). Yhden keräyksen toteuttamiseen tarvitaan tässä tapauksessa yhteensä 44 keräysreittiä (kuva 2), eli reittien määrä kasvaa rekka 1v -skenaarioon verrattuna 33 prosenttia. Reiteistä 20 sijoittuu Joensuun seudulle, 10 Keski-Karjalaan ja 14 Pielisen Karjalaan.



Kuva 2. Pohjois-Karjalaan muodostuneet keräysreitit Rekka 3v -skenaariossa.

Figure 2. Collection routes in North Karelia in the Full trailer combination truck every 3rd year -scenario.

Keräysreitit muodostuvat rekka 3v -skenaariossa keskimäärin 26 kilometriä lyhyemmiksi kuin rekka 1v -skenaariossa ja yhdellä reitillä vieraillaan keskimäärin 14 tilalla. Yhdellä keräysreitillä saadaan kuitenkin kerättyä keskimäärin noin 17 tonnia muovia, joka on yli kaksinkertainen määrä rekka 1v -skenaarioon verrattuna. Samalla keskimääräinen kuormaustasaste kasvaa 52 prosenttiin. Kun keräykset suoritetaan kolmen vuoden välein, saadaan yhdellä

keräyksellä paalimuovia yhteensä noin 740 tonnia. Kuitenkin vuositasolle suhteutettuna paalimuovia saadaan kerättyä yhtä paljon kuin rekka 1v -skenaariossakin (taulukko 6). Kuljetuskustannusten ja kerätyn paalimuovin määrän perusteella paalimuovin keräyksen kustannusestimaatiksi muodostuu 28 euroa tonnilta, jolloin harvennetun keräyksen kustannukset muodostuvat noin 58 prosenttia halvemmaksi vuosittaiseen keräykseen verrattuna.

Taulukko 5. Reitityksen tulokset skenaarioittain. Rekka 3v -skenaario muodostuu vuosittaisen kustannusten perusteella edullisimmaksi vaihtoehdoksi, mutta keskimääräinen kuormausaste on suurin kuorma-autoskenaariossa.

Table 5. Routing results by scenario. Full trailer combination truck every 3rd year -scenario is the most cost-efficient option based on the annual cost, but the average loading rate is highest in the lorry -scenario.

(F-t-c truck yearly = Full trailer combination truck yearly -scenario,

F-t-c truck every 3rd year = Full trailer combination every 3rd year -scenario.)

| Skenaario   | Rekka 1v           | Rekka 3v                       | Kuorma-auto  |
|---|--------------------|--------------------------------|--------------|
| Scenario  | F-t-c truck yearly | F-t-c every 3 <sup>rd</sup> y. | Lorry yearly |
| Kokonaiskustannukset (€/v)<br>Total costs (€/yr.)                                 | 16356,51           | 6907,48                        | 12672,71     |
| Kerätty muovi (tn/keräys)<br>Collected bale wrap (tn/collection)                  | 246,5              | 739,5                          | 246,5        |
| Kerätty muovi (tn/v)<br>Collected bale wrap (tn/yr.)                              | 246,5              | 246,5                          | 246,5        |
| Paalimuovin kustannusestimaatti (€/tn)<br>Cost estimate of bale wrap waste (€/tn) | 66,36              | 28,03                          | 51,42        |
| Reittien määrä (lkm/keräys)<br>Number of routes per collection                    | 33                 | 44                             | 35           |
| Keskimääräinen kuormausaste (%)<br>Average loading grade (%)                      | 22,9               | 51,7                           | 70,4         |
| Reittien keskimääräinen pituus (km)<br>Average length of the routes (km)          | 264                | 238                            | 254          |

Taulukko 6. Rekka 1v -skenaarioiden tulokset verrattuna rekka 3v ja kuorma-auto -skenaarioiden tuloksiin. Vuosittaiset kustannukset jäävät alle puoleen rekka 3v -skenaariossa rekka 1v -skenaarioon verrattuna, mutta keskimääräinen kuormausaste on 47,5 prosenttiyksikköä suurempi kuorma-autoskenaariossa.

Table 6. The results of the full trailer combination truck yearly -scenario compared with the full trailer combination truck every 3rd year and lorry -scenarios. Compared with the full trailer combination truck every 3rd year -scenario but the average loading rate is 47.5 percentage points higher in the lorry scenario.

