

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Energy Systems
Bioenergian laboratorio

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

160

Mika Aalto, Pallav Shrestha, Raghu KC & Tapio Ranta

SairilaSIM – EcoSairila kiertotalouskeskusalustan simulointi

 LUT
University

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Bioenergian laboratorio



LUT Scientific and Expertise Publications
Tutkimusraportit – *Research Reports*, 160

Mika Aalto, Pallav Shrestha, Raghu KC & Tapio Ranta

SairilaSIM – EcoSairila kiertotalouskeskusalustan simulointi



ISBN 978-952-412-057-9 (PDF)
ISSN-L 2243-3376
ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2024

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



ALKUSANAT

Tämä julkaisu on Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston LUT tuottama loppuraportti tutkimushankkeelle "SairilaSIM - EcoSairila kiertotalouskeskus-alustan simulointi". SairilaSIM-hankkeessa tutkittiin simuloinnin käyttöä kiertotalousalustan tutkimuksessa ja kehittämisessä. Tutkimusalustana toimi Mikkelissä toimiva EcoSairila-kiertotalousalusta, jonka avulla testattiin simulointimallia ja hyödynnettiin heidän mittausdataansa.

SairilaSIM-hanke oli LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmän toteuttama tutkimushanke. Hankkeen vastuullisena johtajana toimi professori Tapio Ranta ja projektipäällikkönä Mika Aalto. Tutkimusryhmästä projektiin osallistuivat projektitutkijat Pallav Shrestha ja tutkijatohtori Raghu KC. Hankkeen toteutusaika oli 1.1.2021 – 30.11.2023.

Tutkimusryhmä esittää kiitokset hankkeen rahoittajille, jotka ovat mahdollistaneet tämän tutkimustyön onnistumisen. Kiitokset kohdistuvat Mikkelin vesilaitokselle, Metsäsairila oy:lle, Suur-Savon Energisäätiö ry:lle sekä Mikkelin kaupungille, joiden tuki ja resurssit ovat olleet ratkaisevia hankkeen toteutuksessa. Haluamme myös kiittää niitä organisaatioita, jotka osallistuivat ohjausryhmään; heidän arvokas työpanoksensa ja aktiivinen yhteistyö SairilaSIM-hankkeen tutkimustoimenpiteiden parissa ovat olleet korvaamattomia.

Mikkelissä, kesäkuu 2023

Tekijät

TIIVISTELMÄ

Tekijät: Mika Aalto, Pallav Shrestha, Raghu KC & Tapio Ranta

Otsikko: SairilaSIM – EcoSairila kiertotalouskeskusalustan simulointi

Vuosi: 2024

Paikka: Lappeenranta

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – *Research Reports*, 160

44 sivua, 12 kuvaa, 12 taulukkoa

Hakusanat: *Kiertotalous, Agentti-pohjainen simulointi, Elinkaarianalyysi, Bio-kaasu, Jätevedenpuhdistamo*

SairilaSIM – EcoSairila kiertotalouskeskusalustan simulointi hanke tarkasteli simuloinnin mahdollisuuksia kiertotalouden tehokkuuden kehittämisessä. Hanke toteutettiin kuudessa eri toimenpiteessä: 1. Tietojen kerääminen ja tietojen sopeuttaminen simulointimalliin, 2. Simulointimallin kehittäminen, 3. Digitaalisen kaksosen kehittäminen alustalle, 4. Elinkaarianalyysi, 5. Hankkeen koordinointi ja tulosten jakelu sekä 6. Loppuseminaari.

Toimenpiteiden tuloksina saatiin simulointimalli ja elinkaarianalyysi tuotettua EcoSairila kiertotalousalustalle. Simulointimallin avulla pystyttiin tutkimaan kiertotalousalustaa skenaario analyysin avulla. Yhtenä tarkastelun kohteena oli biometaanin käyttöä paikallisen matkasuoritteen täyttämässä, kun tämä valmistetaan alueen jätteistä ja vedenpuhdistamon tuottamasta jätelietteestä. Tulokset osoittivat teoreettisen mahdollisuuden tuottaa yli 2500 autolle biometaania, mikä ei ole ole helposti saavutettavissa. Nykykapasiteetillä voidaan tuottaa biometaania noin 950 auton tarpeeseen.

Hankkeessa tarkasteltu Eco-Efficiency indeksi (EEI) osoittautui toimivaksi ja yksinkertaiseksi menetelmäksi kuvata kiertotalouden toiminnan ympäristöystävällisyyttä. Tästä muokattu yleinen versio, General Eco-Efficiency indeksi (GEI), mahdollistaa eri yritysten ja tuotteitten vertailun saman indeksin avulla, joka kiertotalouskonseptin yhteydessä on tärkeää. Hankkeen tulokset osoittavat simuloinnin olevan tehokas tapa tarkastella kiertotalousalustan toimintaa. Simulointimallin hyödyntäminen myös päätöksen teossa on mahdollista. Suurimmaksi haasteeksi simulointimallin kehittämisessä todettiin tiedon tarve. EcoSairilan kiertotalousalusta tietoa tarjoo tähän ratkaisun vedenpuhdistamon osalta, mutta muiden toimijoiden osalta tiedonhankinta on haasteellisempaa ja monimutkaisempaa.

Hankkeen jatkotoimenpide suosituksina on simulointimallin hyödyntäminen päätöksenteon apuna ja tarvittaessa tämän jatkokehittäminen tähän tarkoitukseen. Myös vikatilanteiden analysointi mahdollisuuksia voisi tarkastella tarkemmin simulointimallilla. Ympäristövaikutuksien arvioinnissa elinkaarianalyysin kehittäminen tietokantalähteiseksi mahdollistaisi dynaamisemman analyysityökalun ympäristövaikutuksien arviointiin. Johtopäätöksenä hankkeen tuloksissa nähdään EcoSairilan tietokannan tärkeys kiertotaloustoiminnan ja analysoinnissa. Reaaliaikainen ja kattava mittausdata tarjoaa merkittäviä etuja kiertotaloustoiminnassa.

ABSTRACT

Authors: Mika Aalto, Pallav Shrestha, Raghu KC & Tapio Ranta

Title: SairilaSIM – EcoSairila Circular Economy Hub Platform Simulation

Year: 2024

Place: Lappeenranta

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – *Research Reports*, 160

44 pages, 12 figures, 12 tables

Keywords: *Circular Economy, Agent-Based Simulation, Life Cycle Analysis, Biogas, Wastewater Treatment Plant*

The SairilaSIM – EcoSairila Circular Economy Central Platform Simulation project investigated how simulation could be used to evaluate how effective circular economy strategies are. The project was carried out in six different steps: 1. Data collection and integration into the simulation model, 2. Development of the simulation model, 3. Creation of a digital twin for the platform 4. Life cycle analysis, 5. Project coordination and result dissemination, and 6. The final seminar.

These actions led to the creation of a life cycle analysis and simulation model for the EcoSairila circular economy platform. The analysis of different scenarios was made possible by the simulation model. The project looked into producing bio-methane from local waste and sludge from the water treatment plant to meet the demand for local travel. The results indicated a theoretical possibility to produce bio-methane for over 2500 cars, which is not easily achievable. With the current capacity, bio-methane production can meet the needs of approximately 950 cars.

The Eco-Efficiency Index (EEI) under examination turned out to be a useful and uncomplicated way to characterize how environmentally friendly circular economy activities are. An important feature in the context of circular economy concepts is the ability to compare various businesses and products using the same index thanks to a modified version called the General Eco-Efficiency Index.

The project's outcomes show that using simulation to investigate how the circular economy platform operates is a useful approach. It is also possible to use the simulation model for making decisions. The requirement for information is the main obstacle in the simulation model's development. The data infrastructure of the EcoSairila circular economy platform can be used for the water treatment plant, information retrieval for other stakeholders is more difficult and intricate.

Future actions suggested include using the simulation model as a tool with decision-making, with the possibility of further development for this purpose. It is also possible to analyze fault scenarios. A more dynamic analysis of environmental impacts in environmental impact assessment would be possible if life cycle analysis were to be developed into a database-driven tool. To sum up, the project's outcomes highlight how crucial the EcoSairila database is for analyzing circular economy operations. Comprehensive and real-time measurement data provide major benefits for circular economy initiatives.

SISÄLLYSLUETTELO

1	SAIRILASIM-HANKE.....	1
1.1	Hankkeen tausta.....	1
1.2	Hankkeen tavoitteet ja kohderyhmä	1
1.3	Hankkeen toteutus	2
1.3.1	Tietojen kerääminen ja tietojen sopeuttaminen simulointimalliin. ...	3
1.3.2	Simulointimallin kehittäminen.	3
1.3.3	Digitaalisen kaksosen kehittäminen alustalle.....	3
1.3.4	Elinkaarianalyysi.	3
1.3.5	Loppuseminaari.	4
1.4	Tutkimusraportin rakenne.....	4
2	KIERTOTALOUS SUOMESSA	5
2.1	Kiertotalous.....	5
2.2	Kiertotalouden haasteet	8
2.3	Kiertotalousalustat	9
2.3.1	EcoSairila	9
2.3.2	Muita kiertotalousalustoja	10
2.4	Kiertotalouden tehokkuuden arvioinnin työkalut	10
2.4.1	Elinkaarianalyysi	11
2.4.2	Eco-Efficiency indeksi	12
2.5	Kiertotalous ja simulointi	14
3	ELINKAARIANALYYSI.....	16
3.1	Tavoite	16
3.2	Laajuus.....	16
3.3	Inventointi (LCI).....	17
4	SIMULOINTIMALLI JA TIETOJÄRJESTELMÄ.....	18
4.1	Simulointimallin yksityiskohtainen kuvaus.....	18
4.1.1	Tarkoitus.....	19
4.1.2	Entiteetit, tilamuuttujat ja mittakaava	19
4.1.3	Prosessin yleiskatsaus ja aikataulutus	23
4.1.4	Suunnittelukonseptit.....	25
4.1.5	Alkutila.....	25
4.1.6	Alkuarvot.....	26
4.1.7	Alamallit.....	26
5	TULOKSET	27
5.1	Eco-Efficiency index	27
5.1.1	Elinkaarivaikutusten arviointi (LCIA)	27
5.1.2	Jätevesiasema	30
5.1.3	Biokaasulaitos	30

5.2	EEI-simulaation soveltaminen.....	32
5.2.1	Tarkastelun asettelu.....	32
5.2.2	Tarkastelun tulokset	32
5.2.3	Keskustelu tarkastelusta	34
5.3	Simulointi EcoSairilan mittausdatalla	35
5.3.1	Tarkastelun asettelu.....	35
5.3.2	Tarkastelun tulokset	37
5.3.3	Keskustelu tarkastelusta	37
6	LOPPUPÄÄTELMÄT	40
6.1	Hankkeella saavutettiin.....	40
6.2	Hankkeen tuottama lisäarvo	40
6.3	Suosituksat jatkotoimille	40

LÄHTEET

1 SAIRILASIM-HANKE

SairilaSIM-hanke oli LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmän toteuttama tutkimushanke. Tässä kappaleessa käydään läpi hankkeen tausta, tavoitteet ja toteutus sekä tämän tutkimusraportin rakenne.

1.1 Hankkeen tausta

Kiertotalous tarjoaa mahdollisuuden vähentää riippuvuutta perinteisestä lineaarisesta talousmallista, jossa luonnonvaroja otetaan, käytetään ja hylätään. Sen sijaan kiertotalous pyrkii optimoimaan resurssien käyttöä, pidentämään niiden elinkaarta ja vähentämään hävikkiä. Nykyaikaiset digitaaliset ratkaisut tarjoavat kiertotalousjärjestelmille monia mahdollisuuksia. Yksi mahdollisuus on kiertotalousjärjestelmän simulointi.

SairilaSIM-hanke, keskittyessään kiertotalousalustan simulointiin, tuottaa arvokasta tietoa ja ymmärrystä siitä, miten simulointitekniikat voivat edistää kiertotalouden tavoitteita. Simulointi mahdollistaa ajallisen tarkastelun monimutkaiselle järjestelmälle, mutta tämä ei kerro ympäristö vaikutuksista. Tämän vuoksi simuloinnin tueksi suoritettiin elinkaarianalyysi.

Mikkelissä EcoSairila kiertotalousalusta toimii yhdistää yrityksiä ja pyrkii tehostamaan kiertotaloutta alueella. Ecosairila on erikoistunut vedenkäsittelyyn ja Mikkelin vedenpuhdistamo on merkittävässä osassa kiertotalousalustan toimintaa. EcoSairila tarjoaa loistavan tarkastelu kohteen, nykyaikaisen vedenpuhdistus- ja mittaustekniikan vuoksi. Mittaustuloksia voidaan hyödyntää simulointimallissa, niin lähtöarvoina, kuin mallin luotettavuutta tarkastellessa.

1.2 Hankkeen tavoitteet ja kohderyhmä

Kiertotalousjärjestelmä on monimutkainen kokonaisuus, jossa eri yritysten toimet ovat liitettyinä toisiinsa. Agenttipohjainen mallintamista käytettiin dynaaminen simulointityökalu, jolla voitiin tarkastella monimutkaisia järjestelmiä ja selvittää, miten yhden toimijan päätökset vaikuttivat koko järjestelmään. Mallintaminen mahdollisti eri skenaarioiden tutkimisen virtuaalisessa ympäristössä, mikä poisti tarpeen tehdä kalliita investointeja tai häiritä nykyistä järjestelmää. Simuloinnin tuloksilla tarkasteltiin eri skenaarioiden hyötyjä, haittoja ja mahdollisia riskejä

kustannustehokkaasti. Simuloinnin tukeminen elinkaarianalyysillä mahdollisti toimijan ja koko järjestelmän vaikutuksen ympäristöön tarkastelun, tarjoten päätöksentekijöille tietoa eri ratkaisujen päästöistä ja ympäristövaikutuksista.

Simulointimallia kehitettiin edelleen käyttämään alustan tarjoamaa reaaliaikaista dataa, jolloin voitiin luoda digitaalinen kaksonen. Digitaalinen kaksonen mahdollisti erilaisten tilanteiden kuvaamisen todellisen tilanteen perusteella, luoden turvallisen ympäristön erilaisten riskiskenaarioiden ja toimintamallien tarkasteluun. Vuonna 2015 Euroopan komissio hyväksyi toimintasuunnitelman, joka auttoi Eurooppaa siirtymään kiertotalouteen. Toimintasuunnitelma painotti vahvan perustan luomista investoinneille ja innovaatioille. Mikkelissä toimiva EcoSairilan kiertotalouden kehittämisalusta tarjosi yrityksille mahdollisuuden tehdä investointeja Mikkelin alueelle ja tehdä yhteistyötä muiden alueella olevien yritysten kanssa. EcoSairila tarjosi hyvät edellytykset innovaatioille tarjoamalla vahvan yhteistyö-, osaamis- ja tutkimusympäristön. Nämä ominaisuudet tarjosivat hyvän pohjan simuloinnille, elinkaarianalyysille ja digitaalisen kaksonen kehittämiselle, jolloin voitiin tarkastella ratkaisujen tuomia hyötyjä kiertotalousjärjestelmille.

