

Systemianalyttisten menetelmien hyödyntäminen maatalouden ravinteiden kierrossa

Esiselvitys

Jyri Mustajoki, Mika Marttunen, Juuso Liesiö, Eeva Lehtonen



SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA
40 | 2019

Systemianalyyttisten menetelmien hyödyntäminen maatalouden ravinteiden kierrossa

Esiselvitys

Jyri Mustajoki, Mika Marttunen, Juuso Liesiö, Eeva Lehtonen

Helsinki 2019

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS



S Y K E

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUKSEN RAPORTTEJA 40 | 2019
Suomen ympäristökeskus SYKE
Vesikeskus

Systeemanalyttisten menetelmien hyödyntäminen maatalouden ravinteiden
kierrossa - Esiselvitys

Kirjoittajat: Jyri Mustajoki¹, Mika Marttunen¹, Juuso Liesiö², Eeva Lehtonen³

¹) Suomen ympäristökeskus

²) Aalto-yliopisto

³) Luonnonvarakeskus

Vastaava erikoistoimittaja: Ahti Lepistö

Rahoittaja/toimeksiantaja: Luken koordinoima Maatalouden ravinteet hyötykäyttöön II -ohjelma

Julkaisija ja kustantaja: Suomen ympäristökeskus SYKE
Latokartanonkaari II, 00790 Helsinki, puh. 0295 251 000, syke.fi

Kansikuva: Tuuli Myllymaa

Taitto: Pirjo Lehtovaara

Julkaisu on saatavana internetistä: syke.fi/julkaisut | helda.helsinki.fi/syke
sekä ostettavissa painettuna SYKEN verkkokaupasta: syke.juvenesprint.fi

ISBN 978-952-11-5083-8 (nid.)
ISBN 978-952-11-5084-5 (PDF)
ISSN 1796-1718 (pain.)
ISSN 1796-1726 (verkkoj.)

Julkaisuvuosi: 2019

ALKUSANAT

Tässä raportissa kuvataan systeemianalyttisten menetelmien hyödyntämismahdollisuuksia ravinteiden kierrossa tarkastelleen esiselvityksen tulokset. Esiselvitys toteutettiin osana Luken koordinoimaa Maatalouden ravinteet hyötykäyttöön II -ohjelmaa, joka on osa hallituksen ”Kiertotalouden läpimurto, vesistöt kuntoon” -kärkihankekokonaisuutta. Esiselvityksen toteuttaja oli SYKE yhdessä Aalto-yliopiston ja Luken kanssa. Työryhmässä olivat mukana Anna Toppari, Mikko Rahtola, Sari Luostarinen ja Eeva Lehtonen (Luke), Juuso Liesiö (Aalto), sekä Turo Hjerppe, Mika Marttunen ja Jyri Mustajoki (SYKE). Pia Rotko (Innotiimi-ICG) vastasi esiselvityksen työpajojen vetämisestä. Raportin kirjoittajista Eeva Lehtonen osallistui luvun 5 kirjoittamiseen ja muut kaikkien lukujen kirjoittamiseen.

Esiselvityksen tavoitteena on auttaa hahmottamaan sitä, minkä tyyppisiä systeemianalyysin menetelmiä on tarjolla sekä sitä, miten näitä on hyödynnetty ja voidaan tulevaisuudessa hyödyntää erityyppisissä ravinteiden kierron tarkasteluissa. Kohdeyleisöä ovat esimerkiksi henkilöt, jotka ovat ravinnekiertoon liittyvässä hankkeessaan jo tunnistanee ongelman monimutkaisuuden ja systeemisyyden, mutta joilla ei ole varmaa käsitystä siitä, miten ongelmaa kannattaisi lähestyä. Esiselvityksestä on hyötyä myös lukijoille, jotka eivät tätä tarvetta ole vielä tunnistanee, sillä se voi auttaa heitä tunnistamaan systeemianalyysin menetelmien tarjoamia mahdollisuuksia. Lisäksi raportti voi toimia katalyyttinä uusille hankkeille. Raportin laatijoiden visiona onkin, että esiselvityksen innoittamana on muutaman vuoden kuluttua käynnistynyt uusia systeemianalyysiä hyödyntäviä ravinteiden kiertoon liittyviä hankkeita.

Esiselvityksen laadinnassa hyödynnettiin monien eri henkilöiden asiantuntemusta. Suuret kiitokset kaikille haastatteluihin sekä valmistelu- ja sidosryhmätyöpajoihin osallistuneille: Heikki Lehtonen (Luke), Antti Iho (Luke), Sarianne Tikkanen (YM), Marja-Liisa Tapio-Biström (MMM), Nicholas Vardi (Baltic Sea Action Group), Elina Järvelä (Sitra), Petri Hilli (Sitra), Markku Järvenpää (Luke), Kristiina Mikkola (Kristiina Mikkola Consulting), Markku Puustinen (SYKE), Sari Väisänen (SYKE), Juha Grönroos (SYKE), Riina Antikainen (SYKE), Petri Ekholm (SYKE), Päivi Fjäder (SYKE), Jyrki Laitinen (SYKE) ja Taina Nysten (SYKE). Suuret kiitokset myös projektin aikana saaduista kommentteista Maatalouden ravinteet hyötykäyttöön II -ohjelman ohjausryhmälle: Tarja Haaranen (YM), Markku Järvenpää (Luke), Pirjo Salminen (MMM), Marja-Liisa Tapio-Biström (MMM) ja Sini Wallenius (MMM).

Helsingissä 11.9.2019, tekijät

TIIVISTELMÄ

Systemianalyttisten menetelmien hyödyntäminen maatalouden ravinteiden kierrossa – Esiselvitys

Maatalouden ravinnekierto on monimutkainen ongelmakokonaisuus, jonka ratkaisemiseksi tarvitaan systeemistä näkökulmaa. Systemianalyysi on yleiskäsite järjestelmälliselle lähestymistavalle, joka auttaa hahmottamaan systeemeissä olevia monimutkaisia syy–seuraussuhteita. Tarkastelun myötä saadaan jäsenneily kokonaiskuva systeemistä sekä voidaan paremmin ymmärtää vaikutusten välisiä mittasuhteita.

Tässä esiselvityksessä tarkasteltiin, miten systemianalyttisiä menetelmiä on tarkoituksenmukaista soveltaa ravinteiden kierron eri ongelmakokonaisuuksien ratkaisemiseksi. Aluksi tunnistettiin maatalouden ravinteiden kiertoon liittyviä keskeisiä tutkimuskysymyksiä ja arvioitiin erityyppisten menetelmien hyödyntämismahdollisuuksia näiden ratkaisemisessa. Tarkastelun avulla menetelmien soveltajat voivat tunnistaa heidän käyttötarkoituksiinsa parhaiten soveltuvia menetelmiä. Tarkastelu voi antaa uusia ideoita ja näkökulmia myös henkilöille, joilla ei ole aiempaa kokemusta menetelmien soveltamisesta. Usein parhaat tulokset saavutetaan luomalla looginen menetelmäjätkumo, jossa tarkoituksenmukaisesti hyödynnetään eri menetelmien ominaispiirteitä.

Menetelmiä testattiin kahden tapaustutkimuksen avulla. Ohjaukeinojen monitavoitearvioinnissa luotiin järjestelmällinen arviointikehikko, joka ottaa huomioon muun muassa epävarmuuden liittyen ohjaukeinojen vaikutuksen realisoitumiseen. Toisessa tarkastelussa luotiin biomassojen käsittelylaitosten sijoittelulle optimointimalli, jossa samanaikaisesti optimoidaan biomassojen kuljetusmatkoja käsittelylaitokselle ja biomassojen käsittelylaitosten optimaalista sijoittelukombinaatiota. Hankkeessa ei suoritettu varsinaista mallin laskennallista optimointia, mutta sitä suositellaan tehtäväksi esimerkiksi pilottina käytännön hankkeessa hyödyntäen Biomassa-atlaksesta saatavaa paikkatietoa eri biomassoille.

Esiselvityksen perusteella systemianalyttisiä menetelmiä on sovellettu ravinteiden kierron ongelmien tarkasteluun Suomessa jo melko laajalti, ja menetelmille on selvästi tarvetta. Suomessa on myös paljon menetelmiin liittyvää osaamista ja esimerkkejä onnistuneista käytännön sovelluksista sekä ravinteiden kierrossa että muilla aloilla. Menetelmäosaaminen hajaantuu kuitenkin monien eri tutkimuslaitosten ja yksikköjen alle. Sen vahvistamiseksi suositellaan tutkimuslaitosten eri yksiköiden menetelmäosaamisesta kartoituksia sekä menetelmiä hyödyntävien hankkeiden yhteisiä tapaamisia. On tärkeää, että substanssiin liittyvien tulosten lisäksi hankkeissa raportoidaan myös menetelmien soveltamiseen liittyviä kokemuksia ja hyviä käytäntöjä, jotka ovat ensiarvoisen tärkeitä menetelmien myöhemmän soveltamisen kannalta.

Avainsanat

Maatalouden ravinteiden kierto, systemianalyysi, monitavoitearviointi, monitavoiteoptimointi, ympäristösuunnittelu

SAMMANDRAG

Användning av systemanalysmetoder för återvinning av jordbruksnäring – Preliminär studie

Återvinning av jordbruksnäringssämnen är en komplex problematik som kräver ett systemiskt tillvägagångssätt. Systemanalys är en vanlig term för tillvägagångssätt som hjälper till att förstå systemens komplexa orsak-effekt-samband. Analysen ger en strukturerad överblick över systemet och en bättre förståelse för effekterna.

I denna forskning undersökte vi lämpligheten att använda systemanalysmetoder för att ta itu med olika aspekter av näringsämnesåtervinning. Först identifierade vi viktiga forskningsfrågor om återvinning av jordbruksnäringssämnen och utvärderade potentialen för olika typer av metoder för att hantera dem. Syftet är att hjälpa dem som använder metoderna att identifiera de bästa metoderna för deras applikationer. Analysen kan också ge nya idéer och perspektiv till individer som inte har tidigare erfarenhet av att tillämpa metoderna. Ofta erhålls de bästa resultaten genom att skapa en logisk metodkontinuum som på lämpligt sätt använder funktionerna i de olika metoderna.

Metoderna testades i två fallstudier. Multikriterieanalys av kontrollåtgärderna skapade en systematisk utvärderingsram som tar hänsyn till exempelvis osäkerheten relaterad till förverkligandet av effekterna av kontrollåtgärderna. I den andra fallstudien skapades en optimeringsmodell för lokalisering av biomassebehandlingsanläggningar, som samtidigt optimerar kombinationen av biomassetransport till växterna och anläggningsplatserna. Projektet genomförde inte den faktiska beräkningsoptimeringen av modellen, men det rekommenderas att genomföra till exempel ett pilotprojekt som använder platsdata för olika biomasser från Biomass Atlas-systemet.

Vår forskning indikerar att systemanalysmetoder redan har använts för att analysera problem med återvinning av näringsämnen i Finland ganska mycket och det finns uppenbart ett behov av sådana metoder. Det finns också mycket metodisk kunskap i Finland och exempel på framgångsrika praktiska tillämpningar, både i näringsåtervinning och i andra områden. Men den metodiska expertisen är spridd över många olika forskningsinstitut och enheter. För att stärka det rekommenderar vi kartläggning av expertis vid olika institutioner för forskningsinstitut och gemensamma möten med projekt som använder metoderna. Det är också nödvändigt att säkerställa att förutom ämnesresultaten rapporteras erfarenheter och god praxis för att tillämpa metoderna i projekten, eftersom dessa är avgörande för den framtida tillämpningen av metoderna.

Nyckelord

Återvinning av jordbruksnäringssämnen, systemanalys, multikriterieanalys, multiobjektivoptimering, miljöplanering

ABSTRACT

Utilization of Systems Analytical Methods in Agricultural Nutrient Recycling – Preliminary Study

Agricultural nutrient recycling is a complex problem entity that requires a systemic approach. Systems analysis is a common term for approaches that help to understand the complex cause-effect relationships of the systems. The analysis provides a structured overview of the system and a better understanding of the dimensions of the impacts.

In this research, we studied the appropriateness of applying systems analytical methods to address various aspects of nutrient recycling. First, we identified key research questions on agricultural nutrient recycling and evaluated the potential of different types of methods to address them. The aim is to help those applying the methods to identify the best methods for their applications. The analysis can also give new ideas and perspectives to individuals who have no previous experience in applying the methods. Often, the best results are obtained by creating a logical method continuum that appropriately utilizes the features of the various methods.

The methods were tested in two case studies. The multi-criteria decision analysis of the control measures produced a systematic evaluation framework that takes into account, for example, the uncertainty related to the realization of the effects of the control measures. In the second case study, an optimization model for locating biomass treatment plants was created, which simultaneously optimizes combination of biomass transport to the plants and the plant locations. The project did not carry out the actual computational optimization of the model, but it is recommended to do that, for example, in some pilot project utilizing the location data for different biomasses from the Biomass Atlas system.

Our research indicates that systems analytical methods have already been quite widely applied to analyze nutrient recycling problems in Finland and there is clearly a need for such methods. There is also much methodological know-how in Finland and examples of successful practical applications, both in the nutrient recycling and other fields. However, the methodological expertise is spread over many different research institutes and units. To strengthen it, we recommend mapping of expertise in different departments of research institutes and joint meetings of projects applying the methods. It is also necessary to ensure that, besides the substance results, experiences and good practices of applying the methods are reported in the projects, as these are crucial for the future application of the methods.

Keywords

Agricultural nutrient recycling, systems analysis, multi-criteria decision analysis, multi-objective optimization, environmental planning

SISÄLLYS

ALKUSANAT	3
TIIVISTELMÄ	4
SAMMANDRAG	5
ABSTRACT	6
1 Esiselvityksen tausta ja tavoitteet	9
2 Katsaus systeemianalyttisiin menetelmiin	11
2.1 Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)	11
2.2 Systeemidynaamiset mallit	12
2.3 Monitavoitearvioinnin menetelmät	13
2.4 Monitavoiteoptimoinnin menetelmät	13
2.5 Portfolioanalyysin menetelmät	14
2.6 Taloudellisen arvottamisen menetelmät	14
2.7 Skenaarioanalyysin menetelmät	15
2.8 Menetelmien vertailu	16
3 Menetelmien soveltaminen ja hyödyntämispotentiaali maatalouden ravinteiden kierrossa	19
3.1 Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)	19
3.2 Systeemidynaamiset mallit	20
3.3 Monitavoitearvioinnin menetelmät.....	22
3.4 Monitavoiteoptimoinnin menetelmät	23
3.5 Portfolioanalyysin menetelmät	24
3.6 Taloudellisen arvottamisen menetelmät	25
3.7 Skenaarioanalyysin menetelmät	26
3.8 Yhteenveto menetelmien soveltamisesta ja hyödyntämispotentiaalista maatalouden ravinteiden kierrossa	27
4 Esimerkkitarkastelu I: Maatalouden ohjauskeinojen monitavoitearviointi	28
4.1 Kehikko maatalouden ohjauskeinojen monitavoitearviointiin	29
4.2 Ohjauskeinojen monitavoitearvioinnin arviointiprosessi	30
4.3 Tapaustutkimusesimerkki muutaman toimenpiteen edistämiseksi tehtävien ohjauskeinojen arvioinnista.....	33
4.4 Suosituksia ohjauskeinojen toteutukselle	39
4.5 Menetelmän soveltavuuden arviointi.....	40
5 Biomassa-atlaksen hyödyntäminen biomassojen käsittelylaitosten optimointiin	42
5.1 Optimointimalli.....	42
5.2 Mallin soveltaminen käytännössä.....	46

5.3 Mallissa tehtyjen oletusten arviointi	48
5.4 Mallin soveltamismahdollisuuksia	49
6 Yhteenveto ja suositukset	50
Viitteet.....	53
Liite A. Tarkempia tietoja menetelmistä.....	58
Liite B. Esimerkkejä menetelmien soveltamisesta.....	63

1 Esiselvityksen tausta ja tavoitteet

Ravinteiden rooli kiertotaloudessa kytkeytyy erityisesti ruoantuotantoon ja maatalouden energiaomavaraisuuteen. Ruoantuotantoketjun sijaan pitäisi tarkastella ruoantuotantosykliä, jossa ravinteet kiertävät tehokkaasti ja niiden päätyminen vesistöihin minimoidaan. Sipilän hallituksen strategisessa hallitusohjelmassa, ja sitä toimeenpaneissa kärkihankkeissa oli mukana myös kiertotalous ja ravinteiden kierto. Hallitusohjelmaan kirjatun tavoitteen mukaisesti 50 % kotieläinten lannasta ja yhdyskuntajätevesistä tulisi olla järjestelmällisen prosessoinnin piirissä vuoteen 2025 mennessä. Sipilän hallituksen kiertotalous-kärkihankkeen yhtenä toimenpiteenä olikin lisätä ravinteiden kierrätystä ja tehostaa toimia Itämeren ja vesien suojelemiseksi.

Ravinnekierron keskeiset elementit, kuten kotieläinten lanta, peltoviljely, kalastus, elintarviketeollisuuden sivuvirrat, biojäte ja jätevesilietteet on yleisesti tunnistettu. Näistä muodostuu monimutkainen ongelmakokonaisuus, jonka ratkaisemiseksi tarvitaan tutkimusta, jossa tarkastellaan ravinteiden kiertoa systeemisestä näkökulmasta. Systeemianalyysi on yleiskäsite lähestymistavalle, joka tarjoaa joukon erityyppisiä menetelmiä tukemaan monimutkaisten ongelmien järjestelmällistä tarkastelua. Ravinnekierrossa sitä voidaan hyödyntää tehokkaimpien ja kokonaisvaikutusten kannalta myönteisimpien ratkaisujen löytämiseksi. Ravinteiden lisäksi ravinnekierto-ongelmaan kytkeytyy myös hiilen kierto ekosysteemissä, koska ravinteet liikkuvat pääosin biomassaan sitoutuneena.

Systeemianalyyttinen lähestymistapa auttaa hahmottamaan systeemeissä olevat rakenteet, mallit ja kierrot yksittäisten tapahtumien tai tekijöiden sijasta. Lähestymistavan avulla pystytään tunnistamaan ongelman keskeiset muuttujat ja varmistumaan siitä, että kaikki olennaiset asiat tulee otettua huomioon ongelman analysoinnissa. Tavoitteena on tukea monimutkaisten syy–seuraussuhteiden hahmottamista ja näin saada jäsennelty kokonaiskuva systeemistä ja ymmärtää paremmin vaikutusten välisiä mittasuhteita. Kun prosessi toteutetaan yhdessä sidosryhmien kanssa, voidaan tukea sidosryhmien ja asiantuntijoiden välistä vuoropuhelua sekä yhdessä tunnistaa mahdollisia ristiriitoja ja win–win -tilanteita eri sidosryhmien tavoitteiden välillä. Lähestymistapa voi auttaa myös kartoittamaan lisätietotarpeita ja ymmärtämään epävarmuuksien merkitystä.

Esiselvityksen yleisenä tavoitteena oli tarkastella, miten maatalouden ravinteiden kierron tarpeet ja systeemianalyysin tarjoamat mahdollisuudet saadaan kohtaamaan, niin että ravinteiden kierron erityyppisten ongelmakokonaisuuksien ratkaisemiseksi saadaan tarkoituksenmukaista tukea. Esiselvityksen yksityiskohtaisempina tavoitteina oli:

- tunnistaa maatalouden ravinteiden kiertoon liittyviä keskeisiä haasteita ja tutkimuskysymyksiä ja arvioida systeemianalyyttisten menetelmien hyödyntämismahdollisuuksia näiden ratkaisemisessa,
- arvioida yksityiskohtaisemmin monitavoitearvioinnin hyödyntämismahdollisuuksia maatalouden ohjauskeinojen arvioinnissa sekä biomassavirtojen

hallintaa tukevan Biomassa-atlas -paikkatietojärjestelmän (<https://www.luke.fi/biomassa-atlas>) hyödyntämismahdollisuuksia biomassojen käsittelylaitosten optimoinnissa, ja

- tunnistaa keskeiset tahot, joilla on kiinnostusta ja osaamista aihepiiriin liittyen ja laatia suositukset jatkotutkimukselle.

Esiselvitys toteutettiin joulukuun 2018 ja kesäkuun 2019 välisenä aikana. Esiselvityksen aluksi järjestettiin kaksi työryhmän sisäistä työpajaa, jossa tunnistettiin esiselvityksen tarpeet sekä esiselvityksessä toteutettavat tehtävät. Työpajojen perusteella päädyttiin siihen, että erityyppisten menetelmien soveltamismahdollisuuksien tarkastelu eri tilanteissa tehdään taulukkotarkasteluna, jossa kirjallisuuskatsauksen avulla tarkastellaan eri menetelmätyyppien hyötyjä ja haasteita/rajoituksia sekä sitä, minkä tyyppiin maatalouden ravinteiden kierron ongelmiin niistä voisi olla apua.

Työpajojen perusteella päädyttiin tekemään myös kaksi yksityiskohtaisempaa tarkastelua, joissa tutkittiin syvällisemmin jonkin tietyn menetelmän soveltamista ravinteiden kierron kannalta keskeiseksi tunnistetun ongelma-alueen tukemiseen.

Ensimmäinen tarkastelu liittyi monitavoitearvioinnin soveltamiseen maatalouden ohjauskeinojen järjestelmällisessä vertailussa. Haasteena ohjauskeinojen arvioinnissa perinteiseen toimenpiteiden arviointiin verrattuna on, että ohjauskeinojen vaikutuksen realisoituvat vasta niillä tavoiteltujen toimenpiteiden kautta, ja näiden vaikutusten lisäksi ohjauskeinoilla voi olla myös sivuvaikutuksia. Esiselvityksessä luotiin viitekehys ohjauskeinojen monitavoitearviointiin ja tätä testattiin esimerkin omaisesti muutaman ohjauskeino arviointiin.

Toinen yksityiskohtaisempi tarkastelu liittyi Biomassa-atlaksen hyödyntämismahdollisuuksiin tukemaan biomassojen käsittelylaitosten toimintaedellytysten tarkastelua ja optimaalista sijoittelua. Biomassojen tehokas hyödyntäminen vaatii usein useiden eri biomassavirtojen yhdenaikaista hyödyntämistä, mutta tehokkuus riippuu mm. eri biomassojen mahdollisista synergioista sekä siitä, kuinka suuria kuljetusmatkoja vaaditaan. Biomassa-atlas puolestaan on järjestelmä, joka kokoaa eri biomassoja koskevan paikkatiedon yhteen käyttöliittymään ja sen tuottaman paikkatiedon avulla voidaan paikallisesti tai alueellisesti esim. etsiä tehokkaita biomassayhdistelmiä tai optimaalisia sijoituspaikkoja biomassojen käsittelylaitoksille. Systemianalyysin menetelmistä voidaan tällöin hyödyntää esimerkiksi verkosto-optimointimalleja, joita on käytetty paljon erilaisten logistiikkaverkostojen optimoinnissa, mutta ei juurikaan tässä yhteydessä. Esiselvityksessä luotiin optimointimalli biomassojen käsittelylaitosten sijoittelulle ja pohdittiin mallin asettamia reunaehtoja ja tarpeita Biomassa-atlaksesta saatavalle datalle ja sen rajapinnoille, mutta varsinainen optimointi jätettiin tehtäväksi tuonnempana.

2 Katsaus systeemianalyyttisiin menetelmiin

Laajasti katsoen systeemianalyysin voidaan katsoa olevan yläkäsite joukolle erityyppisiä menetelmiä, joita kaikkia yhdistää järjestelmällinen lähestymistapa ongelman tarkasteluun ja jäsenneilyn kokonaiskuvan luomiseen siitä (esim. Bennet ja Chorley, 1978; Senge, 1990). Monesti systeemianalyysin rinnalla tai sijasta puhutaan myös operaatiotutkimuksesta, etenkin jos halutaan korostaa fyysisen systeemin lisäksi myös siihen liittyvien toimintojen ymmärtämistä (Taha, 2011). Myös asiaan liittyvä termistö on kirjavaa ja menetelmien sijasta voidaan puhua myös esimerkiksi työkaluista tai lähestymistavoista (Howick ja Ackermann, 2011).

Tässä raportissa systeemianalyysin menetelmät on luokiteltu seitsemän eri käsitteen alle: 1) Ongelmien jäsentelymenetelmät, 2) Systeemidynaamiset mallit, 3) Monitavoitearvioinnin menetelmät, 4) Monitavoiteoptimoinnin menetelmät, 5) Portfolioanalyysin menetelmät, 6) Taloudellisen arvottamisen menetelmät, ja 7) Skenaarioanalyysin menetelmät. Toki menetelmiä voidaan luokitella muillakin eri tavoin (esim. Finnveden ja Moberg, 2005), mutta tässä esiselvityksessä käytetyn jaottelun perusteena on ollut tarkastella ravinnekierron kannalta sopivia menetelmäkokonaisuuksia.

2.1 Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)

Ongelmien jäsentelymenetelmien tavoitteena on tukea päätöstilanteen järjestelmällistä kehystämistä sekä siihen liittyvien olennaisten tekijöiden ja näiden välisten riippuvuuksien tunnistamista ja kuvaamista yhdessä sidosryhmien kanssa (Rosenhead ja Mingers, 2001; Mingers ja Rosenhead, 2004). Menetelmien tavoitteena ei varsinaisesti ole ratkaista ongelmaa, mutta tuottaa tukea tähän menetelmien soveltamisen myötä lisääntyneen ymmärryksen avulla. Menetelmiä hyödynnetäänkin usein yhdessä varsinaisten ongelman ratkaisemiseen tukea tarjoavien menetelmien kanssa (Marttunen ym., 2017), joista lisää seuraavissa luvuissa.

Siitä, mitä kaikkea luetaan ongelmien jäsentelymenetelmiksi, on eri näkemyksiä, ja tässä raportissa ymmärrämme termin käsittämään laajasti kaikki yksinkertaisetkin tavat tukea ongelman jäsentelyä, kunhan taustalla on jokin systemaattinen logiikka. Tällöin jäsentelymenetelmiin voidaan lukea monia erityyppisiä viitekehyksiä ja tarkistuslistoja, joiden tavoitteena on varmistaa, että ongelman kaikki olennaiset elementit tulevat tarkasteltua. Yksinkertaisimmillaan menetelmä voi olla lista, jonka avulla varmistetaan, että kaikki tekijät tulee otettua huomioon ongelman jäsentelyssä. Esimerkki tällaisesta on Checklandin (1981) *Soft Systems Methodology*n yhteydessä esittämä **CATWOE**-analyysi, jonka mukaan ongelman ratkaisussa on tarpeen tunnistaa ja ottaa huomioon seuraavat tekijät: **C**ustomers (asiakkaat), **A**ctors (toimijat), **T**ransformation (systeemissä tapahtuva muutosprosessi), **W**orldview (laa-

jempi maailmankuva), Owners (päättösvallan haltijat) ja Environment (ympäristön rajoitteet). Strategisessa suunnittelussa voidaan SWOT-analyysillä (esim. Helms ja Nixon, 2010) puolestaan tunnistaa eri strategioiden vahvuudet (Strengths), heikkoudet (Weaknesses), mahdollisuudet (Opportunities) ja uhat (Threats) ja näiden kautta löytää kestäviä ratkaisuja ongelmaan. Esimerkkejä muista vastaavista tarkistuslistoista on liitteen A luvussa A.1.

Tarkistuslistoista askel systemaattisempaan suuntaan on erilaiset kausaalimallit (*Causal Network*), joiden avulla kuvataan havainnollisesti kaaviokuvana ongelman eri komponentit, sekä nuolien avulla miten eri komponentit vaikuttavat toisiinsa (esim. Perdicoulis ja Glasson, 2006). Mallit voivat olla joko käsitteellisiä (joilla kuvataan, että asioiden välillä on yhteys) tai systeemidynaamisia (joissa matemaattisesti mallinnetaan asioiden välisten vaikutusten suuruuksia ja sen perusteella lasketaan muuttujien arvoja ajan funktiona). Käsitteellisten mallien tavoitteena on tunnistaa ongelman kannalta keskeisimpiä tekijöitä ja tekijöiden välisiä vaikutusketjuja sekä vahvistavia tai heikentäviä silmukoita, joiden avulla puolestaan voidaan arvioida välillisten tekijöiden vaikutusta lopputulokseen (esim. Kirkwood, 1998; Greenland ja Brumback, 2002). Esimerkkejä käsitteellisistä kausaalimalleista ovat erilaiset vaikutuskaaviot ja syy-seuraus -kaaviot, joista tarkemmin liitteen A luvussa A.1. Systeemidynaamisissa malleissa puolestaan on mukana vaikutusten numeerinen mallintaminen ja ne luetaan usein omaksi menetelmäryhmäkseen (Luku 2.2).

2.2 Systeemidynaamiset mallit

Systeemidynaamiset mallit ovat sukua kausaalimalleille, mutta niissä mennään askel pidemmälle kuvaamalla numeerisesti tekijöiden tilaa ja niiden välisiä vaikutuksia sekä ottamalla myös aikaperspektiivi huomioon (Kirkwood, 1998). Systeemidynaamisten mallien avulla pystytään tutkimaan ja ymmärtämään, miten muutokset jonkin parametrin arvossa voivat vaikuttaa monimutkaisten vaikutusketjujen kautta muihin tekijöihin. Mallien avulla voidaan usein interaktiivisesti ajan funktiona havainnollistaa, mitä tapahtuu, jos mallin jotain lähtötilaa tai johonkin tilaan vaikuttavaa syötettä muutetaan. Malleille voidaan myös laskea tasapainotiloja, joihin eri tekijät asettuvat ajan myötä. Malleilla voidaan myös tunnistaa takaisinkytkentöjä ja arvioida näiden voimistavaa vaikutusta. Periaatteessa systeemidynaamiset mallit voitaisiin määrittää pelkkinä joukkoina yhtälöitä, jotka kuvaavat eri osien välisiä riippuvuuksia, mutta visuaalisia kaavioita käytetään usein havainnollistamaan näitä riippuvuuksia.