(F-t-c truck yearly = Full trailer combination truck yearly -scenario. P.p. = Percentage point.)

| Skenaario<br>Scenario  | Rekka 1v<br>F-t-c<br>truck<br>yearly | Rekka 3v<br>Full trailer combination<br>truck every 3 <sup>rd</sup> year |                          | Kuorma-auto<br>Lorry |                          |
|--|--------------------------------------|--|--------------------------|----------------------|--------------------------|
|  |                                      | Erotus<br>Difference   | Erotus-%<br>Difference-% | Erotus<br>Difference | Erotus-%<br>Difference-% |
| Kokonaiskustannukset (€/v)<br>Total costs (€/yr.)                                  | 16356,51                             | -9449,03   | -57,77                   | -3683,80             | -22,52                   |
| Kerätty muovi (tn/keräys)<br>Collected bale wrap (tn/collection)                   | 246,5                                | 493  | +200,00                  | 0                    | +0,00                    |
| Kerätty muovi (tn/v)<br>Collected bale wrap (tn/yr.)                               | 246,5                                | 0  | +0,00                    | 0                    | +0,00                    |
| Paalimuovin kustannusestimaatti (€/tn)<br>Cost estimate for bale wrap waste (€/tn) | 66,36                                | -38,33   | -57,76                   | -14,94               | -22,51                   |
| Reittien määrä (lkm/keräys)<br>Number of routes per collection                     | 33                                   | 11   | +33,33                   | 2                    | +6,06                    |
| Keskimääräinen kuormausaste (%)<br>Average loading grade (%)                       | 22,9                                 | +28,8 %<br>yks./p.p.   | +125,76                  | +47,5 %<br>yks./p.p. | +207,42                  |
| Reittien keskimääräinen pituus (km)<br>Average length of the routes (km)           | 264                                  | -26  | -9,85                    | -10                  | -3,79                    |

Kolmannessa skenaariossa käytetään kuorma-autoja, jolloin keräyksen vuosittaiset kuljetuskustannukset pienenevät noin 23 prosenttia rekka 1v -skenaarioon verrattuna (taulukot 5 ja 6). Keräykseen tarvitaan pienemmällä kalustolla yhteensä 35 reittiä, joista 11 sijoittuu Pielisen Karjalaan, 8 Keski-Karjalaan ja 16 Joensuun seudulle. Reittejä muodostuu kaksi enemmän kuin rekka 1v -skenaariossa ja yhdeksän reittiä vähemmän kuin rekka 3v -skenaariossa.

Kuorma-autoskenaariossa reitit muodostuvat keskimäärin kymmenen kilometriä lyhyemmiksi kuin rekka 1v -skenaariossa ja 16 kilometriä pidemmiksi kuin rekka 3v -skenaariossa. Yhdellä reitillä käydään keskimäärin 17 maatilalla. Muovia saadaan kerättyä yhdellä keräysreitillä keskimäärin 7 tonnia, joka on puoli tonnia vähemmän kuin rekka 1v -skenaariossa ja kymmenen tonnia vähemmän kuin rekka 3v -skenaariossa. Kuorma-autoskenaariossa käytetyn kaluston kuljetuskapasiteetti on huomattavasti pienempi kuin rekka 1v ja rekka 3v -skenaariossa. Käytössä oleva kapasiteetti pystytään hyödyntämään rekkoja tehokkaammin keskimääräisen kuormausasteen ollessa noin 70 prosenttia. Maatiloilta kerätään kuorma-autoskenaariossa rekka 1v -skenaariota tavoin vuosittain yhdellä keräyksellä yhteensä 246,5 tonnia paalimuovia, jolloin paalimuovin keräyksen kuljetuskustannusten estimaatiksi muodostuu

noin 51 euroa tonnia kohti. Kustannukset muodostuvat tässä tapauksessa selvästi suuremmiksi kuin rekka 3v -skenaariossa, mutta kuitenkin rekka 1v -skenaariota pienemmiksi.

Seutukunnittain vertailtuna paalimuovin keräys osoittautuu kaikissa tutkituissa skenaarioissa kustannustehokkuudeltaan heikoimmaksi Pielisen Karjalan alueelta. Paalimuovin kustannusestimaatti Pielisen Karjalan keräysreiteillä vaihtelee skenaarioittain 44–104 euron välillä tonnia kohti. Siten keräys on lähes kaksi kertaa kalliimpaa Pielisen Karjalassa kuin Keski-Karjalan ja Joensuun seutukunnissa (taulukot 7–9). Keräyksen tehokkuutta Pielisen Karjalassa vähentää alueen maatalojen pitkä etäisyys muovien keräyspaikkana toimivaan Kontiosuon jätekeskukseen. Reitit muodostuvatkin Pielisen Karjalassa keskimäärin noin 100 kilometriä pidemmiksi kuin muissa seutukunnissa. Yhdellä keräysreitillä ei myöskään ehditä käymään yhtä monella maatilalla, vaan vierailtavia tiloja on keskimäärin kolmannes vähemmän kuin Keski-Karjalassa ja Joensuun seudun reiteillä. Pitkät etäisyydet ja maatilakäyntien vähäinen määrä vaikuttavat myös yhdellä reitillä keskimäärin kerättyyn muovin määrään, joka jää noin reiluun puoleen verrattuna muihin seutukuntiin. Siten myös kuormausaste jää Pielisen Karjalassa huomattavasti alhaisemmaksi kuin Joensuun ja Keski-Karjalan seutukunnissa.