Hankkeen varsinaiset kohderyhmät olivat kiertotalousalustat, jotka kattavat siihen liittyvät yritykset, tutkimus- ja koulutusorganisaatiot sekä muut toimijat. EcoSairilan alueella välillisiä kohderyhmiä olivat esimerkiksi Mikkelin vesilaitos, Biosairila Oy, Metsäsairila Oy, LUT-yliopisto ja XAMK. Hanke toteutettiin EcoSairila kiertotalousalustalla, mutta tulokset olivat sovellettavissa kaikille samantyyppisille kiertotalousalustoille. Hanke tuotti uutta tietoa virtuaalisten tutkimusmenetelmien käytöstä kiertotalouden edistämisessä, mikä oli hyödyksi paikallisille tutkimusalustoille ja edistää uusien kiertotalousratkaisujen toteuttamista.

1.3 Hankkeen toteutus

Simulointimallin luominen vaatii runsaasti lähtötietoja, jotka tässä tapauksessa oli eri kiertotalousalustalla olevien yritysten käyttämät ja tuottavat materiaalit. Lähtötietoina simulointimallissa käytetään yritysten materiaalivirtoja, eli mitä materiaaleja yritys käyttää ja tuottaa. Lisäksi mallinnettiin yrityksen energiakäyttöä. Lähtötietojen hankinnassa hyödynnettiin Mipro Oy:n toteuttamaa digitaalista kiertotaloushallintajärjestelmää. Mipro Oy:n järjestelmän ja simulointimallin välille oli

rajapinta, jonka avulla malliin voidaan tuoda tietoa järjestelmästä. Elinkaarianalyysin luomisessa käytettiin simuloinnin tuloksia ja analyysi tehtiin GABI ohjelmistolla, joka on yleisesti käytetty elinkaarianalyysisovellus. Hankkeen aikana tehtiin yhteistyötä yritysten kanssa ja keskusteltiin mallin kehittämisestä ja tuloksien hyödyllisyydestä. Tiivisyhteistyö yritysten kanssa paransi mallin luotettavuutta ja käytettävyyttä myös hankkeen jälkeen. Hanke toteutettiin seuraavissa kappaleissa esitettyjen otsikkojen mukaisissa toimenpiteissä.

1.3.1 Tietojen kerääminen ja tietojen sopeuttaminen simulointimalliin.

Toimenpiteessä kerättiin tarvittavia tietoja simulointimallia ja elinkaarianalyysiä varten. Samalla tarkasteltiin mitä tietoja on tarjolla ja tämän perusteella valmistellaan simulointimallia. Toimenpiteen aikana määritettiin tarvittavat alkuarvot sekä simulointimallin tulosten esittämistapa.

1.3.2 Simulointimallin kehittäminen.

Toimenpiteessä kehitettiin simulointimalli kiertotalousmallin yleiskuvaavaksi. Simulointimalli kehitettiin Anylogic™ simulointityökalulla, joka mahdollistaa simulointimallin käyttämisen omana ohjelmana ja verkkopohjaisessa pilvipalvelussa. Mallilla pystytään kuvaamaan yleisiä materiaalivirtoja ja yritysten välisiä virtoja. Mallilla voidaan kuvata yritysten vuorovaikutuksia ja kiertotalousalustan tuomia hyötyjä eri skenaarioissa.

1.3.3 Digitaalisen kaksosen kehittäminen alustalle.

Simulointimalli kehitetään hyödyntämään alueen kiertotaloushallinta-alustaa, jolloin simulointimalli käyttää alueen tuottamia tietoja virtuaalisen alustan luomiseen. Digitaalista kaksosta voidaan käyttää erilaisten riskiskenaarioiden luomiseen ja niiden ehkäisemiseen käytettävien hallintamallien tutkimiseen.

1.3.4 Elinkaarianalyysi.

Toimenpiteessä kehitetään elinkaarianalyysi ja tuotetaan EcoSairilan ympäristövaikutukset nykyisillä materiaalivirroilla ja eri simulointimallin skenaarioitten materiaalivirroilla. Elinkaarianalyysi tarjoaa mahdollisuuden tarkastella ympäristövaikutuksia, mikä lisää simulointimallin hyödyntämistä. Elinkaarianalyysin tuloksilla

tuotettiin Eco-Efficiency indeksi, jolloin ympäristövaikutuksien huomioiminen simulointimallissa oli mahdollista.

1.3.5 Loppuseminaari.

Hankeen lopussa pidettiin loppuseminaari, jonka yhteydessä esitellään hankeen tuloksia ja johtopäätöksiä. Seminaarin yhteydessä esiteltiin laajasti LUT-yliopiston toimintaa Mikkelissä. Loppuseminaarissa esiteltiin SairilaSIM hankeen lisäksi kuuden esittelijän toimesta. Esityksissä oli yritystutkimuksesta lietteen tarkasteluun. Seminaarin esityslista on esitelty Taulukko 1:ssä. Seminaariin osallistui noin 20 henkilöä ja se pidettiin Mikkelin yliopistokeskuksen auditoriossa.

Taulukko 1. Loppuseminaarin esitykset.

Avaus	Johdanto seminaariin
LBS	Yritystutkinta Mikkelissä
Willatus 2.0	Villaketjun vesitehokkuutta, ympäristöystävällisyyttä ja kestävyyttä kehittämässä
Biosavu	Riittääkö Etelä-Savossa puuta energiakäyttöön?
kESme	Kestävää Metsäenergiaa Etelä-Savossa
SairilaSIM	"SairilaSIM - Simulation of the EcoSairila Circular Economy Platform"
SETTLE	Drinking water sludge as a substitute for coagulants in wastewater treatment
Liete EAKR	Empowering the role of sludge in circular economy via applications in water treatment, energy storage, and additive manufacturing
Päätössanat	Yhteenveto

1.4 Tutkimusraportin rakenne

Tämä tutkimusraportti on "SairilaSIM – EcoSairila kiertotalouskeskusalustan simulointi" -hankkeen loppujulkaisu, jonka on koostanut LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmä. Raportissa käsitellään SairilaSIM-hankkeen toteutusta ja tuloksia. Raportissa käydään läpi kiertotalouden tilanne Suomessa, elinkaarianalyysin ja Eco-Efficiency -indeksin käyttö kiertotalouden tarkastelussa sekä simulointitutkimusmenetelmän hyödyntäminen kiertotalousalustan toiminnan tehostamisessa. Raportin lopussa esitellään hankeen tulokset ja johtopäätelmät.

2 KIERTOTALOUS SUOMESSA

Kiertotalous on saanut paljon huomiota osakseen, niin suomessa kuin maailmalla. Kiertotalouden kehittäminen on yksi suomen hallituksen tavoitteista nostaa Suomi alan edellä kävijäksi. Vuonna 2014 tehty Sitran selvityksen mukaan (Arponen et al. 2014), kiertotalous loisi Suomella merkittäviä talouskasvun mahdollisuuksia. Esi-merkkinä käytetään vuonna 2012 jätteiden käyttöä Suomessa. Silloin suomessa tuotettiin noin 90 miljoonaa tonnia, josta 54 %:a ei hyödynnetty millään tavalla ja vain 12 % meni energia käyttöön. Vuonna 2022 Sitra julkaisi 10 ehdotusta kiertotalou-
delle edistämiseksi suomessa (Sinervo et al. 2022) ja Vuonna 2023 Valtion neu-
vosto tuotti oman julkaisun suomen kiertotalouden kehittämiseksi (Haila et al.
2023). Kiertotalous on selkeästi merkittävä ala, niin talouskasvun kuin tutkimuksen
kannalta.

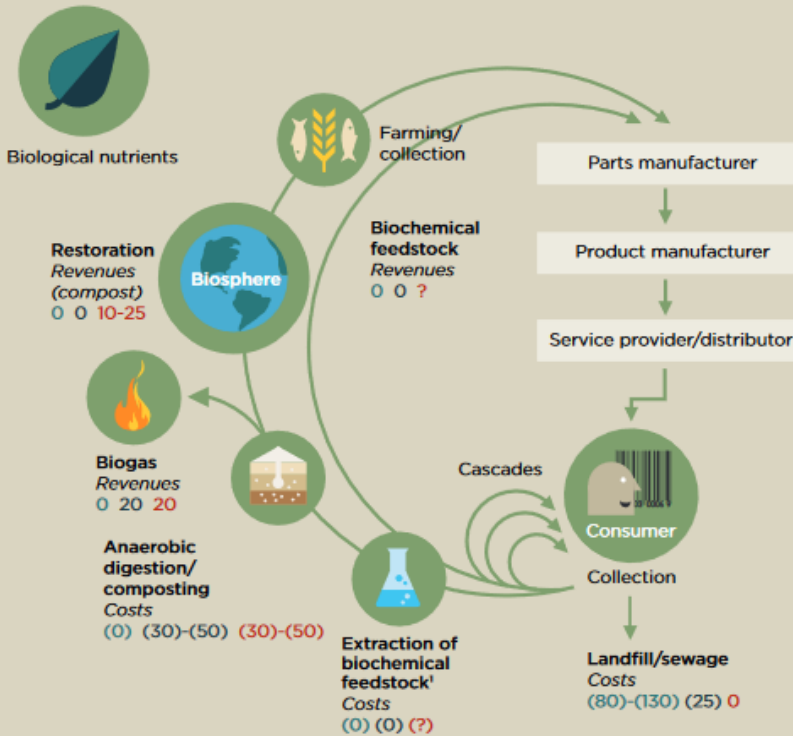
Tässä kappaleessa käydään läpi mikä kiertotalous on ja minkälaisia kiertotalous-
alustoja Suomessa on. Tarkastelu keskittyy Mikkeliissä olevan EcoSairilan toimin-
taan, joka oli hankkeessa simulointimallin testausalusta.

2.1 Kiertotalous

Kiertotalous on lähestymistapa, joka pyrkii minimoimaan jätteen muodostumista ja maksimoimaan resurssien tehokasta käyttöä. Sen perusajatus on siirtyä perinteisestä lineaarisesta mallista, jossa luonnonvarat otetaan, käytetään ja hävitetään, kohti suljettua kiertoa, jossa resurssit kiertävät ja hyödynnetään mahdollisimman pitkään (McDonough and Braungart 2010). Toisin sanoen kiertotaloudessa siirretään materiaalit, jotka ovat elinkaarensa lopussa, uudeksi resurssiksi. Tällä toiminta tavalla vähennetään, niin materiaalien tarvetta, kuin energian käyttöä. Kiertotalou-
den ympäristö vaikutus mahdollisuuksista kertoo muovin kierrätyksen ja orgaaniset
jätteet käyttö liikenne polttoaineen, biokaasun tuotannossa, teknis-talouden poten-
tiaalin hyödyntämisellä voidaan pienentää suomen päästöjä noin 4 % (Seppälä et
al. 2016). Orgaanisen jätteen hyödyntämisellä biokaasu ja kompostin tuotannolla
voidaan saavuttaa merkittävästi lisäarvoa (Kuva 1).

FIGURE 14
Biological nutrients: Diverting organics from the landfill to create more value

EUR/tonne collected—negative numbers indicate a cost



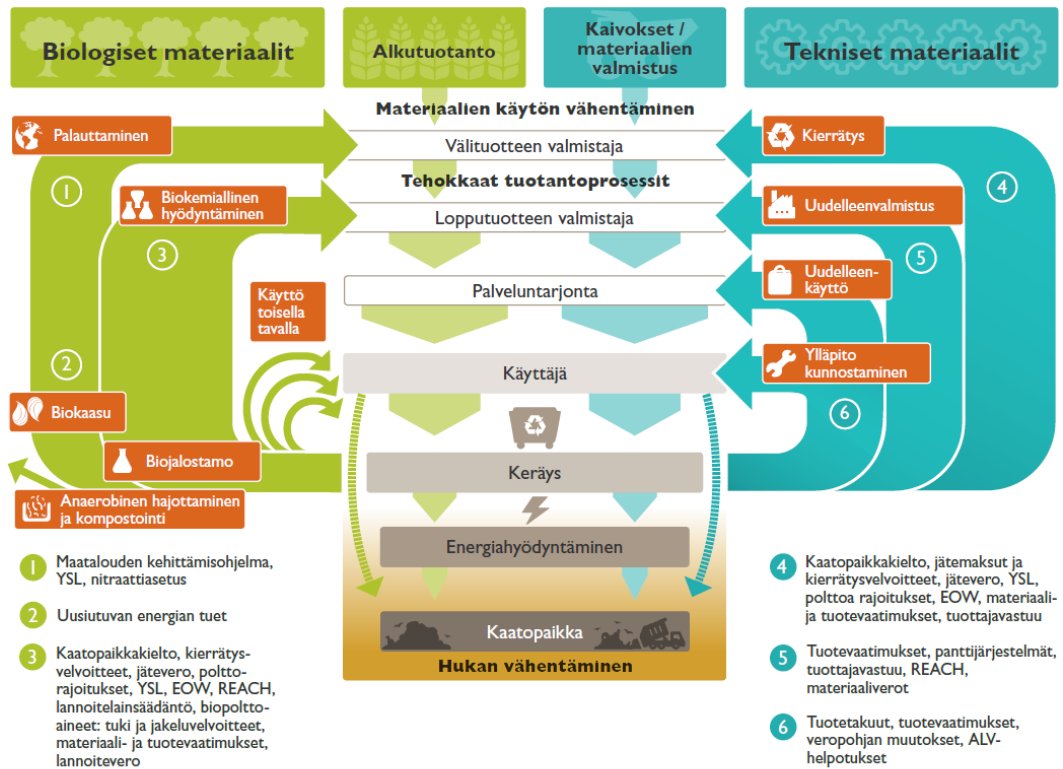
	Status quo	Transition scenario	Advanced scenario
Total cost	(80) - (130)	(55) - (75)	< (30) - (50)
Total revenue	0	20	> 30 - 45
Total net gain	(80) - (130)	(35) - (55)	- (0) - ?

¹ Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input
 Source: Ellen MacArthur Foundation circular economy team

Kuva 1. Bioluonnonvarat: Organisen aineksen ohjaaminen kaatopaikalta luomaan enemmän arvoa (Ellen MacArthur Foundation 2013).

Nykyinen lineaarinen talousjärjestelmä muuttaminen kiertotalousjärjestelmäksi vaatii muutoksia kaikilla yhteiskunnan tasoilla ja eri toimijoiden kesken (Seppälä et al. 2016). Kuvassa 2 on esitelty kiertotalouden kehiiä ja ohjauskeinoja. Huomataan kiertotalouden olevan monimutkainen järjestelmä, jossa toimet vaikuttavat koko järjestelmän läpi.

Kiertotalouden kehät ja esimerkkejä ohjauskeinoista



© SYKE. Lähde: Seppälä ym. 2016. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisu 25/2016.

Kuva 2. Suomen ympäristökeskuksen näkemys kiertotalouden kehistä ja ohjauskeinoista. (Seppälä et al. 2016)

Vedenkäsittely on tärkeä osa kiertotaloutta, koska puhdasvesi on keskeinen luonnonvara (Smol, Adam, and Preisner 2020, 682-697). Kiertotalouden avulla voidaan laskea veden puhdistamisesta syntyvä lieteen käsittely kustannuksia sekä erottaa erilaisia raaka-aineita, esim. fosfaattia (Ellen MacArthur Foundation 2013). Kiertotalous vedenkäsittelyssä tarkoittaa kestävien ja resurssitehokkaiden ratkaisujen etsimistä, jotta voimme säilyttää veden puhtautta, vähentää ympäristövaikutuksia ja kierrättää materiaaleja. Haasteena kiertotalouteen siirtymisessä on tarve koko järjestelmän muutokseen.