Systeemidynaamisten mallien käyttö vaatii syvällistä ja usein yksityiskohtaistakin asiantuntemusta mallien elementtien välisistä vaikutusfunktioista. Vaarana on, että epätarkkuudet mallin parametreissa voivat kertautua pitkien vaikutusketjujen myötä etenkin, jos mallissa on vaikutusta vahvistavia takaisinkytkentöjä. Tämän vuoksi mallin antamia tuloksia tulee aina tulkita suhteessa taustalla tehtyihin oletuksiin ja yksinkertaistuksiin, jotka saattavat olennaisesti vaikuttaa lopputulokseen.

Eräs esimerkki systeemidynaamisista malleista on dynaaminen syy-seuraus -kaavio (*Causal Loop Diagram*), jonka avulla mallin muuttujien käyttäytymistä ajan funktiona voidaan tutkia esimerkiksi simuloimalla (esim. Kirkwood, 1998; Zeigler ym., 2000). Toinen esimerkki on varasto-virtaus -malli (*Stock-and-Flow*), jonka avulla voidaan kuvata, miten eri materiaalivirrat kulkevat systeemin eri osien (eli varastojen) välillä ajan kuluessa (Kirkwood, 1998). Liitteen A luvussa A.2 on lisätietoa systeemidynaamisista malleista.

2.3 Monitavoitearvioinnin menetelmät

Monitavoitearviointi on järjestelmällinen lähestymistapa, jonka avulla voidaan jäsentää ongelmia, tunnistaa niihin liittyviä tärkeitä tavoitteita ja arvioida vaihtoehtoja eri näkökulmista katsottuna (Belton ja Stewart, 2002; Gregory ym., 2012). Monitavoitearvioinnissa ongelmasta tunnistetaan eri osapuolten tavoitteet, muodostetaan vaihtoehdot ja tarkastellaan näitä erikseen kunkin tavoitteen suhteen. Tämän jälkeen vaihtoehtoja vertaillaan kokonaisuutena sen perusteella, miten hyvin ne toteuttavat arvioijan tärkeinä pitämät tavoitteet. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi laskemalla vaikutus- ja arvostustietojen perusteella kullekin vaihtoehdolle kokonaishyvyysarvo. Tulokset voidaan esittää kullekin arvioijalle erikseen tai yhdistämällä yksittäisiä arvioita näkökulmiksi. Tavoitteena on käydä jäsennellysti läpi koko ongelma ja kaikki siinä esiintyvät näkökulmat, ja tämän myötä saada parempi käsitys vaihtoehtojen vahvuuksista ja heikkouksista.

Pääpiirteittäin monitavoitearvioinnista voidaan tunnistaa seuraavat vaiheet:

1. Ongelman jäsentely
 - Ongelman rajaaminen
 - Tavoitteiden/kriteerien määrittäminen ja jäsentäminen arvopuuksi
 - Mittareiden määrittäminen kriteereille
 - Vaihtoehtojen muodostaminen
2. Preferenssien ja mittausarvojen määrittäminen
 - Vaihtoehtojen hyvyyden arviointi kriteerien suhteen
 - Kriteerien tärkeyden arviointi
3. Tulosten arviointi
 - Vaihtoehtojen kokonaisarvojen laskenta ja analysointi
 - Herkkyysanalyysi

Ympäristöongelmat koskettavat tyypillisesti monia eri sidosryhmiä, joilla voi olla hyvinkin erilaiset mieltymykset (Banville ym., 1998). Tällaisissa tilanteissa monitavoitearvioinnin suurimmat hyödyt saadaan tarkastelemalla sitä, miten ja miksi eri sidosryhmien näkemykset tavoitteiden tärkeydestä poikkeavat toisistaan (Marttunen ym., 2015). Eri sidosryhmien mieltymyksillä saatuja tuloksia voidaan analysoida esimerkiksi vertailemalla yksittäisten edustajien tuloksia samassa kuvaajassa tai ryhmittelemällä sidosryhmien edustajia "samanhenkisiin" ryhmiin heidän mieltymystensä perusteella. Tavoitteena on löytää perimmäiset syyt siihen, miksi eri sidosryhmät pitävät eri asioita tärkeinä, ja tätä kautta löytää ratkaisuja, jotka mahdollisimman hyvin ottaisivat eri näkemykset huomioon.

Liitteen A luvussa A.3 on tarkemmin kuvattu arvopuuanalyysi (Keeney ja Raiffa, 1976; Keeney, 1992), joka on eräs paljon käytetty monitavoitearvioinnin menetelmä.

2.4 Monitavoiteoptimoinnin menetelmät

Optimointiongelmissa tavoitteena on löytää päätösmuuttujille annettujen rajoitusten puitteissa sellaiset arvot, että tavoitefunktion arvo joko minimoituu tai maksimoituu (esim. Fletcher, 2013). Esimerkiksi optimoitaessa pellolta saatavaa satoa, on tavoitefunktiona tyypillisesti sadosta saatavan tuoton maksimointi, päätösmuuttujana esimerkiksi lannoituksen määrä ja rajoitteena lannoitusta rajoittavat ympäristömääräykset.

Käytännössä optimointiongelmiä on monenlaisia ja niitä voidaan luokitella esimerkiksi sen mukaan ovatko päätösmuuttujat jatkuvia vai kokonaislukumuuttujia, tai sen mukaan ovatko tavoite- ja/tai rajoitusfunktiot lineaarisia vai epälineaarisia

(esim. Fletcher, 2013). Termiä kombinatorinen optimointi käytetään joskus kuvaamaan optimointitehtävää, joka voidaan formuloida käyttäen ainoastaan binäärisiä päätösmuuttujia (jotka saavat arvon 0 tai 1). Näin ollen kombinatorisessa optimointiongelmassa ratkaisu voidaan määrittellä niiden päätösmuuttujien kombinaationa, jotka saavat arvon 1. Dynaamisissa optimointiongelmissa puolestaan aika on mukana yhtenä ulottuvuutena, jolloin optimiratkaisu on myös ajasta riippuva funktio.

Monitavoiteoptimoinnissa (esim. Ehr Gott, 2005; Miettinen, 2012) on yhden optimoitavan tavoitteen sijasta useita tavoitefunktioita, joiden arvoa pyritään optimoimaan yhtä aikaa. Tavoitteet ovat usein ristiriidassa toistensa kanssa, jolloin on mahdotonta saavuttaa optimia kaikissa tavoitefunktioissa yhtäaikaaisesti, joten joudutaan tekemää valintoja (*trade-offs*) tavoitteiden välillä. Esimerkiksi tuoton optimoinnin lisäksi voi tavoitteena olla vesistöihin pääsevien ravinteiden määrän minimointi. Tällöin tarvitaan päätöksentekijältä tietoa siitä, kuinka tärkeänä hän pitää eri tavoitteiden saavuttamista suhteessa toisiinsa.

Liitteen A luvussa A.4 on matemaattisesti kuvattu monitavoiteoptimoinnin ongelma ja eri ratkaisumenetelmiä.

2.5 Portfolioanalyysin menetelmät

Monitavoitearviointia ja -optimointia voidaan edelleen laajentaa ongelmiin, joissa parhaan vaihtoehdon sijasta etsitäänkin parasta toimenpideyhdistelmää monien mahdollisten toimenpiteiden joukosta. Tällöin puhutaan portfolioanalyysistä, portfoliopäätösanalyysistä tai portfolio-optimoinnista (Salo ym., 2011; Lahtinen ym., 2017). Periaatteessa portfolioanalyysin ongelmat voidaan redusoida esimerkiksi tavallisen monitavoitearvioinnin ongelmiksi, jos kaikki mahdolliset toimenpiteiden yhdistelmät otetaan kukin omiksi vaihtoehdoikseen. Vaihtoehtojen määrä kasvaa tällöin kuitenkin hyvin suureksi ja käytännössä niiden vertailu tulee mahdottomaksi. Portfolioanalyysi tarjoaa kuitenkin menetelmiä, joiden avulla voidaan laskennallisesti analysoida suuriakin toimenpidekokonaisuuksia ilman, että näistä täytyisi muodostaa yksittäisiä vaihtoehtoja.

Vaikka portfolioanalyysi tarjoaa teoreettisesti läpinäkyvän ja johdonmukaisen tavan tarkastella parhaan toimenpideyhdistelmän löytämistä, niin käytännössä sen käyttö on toistaiseksi ollut kuitenkin melko vähäistä (Lahtinen ym., 2017). Eräs syy tähän on, että mallintaminen on yhä sekä kognitiivisesti että tiedon saatavuuden kannalta haastavaa. Esimerkiksi, jos toimenpiteiden välillä on synergioita tai toisten toimenpiteiden tehokkuutta heikentäviä vaikutuksia (eli ns. kannibalismia), niin kaikkien näiden eksplisiittinen mallintaminen yksittäin voi olla erittäin työlästä.

2.6 Taloudellisen arvottamisen menetelmät

Monissa hankkeissa on tarve tarkastella jonkin toimenpiteen hyötyjä suhteessa siihen panostettuihin kustannuksiin, jolloin voidaan hyödyntää taloudellisen arvottamisen menetelmiä. Eräs yleisimmin käytetyistä menetelmistä on kustannus-hyötyanalyysi (*Cost-Benefit Analysis – CBA*; esim. Boardman, 2017), jonka avulla voidaan arvioida toimenpiteiden hyötyjä rahamittallisesti ja verrata näitä toimenpiteen kustannuksiin. Analyysiä voidaan soveltaa joko jonkin yksittäisen toimenpiteen kannattavuuden arviointiin tai useiden eri toimenpiteiden järjestelmälliseen arviointiin yhtenäisten periaatteiden perusteella. Kustannus-hyötyanalyysin toteutusprosessi ja matemaattinen tausta on kuvattu liitteen A luvussa A.6.

Kustannusten rahallinen arviointi on usein melko suoraviivaista. Sen sijaan hyötyjen arviointi on haastavampaa, sillä suorien rahallisten hyötyjen lisäksi toimenpiteillä

on monesti esimerkiksi ympäristön tilaan liittyviä hyötyjä, joita voi olla vaikea mitata rahassa. Vaikutusten mittaamiseen rahassa on kuitenkin kehitetty erilaisia menetelmiä. Esimerkiksi maksuhaluuskyselyllä (*Contingent Valuation*; esim. Diamond ja Hausman, 1994) vaikutusten rahallinen arvo määritellään sen mukaan, kuinka paljon arvioija on valmis maksamaan saavutettavasta tavoitteesta. Omaisuuksien muutoksia mittaava menetelmä (*Hedonic Pricing*; esim. Vanslebrouck ym., 2005) puolestaan pyrkii löytämään yhteyden markkinallisen hyödykkeen (esimerkiksi rantakiinteistön hinta) ja ympäristöhyödykkeen (esimerkiksi veden laatu) välillä. Maksuhaluuskyselyä voidaan luonnehtia ilmaistujen (*stated*) preferenssien menetelmäksi, jossa preferenssejä kysytään suoraan ihmisiltä, kun taas omaisuuksien muutoksia mittaavaa menetelmää paljastettujen (*revealed*) preferenssien menetelmäksi, jossa preferenssit paljastuvat ihmisten ostokäyttäytymisen myötä.

Kustannus-hyötyanalyysin rinnalla on olemassa myös muita taloudellisen arvotamisen menetelmiä. Esimerkiksi kustannus-tehokkuusanalyysissä (esim. Balana ym., 2011) kustannukset arvioidaan rahassa, mutta hyödyt arvioidaan jollakin luonnollisella niiden mittaamiseen soveltuvalla mittarilla. Tuotoksena saadaan hyötyjen suhde kustannuksiin, joka yksittäisen toimenpiteen kohdalla ei välttämättä kerro mitään, mutta usean vertailtavan toimenpiteen kohdalla kertoo näiden kustannus-tehokkuuden suhteessa muihin toimenpiteisiin.

2.7 Skenaarioanalyysin menetelmät

Skenaariosuunnittelu on lähestymistapa, jonka avulla voidaan analysoida ja hallita tulevaisuuden epävarmuuksia strategisessa suunnittelussa (Maack, 2001). Tässä yhteydessä termillä skenaario tarkoitetaan tulevaisuuden mahdollista tapahtumaketjua, joka kuvaa, minkälaiseksi tulevaisuus voisi muodostua, jos tietyt oletukset toteutuisivat. Tavoitteena on erilaisten skenaarioiden avulla arvioida mahdollisia ulkoisen toimintaympäristön muutoksia, ja tämän perusteella analysoida, miten näihin muutoksiin voidaan vastata.

Skenaarioiden analyysiprosessista voidaan tunnistaa seuraavat päävaiheet:

1. Valmistelu
 - Ongelman rajaaminen
 - Sidosryhmien osallistaminen
2. Skenaarioiden muodostaminen
 - Keskeisen tekijän tai päätöksen tunnistaminen
 - Ohjausmuuttujien tunnistaminen
 - Skenaariorunkojen luominen
 - Skenaarioiden täydentäminen
3. Skenaarioiden analysointi ja kommunikointi
 - Skenaarioiden seurausten analysointi
 - Skenaarioiden välittäminen sidosryhmille
4. Skenaarioiden soveltaminen käytännössä
 - Tulosten ja strategisten tavoitteiden hyödyntäminen käytännön toimenpiteiden suunnitteluun

Tyypillisesti prosessissa luodaan muutamia (noin 4–5) skenaarioita, jotka kattavat sekä tulevaisuuden trendejä että odottamattomia – mutta silti mahdollisia – ja vaikutuksiltaan suuria muutoksia tulevaisuuden tiloihin. Prosessin ensimmäinen vaihe on tällöin ohjausmuuttujien määrittäminen ja epävarmuuksien tunnistaminen. Tämän jälkeen voidaan hyödyntää esimerkiksi nelikenttää, jossa skenaarioihin vaikuttavat tekijät jaetaan niiden vaikutuksen suuruuden perusteella merkityksellisiin

ja vähämerkityksellisiin asioihin, sekä niihin liittyvän epävarmuuden perusteella todennäköisiin ja epätodennäköisiin asioihin. Skenaariot muodostetaan nelikentän perusteella ottamalla varioitaviksi ohjausmuuttujiksi sekä vaikutuksiltaan että epävarmuudeltaan suuria tekijöitä, sillä nämä ovat lopputuloksen kannalta usein kaikkein merkittävimpiä.

Skenaarioiden luomiseen voidaan hyödyntää myös luvussa 2.1 mainittuja ongelman jäsentelyyn ja tekijöiden tunnistamiseen liittyvät menetelmät. Olennainen osa skenaarioanalyysia on myös skenaarioiden ympärille luotavat loogiset tarinat siitä, miten kuhunkin tilaan on tultu, ja mitä on tällöin täytynyt tapahtua. Nämä auttavat hahmottamaan skenaarioiden tapahtumiseen johtavia syitä sekä eläytymään skenaarion myötä tapahtuviin oletettuihin asioihin. Skenaariota voidaan myös lähteä luomaan ns. *backcasting*-hengessä takautuvasti ottamalla lähtökohdaksi tulevaisuuden tila ja pohtimalla, mitä on täytynyt tapahtua, että kyseiseen tilaan on päädytty.

2.8 Menetelmien vertailu

Menetelmien soveltamisessa on ensiarvoisen tärkeää muistaa, että mikään yksittäinen menetelmä ei sovellu kaikkiin suunnittelu- ja arviointilanteisiin. Jokaisella menetelmällä on omat vahvuutensa, mutta myös omat rajoitteensa ja puutteensa. Tämän vuoksi menetelmien soveltamisessa tulee lähtökohtana aina olla tarkasteltavan ongelman tarpeet: niiden mukaan pohditaan, millä menetelmällä voitaisiin mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti tukea ongelman ratkaisua. Muutoin vaarana on niin sanottu ”vasara ja naula” -syndrooma, jossa vasaraa kädessä pitävä henkilö näkee kaikki ongelmat nauloina (Prell ym., 2007).

Ensisijaisesti menetelmän valinnassa tulee katsoa kunkin menetelmän perimmäistä käyttötarkoitusta ja sen soveltuvuutta tarkasteltavaan ongelmaan. Tämän lisäksi on myös tarkasteltava mahdollisia rajoittavia tekijöitä, jotka voivat vaikeuttaa menetelmän soveltamista. Myös menetelmän vaatimien resurssien osalta tulee punnita, mitkä ovat menetelmällä saatavat hyödyt verrattuna soveltamisen kustannuksiin, sillä monet menetelmistä ovat melko työläitä toteuttaa. Lisäksi on tarpeen pohtia, mikä on paras ja kustannustehokkain tapa soveltaa menetelmää, sillä menetelmiä voidaan soveltaa monin eri tavoin. Esimerkiksi sidosryhmien osallistaminen vie usein paljon resursseja, jolloin on pohdittava, kuinka intensiivisesti tämä on tarkoituksenmukaisinta toteuttaa. Myös mallintamiseen tarvittavan datan keruu voi usein olla työlästä, jolloin tulee miettiä, voisiko tarkastelun tehdä esimerkiksi asiantuntija-arvioiden avulla.

Samassa tapaustutkimuksessa voidaan soveltaa usein monia menetelmiä. Esimerkiksi monitavoitearviointia tukemaan voidaan usein käyttää jotain ongelmien jäsentelymenetelmää. Marttunen ym. (2017) ovat tehneet katsauksen menetelmien yhteiskäytöstä. Mikäli ne ymmärretään laajalti käsittämään kaikki edellä mainitut järjestyslistamaiset tavat tukea ongelmien jäsentelyä, niin soveltaja ei välttämättä edes itse tiedosta käyttävänsä ongelman mitään erityistä menetelmää. Etenkin jos tutkimuksessa hyödynnetään jotain edistyneempää menetelmää, niin siihen on usein jo sisäänrakennettuna jotain järjestelmällisiä ongelman eri elementtien tunnistamiseen käytettäviä menetelmiä.

Taulukkoon 1 on koottu yhteenvetona kuvaukset tässä luvussa käsitellyistä menetelmistä ja niiden ominaisuuksista.

Taulukko I. Menetelmien ominaisuuksien vertailu

Menetelmä	Käyttötarkoitus	Menetelmän tuotos	Tarvittava data
Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)	Päätöstilanteen kehystäminen sekä asioiden välisten riippuvuuksien kuvaaminen ja tunnistaminen	Kaaviokuva tilanteesta ja ongelman eri komponenttien vaikutuksesta toisiinsa (esim. nuolilla, mikä vaikuttaa mihinkin), ja tämän myötä kokonaisymmärrys ongelmasta	Alustavaa tietoa ongelmakentästä
Systeemidynaamiset mallit	Systeemin osien välisen vuorovaikutusten mallintaminen dynaamisesti	Dynaaminen malli, jolla voidaan simuloida tilanteen kehittymistä erilaisilla lähtöoletuksilla ja parametrien arvoilla	Funktiot mallin eri komponenttien väliselle vuorovaikutukselle (eli miten jonkin komponentin arvo riippuu toisesta), sekä dataa lähtötilanteesta
Monitavoitearvioinnin menetelmät	Tavoitteiden tunnistaminen sekä vaihtoehtojen muodostaminen ja vertailu eri tavoitteiden suhteen	Arviot vaihtoehtojen kokonaisuhyvyydestä perustuen vaihtoehtojen hyvyyteen eri tavoitteiden suhteen, ja siihen miten sidossuhteet arvostavat eri tavoitteita	Arviot vaihtoehtojen vaikutuksista tavoitteiden saavuttamista mittaavien mittareiden suhteen
Monitavoiteoptimoinnin menetelmät	Parhaiden arvojen tunnistaminen päätösmuuttujille	Optimaaliset arvot päätösmuuttujille	Funktiot sille, miten tavoitteiden arvot riippuvat päätösmuuttujien arvosta, sekä dataa lähtötilanteesta
Portfolioanalyysin menetelmät	Parhaan toimenpideyhdistelmän luominen/tunnistaminen	Ehdotus tehokkaasta toimenpideyhdistelmästä ottaen huomioon toimenpiteiden vaikutukset ja annetut (resurssien) rajoitteet	Toimenpiteiden vaikutukset tavoitteiden saavuttamista mittaavien mittareiden suhteen
Taloudellisen arvottamisen menetelmät	Toimenpiteiden kustannusten ja hyötyjen sekä näiden perusteella kustannustehokkuuden arviointi	Arvio siitä, ylittävätkö toimenpiteistä saatavat (rahassa määritetyt) hyödyt niiden toteuttamiseen tarvittavat kustannukset	Arviot vaihtoehtojen vaikutuksista rahassa
Skenaarioanalyysin menetelmät	Erilaisten vaihtoehtojen mahdollisten tulevaisuuden tapahtumakulkujen kuvaus, ja niiden perusteella strategioiden pohtiminen tulevaisuutta varten	Kuvauksia mahdollisista tulevaisuuden tapahtumakuluista tehtyjen oletusten pohjalta, sekä strategioita erilaisiin tulevaisuuksiin varautumiseksi.	Tyypillisesti asiantuntija-arvioina tehtäviä tarkasteluja tulevaisuuden tapahtumista ja niiden vaikutuksista. Voidaan myös hyödyntää esim. mallien avulla saatavaa tietoa.

Taulukko I. (jatkuu).

Menetelmä	Sidosryhmien mukanaolo	Menetelmän rajoitteet/ haasteet	Epävarmuuden kuvaus
Ongelmien jäsen- telymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)	Välttämätöntä koko prosessin ajan. Sidosryhmille tärkeät tavoitteet pyritään sisällyttämään malliin, mutta ei eksplisiittisesti oteta kantaa, kuinka tärkeitä nämä ovat	Tasapainoilu kaavioiden kattavuuden ja käytettävyyden välillä. Kompleksisissa ongelmissa, joissa 'kaikki vaikuttaa kaikkeen', voi kaavioista tulla monimutkaisia.	Jos ei ole varmaa tietoa vaikutuksista, voidaan nuolia kuvata esim. katkoviivoin
Systeemidynaamiset mallit	Mallinnus usein asiantuntija-pohjaista, mutta sidosryhmät voivat olla mukana ongelman jäsentämisessä ja mallin analysoinnissa ja mallin tuloksia voidaan tarkastella suhteessa arvostuksiin.	Mallintamisessa käytettävien funktioiden määrittäminen voi olla haastavaa ja pienetkin virheet funktioissa voivat moninkertais- tua lopputuloksessa	Eksplisiittisesti haastavaa, mutta herkkyytarkasteluita voidaan tehdä ajamalla mallia eri parametrien ja lähtödatan arvoilla
Monitavoitearvioinnin menetelmät	Prosessin aikana mallinnetaan sidosryhmien mieltymyksiä eri tavoitteiden suhteen. Mikäli sidosryhmien tavoitteet eroavat toisistaan, on hyvä osallistaa heidät alusta asti.	Voidaan arvioida vain rajoitettu vaihtoehtojoukkoa (yleensä max. 10 vaihtoehtoa) ja todellisuudessa paras vaihtoehto voi olla jossain välimaastossa	Ei eksplisiittisesti, mutta on olemassa malleja, jossa muuttujien arvot annetaan vaihteluvälinä tai todennäköisyysjakauksina tarkkojen arvojen sijasta. Tällöin myös tulokset ovat vaihteluvälisiä tai todennäköisyysjakauksia
Monitavoiteoptimoinnin menetelmät	Prosessin aikana mallinnetaan sidosryhmien mieltymyksiä eri tavoitteiden suhteen esimerkiksi interaktiivisten prosessien avulla. Mikäli sidosryhmien tavoitteet eroavat toisistaan, on hyvä osallistaa heidät alusta asti.	Mallien laskenta perustuu optimointimenetelmien hyödyntämiseen (esim. lineaarinen ohjelmointi) ja monimutkaisissa ongelmissa tulosten havainnollistaminen voi olla haastavaa	Voidaan ottaa mukaan malliin esim. rajoitteina
Portfolioanalyysin menetelmät	Prosessin aikana mallinnetaan sidosryhmien mieltymyksiä eri tavoitteiden suhteen. Mikäli sidosryhmien tavoitteet eroavat toisistaan, on hyvä osallistaa heidät alusta asti.	Toimenpiteiden vaikutusten ja etenkin toimenpiteiden välisen vuorovaikutuksen arviointi työläästä mikäli toimenpiteitä on paljon	Sidosryhmien arvostukset voidaan syöttää rajoitteina malliin esimerkiksi tarkkojen arvojen sijasta
Taloudellisen arvottamisen menetelmät	Riippuu taloudellisen arvottamisen menetelmästä. Esimerkiksi maksuhalukkuus-kyselyissä tarvitaan arvio siitä, kuinka halukkaita sidosryhmät ovat maksamaan toimenpiteistä saadakseen niillä saavutettavat hyödyt.	Hyötyjen mittaaminen rahassa voi olla haastavaa etenkin aineettomien hyötyjen kohdalla. Tulevaisuuden hyötyjen arviointiin käytettävän 'diskonttauskoron' määrittäminen voi vaikuttaa lopputulokseen	Ei eksplisiittisesti, mutta tuloksille voidaan tehdä herkkyyso- nalyyskejä
Skenaarioanalyysin menetelmät	Tarve olla mukana alusta asti suunnittelemassa skenaarioita ja tuomassa esiin mahdollisia uhkakuvia ja skenaarioihin vaikuttavia ohjausvoimia sekä sitä, kuinka merkittävänä uhkat nähdään.	Keskitytään vain muutamaaan skenaarioon, mutta todellisuudessa tilanne voi olla aivan erilainen	Skenaariot perustuvat tulevaisuudesta tehtäviin oletuksiin, joiden toteutuminen on epävarmaa. Ei kuitenkaan oteta kantaa eksplisiittisesti oletusten toteutumisen todennäköisyyksiin

3 Menetelmien soveltaminen ja hyödyntämispotentiaali maatalouden ravinteiden kierrossa

Seuraavassa tarkastellaan eri menetelmätyyppien soveltamista ja hyödyntämispotentiaalia maatalouden ravinteiden kierrossa sekä osin myös yleisemmin maataloudessa. Tarkastelua varten tehtiin kirjallisuuskatsaus, jossa tunnistettiin maatalouden ravinteiden kiertoon liittyviä keskeisiä tutkimuskysymyksiä sekä etsittiin edustavia menetelmien soveltamisesimerkkejä ja käytiin läpi jo tehtyjä aiempia katsauksia menetelmien soveltamisesta tutkimuskysymysten ratkaisemiseen. Vaikka menetelmätyyppejä käsitellään tässä erillisinä, niin käytännössä ongelmat ovat niin monisyisiä, että parhaaseen ratkaisuun pääsemiseksi on tarpeen hyödyntää useita eri menetelmiä. Parhaimmillaan menetelmien yhteiskäyttö on tiivis jatkumo, jossa edellisen menetelmän antamia tuloksia voidaan hyödyntää seuraavan menetelmän syötteenä. Liitteessä B on esimerkkejä kirjallisuudesta kunkin menetelmätyypin soveltamisesta.

3.1 Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)

Ongelmien jäsentelymenetelmien tavoitteena on saada parempi ymmärrys ongelman luonteesta ja siihen liittyvistä monimutkaisista vaikutusketjuista. Maatalouden ravinteiden kiertoon liittyvät ongelmat ovat usein hyvin monimutkaisia: etenkin kiertoon liittyvien suorien ja välillisten vaikutusten muodostamien vaikutusketjujen ymmärtämiseksi voi menetelmistä olla suurta hyötyä. Sidosryhmät ovat keskeisessä roolissa, jolloin menetelmiä voidaan hyödyntää myös esimerkiksi tutkimustulosten kommunikoinnissa maatalouden toimijoille.

Jäsentelymenetelmien soveltamismahdollisuuksista maataloudessa löytyy kirjallisuudesta lukuisia esimerkkejä. Esimerkiksi Plän ym. (2014) mukaan systeemanalyysi voi tarjota paljon uusia mahdollisuuksia maanviljelyn ongelmien monitieteelliseen tarkasteluun ja sidosryhmien aktiiviseen osallistamiseen. Stave ja Kopainsky (2015) puolestaan korostavat, että konseptuaaliset mallit voivat toimia välivaiheena ongelman sanallisten kuvausten ja varsinaisen formaalin simuloinnin välillä. Niiden avulla tutkijat voivat jäsenellä tietämystään systeemistä, joka puolestaan voi toimia ensimmäisenä vaiheena varsinaisen selittävän mallin rakentamiselle. Päätöksentekijöille konseptuaaliset mallit puolestaan voivat toimia apuvälineenä systeemin muutoksen aikaansaamiseksi tarvittavien vipuvoimien tunnistamiseen. Stave ja Kopainsky (2015) havainnollistivat muutaman esimerkin avulla, miten kausaalimalleilla voidaan tunnistaa monimutkaisiin ruoantuotantjärjestelmiin liittyviä haavoittuvuuksia ja miten mahdolliset haavoittuvuudet kertautuvat systeemissä.

Kirjallisuudessa on myös tapaustutkimuksia, joissa on tarkasteltu pelkästään jonkin yksittäisen ongelman jäsentelymenetelmän soveltamista ravinteiden kierrossa. Esimerkiksi Ness ym. (2010) ovat soveltaneet DPSIR-kehikkoa (kts. liitteen A luku A.1) maatalouden aiheuttamien vesistöjen rehevöitymistä edistävien paineiden tar-

kasteluun ja esimerkkinä tarkastelevat Ruotsin maatalouden Itämereen kohdistuvia paineita. Tarkastelu auttaa tunnistamaan ja analysoimaan kansallisella ja myös kansainvälisellä tasolla tapahtuvien ohjausvoimien monimutkaisia vaikutusketjuja Itämeren tilaan. Ragnarsdottir ym. (2011) sovelsivat kausaalimallia fosforin kierron ympäristövaikutusten mallintamiseen ja havainnollistamiseen. He tutkivat vaihtoehtoisten kulutus- ja tuotantoratkaisujen vaikutuksia muun muassa ruoantuotannon, jätteidenkierrätyksen ja kulutukseen. Schiere ym. (2002) puolestaan havainnollistivat yleistetyin vaikutuskaavion avulla karjankasvatuksen ja viljelykasvien viljelyn välillä liikkuvia materiaali- ja virta- ja energiatuloja. Suomessa Myllyviita ja Rintamäki (2018) ovat Bio-ReEE-hankkeessa soveltaneet SWOT-analyysia kierrätyslannoitteiden vahvuuksien ja heikkouksien sekä niihin liittyvien mahdollisuuksien ja uhkien tunnistamiseen.