Taulukko 7. Rekka 1v -skenaariota tulosten vertailu seutukunnittain.

Table 7. Comparison of the results of the full trailer combination truck yearly scenario by subregion.

| Seutukunta<br><i>Subregion</i>   | Joensuu    | Keski-Karjala | Pielisen Karjala |
|--|------------|---------------|------------------|
| Paalimuovin kustannusestimaatti<br><i>Cost estimate of bale wrap waste</i>   | 53,42 €/tn | 56,62 €/tn    | 104,27 €/tn      |
| Keskimääräinen kuormausaste<br><i>Average loading grade</i>  | 27 %       | 25 %          | 16 %             |
| Reittien keskimääräinen pituus<br><i>Average length of the routes</i>  | 229 km     | 229 km        | 334 km           |
| Yhdellä reitillä keskimäärin kerätty muovin määrä<br><i>Average quantity of bale wrap waste collected on one route</i> | 8,8 tn     | 8,1 tn        | 5,3 tn           |
| Maatilojen lkm keskimäärin yhdellä reitillä<br><i>Average number of farms on one route</i>                             | 19         | 21            | 14               |

Taulukko 8. Rekka 3v -skenaarion tulosten vertailu seutukunnittain.

Table 8. Comparison of the results of the full trailer combination truck every 3rd year -scenario by subregion.

| Seutukunta<br><i>Subregion</i>   | Joensuu    | Keski-Karjala | Pielisen Karjala |
|--|------------|---------------|------------------|
| Paalimuovin kustannusestimaatti<br><i>Cost estimate of bale wrap waste</i>   | 23,10 €/tn | 23,00 €/tn    | 43,71 €/tn       |
| Keskimääräinen kuormausaste<br><i>Average loading grade</i>  | 57 %       | 60 %          | 39 %             |
| Reittien keskimääräinen pituus<br><i>Average length of the routes</i>  | 196 km     | 206 km        | 321 km           |
| Yhdellä reitillä keskimäärin kerätty muovin määrä<br><i>Average quantity of bale wrap waste collected on one route</i> | 18,4 tn    | 19,5 tn       | 12,6 tn          |
| Maatilojen lkm keskimäärin yhdellä reitillä<br><i>Average number of farms on one route</i>                             | 14         | 16            | 11               |

Taulukko 9. Kuorma-autoskenaarion tulosten vertailu seutukunnittain.

Table 9. Comparison of the results of the yearly lorry scenario by subregion.

| Seutukunta<br><i>Subregion</i>   | Joensuu    | Keski-Karjala | Pielisen Karjala |
|--|------------|---------------|------------------|
| Paalimuovin kustannusestimaatti<br><i>Cost estimate of bale wrap waste</i>   | 43,59 €/tn | 42,48 €/tn    | 77,73 €/tn       |
| Keskimääräinen kuormausaste<br><i>Average loading grade</i>  | 77 %       | 81 %          | 53 %             |
| Reittien keskimääräinen pituus<br><i>Average length of the routes</i>  | 214 km     | 221 km        | 334 km           |
| Yhdellä reitillä keskimäärin kerätty muovin määrä<br><i>Average quantity of bale wrap waste collected on one route</i> | 7,7 tn     | 8,1 tn        | 5,3 tn           |
| Maatilojen lkm keskimäärin yhdellä reitillä<br><i>Average number of farms on one route</i>                             | 17         | 21            | 14               |

## Pohdinta

Paalimuovin keräys on edullisinta, kun se toteutetaan suuremmalla kalustolla ja kolmen vuoden välein. Samansuuntaiseen tulokseen ovat päätyneet myös Kinobe ym. (2015), jotka totesivat suuremman kaluston vähentävän kuljetuksen kustannuksia, tarvittavien reittien määrää ja matkaan käytettävää aikaa. Suurella kalustolla kolmen vuoden välein toteutetulla keräyksellä saatiin kerättyä kolminkertainen määrä muovia verrattuna pienellä kalustolla tehtävään keräykseen, mutta keräysreitit

keräykseen tarvittiin vain noin kolmannes enemmän kuin pienellä kalustolla tehdyssä keräyksessä. Näin ollen myös kuljetuskustannukset jäivät suhteessa kerättyyn paalimuovin määrään verrattuna pienemmiksi. Kun tulokset suhteutetaan Rantalan ja Viljakaisen (2010) tuloksiin maanviljelijöiden maksuhalukkuudesta, voidaan tässä tutkimuksessa estimoituja kustannuksia pitää kohtuullisina. Rantalan ja Viljakaisen (2010) tekemän kyselytutkimuksen mukaan vastaajista lähes 19 prosenttia oli valmis maksamaan muovien noudosta korkein-

taan 50 euroa. Yli 50 euroa oli valmis maksamaan yhteensä noin 26 prosenttia vastaajista. Rekka 3v -skenaariossa paalimuoville muodostunut kustannusarvio alittaa siis selkeästi 50 euron ”kipurajan”. Kuorma-autoskenaariossakin muoville syntynyt keräyksen tonnihinta sijoittuu sen tuntumaan.