Kiertotaloustoimintaa aloittavien yritysten yhtenä haasteena on monimutkainen luvitusprosessi (Seppälä et al. 2016). Kiertotalousalustat ovat yksi mahdollisuus näiden ratkaisemisessa, kun alustalla on valmiiksi tiedossa paikallinen toiminta tapa ja pystyvät käytännön läheisesti neuvomaan ja auttamaan aloittavia yrityksiä lupaprosessin lisäksi yhteistyökumppanien ja tutkimustoiminnassa.

2.2 Kiertotalouden haasteet

Kiertotalouden edistäminen Suomessa kohtaa monenlaisia haasteita, jotka heijastelevat sekä teknillisiä, taloudellisia että lainsäädännöllisiä näkökohtia. Merkittävin taloudellinen este kiertotalouden edistämiseksi liittyy neitseellisen raaka-aineen alhaisempaan hintaan verrattuna kierrätettyihin materiaaleihin. Tämä hintaero luo epätasapainoa, mikä vaikeuttaa kierrätysprosessien kilpailukykyä ja houkuttelevuutta. Tämä haaste lisääntyy, kun lainsäädännön kierrätetyille materiaaleille ei ole asetettu selkeitä etuja verrattuna neitseellisiin raaka-aineisiin. Jos sivuvirroista peräisin olevat materiaalit joutuvat kohtaamaan samat ehdot kuin neitseelliset, se luo ylimääräisiä esteitä kiertotalouden etenemiselle. Kiertotalouden monimutkaisuus luo omia teknillisiä ongelmia. Esimerkiksi laadun valvonta vaatii uusia ratkaisuja ja vaikka uusia tekniikoita on kehitetty, näiden pilotointi on hidasta (Nousiainen, Kokko, and Kuure 2022).

Kiertotalouden edistäminen on haasteellista ja Suomessa tämä on ollut hidasta. Indikaattoreitten mukaan, kierrätysaste on alle EU:n keskiarvon ja kotimaisen materiaalin kulutus ei ole juurikaan vähentynyt. Yhdyskunnanjätteen kierrätysaste tippui 38 % vuonna 2021 ja uuden jäteasetuksen mukaan Suomen tulisi saada kierrättää vähintään 55 % yhdyskunnan jätteistä vuoteen 2025 mennessä. Positiivisena merkkinä on ekoinnovaatioiden olevan EU:n huippua. Suomen Ekoinnovaatioindeksi oli 145 vuonna 2019, joka oli kolmanneksi korkein Euroopassa. (Pirtonen and Kaariaho 2022)

Kiertotalous on uusi juttu, jos verrataan perinteiseen lineaariseen talouteen, ja tämän yhteydessä kielikin on vielä muuttumassa. Termistö on monimutkaista ja kehittymässä. Vuonna 2016 Sitra julkaisi artikkelin kiertotalouden termeistä ja tätä artikkelia on päivitetty vuosina 2017, 2018, 2019 ja 2022 (Sjöstedt 2018). Moni asiantuntijakin käyttää eritermejä ja esimerkiksi kiertotalousalusta, jota tämä raportti käyttää Ecosairila alustan yhteydessä, on jossain yhteydessä osaamiskeskus, kehittämisalusta, Ekoteollisuuspuisto tai kiertotalouden klusteri. Kaikki nämä termit ovat päteviä tietyssä kontekstissa, mutta ne voivat aiheuttaa hämmennystä kulluttajille, erityisesti kun puhutaan tietystä kiertotalouden toimijasta kuten EcoSairilasta. Yhtenäisen kielenkäytön merkitys korostuu, kun pyritään välittämään selkeää viestiä kiertotalouden periaatteista ja toimijoista.

2.3 Kiertotalousalustat

Kiertotalousalusta on järjestelmä, joka tarjoaa mahdollisuuden erilaisten organisaatioiden, yritysten ja muiden toimijoiden yhteistyölle kiertotalouden edistämiseksi. Alustan tarkoituksena on mahdollistaa resurssien tehokkaamman käytön, jätemäärien minimoimisen ja kestävien käytäntöjen kehittämisen. On hyvä huomioida, että myös kehittyvien digitaalisten alustojen avulla on mahdollista tehostaa kiertotaloutta fyysistä alustaa. Kiertotalousalustalla erilaiset toimijat voivat jakaa tietoa, resursseja ja innovaatioita, luoden näin synergioita, jotka edistävät kestävästä kehitystä ja ympäristövastuullisuutta. Tärkeää on, että alustalla pyritään luomaan verkostoja ja rakenteita, jotka tukevat kiertotalouden periaatteita ja mahdollistavat uusien ratkaisujen kehittämisen ja käyttöönoton. Kiertotalousalusta toimii alustana, missä eri sidosryhmät voivat yhdessä työskennellä kohti yhteistä tavoitetta resurssitehokkaamman ja kestävämmän tulevaisuuden saavuttamiseksi. Työ- ja elinkeinoministeriön tekemässä selvitystyössä ei löytynyt olemassa olevia tietotalustoja, jotka toimisivat päätöksenteon tukena kiertotaloustoimijoille (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022).

2.3.1 *EcoSairila*

Työ- ja elinkeinoministeriön tuo esille digitaalisia ratkaisuja, joiden avulla voitaisiin luoda lisäarvoa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022). EcoSairila – kiertotalous alusta toimii fyysisenä alustana Mikkelissä, jonne tulevat yritykset voivat sijoittaa tuotantoa, mutta tämän lisäksi on olemassa digitaalinen EcoS-tietotalusta, jonka avulla yritykset voivat seurata reaaliajassa ympäristövaikutuksia (EcoSairila 2023a).

Miksei Mikkelin esityksessä Mikkelin kaupunginhallitukselle kerrottiin EcoSairilan vision olevan: ”kansallisesti merkittävä ja kansainvälisesti kiinnostava kiertotalouden ja vesiosaamisen keskus” (Miksei Mikkelä 2021). Tämän vision toteuttamiseksi EcoSairila alusta toimii vahvana tutkimusalustana. Tätä todistaa yli 30 teollisuusalueen kehittämishanketta (EcoSairila 2023b). Tutkimustoiminnassa on mukana paikallisia tutkimuslaitoksia, kuten LUT-Yliopisto, Xamk, ESEDU ja Helsingin yliopisto.

2.3.2 Muita kiertotalousalustoja

EcoSairila ei ole Suomen ainut kiertotalousalusta. Ekoteollisuuspuistojen verkostot sivusto listaa 15 ekoteollisuuspuistoa (Taulukko 2), joihin EcoSairila kuuluu (Kemin Digipolis Oy 2023).

Taulukko 2. Ekoteollisuuspuistojen verkoston listaamat ekoteollisuus puistot (Kemin Digipolis Oy 2023).

Sijainti	Nimi
Forssa	Envi Grow park
Turun seutu	Green Industry Park Oy
Hämeenlinna	MORE
Joensuu	GreenPark
Kemi	Digipoli
Kemijärvi	Biopark
Kokkola	Kokkola Industrial Park
Mikkeli	EcoSairila
Nokia	ECO3
Pori ja Harjavalta	Pori-Harjavallan ekoteollisuuspuisto
Porvoo	Kilpilahden teollisuusalue
Riihimäki	Kiertotalouskylä
Salo	Lounapuisto
Turku	Smart Chemistry Park
Äänekoski	Plänet B

Kiertotalousalustat eivät eroa vain sijainnin mukaisesti, vaan jokaisella on oma erikoisalansa, kuten nimistä voi päätellä. Erikoistumisia on esimerkiksi kemianteollisuus, jätteiden lajittelu ja puuteollisuus. Yhteisenä teemana voidaan nähdä alueellinen yhteistyö, ympäristövastuu ja tutkimuksen tärkeä merkitys alueen toiminnassa.

2.4 Kiertotalouden tehokkuuden arvioinnin työkalut

Kiertotalouden tehokkuus määräytyy asetettujen määritysten mukaan. Nämä määritykset voivat liittyä ympäristöystävällisyyteen, materiaalitehokkuuteen tai biopohjaisten raaka-aineiden käytön lisäämiseen. Koska kiertotalouden tehokkuudelle ei ole yhtä ainoaa oikeaa määritelmää, ei myöskään ole yhtä ainoaa oikeaa tapaa mitata sitä. SairilaSIM-hankkeessa toteutettu elinkaarimallinnus on yksi

mahdollinen lähestymistapa, mutta lisäksi hankkeessa tutkittiin Eco-Efficiency -indeksin käyttöä kiertotalouden tehokkuuden mittaamisessa.

2.4.1 Elinkaarianalyysi

Elinkaarianalyysi on työkalu, joka on tarkoitettu arvioimaan tuotteiden tai palveluiden mahdollisia ympäristövaikutuksia. Sitä käytetään tunnistamaan mahdolliset mahdollisuudet parantaa tuotteen tai palvelun ympäristötehokkuutta sen elinkaaren eri vaiheissa. Elinkaarianalyysi voi auttaa päätöksentekijöitä suunnittelemaan ja muotoilemaan tuotteita parantaakseen niiden ympäristötehokkuutta. Sitä voidaan myös käyttää markkinointityökaluna, joka auttaa asiakkaita tekemään tietoon perustuvia päätöksiä valinnoistaan. Elinkaarianalyysiä on käytetty kulutustuotteiden ympäristövaikutusten arvioimiseen 1960-luvulta lähtien, ja se on ollut standardoitu Kansainvälisen standardointiorganisaation (ISO) toimesta vuodesta 1994 lähtien (McManus and Taylor 2015, 13-26).

Elinkaarianalyysi suoritetaan neljässä eri, mutta toisiinsa liittyvässä vaiheessa: tavoitteen ja rajauksen määrittely, elinkaari-inventaario (LCI), elinkaaren vaikutusarviointi (LCIA) ja tulkinta. Tutkimuksen järjestelmäraajat ja laajuus määritellään projektin tavoitteen perusteella, ja näiden rajojen sisällä oleva relevantti tieto kerätään. Vaikutusarvioinnissa inventaario muunnetaan ympäristövaikutuksiksi, joita sillä saattaa olla. Viimeisessä vaiheessa, tulkinnassa, inventaarion ja vaikutusarvioinnin tulokset käsitellään, täydennetään ja tehdään suosituksia ensimmäisessä vaiheessa määriteltyjen tavoitteiden perusteella. Lisäksi nämä vaiheet ovat toisiinsa liittyviä ja niitä voidaan säätää tutkimuksen laajuuden mukaan (Finnish Standards Association 2006). Käytännössä jotkin vaiheet voivat kuitenkin jäädä huomioimatta tai niitä saattaa ohittaa tulosten esittämisessä .

Elinkaarianalyysi on keskeinen työkalu tuotesysteemien suunnittelussa kiertotalouden viitekehyksessä, jonka tavoitteena on vähentää jätettä, edistää kestävyyttä ja maksimoida resurssitehokkuus. Elinkaarianalyysi tarjoaa kattavan näkemyksen eri osatuotteiden järjestelmien ympäristövaikutuksista. Tarkan datan kerääminen on olennaista, ja vaikka elinkaarianalyysi on yleensä tuotespesifistä, relevanttia tietoa voidaan hankkia kirjallisuudesta tai vastaavista järjestelmistä. Varovaisuutta on noudatettava eri lähteistä peräisin olevan datan vertailussa johtuen menetelmien

vaihtelusta. Monimutkaisissa järjestelmissä, kuten jäteveden käsittelylaitoksissa, joustava datankeruu on elintärkeää. Nämä laitokset koostuvat useista tuotteista, prosesseista ja komponenteista, joista jokaisella on oma ympäristövaikutuksensa. Relevanteimman datan kerääminen mahdollistaa yksityiskohtaisen analyysin, ottaen huomioon järjestelmän moninaiset näkökulmat.

Kiertotalous korostaa eri tuotesysteemien välistä yhteenliittymistä. Monimutkaisissa suunnitelmissa, kuten jäteveden käsittelylaitoksissa, aiemmin laskettujen LCA-tulosten integroiminen syöttötietoina parantaa järjestelmän dynaamista ymmärrystä (Chen and Huang 2019, 210-217). Analyytikot voivat mallintaa komponenttien väliset vuorovaikutukset, mahdollistaen kokonaisvaltaisen näkemyksen ympäristövaikutuksista. Tämä lähestymistapa auttaa päätöksentekijöitä tunnistamaan parannuskohteet, optimoimaan resurssien kohdentamisen ja toteuttamaan strategioita koko ympäristöjalanjäljen minimoimiseksi. Yhteenvetona LCA tarjoaa tehokkaan viitekehyksen tuotesysteemien arvioimiseen kiertotaloudessa. Sen joustavuus ja aiempien LCA-tulosten integrointi mahdollistavat sidosryhmien päätöksenteon, edistäen kestävyyttä ja resurssitehokkuutta monimutkaisten ja toisiinsa kietoutuneiden järjestelmien keskuudessa.

2.4.2 Eco-Efficiency indeksi

ISO 14045 (International Organization for Standardization, 14045 2012) tarjoaa viitekehyksen Eco-Efficiency Indexille (EEI), joka perustuu elinkaarianalyysin standartiin, ISO 14040 (International Organization for Standardization, 14040 2006). Elinkaarianalyysin lisäksi EEI pyrkii sisällyttämään tuotteen tai tuotejärjestelmän arvon.

Eco-Efficiency -indeksin (EEI), painotettujen ympäristövaikutusten (WEI) ja yleisen EEI:n (GEI) tarkoituksena on visualisoida eroja, jotta voidaan tehdä oikeudenmukaisia ja perusteltuja vertailuja ja kuvata kiertotalouden toteutuksia. GEI on myös suunniteltu olevan ymmärrettävämpi ilman tietoa tuotejärjestelmästä, koska se esitetään rahassa, mikä ylittää sosiaaliset, taloudelliset, poliittiset ja maantieteelliset rajat.

Eco-Efficiency Index on arviointikehys, joka johdetaan elinkaarianalyysin kehyksestä. Kuten elinkaarianalyysi, EEI riippuu määritellyistä tavoitteista ja rajauksista. Tuotteen tai tuotejärjestelmän osalta se voidaan määritellä "painotetun lisäarvon" ja "painotetun ympäristövahingon" summaksi.

$$EEI = w_1 I_1 - w_2 I_2$$

- Missä I_1 on lisäarvo. Lisäarvon määritelmä voi vaihdella. Yleisesti se määritellään joko: tuotteen kustannuksena, mukaan lukien elinkaaren kustannukset; tai tuotteen kilpailukykyisenä markkinahintana.
- w_1 on I_1 :n painokerroin. Se asetetaan yleisesti arvoksi 1.
- I_2 tarkoittaa ympäristövahinkoa valittuna yksikkönä, joka on merkitty ympäristövaikutusarvioinnin mittariksi. Esimerkiksi hiilijalanjälki, globaali lämpenemispotentiaali 100 vuotta ilman biogeenistä hiiltä tai reseptin yksikköarvo. I_2 on negatiivinen vahingon merkitsemiseksi. Eli jos tuotejärjestelmä on hiilenegatiivinen, sillä on positiivinen I_2 -arvo, joka lisää Eco-Efficiency Indexiin.
- w_2 on ympäristövahinkorangaistuksen painotuskerroin. Esimerkissämme käytämme hiiliveroa painokerroin, joka mahdollistaa tutkimuksen arvon ja sen ympäristösuorituksen kokonaisarvioinnin yhtenä yksikkönä.
- $-w_2 I_2$ on tuotejärjestelmän painotettu ympäristövaikutus.