Walters ym. (2016) sovelsivat kausaalimallia maatalouden tuotantoketjun mallintamista lähtien alkutuotannosta ja päätyen kuluttajan valintojen sosiaalisiin ja ympäristövaikutuksiin. Kausaalimallin avulla pystyttiin muun muassa tunnistamaan itseään vahventavia ja heikentäviä silmukoita ja näin analysoimaan eri vaikutusketjujen merkittävyyttä. Tässäkin tapauksessa analyysia jatkettiin systeemidynaamisella mallintamisella siten, että kausaalimallin pohjalta luotiin varasto–virtaus -malli varsinaisten kvantitatiivisten massavirtojen analysointiin. Mallin simuloinnin perusteella luotiin vaihtoehtoisille toimintatavoille erityyppisiä kestävyysindeksejä, joiden perusteella pystyttiin vertailemaan toimintatapojen vahvuuksia ja heikkouksia.

3.2 Systeemidynaamiset mallit

Maatalouden ravinnekierto on luoteeltaan hyvin systeeminen ongelma, jossa ravinteet liikkuvat systeemissä tiettyjen lainalaisuuksien mukaan. Systeemidynaamiset mallit on suunniteltu juuri tämäntyyppisiä ongelmia varten lisäämään ymmärrystä monimutkaisten vaikutusketjujen kokonaisvaikutuksista. Soveltamisessa on kuitenkin tärkeää aluksi rajata tarkasteltava ongelma, sillä liian laajasti rajattuna tulokset jäävät helposti yleiselle tasolle ja vaille konkretiaa, kun taas liian suppea malli ei välttämättä ota kaikkia vaikutuksia huomioon. Haasteena on myös vaikutusmekanismien tunnistaminen, sillä mallien soveltaminen vaatii usein hyvin yksityiskohtaistakin tietoa siitä, miten mikäkin systeemin osa vaikuttaa toiseen (Turner ym., 2016). Ravinteiden kulkeutumiseen vesistöihin vaikuttaa esimerkiksi maaperän laatu ja sadanta, ja sadannan ajoittuminen suhteessa lannoitusajankohtaan. Tämän vuoksi tulosten tulkinnassa on aina otettava huomioon mallien rajoitteet esimerkiksi liittyvien vaikutusmekanismien numeeriseen mallintamiseen.

Kirjallisuudesta saatujen kokemusten perusteella systeemidynaamiset mallit sopivat hyvin maatalouden ravinteiden kierron mallintamiseen. Fernandez-Mena ym. (2016) ovat tehneet katsauksen, jossa arviointiin erityyppisten mallinnus- ja arviointityökalujen soveltuvuutta maatalouden ruoantuotantojärjestelmien tarkasteluun paikallisesti. Katsauksessa tunnistettiin kolme ylätasoa menetelmäperheitä: ympäristövaikutusten arviointityökalut, varasto–virtaus -mallit ja agenttipohjaiset menetelmät. Johtopäätöksenä oli, että varasto–virtaus -mallien soveltaminen yhdessä kahden muun menetelmäperheen kanssa on lupaava tapa analysoida eri toimijoiden vaikutusta virtojen muodostumiseen sekä erilaisten tapojen mahdollisuuksia edistää paikallistason suljettujen kiertojen muodostumista. Turner et al. (2016) ovat arvioineen muutamia tapaustutkimuksia, joissa systeemidynaamista mallintamista on sovellettu maatalouden ja ympäristövarojen hallintaan liittyvissä kysymyksissä. Heidän mukaansa malleista on suurta hyötyä monimutkaisten maatalouteen liittyvien kysymysten hallinnassa etenkin silloin, kun pystytään hyödyntämään simulointimalleja. Mirchi ym. (2012) puolestaan esittelevät havainnollistavien esimerkkien avulla systeemidynaamisten mallien soveltamista vesistöjen hallinnan ongelmien

kokonaisvaltaiseen tarkasteluun ja monet esimerkeistä sivuavat myös maatalouden ravinteiden kiertoa.

Vaikutusmekanismien ymmärryksen lisäämiseksi Chowdhury ym. (2014) ovat tarkastelleet fosforivirtojen luonnetta ja kulkeutumista erilaisilla maantieteellisillä mittakaavoilla vaihdellen yksittäisestä alueesta aina kansallisten tasojen tarkasteluihin. Tarkastelu perustuu kirjallisuuskatsaukseen, jossa vertailtiin 21 eri fosforivirtojen analyysia. Tarkastelu lisäsi ymmärrystä eri tasolla tapahtuvien fosforivirtojen hallinnasta, mutta myös tunnisti selviä tiedon puutteita esimerkiksi alueellisella tasolla tapahtuvasta fosforivirtojen vuosittaisen vaihtelun ymmärryksestä.

Ongelman mittakaava ei rajoita systeemidynaamisten mallien hyödyntämistä, kunhan se vaan otetaan huomioon mallinnuksessa. Esimerkiksi Cooper ja Carliell-Marquet (2013) ovat tarkastelleet kansallisella tasolla Britannian ruoantuotantojärjestelmän fosforivirtoja varasto–virtaus -mallin kaltaisella massavirtausanalyysillä. Tarkastelun avulla pystyttiin tunnistamaan keskeisiä kohteita, joiden avulla fosforin kierrätystä pystytään edistämään liittyen esimerkiksi jätevesien puhdistamiseen, maaperän fosforipitoisuuksien alentamiseen sekä lannoitteiden käyttöön. Tarkastelun rajoitteina tuotiin esiin, että kansallisen tason analyysillä ei välttämättä päästä kiinni paikallisesti tehokkaisiin toimenpiteisiin ja että esimerkiksi vuoden sisällä tapahtuva vaihtelua ei ollut mukana tarkastelussa. Toisena ääripäänä voidaan mainita Treadwellin ym. (2018) tarkastelu, jossa simuloitiin dynaamisen fosforivirtausmallin avulla Montrealin ruoantuotanto- ja jätevesijärjestelmän toimintaa. Cooper ym. (2018) ovat mallintaneet fosforin kulkeutumista järviin varasto–virtaus -mallin avulla ja simuloineet järven fosforipitoisuuksia kolmen eri skenaarion avulla.

Systeemidynaamisia menetelmiä on sovellettu paljon myös Suomessa ja muissa Itämeren rannikkovaltioissa. Antikainen ym. (2005) ovat mallintaneet varasto–virtaus -mallilla typen ja fosforin virtausta Suomessa. Mallin avulla pystyttiin havainnollistamaan ravinteiden kiertoa ja tunnistamaan ravinteiden katoamista ilmaan, veteen ja maaperään. Yhtenä ratkaisuna ongelmaan ehdotettiin tasapainoisempaa ravinteiden käyttöä, mikä voidaan saavuttaa esim. taloudellisilla kannustimilla tai kehittämällä tuotantosysteemien laadun varmistamista ja valvontaa. Asmala ja Saiku (2010) puolestaan ovat soveltaneet ainevirta-analyysiä typen ja fosforin kierron mallintamiseen kalankasvatusjärjestelmissä. Iho ym. (2017) rakensivat systeemidynaamisen mallin, jossa tarkastellaan liuenneen ja hiukkasmaisen fosforin vaikutuksia rehevöitymiseen. Modin-Edman ym. (2007) ovat simuloineet yksittäisen maatilan fosforivirtojen kulkeutumista dynaamisen biomassa-virtausmallin avulla Ruotsissa ja Iital ym. (2018) vastaavan mallin avulla Viron ja Latvian ravinnevirtoja.

Maatalouden ravinteiden kulkeutumiseen vesistöissä on myös kehitetty useita erilaisia malleja, joiden toimintaperiaatteet nojaavat pitkälti systeemidynaamisten mallien toimintaperiaatteisiin. VEMALA-malli (Huttunen ym., 2016) kattaa kaikki Suomen järvet ja joet ja siinä simuloidaan sekä vesitasetta (mm. valunta, virtaamat, vedenkorkeudet, tilavuudet) että vedenlaatua (kokonaisfosfori-, kokonaistyyppi- ja kiintoainekuormat sekä pitoisuudet). VEMALAN ensimmäisessä versiossa maatalouden fosforikuorma lasketaan peltolohkokohtaisesti valunnan ja pitoisuuden väliseen riippuvuuteen perustuvan VIHMA-mallin avulla (Puustinen ym., 2010). Toisessa versiossa sovelletaan vastaavasti ICECREAM-mallia (Tattari ym., 2001), joka ottaa huomioon pellon, maalajin, kaltevuuden, lannoituksen ja viljelykasvin vaikutukset. Norjassa puolestaan on kehitetty uusi lisäys INCA-malliperheeseen, INCA-Contaminants -malli (Integrated Catchments model for Contaminants; Nizzetto ym., 2016), joka tukee muun muassa haitallisten aineiden, sedimenttien, orgaanisen aineksen, elohopean ja taudinaiheuttajien liikkumisen mallintamista ja laskentaa.

3.3 Monitavoitearvioinnin menetelmät

Monitavoitearviointia on sovellettu lukuisissa eri ympäristösovelluksissa ympäri maailmaa ja katsauksia sovelluksista ovat tehneet muun muassa Kiker ym. (2005), Hajkowich ja Collins (2007), Huang ym. (2011) ja Keisler ja Linkov (2014). Vaikka sovellukset eivät eksplisiittisesti koske maataloutta tai maatalouden ravinteiden kiertoa, niin useissa esimerkiksi vesistöjen hoitoon tai kunnostukseen liittyvissä sovelluksissa monet toimenpiteistä liittyvän maatalouden ravinteiden pääsyn estämiseen vesistöihin. Eräs ravinnekierron ongelma, jota monitavoitearvioinnilla voidaan tukea, on kiertoa edistävien vaihtoehtoisten toimenpiteiden vertailu.

Suoraan maatalouteen liittyvistä tapaustutkimuksista voidaan mainita esimerkiksi Dantsis ym. (2010), jotka hyödynsivät monitavoitearviointia alueellisten kasvintuotannon ympäristöllisen, taloudellisen ja sosiaalisen kestävyuden arviointiin. Arviointi perustui 21 mittariin, joiden perusteella arvioitiin kahden Kreikan alueen maatalouskäytäntöjen kestävyyttä. Talukder ym. (2017) puolestaan sovelsivat monitavoitearviointia kestävään maatalouteen tähtäävien toimenpiteiden hyötyjen ja haittojen arvioinnissa ja näiden perusteella tunnistivat ne vaihtoehdot, jotka kokonaisuutena parhaiten saavuttavat määritellyt tavoitteet. Kriteereinä arvioinnissa oli tuottavuus, vakaus, tehokkuus, jatkuvuus, soveltuvuus ja tasapuolisuus.

Maatalouden ravinteiden kierrätyksessä tuotteiden elinkaari on usein olennainen tekijä. De Luca ym. (2017) ovat laatineet katsauksen elinkaariarvioinnin (Life Cycle Assessment, LCA; Rebitzer ym., 2004; Guinee ym., 2011) ja monitavoitearvioinnin menetelmien soveltamisesta maatalouden kestävien käytäntöjen arvioinnissa. Katsauksessa käytiin läpi 32 tapaustutkimusta, ja tarkastelun perusteella selkeä tarve menetelmien soveltamiselle on olemassa. Pääsääntöisesti tapaustutkimuksissa toimenpiteiden arviointi toteutettiin monitavoitearvioinnilla, mutta toimenpiteiden koko elinkaaren aikaisten vaikutusten arvioinnissa hyödynnettiin elinkaariarvioinnin menetelmiä. Yksi tarkastelluista tapaustutkimuksista oli Myllyviidan ym. (2012) tutkimus, jossa SMART-menetelmää (Edwards ja Barron, 1994) sovellettiin biodieselin tuotantoon liittyvien vaihtoehtojen elinkaarten vertailussa. Monitavoitearviointia hyödynnettiin tutkimuksessa muun muassa elinkaariarviointiin normaalisti kuulumattomien tavoitteiden tunnistamisessa sekä tavoitteiden painotuksessa ja tätä kautta kokonaisuutena kestävien ratkaisujen löytämisessä. Elinkaariarviointi on myös keskeisessä roolissa SYKEN vetämässä CircWaste-hankkeessa (<http://www.materiaalitkiertoon.fi>).

Maatalouden ravinnekierron vaikutukset kohdistuvat alueellisesti eri kohteisiin. Monitavoitearviointia voidaan soveltaa myös yhdessä paikkatietojärjestelmien (*Geographic Information Systems – GIS*) kanssa, jolloin vaikutusten spatiaalinen jakautuminen otetaan huomioon niiden arvioinnissa (Geneletti, 2010; Malczewski ja Rinner, 2015). Esimerkiksi Fealy ym. (2010) ovat soveltaneet GIS-pohjaista monitavoitearviointia eri vaihtoehtojen arviointiin EU:n nitraattidirektiivin toteuttamiseksi Irlannissa. Tarkastelussaan he hyödynsivät paikkatietojärjestelmistä saatavaa spatiaalista vaikutusdataa vaikutusten arviointiin.

Parhailtaan meneillään olevassa SOMPA-tutkimushankkeessa kehitetään ekologisesti ja taloudellisesti kestäviä keinoja hoitaa suometsiä ja -peltoja niin, että samalla hillitään ilmastonmuutosta. Hankkeessa on tarkoitus myös soveltaa monitavoitearviointia vaihtoehtoisten ratkaisujen arviointiin. Luke on myös mukana eurooppalaisessa DiverFarming-hankkeessa (<http://www.diverfarming.eu>), jossa yhtenä tavoitteena on mallintaa ja arvioida erilaisten viljelykäytäntöjen monisyisiä vaikutuksia. Arvioinnissa sovelletaan FAO:n kestävyys-käsitteen luokittelua neljän eri ulottuvuuden alle (hyvä hallinto, ympäristön eheys, taloudellinen resilienssi ja sosiaalinen hyvinvointi), jotka edelleen jakautuvat 21 teemaan ja 58 alateemaan, joita arvioidaan 114:n eri indikaattorin suhteen (SAFA, 2014).

Monitavoitearviointia on hyödynnetty myös BonusReturn-hankkeessa, jossa tarkastellaan erilaisten ekoteknologioiden hyödyntämismahdollisuuksia Itämeren alueen ravinne- ja hiiliongelmiä ratkaisemiseksi. Hankkeessa tehdyssä monitavoitearvioinnissa (Johannesdottir ym., 2019) vertailtiin erilaisia ravinteiden kierrätysratkaisuja kolmella eri alueella (Suomen Vantaanjoki, Ruotsin Fyrisån-joki ja Puolan Słupia-joki). Arviointikriteereinä tarkastelussa oli kestävyuden eri ulottuvuuksia, mukaan lukien ilmaston lämpeneminen, ravinne- ym. päästöt, kustannukset, hyväksyttävyyden ja tekninen toteutettavuus.

Monitavoitearviointia voidaan soveltaa myös "meta-tasolla" eli toimenpiteiden arvioinnin sijasta esimerkiksi hankkeessa sovellettavan menetelmän arviointiin. TOIMI-hankkeessa (Tattari ja Puustinen, 2017) monitavoitearviointia sovellettiin erilaisten ravinteiden kiertoa vesistöissä mallintavien mallien valintaan. Tarkasteltavina malleina olivat mm. kappaleessa 3.2 mainitut VEMALA ja INCA, ja arviointi perustui mallien uskottavuuteen (mm. epävarmuudet, luotettavuus), relevanssiin (mm. hyödynnettävyys, käytettävyys) ja legitimitettiin (mm. sidosryhmien osallistuminen, hyväksyttävyyden).

Kirjallisuuden perusteella monitavoitearviointi soveltuu hyvin erilaisiin ravinteiden kierrätykseen tähtäävien toimenpiteiden arviointiin. Näiden lisäksi maatalouden ravinteiden kierrossa on kuitenkin tarvetta myös erilaisten ohjauskeinojen vaikutusten arvioinnille. Tämä on astetta haastavampi tarkastelu, sillä toimenpiteiden vertailu on lähtökohtaisesti yksittäisten toimijoiden ongelma, kun taas ohjauskeinojen vertailu on ylempällä tasolla oleva päätösongelma, jolla pyritään siihen, että eri toimijat tekevät toivotut toimenpiteet. Tällöin ohjauskeinojen vaikutukset eivät näy suoraan vaan ne realisoituvat välillisesti ohjauskeinoilla edistettävien toimenpiteiden ja näiden vaikutusten kautta. Lisäksi ohjauskeinoilla voi olla erilaisia joko hyödyllisiä tai haitallisia sivuvaikutuksia ja se, saadaanko ohjauskeinolla aikaan halutut toimenpiteet, on epävarmaa. Tällaisia tarkasteluita ei ole aiemmin tehty, joten yhdeksi tarkemmin tässä esiselvityksessä tehtäväksi tapaustarkasteluksi valittiin ohjauskeinojen monitavoitearviointi, josta enemmän luvussa 4.

3.4 Monitavoiteoptimoinnin menetelmät

Pohjimmiltaan maatalous on liiketoimintaa, jossa tavoitteena on optimoida rahallista tuottoa. Tämän lisäksi viljelijällä voi olla muitakin tavoitteita liittyen esimerkiksi haitallisten ympäristövaikutusten minimointiin, jolloin kyseessä on monitavoitteinen ongelma, jossa on keskenään ristiriitaisia tavoitteita. Eri tavoitteiden arvostus riippuu päätöksentekijästä, mutta viime vuosina ympäristölliset tavoitteet ovat nousseet tärkeään rooliin, mikä on lisännyt monitavoitteisten menetelmien tarvetta. Tuoton optimointi ei välttämättä edes ole ristiriidassa ympäristötavoitteiden kanssa, sillä esimerkiksi lannoituksesta saatava rajahyöty laskee lannoituksen määrän myötä, jolloin "liikalannoituksesta" vähentäminen voi olla sekä taloudellisesti että ympäristön kannalta kannattavaa.

Rossing ym. (2007) ovat vertailleet optimointimenetelmien käytännön sovelluksia maataloudessa kolmessa eri maassa (Ranska, Saksa, Alankomaat). Pääasiassa sovelluksissa on optimoitu maatalon toimintaa tai viljelykäytäntöjä, mutta joissain sovelluksissa on myös tarkasteltu ongelmaa laajemmin esimerkiksi luontoarvojen kannalta. Esimerkkinä maatalon monitavoiteoptimoinnista on Grootin ym. (2012) FarmDESIGN-malli, jossa tavoitteina oli tuoton maksimoinnin lisäksi työvoiman optimaalinen balanssi, maaperän parantaminen ja ravinnehävikki.

Optimoinnin tukimenetelmiä on sovellettu ja kehitetty myös Suomessa optimaalisen lannoituksen määrittämiseen. Esimerkiksi käynnissä olevassa Lannoita paremmin-hankkeessa (Mattila ja Rajala, 2018) on kehitetty viljelijöiden käyttöön Excel-poh-

jainen Lannoita paremmin -malli (LaPaMa). Sen avulla viljelijät voivat optimoida tarvittavien lannoitteiden määrää erilaisten satotaso- ja muiden tavoitteiden, niiden kustannusten sekä annettujen reunaehtojen suhteen. Vaikka malli on lähtökohtaisesti suunniteltu viljelijän rahallisen tuoton maksimointiin, niin mallin avulla voidaan myös arvioida muita hyötyjä (esim. kalkitustarve, multavuushiilen lisäys ja jäännöstyyppi). Lisäksi lannoituksen optimoinnilla voi olla vaikutuksia ravinteiden vähentämiseen, mikäli lannoitteita on aiemmin käytetty ylimäärin.

PeltoOptimi (Peltonen-Sainio, 2018) on työkalu, jonka avulla voidaan optimoida peltolohkojen käyttöä ottaen huomioon tilan tuotantokyky ja luontoarvot. Työkalun avulla voidaan selvittää peltomaan ominaisuuksien perusteella muun muassa viljelykierron hyötyjä ja optimoida kiertoa siten, että se pitkällä aikavälillä ja myös olosuhteiden muuttuessa on mahdollisimman kannattavaa sekä tuotannon että luontoarvojen kannalta. KiertoVesi-hankkeessa puolestaan tarkastellaan kiertotalouden näkökulmasta katsottuna lannan laaja-alaisen ja optimaalisen peltoviljelykäytön mahdollisuuksia parantaa vesistöjen tilaa sekä vähentää mineraalilannoitteiden käyttöä.

JaloJäte-hankkeessa (Kahiluoto ja Kuisma, 2010) tarkasteltiin biomassojen käsittelylaitosten optimaalista sijoittelua niin, että laitosten kannattavuus maksimoituu. Tarkastelussa hyödynnettiin biomassojen paikkatietoa ja tietoa kuljetuskustannuksista eri laitospaikkoihin, joiden perusteella optimoitiin biomassojen kuljetuksia neljässä skenaariossa. Tarkastelu sinällään oli melko suoraviivainen optimointitehtävän ratkaiseminen, mutta tarvittavien tietojen (biomassojen paikkatiedot ja kuljetusmatkat) kerääminen osoittautui melko työlääksi. Tässä mielessä tarkastelu antoi sysäyksen kehittää Biomassa-atlas, johon on koottu tiedot biomassojen sijaintitiedosta. Tässä hankkeessa tarkastellaan yksityiskohtaisemmin, miten Biomassa-atlasta voidaan tämäntyyppisten optimointitehtävien ratkaisemiseen.

Myös dynaamista optimointia voidaan hyödyntää optimaalisten käytäntöjen löytämiseen, ja sen soveltaminen linkittyy usein kappaleessa 3.2 käsiteltyihin systeemidynaamisiin malleihin, joille etsitään optimaalisia ratkaisuja. Esimerkiksi Ihon ym. (2017) liuenneeseen ja hiukkasmaiseen fosforiin liittyvässä systeemidynaamisessa tarkastelussa löydettiin dynaamisen optimoinnin avulla optimaalisia rehevöitymisen hallintatoimenpiteitä, jotka korostavat liuenneen fosforin vähentämistä.

3.5 Portfolioanalyysin menetelmät

Maatalouden ravinteiden kierto on ongelma, jonka ratkaisemiseksi on tarvetta monille toimenpiteille. Portfolioanalyysi on kehitetty juuri tämäntyyppisten ongelmien ratkaisemiseen ja periaatteessa sen pitäisi soveltua hyvin tähän aihealueeseen. Ravinteiden kierrossa haasteena on kuitenkin mallintaa eri toimenpiteiden välisiä yhteisvaikutuksia, jotka täytyy erikseen määrittää kullekin toimenpideyhdistelmälle. Tämä tekee mallintamisesta erittäin työlästä ja on eräs syy portfolioanalyysin vähäiselle soveltamiselle ravinteiden kierrossa. Menetelmään liittyvää tutkimusta tehdään kuitenkin koko ajan, ja esimerkiksi syksyllä 2019 käynnistyvässä Suomen Akatemian rahoittamassa PortRight-hankkeessa pohditaan, miten menetelmiä voisi kehittää ottamaan tämä asia huomioon.

Portfolioanalyysiä on sovellettu jonkin verran maatalouden muilla osa-alueilla. Esimerkiksi optimaalisen maatalouden tuotantoportfolion löytäminen on tuotannon maksimointiongelma, jossa yhden tuotteen tuotantomäärällä tai hinnalla ei tyypillisesti juuri ole vaikutusta toisten tuotteiden määriin tai hintoihin. Tällöin portfolio voidaan muodostaa yksittäisistä tuotoksista ottamatta kantaa näiden yhteisvaikutuksiin. Esimerkiksi Abson ym. (2013) ovat tarkastelleet erilaisten viljelylajikkeiden optimaalista tuotantoyhdistelmää maankäytön ja tuotantorakenteisiin liittyvien riskien

kannalta. Marko ym. (2017) tutkivat optimaalisen siemenyhdistelmän löytämistä ja hyödynsivät tarkastelussaan myös skenaarioanalyysiä. Paydar ja Qureshi (2012) ovat puolestaan soveltaneet portfolioanalyysiä kastelujärjestelmäinvestointeihin liittyvien riskien tarkasteluun.

Suomessa ei ole tehty ravinteiden kiertoon liittyviä portfolioanalyysin sovelluksia, mutta menetelmää on hyödynnetty esimerkiksi maatalouden riskien tarkasteluun. Koivulahti (2018) on gradu-työssään tutkinut, millainen peltokasvien tuotantoyhdistelmä on lyhyellä aikavälillä riskitehokas ja hyödyntänyt työssään portfolioanalyysiä tehokkaan peltokasviportfolion löytämiseksi. Myyrä ja Väre (2016) ovat puolestaan soveltaneet portfolioanalyysiä sika- ja siipikarjatalouteen liittyvien hintariskien tarkastelun markkinamarginaalien kuukausimuutosten avulla.

3.6 Taloudellisen arvottamisen menetelmät

Maatalouden ravinteiden kierrossa toimenpiteiden kustannukset ovat keskeisessä roolissa, sillä maatalous elinkeinona on toimijoille käytännössä liiketoimintaa. Viljelijän näkökulmasta katsottuna toimenpiteillä saatavien ei-aineellisten hyötyjen rahallinen laskeminen ei kuitenkaan välttämättä ole kovin keskeisessä roolissa, sillä hyödyt kohdistuvat usein muihin sidosryhmiin. Sen sijaan esimerkiksi tuki- ja ohjauskeinopolitiikoita pohdittaessa on asioita tarpeen katsoa laajemmin kaikille sidosryhmille koituvien hyötyjen näkökulmasta. Tällöin eri toimenpiteiden kokonaishyötyjen arviointi suhteessa käytettyihin investointeihin on tärkeää.

Balana ym. (2011) ovat tehneet katsauksen kustannus-tehokkuusanalyysin soveltamisesta maatalouden ympäristövaikutusten arviointiin liittyen EU:n vesipuitedirektiiviin. Pääosin tarkastelut nähtiin hyödyllisinä: ne toivat esiin systeemisen ajattelun tärkeyden, jotta tarkasteluissa ei tulisi keskityttyä vain yhteen maatilatyyppiin tai yhteen ravinteeseen (esim. fosfori). Tarkasteluissa korostui myös epävarmuuksien ottamisen huomioon, mikä taloudellisen arvottamisen menetelmissä voi helposti jäädä taka-alalle. Hauk ym. (2014) vertailivat katsauksessaan taloudellisia arvottamismenetelmiä soveltavia tapaustutkimuksia viljelykierron hyötyjen ja kustannusten arvioinnissa.

Erilaisia taloudellisen arvottamisen menetelmiä on sovellettu jonkin verran maatalouden vaikutusten arviointiin. Le Goffe (2000) on tarkastellut omaisuusarvojen muutoksia mittaavan menetelmän soveltamista arvioimaan maatalouden maankäytön vaikutuksia kesämökkien hintoihin. Esimerkiksi karjan laidunmaiden läheisyys laskee mökkien hintoja, kun taas tavallisen peltomaan läheisyys nosti niitä. Vanslebrouckin ym. (2005) tutkimuksessa tarkasteltiin vaikutuksia turismin kautta, ja sekä niittyjen että karjan laidunmaiden todettiin vaikuttavan positiivisesti siihen. Ready ym. (1997) ovat vertailleet maksuhaluuskyselyn ja omaisuusarvojen muutoksia mittaavan menetelmän ominaisuuksia hevosmaatilojen vaikutuksista ja eri menetelmillä saadut tulokset olivat hyvin samansuuntaisia.

Taloudellisen arvottamisen menetelmiä on sovellettu myös Suomessa. Yrjölä ja Kola (2001) tarkastelivat kustannus-hyötyanalyysin avulla monivaikutteisen maatalouden kustannuksia ja hyötyjä. Tarkasteltavina hyötyinä olivat itse maatalouden tuotosten lisäksi myös esimerkiksi ympäristön tilalle, ruokaturvalle sekä maaseudun elinvoimaisuudelle koituvat hyödyt. Ahtiainen ym. (2014) tarkastelivat PRO-BAPS-hankkeessa (Protection of the Baltic Sea: Benefits, Costs and Policy Instruments) Itämeren tilan parantamiseksi ja ympäristöuhkien torjumiseksi suunnattujen toimenpiteiden taloudellista kannattavuutta kustannus-hyötyanalyysin avulla. Hankkeessa tehdyssä maksuhaluuskyselyssä havaittiin suuria eroja siinä, kuinka halukkaita eri Itämeren ympäristömaiden asukkaat ovat maksamaan tilan parantamisesta. TOIMI-hankkeessa (Tattari ja Puustinen, 2017) arvioitiin vesienhoidon

toimenpiteitä kustannus-hyötyanalyysillä ja suuri osa arvioitavista toimenpiteistä liittyi nimenomaan maatalouden ravinteiden kiertoon. Hankkeessa hyödynnettiin kustannustehokkaiden fosforinvähennystoimenpideyhdistelmien valintaan alun perin PROBAPS-hankkeessa kehitettyä KUTOVA-mallia (Hjerpe ja Väisänen, 2015).