Pohjois-Karjalaa koskevan tutkimuksen perusteella keräyksen kannattavuuteen ja keräykseen käytettävän kaluston valintaan vaikuttaa merkittävästi kerättävän muovin määrä ja keräyskaluston käyttöaste. Tämän osoittaa se, että vuosittain tehtävät keräykset muodostuvat kannattavammiiksi pienemmällä kalustolla kuin suurella. Tämä johtuu etenkin siitä, että kerättävää materiaalia muodostuu vuodessa melko vähän verrattuna täysperävaunun rekkan 32 tonnin kuljetuskapasiteettiin. Reitiltä on palattava maksimiyöajan (9 tuntia) vuoksi ennen rekkan kapasiteetin täyttymistä, eikä reiteillä ehdi näin kerätä täysia kuormia. Vuosittain Pohjois-Karjalassa muodostuvan muovin määrän keräys soveltuukin paremmin kuorma-auton kapasiteetille (10 tonnia) keskimääräisen kuormausasteen ollessa kuorma-autoskenaariossa noin 48 prosenttisyksikköä suurempi kuin rekka 1v -skenaariossa. Kerättäessä paalimuovit kolmen vuoden välein myös rekkakuljetusten kannattavuus paranee, joten se on edullisin muovijätteen keräystapa. Muihin jätekuljetuksiin verrattuna keskimääräinen kuormausaste on sekä rekka 3v -skenaariossa että kuorma-autoskenaariossa melko hyvä, sillä Suomessa vuonna 2017 esimerkiksi talousjätteiden kuljetuksissa kuormausaste oli 55 prosenttia ja kierrätysmateriaalien kuljetuksissa 58 prosenttia (Tilastokeskus 2017). Kuorma-autoskenaariossa saavutettu kuormausaste ylittää nämä luvut selvästi. Myös rekka 3v -skenaarion kuormausaste on melko lähellä näitä talousjätteiden ja kierrätysmateriaalien kuormausasteita.

Seutukunnittain tarkastellen keräys on jokaisessa skenaarioissa kustannustehokkuudeltaan selkeästi heikointa Pielisen Karjalassa, josta on pitkät etäisyydet muovin vastaanottoaikaan. Kustannuksia nostaa myös maatilojen vähäisempi määrä laajalla alueella verrattuna Joensuun ja Keski-Karjalan seutukuntiin. Keski-Karjalan ja Joensuun seutukunnan välille ei synny kovin merkittävää kustannuseroa, vaan molemmissa seutukunnissa keräyksen kustannustehokkuus on samaa luokkaa paalimuovijätteen kustannusestimaatin ja keskimääräisen kuormausasteen perusteella.

Vastaavaa tutkimusta ei ole aiemmin tehty Suomessa, joten suoraa vertailukohtaa saavutetuille tuloksille ei ole. Useissa jätehuollon tutkimuksissa reittioptimoinnilla on voitu osoittaa edullisempia vaihtoehtoja (esim. Ghose ym. 2006; Kinobe ym. 2015) ja käytännössä on pystytty saavuttamaan huomattavia kustannussäästöjä (Sahoo

ym. 2005). Näin ollen tulosten voidaan ajatella olevan vähintäänkin oikeansuuntaisia ja sopivan myös suunnittelutarkoituksiin. Tulokset osoittavat myös sen, että optimoimalla keräysreittejä vältetään yksittäiset käynnit maataloilla, mikä alentaa paalimuoville muodostuvaa tonnikohtaista hintaa ratkaisevasti (Tepponen 2018).

Tulosten pätevyyyteen vaikuttavat tutkimuksessa tehdyt oletukset. Oletimme, että paalimuovia muodostuu jokaisella lypsy- ja nautakarjatilalla ja että paalimuovijätteen määrä nautaa kohden on Pohjois-Karjalassa sama kuin koko Suomessa. Siten Pohjois-Karjalan muovijätteen määrässä voi olla jonkin verran epävarmuutta. Tilakohtaisen tiedon puuttuessa nyt tehty arvio oli kuitenkin tarkin, joka pystyttiin tuottamaan. Myöskään tietoa siitä, säilytetäänkö muovit ulkona vai suojassa, ei ollut saatavilla. Se on tarpeen arvioitaessa paalimuovin painoa (kg) suhteessa sen tilavuuteen (m<sup>3</sup>). Laskelmissa käytettiin keskiarvoa kuivan ja märän paalimuovin painosta. Tällä ei juuri ole vaikutusta tuloksiin, sillä kuormausasteet jäivät yleisesti selvästi alle kuljetuskapasiteetin.