Tuotejärjestelmän arvo voidaan valita heijastamaan esimerkiksi; sen resurssi-, tuotanto-, toimitus- tai käyttötehokkuus tai näiden yhdistelmä. Arvo voidaan ilmaista rahamääräisinä tai muina arvotekijöinä.

EEI-arviointi koostuu viidestä vaiheesta (International Organization for Standardization, 14045 2012):

1. Tavoitteen ja rajauksen määrittely (sisältäen järjestelmän rajat, tulkinnan ja rajoitukset)
2. Ympäristöarviointi
3. Tuotejärjestelmän arvon arviointi
4. Eco-efficiencyn määrittely
5. Tulkinta (sisältäen laadunvarmistuksen)

Menetelmä jakaa useita piirteitä elinkaarianalyysistä, kuten elinkaarinäkökulma, kattavuus, toiminnallisen yksikön lähestymistapa, iteratiivisuus, läpinäkyvyys ja prioriteetti.

Koska EEI voi vaihdella tutkimuksesta riippuen, yhdenmukaisen mittarin käyttämiseksi yhdessä järjestelmässä voidaan määritellä Yleisen ekotehokkuusindeksi

(GEI) , joka ottaa käyttöön "kehdestä hautaan" -lähestymistavan ja GWP 100 vuotta (pois lukien biogeeninen hiili) mittarina ympäristövahinkojen arvioimiseksi. Se on ilmaistu yksikkönä hiilidioksidiekvivalentin massana.

$$GEI = \alpha - wI$$

- Missä α on tuotteen arvo
- w on ympäristövahinko, joka on GWP 100 vuotta (pois lukien biogeeninen hiili),
- I on hiilivero tai muu ympäristövahinkokustannus,
- wI tarkoittaa ympäristövahinkorangaistusta.

GEI voidaan myös laskea markkinoiden hyvitysten sisällyttämiseksi. Esimerkiksi laskettaessa GEI vedyllä liikennepolttoaineille, hyvitys voidaan ottaa huomioon visualisoimaan mahdollista markkina-arvoa dieselöljyn korvaamistapauksessa. Hyvityksen arvo on negatiivinen, jos korvattavalla tuotteella on suurempi ympäristövahinko.

$$GEI_{offset} = \alpha - wI + O$$

- Missä O on hyvityksen arvo

2.5 Kiertotalous ja simulointi

Kiertotalouden tutkimisessa simulointi tarjoaa mahdollisuuden tarkastella monimutkaista järjestelmää virtuaalisessa ympäristössä. Tämä mahdollistaa järjestelmän toiminnan ennustamisen ja monimutkaisten vuorovaikutuksien kuvaamisen. Simulointia voidaan hyödyntää usealla tavalla kiertotalouden tutkimisessa. Aiheeseen liittyvän katselmus jakoi simuloinnin hyödyntämisen kuuteen pääryhmään (Sassanelli, Rosa, and Terzi 2020, 53-59):

1. Suunnitteluvaihtoehtojen valinta (design alternatives selection)
2. Päätöksentukityökalut (decision-support tools)
3. Online-alustat ja seuranta teollisen symbioosin (IS) osalta, (online platforms and monitoring for Industrial Symbiosis (IS))
4. Kierrätystehokkuus ja keskeiset suoritusindikaattorit (KPI) (recycling performance and Key Performance Indicators)
5. Materiaali- ja teknologiset ominaisuudet (material and technological properties)
6. Hyödyt ja liiketoiminnalliset vaikutukset (benefits and business impacts)

Haasteena simuloinnissa on tiedon tarve, jonka täyttämässä kiertotalousalustojen data-alustat voivat tarjota ratkaisun. Alustalta kerättyä dataa voidaan hyödyntää simuloinnissa, ja tuloksia voidaan käyttää päätöksenteossa, riskianalyyssissä tai kiertäystehokkuuden mittaamisessa. Kun simulointimalli kuvaa todellisen maailman järjestelmää, voidaan tätä simulointimallia kutsua digitaaliseksi kaksosiksi. Yhtenä määritelmänä digitaalinen kaksonen vastaa reaaliaikaisesti järjestelmää, jolloin malli tarvitsee reaaliaikaisesti tietoa. Reaaliaikaisen tiedon hakeminen järjestelmästä voidaan toteuttaa rajapinnan avulla, joka määräytyy kiertotalousalustan järjestelmästä ja käytetystä simulointimenetelmästä.

Tämän raportin yhteydessä käytetään Anylogic simulointityökalua, joka tarjoaa mahdollisuuden hyödyntää Agenttipohjaista simulointia. Kyseistä työkalua on käytetty aikaisemminkin kiertotalouden tarkastelussa ja se on todettu olevan erittäin kykenevä vangitsemaan taustalla olevat käyttäytymistekijöitä ja vaikutteita kiertotalouden tutkimuksessa (Lieder, Asif, and Rashid 2017, 1377-1402).

3 ELINKAARIANALYYSI

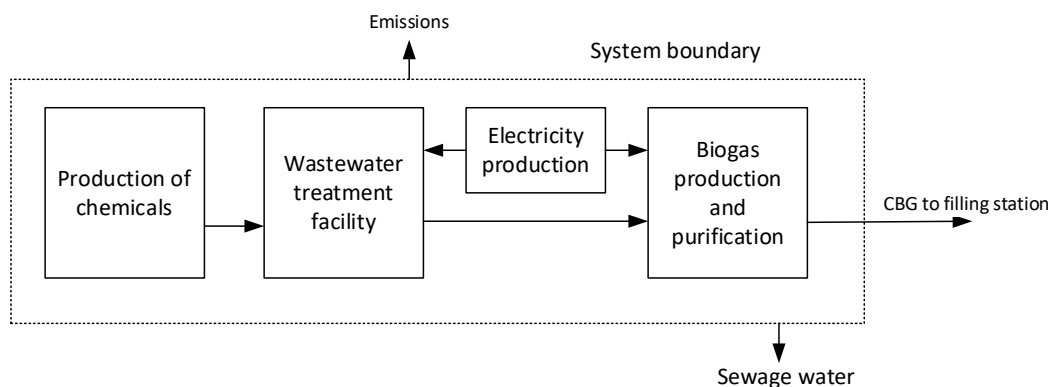
Hankkeessa toteutettiin elinkaarianalyysi Mikkelin jätevesilaitokselle. Tavoitteena oli saada käsitys jäteveden käsittelyn ympäristövaikutuksista eri tuotantovaiheissa. Elinkaarianalyysillä tuloksena saatiin merkittävät päästölähteet, joiden avulla tunnistettiin kestävyysvaikuttavia tekijöitä ja tehtiin perusta Eco-Efficiency indeksin laskemiselle. Näiden tietojen avulla pystytään kehittämään tarkempia strategioita ympäristöystävällisemmän ja resurssitehokkaamman jätevedenkäsittelyn saavuttamiseksi.

3.1 Tavoite

Elinkaarianalyysin tavoitteena on analysoida Mikkelin jätevedenpuhdistamon hiilijalanjälkeä, joka toimittaa lietteensä lähellä sijaitsevalle biokaasulaitokselle, Bio-Sairilalle. Tämän cradle-to-grave -tutkimuksen tulos ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenttina ($\text{kgCO}_2\text{-eq/m}^3$ käsiteltyä jätevettä). Päästötuloksia käytetään sen jälkeen simulointimallin logiikassa, joka mahdollistaa erilaisten skenaarioitten suorittamisen dynaamisessa ympäristössä.

3.2 Laajuus

Tutkimus voidaan perinteisesti kuvata cradle-to-grave -tutkimukseksi, koska se sisältää kemikaalien ja sähkön tuotantoprosessin jätevedenpuhdistamossa. Jäteveden tuotanto- ja keräysprosessit eivät kuitenkaan ole relevantteja tutkimuksessa. Liette kuljetetaan bioreaktoriin, joka tuottaa biokaasua. Biokaasu puhdistetaan ja puristetaan edelleen liikennepolttoaineeksi, jota kutsutaan paineistetuksi biokaasuksi (CBG), vaikka kyseessä on biometaani. Kaaviokuva tutkitusta järjestelmästä ja sen rajoista on esitelty Kuva 3.



Kuva 3. Kaaviokuva tutkitun järjestelmän ja sen rajasta.

3.3 Inventointi (LCI)

Inventaariot kerätään eri kirjallisuudesta, raporteista ja jätevedenpuhdistamolta saaduista paikallisista tiedoista. Kemikaalien ja suorien päästöjen määrät, yksiköt sekä lähteet on esitelty Taulukko 3:ssa.

Taulukko 3. Elinkaarilaskennan inventoinnissa käytetyt kemikaalit ja näiden arvot.

Kemikaalit	Vuodessa	per m ³ jätevesi	Lähde
Kalkki	781728,68 l	0,24704 l	Paikalliset tiedot
Polymeeri (PAC)	2572721,95 l	0,81302 l	Paikalliset tiedot
Natriumhypokloriitti	18618,09 l	0,00588 l	Paikalliset tiedot
Sitruunahappo	24138,66 l	0,00763 l	Paikalliset tiedot
Sähkö	2646817 kWh	0,83644 kWh	Paikalliset tiedot
Suorat päästöt			Lähde
Hajapäästöt N ₂ O	1,6	% kokonaistyy- pestä, joka ilme- nee N ₂ O kaasuna	(IPCC 2006)
CH ₄ (kompostoin- nista)	10	gCH ₄ /kg kuiva- aineesta	
Metaani vuodot	0,4	% tuotetusta biokaasusta	(Tauber et al. 2019)

4 SIMULOINTIMALLI JA TIETOJÄRJESTELMÄ

Hankeessa hyödynnettiin agenttipohjaista simulointimenetelmää. Kehitetty mallin tarkempi kuvaus on esitetty tässä kappaleessa. Kuvattu kohde on viimeisin malli versio, joka pystyy hyödyntämään EcoSairilan tietöalustan tietoja. Nämä tiedot tuodaan malliin manuaalisesti taulukkotiedostosta. Simulointimallia hyödynnetään tässä versiossa 5.3 kappaleessa ja aikaisempi versio, jossa alkudata syötettiin käsin malliin, hyödynnetään kappaleessa 5.2.

Simulointimalli mahdollistaa kiertotalouden eri tekijöiden vuorovaikutuksien tarkastelun. Jotta vuorovaikutukset saadaan hyvin esille, simulointimalli tarvitsee kuvata riittävällä tasolla. Hankeen alussa pyrittiin kehittää yksinkertainen malli, jossa ainoastaan raaka-aineet, tuotteet ja jätteet olisi kuvattu. Valitettavasti tämän tason tarkastelussa ei simulointimalli tuonut merkittävää hyötyä ja samoihin johtopäätöksiin päästäisiin yksinkertaisemminkin menetelmillä. Tämän vuoksi simulointimalli kehitettiin monimutkaisempaan. Haasteena monimutkaisemmassa simulointimallissa on tietojen saatavuus. EcoSairilan tietöalusta tarjoaa tähän vastauksen, mutta ainoastaan vesilaitoksen osalta. Simulointimalli hyötyisi merkittävästi, jos vastaavanlainen mittausdata olisi tarjolla muistakin toimijoista. Simulointimallia pystyi käyttämään ilman mittausdataa, kuten kappaleessa 5.2.1. Tällöin tarvitsee vain tehdä oletuksia, joka vähentää tulosten luotettavuutta.

EcoSairilan tietöalustan mittausdatoja ei käytetty pelkästään alkuarvoina, vaan myös simulointimallin validoinnissa. Simulointimallin luotettavuuden ja uskottavuuden kannalta on tärkeää pystyä näyttämään mallin toimivan suunnitellulla tavalla. Kyseessä ollessa virtuaalinen kaksonen, paras tapa validoida malli on vertailla tuloksia todellisiin mittauksiin. Hyvin usein tämä ei ole mahdollista ja EcoSairilan datajärjestelmä mahdollistaa tämän.

4.1 Simulointimallin yksityiskohtainen kuvaus

Hankeessa luotiin simulointimalli, jonka yksityiskohtainen kuvaus on esitetty ODD-protokollan (Overview, Design concepts, and Details) mukaisesti (Grimm et al. 2010, 2760-2768).

4.1.1 Tarkoitus

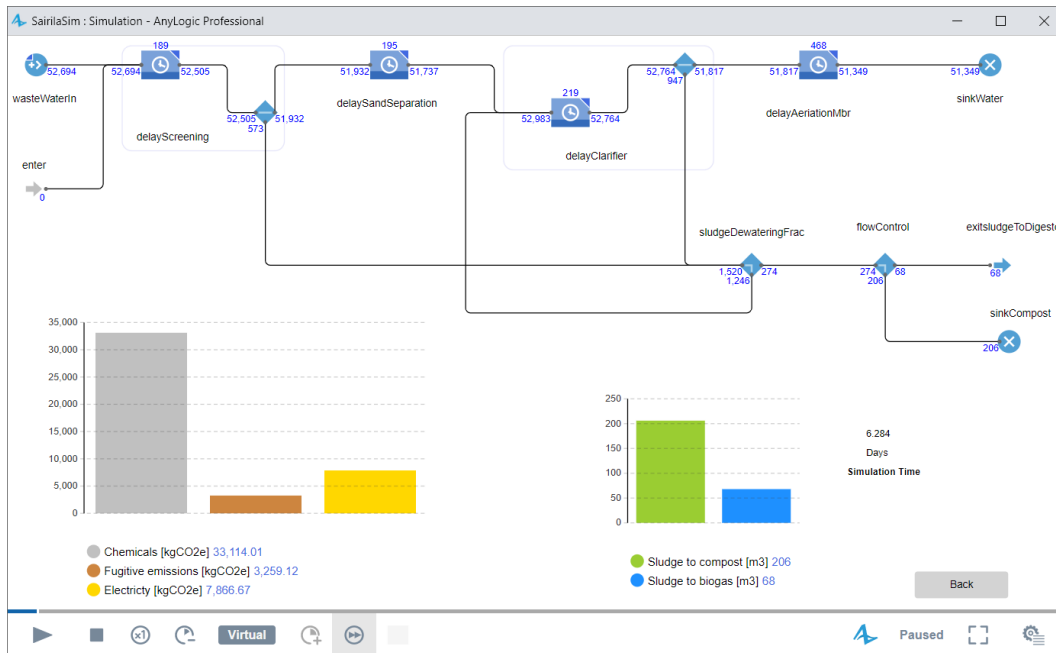
Kiertotalouden ja synergian arvioimiseksi malli simuloi jäteveden käsittelylaitosta ja biokaasulaitosta liitettyyn järjestelmään. Tavoitteena on tutkia, miten näiden laitosten yhteiselo edistää kiertotalouden tavoitteita, mukaan lukien resurssitehokkuus ja uusiutuvan energian tuotanto.