Taloudellisen arvottamisen menetelmiä voidaan hyödyntää myös muiden menetelmien kanssa arvioitaessa eri toimenpiteiden vaikutuksia. Vaikka vaikutuksia itsessään ei laskettaisi taloudellisina hyötyinä, niin esimerkiksi maksuhalukkuuskyselyistä saatavaa tietoa voidaan hyödyntää arvioitaessa sitä, kuinka tärkeänä ranta-asukkaat pitävät vesistöjen hyvää tilaa tai sitä kuinka paljon viljelijät ovat valmiita maksamaan ympäristöystävällisemmistä lannoitteista. Myös paljastettujen preferenssien menetelmillä saatuja arvioita ihmisten ostokäyttäytymisestä voidaan vastavalla tavalla hyödyntää arvioitaessa toimenpiteiden vaikutuksia. Esimerkiksi Tiwari ym. (1999) tarkastelivat keinokastelun hyötyjä ja tarkastelussa yhtenä kriteerinä olleen taloudellisen kestävyuden arviointiin he hyödynsivät monitavoitearviointia. Usein taloudelliset tarkastelut voidaan linkittää suoraan myös optimointiin, etenkin jos on kyse yksittäisen viljelijän toimenpiteiden arvioinnista.

3.7 Skenaarioanalyysin menetelmät

Maatalouden osalta olennaisia skenaarioita ovat etenkin sen rakennemuutokseen sekä ilmastonmuutokseen liittyvät skenaariot. Molempia näitä voidaan hyödyntää arvioitaessa erilaisten strategioiden tulevaisuuden vaikutuksia erilaisissa mahdollisissa toimintaympäristöissä. Skenaarioanalyysiä sovellettaessa voidaan hyödyntää jo olemassa olevia skenaarioita tai sitten ne voidaan tuottaa hankkeessa tehtävän prosessin myötä. Tunnetuimpia yleisesti laadittuja skenaarioita ovat esimerkiksi kansainvälisen ilmastopaneelin (IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change) laatimat maapallon lämpenemisskenaariot, joita päivitetään vuosittain, ja joita voidaan hyödyntää erityyppisissä hankkeissa arvioitaessa ilmastonmuutoksen vaikutuksia tulevaisuudessa (IPCC, 2018).

Maatalouden kehityksestä on myös laadittu globaaleihin ajureihin nojautuvia skenaarioita (esim. Nelson ym., 2010), mutta ne eivät ole samalla tavalla hyödynnettävissä kuin ilmastonmuutosskenaariot, sillä kehitykseen vaikuttaa myös monia kansallisia ajureita. Suomen maatalouden kehityksestä on vuosien varrella laadittu eri hankkeissa kansallisia skenaarioita, joita voidaan hyödyntää arvioitaessa vaihtoehtoisten strategioiden tulevaisuuden vaikutuksia. Esimerkiksi Niemi ja Rikkinen (2010) ovat esittäneet skenaarioita maatalouspoliittisen toimintaympäristön muutokseen sekä näiden vaikutuksia kotimaiseen elintarvikeketjuun. EU:n yhteisen maatalouspolitiikan tulevaisuus (CAP2020) -hankkeessa on puolestaan muutosvoimapohjaisesti luotu ja tarkasteltu vaihtoehtoisia skenaarioita maataloudesta vuoteen 2030 saakka (Rikkinen, 2017). Kahtena ohjaavana muutosvoimana tarkasteltiin julkisen ohjauksen roolia markkinoilla sekä Suomen maa- ja elintarviketalouden kilpailukykyä, joita varioimalla saadut skenaariot olivat: maatalous hillintätalkoisiin, energiamuutos maataloudessa, maatalous muuttuvan kauppapolitiikan puristuksessa sekä arktisuuden ”brändäys” viennin veturina.

VN-TEAS -hankkeessa MISA (Kärkkäinen ym., 2019) tarkasteltiin maankäyttösektorin toimien mahdollisuuksia ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi ja pohdittiin, miten metsäkatoa voitaisiin vähentää ja metsitystä lisätä Suomessa. Hankkeessa laadittiin kaksi vuoteen 2050 ulottuvaa maankäytön skenaariota pitkän aikavälin kasvihuonekaasupäästöjen vaikutusten arviointiin. Toisessa näistä oletettiin maankäytön muutosten jatkuvan kuten vuosina 2005–2014, ja toisessa oletettiin tapahtuvan laaja-alaisia metsitystoimenpiteitä ja metsäkadon vähentämistä. Hankkeessa havainnollistuu myös se, että menetelmien yhteiskäyttö on parhaimmillaan tiivis jatku-

mo useista toisiinsa nivoutuneista menetelmistä, sillä skenaarioanalyysin tuloksia hyödynnettiin tukemaan hinnoitteluun ja optimointiin perustuvaa ohjauskeinojen taloustieteellistä analyysia.

3.8 Yhteenveto menetelmien soveltamisesta ja hyödyntämispotentiaalista maatalouden ravinteiden kierrossa

Taulukkoon 2 on koottu yhteenveto systeemianalyysin menetelmien hyödyntämis-potentiaalista maatalouden ravinteiden kierrossa. Lisäksi taulukkoon on listattu hankkeita, joissa menetelmiä on sovellettu.

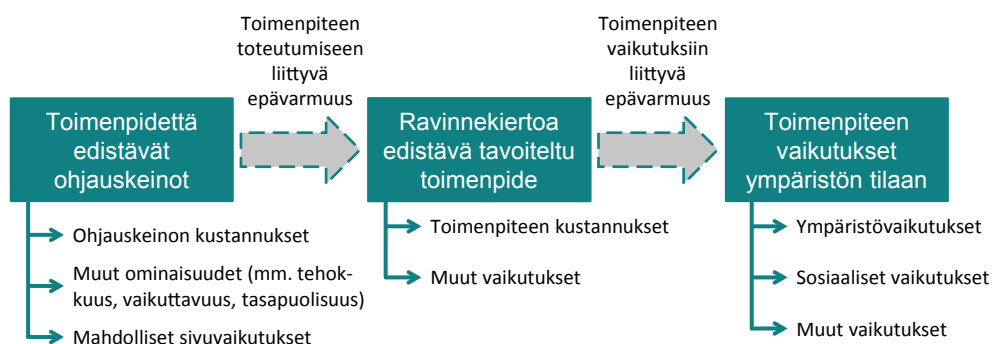
Taulukko 2. Systeemianalyysin menetelmien hyödyntämispotentiaali maatalouden ravinteiden kierrossa ja menetelmiä soveltavia hankkeita.

Menetelmä	Mahdolliset sovellusalueet ravinteiden kierrossa	Suomalaisia menetelmiä soveltavia hankkeita/malleja
Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)	Ongelmatilanteen havainnollistaminen, ravinteiden kierron monimutkaisten syy-seuraus -suh-teiden mallintaminen	BioRaeEE
Systeemidynaamiset mallit	Ravinteiden sekä hiilen kierron ja kulkeutumisen mallintaminen systeemissä	VEMALA, ICECREAM, TOIMI, Samassa vedessä
Monitavoitearvioinnin menetelmät	Ravinteiden kiertoa edistävien toimenpiteiden sekä toimenpiteitä edistävien ohjauskeinojen arviointi	TOIMI, DiverFarming, SOMPA, BonusReturn
Monitavoiteoptimoinnin menetelmät	Jätteenkäsittelylaitosten sijoittelun optimointi, pellon lannoituksen optimointi, viljelykäytäntö- jen ja -kierron optimointi	LaPaMa, JaloJäte, PeltoOptimi, Biomassa-atlas, KiertoVesi, Samassa vedessä
Portfolioanalyysin menetelmät	Ravinteiden kiertoa edistävien tehokkaiden toimenpideyhdistelmien muodostaminen ja arviointi	PortRight
Taloudellisen arvottami- sen menetelmät	Ravinnekiertoa edistävien toimenpiteiden hyö- tyjen arviointi suhteessa kustannuksiin, maata- louden ei-rahalliset hyötyjen arviointi	TOIMI, PROBAPS, KUTOVA
Skenaarioanalyysin menetelmät	Ilmastonmuutokseen varautuminen, maatalou- den rakennemuutoksen strateginen suunnittelu	MISA, CAP2020, Ravinlaskuri

4 Esimerkkitarkastelu 1: Maatalouden ohjauskeinojen monitavoitearviointi

Yksityiskohtaisempaan systeemianalyyttisten menetelmien soveltamisalueena tarkasteltiin maatalouden ohjauskeinojen monitavoitearviointia. Perinteisesti monitavoitearviointia on sovellettu eri toimenpiteiden vertailuun, jolloin kyseessä voi olla joko yksittäisen toimijan (esim. yksittäinen viljelijä) päätösongelma edistää ravinteiden kiertoa tai vaihtoehtoisesti ongelma, jonka ratkaisu vaativat useamman toimijan yhteistyötä. Molemmassa tapauksissa arviointi perustuu lähinnä toimenpiteiden eri tavoitteisiin kohdistuvien vaikutusten ja kustannusten järjestelmälliseen vertailuun ja tuloksena saadaan tyypillisesti tehokkain toimenpide jostain tietyistä toimenpidejoukosta.

Yhteiskunnan mahdollisuudet vaikuttaa suoraan yksittäisten toimijoiden päätöksiin ovat kuitenkin usein rajalliset, mutta päätöksiä voidaan ohjalla erilaisten ohjauskeinojen avulla. Ohjauskeinojen arvioinnissa ei ohjauskeino ja sillä tavoiteltavien vaikutusten syy–seuraus -suhde ole kuitenkaan yhtä suoraviivainen kuin toimenpiteiden arvioinnissa, sillä ohjauskeino ei suoraan toteuta toimenpiteitä vaan pyrkii jonkinlaisten kannustimien tai rajoitusten kautta saamaan toimijat tekemään näitä (Kuva 1). Ohjauskeinojen arvioinnissa on täten otettava huomioon myös se epävarmuus, joka liittyy ohjauskeinoon kykyyn saada toimijat tekemään halutut toimenpiteet. Lisäksi ohjauskeinoilla voi olla muitakin joko hyödyllisiä tai haitallisia sivuvaikutuksia, jotka syntyvät tavoitellun toimenpiteen lisäksi. Mitä pidemmälle vietyjä systeemisiä muutoksia saadaan aikaiseksi, sitä kestävämmällä pohjalla ratkaisut yleensä ovat (esim. Luostarinen ym., 2019).



Kuva 1. Ohjauskeinojen monitavoitearvioinnin periaate.

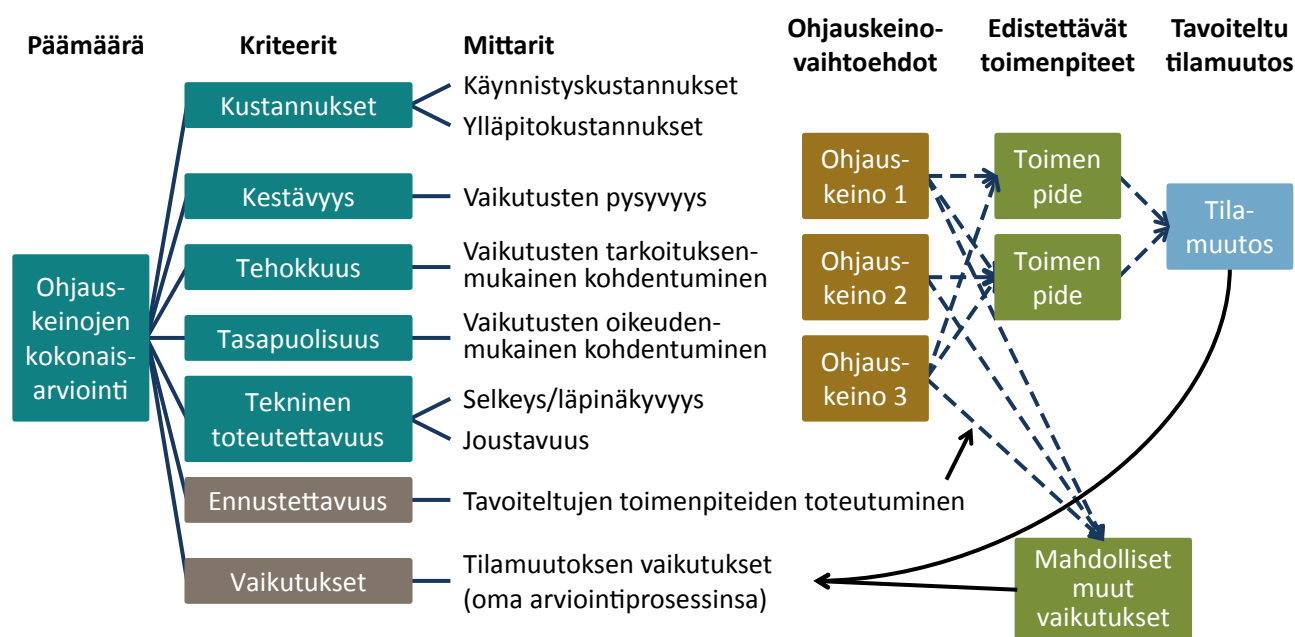
Ohjauskeinoja vertailtaessa on otettava huomioon, että varsinaisiin toimenpiteiden vaikutuksiin liittyvien kriteerien lisäksi myös ohjauskeinoilla itsessään voi olla eroja eri kriteerien suhteen. Esimerkiksi ohjauskeinoilla voi olla niiden toimeenpanoon liittyviä kustannuksia toimenpiteiden kustannusten lisäksi ja lisäksi eroja voi olla vaikutusten kestävyys tai tasapuolisen kohdentumisen suhteen. Tämä lisää arviointiin uuden ulottuvuuden, jonka huomioonottamista tarkastellaan seuraavaksi.

4.1 Kehikko maatalouden ohjauskeinojen monitavoitearviointiin

Esiselvityksessä luotiin ohjauskeinojen arviointiin monitavoitearviointiin pohjautuva arviointikehikko (Kuva 2). Alustava versio kehikosta luotiin projektiryhmässä, ja sen toimivuutta testattiin sidosryhmille järjestetyssä työpajassa 14.2019. Työpajasta sekä asiantuntijoiden haastatteluista kehikon soveltamiseen saatiin uusia ideoita, joiden perusteella kehikkoa muokattiin edelleen.

Lähtökohtana arvioinnissa on tavoiteltu vaikutus ja siihen tähtäävä yksittäinen tai muutama tietty toimenpide, jonka/joiden toteutumista halutaan edistää. Tämän jälkeen tunnistetaan erityyppisiä ohjauskeinoja, joilla toimenpidettä voitaisiin edistää ja näistä valitaan sopivimmat arviointikehikolla tarkasteltavaksi. Ohjauskeinoja puolestaan arvioidaan ns. ohjauskeinokriteerien ja näille määriteltyjen mittarien perusteella. Lisäksi arvioidaan, kuinka paljon kukin ohjauskeino lisää tavoitellun toimenpiteen ja sen vaikutusten toteutumisen todennäköisyyttä, sekä mahdolliset muut ohjauskeinojen toteuttamisesta aiheutuvat vaikutukset.

Periaatteessa arviointi voitaisiin myös tehdä niin, että tunnistettaisiin erityyppisiä ohjauskeinoja, ja määritettäisiin, minkälaisia toimenpiteitä ne edistävät. Tällöin eivät mahdollisten toimenpiteiden vaikutukset ole kuitenkaan niin konkreettisesti arvioitavissa, jolloin myös ohjauskeinojen mahdolliset vaikutukset jäävät hyvin abstraktille tasolle. Tämän vuoksi päädyimme Kuvassa 2 esitettyyn tapaan, jossa lähtökohtana on jonkin toivotun tilamuutoksen ja tätä edistävien toimenpiteiden tavoittelu.



Kuva 2. Ohjauskeinojen monitavoitteinen arviointikehikko.

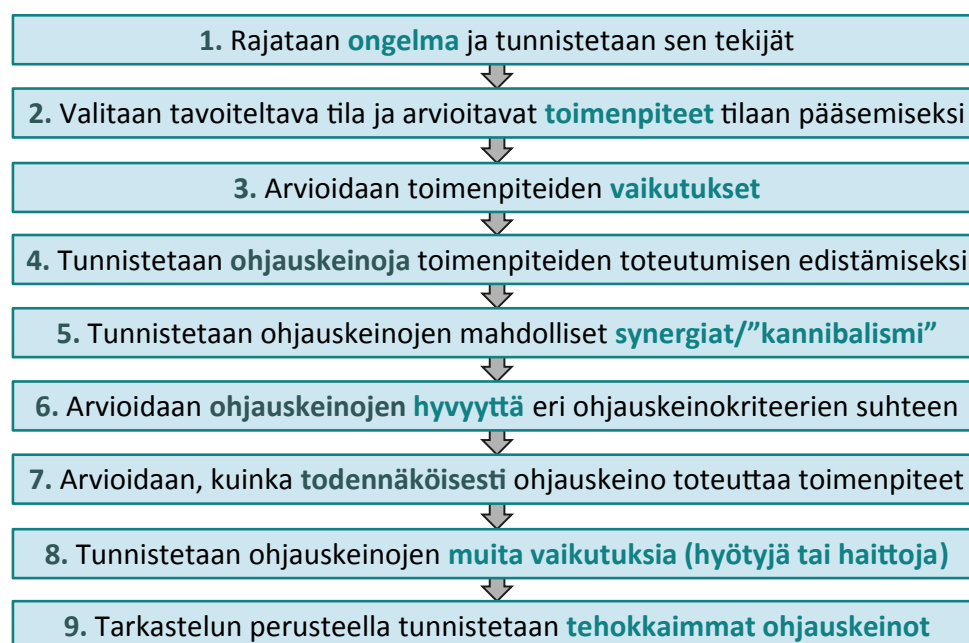
4.2 Ohjauskeinojen monitavoitearvioinnin arviointiprosessi

Kuvassa 3 on esitetty arviointiprosessi kuvan 2 perusteella tehtävälle ohjauskeinojen monitavoitearvioinnille. **Ensimmäisessä vaiheessa** rajataan ongelma ja tunnistetaan sen keskeiset piirteet. Ohjauskeinoja on hyvin erityyppisiä, joten tässä vaiheessa on tärkeää tunnistaa mittakaava, jossa toimitaan. Lisäksi ohjauskeinoilla tavoiteltujen toimenpiteiden toteutukseen tarvitaan usein monia eri toimijoita ja vaikutukset koskevat monia eri ihmisryhmiä. Molempiin näihin tehtäviin voidaan hyödyntää apuna myös kappaleessa 2.1 esitettyjä ongelmien jäsentelymenetelmiä.

Sidosryhmien, eli tässä tapauksessa eri toimijoiden osallistuminen prosessiin on ensiarvoisen tärkeää heti ensimmäisestä vaiheesta alkaen, sillä tässä vaiheessa tehtävät valinnat vaikuttavat koko loppuprosessiin (esim. Banville ym., 1998). Osallistaminen on kuitenkin aikaa vievää, minkä vuoksi on pohdittava osallistumisen hyötyjä suhteessa käytettäviin resursseihin. Esimerkiksi Marttunen ym. (2015) ovat esitelleet kirjon erilaisia tapoja osallistaa sidosryhmiä monitavoitearviointiin sekä pohtineet näiden hyötyjä suhteessa käytettyihin resursseihin.

Toisessa vaiheessa valitaan yksittäinen konkreettinen tilamuutos (esim. P-luvun aleneminen pelloilla), johon ohjauskeinoilla pyritään, sekä toimenpiteet, joilla tilamuutokseen pyritään (esim. lannoituksen vähentäminen). Oletuksena on tällöin, että jo joissain aiemmissa tarkasteluissa tämä tilamuutos on havaittu tarpeelliseksi ja tehokkaaksi tavaksi vähentää ravinteiden haitallisia vaikutuksia, mutta tietoa siitä, miten siihen päästäisiin ei ole. Tarkasteluun voidaan valita myös useampi tavoiteltava tilamuutos ja toimenpide kerrallaan, mutta vaarana on tällöin tarkastelun liiallinen laajeneminen.

Kolmannessa vaiheessa arvioidaan, mitä vaikutuksia tarkasteltavilla toimenpiteillä on. Nämä vaikutukset voivat olla esimerkiksi taloudellisia, ympäristöllisiä ja sosiaalisia. Sinänsä tämä vaihe voidaan toteuttaa myöhemminkin, sillä vaikutustietoa itse toimenpiteistä ei tarvita ennen vaihetta 9. Vaihe on kuitenkin laitettu tähän siksi, että lähtökohtana on jo tehokkaaksi havaitut toimenpiteet, joista on usein jo olemassa vaikutustietoa.



Kuva 3. Ohjauskeinojen monitavoitearviointiprosessi.

Neljännessä vaiheessa tunnistetaan ohjauskeinoja tavoiteltujen toimenpiteiden edistämiseksi. Ohjauskeinoja on olemassa hyvin erityyppisiä ja niiden tunnistamiseksi on kirjallisuudessa esitetty erilaisia luokitteluja (esim. Gunningham ja Sinclair, 2005; Marttinen ym., 2017). Seuraavassa on tunnistettu ohjauskeinotyyppisiä jaoteltuna viiden eri kategorian alle. Tätä jaottelua voidaan hyödyntää tapaustutkimuksissa tehtävässä varsinaisessa ohjauskeinojen tunnistamisessa:

- Taloudellisia ohjauskeinoja, mm.
 - Lannoiteverot tai verohelpotukset
 - Investointituet/innovaatorahoitus
 - Lupamaksut
 - Kaupiteltavissa olevat ravinne- tai päästökaupat
 - Tuet parhaiden käytäntöjen käyttöönottoon
 - Kompensaatiot maan käytöstä poistoon (esim. suojavaoikeuksilla)
- Lainsäädännöllisiä ja sääntelyyn perustuvia ohjauskeinoja, mm.
 - Pakolliset ympäristönhallintasuunnitelmat
 - Päästörajat
 - Lannoitteiden käyttörajoitukset
 - Ympäristön kannalta haitallisten käytäntöjen kieltäminen
 - Pakolliset jätteenhävitysmenetelmät
- Maankäyttöön ja suunnitteluun liittyviä ohjauskeinoja, mm.
 - Maatalouden rajoittaminen uudelleenkaavoituksella
 - Maatalousmaan käytöstä poistoon liittyvät sopimukset tai sitoumukset
 - Maankäyttöön liittyvät sopimukset tai sitoumukset
- Vapaaehtoisuuteen perustuvia ohjauskeinoja, mm.
 - Maatalouden ohjeelliset ammattisäännökset
 - Ympäristönhallintastandardit tai sertifikaatit
 - Vapaaehtoiset sopimukset
- Koulutukseen ja tiedonjakoon liittyviä ohjauskeinoja, mm.
 - Informaatiokampanjat (myös kuluttajavaikuttaminen)
 - Maatalousyrittäjien kouluttaminen ympäristöasioissa
 - Lannoite- ym. tuottajien tarjoaman ohjeistuksen kehittäminen
 - Seurannan kehittäminen

Viidennessä vaiheessa tunnistetaan ohjauskeinojen välisiä mahdollisia yhteisvaikutuksia (synergioita tai 'kannibalismia'), sillä usein kaksi tai useampia ohjauskeinoja yhdessä toteutettuna saattavat tuottaa ylimääräistä hyötyä tai vaihtoehtoisesti syödä toistensa tehokkuutta. Tällöin ohjauskeinoja ei voida tarkastella yksittäisinä, vaan niiden väliset riippuvuudet tulee ottaa huomioon mallintamisessa. Yksi käsitelytapa on tehdä ensin arviointi yksittäisille ohjauskeinoille, mutta sen lisäksi tehdä oma arviointinsa mahdollisista riippuvuuksista ja synergioiden tuomista hyödyistä. Toinen tapa on luoda sopivia toisiaan tukevia ohjauskeinoyhdistelmiä, joiden vaikutuksia arvioidaan kokonaisuutena. Kolmas tapa on hyödyntää portfolioanalyysin menetelmiä, joiden avulla valitaan tehokas ohjauskeinoyhdistelmä yksittäisistä toimenpiteistä. Tällöin mallissa pitää kuitenkin olla tiedot yksittäisten ohjauskeinojen välisen riippuvuuksien vaikutuksista, mikä saattaa olla haastavaa.

Ohjauskeinojen väliset yhteisvaikutukset tulevat esille usein vasta seuraavissa vaiheissa eli ohjauskeinojen vaikutusten arvioinnissa tai siinä, kuinka hyvin ohjauskeinot toteuttavat toivotun toimenpiteen ja onko näillä muita vaikutuksia. Tämän vuoksi vaiheet 3–8 on usein tarpeen toteuttaa iteratiivisesti. Eli kun on saatu jonkinlainen arvio ohjauskeinojen ominaisuuksista vaikutuksista, niin palataan arvioimaan pitäisikö näiden perusteella ohjauskeinoja vielä muokata.

Kuudennessa vaiheessa arvioidaan kuinka hyvin kukin tarkasteltavista ohjauskeinoista täyttää arvioitavat kriteerit. Myös ohjauskeinojen arviointiin on kirjallisuutta

nessa esitetty lukuisia erilaisia kriteereitä ja mittareita (esim. Mickwitz, 2003; Crabb ja Leroy, 2012; Dutch Ministry of Foreign Affairs, 2009; Barton ym., 2014; Marttinen ym., 2017). Näitäkin voidaan ryhmitellä eri kategorioihin esimerkiksi seuraavasti:

- Toimenpiteiden vaikutuksiin ja niiden toteutumiseen liittyviä kriteereitä (vaikuttavuus, tehokkuus, vaikutus)
- Toimenpiteiden ja ohjauskeinojen kustannuksiin tai kustannustehokkuuteen liittyviä kriteereitä (vaikutukset valtiontalouteen, kustannukset toimijoille, kustannus-tehokkuus, kustannus-hyöty)
- Toimenpiteiden ajalliseen ulottuvuuteen liittyviä kriteereitä (kestävyys, jatkuvuus, kannustavuus uusiutumiseen)
- Toimenpiteiden kohdentumiseen liittyviä kriteereitä (tasapuolisuus, vaikutusten kohdentuminen, hallinnolle ja toiminnanharjoittajille koitua sääntelytaakka)
- Mallin tai ohjauskeinojen ominaisuuksiin liittyviä kriteereitä (selkeys, asiaankuuluvuus, johdonmukaisuus, läpinäkyvyys)
- Muita kriteereitä (laillisuus, joustavuus, ennakoitavuus)

Kriteerit ja niiden toteutumista mittavat mittarit ovat osin päällekkäisiä, eivätkä aina yksiselitteisiä. Arviointikehikossa (Kuva 2) on näistä valittu joukko mittareita jaoteltuna viiden eri päätekijän eli kriteerin alle. Tavoitteena on ollut yhtäältä mahdollisimman kattava joukko relevantteja kriteereitä, mutta toisaalta tarpeeksi suppea ja näin ollen hallittavissa oleva määrä. Tämän vuoksi kriteerien välillä on jouduttu jonkin verran tasapainoilemaan. Ehdotettuja kriteereitä voidaan pitää yleisemminkin lähtökohtana ohjauskeinojen arvioinnissa, mutta toki sitä voidaan muokata aina kulloistenkin tarpeiden mukaisesti.

Käytännössä jokaisen ohjauskeinoon hyvyttä arvioidaan kunkin mittarin suhteen. Sekä toimenpiteiden että ohjauskeinojen vaikutusten osalta tämä voidaan tehdä eri tarkkuustasoilla, esimerkiksi kvantitatiivisesti mallien tai mittausten perusteella tai kvalitatiivisesti asiantuntija-arvioina. Tarkkuustason valinta riippuu tarkastelun tarpeista. Kvantitatiiviset arviot ovat usein tarkempia, mutta samalla myös työlämpiä kuin kvalitatiiviset arviot, joilla voidaan saada nopeasti suuntaa-antavia arvioita. Kvantitatiivisten arvioiden vaarana on myös niiden ”näennäistarkkuus”, eli numeeriset arviot voivat tuntua tarkemmilta kuin ne oikeasti ovat. Ohjauskeinojen arvioinnissa voi usein olla paljon epävarmuutta etenkin, jos aiempia kokemuksia vastaavantyyppisistä ohjauskeinoista ei ole.

Seitsemännessä vaiheessa arvioidaan, kuinka todennäköisesti ohjauskeino toteuttaa tavoitellut toimenpiteet. Tehdyn arvon myötä konkretisoituu myös vaiheessa kaksi tehty toimenpiteen vaikutusten arviointi, sillä toteutuvat vaikutukset riippuvat siitä, missä laajuudessa ohjauskeinolla tavoiteltu toimenpide toteutuu. Myös tämä arviointi voidaan tehdä joko kvantitatiivisesti tai kvalitatiivisesti, kuten myös **kahdeksannessa vaiheessa** tehtävä ohjauskeinojen mahdollisten sivuvaikutusten arviointi.

Yhdeksännessä vaiheessa tunnistetaan tarkastelun perusteella tehokkaimmat ohjauskeinot. Tähänkin on useita eri tapoja vaihdellen holistisista taulukkotarkasteluista matemaattista laskentaa edellyttäviin vaihtoehtojen kokonaisarvojen numeerisiin tarkasteluihin. Tarkastelutavan valinta riippuu pitkälti siitä, mitä koko tarkastelulta halutaan, ja siinä on syytä ottaa huomioon myös edellisissä vaiheissa tehdyt valinnat tarkkuustasosta.

Holistisissa taulukkotarkasteluissa kunkin vertailtavan vaihtoehdon (eli ohjauskeino tai ohjauskeinokokonaisuuden) vaikutukset kunkin arvioitavan tekijän suhteen kuvataan taulukossa, jossa voidaan hyödyntää myös esimerkiksi värejä kuvaamaan vaikutusten suuruutta. Kunkin vaihtoehdon osalta tunnistetaan niiden vahvuuden ja heikkoudet ja tämän perusteella tehdään arvio vaihtoehdon kokonaisuhyvyydestä. Tämän tyyppisen vertailun tekemiseen riittää hyvin karkeat kvalitatiiviset arviot

ohjauskeinojen vaikutuksista ja sillä voidaan tunnistaa esimerkiksi selvästi muita paremmat tai huonommat vaihtoehdot.