Yksityiskohtaisen tilakohtaisen tiedon kerääminen säilöntämenetelmistä ja paalimuovista tarjoaisi hyödyllistä lisätietoa ja sen avulla olisi mahdollista tarkentaa reittioptimointia ja lisätä tulosten luotavuutta. Kuljetuskalustoa koskevia oletuksia tehtiin, koska tutkimusta varten ei ollut tiedossa tiettyä keräykseen tarjolla olevaa kalustoa. Kaluston kustannukset laskettiin kuorma-autolle ja rekalle, joita kuljetuksissa todennäköisesti voidaan käyttää. Laskelmissa ei käytetty kuljetusyhtiöiden taloustietoja, joten tiedot eivät sellaisenaan kuvaa kuljetusten kannattavaa markkinahintaa.

Tutkimuksessa kehitetty malli rakentuu ajoneuvon reititysongelman ympärille, joka ratkaistaan metaheuristisilla paikkatietomenetelmillä. Tämän vuoksi reiteissä voi ilmetä joitakin epäoptimaalisuuksia. Metaheuristiikasta johtuvia reittien epäoptimaalisuuksia on kuitenkin vähennetty tekemällä reititys seutukunnittain. Tällöin reititysongelman ratkaisu sisältää vähemmän vaihtoehtoja ja tulokset sisältävät vähemmän virheitä. Seutukunnittain tehty reittien optimointi vaikuttaa todennäköisesti kuitenkin jonkin verran reitityksen tuloksiin. Reitityksen suorittaminen kerralla koko maakunnalle tuottaa erilaiset keräysreitit. Jälkikäteen tuloksia arvioitiin uudella maakunnallisella mallilla. Tässä mallissa keräysreittien määrä kasvoi 6 reitillä ja kokonaiskustannukset kasvoivat noin 3 000 euroa, jolloin vastaavasti myös paalimuoville muodostuva kustannusestimaatti kasvoi hieman. Reitityksen tulosten voidaan siis sanoa olevan herkkiä metaheuristisille ratkaisuille ja parametrien sekä rajoitusten muutoksille. Pidemmälle menevien johtopäätösten

tekeminen vaatii kuitenkin herkkyyden tarkempaa tutkimusta. Jatkossa onkin perusteltua tutkia esimerkiksi paalimuovin määrän muutosten tai kustannusten muutosten vaikutuksia reititystuloksiin.

Nyt kehitetyn mallin avulla voidaan ensisijaisesti optimoida paalimuovien keräysreitit ja arvioida näin muodostuvia kuljetuskustannuksia sekä kuljetusten tehokkuutta. Lisäksi malli tarjoaa esimerkiksi maaseudun ja haja-asutusalueiden jätehuollon kehittämiseksi koko Suomessa, sillä se on helpposti muunneltavissa ja sovellettavissa muihin seutu- ja maakuntiin. Vastaavat menetelmät ja analytiikka ovat sovellettavissa myös muissa maissa, joissa maataloudessa hyödynnetään samalla tavalla kerättävissä olevia materiaaleja. Tutkimuksessa keskitytään vain maatalouden paalimuoviin, mutta malli on sovellettavissa myös muiden muovijätteen ja vastaavien suurta kuljetuskapasiteettia vaativien jätetyyppien keräyksen tarkasteluun.

## Johtopäätökset

Tutkimus osoittaa, että paalimuovin keräystä suunniteltaessa kaluston kapasiteetti ja keräystiheys tulee sovittaa yhteen kerättävän muovin määrän kanssa. Keräys täysperävaunurekoilla voi osoittautua kannattavimmaksi ratkaisuksi, mutta tällöin kerättävää muovia tulee olla tarpeeksi. Pienemmän kaluston käyttäminen voi olla kustannustehokkainta, jos kerättävää muovia on niin vähän, että kuormausaste jää rekoilla alhaiseksi. Käytännössä, etenkin tilojen sijaitessa etäällä toisistaan ja jätteenkäsittelyasemista, kolmen vuoden välein toteutettavat keräykset voivat olla realistisin paalijätteen keräystapa, sillä näissä olosuhteissa tämä muodostuu kustannuksiltaan halvimmaksi ja kuormausasteeltaan tehokkaimmaksi vaihtoehdoksi.

Tutkimuksessa tehdyillä oletuksilla ja tutkimuksessa käytettyjen menetelmien pätevyydellä ja luotettavuudella on vaikutusta tuloksiin. Vastaavia menetelmiä on käytetty tuloksellisesti myös muissa vastaavissa jätehuoltologiikan tutkimuksissa. Käytettävissä olleissa tietokannoissa emme havainneet puutteita. Tutkimuksen tuloksia voidaan yleistää, kun huomioidaan, että tulokset kuvaavat tiettyä tutkimuksessa määritettyä ajankohtaa ja aluerakennetta.