4.1.2 Entiteetit, tilamuuttujat ja mittakaava

Malli koostuu yleisestä pääagentista (Main agent), jätevedenkäsittelylaitoksen erikoistuneesta agentista (WasteWaterTreatment) ja biokaasulaitoksesta erikoistuneesta agentista (BioGasPlant), yritysagentista (Companies) ja materiaali agentista (Material). Pääagentti toimii ympäristöoliona, jossa toissijaiset agentit toimivat. Jätevedenkäsittelylaitoksen agentin tilamuuttujat, jotka edustavat jätevedenkäsittelyprosessin näkökohtia on esitelty Taulukko 4 ja Kuva 4 on agentin visualisointi simulointimallissa.

Taulukko 4. Jätevesipuhdistamon tilamuuttujat

Nimi	Kuvaus	Yksikkö
wasteWaterIn	Jäteveden tulo	m ³ /h
delayScreening	Siivilöinnin kesto	h
selectOutputLightFrac	Siivilän lietteen poisto	%
delaySandSeparation	Hiekkapuhdistuksen kesto	h
delayClarifier	Selkeytyksen kesto	h
clarifierSludgeFrac	Selkeytyksestä lietteen poisto	%
sludgeDewateringFrac	Lietteen kuivauksen veden poisto	%
delayAeriationMbr	MBR puhdistuksen kesto	h
flowControl	Lietteen ohjaus biokaasutuotantoon tai kompostiksi	%
sinkWater	Puhdistettu vesi	-
sinkCompost	Komposiin menevä liete	-
exitsludgeToDigester	Biokaasulaitokseen menevä liete	-



Kuva 4. Jätevesipuhdistamon agentin visualisointi simulointimalissa.

BioGasPlant-agentti määritellään vastaavasti tilamuuttujilla, jotka on esitelty Taulukko 5. Agentin visualisointi simulointimalissa on esitelty Kuva 5.

Taulukko 5. Biokaasulaitoksen tilamuuttujat.

Nimi	Kuvaus	Yksikkö
sourceWasteMaterial	Jättemateriaali sisään	m ³ /h
enterSludge	Liete sisään	-
queueDigester12	Mädättömän 1 ja 2 jono	-
queueDigester3	Mädättömän 3 jono	-
selectDigester12	mädättömän 1 ja 2 valinta	-
delayDigester1	Mädätyksen kesto 1	h
delayDigester2	Mädätyksen kesto 2	h
delayDigester3	Mädätyksen kesto 3	h
exitDigester1	Mädätyksestä poistuminen 1	-
exitDigester2	Mädätyksestä poistuminen 2	-
exitDigester3	Mädätyksestä poistuminen 3	-
enterDigesters	Mädätyksestä agentin tulo	-
sinkRemoveAgent	Mädätyksestä tulleen agentin tuhoaminen	-
sourceBiogas	Biokaasun tuotanto	-
selectOutputDistribution	Biokaasun käytön valinta	%
queueBiogasCleaning	Biokaasun puhdistuksen jono	-
delayCleaning	Biokaasun puhdistuksen kesto	h
selectOutputCO2out	Hiilidioksidin poisto	%
sinkTransport	Liikennepolttoaineeksi	-
sinkHeating	Lämmitykseen	-
sourceMessWater	Mädätyslietteen luonti	-
selectOutputMesswater	Mädätyslietteen käsittelyn valinta	%
queueDewatering	Mädätyslietteen kuivatuksen jono	-
delayDewatering	Mädätyslietteen kuivatuksen kesto	h
sinkWWT	Mädätyslietteen vedenpoisto	-
sinkLosses	Mädätyslietteen häviöitten poisto	-
sinkSludge	Kuivatun mädätyslietteen poisto	-

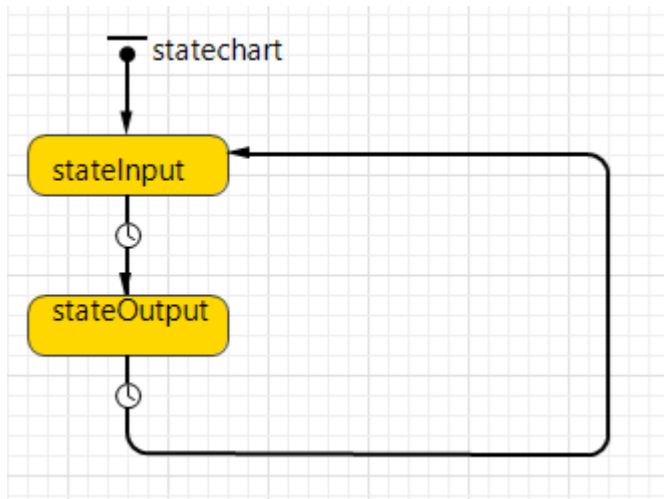


Kuva 5. Biokaasulaitoksen agentin visualisointi simulointimallissa.

Company agentti on yksinkertaisempi ja sisältää vain attribuutteja ja tilakaavion (Kuva 6). Attribuutit (Taulukko 6) kertovat käytettävät materiaalit ja energiat. Tilakaavio kuvaa tuotteen valmistusprosessia, jossa kaksi eri aikavakioita määrittävät tuotannon keston. Company agentti on kuvattu hyvin yksinkertaisesti mahdollistaen sen kuvaamaan monenlaisia yrityksiä ja mahdollistaa useamman yrityksen määrittämisen simulointia varten.

Taulukko 6. Company agentit attribuutit.

Atribuutti	Selite
id	Tunniste
name	Nimi
elecIn	Sähkö sisään
heatIn	Lämpö sisään
waterIn	Vesi sisään
materialsIn	Materiaalit sisään
waterOut	Vesi ulos
GoodsOut	Hyödykkeet ulos
WasteOut	Jäte ulos
hazardsWasteOut	Ongelmajäte ulos
co2Out	Hiilidioksidi ulos

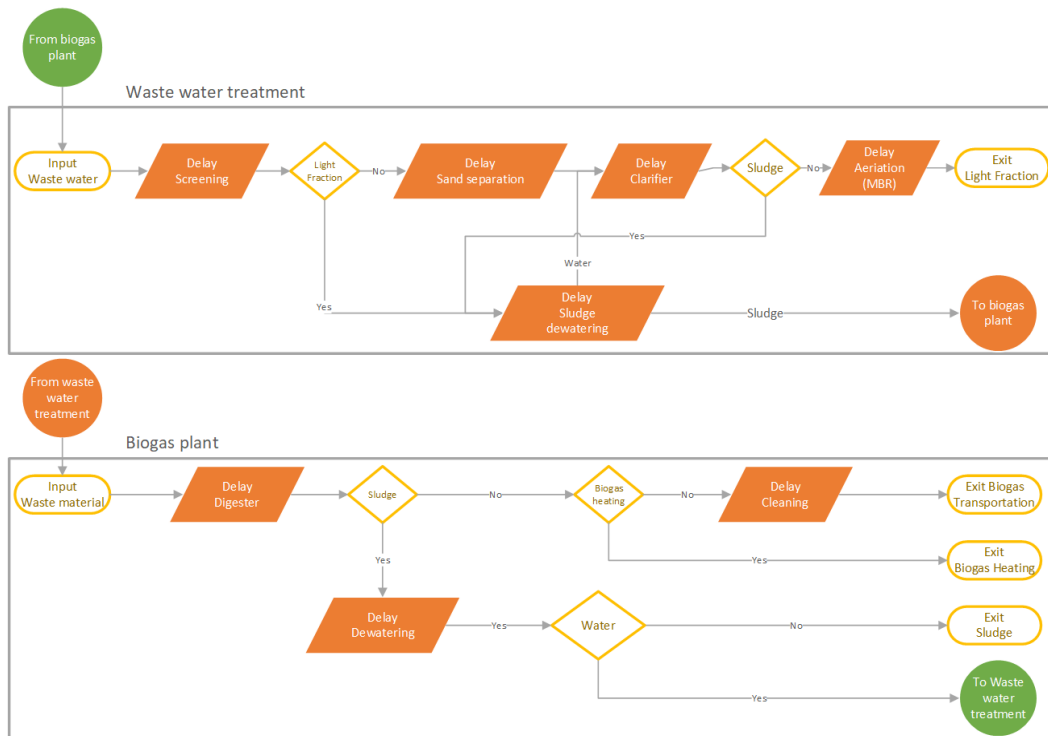


Kuva 6. Yritysentin tilakaavio.

Mallin tavoitteet eivät edellytä tilan esittämistä eli eri muuttujien sijainnilla ei ole mallissa merkitystä. Mallin ajallinen resoluutio on minuutti.

4.1.3 Prosessin yleiskatsaus ja aikataulukutus

Simulointimallin pääagentissa asustavat jätevedenkäsittelylaitoksen ja biokaasulaitoksen agentit luovat suurimman osan mallin prosesseista. Näiden kahden agentin prosessi on kuvattu Kuva 7.



Kuva 7. Vedenkäsittelylaitoksen ja biokaasulaitoksen toiminta vuokaaviona.

Mallissa materiaali kulkee vuokaavioiden läpi. Vedenkäsittelylaitokselle jätevesi saapuu Input waste water -syötteestä, joka sisältää sekä biokaasulaitoksen jätevettä että muualta saapuvan jäteveden. Aluksi materiaali ohjataan karkeasuodatukseen (Screening), jonka jälkeen vesi jatkaa hiekkapuhdistukseen ja syntynyt liete ohjataan veden erotukseen (Sludge dewatering). Vesi puhdistetaan hiekkaerotuksella (Sand separation) ja selkeytetään (Clarifier). Viimeiseksi vesi ilmataan kalvobioreaktorissa (Aeriation (MBR)), jonka jälkeen vesi ohjataan purkukaiivoon (Exit Light Fraction). Hiekka erotuksesta, selkeytyksestä ja ilmauksesta syntyvä liete ohjataan lietevedenerotukseen. Vedenerotuksessa syntynyt vesi ohjataan takaisin selkeytymään ja liete ohjataan biokaasulaitokselle raaka-aineeksi.

Biokaasulaitokselle jättemateriaali tulee Input waste material -syötteestä, joka sisältää orgaanista jätettä sekä vesilaitokselta että muualta laitokselle saapuvasta jättemateriaalista. Materiaalit ohjataan ensin mädättämöihin (digester). Mallissa on kuvattu kolme mädättämöä, jotka vuokaaviossa on yksinkertaistettu yhdeksi elementiksi. Mädättömästä materiaalista osa ohjataan joko kuivaamoon tai biokaasuna käytön valintaan. Biokaasun ja mädättömän lietteen määriä ohjataan alamallilla, joka on esitelty kappaleessa 4.1.7 Alamallit. Jos biokaasun käyttötarkoitus on

liikenne, se ohjataan puhdistukseen. Puhdistukseen menevästä biokaasusta poistetaan hiilidioksidi, jonka jälkeen se poistuu liikennekäyttöön. Biokaasu, joka ohjataan lämmityskäyttöön, menee suoraan poistoelementtiin. Kuivaukseen menevästä materiaalista, nestemäinen osuus ohjataan vedenpuhdistamolle ja kiinteä osuus lietteen poistoelementtiin.

4.1.4 Suunnittelukonseptit

Malli on ytimeltään rakennettu tapahtumapohjaisena simulointina, joka kuvaa jätevedenkäsittelyä ja biokaasuprosesseja käsitteellisen virtakaavion avulla. Se käyttää viivettä ja valitse-tuotos-elementtejä vangitakseen ajalliset näkökohdat, määritellen aikakestoja ja kapasiteetteja kullekin prosessille. Tämä suunnittelu välttää agenttien sopeutumiskyvyn tai käyttäytymisen nimenomaista sisällyttämistä, keskittyen enemmän materiaalivirtoihin prosessien läpi. Päämääränä on abstraktisti kuvata jätevedenkäsittely- ja biokaasuprosesseista, ja tulokset keskittyvät kasvihuonekaasujen tuotannon mittaamiseen mitattavana tuloksena.

Vuorovaikutusten osalta malli sisältää materiaalin siirrot eri elementtien ja materiaaliagentin välillä. Erityisesti jätevesiagentti tuottaa lietteen, jota käytetään jatkossa raaka-aineena biokaasilaitoksessa. Nämä vuorovaikutukset toteutetaan kuitenkin suorina materiaalin siirtoina, ilman nimenomaista agentilta-agentille kommunikaatiota tai sopeutuvaa päätöksentekoa. Tämä lähestymistapa virtaviiivaistaa mallin keskittymistä fyysisiin prosesseihin, korostaen yksinkertaisuutta ja selkeyttä jätevedenkäsittely- ja biokaasuntuotantosysteemien kuvauksessa.

4.1.5 Alkutila

Mallin maailman alkutila, simulaation alussa aikaan $t = 0$, luonnehtii materiaaliagenttien puuttumista järjestelmästä. Materiaaliagentit tuodaan mukaan perustuen EcoSairila-tietojärjestelmästä saatuihin syötteisiin. Järjestelmä ei toimi täydellä teholla alussa, ja tämä on otettava huomioon simulaatiossa. Vaihtoehtoina ovat jättää ensimmäisen kuukauden tulokset huomioimatta tai antaa mallin toimia kuukauden ilman syötteitä.

4.1.6 Alkuarvot

Mallin tiedot on joko kerätty laitosten asiakirjoista tai ne on tuotu EcoSairila-mittausjärjestelmästä Mipro Oy:n tarjoaman rajapinnan kautta. Vesilaitokseen tulevan vesimäärä on tietokannasta, mutta biokaasulaitoksen jätemäärät syötetään käyttäjän toimesta. Samoin aineominaisuudet, kuten tiheydet, ja biokaasun muutosprosessin attribuutit. Vesilaitoksen ja biokaasulaitoksen ominaisuudet, kuten prosessien kestoajoja ja kapasiteettejä on myös käyttäjän syötettävissä simuloinnin alussa.

4.1.7 Alamallit

Biokaasun saatavuus arvioidaan alamallilla, jossa mädättämöstä tulleet agentit muutetaan kaasuksi ja lietteeksi. Biokaasun määrä arvioidaan materiaali agentin massan, metaanin potentiaalin avulla ja metaanin osuus biokaasussa arvojen avulla. Laskenta suoritetaan seuraavanlaisesti:

$$V_{biomethane} = m_{material} * VS_{Material} * CH4_{potential}$$

$$V_{biogas} = V_{biomethane} * C_{CH4}$$

Missä

$V_{biomethane}$ on tuotetun biometaanin tilavuus kuutiossa

$m_{material}$ on materiaalin massa tonneissa

$VS_{material}$ on kaasuuntuvan aineen määrän osuus

$CH4_{potential}$ on metaanin potentiaali kaasuuntuvien määrästä

V_{biogas} on tuotetun biokaasun tilavuus

C_{CH4} on metaanin osuus biokaasussa

5 TULOKSET

Hankkeessa tuotettiin elinkaarianalyysi, jota hyödynnettiin Eco-Efficiency indeksin laskennassa. Tämän lisäksi luotiin simulointimalli, jota käytettiin vesilaitoksen ja biokaasulaitoksen tarkastelussa. Tämän jälkeen mallia kehitettiin käyttämään EcoSairilan tietojärjestelmän tarjoamaa mittausdataa. Tässä kappaleessa ensin esitellään Eco-Efficiency indeksin ja elinkaarivaikutusten arviointi. Tämän jälkeen tarkastellaan EEI-simulointia ja esitellään simulointimallilla luotu skenaario, jossa paikalliset jätteet hyödynnetään biometaanin tuottamiseen.