Laskettaessa vaihtoehdoille niiden hyvyttä kuvaavat kokonaisarvot esimerkiksi arvopuuanalyysin menetelmillä (Belton ja Stewart, 2002) on vaihtoehtojen vaikutuksista oltava suhteellisen tarkkoja arvioita. Lisäksi on määriteltävä kriteereille tärkeispainot, johon voidaan käyttää eri menetelmiä. Tuloksena saavat kokonaisarvot voidaan jakaa osiin sen suhteen, minkä eri kriteerien kautta ne muodostuvat. Menetelmä antaa havainnollisia tuloksia, mutta toisaalta on hyvin työläs ja vaatii resursseja sekä vaihtoehtojen vaikutusten että tärkeispainojen arvioimiseksi.

4.3 Tapaustutkimusesimerkki muutaman toimenpiteen edistämiseksi tehtävien ohjauskeinojen arvioinnista

Edellisissä luvuissa kuvatus monitavoitteisen arviointikehikon soveltuvuutta testattiin soveltamalla sitä muutaman ravinnekiertoa edistävän ohjauskeino arviointiin. Arviointia tukemaan järjestettiin sidosryhmätyöpaja 1.4.2019, jossa osallistujilta pyydettiin kommentteja itse lähestymistavasta ja sen soveltamisesta sekä tunnistettiin toimenpiteitä edistäviä mahdollisia ohjauskeinoja. Lisäksi tehtiin asiantuntijahaastatteluita.

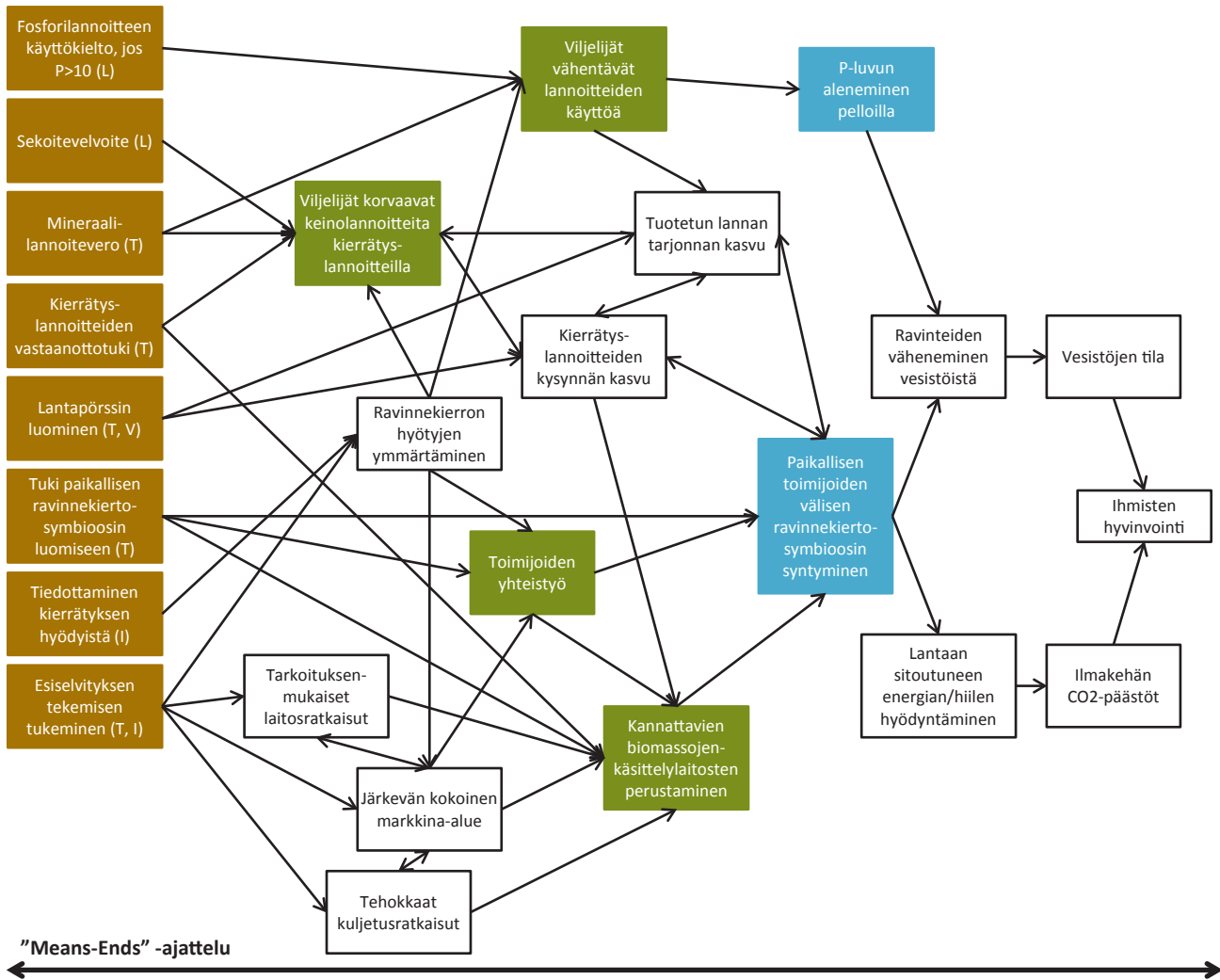
Tarkastelun ongelmakentäksi oli jo esiselvityksen tehtävänannossa rajattu maatalouden ravinnekierron tukeminen (**Vaihe 1**). Koska tavoitteena oli testata kehikon soveltuvuutta erilaisiin tilanteisiin, niin toivotuiksi tilamuutoksiksi (**Vaihe 2**) valittiin kaksi skaalaltaan ja toimijoiltaan erityyppistä tilamuutosta eli:

1. Paikallisen toimijoiden välisen ravinnekiertosymbioosin syntyminen ja
2. P-luvun aleneminen pelloilla.

Tavoiteltujen tiloihin pääsemiseksi tarvittavien toimenpiteiden havainnollistamiseksi luotiin tilanteesta yksinkertaistettu kaaviokuva. Sen avulla voidaan paremmin ymmärtää tavoiteltaviin tilamuutoksiin pääsemiseksi tehtävien toimenpiteiden vaikutusketjuja (Kuva 4) sekä tilamuutosten vaikutuksia, mitkä ovat ratkaisevia tekijöitä pyrittäessä ymmärtämään mitä systeemisen muutoksen aikaansaamiseksi tarvitaan. Kuvasta voidaan huomata esimerkiksi, että P-luvun alentamisella voidaan vaikuttaa lähinnä siihen, kuinka paljon ravinteita kulkeutuu pelloilta vesistöihin. Sen sijaan toimivan ravinnekiertosymbioosin avulla voidaan myös lantaan sitoutunutta energiaa hyödyntää ja näin ollen vaikuttaa esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen vähentämisen kautta ilmastonmuutoksen ehkäisemiseen.

Vaikutuskaavio-tyyppisten tarkastelujen lisäksi voidaan tilanteen hahmottamiseksi hyödyntää myös muita luvussa 2.1 esitettyjä menetelmiä. Esimerkiksi yhtenä haasteena toimenpidelähtöisessä tarkastelussa havaittiin se, että tässä tarkastelussa käsitellyt toimenpiteet voidaan nähdä katsantokannasta riippuen myös tavoitteina, jolloin sidosryhmäkeskusteluissa toimenpide- ja tavoite-käsitteet menevät helposti sekaisin. Tämän hahmottamiseksi voidaan hyödyntää Keeneyn (1992) ”keinotavoite – perimmäinen tavoite” (*Means–Ends Objectives*) -ajattelua, jossa kaaviossa jonkin tavoitteen alapuolella (tässä oikealla) oleva tavoite on yleisluontoisempi tavoite tälle, kun taas yläpuolella (vasemmalla) oleva tavoite on keinotavoite tämän toteuttamiselle (Kuva 4). Esimerkiksi paikallisen ravinnekiertosymbioosin syntyminen voidaan nähdä toisaalta yleisemmän tason tavoitteena esiselvityksen tekemiselle, mutta toisaalta myös keinona ravinnekierron tehostamiselle.

Kaaviokuvasta voidaan tunnistaa myös mihin eri DPSIR-kaavion vaiheisiin kukin tavoite vaikuttaa. Tämä auttaa hahmottamaan toimenpiteiden kestävyyttä, sillä mitä



Kuva 4. Toimenpiteiden edistämiseksi tehtävien ohjauskeinojen arviointi. Kuvassa käytetty väriytyys vastaa kuvan 3 elementtien väriytystä.

syvemmlle systeemin rakenteisiin voidaan vaikuttaa, sitä kestävämmällä pohjalla ratkaisut tyypillisesti ovat. Kuvassa 4 ihmisten hyvinvointi voidaan nähdä tavoiteltavana vaikutuksena (*Impact*), vesistöjen ja ilmaston tilat tiloina (*State*), ravinteet ja CO₂-päästöt paineina (*Pressures*) ja ohjauskeinot mahdollisuuksina vaikuttaa näihin (*Response*). Paineiden yläpuolella olevat tekijät voidaan nähdä joko paineiden taustalla olevina "perimmäisempinä" paineina tai jossain määrin jopa ohjausvoimina. Aivan perimmäisiä ohjausvoimia (*Drivers*) (esim. ilmastonmuutos) ei tässä kaaviossa tunnistettu, sillä niihin ei tarkasteltavaksi rajatussa viitekehyksessä voida vaikuttaa kuin välillisesti.

Kaaviossa tarkastelujen maatalouden ohjauskeinojen voidaan kuitenkin katsoa olevan jo hyvin syvällä ainakin paineisiin tai jossain määrin jopa ohjausvoimiin vaikuttavia toimenpiteitä olettaen, että niillä saadaan rakenteellisia muutoksia aikaikseksi. Toisaalta toimenpiteissäkin voi olla eroja siinä, kuinka laajalti eri paineisiin ne vaikuttava. Esimerkiksi ravinnekierron edistämiseen kohdistuvilla toimenpiteillä voidaan vaikuttaa sekä ilmakehän CO₂-pitoisuuteen että vesistöjen ravinnepitoisuuteen kohdistuviin paineisiin. Sen sijaan P-luvun alentamiseen tähtäävillä toimenpiteillä voidaan lähinnä vaikuttaa ravinteiden pääsyyn vesistöön, mutta ei varsinaisesti oteta kantaa siihen, mitä käyttämättä jäävälle ylimääräiselle lannalle tehdään. Toki P-luvun alentamisella voi olla ilmastovaikutuksia esimerkiksi lannan käytön vähen-

tymisen myötä, mutta toisaalta se voi aiheuttaa eläintilallisille lantaongelmia, mikäli lannan kierrätykseen ei ole tarjolla keinoja.

Vaihe 3 on toimenpiteiden vaikutusten arviointi. Arviointi voidaan kuitenkin toteuttaa myös ilman tätä vaihetta, esimerkiksi silloin, jos kaikilla ohjauskeinoilla tähdätään samaan toimenpiteeseen, jolloin tämä on ohjauskeinojen välisen vertailun kannalta merkityksetön. Tällöin on kuitenkin oltava tiedossa, että toimenpide on ylipäänsä hyödyllinen ja että siihen kannattaa pyrkiä. Esimerkiksi tässä hankkeessa arviointi tehtiin yleisellä tasolla eri ohjauskeinoille, sillä oletuksella että toivotut tilamuutokset ja niihin tähtäävät toimenpiteet on jo aiemmin todettu hyödyllisiksi, jolloin varsinaiset P-luvun alentamisen tai ravinnekiertosymbioosin vaikutukset voitiin jättää arvioimatta.

Vaiheessa 4 tunnistettiin joukko ohjauskeinoja sidosryhmätyöpajassa 1.4.2019 tehdyn ryhmätyön ja kirjallisuuskatsauksen perusteella. Tarkasteluun valittiin kahdeksan ohjauskeinoa (Kuva 4), joita tarkasteltiin esimerkinomaisesti, ja jotka on kuvattu tarkemmin liitteessä B. Tarkasteluun pyrittiin valitsemaan mahdollisimman erityyppisiä ohjauskeinoja, jotta saataisiin kattavasti kokemuksia menetelmän soveltuvuudesta eri tilanteisiin. Lisätietoa erilaisista mahdollisista ohjauskeinoista löytyy muun muassa seuraavista julkaisuista:

- Aho ym. (2015) ovat arvioineet erilaisia mahdollisuuksia tukea yleisesti kiertotalouden edistämistä. Yksi valituista esimerkkiteemoista on maatalous, jonka osalta käytiin läpi muun muassa lannoitevuokrauksen ja kipsin käytön mahdollisuuksia.
- Hulkkonen (2017) on tarkastellut opinnäytetyössään maatalouden ohjauskeinoja vesistöjen ravinnekuormituksen vähentämiseksi. Fokus on ravinteiden vähentämisessä vesistöissä, mutta välillisesti ohjauskeinoilla voidaan edistää myös kiertotalouden ratkaisuja.
- Marttinen ym. (2017) ovat tarkastelleet ja luokitelleet ravinteiden kierrätyksen ohjauskeinoja ja esittäneet suosituksia ohjauksen kehittämiseksi ja kehitystyön tukemiseksi.
- Salminen ym. (2017) ovat tunnistaneet ja arvioineet kiertotalouden ohjauskeinoja vesiviisaan kiertotalouden näkökulmasta katsottuna.
- Tikkanen ym. (2018) ovat tarkastelleet yleisesti kiertotalouden mahdollisia taloudellisia ohjauskeinoja. Maatalouden osalta tarkasteltuja ohjauskeinoja olivat muun muassa lannoitevero ja erilaiset investointituet.
- Simons ym. (2018) ovat myös tarkastelleet yleisesti kiertotalouden taloudellisia ohjauskeinoja. Tarkastelu ei varsinaisesti koske maatalouden kiertoa, mutta yhtenä potentiaalisena kiertotalouden alueena tarkasteltu biokaasun tuotanto koskee vahvasti myös maataloutta.
- Kärkkäinen ym. (2018) ovat tarkastelleet maankäyttösektorin toimien mahdollisuuksia ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi sekä ohjauskeinoja edistää näitä toimia. Tarkastelussa maatalous oli yksi maankäyttösektorin toimijoista.
- Luostarinen ym. (2019) ovat OLAKE-hankkeessa monipuolisesti tunnistaneet erilaisia ohjauskeinoja orgaanisten lannoitevalmisteiden käytön edistämiseen sekä tarkastelleet näiden etuja ja käyttöönoton rajoitteita. Taustalla on ollut tarve, ei pelkästään hienosäätää olemassa olevia ohjauskeinoja, vaan myös pohtia miten päästään laajaan systeemiseen muutokseen.

Vaiheissa 5–8 tunnistettiin ohjauskeinojen välisiä mahdollisia synergioita ja ”kanibalismia” sekä arvioitiin ohjauskeinojen hyvyttä eri ohjauskeinokriteerien suhteen ja ohjauskeinojen muita (toivottuja tai ei-toivottuja) vaikutuksia sekä sitä, miten hyvin ohjauskeino toteuttaa toivotut vaikutukset. Tarkastelun tulokset on esitetty taulukossa 3 kolmen erityyppisen ohjauskeinojen osalta. Koko taulukko on liitteessä B.

Taulukko 3. Ohjauskeinojen arviointitaulukko kolmen eri ohjauskeinoon osalta.

Ohjauskeino	Fosforilannoitteen käyttökielto, jos P>10	Lantapörssin luominen	Alueellisen esiselvityksen tekemisen tukeminen
Kriteeri			
Kuvaus	Kielletään lailla fosforilannoitteiden käyttö, mikäli pellon fosforiluku ylittää 10	Luodaan kauppapaikka, jossa toimijat voivat myydä ja ostaa kierrätyslannoitteita	Tuetaan rahallisesti esiselvitystä, jossa kartoitetaan alueellisen ravinnekierto-symbioosin syntymistä
Tyyppi	Lainsäädännöllinen	Taloudellinen, vapaaehtoisuuteen perustuva	Informatiivinen
Tavoite	Vähentää lannoitusta pelloilla, jossa P-luku on tarpeettoman suuri kasvin tarpeeseen nähden	Edesauttaa kierrätyslannoitteiden kysynnän ja tarjonnan kohtaamista	Lisätä ymmärrystä alueen ominaispiirteistä ja alueellisen ravinnekierto-symbioosin toteutusmahdollisuuksista (onko edes teoreettisesti mahdollista?)
Toimenpiteen kohdistuminen	Maanviljelijä	Maanviljelijät ja kierrätyksen parissa toimivat	Konsultti (tekijänä), välillisesti maanviljelijät ja muut toimijat
Hyödylliset sivuvaikutukset	Kannustaa laittamaan ylimääräistä lantaa kiertoon eikä pelloille	Saattaa synnyttää markkinoita, jossa pörssiä ei enää tarvita välikätenä	Ymmärryksen lisääntyminen voi poikia myös muuta toimintaa alueella
Haitalliset sivuvaikutukset	Voi johtaa esimerkiksi pellon lisäraivaukseen, jos lantaa ei voi laittaa kiertoon, mikä puolestaan voi muuttaa alueen hiilinielusta hiililähteeksi. Mahdollisuus manipuloida esim. P-luvun mittausarvoja.	Mikäli syntyy useita kauppapaikkoja, niin ne voivat syödä toistensa tehoa.	Voi tuottaa läjäpäin selvityksiä, jotka eivät johda mihinkään (turhaa paperia)
Käynnistyskustannukset	Lainsäädännön muutokseen tarvittavan selvitystyön vaatimat kulut	Järjestelmän toteutukseen tarvittavat resurssit	Instrumentin suora rahoitus
Ylläpito-kustannukset (taloudellinen kestävyys)	P-luvun mittaaminen vaatii resursseja	Järjestelmän ylläpito voi vaatia resursseja, mikäli se halutaan pitää ilmaisenä	Ei ole
Kustannukset toimijoille	Tulonmenetyksiä maanviljelijöille vähentyneen tuoton myötä.	Lantapörssin käyttäminen voi vaatia viljelijöiltä investointeja massojen varastointiin. Tosin tähän voidaan osin hyödyntää jo olemassa olevia käytöstä poistettuja lietelantaloita.	Ei kuluja viljelijöille tai muille toimijoille
Vaikutusten pysyvyys (ekologinen kestävyys)	Saadaan pysyviä vaikutuksia peltojen P-lukuun	Voi johtaa pysyviin kahdenvälisiin kauppasuhteisiin	Selvityksen lopputulema vaikuttaa. Tavoitteena, että selvityksestä on hyvä jatkaa toteutukseen
Vaikutusten tarkoituksenmukainen kohdentuminen	Suurimmat vaikutukset niille pelloille, joista huuhtoutuu eniten ravinteita. Tosin hetkellinen liukoisen fosforin pitoisuuden alentaminen ei välttämättä ole pitkässä juoksussa paras.	Kohdentuu sinne, missä on tarjontaa tai kysyntää	Auttaa tätä tavoitetta siten, että toimenpiteitä kohdistetaan sinne, missä tehokkainta
Vaikutusten oikeudenmukainen kohdentuminen (sosiaalinen toteutettavuus)	Ei sellaisenaan ota huomioon maatilan eikä alueen rakennetta. Esimerkiksi kotieläinkestävyysillä on eri tilanne kuin viljelyvaltaisilla tai erikoiskasveja kasvattavilla alueilla.	Kaikilla sama mahdollisuus kaupan	Selvitykset kohdistuvat alueille, joissa on potentiaalia ja aktiivisuutta
Tekninen toteutettavuus	Itse lainsäädännön muutos teknisesti helppoa, mutta seuranta ei välttämättä	Järjestelmän rakentaminen tietoteknisesti toteutettavissa	Helppoa

Ohjauskeino	Fosforilannoitteen käyttökielto, jos P>10	Lantapörssin luominen	Alueellisen esiselvityksen tekemisen tukeminen
Kriteeri			
Poliittinen hyväksyttävyyys	Lainsäädännön rajoittavat muutokset ovat poliittisesti hankalia toteuttaa	Poliittisesti neutraali	Poliittisesti neutraali
Ohjauskeinoon kyky saada toimijat tekemään tavoitellut toimenpiteet (toimintavarmuus)	Lainsäädäntö pakottaa toimenpiteisiin	Vaatii alkusysäyksen toimiakseen ja pitää olla taloudellisesti kannattavaa kummallekin osapuolelle	Sellaisenaan ei johda toimenpiteisiin, mutta välillisesti lisääntyneen ymmärryksen kautta voi auttaa markkinoiden syntyisessä. Toimijoiden väliset suhteet tekevät tilanteesta aina yksilöllisen.
Ohjauskeinoon toimivuus itsenäisesti	Toimii itsenäisesti	Tehokas toiminta vaatii tiedotusta rinnalle sekä mahdollisesti investointitukea massojen varastointiin.	Ei yksinään välttämättä johda mihinkään, vaan vaatii iterointia. Vaatii muita ohjauskeinoja rinnalle, mutta toisaalta edistää tunnistamaan näitä.
Vaikutukset P-luvun alentamiseen	Suora ja tehokas vaikutus	Välillinen vaikutus sen kautta, että ylimääräiset lannoitteet laitetaan kiertoon	Ohjauskeinolla ei yksinään ole juuri vaikutusta
Vaikutukset ravinnekierto-symbioosin syntymiseen	Välillinen vaikutus sen kautta, että P-luvun rajoitus pakottaa laittamaan ylimääräiset lannoitteet kiertoon	Välillinen vaikutus, kun kahdenkeskisten kauppojen syntyminen myötä syntyy esimerkkejä alueelliseen symbioosin syntymiseen	Välillinen vaikutus sen kautta, että ymmärretään paremmin symbioosin syntymisen reunaehdot

Yksi havainto työpajasta oli se, että ohjauskeinoja pohtiessa on erityisen tärkeää tunnistaa, ketkä ovat toimijoita sekä ohjauskeinojen toimeenpanossa että niillä toivotujen toimenpiteiden toimeenpanossa. Taulukossa 4 on tunnistettu, mihin toimijaan toimenpide kohdistuu. Tarkastelua voidaan laajentaa esimerkiksi CATWOE-analyysillä, jossa tunnistetaan yksityiskohtaisemmin, ketkä ovat ongelman omistajia, toimijoita ja asiakkaita. Ohjauskeinosta riippuen mahdolliset toimijat voivat kuitenkin vaihdella suuresti, joten analyysi täytyy tehdä jokaiselle ohjauskeinolle erikseen. Taulukossa 4 on esimerkki CATWOE-analyysistä esiselvityksen tekemiselle paikallisen toimijoiden välisen ravinnekierto-symbioosin luomiseksi. Analyysiä ei välttämättä ole tarkoituksenmukaista tehdä kaikessa laajuudessaan, mutta ainakin erityyppisten toimijoiden tunnistaminen on ohjauskeinojen tarkastelussa hyödyllistä.

Taulukko 4. CATWOE-analyysi esiselvityksen tekemiselle paikallisen toimijoiden välisen ravinnekierto-symbioosin luomiseksi.

Asiakkaat (Customers)	Ketkä ovat hyötyjiä ja kuinka asia vaikuttaa heihin?	Paikalliset maatalouden toimijat – saavat tietoa symbioosin hyödyistä ja toteutusmahdollisuuksista
Toimijat (Actors)	Kuka on mukana tilanteessa ja toteuttamassa ratkaisua, ja mikä on heidän vaikutuksensa?	Konsultti – tekee selvityksen, paikalliset toimijat – mukana tuottamassa tietoa
Muutosprosessi (Transformation Process)	Mikä on tavoiteltu muutos koko tarkastelun taustalla?	Selvittää miten lannasta saatava energia ja ravinteet saadaan paikallisella tasolla kierrätettyä takaisin hyötykäyttöön
Laajempi maailmankuva (Worldview)	Mikä on tarkastelun “iso kuva”, ja mitkä ovat sen laajemmat vaikutukset?	Vesistöjen rehevöitymisen estäminen, ilmastomuutoksen hillintä, neitseellisten raaka-aineiden käytön korvaaminen
Päätösvallan haltija (Owner)	Kuka omistaa tarkasteltavan prosessin ja mikä on heidän roolinsa ratkaisussa?	Valtio – haluaa edistää kierrätystaloutta ja kansainvälisten sopimusten saavutettavuutta
Ympäristön rajoitteet (Environmental Constraints)	Mitä rajoituksia ongelman ratkaisuun liittyy?	Ei vielä tuota varsinaista ratkaisua, toteutus jää erikseen tehtäväksi

Arvioitaessa eri ohjauskeinojen tehokkuutta ja vaikutuksia eri kriteerien suhteen voidaan hyödyntää myös yleisesti ohjauskeinojen tehokkuuksista tehtyjä tarkasteluja. Esimerkiksi maatalouden ohjauskeinojen arviointiin voidaan hyödyntää aiempia sekä maatalouden kierron että yleisesti kiertotalouden ohjauskeinojen arviointia koskevia tutkimuksia. Seuraavassa on tarkasteluja, joissa on ainakin osittain sivuttu maatalouden ohjauskeinoja:

- Hilden ym. (2007) ovat tutkineet laajalti, miten verotus taloudellisena ohjauskeinona vaikuttaa maanviljelijöiden viljelykäyttäytymiseen ja lannoitteiden käyttöön.
- Grönroos (2014) on tarkastellut maatalouden ammoniakkipäästöjen vähentämismahdollisuuksia ja niiden kustannuksia. Tarkastelu keskittyy ammoniakkipäästöihin, mutta tarkastelussa tarkastellut keinot ovat sovellettavissa myös muihin päästöihin.
- Aakkula ja Leppänen (2014) ovat tarkastelleet seurantatutkimuksen avulla maatalouden ympäristötuen vaikuttavuutta sekä vaikutuksia. He tuovat esiin myös tukien alueellisen, tuotantosunnittaisen ja tilakohtaisen sovittamisen ja räätälöinnin tarpeen, jotta tuet saataisiin kohdennettua tarkoituksenmukaisesti.
- Seppälä ym. (2016) ovat tarkastelleet yleisesti kiertotalouden toimintaympäristöä ja ohjauskeinoja sekä näiden vaikutusten mallintamista vuoteen 2030 saakka. Tarkastelussa on maatalouden osalta arvioitu esimerkiksi erilaisten investointitukien vaikutuksia.
- Helenius ym. (2017) ovat arvioineet agroekologisen ravinne- ja energiaomavaraisen ruoantuotannon symbioosin taloudellisia ja ympäristövaikutuksia. Esimerkkikohteena on Palopuron agroekologinen symbioosi Hyvinkäällä.
- Salminen ym. (2017) ovat arvioineet kiertotalouden vaikutuksia vesistöjen näkökulmasta katsottuna. Maatalous on tässä asiassa keskeisessä roolissa, joten arvioinnissa pohditaan laajasti myös maatalouden toimien vaikutuksia.
- Seppänen ym. (2018) ovat kartoittaneet biokaasutoimijoiden ja viljelijöiden näkemyksiä mädätysjäätännöksen hyödyntämisestä lannoitteena ja tämän perusteella arvioineet sen hyödyntämismahdollisuuksia sekä mahdollisia rajoitteita ja vaikutuksia.
- Myllyviita ja Rintamäki (2018) ovat kartoittaneet ruoantuottajien näkemyksiä kierrätyslannoitteiden ominaisuuksista sekä niiden käyttöön liittyvistä tukitarpeista.
- Sitran Lukelta tilaamassa tutkimuksessa (Sitra/Luke, 2019) on tarkasteltu maatalojen erilaisia kiertotaloutta edistäviä ratkaisuja, ja arvioitu yleisellä tasolla niiden mahdollisia vaikutuksia.

Vaiheessa 9 tunnistetaan tehokkaat ohjauskeinot niille asetettujen ominaisuuksien perusteella. Arvioinnissa täytyy muistaa se, että tehokkuus riippuu siitä, kuinka paljon päätöksentekijä tai arvioija arvostaa eri ominaisuuksia. Eri arvioijilla voi olla erilaisia subjektiivisia mieltymyksiä liittyen esimerkiksi kriteerien tärkeyteen, ja arvioinnista saatavat tulokset riippuvat luonnollisesti näistä. Täten tuloksena ei myöskään saada yhtä oikeaa vaihtoehtoa vaan jokaiselle arvioijalle omansa.

Tässä tapauksessa vaikutusten arviointi oli laadullinen kolmiportaiseen asteikkoon perustuva, joten eri ominaisuuksille ei ollut myöskään mielekästä antaa esimerkiksi tarkkoja painoarvoja kuvaamaan niiden keskinäistä tärkeyttä. Yksi tapa saada tällöin yleiskuva vaihtoehtojen paremmuudesta on asettaa vertailtavat ominaisuudet niiden tärkeyden mukaiseen järjestykseen ylhäältä alaspäin. Tällöin vaihtoehto on sitä parempi, mitä enemmän vihreää ja keltaista sillä on mentäessä ylhäältä alaspäin. Taulukossa 5 on esimerkki tämäntyyppisestä vertailusta, jossa arvioija on pitänyt ylimpänä olevia ominaisuuksia kaikkein tärkeimpinä (esim. kyky saada toimijat

tekemään toimenpiteet, poliittinen ja tekninen toteutettavuus sekä tarkoituksen- ja oikeudenmukainen kohdentuminen). Tällöin esimerkiksi kierrätyslannoitteiden vastaanottotuki on hyvin vartenotettava ohjauskeino, sillä se on hyvä etenkin näissä tärkeimpinä pidetyissä ominaisuuksissa. Tässä täytyy toki muistaa, että tämä pätee vain tälle kyseiselle esimerkkiarvioijalle, sillä ominaisuuksien järjestys on subjektiivinen. Sen sijaan esimerkiksi sellaiselle arvioijalle, joka nostaisi ylläpitokustannukset kaikkein tärkeimmäksi, vastaanottotuki ei olisi kovin hyvä vaihtoehto.

Taulukko 5. Esimerkki ohjauskeinojen vertailusta ominaisuuksien tärkeysjärjestyksen perusteella (Asteikko: vihreä = toteutuu hyvin, keltainen = toteutuu kohtalaisesti, punainen = toteutuu huonosti).