Tässä tutkimuksessa saatuja tuloksia on jatkossa hyödyllistä tarkentaa suorittamalla kustannuslaskenta keräyskaluston todellisiin kustannuksiin perustuen sekä hyödyntämällä tarkempia paalimuovitietoja. Mallin herkkyyttä tulee puolestaan tarkastella tutkimalla kustannusten ja muovijättemäärien muutoksien vaikutusta mallin tuloksiin. Reititysongelmien algoritmeissa on eroja, joiden vaikutusta tuloksiin on tarpeen tutkia. Uusia käy-

tännön ratkaisuja voi etsiä vertailemalla erilaisten keräysmallien kannattavuutta, kun muovit kerätään esimerkiksi muun jätteen keräyksen yhteydessä tai paluurahtina, kun tilalle on viety rahtia. Sovellettaessa mallia muihin maakuntiin sitä on tarpeen kehittää siten, että useampien jäteasemien huomioiminen samanaikaisesti paalimuovijätteen vastaanottajana on mahdollista.

## Kiitokset

Artikkeli liittyy ”CIRCWASTE – Kohti kiertotaloutta (LIFE15 IPE FI 004)” -projektiin ja kiitämme projektin yhteyshenkilöitä Simo Paukkusta ja Anssi Kokkosta yhteistyöstä. Samoin kiitämme *Terra* -lehden anonyymeja arvioitsijoita rakentavasta palautteesta.

## KIRJALLISUUS

- Akhtar, M., Hannan, M. A., Begum, R. A., Basri, H. & Scavino, E. (2017) Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization. *Waste Management* 61, 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.022>
- AKT (2019) *Työehtosopimus*. Auto- ja Kuljetusalan Työntekijäliitto AKT ry:n internetsivut. 31.3.2019. <[www.akt.fi/edunvalvonta/tyoehtosopimukset/kuorma-autoala/tyoehtosopimus/](http://www.akt.fi/edunvalvonta/tyoehtosopimukset/kuorma-autoala/tyoehtosopimus/)>
- Anbuudayasankar, S. P., Ganesh, K. & Mohapatra, S. (2014) *Models for Practical Routing Problems in Logistics – Design and Practices*. Springer, Switzerland.
- Arribas, C. A., Blazquez, C. A. & Lamas, A. (2010) Urban solid waste collection system using mathematical modelling and tools of geographic information systems. *Waste Management & Research* 28, 355–363. <https://doi.org/10.1177/0734242X09353435>
- Assaf, R. & Saleh, Y. (2017) Vehicle-routing optimization for municipal solid waste collection using genetic algorithm: The case of Southern Nablus city. *Civil and Environmental Engineering Reports* 26(3) 43–57. <https://doi.org/10.1515/ceer-2017-0034>
- Beliën, J., De Boeck, L. & Van Ackere, J. (2014) Municipal solid waste collection and management problems: A literature review. *Transportation Science* 48(1) 78–102. <https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0448>
- Erälina, L. & Järvenpää, A.-M. (toim.) (2019) *Maatalousmuovijätteen keräys ja kierrätys – Haasteet ja mahdollisuudet*. Turun yliopisto, Turku. <[https://maatalousmuovijate.fi/wp-content/uploads/2019/03/Maatalousmuovij%C3%A4tteen-ker%C3%A4ys-ja-kierr%C3%A4tys\\_-LiMuKe-eng.pdf](https://maatalousmuovijate.fi/wp-content/uploads/2019/03/Maatalousmuovij%C3%A4tteen-ker%C3%A4ys-ja-kierr%C3%A4tys_-LiMuKe-eng.pdf)>
- Esri (2019) *Algorithms used by the ArcGIS Network Analyst extension*. 18.2.2019. <<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithms-used-by-network-analyst.htm>>