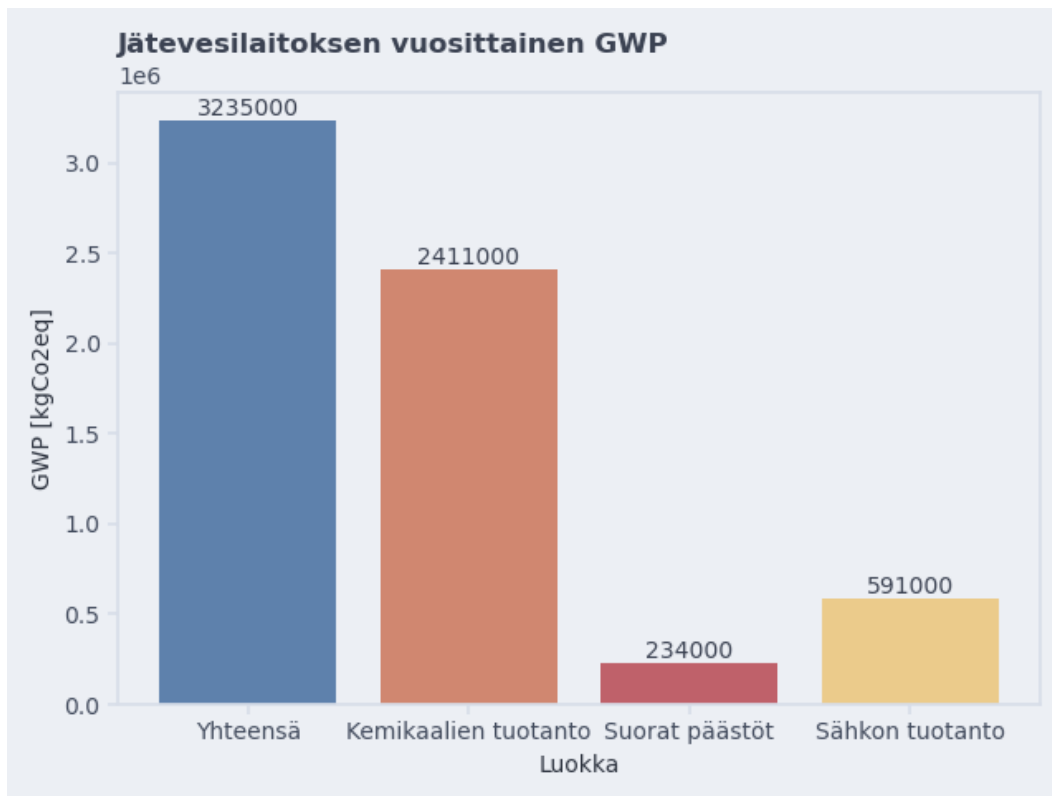
5.1 Eco-Efficiency index

Käyttämällä simulaatiomallia ekotehokkuusindeksin (EEI) kehittämiseen ja laskemiseen ympäristövaikutusten taloudelliseen vaikutusten visualisoimiseen. Tässä on esimerkki laskenta suljetusta järjestelmästä, jossa jätevesi käsitellään laitoksessa ja liete ohjataan biokaasuntuotantoon. Tarkastelu tehdään molemmille laitoksille erikseen ja näiden tulokset voidaan yhdistää yleisen ekotehokkuusindeksin mukaisesti.

Biokaasu laitokselle tulee biojätettä, mutta laskenta suoritetaan vain lietteelle. Lietteen määrä laitokselle on arvioitu simulaatio mallilla. Jätevesilaitoksella käsitellään vuotuinen jätevesimäärä ja päästöt sekä hyvitykset arvioidaan ”well to filling station” periaatteella.

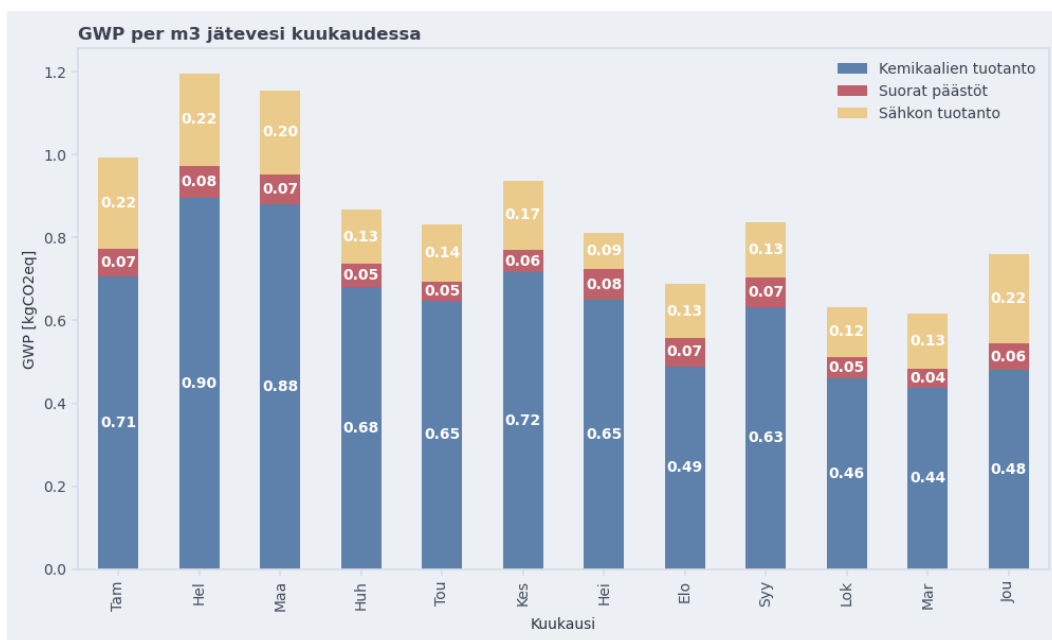
5.1.1 Elinkaarivaikutusten arviointi (LCIA)

Elinkaarianalyysin tavoitteena on analysoida Mikkelin jätevedenpuhdistamon hiilijalanjälkeä. Hiilijalanjälki ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenttina ($\text{kgCO}_2\text{-eq per m}^3$ käsiteltyä jätevettä) CML2001 (2016) standardin mukaisesti GWP 100 vuotta (pois lukien biogeeniset CO_2 -päästöt). Tulosten mukaan (Kuva 8), jäteveden käsittelyyn liittyvät vuotuiset päästöt olivat yhteensä 3225 tonnia $\text{CO}_2\text{-eq}$. Suurin osa päästöistä johtui kemikaalien, kuten kalkin, koagulanttien ja sitruunahapon, tuotannosta.



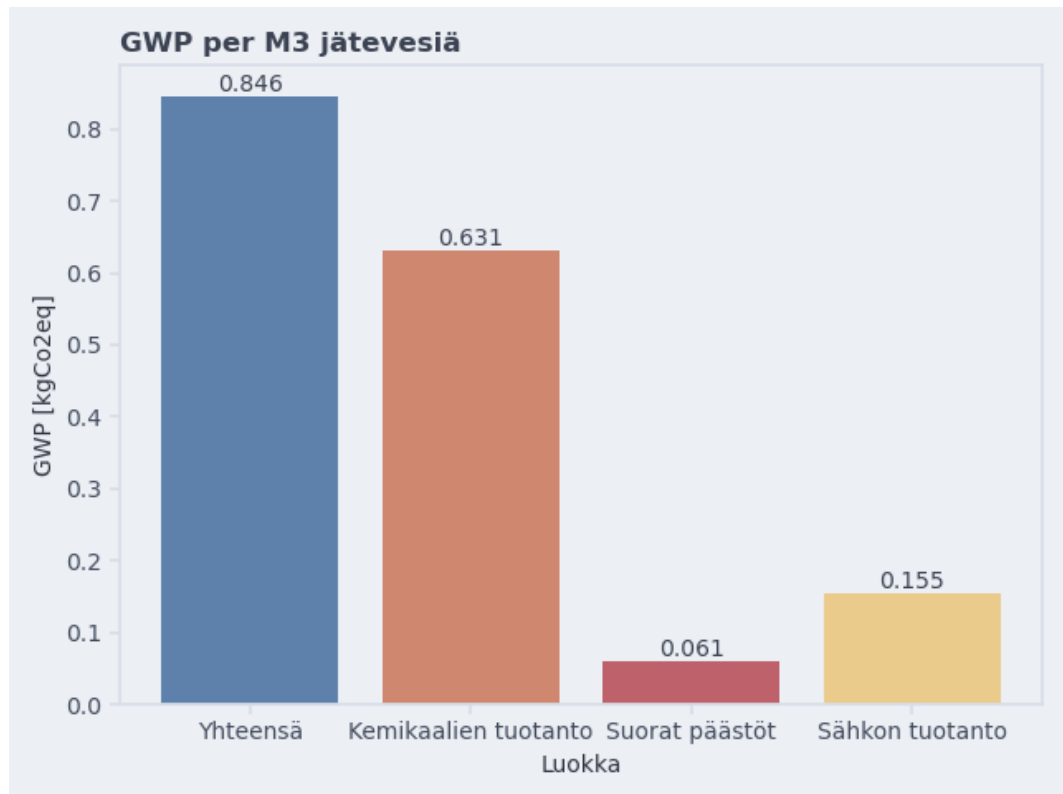
Kuva 8. Elinkaarianalyysin tulokset vesilaitoksen vuosi päästöistä.

Vesilaitoksen päästöt jakaantuvat eri kuukausille, kuten Kuva 9 osoittaa.



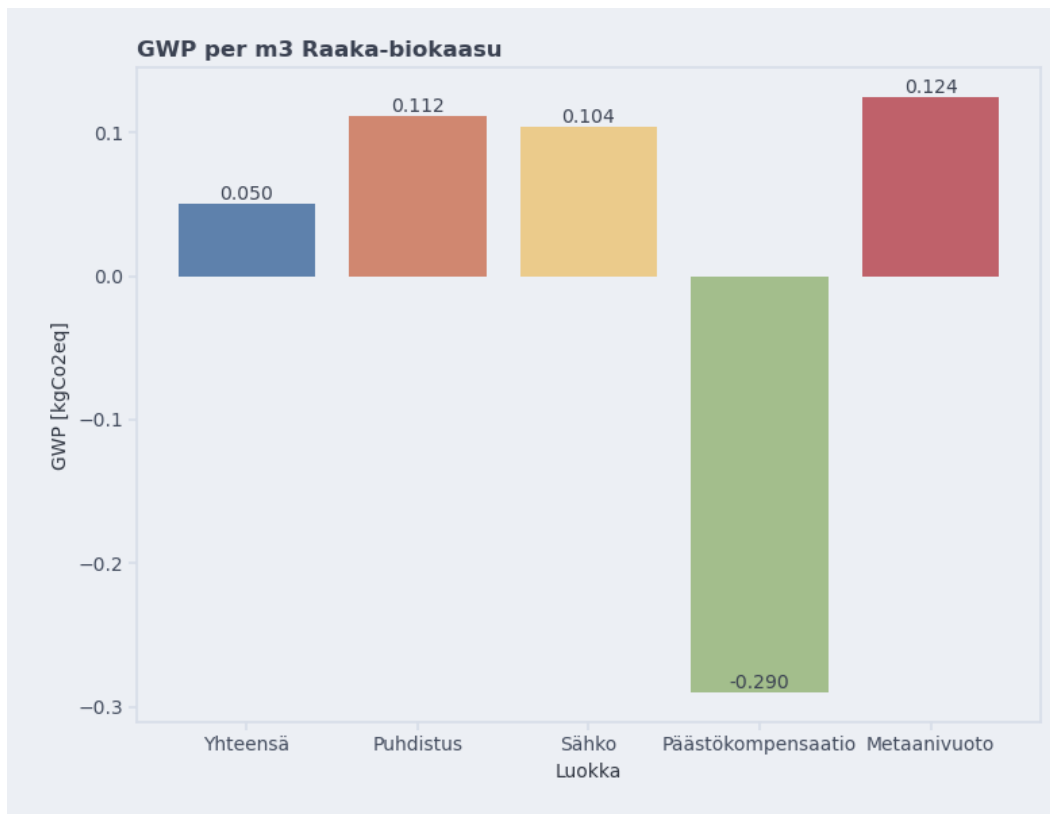
Kuva 9. Vesilaitoksen päästöjen kuukausivaihtelu.

Vastaanotettua jätevettä kohti vapautui 846 gCO₂-eq päästöjä, joista suurin osa johdettiin kemikaalien tuotannosta. Tämän jälkeen seurasi suomalaisen sähkösekoituksen tuotanto (Kuva 10).



Kuva 10. Globaali lämpenemispotentiaali laskentayksikköä kohden (m³ käsiteltyä jätevettä)

Kuva 11 havainnollistaa, että jäteveden käsittelyyn liittyvät päästöt olivat 50 gCO₂-eq per käsitelty kuutiometri jätevettä, kun huomioitiin 290 g päästöjen hyvitys. Päästöjen hyvitys laskettiin puhdistetun biokaasun ja maakaasun nettohyötyarvon perusteella. Muita päästöjen aiheuttajia olivat puhdistus (112 g) Sphera-tiekannalla laskettuna, käytetty sähkö (suomalainen sekoitus) (104 g) ja metaanivuoto anaerobisesta käsittelystä (124 g).



Kuva 11. Globaali lämpenemispotentiaali tuotettua raakabiokaasua kohden.

5.1.2 Jätevesiasema

Kaupallisessa tuotteessa arvonlisävero voidaan laskea seuraavasti:

$$VA = WP - LCC$$

Missä VA on arvonlisä, WP on myyntihinta ja LCC on elinkaarikustannukset.

Jäteveden käsittelyjärjestelmässä arvonlisän määrittäminen ei ole yhtä suoraviivaista, koska yksikön käsitellyn jätevedellä ei ole markkinahintaa. Arvonlisän laskemiseen voidaan kuitenkin käyttää erilaisia lähestymistapoja. Oletetaan, että 1 m³ vettä voidaan palauttaa 0,6 m³ hanavettä. Arvonlisä voidaan arvioida potentiaalisen hanaveden perusteella, jonka 3,80 €/m³ hintaa käytettiin laskennassa. Hanaveden tuotannosta arvioitiin syntyvän 2700 tonnia CO₂eq

5.1.3 Biokaasulaitos

Jäteveden lietteen koostumus arvioitiin olevan noin 21 % kuiva-ainetta, ja 78 % kuiva-ainemäärästä arvioitiin olevan biologista ainesta. Biologinen aines (haihtuva

aines) sisälsi raakabiokaasupotentiaalin 0,981 normaalia kuutiometriä kilogrammaa kohti (981 m³ tonnia kohti) haihtuvaa ainetta. Raaka biokaasu on 60 % metaania. Puhdistuksen jälkeen puhdas biometaani on 96 % metaania. Haihtuvasta aineesta peräisin oleva biometaanipotentiaali on 0,381 m³ per kg tai 381 m³ tonnia haihtuvaa ainetta. Lietteiden ominaispaino oletettiin olevan sama kuin vedellä.