Ohjauskeino	Fosforilannoitteen käyttökielto, jos P>10	Sekoitevelvoite	Mineraalilannoitevero	Kierrätyslannoitteiden vastaanottotuki	Lantapörssin luominen	Tuki paikallisen ravinnekiertosymbioosin luomiseen	Tiedottaminen kierrätysen hyödyistä	Alueellisen esiselvityksen tekemisen tukeminen
Kriteeri								
Kyky saada toimijat tekemään toimenpiteet								
Poliittinen hyväksyttävyyys								
Tekninen toteutettavuus								
Vaikutusten oikeudenmukainen kohdentuminen								
Vaikutusten tarkoituksenmukainen kohdentuminen								
Vaikutukset ravannekiertosymbioosin syntymiseen								
Vaikutukset P-luvun alentamiseen								
Ohjauskeinoon toimivuus itsenäisesti								
Käynnistyskustannukset								
Ylläpitokustannukset								
Hyödylliset sivuvaikutukset								
Haitalliset sivuvaikutukset								
Vaikutusten pysyvyys								
Kustannukset toimijoille								

4.4 Suosituksia ohjauskeinojen toteutukselle

Tehdyn analyysin perusteella mikään tarkastelluista ohjauskeinoista ei ole yksiselitteisesti paras ottaen huomioon kaikki tarkasteltavat kriteerit, ja kaikilla tarkastelluilla kohteilla on hyviä ja huonoja puolia. Hyvin paljon riippuu käytössä olevista resursseista, mitä ohjauskeinoa kannattaa lähteä viemään eteenpäin. Tämän perusteella ohjauskeinot on jaettu neljään eri ryhmään ja seuraavassa on analysoitu, millä edellytyksillä kunkin ryhmän ohjauskeinoja voidaan lähteä edistämään.

Fosforin käyttökielto, sekoitevelvoite ja mineraalilannoitevero. Nämä ohjauskeinot ovat sinänsä tehokkaita, mutta eivät välttämättä kovin oikeidenmukaisia eivätkä teknisesti ja poliittisesti toteutettavia. Lisäksi niiden sivuvaikutukset voivat olla

arvaamattomia. Mikäli näitä ohjauskeinoja toteutetaan, niin on tarkkaan pohdittava, miten se käytännössä tapahtuu niin että kaikki hyväksyvät ne, ja niin että, kaikki mahdolliset haitalliset sivuvaikutukset minimoituisivat. Vaikka itse lainsäädännön muuttaminen ei välttämättä vaadi resursseja, voi olla hyvinkin työlästä ja resursseja vievää muokata lainsäädäntö sellaiseksi, että se johtaa tarkoituksenmukaisiin toimenpiteisiin.

Vastaanottotuki ja tuki symbioosille. Tukiin suhtaudutaan ”porkkanana” usein paljon myönteisemmin kuin säädöksiin ja rajoituksiin ja niillä saadaan monesti toimenpiteitä aikaiseksi. Ne kuitenkin vaativat jatkuvaa rahoitusta, jonka lisäämisen suhtaudutaan usein nihkeästi. Mikäli rahoitus kuitenkin otetaan tehottomien toimien rahoituksesta, on kyseessä nollasummapele, jolla voidaan ohjata toimenpiteitä toivottuun suuntaan. Tukien osalta tulee myös muistaa, että kilpailusäännökset voivat rajoittaa toteuttamista.

Lantapörssin luominen ja esiselvityksen tekemisen tukeminen. Nämä ovat kohtuullisen halpoja tapoja, mutta eivät yksinään välttämättä johda konkreettisiin toimenpiteisiin. Onnistuessaan niillä on kuitenkin mahdollisuus hyvinkin kustannustehokkaasti saada tuloksia aikaiseksi, mutta ne vaativat rinnalle myös muita ohjauskeinoja. Tämän vuoksi niitä voisi olla hyvä ensin pilotoida ja jos kokemukset ovat hyviä, niin toteuttaa laajemmin. Lantapörssien osalta tätä on jo kokeiltu (esim. MOTIVAn materiaalitori, <https://www.materiaalitori.fi> ja Kiertoa Suomesta -myyntipaikka, <https://kiertoasuomesta.fi>) ja kokeilut ovat vahvistaneet käsitystä siitä, että rinnalle tarvitaan muitakin ohjauskeinoja.

Tiedottaminen. Sinänsä huokea tapa, mutta tiedottamisen sisältö vaatii konkretia, jotta viesti menisi tehokkaasti perille. Tiedottaminen toimii usein parhaiten silloin, kun se voidaan esimerkiksi kytkeä onnistuneisiin käytännön pilottikohteisiin ja muihin ohjauskeinoihin. Tiedottamisella voidaan myös yrittää vaikuttaa kansalaisten kulutustottumuksiin ja sitä kautta ohjata kierrätyslannoitteilla tuotettujen tuotteiden kysyntää.

Lisäksi ohjauskeinojen toteutuksesta on tarpeen muistaa, että ne eivät välttämättä toimi yksin, vaan tarvitsevat yleensä rinnalle muita ohjauskeinoja. Soveltuvan ohjauskeinoyhdistelmän valinnassa on myös otettava huomioon se, että esimerkiksi lainsäädännöllisiä keinoja ei kaikkia ole tarkoituksenmukaista lähteä toteuttamaan, sillä yhdessä ne syövät toistensa tehokkuutta.

4.5 Menetelmän soveltuvuuden arviointi

Yleisesti ottaen esimerkkitarjastelu osoitti monitavoitearvioinnin soveltuvan melko hyvin myös ohjauskeinotason tarkasteluihin. Pelkästään asioiden systemaattinen jäsentely auttaa hajanaisen tiedon kokoamisessa eri alojen asiantuntijoilta ja erilaisten ohjauskeinojen hyvien ja huonojen puolien ymmärtämisessä ja vertailemisessa. Menetelmää sovellettaessa on kuitenkin ensiarvoisen tärkeää osata rajata tarkasteltava ongelma ja sen tavoitteet hyvin. Maatalouden ravinnekierto on niin monimutkainen systeemi, että esimerkiksi peltolohkotason tarkastelut eivät yksinään riitä vaan järjestelmää tulisi katsoa kokonaisuutena. Menetelmän yhtenä hyötynä nähtiin, että lähestymistapa antaa viitekehysten keskustelulle aiheesta strukturoidusti yleisellä tasolla, mutta tarpeen vaatiessa se sallii tarkentamisen yksittäisiin tekijöihin.

Kappaleessa 4.3 tehty arviointi oli laadullinen, mutta työpajassa kokeiltiin kahden P-luvun alentamisen pyrkivän ohjauskeinon (Fosforilannoitteen käyttökielto ja mineraalilannoitevero) osalta myös numeerista arviointia asteikolla 0–10. Arviointi tehtiin karkealla tasolla ja esimerkinomaisesti, mutta se osoitti, että arviointi on myös mahdollista tehdä numeerisesti ainakin silloin, kun arvioidaan melko spesifisesti määritellyn tavoitellun toimenpiteen ohjauskeinoja. Numeeristen asteikkojen etuna

on, että tarvittaessa voidaan laskea kokonaisarvot, mikä tosin vaatisi arviointikriteerien tärkeyden määrittämistä, mihin tässä harjoituksessa ei kuitenkaan otettu kantaa. Lisäksi tällöin tarvitsee olla melko syvällistä tietoa mahdollisista vaikutuksista. Sen sijaan mitä laaja-alaisemmin erilaisiin toimenpiteisiin tähtääviä ohjauskeinoja tarkastellaan, sitä haastavampaa on vaikutusten kvantitatiivinen arviointi, mikä puoltaa taulukkotyyppisten tarkastelujen tekemistä tällaisissa tarkasteluissa.

Monessa kohtaa todettiin myös, että vaikutukset kriteereihin ovat epävarmoja, ja arvio epävarmuudesta olisi hyvä olla mukana. Tässä tarkastelussa on mukana epävarmuus, joka liittyy ohjauskeinojen kykyyn saada toimija tekemään halutut toimenpiteet, mutta senkin osalta arviointi oli ainoastaan kvalitatiivista. Eräs tapa tukea epävarmuuksien huomioon ottamista on soveltaa päätöspuita (Clemen ja Reilly, 2013), joiden avulla voidaan laskea esimerkiksi kustannusten odotusarvoja erilaisten ohjauskeinopäätösten ja näihin liittyvien epävarmuuksien osalta. Toki tällöin tarvitsee olla tietoa toimenpiteiden toteutumisen todennäköisyyksistä eri ohjauskeinoille.

Monien ohjauskeinojen osalta todettiin, että niillä on itse P-luvun alentamisen tähtäämisen tai ravinnekiertosymbioosin edistämisen lisäksi myös monia sivuvaikutuksia sekä välillisiä vaikutuksia. Vaikka toimenpiteen tavoite itsessään on selvä, niin olisi kuitenkin hyvä rakentaa isompi viitekehys, johon tulisi mukaan myös yhteydet muihin ohjauskeinoihin. Tällöin yksittäisistä ohjauskeinoista voitaisiin rakentaa loogisia kokonaisuuksia eli portfolioita eri ohjauskeinoista ja arvioida näitä keskenään. Toisena vaihtoehtona voisi olla hyödyntää portfolioanalyysin menetelmiä, joskin haasteeksi tällöin voi muodostua ohjauskeinojen välisten yhteisvaikutusten mallintaminen. Tällöin vaikutuksiin liittyvät epävarmuudet voivat myös kertautua, mutta toisaalta portfolioanalyysi voi myös toimia eräänlaisena riskien hajuttajana, etenkin jos mukaan saadaan erityyppisiä ohjauskeinoja. Ohjauskeinoyhdistelmällä voidaan myös muiden kriteerien osalta "tasoittaa vaikutuksia". Esimerkiksi tasapuolisuutta ei välttämättä saada toteutumaan minkään yksittäisen ohjauskeinon osalta, mutta ohjauskeinoista voidaan luoda sellainen yhdistelmä, joka tasapuolisesti nostaa eri näkökulmia esiin.

Yhtenä haasteena monitavoitearvioinnissa nähtiin aikaperspektiivin puuttuminen, sillä vaikutuksissa ei eksplisiittisesti oteta kantaa siihen, milloin nämä tapahtuvat. Tämän vuoksi on tärkeää ongelman määrittelyssä tuoda esiin, millä ajanjaksolla näitä tarkastellaan, mikä usein määräytyy kyseessä olevan projektin keston mukaan. Toki aikaperspektiivi tulee osin implisiittisesti esiin esimerkiksi tarkastellessa investointi- ja ylläpitokustannuksia erikseen, mutta ylläpitokustannusten osalta on lisäksi usein tarpeen erikseen määrittää kuinka pitkältä ylläpitojaksosta on kyse. Yksi tapa on tuoda arvioinnissa esiin taloudellisten arvottamisen menetelmissä käytetty diskonttaus-ajattelu, jossa tulevaisuuden kustannukset ja hyödyt muutetaan nyky aikaan sopivaa korkokantaa käyttämällä.

5 Biomassa-atlaksen hyödyntäminen biomassojen käsittelylaitosten optimointiin

Toisena yksityiskohtaisempuna systeemianalyyttisten menetelmien soveltamisalueena tarkasteltiin Biomassa-atlaksen hyödyntämistä biomassojen käsittelylaitosten optimointiin. Motiivina oli noin kymmenen vuotta sitten toteutettu JaloJäte-hanke (Kahiluoto ja Kuisma, 2010), jossa jo tehtiin samankaltaista optimointia. Tuolloin suuri osa hankkeeseen käytetyistä resursseista meni kuitenkin tiedon kokoamiseen eri lähteistä. Nyt kun Biomassa-atlaksessa suuri osa tiedoista on koottuna yhteen paikkaan, niin on mielenkiintoista tarkastella, miten vastaava optimointi voitaisiin tehdä nykyään hyödyntäen Biomassa-atlasta.

Toisena motiivina oli, että JaloJäte-hankkeessa optimoitiin kuljetusten järjestämisestä muutamassa vaihtoehtoisessa laitosten sijoittelustrategiassa, joissa biomassojen käsittelylaitosten määrät, tyypit ja paikat oli määrätty etukäteen. Nykyiset optimointimenetelmät ja lisääntynyt laskentakapasiteetti mahdollistavat kuitenkin edistyneemmät tarkastelut esimerkiksi niin, että myös laitosten sijaintia optimoidaan. Tässä hankkeessa testasimme myös sitä, miten nämä voitaisiin ottaa huomioon mallintamisessa.

5.1 Optimointimalli

Tarkastelua varten rakennettiin optimointimalli, jossa optimoidaan sekä laitosten paikkaa että sitä, mihin laitoksiin biomassoja kannattaa viedä. Malliin tarvitaan lähtödataksi sijaintitietoa biomassojen sijainneista, biomassojen mahdollisista kuljetusreiteistä sekä mahdollisista laitosten paikoista ja tyypeistä. Mallissa biomassojen sijaintitieto esitetään kaksiulotteisena ruudukkona, jossa kussakin ruudussa on määritetty mitä eri biomassoja ko. ruudussa tuotetaan.

Käytännössä laitoksia on hyvin erityyppisiä (esim. biokaasu- tai CHP-laitos), ja kukin laitostyyppi vaatii toimiakseen tietynlaista biomassajakaumaa ja tuottaa tietynlaisia lopputuotteita. Lisäksi erityyppisiä laitoksia on usein järkevää rakentaa vain tiettyihin paikkoihin. Esimerkiksi lämpöä tuottava laitos on rakennettava paikkaan, missä syntyvää lämpöä voidaan hyödyntää. Tätä varten malliin on annettava lista kaikista mahdollisista laitoksista l ja tiedot näiden sijaintipaikoista, ja siitä min-kä tyyppisiä laitoksia kuhunkin sijaintipaikkaan kannattaa rakentaa. Käytännössä kuhunkin laitospaikkaan joko rakennetaan tai ei rakenneta laitosta, jota voidaan mallintaa 0–1 -päätösmuuttujalla.

Itse optimointi voidaan suorittaa esimerkiksi maksimoimalla vuotuista tuottoa (myynti-kustannukset), jolloin investointikustannukset voidaan jyvittää vuotuisiksi kustannuksiksi. Toinen tapa suorittaa optimointi on maksimoida kokonaistuottoa tietyltä aikaväliltä niin, että tulevat vuotuiset kustannukset ja tuotot diskontataan nykyarvoon. Periaatteessa optimointi voitaisiin suorittaa myös monitavoiteoptimointina, jossa eri kustannustyypit olisivat yksittäisiä optimoitavia tavoitteita. Nämä ovat

kuitenkin jo kaikki määritetty rahassa, joten jos halutaan maksimoida systeemin kokonaistuottoa, niin tehtävä voidaan redusoida yllä olevaksi tuoton optimointitehtäväksi.

Seuraavassa käydään läpi optimointimallin parametrit ja lähtötiedot, optimoitavat päätösmuuttujat ja tavoitefunktio, sekä päätösmuuttujien arvoille asetettavat rajoitteet.

Parametrit:

- L = Mahdollisten laitosten määrä
- B = Eri biomassojen määrä
- P = Erilaisten tuotettujen tuotteiden määrä
- I = Alueen koko vaakasuunnassa
- J = Alueen koko pystysuunnassa
- m_{ijb} = Biomassan b tuotanto pisteessä (i, j)
- d_{ijl} = Kuljetusmatka pisteestä (i, j) laitokseen l (kilometriä)
- K_b^{kn} = Yhden biomassan b massayksikön kuljetuskustannus / kilometri
- $K^{lastaus}$ = Yhden lastauskerran kiinteä kustannus
- C_b^{lasti} = Yhden kuljetuksen kapasiteetti biomassalle b
- H_p^{myynti} = Tuotteen p yksikkömyyntihinta
- H_b^{osto} = Biomassan b yksikköostohinta
- Laitoksen l ominaisuudet:
 - $K_l^{kiinteä}$ = Laitoksen l kiinteät investointikustannukset
 - $K_l^{käyttö}$ = Laitoksen l operointikustannukset vuodessa
 - S_b^{max} = Biomassan b maksimiosuus käsiteltävistä biomassoista laitoksessa l (%)
 - S_b^{min} = Biomassan b minimiosuus käsiteltävistä biomassoista laitoksessa l (%)
 - C_l^{tot} = Biomassojen suurin kokonaiskäsittelykapasiteetti laitoksessa l
 - T_{lp} = Laitoksen l tuottaman tuotteen p tuotanto täydellä käytöllä

Päätösmuuttujat:

- x_{ijbl} = Määrä, kuinka paljon pisteestä (i, j) viedään biomassaa b laitokselle l
- e_l = Päätös laitoksen l rakentamisesta (0–1 -muuttuja: 0 = ei laitosta, 1 = rakennetaan laitos)

Tavoitteet:

- Kaikkien laitosten yhteisen tuoton maksimointi:

$$\text{Max } \sum_{l=1\dots L} (M_l^{\text{myynti}} - K_l^{\text{osto}} - K_l^{\text{operointi}} - K_l^{\text{kuljetus}} - K_l^{\text{investointi}})$$

jossa

- Tuotoksista saatava vuotuinen myynti laitoksesta l :

$$M_l^{\text{myynti}} = \sum_{p=1\dots P} T_{lp} * ((\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J'} x_{ijgl}) / C_l^{\text{tot}}) * H_p^{\text{myynti}}$$

- Laitoksen l investointikustannus jyvitettyinä vuotuisiksi kustannuksiksi:

$$K_l^{\text{investointi}} = e_l * K_l^{\text{kiinteä}}$$

- Vuotuiset kuljetusten kustannukset laitokseen l :

$$K_l^{\text{kuljetus}} = (\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J'} x_{ijbl} * d_{ijl} * K_b^{\text{kn}}) + (\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J, b=1\dots B} x_{ijbl} / C_b^{\text{lasti}} * K_b^{\text{lastaus}})$$

- Laitoksen l vuotuiset operointikustannukset

$$K_l^{\text{operointi}} = e_l * K_l^{\text{käyttö}}$$

- Biomassojen vuotuiset ostokustannukset laitokselle l :

$$K_l^{\text{osto}} = \sum_{i=1\dots L, j=1\dots J'} x_{ijbl} * H_b^{\text{osto}}$$

Rajoitukset:

- Liikuteltavat biomassamäärät eivät voi olla negatiivisia:

$$x_{ijbl} \geq 0, \forall i, j, b, l$$

- Paikasta (i, j) ei voida viedä enempää biomassoja kuin se tuottaa:

$$\sum_{l=1\dots L} x_{ijbl} \leq m_{ijb}, \forall i, j, b$$

- Ainoastaan rakennetuille laitoksille voidaan tuoda biomassoja, ja tällöinkään ei voida tuoda enempää kuin laitoksen kokonaiskäsittelykapasiteetti:

$$\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J'} x_{ijbl} \leq e_l * C_l^{\text{tot}}, \forall l$$

- Yläraja sille, kuinka suuri osuus laitoksen biomassasta voi olla tiettyä biomassaa:

$$(\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J} x_{ijbl}) / (\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J'} x_{ijgl}) \leq S_{lb}^{\text{max}}, \forall b, l$$

- Alaraja sille, kuinka suuri osuus laitoksen biomassasta pitää olla tiettyä biomassaa:

$$(\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J} x_{ijbl}) / (\sum_{i=1\dots L, j=1\dots J'} x_{ijgl}) \geq S_{lb}^{\text{min}}, \forall b, l$$

- Kunkin yksittäisen laitoksen toiminta pitää olla kannattavaa:

$$M_l^{\text{myynti}} - K_l^{\text{osto}} - K_l^{\text{operointi}} - K_l^{\text{kuljetus}} - K_l^{\text{investointi}} \geq 0, \forall l$$

Käytännössä optimoidaan siis kannattavuutta, eli jos tuotto on suurempi kuin kustannukset, niin silloin toiminta on kannattavaa. Lisäksi oletuksena on, että jokaisen yksittäisen laitoksen toiminta on oltava kannattavaa. Etukäteen on tiedossa laitosten mahdolliset sijaintipaikat ja se millä parametreilla kussakin sijaintipaikassa oleva laitos toimii. Päätösmuuttujana on kunkin mahdollisen laitoksen osalta se, rakennetaanko laitos vai ei. Lisäksi muuttujina on se, kuinka paljon kustakin pisteestä viedään kutakin biomassaa kuhunkin laitokseen. Mallissa ei eksplisiittisesti ole mukana laitoksen sijaintia koordinaatistossa, mutta se tulee otettua huomioon implisiittisesti kuljetusmatkassa, sillä jokaisesta koordinaatiston pisteestä lasketaan kuljetusmatka kuhunkin laitokseen, ja tämän laskennassa tarvitaan tietoa laitosten sijaintipaikoista.

Käytännössä malli on lineaarinen sekalukutehtävä (*Mixed Integer Linear Programming Model*, MILP), sillä rajoitteet ovat lineaarisia ja muuttujat ovat joko jatkuvia (biomassojen vientimäärät: x_{ijbl}), tai kokonaislukumuuttujia (rakennetaanko laitos vai ei: e_i). Mallin soveltamiseksi on ensin määriteltävä mallin parametrit sekä mallissa tarvittava data, joista tarkemmin seuraavassa:

- **Tarkastelualueen valinta.** Käytännössä tarkastelualue määräytyy yleensä hankkeen ja sen tavoitteiden perusteella siten, että se on jokin looginen kokonaisuus, esimerkiksi maakunta tai yksittäinen pienempi talousalue. Tarkasteltavan alueen lisäksi valitaan tarkastelun mittakaava, eli se, minkä kokoisilla ruuduilla data annetaan. Näiden perusteella sijoitetaan tarkastelualueen päälle ruudukko (dimensiot I ja J) siten, että se kattaa koko alueen. Tarkastelualue voi olla minkä muotoinen vain, sillä sen ulkopuolelle oleviin ruutuihin voidaan biomassojen tuotanto määrittää nollassi.
- **Tarkasteltavien laitosten määrittely.** Tässä vaiheessa päätetään, mitä eri laitoksia alueelle on mahdollista rakentaa, näiden määrä (L) sekä laitosten sijainnit. Jokaiselle laitokselle (l) tulee määrittää sen tyyppin perusteella rajoitteet käsiteltävien biomassojen kokonaismäärälle (C_l^{tot}) sekä käsiteltävien erilaisten biomassojen (b) suhteellisille osuuksille ala- ja ylärajat (S_{lb}^{min} ja S_{lb}^{max}). Tarkasteluun valittavista laitoksista riippuu, mitä kaikkia biomassoja otetaan mukaan tarkasteluun sekä erilaisten biomassojen määrä (B). Valittavista laitoksista riippuu myös mitä tuotteita voidaan tuottaa sekä niiden määrä (P). Lisäksi on määritettävä myös se, kuinka paljon mitäänkin tuotosta (p) laitos tuottaa (T_{lp}), kun se toimii täydellä teholla. Sama sijaintipaikka voidaan antaa monelle erityyppiselle mahdolliselle laitokselle, mikäli ei olla varmoja minkä tyyppinen tai minkä kokoinen laitos olisi paras kyseiseen paikkaan. Usein samalla paikalla toimiikin erilaisia laitoksia, kun massojen käsittely toimii prosessina, esimerkiksi sekä metaanin että etanolin tuotantoa.
- **Kuljetusmatkojen laskenta.** Edellisessä vaiheessa määritetyt tarkasteltavien laitosten paikkoja ei ole itse mallissa eksplisiittisesti mukana, mutta niiden perusteella tulee laskea kuljetusmatkat (d_{ijl}) jokaisesta tarkastelualueen pisteestä (x_{ij}) kuhunkin mahdolliseen laitospaikkaan. Käytännössä kuljetusmatkojen laskenta vaatii tietoa mahdollisista kuljetusreiteistä.
- **Biomassojen tuotannon laskenta.** Tarkasteluun aiemmin valituista biomassoista riippuen määritetään kuinka paljon missäkin alueen pisteessä tuotetaan mitään biomassaa (m_{ijb}).
- **Kustannusten arviointi.** Kustannusten arviointi varten tarvitaan tietoa kunkin laitoksen (l) rakentamisen kiinteistä kustannuksista ($K_l^{kiinteä}$) sekä laitoksen operoinnin vuotuisista kustannuksista ($K_l^{käyttö}$). Kuljetusmatkojen laskentaa varten tarvitaan tieto kilometrikustannuksista yhtä biomassayksikköä kohden (K^{km}).

- **Osto- ja myyntihintojen arviointi.** Tuoton laskentaa varten tarvitaan tieto kunkin lopputuotteen yksikkömyyntihinnasta (H_p^{myynti}), sekä mahdollisista biomassojen ostohinnoista (H_b^{osto}).

5.2 Mallin soveltaminen käytännössä

Mallin lähtötiedoiksi tarvitaan tietoa 1) biomassojen sijainneista, 2) niiden kuljetusmatkoista laitoksiin, 3) laitosten ominaisuuksista, sekä 4) biomassojen ja lopputuotteiden osto- ja myyntihinnoista. Biomassojen sijainti- ja määrätiedot löytyvät käytännössä kaikki suoraan Biomassa-atlaksesta ruudukkona, jonka koko on 1 km * 1 km. Laskentaa varten se olisi hyvä saada raakadatana. Biomassa-atlaksessa on (ei-julkinen) WFS-tiedonsiirtorajapinta, sekä latauspalvelu josta eri biomassatasojen tiedot voidaan ladata joko shape-muotoisena tiedostona tai geometriatiedon sisältävänä csv-tiedostona. Esimerkiksi valtakunnallisten ja alueellisten ravinnekiertojen suunnitteluun ja toimenpiteiden vaikutusten tarkasteluun kehitetty Ravinnelaskuri-työkalu (<https://www.luke.fi/projektit/ravinnelaskuri/>) hyödyntää Biomassa-atlaksesta saatua dataa.

Toinen tarvittava tietokokonaisuus on tieto kuljetusmatkasta jokaisesta ruudukon pisteestä jokaiseen eri laitokseen. Paikkatietoa väyläverkostoista on saatavissa monista eri avoimen datan karttapalveluista (esim. DigiRoad; <http://www.digiroad.fi>) ja etäisyyksien laskentaan kahden minkä tahansa maantieteellisen pisteen välillä on olemassa avoimen lähdekoodin sovelluksia (esim. QGISn pgRoutingLayer-laajennusosa; <http://planet.qgis.org/planet/tag/pgrouting/>). Kaikkien ruudukon pisteiden etäisyyksien laskemiseksi kaikkiin mahdollisiin laitospaikkoihin voidaan tehdä lyhyt ohjelmakoodi, joka hakee tämän tiedon yksitellen jokaiselle ruudukon piste/laitos -parille. Tämä tieto säilyy muuttumattomana koko optimoinnin ajan, joten ohjelma voidaan ajaa erikseen ennen varsinaista optimointia siinä vaiheessa, kun on tiedossa mahdollisten laitosten paikat.

Kolmas tarvittava tietokokonaisuus on tietoja laitosten ominaisuuksista. Laitosten investointi- ja käyttökustannusten arviointiin voidaan hyödyntää tietoa jo olemassa olevien laitosten toteutuneista kustannuksista, joskin tiedot täytyy kulloinkin sovittaa kunkin laitospaikan mukaiseksi. Itse laitosten operointiin saatavat tuotantotiedot ja operoitavien biomassojen rajoitteet riippuvat tarkasteltavista laitoksista ja niiden tyypeistä. Ohessa esimerkkinä tietoja muutamasta laityypistä:

Biokaasulaitos:

- Syötteen: yhdyskuntien biojäte, elintarviketeollisuuden jätteet, jätevedenpuhdistamoiden lietteet
- Prosessi mesofiilinen jatkuvatoiminen biokaasuprosessi
- Tuotteet: biokaasu, ravinnepitoinen käsittelyjäännös, josta lingotaan erillään typpipitoinen rejektivesi kiertovedeksi ja jätevedenpuhdistamon ravinneliuokseksi sekä fosforipitoinen kuivempi jae lannoitteeksi
- Jätteenkäsittelykapasiteetti 60 000 t/vuosi
- Biokaasuntuottokapasiteetti 30 GWh/vuosi
- Investointikustannus noin 6 000 000 €
- Lähteet:

<https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasulaitokset/kuopion-biokaasulaitos/>
<https://www.lut.fi/documents/10633/354090/Havukainen+Kaikko+Biogas+production.pdf>

Maatilamittakaavan CHP-laitos:

- Syöte: puuhake
- Prosessi: puuhake kaasutetaan 900–1 200 asteen lämpötilassa, kaasu jäähdytetään, suodatetaan ja käytetään sähkögeneraattorin polttoaineena. Lämpöä saadaan moottorin jäähdytysnesteestä, pakokaasuista sekä muusta prosessista syntyvästä hukkalämmöstä.
- Tuotteet: lämpö ja sähkö
- Kulutus täydellä teholla 4,5 m³/vrk → 4,5*365 m³/vuosi, puoliteholla 2 m³/vrk
- Tuotto, lämpö 700 000 kWh, sähkö 250 000 kWh
- Investointikustannus noin 350 000 €
- Lähde:

<http://www.bioenergieneuvoja.fi/biolampolaitos/kayttajakokemuksia/pien-chp/>

Neljäs tarvittava tietokokonaisuus on valmiiden tuotteiden myyntihinnat sekä biomassojen ostohinnat. Näitä voidaan arvioida keskimääräisten toteutuneiden myynti- ja ostohintojen perusteella, joskin hintoihin vaikuttaa paljon myös tuotteiden kysyntä alueella. Tuotteiden myynnissä ei ole huomioitu tuotteen kuljetuskustannuksia kohteeseen. Sähkön ja lämmön osalta kuljetus voidaan laskea mukaan siirron vaatiman infran investointikustannuksiin, mutta muiden jalostustuotteiden osalta kuljetuskustannuksia on vaikeampi arvioida, sillä siihen, missä tuotetta käytetään, liittyy paljon epävarmuutta. Näitäkin hintoja voidaan kuitenkin arvioida alueen ominaispiirteiden perusteella, ja ne voidaan ottaa huomioon mallissa tuotteen alempana myyntihintana.