- Esri Finland (2015) *Suomen tie- ja katuverkko 2015 -aineiston tietosisältö*.
- Euroopan komissio (2018) *Muovijäte: Eurooppalainen strategia maapallon, kansalaisten ja yritysten hyväksi*. Euroopan komission internetsivut. 11.8.2019. <[https://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-18-5\\_fi.htm](https://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-5_fi.htm)>
- FinFerries (2017a) *Arvinsalmi*. Suomen lauttaliikenne Oy:n internetsivut. 29.5.2019. <<https://finferries.fi/lauttaliikenne/lauttapaikat-ja-aikataulut/arvinsalmi.html>>
- FinFerries (2017b) *Hirvisalmi*. Suomen lauttaliikenne Oy:n internetsivut. 29.5.2019. <<https://finferries.fi/lauttaliikenne/lauttapaikat-ja-aikataulut/hirvisalmi.html>>
- Friari, P., Horttanainen, M. & Marttila, E. (2005) *Maatalouden muovijätteen keräily ja hyötykäyttö. Hankkeen loppuraportti*. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Lappeenranta.
- Ghose, M. K., Dikshit, A. K., & Sharma, S. K. (2006) A GIS based transportation model for solid waste disposal – A case study on Asansol municipality. *Waste Management* 26 1287–1293. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.022>
- Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A. & Scavino, E. (2018) Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste Management* 71 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.019>
- Kinobe, J. R., Bosona, T., Gebresenbet, G., Niwagaba, C. B. & Vinnerås, B. (2015) Optimization of waste collection and disposal in Kampala city. *Habitat International* 49 126–137. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.025>
- Laporte, G. (2009) Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science* 43(4) 408–416. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0301>
- Liikennejärjestelmä.fi (2018) *Tiekuljetusten kustannustehokkuus*. Liikenne- ja viestintäministeriön, Liikenne- ja viestintäviraston, Väyläviraston ja Ilmatieteidenlaitoksen liikennejärjestelmä.fi -palvelu. 13.4.2019. <<http://liikennejarjestelma.fi/palvelutaso/matkojen-ja-kuljetusten-palvelutaso/tiekuljetusten-kustannustehokkuus/>>
- Liikennevirasto (2015) *Tie- ja rautatieliikenteen hankearvioinnin yksikkökustannukset 2013*. Liikenneviraston ohjeita 1/2015. Helsinki, 2015. <<https://vayla.fi/documents/20473/34253/Tie-+ja+rautatieliikenteen+hankearvioinnin+yksikk%C3%B6arvot+2013.pdf/5f165edd-c827-4f2a-95a6-5b17649340d4>>
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H. & Bräysy, O. (2006) Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications* 30 223–232. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2005.07.009>
- Pohjois-Karjalan ELY-keskus (2013) *Puhtaiden luonnonvarojen energinen maakunta. Pohjois-Karjalan maaseudun kehittämissuunnitelma vuosille 2014–2020*. <[https://maakaista.fi/tiedostot/P-Kn\\_Maaseutusuu-nitelma\\_2014-2020.pdf](https://maakaista.fi/tiedostot/P-Kn_Maaseutusuu-nitelma_2014-2020.pdf)>
- Rantala, T. & Viljakainen, A.-L. (2010) *Esiselvitys maa- ja hevostalouden sivutuotteiden hyödyntämismahdollisuuksista Pohjois-Savossa. Epäkurantin nurmirehun ja hevosenlannan hyödyntäminen energiana -hankkeen loppuraportti*. Savonia ammattikorkeakoulu. <[http://portal2.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia\\_ja\\_ymparisto/ymparistotekniikka/HEINAPAALI\\_Esiselvitysraportti\\_1.pdf](http://portal2.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia_ja_ymparisto/ymparistotekniikka/HEINAPAALI_Esiselvitysraportti_1.pdf)>
- Ross, D. F. (2018) *Distribution Planning and Control: Managing in the Era of Supply Chain Management*. Springer, New York.
- Sahoo, S., Kim, S., Kim, B.-I., Kraas, B. & Popov Jr. A. (2005) Routing Optimization for Waste Management. *Interfaces* 35(1) 24–36. <https://doi.org/10.1287/inte.1040.0109>
- Sulemana, A., Donkor, E. A., Forkuo, E. K. & Oduro-Kwarteng, S. (2018) Optimal routing of solid waste collection trucks: A review of methods. *Journal of Engineering* 2018 1–12. <https://doi.org/10.1155/2018/4586376>
- Tapaninen, U. (2018) *Logistiikka ja liikennejärjestelmät*. Otatieto, Helsinki.
- Teixeira, J., Antunes, A. P. & Sousa, J. P. (2004) Recyclable waste collection planning – a case study. *European Journal of Operational Research* 158 543–554. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00379-5](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00379-5)
- Tepponen, J. (2018) *Maatalousmuovin keräyspisteiden sijoittaminen Pohjois-Karjalan alueelle. Julkaisematon kandidaatin tutkielma*. Historia- ja maantieteiden laitos, Itä-Suomen yliopisto.
- Tilastokeskus (2017) *Liitetaulukko 10. Keskimääräinen kuljetusmatka ja kuormausaste kotimaan liikenteessä tavaralajeittain vuonna 2017*. 7.5.2019. <[http://www.stat.fi/til/kttav/2017/kttav\\_2017\\_2018-04-26\\_tau\\_010\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/kttav/2017/kttav_2017_2018-04-26_tau_010_fi.html)>
- Tilastokeskus (2019) *Liitetaulukko 1. Yhdyskuntajättekertymä 2017, tonnia (Korjattu 11.1.2019)*. 22.6.2019. <[https://www.stat.fi/til/jate/2017/13/jate\\_2017\\_13\\_2019-01-09\\_tau\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/jate/2017/13/jate_2017_13_2019-01-09_tau_001_fi.html)>
- Tilastotietokanta (2019a) *Taulukko: Maatalous- ja puutarhayritysten lukumäärä muuttujina Vuosi, ELY-keskus ja Tuotantosuuruus*. Luonnonvarakeskus. 30.5.2019. <[http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE\\_02%20Maatalous\\_02%20Rakenne\\_02%20Maatalous-%20ja%20puutarhayritysten%20rakenne/03\\_Maatalous\\_ja\\_puutarhayritykset\\_tuotantos\\_ELY.px/?rxid=001bc7da-70f4-47c4-a6c2-c9100d8b50db](http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/fi/LUKE/LUKE_02%20Maatalous_02%20Rakenne_02%20Maatalous-%20ja%20puutarhayritysten%20rakenne/03_Maatalous_ja_puutarhayritykset_tuotantos_ELY.px/?rxid=001bc7da-70f4-47c4-a6c2-c9100d8b50db)>
- Tilastotietokanta (2019b) *Nautojen lukumäärä muuttujina Vuosi, ELY-keskus ja Luokka*. Luonnonvarakeskus. 30.5.2019. <<http://statdb.luke.fi/PXWeb/pxweb/>>