Potentiaalinen biokaasun saanti yhdestä kuutiosta lietteestä on näiden arvioiden mukaan 0,155 Nm³. Biokaasun kuutiometriä kohti laskettu LCA oli 0,2284 kgCO_{2e}. Biokaasu oletetaan korvaavan maakaasun käyttöä liikenteessä joten vastaava hyvitys laskettiin olevan -0,290 kgCO_{2e}. Biometaanin hinta on 1,80 €/kg, mikä on 1,65 € per Nm³ biometaania ja 1 € per Nm³ raakabiokaasua. Yhden kuution raakabiokaasun GEI on 0,9974 €.

Kun 6000 tonnia jäteveden lietettä käsitellään biokaasulaitoksella vuosittain, järjestelmän kokonais-GEI on 928 euroa vuodessa, joka voidaan laskea vesilaitokselle biokaasu hyvitykseksi.

Laskennan alkuarvot ja tulokset näkyvät Taulukko 7.

Taulukko 7. EEI laskennassa käytetyt arvot ja tulokset.

Jätevesi sisään	3160000 m ³
Puhdistettu vesi	1900000 m ³
Veden arvo	3,80 €/m ³
Arvonlisä (α)	7 220 000 €
GWP(w)	2700 tonnia CO _{2e}
Hiilivero (I)	52 €/tCO _{2e}
Ympäristövahinkorangaistusta	140 400 €
GEI_{vuosittain}	7 079 600 €
Liete biokaasutuotantoon	6000 t
Biokaasupotentiaali	0,155 m ³
Biokaasu tuotanto	930 m ³
Biokaasu hyvitys	928 €

5.2 EEI-simulaation soveltaminen

Simulointimallin ja EEI käytöstä tehtiin yksinkertainen esimerkki, missä suoritettiin kaksi simulointia, yksi vedenpuhdistamolaitokselle ja toinen biokaasulaitokselle.

5.2.1 Tarkastelun asettelu

Hankkeessa tarkasteltiin kahta erilaista tilannetta yksinkertaisella simulaatiomallin ja EEI-sovelluksen testaamiseksi. Ensimmäisessä tapauksessa arvioitiin EEI:ä itenäisenä vedenkäsittelylaitoksena. Tässä skenaariossa vedenkäsittelylaitos tuotti hanasta saatavaa vettä, jonka kustannukset olivat arviolta 3,80 euroa kuutiometriltä. Simulaation kesto oli asetettu 24 tunniksi.

Toisessa tapauksessa vedenkäsittelylaitoksen lietettä hyödynnettiin biokaasulaitoksessa raaka-aineena. Biokaasulaitoksen simuloinnin kesto oli asetettu 30 päiväksi, mikä vastaa arvioitua aikaa yhden 500 m³ lietekuorman käsittelyyn.

Ympäristövahinkojen ehkäisyyn käytettiin hiilidioksidihinnoittelua, joka on 52 €/tCO_{2e} muille fossiilisille polttoaineille kuin liikennepolttoaineille ja 78 €/tCO_{2e} liikennepolttoaineille (The word bank 2019). Biokaasu on biogeenistä hiiltä, jolloin hiilidioksidipäästöt voidaan olettaa nollassa. Biokaasun käyttö oletettiin olevan 50% lämmitykseen ja 50% liikenteeseen. Biokaasun oletettiin korvaavan maakaasua, ja laskennassa käytettiin hiilitekijää 1,55 tCO₂/m³ korvatun kasvihuonekaasupotentiaalin määrän laskemiseen (Department of Energy 2021).

5.2.2 Tarkastelun tulokset

Elinkaarenkustannus jäteveden käsittelyyn asetettiin nolnaan euroon, koska kuution jäteveden käsittelykustannukset ovat minimaaliset. Taulukko 8 esittää simulointitulokset pelkälle vedenkäsittelylaitokselle.

Taulukko 8. Simulointimallin tulokset jätevesilaitokselle.

	Simulaatio tulos	Per kuutio	Yksikkö
Käsitelty jätevesi	8088	1	m ³
Lietteen osuus	323,5	0,0015	m ³
Tuotettu Kevytfraktio	7741,4	0,9571	m ³
Pix (Rauta(II) Sulfaatti)	355,2	0,0439	l
Pax (Alumiinikloridi)	679,2	0,084	l
Lipeä	2856	0,3531	l
GWP (Kasvihuonekaasupotentiaali)	319,5	0,0395	kgCO ₂ eq

Laskettu vuotuinen jäteveden käsittelymäärä oli 2 952 120 m³ ja lietettä tuotetaan 4286 m³. Taulukko 9 esittää simulointitulokset biokaasulaitokselle kun 500 m³ ja per kuutio käsiteltyä lietettä.

Taulukko 9. Simulaatiotulokset biokaasun tuotannosta.

	Simulaatio tulos	Per kuutio	Yksikkö
Käsitelty liete	500,00	1	m ³
Metaanin tuotto	14 630	29,3	m ³
CO₂-päästöt	614	1,23	kgCO ₂ e

Arvioidaksemme lisäarvoa (EEI yhtälön muuttuja I₁) vedenkäsittelylaitokselle voimme käyttää oletettua vesimaksua ja tuotetun vesimäärän arvoa 1 m³ kohti. Tämä antaa meille arvon 3,64 €/m³, joka vastaa 39,2 miljoonaa euroa vuosittain. Arvioidaksemme ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP), joka on I₂ EEI yhtälössä, vedenkäsittelylaitokselle käytämme hiilidioksidin hintaa ja GWP arvoa, joka

tuotetaan kuutiota puhdistettua vettä kohden. Tämä antaa meille arvon $1,56 \cdot 10^{-6}$ €/m³ ja vuosittain 6064 €.

Lietteestä tuotettu biokaasu voidaan arvioida jätevesilaitoksentuottamaksi hyödykkeeksi. Biokaasulaitos tuottaa 29,3 m³ metaania jokaista jätevedenkäsittelylaitoksen käsittelemää kuutiometriä kohden yhdistämällä vedenkäsittely- ja biokaasusimulaatioiden tulokset. Tuloksena on, että jätevesilietteen tuottama metaanimäärä vuosittain on 125 403 m³. Biokaasun tuotanto kuitenkin aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä, ja I₂ näille oli 5266 €, jos EDP katsotaan samaksi 52 € kuin hiilidioksidin hinta Suomessa.

Biokaasun käytöstä korvaushintalämmityksen osalta oli 633 984 € ja liikenteelle 950 976 €. Negatiiviset vaikutukset, kuten vedenkäsittelylaitoksen päästöjen arvo ja biokaasulaitoksen hiilidioksidituotanto, on vähennettävä tuloksista. Tämä johtaa vuotuisen EEI:n toisen termin olevan:

$$-w_2 I_2 = -6064\text{€} - 5266\text{€} + 633\,984\text{€} + 950\,976\text{€}$$

$$-w_2 I_2 = 1\,573\,630\text{€}$$

Vähentämällä ympäristövaikutuksen termi lisäarvosta, saadaan EEI ensimmäisessä tapauksessa olevan 39,2 miljoonaa euroa, ja jos lietettä käytettäisiin biokaasun raaka aineena, arvo olisi 40,8 miljoonaa euroa.

5.2.3 *Keskustelu tarkastelusta*

Tarkastelussa käytetty EEI voidaan hyödyntää ilmastovaikutusten arvioimisen työkaluna taloudellisessa kontekstissa, mutta se vaatii perusteellisen ymmärryksen käytetyistä muuttujista. EEI:tä voidaan vertailla niin kauan kuin laskentalaajuus on sama. Tässä skenaariossa hiilidioksidin päästöhintoja käytetään päästöjen arvioimiseen, ja GWP lasketaan samoissa yhteyksissä.

Tutkittu simuloitu järjestelmä oli yksinkertainen, ja lisäämällä enemmän operaattoreita arviot olisivat monimutkaisempia. Oletuksia voidaan tehdä jokaisesta yrityksestä samassa kontekstissa, jolloin EEI:tä voidaan käyttää arvioimaan kiertotalouden vaikutuksia järjestelmässä. Haasteena EEI ja simuloinnin yhdistämisessä on suuri tiedon määrän tarve. Tähän EcoSairilan tietojärjestelmä tuo

lisämahdollisuuksia, mutta ainoastaan vedenkäsittelylaitoksen osalta. Perusteellisemmän tarkastelun tekeminen vaatisi kaikilta toimijoilta suuren tietomäärän käyttömahdollisuuden.

5.3 Simulointi EcoSairilan mittausdatalla

Kiertotalous yleensä kuvataan suurena ympyränä, vaikka todellisuudessa materiaa-
livirrat ovat enemmänkin verkosto. Esimerkkinä Ecosairilan biokaasulaitos voi
saada raaka-aineita talousjätteistä, maataloudesta tai vedenpuhdistuslaitokselta ja
he tarjoavat biokaasua liikennekäyttöön ja lannoitteeksi sopivaa materiaalia takai-
sin maataloudenkäyttöön. Hyödyntäen Ecosairilan tietoaalustaa, voidaan tarkastella
Mikkelin asukkaiden tuottaman jätteen mahdollisuutta olla heille liikennepolttoai-
neena, kun jäte on hyödynnetty biokaasulaitoksella raaka-aineena.

5.3.1 Tarkastelun asettelu

Mikkelissä asuu n. 52 tuhatta henkeä (Tilastokeskus 2023). Heidän tuottama ta-
lousjättemäärä voidaan arvioida käyttämällä Euroopan tilastoja. Tilastojen mukaan,
Suomessa yksi henkilö tuotti keskimäärin 630 kg talousjätettä vuonna 2021 (Euros-
tat 2023). Tästä 70% on arviolta orgaanista jätettä, joka voidaan hyödyntää biokaas-
sulaitoksella (Albanna 2013, 313-340). Kaiken orgaanisen jätteen hyödyntäminen
ei ole mahdollista, mutta tämä antaa skenaario tarkastelulle rajat.

Jätevesi määrää on hankala arvioida asukasluvun perusteella, koska osa asukkaista
ei kuulu jätevesiverkostoon ja jäteveden tuotanto vaihtelee ajallisesti. EcoSairilan
tietoaalustasta saadaan mitattu jäteveden määrä tuntitasolla, jota voidaan käyttää si-
mulointimallissa. Järjestelmän ilmoittama kuukausittainen jätevedenmäärä on il-
moitettu Taulukko 10.

Taulukko 10. Käsitellyn jätevesimäärä kuukausitasolla.

Kuukausi	Jätevesi sisään [m ³]
Tammikuu	287 615
Helmikuu	246 247
Maaliskuu	317 147
Huhtikuu	431 965
Toukokuu	370 324
Kesäkuu	261 710

Skenaariot olettaa kaiken jätelietteen käsiteltäväksi. Tämän lisäksi teoreettisen biojätteen määristä on tehty neljä skenaariota ja vertailu kohdaksi tehtiin BAU skenaario. Kaikki skenaariot on esitelty Taulukko 11.

Taulukko 11. Talousjätteen ja vedenpuhdistamon lietemäärät eri skenaarioissa.

Simulaatioskenaario	Biologinen jäte [tonnia]	Prosentti-osuus	Liete [tonnia]	Prosentti-osuus
Teoreettinen	22 159	100%	6000	100%
Korkea	17 727	80%	6000	100%
Keskimääräinen	11 080	50%	6000	100%
Matala	6648	30%	6000	100%
BAU	3500	16%	6000	100%

Tarkastelu suoritetaan puolenvuoden ajanjaksolle. Valittu ajanjakso on 1.1.2023 - 30.6.2023. Mallin annettiin käydä kuukausi yli tämän ajan, jotta kaikki materiaali jätevesilaitoksessa ja biokaasulaitoksessa käsiteltiin. Tarkastelussa ei huomioida ympäristövaikutuksia, jolloin kemikaalien tai energian käyttöä ei huomioida. Tuotettu biokaasu käytetään paikallisesti tieliikennesuorituksessa, joten kaikki tuotettu biokaasu ohjataan puhdistukseen, jonka odotetaan tuottavan 4% häviön biometaanin tuotossa. Biokaasulaitoksen syötteen tiedot on ilmoitettu Taulukko 12.

Taulukko 12. Biokaasulaitoksen syötteiden ominaisuudet.

Ominaisuus	Yksikkö	Liete	Kunnallinen biologinen jäte
Kuiva-aine (TS)	%	20	28
Orgaaninen aine (VS)	%/TS	60	91
Metaanin tuotantopotentiaali	m ³ /t _{VS}	475	450
Biokaasun metaanipitoisuus	%	60	60
Tiheys	kg/m ³	1000	1000
Mädätystehokkuus	%	80	80

5.3.2 Tarkastelun tulokset



Eri skenaarioilla voidaan tuottaa biokaasua alueen liikenne käyttöön alueen tuottamalla jätteellä. Kaasuauton 3.9 kg/km (Traficom 2023) kulutusta käytettynä saadaan laskettua tuotetun biokaasun teoreettinen matkasuorite ja hiilidioksidipäästövähennys mahdollisuudet, jos oletetaan kaasun korvaavan bensiinin ajosuoritetta ja bensiinin hiilidioksidipäästöarvona käytetään 113 g/km (Taulukko 13). Henkilöliikennetutkimuksen (Tiikkaja et al. 2023) mukaan Suomessa 84 % matkasuoritteista tehdään henkilöautoilla ja yhden henkilön matkasuorite autolla on keskimäärin 21,8 km/vrk. Vuositasolla yhden auton oletetaan ajavan 13 600 km (Lahtinen 2020). Etelä-Savon henkilöautojen matkasuorite vuorokaudessa olisi n. 1,1 miljoonaa kilometriä. Tuotetulla biometaanilla voidaan korvata osa tästä suoritteesta (Taulukko 13).

Taulukko 13. Biometaanin tuotanto, katettava ajoneuvo kanta, ajosuorite ja hiilidioksidipäästövähennys mahdollisuudet skenaarioissa.

Skenaario	Biometaanin tuotanto [tonnia]	Katettava autojen määrä	Katettu matkasuorite	Säästetty tCO ₂
Teoreettinen	1362	2568	8,4 %	3946
Korkea	1118	2108	6,9 %	3239
Keskimääräinen	739	1393	4,6 %	2141
Matala	501	944	3,1 %	1452
BAU	329	621	2,0 %	953

5.3.3 Keskustelu tarkastelusta

Hiilivapaa Etelä-Savon loppuraportin mukaan, Mikkelin alueen päästöistä liikennepolttoaineiden osuus on 41 % alueen päästöistä ja näiden vähentäminen on kaikkein haasteellisinta Etelä-Savossa (Laihanen et al. 2020). Biokaasu on hyvä vaihtoehto tähän ja paikallisia jätevirtoja voidaan hyödyntää biokaasun tuotannossa. Ajoneuvojen määrän oletetaan olevan kasvussa ja paikallinen biokaasu voisi toimia kannustimena alueella kaasuautojen ostamiseen. Päästöjen osalta on hyvä huomioida, että kaasu on biopohjaista, jonka vuoksi laskennassa käytettiin arvoa 0 g/km. Biokaasun päästönä voisi käyttää myös 107 g/km (Kuva 12), jolloin säästetty hiilidioksidimäärä on merkittävästi vähäisempi.