Muodoltaan optimointitehtävä ei sinänsä ole mitenkään erityisen haastava ja vastaavan tyyppisiä malleja on sovellettu esimerkiksi tuotannon ja kulutuksen jakeluverkoston varastopaikkojen optimoinnissa (Zhang ja Song, 2018) ja autonvalmistuksessa käytettävien osien tuotantopaikkojen sijoittelussa (Fleischmann ym., 2006). Tämän tyyppisten lineaaristen sekalukutehtävien ratkaisemiseksi on olemassa monia sekä kaupallisia että avoimen lähdekoodin ohjelmistoja. Kaupallisista tehokkaita ratkaisimia ovat esimerkiksi Gurobi Optimizer (<http://www.gurobi.com>) ja IBM:n ILOG CPLEX Optimization Studio (<https://www.ibm.com/se-en/products/ilog-cplex-optimization-studio/>). Avoimen lähdekoodin ratkaisimia on esimerkiksi lp_solve (<http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>).

Myöskään mallin koon ei pitäisi aiheuttaa haasteita optimoinnille. Esimerkiksi 100 km * 100 km -kokoinen alue 4 km * 4 km ruutukoolla vaatii malliin 625 pistettä, ja jos laitospaikkoja on esimerkiksi 100 ja tuotettavia biomassoja 10, niin biomassojen liikuttelua kuvaavien jatkuvien päätösmuuttujien x_{ijbl} lukumäärä on noin 625000. Koska kokonaislukumuuttujien e_i on ainoastaan 100, ei tämän kokoisen lineaarisen sekalukutehtävän käsittely pitäisi olla nykyisille kaupallisille optimointiratkaisimille ongelma, sillä ratkaiseminen veisi todennäköisesti joitakin minuutteja. On syytä kuitenkin korostaa, että optimointitehtävien ratkaisuaikojen ennustaminen on hyvin vaikeaa pelkästään päätösmuuttujien lukumäärän perusteella ja hyvien estimaattien tuottaminen vaatii, että mallin ratkaisemista kokeillaan realistisella datalla. Esimerkiksi joissain tilanteissa voi olla tarpeen pienentää ruutukokoa, jolloin voi joutua tinkimään ratkaisuajasta tai laitospaikkojen määrästä. Yleisenä periaatteena pätee, että ratkaisuaika on huomattavasti herkempi kokonaislukupäätösmuuttujien lukumäärälle kuin jatkuvien päätösmuuttujien lukumäärälle.

5.3 Mallissa tehtyjen oletusten arviointi

Vähänkään monimutkaisempien tarkasteluiden matemaattisessa mallintamisessa ei kaikkia asioita voida ottaa huomioon, vaan mallintamisessa täytyy käytännössä aina tehdä yksinkertaistavia oletuksia. Seuraavassa käymme läpi yllä esitetystä mallista tehtyjä oletuksia ja niiden vaikutuksesta mallin antamiin tuloksiin, sekä sitä, miten mallia voidaan mahdollisesti tarkentaa ottamaan kyseiset asiat huomioon.

- Tarkastelualueen rajauksessa oletetaan, että kaikki tarkastelualueella syntyvä biomassa tuodaan kyseisen alueen laitoksiin. Käytännössä kuitenkin tarkastelualueen reunoilta biomassoja voi olla kannattavampaa vielä viereisten alueiden laitoksiin. Tämä on hyvä ottaa huomioon alueen määrittelyssä ja reuna-alueiden osalta voi olla tarpeen erikseen tarkastella, onko niistä kustannustehokkaampaa viedä biomassoja muille alueille. Käytännössä massan saatavuuteen vaikuttaa myös biomassan omistajan halukkuus myydä tai luopua biomassasta. Siten kaikki olemassa oleva massa ei ole välttämättä käytettävissä olevaa massaa.
- Biomassa-atlaksen potentiaalit käsitteet vaihtelevat eri biomassoille. Esimerkiksi hake on laskettu kahteen skenaarioon perustuen eli toteutuneisiin hakkuisiin sekä suurimpaan taloudellisesti kestävään hakkuumäärään perustuen. Lanta koskee muodostuvia lantamääriä ja olki on laskettu maksimipotentiaalina, eikä kaikki ole teknistaloudellisesti tai kestävästi hyödynnettävissä. Malliin on siten syytä sisällyttää massakohtaisia rajoittimia.
- Kuljetuskustannuksissa on oletettu, että laitoksiin viedään aina täysinä kuorma yhdestä tuotantopisteestä, sitten kun tuotantopisteessä tuotetun biomassan määrä ylittyy. Käytännössä kuitenkin kuljetuksia voidaan viedä jo ennen kuin määrä tulee täyteen, mutta toisaalta kuljetukset järjestetään usein siten, että samalta alueelta haetaan kerralla biomassoja useista eri paikasta. Käytännössä tästä voi tulla pientä epätarkkuutta malliin, mutta herkkyysanalyysin avulla voidaan tarkastella, miten malli käyttäytyy, jos esimerkiksi lastauskustannukset ovatkin suuremmat.
- Laitoksissa syntyvien jalostustuotteiden kuljetuskustannuksia ei ole otettu huomioon, mutta ne voidaan ottaa huomioon siten, että hinta määritetään tuotteen myyntihintana paikan päällä. Tällöin, jos jalostustuotteiden ostajat ovat kaukana, niin niiden hinta voidaan arvioida alhaisemmaksi. Käytännössä jalostustuotteita voidaan myös kuljettaa tiloille takaisin samoilla kuljetuksilla kuin biomassoja laitokseen, jolloin voidaan saada synergiaetuja, mitä ei ole tässä mallissa otettu huomioon. Tosin käytännössä samojen kuljetusten käyttöä voi rajoittaa hygieniasyyt, mikä vähentää synergioita. Periaatteessa malli sallii myös sen, että myyntihinnat voitaisiin määrittää sijainnista riippuvan kysynnän funktiona. Tämä monimutkaistaisi mallia jonkin verran, joten tämän laajennuksen kohdalla soveltamisessa on tarpeen pohtia, ovatko hyödyt suuremmat kuin monimutkaisuuden kasvusta aiheutuvat haitat.
- Biomassojen ostohinnat ovat kiinteitä, mutta näin ei välttämättä todellisuudessa ole. Ostokustannukset voivat periaatteessa mennä jopa negatiivisiksi, jos esimerkiksi asetetaan lainsäädännöllisiä määräyksiä kierrättää biomassoja. Tällöin viljelijä joutuu maksamaan siitä, että biomassaa otetaan vastaan, mutta malli sallii negatiivistenkin hintojen käytön.
- Mallin tulokset riippuvat aina merkittävästi lähtödatasta, mikä pitää ottaa huomioon tulosten tulkinnassa. Esimerkiksi osa Biomassa-atlaksesta saatavista tiedoista on sellaisia, joiden lähtöaineistossakaan ei ole tarkkaa paikkatietoa, vaan ne on jyvitetty eri paikkoihin aluetasolle laskettujen mallien avulla. Esimerkiksi metsähakepotentiaalit perustuvat toteutuneisiin hakkuu-

määriin, jotka tunnetaan metsäkeskustasolla ja tieto on jaettu pienempiin yksiköihin metsän esiintyvyyden perusteella. Osa tiedoista esitetään yleisellä tasolla tietosuojasyistä. Esimerkiksi tuotantoeläinten lannan lähtötieto on tilatasolla, mutta tieto esitetään Biomassa-atlaksessa kuntatasolla. Se, miten paljon nämä vaikuttavat lopputulokseen, riippuu pitkälti tarkasteltavan alueen ominaispiirteistä, ja tuloksia kannattaa peilata näihin.

5.4 Mallin soveltamismahdollisuuksia

Mallia voidaan soveltaa eri karkeustasoille riippuen siitä, mikä on sen sovellustarkoitus ja tarkastelun luonne. Yksi tapa soveltaa mallia on luvussa 4.3. mainitun ohjauksen ”Alueellisen esiselvityksen tekemisen tukeminen” yhteydessä tukemaan ravinnekierto-symbioosin edellytysten arviointia. Tällöin mallin syötteeksi riittää melko karkean tason tieto esimerkiksi laitosten parametreista ja tuotteiden hintatiedoista. Lisäksi voidaan tehdä herkkyyksianalyysiä siitä, mitä tapahtuu, jos mallin parametrejä muutetaan. Näiden analyysien perusteella voidaan sitten arvioida, onko alueella ylipäänsä toimintaedellytyksiä mahdolliselle ravinnekierto-symbioosille. Jos näin on, niin hanketta voidaan jatkaa tarkentamalla parametrejä ja tekemällä optimointi uudelleen. Sen sijaan, jos jo karkea arviointi osoittaa symbioosin mahdottomaksi, voidaan optimointi jättää siihen.

Toisen ääripään sovelluskohde on tilanne, jossa ollaan jo konkreettisesti suunnittelemassa esim. laitosten parhaita sijaintipaikkoja tai niiden tyyppisiä. Tällöin on syytä käyttää jo hyvin tarkkoja parametrejä, mutta tällöin suunnittelutilanne on jo oletettavasti niin pitkällä, että niitä on jo ainakin jossain määrin arvioitu.

Jatkokehityskohteena suositellaan toteuttamaan edellä kuvatun mallin mukainen optimointi jollain tarkastelualueella esimerkiksi jossain pilottihankkeessa. Biomassa-atlas tarjoaa periaatteessa kaiken mallissa tarvittavan paikkatiedon biomassoista, ja siinä olevaa WFS-rajapintaa voidaan testata mallia toteuttaessa. Lisäksi toteutus vaatii sen, että malli on muunnettu sovellettavan optimointiohjelmiston vaatimaan muotoon, mutta tämän jälkeen sitä voidaan melko helposti ”monistaa” muille alueille.

6 Yhteenveto ja suositukset

Kokonaisuutena maatalouden ravinteiden kierto on hyvin monisyinen ongelma, jonka eri osa-alueiden tarkasteluun systeemianalyysi jäsentävänä menetelmäkokonaisuutena tarjoaa paljon mahdollisuuksia. Kaikessa laajuudessaan läpi vietyinä menetelmien soveltamisprosessit voivat olla raskaita, mutta toisaalta niillä on mahdollista parantaa huomattavasti suunnittelun ja myös päätösten laatua.

Tässä esiselvityksessä on vertailtu eri menetelmätyyppien ominaisuuksia ja kirjallisuuskatsauksen avulla tunnistettu menetelmien mahdollisia soveltamiskohteita ravinteiden kierron keskeisten tutkimuskysymysten ratkaisemiseksi. Tavoitteena on ollut tuottaa menetelmistä vertailevaa taustatietoa, jonka avulla menetelmien soveltajat voivat tunnistaa heidän käyttötarkoituksiinsa parhaiten soveltuvia menetelmiä, sekä tietoa menetelmien tarkoituksenmukaisesta soveltamisesta. Tarkastelu voi antaa uusia ideoita ja näkökulmia myös henkilöille, joilla ei ole aiempaa kokemusta menetelmien soveltamisesta. Tarkastelun perusteella suosittelemme seuraavien toimintaperiaatteiden omaksumista:

- Ennen menetelmän valintaa on hyvä tehdä kartoitus suunnittelu- tai arviointitilanteeseen liittyvistä tarpeista sekä arvioida eri menetelmien hyötyjä, rajoituksia ja resurssitarpeita kyseisessä tilanteessa. Kartoituksen avulla voidaan valita parhaiten tilanteeseen soveltuva menetelmä. Näin menetellen on mahdollista välttää niin sanottu ”vasara ja naula” -syndrooma, jossa vasaraa kädessä pitävälle henkilölle kaikki ongelmat näyttävät nauiloilta. Lisäksi systeemianalyysin menetelmiä voidaan soveltaa usealla eri tavalla, joten on myös tärkeää räätälöidä menetelmän käyttö tilanteeseen sopivaksi niin, että se tuottaisi päätöksenteolle todellista lisäarvoa olematta kuitenkaan liian raskas toteuttaa.
- Menetelmien rajat ovat häilyviä, ja niitä ei tarvitse soveltaa täydessä laajuudessaan, vaan niistä voidaan poimia esimerkiksi yksittäisiä kokonaisuuteen soveltuvia laskentaperiaatteita. Esimerkiksi monet systeemidynaamisen ja monitavoitearvioinnin menetelmät jo itsessään sisältävät jonkinlaista ongelman jäsentelyä tai kehystämistä, ja voivat esimerkiksi kustannusten arvioinnissa hyödyntää taloudellisen arvottamisen menetelmiä.
- Usein parhaat tulokset saavutetaan luomalla looginen menetelmäjätkumo, jossa tarkoituksenmukaisesti hyödynnetään eri menetelmien hyödyllisiä ominaispiirteitä. Esimerkiksi ongelman jäsentelymenetelmillä voidaan saada parempi ymmärrys ongelmasta, mutta ne eivät varsinaisesti tuota ratkaisua siihen. Ratkaisun saamiseksi voidaan kuitenkin hyödyntää seuraavassa vaiheessa esimerkiksi optimoinnin, monitavoitearvioinnin tai skenaarioanalyysin menetelmiä.

Yhtenä keskeisenä ravinteiden kierron edistämisen tutkimuskysymyksenä tunnistettiin, miten erilaisia ohjauskeinoja voidaan arvioida ja vertailla järjestelmällisesti ja läpinäkyvästi. Yksityiskohtaisempana tapaustutkimuksena tarkasteltiin monita-voitearvionnin soveltamista ohjauskeinojen arviointiin ja kehitettiin tähän järjestelmällinen arviointikehikko. Kehikon soveltamisessa on hyvä noudattaa seuraavien toimintaperiaatteita:

- Monitavoitearviointi soveltuu hyvin ohjauskeinojen järjestelmälliseen ja läpinäkyvään arviointiin. Ohjauskeinojen arvioinnissa on kuitenkin tavallista enemmän epävarmuuksia liittyen muun muassa siihen, kuinka hyvin ohjauskeino toteuttavat tavoitellut toimenpiteet. Tämän vuoksi numeerinen analyysi voi olla haastavaa, mutta etenkin taulukkotyyppiset tarkastelut soveltuvat hyvin arviointiin. Jo asioiden systemaattinen jäsentely voi auttaa kokoamaan hajanaista tietoa ja ymmärtämään ja vertailemaan erilaisten ohjauskeinojen hyviä ja huonoja puolia.
- Tarkastelun pitämiseksi hallinnassa on tarpeen rajata se aluksi vain muutama tavoiteltuun tilaan tai toimenpiteeseen, joita halutaan edistää. Ohjauskeinojen vaikutusmekanismien ymmärtämiseksi ja hahmottamiseksi voidaan hyödyntää esimerkiksi vaikutuskaavioita tai muita ongelmien jäsentelymenetelmiä.
- Tehdyn analyysin perusteella mikään tässä selvityksessä tarkastelluista ohjauskeinoista ei ole yksiselitteisesti paras, jos kaikki kriteerit otetaan huomioon. Kaikilla ohjauskeinoilla on hyviä ja huonoja puolia ja se, mitä ohjauskeinoa kannattaa lähteä edistämään, riippuu hyvin pitkälti käytössä olevista resursseista ja siitä, miten tärkeinä eri tavoitteita pidetään. Esimerkiksi lainsäädäntöön perustuvat ohjauskeino ovat sinänsä tehokkaita, mutta eivät välttämättä kovin oikeidenmukaisia eivätkä teknisesti ja poliittisesti toteuttamiskelpoisia ja lisäksi niillä voi olla vaikeasti ennakoitavia sivuvaikutuksia. Toisessa ääripäässä oleva tiedottamisen kustannukset ovat matalat, mutta vaikuttavuus on kysymysmerkki. Yksittäisten ohjauskeinojen tarkastelun lisäksi olisikin jatkossa hyvä tarkastella myös sitä, mikä ohjauskeinojen yhdistelmä kattaisi parhaiten ravinnekierron eri tehtävät ja toimijat.

Toisena tapaustutkimuksena tarkasteltiin Biomassa-atlaksen tuottaman paikkatietoaineiston hyödyntämistä biomassojen käsittelylaitosten optimaaliseen sijoitteluun. Tätä varten luotiin optimointimalli, josta seuraavia huomioita:

- Hankkeessa muotoillun optimointimallin avulla voidaan biomassojen käsittelylaitosten sijoittelutehtävä ratkaista niin, että samalla aikaa optimoidaan biomassojen kuljetusmatkoja käsittelylaitokselle sekä biomassojen käsittelylaitosten optimaalista sijoittelukombinaatiota. Laskennallisesti mallin ratkaisemisen ei pitäisi olla ongelma nykyisille kaupallisille optimointiohjelmistoille.
- Optimointimallia varten tarvittavat paikkatiedot biomassoista on saatavissa Biomassa-atlaksesta. Kuljetusmatkojen laskentaan tarvittavat väylätiedot on saatavissa kansallisista avoimen rajapinnan palveluista. Lisäksi malliin tarvitaan tiedot erityyppisten laitosten parametreista, mikä voidaan tehdä asiantuntija-arviona.
- Hankkeessa ei suoritettu varsinaista mallin laskennallista optimointia, mutta sitä suositellaan tehtäväksi esimerkiksi pilottina jossain käytännön hankkeessa. Kun optimointi on kerran tehty, niin sitä voidaan lähtötietoja muokaten melko helposti soveltaa myös muille alueille.

Esiselvityksessä tunnistettiin jo toteutettuja ja vielä käynnissä olevia hankkeita, joissa systeemianalyttisiä menetelmiä on sovellettu ravinteiden kierron ongelmien tarkasteluun Suomessa. Tunnistettujen hankkeiden perusteella menetelmiä sovelletaan jo melko laajalti ja niille on selvästi tarvetta. Suomessa on myös paljon menetelmiin liittyvää osaamista ja esimerkkejä onnistuneista käytännön sovelluksista sekä ravinteiden kierrossa että muilla aloilla. Menetelmiä soveltavien tutkimuslaitosten organisaatiot rakentuvat kuitenkin tyypillisesti substanssin mukaan, jolloin menetelmäosaaminen hajautuu monien eri yksiköiden alle. Menetelmäosaamisen vahvistamiseksi ja menetelmien käytön edistämiseksi suosittelemme seuraavia toimenpiteitä:

- Tehdään tutkimuslaitosten eri yksiköiden menetelmäosaamisesta kartoituksia, joiden perusteella voidaan uusia hankkeita ideoitaessa tunnistaa yhteistyökumppaneita. Kartoitusten pohjalta luodaan verkostoja edistämään menetelmäosaajien välistä aktiivista tiedonvaihtoa. Kartoituksia ja verkostojen perustamista ja ylläpitoa varten tulee varata riittävästi resursseja eri organisaatioissa.
- Järjestetään (esim. vuosittain) tapahtuma, jossa systeemianalyysiä hyödyntäneet hankkeet ja tutkijat sekä päätöksentekijät voivat kohdata ja ideoida, miten menetelmiä hyödynnettäisiin entistä paremmin päätöksenteossa. Lisäksi on tarpeen järjestää tilaisuus, jossa keskustellaan tässä raportissa esitettyjen menetelmien soveltamisesta ja esitettyjen pilottihankkeiden viemisestä käytäntöön.
- Varmistetaan menetelmiä soveltavissa hankkeissa, että substanssiin liittyvien tulosten lisäksi raportoidaan myös menetelmien soveltamiseen liittyviä kokemuksia ja hyviä käytäntöjä. Nämä ovat ensiarvoisen tärkeitä menetelmien tarkoituksenmukaiseen soveltamisen kannalta myös jatkossa. Hankesuunnitelmissa on tarpeen myös varata resursseja menetelmien soveltamiskokemusten raportointiin.

VIITTEET

- Aakkula, J., Leppänen, J. (toim.) (2014). Maatalouden ympäristötuen vaikuttavuuden seurantaratkaisu (MYTVAS 3) – Loppuraportti. Maa- ja metsätalousministeriö 3/2014.
- Abson, D.J., Fraser, E.D., Benton, T.G. (2013). Landscape diversity and the resilience of agricultural returns: a portfolio analysis of land-use patterns and economic returns from lowland agriculture. *Agriculture & Food Security*, 2(2), pp.15.
- Aho, M., Pursula, T., Saario, M., Miller, T., Kumpulainen, A., Päällysaho, M., Kontiokari, V., Autio, M., Hillgren, A., Descombes, L., Gaia Consulting (2015). Ravinteiden kierron taloudellinen arvo ja mahdollisuudet Suomelle. Sitran selvityksiä, 99.
- Ahtiainen, H., Artell, J., Czajkowski, M., Hasler, B., Hasselström, L., Huhtala, A., Meyerhoff, J., Smart, J.C.R., Söderqvist, T., Alemu, M.H., Angeli, D., Dahlbo, K., Fleming-Lehtinen, V., Hyytiäinen, K., Karlöševa, A., Khaleeva, Y., Maar, M., Martinsen, L., Nömmann, T., Pakalnieta, K., Oskolokaite, I., Semeniene, D. (2014). Benefits of meeting nutrient reduction targets for the Baltic Sea – a contingent valuation study in the nine coastal states. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 3(3), 278–305.
- Antikainen, R., Lemola, R., Nousiainen, J.I., Sokka, L., Esala, M., Huhtanen, P., Rekolainen, S. (2005). Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 107(2–3), 287–305.
- Asmala, E., Saikku, L. (2010). Closing a loop: substance flow analysis of nitrogen and phosphorus in the rainbow trout production and domestic consumption system in Finland. *Ambio*, 39(2), 126–135.
- Balana, B.B., Vinten, A., Slee, B. (2011). A review on cost-effectiveness analysis of agri-environmental measures related to the EU WFD: Key issues, methods, and applications. *Ecological Economics*, 70(6), 1021–1031.
- Banville, C., Landry, M., Martel, J.M., Boulaire, C. (1998). A stakeholder approach to MCDA. *Systems Research*, 15, 15–32.
- Barton, D.N., Kuikka, S., Varis, O., Uusitalo, L., Henriksen, H.J., Borsuk, M., de la Hera, A., Farmani, R., Johnson, S., Linnell, J.D.C., (2012). Bayesian networks in environmental and resource management. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 8(3), 418–429.
- Barton, D. N., Ring, I., Rusch, G. M., Brouwer, R., Grieg-Gran, M., Primmer, E., May, P., Santos, R., Lindhjem, H., Schröter-Schlaack, C., Lienhoop, N., Similä, J., Antunes, P., Andrade, D.C., Romero, A., Chacón-Cascante, A., DeClerck, F. (2014). Guidelines for multi-scale policy mix assessments. POLICYMIX Technical Brief, (12).
- Belton, V., Stewart, T.J. (2002). *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers, Boston, U.S.A.
- Bennett, R.J., Chorley, R.J. (1978). *Environmental Systems: Philosophy, Analysis and Control*. Princeton University Press, Princeton, U.S.A.
- Boardman A.E., Greenberg D.H., Vining A.R., Weimer D.L. (2017). *Cost-Benefit Analysis. Concepts and Practice*. 4th edition. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.
- Checkland P. (1981). *Systems Thinking, Systems Practice*. John Wiley & Sons, Chichester, U.K.
- Chowdhury, R.B., Moore, G.A., Weatherley, A.J., Arora, M. (2014). A review of recent substance flow analyses of phosphorus to identify priority management areas at different geographical scales. *Resources, Conservation and Recycling*, 83, 213–228.
- Clemen, R.T., Reilly, T. (2013). *Making Hard Decisions with DecisionTools*. South-Western, Cengage Learning, Mason, U.S.A.
- Cooper, J., Carliell-Marquet, C. (2013). A substance flow analysis of phosphorus in the UK food production and consumption system. *Resources, Conservation and Recycling*, 74, 82–100.
- Cooper, G., Dearing, J., Langdon, P. (2018). Using systems modelling to design safe operating spaces for shallow lakes. Presentation at Lahti Lakes 2018 Conference.
- Crabb, A., Leroy, P. (2012). *The handbook of environmental policy evaluation*. Routledge, Abingdon, U.K.
- Dantsis, T., Douma, C., Giourga, C., Loumou, A., Polychronaki, E.A. (2010). A methodological approach to assess and compare the sustainability level of agricultural plant production systems. *Ecological Indicators*, 10(2), 256–263.
- Dantzig, G. (2016). *Linear programming and extensions*. Princeton University Press, New Jersey, U.S.A.
- De Luca, A.I., Iofrida, N., Leskinen, P., Stillitano, T., Falcone, G., Strano, A., Gulisano, G. (2017). Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. *Science of the Total Environment*, 595, 352–370.
- Diamond, P.A., Hausman, J.A. (1994). Contingent valuation: is some number better than no number? *Journal of Economic Perspectives*, 8(4), 45–64.
- Dutch Ministry of Foreign Affairs (2009). *Evaluation policy and guidelines for evaluations*. The Policy and Operations Evaluation Department. October 2009.
- Eden, C. (2004). Analyzing cognitive maps to help structure issues or problems. *European Journal of Operational Research*, 159, 673–686.
- Edwards, W., Barron, F.H. (1994). SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60(3), 306–325.
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization*. Vol. 491. Springer Science & Business Media, Berlin, Germany.

- Fealy, R.M., Buckley, C., Mechan, S., Melland, A., Mellander, P.E., Shortle, G., Wall, D., Jordan, P. (2010). The Irish Agricultural Catchments Programme: catchment selection using spatial multi-criteria decision analysis. *Soil Use and Management*, 26(3), 225–236.
- Fernandez-Mena, H., Nesme, T., Pellerin, S. (2016). Towards an Agro-Industrial Ecology: A review of nutrient flow modelling and assessment tools in agro-food systems at the local scale. *Science of the Total Environment*, 543, 467–479.
- Figueira, J., Greco, S., Ehrgott, M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Springer, New York, U.S.A.
- Finnveden, G., Moberg, Å. (2005). Environmental systems analysis tools – An overview. *Journal of Cleaner Production*, 13(12), 1165–1173.
- Fleischmann, B., Ferber, S., Henrich, P. (2006). Strategic planning of BMW's global production network. *Interfaces*, 36(3), 194–208.
- Fletcher, R. (2013). *Practical methods of optimization*. John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A.
- Gari, S.R., Newton, A., Icelly, J.D. (2015). A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal Management* 103, 63–77.
- Geneletti, D. (2010). Combining stakeholder analysis and spatial multicriteria evaluation to select and rank inert landfill sites. *Waste Management*, 30(2), 328–337.
- Golabi, K., Kirkwood, C., Sicherman, A. (1981). Selecting a portfolio of solar energy projects using multiattribute preference theory. *Management Science*, 27(2), 174–189.
- Greenland, S., Brumback, B. 2002. An overview of relations among causal modelling methods. *International Journal of Epidemiology* 31(5); 1030–1037.
- Gregory, R., Failing, L., Harstone, M., Long, G., McDaniels, T., Ohlson, D. (2012). *Structured Decision Making: A Practical Guide to Environmental Management Choices*. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.
- Groot, J.C., Oomen, G.J., Rossing, W.A. (2012). Multi-objective optimization and design of farming systems. *Agricultural Systems*, 110, 63–77.
- Grönroos, J. (2014). Maatalouden ammoniakkipäästöjen vähentämismahdollisuudet ja -kustannukset. Ympäristöministeriön raportteja 26/2014.
- Guinee, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: past, present, and future. *Environmental Science & Technology*, 45(1), 90–96.
- Gunningham, N., Sinclair, D. (2005). Policy instrument choice and diffuse source pollution. *Journal of Environmental Law*, 17(1), 51–81.
- Hajkovicz, S., Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water Resources Management*, 21, 1553–1566.
- Hammond J.S., Keeney R.L., Raiffa H. (1999). *Smart Choices. A Practical Guide to Making Better Decisions*. Harvard Business School Press, Boston, U.S.A.
- Hauk, S., Knoke, T., Wittkopf, S. (2014). Economic evaluation of short rotation coppice systems for energy from biomass – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 435–448.
- Helenius, J., Koppelmäki, K., Virkkunen, E. (toim.) (2017). Agroekologinen symbioosi ravinne- ja energiaomavaraisessa ruoantuotannossa. Ympäristöministeriön raportteja 18/2017.
- Helms, M.M., Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis—where are we now? A review of academic research from the last decade. *Journal of Strategy and Management*, 3(3), 215–251.
- Hildén, M., Huhtala, A., Koikkalainen, K., Ojanen, M., Grönroos, J., Helin, J., Isolampi, M., Kaljonen, M., Kangas, A., Känkänen, H., Puustinen, M., Salo, T., Turtola, E., Uusitalo, R. (2007). Verotukseen perustuva ohjaus maatalouden ravinnepäästöjen rajoittamisessa. Ympäristöministeriön raportteja 15/2007.
- Hjerpe, T., Väisänen, S. (2015) A practical tool for selecting cost-effective combinations of phosphorus loading mitigation measures in Finnish catchments. *International Journal of River Basin Management*, 13(3), 363–376.
- Hobbs B.F., Ludsin S.A., Knight R.L., Ryan P.A., Biberhofer J., Ciborowski J.J.H. (2002). Fuzzy Cognitive Mapping as a tool to define management objectives for complex ecosystems. *Ecological Applications* 12(5), 1548–1565.
- Howard, R.A., Matheson, J.E. (2005). Influence diagrams. *Decision Analysis*, 2(3), 127–143.
- Howick, S., Ackermann, F. (2011). Mixing OR methods in practice: past, present and future directions. *European Journal of Operational Research*, 215, 503–511.
- Huang, I.B., Keisler, J., Linkov, I. (2011). Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of the Total Environment*, 409, 3578–3594.
- Hulkkonen, A. (2017). Vesiensuojelu peltoviljelyssä - ravinnekuormituksen ohjauskeinot ja niiden vaikuttavuus. Pro Gradu -tutkielma, Helsingin yliopisto, Ympäristöoikeus.
- Huttunen, I., Huttunen, M., Piirainen, V., Korppoo, M., Lepistö, A., Räike, A., Tattari, S., Vehviläinen, B. (2016). A national-scale nutrient loading model for Finnish watersheds – VEMALA. *Environmental Modeling and Assessment*, 21(1), 83–109.
- Iho, A., Ahlvik, L., Ekholm, P., Lehtoranta, J., Kortelainen, P. (2017). Optimal phosphorus abatement redefined: Insights from coupled element cycles. *Ecological Economics*, 137, 13–19.