[fi/luke/luke\\_02%20Maatalous\\_04%20Tuotanto\\_12%20Kotielainten%20lukumaara/07\\_Nautojen\\_lukumaara\\_joulukuussa.px/table/tableViewLayout1/?rxid=69624f57-12b8-492f-bfa6-fa85883f0bba](https://www.luke.fi/luke/luke_02%20Maatalous_04%20Tuotanto_12%20Kotielainten%20lukumaara/07_Nautojen_lukumaara_joulukuussa.px/table/tableViewLayout1/?rxid=69624f57-12b8-492f-bfa6-fa85883f0bba)

Toth, P. & Vigo, D. (2003) The Granular Tabu Search and its application to the Vehicle-Routing Problem. *Journal on Computing* 15(4) 333–346. <https://doi.org/10.1287/ijoc.15.4.333.24890>

Traficom (2019a) *Ajoneuvoveron määrä ja rakenne*. Liikenne- ja viestintäviraston internetsivut. 14.1.2019. <<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/ajoneuvoveron-rakenne-ja-maara>>

Traficom (2019b) *Haluun tavaraliikenneyrittäjäksi*. Liikenne- ja viestintäviraston internetsivut. 6.7.2019. <<https://www.traficom.fi/fi/tavaraliikenneyrittajaksi>>

Valtioneuvoston asetus *jätteen polttamisesta* (151/2013) Annettu Helsingissä 14.2.2013. <<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130151>>

Valtonen, T. (2015) Kuljetusyrityksen kustannuslas-kenta. Teoksessa JAMK Logistiikka (toim.) *Tavara-liikenneyrittäjä*, 245–269. Jyväskylän ammattikor-keakoulu, Jyväskylä.

Väylävirasto (2019) *Digiroad – kansallinen tie- ja katu-verkon tietojärjestelmä*. 17.2.2019. <<https://vayla.fi/avoindata/digiroad>>

Ympäristöhallinto (2013) *Resurssitehokkuus*. Ympäris-töhallinnon internetsivut. 24.3.2019. <[https://www.ymparisto.fi/fi/FI/Kulutus\\_ja\\_tuotanto/Resurssitehokkuus](https://www.ymparisto.fi/fi/FI/Kulutus_ja_tuotanto/Resurssitehokkuus)>

Zsigraiova, Z., Semiao, V. & Beijoco, F. (2013) Opera-tion costs and pollutant emissions reduction by defini-tion of new collection scheduling and optimization of MSW collection routes using GIS. The case study of Barreiro, Portugal. *Waste Management* 33 793–806. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.11.015>

## SÄHKÖPOSTILÄHTEET

Furu, H. (2019) Rani Plast Oy, aluemyyntipäällikkö. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Tepposelle 23.1.2019.

Heikkilä, M. (2019). OP Vakuutus Oy, asiakasneuvoja. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Tepposelle 12.3.2019.

Heikkinen, T. (2018). Kuusakoski Oy, asiakaspäällikkö. Henkilökohtaiset sähköpostiviestit J. Tepposelle 2.-3.1.2018.

Heikkinen, T. (2019). Kuusakoski Oy, asiakaspäällikkö. Henkilökohtaiset sähköpostiviestit J. Tepposelle 7.1.2019.

Karvonen, J.-P. (2019). Fortum Oy, myyntipäällikkö. Henkilökohtaiset sähköpostiviestit J. Tepposelle 4.3.2019.

Kauppinen, M. (2019). OP Vakuutus Oy, asiakasneu-voja. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Tepposelle 10.2.2019.

Lahti, J. (2019). A-Katsastus Oy, aluejohtaja Itä-Suomi. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Tepposelle 29.1.2019.

Nykänen, M. (2019). K1 Katsastus, tekninen asiantun-tija. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Tepposelle 11.2.2019.

Tamsi, J. (2019). LähiTapiola Itä, asiakkuspäällikkö. Henkilökohtainen sähköpostiviesti J. Tepposelle 13.2.2019.