Polttoaine	Keskiahinta 7-9/2023	Yksikkö	Vertailu- segmentti	Segmentin myydyimmät autot 2022	Väite- kulutus	Yksikkö/ 100 km	Vertailuhinta, €/100 km	CO2- päästö, g/km*
Bensiini 	1,99	EUR/l	C	Toyota Corolla, Kia Ceed, Volkswagen Golf	5,4	l	10,8	113
Diesel* 	1,95	EUR/l		Skoda Octavia, Volkswagen Golf, Mercedes Benz CLA	5,3	l	10,3	129
Maakaasu* 	1,98	EUR/kg		Skoda Octavia, Volkswagen Golf, Seat Leon	3,9	kg	7,7	107
Biokaasu* 	1,73	EUR/kg		Skoda Octavia, Volkswagen Golf, Seat Leon	3,9	kg	6,7	107
Sähkö* 	16,9	snt/kWh*		Tesla Model 3, Nissal Leaf, Volkswagen ID.3	16,4	kWh	2,8	0
* Näitä polttoaineita käyttäville autoilta kannetaan lisäksi käyttövoimaveroa, joka riippuu auton massasta ja polttoaineesta 		* Perustuu sähkön kotitaloushintaan siirtomaksuineen ja veroineen		* Ei ota huomioon polttoaineen elinkaaren päästötasetta. Fingridin ja Gasumin tietojen perusteella, Suomessa kulutetun polttoaineen ja sähkön päästöt ja häviöt huomioiden lasketut vastaavat biokaasuauton CO2-päästöt ovat 33,3 g/km ja sähköauton CO2-päästöt 10,9 g/km.				

Kuva 12. Liikennepolttoaineiden päästöt ja kustannuksien vertailu (Traficom 2023).

Simulointimalli ei ota huomioon kustannuksia. Paikallisesti tuotettu biokaasu olisi halvempi kuluttajille, mutta tuo myös alueelle lisää työpaikkoja ja energiaturvalliisuutta. Simulointimalliin voisi kehittää kustannuslaskelman, mutta tämä vaatisi materiaalivirtojen kustannuksien tuntemisen. Epäsuorien vaikutuksien arviointi on simulointimallilla hankalampi, mutta näiden vaihtelu ei ole ajallista tai merkittävää, joten näiden tarkastelu voitaisiin tehdä simulointimallin tuloksien pohjalta.

Biokaasu laitoksen maksimi vastaanottokapasiteetiksi on ilmoitettu 13 500 tn biojätettä ja 6 000 tn jätevesilietettä vuodessa ja mallilla tarkasteltiin nämä määrät jo matala skenaariossa. Teoreettisen jätteen käsittely vaatisi yli 2000 kuutiometrin mädättämö tilavuuden pelkästään jätteelle. On myös mahdollista lyhentää mädätysaikaa, mutta silloin biokaasun saanti vähenee. Tämän voisi ottaa huomioon käyttämällä Monodiyhtälöä (Appels et al. 2008, 755-781). Tämä mahdollistaa tarkastelun, jossa syötemäärä on suurempi kuin suunniteltu ja mädätysaika voitaisiin määrittellä niin, että biokaasun saanti maksimoitaisiin. Mallin elinkaarianalyysi ei ole tehty näin suurille määrille ja tämän päivittäminen olisi myös tarpeen.

Toinen mahdollinen tarkasteli biokaasun tuotannossa olisi raaka-aineen alkuainekoostumis. Biokaasun tuottoon vaikuttaa suuresti mistä syöte koostuu. Hapen, hiilen ja veden määrä syötteessä vaikuttaa saantiin ja tämä voitaisiin huomioida luomalla järjestelmädynamiikalla alamalli, jossa syötteet vaikuttavat dynaamisesti reaktorin toimintaan. Biokaasun simulointi järjestelmädynamiikan avulla on esitelty aikaisemminkin (Temirbekova et al. 2020)

6 LOPPUPÄÄTELMÄT

SairilaSIM hanke oli LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmän toteuttama tutkimushanke. Hanke tarkasteli elinkaarianalyysillä tuettua simuloinnin hyödyntämistä kiertotalouden tutkimisessa. Tutkimuskohteena käytettiin EcoSairila alustaa, joka tarjosi hankkeelle tietojärjestelmän datan käyttöön.

6.1 Hankkeella saavutettiin

Hankeen aikana suoritettiin elinkaarianalyysi, jonka avulla laskettiin jätevedenpuhdistamon kasvihuonekaasupäästöt, mukaan lukien lietteestä tuotettu biokaasu (liikennekäyttöön) ja päästöjen hyvitys. Päästötiedot käytettiin sitten Eco-Efficiency indeksin laskemiseen. Hankeen aikana kehitettiin simulointimalli, jolla voidaan tarkastella EcoSairilan kiertotalouden toimintaa. Malli keskittyy vesilaitoksen ja biokaasulaitoksen toimintaan, mutta siihen voidaan pelkistettynä lisätä muita toimijoita. Malli yhdistettynä Eco-Efficiency indeksin kanssa mahdollistaa ympäristövaikutuksien esittämisen yksinkertaisessa muodossa. Vaikka Eco-Efficiency indeksi kertoo ympäristövaikutukset kustannuksina tai voittona, tämä ei suoraan ole alueen rahalliseen tuottoon verrattavissa. Syy on, ettei ympäristövaikutuksia voida suoraan muuttaa rahaksi. Tämä on kumminkin hyvä indeksi ympäristövaikutuksien ja tuotteen tuottaman hyödyn vertaamiseen.

6.2 Hankkeen tuottama lisäarvo

Hanke tuotti EcoSairila kiertotalousalustalle simulointimallin, jolla voidaan tarkastella alueen toimintaa. Simulointimallilla voidaan tarkastella esimerkiksi vikatilanteita, kuten kuinka kauan vesilaitos voi toimia vain puolella teholla tai optimoida mädätysaikaa, jos biokaasulaitokselle tulee enemmän syötettä, kuin sen kapasiteetti oli suunniteltu. Elinkaarianalyysin avulla nähdään alueen ympäristövaikutukset ja yhdistämällä tämä Eco-Efficiency indeksiin saadaan yksinkertainen arvo, jolla on helppo näyttää toimijoiden ympäristövaikutukset.

6.3 Suositukset jatkotoimille

Simulointimalli toimii kiertotalousjärjestelmän tutkimisalustana, mutta sen jatkokehitys olisi hyödyllistä. Mahdollisia kehityskohteita ovat biokaasun saannin simulointi ja syötteen vaikutuksen huomioiminen biokaasun saantiin. Yhtenä

rajoittavana tekijänä simulointimallin hyödyntämiseen on saatavilla olevan tiedon määrä. Tässä EcoSairilan tietoa tarjoo hyvän ratkaisun. Tällä hetkellä data oli saatavilla vain vedenpuhdistamolle, mutta vastaavan datan saaminen muiltakin laitoksilta mahdollistaisi tehokkaamman simuloinnin. Myös elinkaarianalyysi ja Eco-Efficiency indeksin selvittäminen helpottuu vastaavan tietojärjestelmän avulla. Simulointimallin hyödyntäminen jatkossa päätöksenteon apuna on mahdollisuus. Esimerkiksi biokaasulaitoksen käytön optimointi on mahdollisuus. Myös vikatilanteen vaikutusten arviointi on mahdollista. Yksi elinkaarianalyysin tärkeimmistä tavoitteista on löytää päästöjen vähentämispotentiaali elinkaaren eri vaiheissa. Tämä koskee myös Ecosairilaa ja jätevedenpuhdistamoja. Viime vuonna tehdyn LCA:n perusteella jätevedenpuhdistamon operaattoreiden kanssa tarvitaan tiivistä yhteistyötä, jotta voidaan löytää korvaavat materiaalit, joilla voi olla pienempi ympäristövaikutus ilman, että päivittäisen toiminnan tehokkuus vaarantuu.

LÄHTEET

Bibliography

- Albanna, Muna. 2013. "Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste." In *Management of Microbial Resources in the Environment*, edited by Abdul Malik, Elisabeth Grohmann and Madalena Alves, 313-340. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-007-5931-2_12. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5931-2_12.
- Appels, Lise, Jan Baeyens, Jan Degreève, and Raf Dewil. 2008. "Principles and Potential of the Anaerobic Digestion of Waste-Activated Sludge." *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (6): 755-781.
- Arponen, J., A. Granskog, M. Pantsar-Kallio, M. Stuchtey, A. Törmänen, and H. Vanthournout. 2014. "Kiertotalouden Mahdollisuudet Suomelle." *Sitran Selvityksiä 84.Helsinki 2014*. <https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/02/Selvityksia84-2.pdf>.
- Chen, Ziyue and Lizhen Huang. 2019. "Application Review of LCA (Life Cycle Assessment) in Circular Economy: From the Perspective of PSS (Product Service System)." *Procedia Cirp* 83: 210-217.
- Department of Energy. "Alternative Fuels Data Center: Fuel Properties Comparison.", accessed Nov 2, 2023, <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>.
- EcoSairila. "EcoS Ympäristötietoalusta.", accessed 14.10., 2023, <https://ecosairila.fi/ecosairila/ecos-ymparistotietoalusta/>.
- . "Kehittämishankkeet." EcoSairila., accessed Oct 17, 2023, <https://ecosairila.fi/ecosairila/hankkeet/>.
- Ellen MacArthur Foundation. 2013. "Towards the Circular Economy Vol. 1: An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition." *Ellen McArthur*.
- Eurostat. "Municipal Waste Statistics.", accessed Nov 6, 2023, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics.
- Finnish Standards Association, SFS. 2006. *ISO 14044:2006 Environmental Management—Life Cycle Assessment—Requirements and Guidelines*.
- Grimm, Volker, Uta Berger, Donald L. DeAngelis, J. Gary Polhill, Jarl Giske, and Steven F. Railsback. 2010. "The ODD Protocol: A Review and First Update." *Ecological Modelling* 221 (23): 2760-2768.
- Haila, Katri, Vesa Salminen, Jenna Kiiskinen, Ulla Roiha, Riikka Leppänen, and Janette Kiemunki. 2023. "Kiertotalouden Strategisen Ohjelman Arviointi." .

- International Organization for Standardization, 14040. 2006. *Environmental Management: Life Cycle Assessment; Principles and Framework* ISO.
- International Organization for Standardization, 14045. 2012. "Environmental Management–eco-Efficiency Assessment of Product Systems–principles, Requirements and Guidelines." .
- IPCC. 2006. "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." *Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, Editors. Published: IGES, Japan.*
- Kemin Digipolis Oy. "Kiertotalous - Ekoteollisuuspuistojen Verkosto.", accessed Oct 17, 2023, <https://www.digipolis.fi/kiertotalouskeskus/ekoteollisuuspuistojen-verkosto>.
- Lahtinen, Sami. "Tilastokeskus - Tietilasto." Tilastokeskus, accessed Jan 15, 2024, https://tilastokeskus.fi/til/tiet/2019/tiet_2019_2020-04-15_tie_001_fi.html.
- Laihanen, Mika, Antti Karhunen, Kalle Karttunen, Raghu KC, Tapio Ranta, Soili Haikarainen, Hannu Salminen, et al. 2020. *Hiilivapaa Etelä-Savo, Loppuraportti*.
- Lieder, Michael, Farazee MA Asif, and Amir Rashid. 2017. "Towards Circular Economy Implementation: An Agent-Based Simulation Approach for Business Model Changes." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 31: 1377-1402.
- McDonough, William and Michael Braungart. 2010. *Cradle to Cradle: Remaking the Way we make Things* North point press.
- McManus, Marcelle C. and Caroline M. Taylor. 2015. "The Changing Nature of Life Cycle Assessment." *Biomass and Bioenergy* 82: 13-26.
- Miksei Mikkeli. 2021. *EcoSairila Ja Blue Economy Mikkeli-Osaamiskeskus, Mikkelin Kaupunginhallitus 18.1.2021 Liite 1*.
- Nousiainen, Eveliina, Sirpa Kokko, and Sara Kuure. 2022. *Teollisen Kiertotalouden Haasteet Ja Mahdollisuudet Vuonna 2021-2*.
- Pirtonen, Heidi and Kaariaho, Tuomas. "Kiertotalous Edistyy Suomessa Hitaasti – Merkittävimmät Askeleet Kohti Asetettuja Tavoitteita Ovat Vielä Ottamatta | Tieto&trendit." Tilastokeskus, accessed Oct 17, 2023, <https://www2.stat.fi:443/tietotrendit/artikkelit/2022/kiertotalous-edistyy-suomessa-hitaasti-merkittavimmat-askleet-kohti-asetettuja-tavoitteita-ovat-viela-ottamatta/?listing=simple>.

- Sassanelli, Claudio, Paolo Rosa, and Sergio Terzi. 2020. "Circular Economy-Oriented Simulation: A Literature Review Grounded on Empirical Cases." *In4pl*: 53-59.
- Seppälä, Jyri, Olli Sahimaa, Juha Honkatukia, Helena Valve, Riina Antikainen, Petrus Kautto, Tuuli Myllymaa, Ilmo Mäenpää, Hanna Salmenperä, and Katriina Alhola. 2016. "Kiertotalous Suomessa-Toimintaympäristö, Ohjaukset Ja Mallinnetut Vaikutukset Vuoteen 2030." .
- Sinervo, Riku, Tiina Paajanen, Vilma Turkki, and Kari Herlevi. 2022. *10 Kiertotalousehdotusta Suomelle*.
- Sjöstedt, Tuula. "Mitä Nämä Käsitteet Tarkoittavat?" Sitra., accessed Oct 17, 2023, <https://www.sitra.fi/artikkelit/mita-nama-kasitteet-tarkoittavat/>.
- Smol, Marzena, Christian Adam, and Michał Preisner. 2020. "Circular Economy Model Framework in the European Water and Wastewater Sector." *Journal of Material Cycles and Waste Management* 22: 682-697.
- Tauber, Joseph, Vanessa Parravicini, Karl Svardal, and Joerg Krampe. 2019. "Quantifying Methane Emissions from Anaerobic Digesters." *Water Science and Technology* 80 (9).
- Temirbekova, Marzhan, Madina Aliyarova, Iliya Iliev, Aliya Yelemanova, and Saule Sagintayeva. 2020. "The Generation of a Mathematical Model of the Biogas Production Process from Organic Municipal Solid Waste." *EDP Sciences*, .
- The word bank. 2019. "Up-to-Date Overview of Carbon Pricing Initiatives." *World Bank Group*. https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/map_data.
- Tiikkaja, Hanne, Heikki Liimatainen, Juhani Mutikainen, and Atte Supponen. 2023. "Henkilöliikennetutkimus 2021." *Traficomin Tutkimuksia Ja Selvityksiä 1/2023*. https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/valtakunnallinen%20henkil%C3%B6liikennetutkimus_paarportti_20230406.pdf.
- Tilastokeskus. 2023. *Väestörakenne, Tunnuslukuja Väestöstä Alueittain, 1990-2022*.
- Traficom. "Polttoaineiden Vertailuhintojen Laskeminen.", accessed 15.11., 2023, <https://www.traficom.fi/fi/polttoainekustannusvertailu>.
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. "Kiertotalouden Digitalisaatio Ja Ekosysteemit: Nykytila, Tavoitearkkitehtuuri Ja Toimenpiteet." .

ISBN 978-952-412-057-9 (PDF)

ISSN-L 2243-3392

ISSN 2243-3392

Lappeenranta 2024

...the most crucial elements, which have been identified in the framework of the TCE and the...

The Multi...

...the most crucial elements...

 LUT
University