- Iital, A., Bārdule, A., Bērziņa, L., Fībiņa, L., Grīnfelde, I., Kadiķe, S., Kokorīte, I., Krauze, A., Kubliņa, A., Kuusik, A., Lazdiņa, D., Loigu, E., Pachel, K., Reihan, A., Rubīns, E., Voronova, V. (2018). Comparative overview of reactive nitrogen (Nr) flows in Latvia and Estonia. Report of the work package T2.2 of the GURINIMAS project (Integrated Nitrogen Management System for the Gulf of Riga).
- IPCC (2018). Global warming of 1.5 °C. Intergovernmental Panel on Climate Change, Special Report, Switzerland. (<https://www.ipcc.ch/sr15/>)
- Johannesdottir, S., Kärrman, E., Ljung, E., Anderzén, C., Edström, M., Ahlgren, S., Englund, M. (2019). BonusReturn – Report from the multi-criteria analysis from workshop 2 with comparisons of the different alternatives in each case study and selection of eco-technologies for further use in WP5. Report.
- Kahiluoto, H., Kuisma, M. (toim.) (2010). Elintarvikeketjun jätteet ja sivuvirrat energiaksi ja lannoitteiksi. Jalojäte-tutkimushankkeen synteesiraportti. MTT Kasvu 12.
- Keeney, R.L. (1992). Value-Focused Thinking. Harvard University Press, Cambridge, U.S.A.
- Keeney, R.L., Raiffa, H. (1976). Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Wiley, New York, U.S.A.
- Keisler, J., Linkov, I. (2014). Environment models and decisions. *Environment Systems and Decisions* 34(3), 369–372.
- Kiker, G., Bridges, T., Varghese, A., Seager, T.P., Linkov, I. (2005). Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making. *Integrated Environmental Assessment and Management* 1(2), 95–108.
- Kirkwood, C.W. (1998). System Dynamics Methods: A Quick Introduction. Ventana Systems, Inc. <http://www.public.asu.edu/~kirkwood/sysdyn/SDIntro/SDIntro.htm>
- Koivulahti, A. (2018). Riskitehokas peltokasvien tuotantoyhdistelmä lyhyellä aikavälillä. Pro Gradu -työ, Taloustieteen laitos, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta, Helsingin yliopisto.
- Kärkkäinen, L., Haakana, M., Heikkinen, J., Helin, J., Hirvelä, H., Jauhiainen, L., Laturi, J., Lehtonen, H., Lintunen, J., Niskanen, O., Ollila, P., Peltonen-Sainio, P., Regina, K., Salminen, O., Tuomainen, T., Uusivuori, J., Wall, A., Packalen, T. (2018). Maankäyttösektorin toimien mahdollisuudet ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 67/2018.
- Lahtinen, T.J., Hämäläinen, R.P., Liesiö, J. (2017). Portfolio decision analysis methods in environmental decision making, *Environmental Modelling & Software*, 94, 73–86.
- Le Goffe, P. (2000). Hedonic pricing of agriculture and forestry externalities. *Environmental and Resource Economics*, 15(4), 397–401.
- Liesiö, J., Punkka, A. (2014). Baseline value specification and sensitivity analysis in multiattribute project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 237(3), 946–956.
- Luostarinen, S., Tampio, E., Berlin, T., Grönroos, J., Kauppila, J., Koikkalainen, K., Niskanen, O., Rasa, K., Salo, T., Turtola, E., Valve, H., Ylivainio, K. (2019). Keinoja orgaanisten lannoitevalmisteiden käytön edistämiseen. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 5/2019.
- Maack, J.N. (2001). Scenario analysis: A tool for task managers. In "Social Analysis: Selected Tools and Technique." Social Development Paper no. 36. The Social Development Department, the World Bank, Washington, D.C., 62–87.
- Malczewski, J., Rinner, C. (2015). *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Marko, O., Brdar, S., Panić, M., Šašić, I., Despotović, D., Knežević, M., Crnojević, V. (2017). Portfolio optimization for seed selection in diverse weather scenarios. *PLoS One*, 12(9), e0184198.
- Marttinen, S., Venelampi, O., Iho, A., Koikkalainen, K., Lehtonen, E., Luostarinen, S., Rasa, K., Sarvi, M., Tampio, E., Turtola, E., Ylivainio, K., Grönroos, J., Kauppila, J., Koskiahho, J., Valve, H., Laine-Ylijoki, J., Lantto, R., Oasmaa, A., zu Castell-Rüdenhausen, M. (2017). Kohti ravinteiden kierrätyksen läpimurtoa: Nykytila ja suositukset ohjauskeinojen kehittämiseksi Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus, Luonnonvarakeskus, Helsinki, 45/2017.
- Marttunen, M., Hämäläinen, R.P. (1995). Decision analysis interviews in environmental impact assessment. *European Journal of Operational Research*, 87, 551–563.
- Marttunen, M., Hämäläinen, R.P. (2008). The decision analysis interview approach in the collaborative management of a large regulated water course. *Environmental Management*, 42(6), 1026–1042.
- Marttunen, M., Mustajoki, J., Dufva, M., Karjalainen, T.P. (2015). How to design and realize participation of stakeholders in MCDA processes? A framework for selecting an appropriate approach. *EURO Journal on Decision Processes*, 3(1), 187–214.
- Marttunen, M., Lienert, J., Belton, V. (2017). Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 1–17.
- Mattila, T., Rajala, J. (2018). Lannan ja orgaanisten lannoitteiden arvon optimointi lohkokasvolla -hanke. <http://www.luonnonkoneisto.fi/lannoitaparemmiin>
- Mickwitz, P. (2003). A framework for evaluating environmental policy instruments: context and key concepts. *Evaluation*, 9(4), 415–436.
- Miettinen, K. (2012). *Nonlinear multiobjective optimization*. Springer Science & Business Media, Berlin, Germany
- Mingers, J., Rosenhead, J. (2004). Problem structuring methods in action. *European Journal of Operational Research*, 152, 530–554.
- Mirchi, A., Madani, K., Watkins, D., Ahmad, S. (2012). Synthesis of system dynamics tools for holistic conceptualization of water resources problems. *Water Resources Management*, 26(9), 2421–2442.

- Modin-Edman, A.K., Öborn, I., Sverdrup, H. (2007). FARMFLOW – A dynamic model for phosphorus mass flow, simulating conventional and organic management of a Swedish dairy farm. *Agricultural Systems*, 94(2), 431–444.
- Mustajoki, J., Marttunen, M. (2017). Comparison of multi-criteria decision analytical software for supporting environmental planning processes. *Environmental Modeling & Software*, 93, 78–91.
- Myyrä, S., Väre, M. (2016). Markkinamarginaalit sika- ja siipikarjatalouteen. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus*, 46/2016.
- Myllyviita, T., Rintamäki, H. (2018). Ruuantuottajien näkemyksiä ja kokemuksia kierrätyslannoitteiden käytöstä ja kehitystarpeista. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja* 31/2018.
- Myllyviita, T., Holma, A., Antikainen, R., Lähtinen, K., Leskinen, P. (2012). Assessing environmental impacts of biomass production chains—application of life cycle assessment (LCA) and multi-criteria decision analysis (MCDA). *Journal of Cleaner Production*, 29, 238–245.
- Nelson, G.C., Rosegrant, M.W., Palazzo, A., Gray, I., Ingersoll, C., Robertson, R., Tokgoz, S., Zhu, T., Sulser, T.B., Ringler, C., Msangi, S., You, L. (2010). *Food Security, Farming, and Climate Change to 2050: Scenarios, Results, Policy Options* (Vol. 172). International Food Policy Research Institute. Washington, D.C., U.S.A.
- Ness, B., Anderberg, S., Olsson, L. (2010). Structuring problems in sustainability science: The multi-level DPSIR framework. *Geoforum*, 41(3), 479–488.
- Niemi, J., Rikkinen, P. (toim.) (2010). Maatalouspoliittisen toimintaympäristön ennakkointi. Miten käy kotimaisen elintarvikeketjun? *MTT Raportti* 7/2010.
- Nizzetto, L., Butterfield, D., Futter, M., Lin, Y., Allan, I., Larssen, T. (2016). Assessment of contaminant fate in catchments using a novel integrated hydrobiogeochemical-multimedia fate model. *Science of the Total Environment*, 544, 553–563.
- Patchak, W.M. (2014). Decision analysis software survey. *OR/MS Today*, 41(5).
- Paydar, Z., Qureshi, M.E. (2012). Irrigation water management in uncertain conditions – application of modern portfolio theory. *Agricultural Water Management*, 115, 47–54.
- Peltonen-Sainio, P., Lehtonen, H., Regina, K., Tiainen, J. (2018). Pellon käytön optimointi tuotannon kestäväksi tehostamiseksi – PeltoOptimi. *Loppuraportti*, Luke.
- Perdicoulis, A., Glasson, J. (2006). Causal networks in EIA. *Environmental Impact Assessment Review* 26, 553–569.
- Plà, L.M., Sandars, D.L., Higgins, A.J. (2014). A perspective on operational research prospects for agriculture. *Journal of the Operational Research Society*, 65(7), 1078–1089.
- Prell, C., Hubacek, K., Reed, M., Quinn, C., Jin, N., Holden, J., Burt, T., Kirby, M., Sendzimir, J. (2007). If you have a hammer everything looks like a nail: traditional versus participatory model building. *Interdisciplinary Science Reviews*, 32(3), 263–282.
- Puustinen, M., Turtola, E., Kukkonen, M., Koskiaho, J., Linjama, J., Niinioja, R., Tattari, S. (2010). VIHMA - A tool for allocation of measures to control erosion and nutrient loading from Finnish agricultural catchments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 138(3–4), 306–317.
- Ragnarsdóttir, K.V., Sverdrup, H.U., Koca, D. (2011). Challenging the planetary boundaries I: Basic principles of an integrated model for phosphorous supply dynamics and global population size. *Applied Geochemistry*, 26, 303–306.
- Ready, R.C., Berger, M.C., Blomquist, G.C. (1997). Measuring amenity benefits from farmland: Hedonic pricing vs. contingent valuation. *Growth and Change*, 28(4), 438–458.
- Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., Schmidt, W.-P., Suh, S., Weidema, B.P., Pennington, D.W. (2004). Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, 30(5), 701–720.
- Rikkinen, P. (2017). Vaihtoehtoisia skenaarioita maataloudesta vuoteen 2030. *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus*, 55/2017.
- Rosenhead, J., Mingers, J. (2001). *Rational Analysis for a Problematic World Revisited: Problem Structuring Methods for Complexity, Uncertainty and Conflict*. John Wiley & Sons. Ltd., Chichester, U.K.
- Rossing, W.A.H., Zander, P., Josien, E., Groot, J.C.J., Meyer, B.C., Knierim, A. (2007). Integrative modeling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: a review for France, Germany and The Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120(1), 41–57.
- SAFA (2014). *Safa sustainability assessment of food and agriculture systems. Guidelines, Ver. 3.0*. Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome.
- Salminen, J., Tikkanen, S., Koskiaho, J. (2017). Kohti vesiviisasta kiertotaloutta. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja*, 16/2017.
- Salo, A., Keisler, J.M., Morton, A. (eds.) (2011). *Portfolio Decision Analysis*. Springer, Berlin, Germany.
- Schiere, J.B., Ibrahim, M.N.M., Van Keulen, H. (2002). The role of livestock for sustainability in mixed farming: criteria and scenario studies under varying resource allocation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 90(2), 139–153.
- Senge, P.M. (1990). *The Fifth Discipline, the Art and Practice of the Learning Organization*. Currency Doubleday, New York, U.S.A.
- Seppälä, J., Sahimaa, O., Honkatukia, J., Valve, H., Antikainen, R., Kautto, P., Myllymaa, T., Mäenpää, I., Salmenperä, H., Alhola, K., Kauppila, J., Salminen, J. (2016). Kiertotalous Suomessa-toimintaympäristö, ohjaukeinoit ja mallinnetut vaikutukset vuoteen 2030. *Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja*, 25/2016.

- Seppänen, A.M., Laakso, J., Luostarinen, S. (2018). Sivuvirrasta väkilannoitteen korvaajaksi: Mädätysjännöksen jalostusteknologioiden nykytila, tarpeet ja tulevaisuuden mahdollisuudet Suomessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 31/2018.
- Simons, M., Honkatukia, J., Antikainen, R., Hippinen, I., Merenheimo, T., Lehtomaa, J., Kautto, P., Mikkola, M., Tikkanen, S., Salmenperä, H. (2018). Taloudelliset ohjauskeinot kiertotalouden arvoketjuissa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 54/2018.
- Sitra/Luke (2019). Maatalouden kiertotaloutta edistävät ratkaisut. Raportti.
- Stave, K.A., Kopainsky, B. (2015). A system dynamics approach for examining mechanisms and pathways of food supply vulnerability. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 5(3), 321–336.
- Taha, H.A. (2011). *Operations research: an introduction*. Vol. 790. Pearson/Prentice Hall, New Jersey, U.S.A.
- Talukder, B., Blay-Palmer, A., Hipel, K.W., van Loon, G.W. (2017). Elimination method of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA): A simple methodological approach for assessing agricultural sustainability. *Sustainability*, 9(2), 287.
- Tattari, S., Puustinen, M. (toim.) (2017). Toimivimmat mallityökalut vesistö-vaikutusten ja ravinteiden kierrätyksen kustannustehokkaaseen hallintaan. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja, 70/2017.
- Tattari, S., Bärlund, I., Rekolainen S., Posch, M., Siimes, K., Tuhkanen, H-R. Yli-Halla, M., (2001). Modeling sediment yield and phosphorus transport in Finnish clayey soils. *Transactions of ASAE*, 44, 297–307.
- Tikkanen, S., Antikainen, R., Kautto, P., Salmenperä, H. (2018). Katsaus kiertotalouden mahdollisiin taloudellisiin ohjauskeinoihin. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 4/2018.
- Tiwari D.N., Loof R., Paudyal G.N. (1999). Environmental-economic decision-making in lowland irrigated agriculture using multi-criteria analysis techniques. *Agricultural Systems*, 60, 99–112.
- Treadwell, J.L., Clark, O.G., Bennett, E.M. (2018). Dynamic simulation of phosphorus flows through Montreal's food and waste systems. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 122–133.
- Tscherning, K., Helming, K., Krippner, B., Sieber, S., Gomez y Paloma, S. (2012). Does research applying the DPSIR framework support decision making? *Land Use Policy* 29, 102–110.
- Turner, B., Menendez, H., Gates, R., Tedeschi, L., Atzori, A. (2016). System dynamics modeling for agricultural and natural resource management issues: Review of some past cases and forecasting future roles. *Resources*, 5(4), 40.
- Uusitalo, L. (2007). Advantages and challenges of Bayesian networks in environmental modelling. *Ecological Modelling*, 203, 312–318.
- Vanslebrouck, I., Van Huylenbroeck, G., Van Meensel, J. (2005). Impact of agriculture on rural tourism: a hedonic pricing approach. *Journal of Agricultural Economics*, 56(1), 17–30.
- von Winterfeldt D., Edwards W. (1986). *Decision Analysis and Behavioral Research*. Cambridge University Press, New York, U.S.A.
- Walters, J. P., Archer, D.W., Sassenrath, G.F., Hendrickson, J.R., Hanson, J.D., Halloran, J.M., Vadas, P., Alarcon, V.J. (2016). Exploring agricultural production systems and their fundamental components with system dynamics modelling. *Ecological Modelling*, 333, 51–65.
- Whitley, D. (1994). A genetic algorithm tutorial. *Statistics and Computing*, 4(2), 65–85.
- Yrjölä, T., Kola, J. (2001). Cost-benefit analysis of multifunctional agriculture in Finland. *Agricultural and Food Science in Finland*, 10, 295–307.
- Zeigler, B.P., Kim, T.G., Praehofer, H. (2000). *Theory of modeling and simulation*. Academic press, Cambridge, U.S.A.
- Zhang, S., Song, H. (2018). Production and Distribution Planning in Danone Waters China Division. *INFORMS Journal on Applied Analytics*, 48(6), 578–590.

Liite A. Tarkempia tietoja menetelmistä

A.1. Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)

Kappaleessa 2.1 kuvatun CATWOE-analyysin (Checkland, 1981) lisäksi on olemassa myös muita vastaavia tarkistuslistamaisia ongelmien jäsentelymenetelmiä. Esimerkkejä näistä ovat Hammond ym. (1999) esittelemä PrOACT-prosessi (*Problem* – ongelma, *Objectives* – tavoitteet, *Alternatives* – vaihtoehdot, *Consequences* – seuraukset, *Trade-offs* – vaihtokaupat) sekä Beltonin ja Stewartin (2002) ehdottama CAUSE (*Criteria* – kriteerit, *Alternatives* – vaihtoehdot, *Uncertainties* – epävarmuudet, *Stakeholders* – asianosaiset, *External factors* – ulkopuoliset tekijät). Prosessimaisten menetelmien eri vaiheita ei kuitenkaan tarvitse orjallisesti suorittaa annetussa järjestyksessä, vaan ongelman erityispiirteet on otettava huomioon. Lisäksi päätöksentekijän ja analysoijan ymmärrys ongelmasta kasvaa prosessin tarjoaman oppimisen myötä, minkä vuoksi voi usein olla tarvetta palata takaisin edelliseen vaiheeseen tarkentamaan tässä annettuja tietoja.

Kausaalimalleihin liittyvä käsitteistö on kirjavaa, ja niistä voidaan käyttää myös muita yleistermejä kuten syy–seuraus -kaavio (*Causal Diagram*) tai vaikutuskaavio (*Influence Diagram*). Toisaalta näillä termeillä voidaan tarkoittaa myös jotain tiettyä yksittäistä menetelmää (esim. Greenland ja Brumback, 2002; Gregory ym., 2012). Esimerkiksi termiä syy–seuraus -kaavio käytetään myös kuvaamaan kaavioita, jossa systeemin dynamiikka otetaan mukaan (*Causal Loop Diagram*, kts. seuraava luku). Termiä vaikutuskaavio puolestaan käytetään yleistermin lisäksi myös menetelmästä, jossa kaavion solmukohdat on kuvattu erilaisin symbolein sen mukaan, minkä tyyppisiä ne ovat (nelikulmio = päätösolmu, ovaali = epävarmuussolmu, kahdeksankulmio = arvosolmu), ja jossa bayesilaisen päättelyn avulla lasketaan tasapainotiloja (Howard ja Matheson, 2005).

Kausaalimallit ovat idealtaan lähellä myös erilaisia mentaalimalleja (Cognitive Mapping) tai miellekarttoja (Mind Map), jossa mielen sisäistä ajattelua mallinnetaan visuaalisesti yhdistelemällä toisiinsa liittyviä asioita viivoilla (esim. Eden, 2004). Tavoitteena näissä on helpottaa ajattelua järjestelemällä asioita loogisiksi kokonaisuuksiksi kuvaamaan sitä, että asioiden välillä on yhteys, mutta ei välttämättä yhteyden suuntaa (eli kumpi vaikuttaa kumpaan).

Eräs lähestymistapa ongelmaan liittyvien avaintekijöiden löytämiseen ja näiden välisten suhteiden jäsentelyyn on DPSIR-kehikko (*Drivers* – ohjausvoimat, *Pressures* – paineet, *State* – tila, *Impact* – vaikutukset, *Response* – reagointi) (Gari ym., 2015; Tscherning ym., 2012). Sen tavoitteena on havainnollistaa vaikutusten syntymistä eri tekijöistä ja sitä, miten näihin voidaan yrittää reagoida. Ohjausvoimat ovat ulkoisia tekijöitä, esimerkiksi ihmisen toimia tai luonnon aiheuttamia tekijöitä, jotka aiheuttavat paineita ympäristölle esimerkiksi erilaisten saasteiden muodossa. Nämä puolestaan vaikuttavat ympäristön tilaan, ja tilan muutosten myötä syntyvät varsinaiset esim. biologiset, sosiaaliset tai taloudelliset vaikutuksia ihmisiin ja eliöihin. Tavoitteena on tunnistaa, miten vaikutuksiin voidaan reagoida ketjun eri tekijöiden kautta. Yleensä mitä syvemmälle ketjussa reagointi voidaan tehdä, sitä kestävämmällä pohjalla tehdyt ratkaisut ovat.

Ongelmien jäsentelymenetelmien suurin hyöty on tyypillisesti ongelman parempi hahmottaminen. Ne eivät kuitenkaan anna välttämättä ratkaisua itse ongelmaan, vaan rinnalla voi olla tarpeen hyödyntää muita menetelmiä varsinaisen ongelmanratkaisun tukemiseen. Tämän vuoksi ainoastaan jotain tiettyä ongelmien jäsentelymenetelmää soveltavia tapaustutkimuksia on melko vähän, sillä usein jäsentelymenetelmää hyödynnetään osana jotain suurempaa kokonaisuutta. Esimerkiksi Marttunen et al. (2017) ovat käyneet läpi erityyppisten ongelmanjäsentelymenetelmien sekä monitavoitearvioinnin (Kappale 3.3) toisiaan tukevaa käyttöä. Tarkastelun perus-

teella menetelmien yhteiskäyttö tarjoaa usein laajemman kuvan päätösongelmasta ja kokonaisvaltaisesti tukea prosessin kaikkiin vaiheisiin. Etenkin **SWOT**-analyysiä, skenaariosuunnitelua ja DPSIR-kehikkoa on hyödynnetty tukemaan monitavoitearviointia. Menetelmien yhteiskäyttöön tarvitaan kuitenkin vielä hyviä toimintatapoja, jotta menetelmät voidaan mahdollisimman saumattomasti nivota toisiinsa.

A.2. Systemidynaamiset mallit

Kun käsitteellisiin syy–seuraus -kaavioihin lisätään systeemin osien välinen kvantitatiivinen mallinnus mukaan, voidaan puhua dynaamisista syy–seuraus -kaavioista (*Causal Loop Diagram*), joiden käyttäytymistä voidaan tutkia esimerkiksi simuloimalla (esim. Kirkwood, 1998). Sukua näille on myös sumea kognitiivinen kartta (*Fuzzy Cognitive Mapping* – FCM; Hobbs ym., 2002), jossa vaikutussuhteiden suuntaa ja voimakkuutta kuvataan sumean logiikan numeroarvoilla. Näiden perusteella tekijöille voidaan laskea niiden suuruutta kuvaavat arvot systeemin kokonaisvaikutusten seurauksena sekä tunnuslukuja esimerkiksi tekijöiden tyyppien ja systeemin kannalta keskeisimpien tekijöiden tunnistamiseksi.

Myös esimerkiksi Bayes-verkkoja voidaan hyödyntää syy–seuraus -suhteiden kvantitatiivisessa mallintamisessa (esim. Uusitalo, 2007; Barton ym., 2012). Niiden etuna on, että ne sallivat eri lähteistä tulevien tietojen yhdistämisen ja myös elementtien välisiin vaikutuksiin liittyvien epävarmuuksien mallintamisen (Uusitalo, 2007). Haasteena on kuitenkin – kuten monissa muissakin dynaamisissa menetelmissä – luotettavan asiantuntijatiedon löytäminen vaikutuksien määrittämiseen. Bayes-verkoissa tulee lisäksi määritellä vaikutuksiin liittyvä epävarmuus diskreetteinä ehdollisina todennäköisyysjakaumina. Näin ollen tarvittavan lähtötiedon määrä on suurempi kuin deterministisissä malleissa, joissa vaikutusten epävarmuutta ei mallinnetta eksplisiittisesti.

Varasto–virtaus -mallissa (*Stock-and-Flow*) kuvataan, miten eri materiaalivirrat kulkevat systeemin eri osien (eli varastojen) välillä ajan kuluessa (Kirkwood, 1998). Varastoille määritetään alkutilat ja maksimikoot ja virtaukset määritetään parametrit kuvaamaan sitä, miten varastot muuttuvat ajan myötä kyseisen virtauksen johdosta. Virtauksen suuruus voi riippua myös esimerkiksi muiden varastojen koosta.

Vähänkään monimutkaisempien mallien ratkaiseminen analyttisesti on usein käytännössä mahdotonta. Niiden ratkaisemisen voidaan kuitenkin hyödyntää simuloimalla menetelmiä (esim. Zeigler ym., 2000) ja mallin tulokset kuvataankin tyyppillisesti varastoissa ajan myötä tapahtuvien muutosten visuaalisena simulaationa lähtien jostain alkutilasta. Simuloimalla voidaan myös tunnistaa mahdollisia tasapainotiloja, joihin varastot asettuvat ajan myötä.

Mallien luomiseen ja laskentaan ja simulointiin on myös olemassa ohjelmistoja, joiden avulla voidaan usein visuaalisesti havainnollistaa mallin toimintaa. Esimerkiksi VENSIM-ohjelmisto (<http://www.vensim.com>) tarjoaa tukea sekä dynaamisten syy–seuraus -kaavioiden että varasto–virtaus -mallien luomiseen sekä simulointimenetelmiä näiden tuottamien yhtälöryhmien ratkaisemiseen ja systeemin dynamiikan visuaaliseen havainnollistamiseen.

A.3. Monitavoitearvioinnin menetelmät

Yleiskäsitteenä puhuttaessa monitavoitearvioinnin alle voidaan katsoa kuuluvan useita eri menetelmiä (esim. Figueira ym., 2005), mutta monitavoitearvioinnista puhutaan usein silloinkin, kun tarkoitetaan jotain tiettyä menetelmää. Yleisesti puhuttaessa lähestymistavasta voidaan käyttää myös muita termejä (*Multi-Criteria Evaluation* – MCE tai *Multi-Criteria Assessment* – MCA), ja käytetyn termin valinta riippuu usein suunnittelutilanteesta. Voidaan puhua myös monitavoitteisesta päätösanalyysistä

(*Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA*), jos lähestymistapaa sovelletaan tukemaan päätöksenteon valmistelua.

Arvopuuanalyysi (*Value Tree Analysis*) on eräs monitavoitearvioinnin menetelmä. Sen avulla voidaan järjestelmällisesti arvioida päätösvaihtoehtojen hyvyttä hierarkkisessa jäsentelykehikossa (Keeney ja Raiffa, 1976; Keeney, 1992). Arvopuuanalyysissä ongelman tavoitteet jäsennellään hierarkkiseen muotoon. Hierarkiassa tavoitteita kutsutaan usein kriteereiksi tai attribuuteiksi. Vaihtoehtojen hyvyttä arvioidaan alimman tason kriteerien suhteen näille määritettyjen mittarien avulla. Olennainen osa arvopuuanalyysiä on preferenssimalli, jonka avulla jäsentelyvaiheessa luoduille vaihtoehdoille lasketaan kunkin arvioijan mieltymysten mukaiset hyvyysarvot. Tähän sovelletaan usein additiivista mallia, jossa kriteereille annetaan painot kuvaamaan niiden tärkeyttä ja vaihtoehdoille pistemäärät kunkin eri mittarin suhteen kuvaamaan niiden kriteerikohtaista hyvyttä. Vaihtoehtojen paremmuutta kuvaavat kokonaisarvot saadaan kertomalla kunkin vaihtoehdon saamat mittarikohtaiset pistemäärät näille annetuilla painoarvoilla ja laskemalla tulot yhteen (mistä nimitys additiivinen malli). Vaihtoehtojen mittarikohtaiset pistemäärät skaalataan yleensä asteikolle 0–1, ja ne voidaan antaa suoraan tai johtaa mittarien mittausarvoista arvofunktiolla.

Additiivisessa mallissa vaihtoehdon x hyvyttä kuvaava kokonaisarvo $v(x)$ saadaan kaavasta:

$$v(x) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_i) \quad (1)$$

missä n on arvopuussa olevien alimman tason kriteerien määrä, $w_i \in [0, 1]$ on kriteerin i saama kokonaispainoarvo, x_i vaihtoehdon x seuraus kriteerin i suhteen ja $v_i(x_i)$ sen saama pistemäärä asteikolla 0–1 (Keeney ja Raiffa, 1976). Painojen w_i summa normeerataan yhdeksi.

Arvopuun kriteereitä painotetaan sen mukaan, kuinka tärkeänä arvioija pitää niitä suhteessa toisiinsa. Painotuksessa tulee ottaa huomioon se, kuinka tärkeänä arvioija pitää muutosta kriteerissä sen huonoimmalta tasolta parhaimmalleen. Esimerkkinä tästä on ympäristön parantamiseen käytettävien vaihtoehtojen kustannusten vaihteluväli 0€ – 1 000 000€ ja näillä saatavien vedenlaadun parannusten vaihteluväli ”erittäin huono” – ”erittäin hyvä”. Jos arvioija tällöin antaa näille kriteereille yhtä suuren painon, niin hän on valmis panostamaan miljoona euroa vedenlaadun paranemiseen tilasta ”erittäin huono” tilaan ”erittäin hyvä”. Painoja määritettäessä on otettava huomioon myös ongelman konteksti. Esimerkiksi, jos edellisen esimerkin vedenlaatua kuvaava kriteeri tarkoittaisikin jonkin hyvin pienen ja virkistysarvoiltaan merkityksettömän lammikon vedenlaatua, niin harva arvioija olisi valmista panostamaan kyseistä miljoonaa euroa vedenlaadun paranemiseen. Tämän vuoksi usein nähtävät kriteerien tärkeyttä koskevat yleiset kysymykset (esim. ”Kumpi on tärkeämpää, vedenlaatu vai kustannukset?”) ovat merkityksettömiä ilman, että arvioidavien kriteerien skaalat eli vaihteluvälit vaihtoehtojoukossa ja konteksti on huolellisesti määritelty. Painotukseen on olemassa eri menetelmiä, joiden avulla kriteerien vaihteluvälit tulevat eksplisiittisesti otettua huomioon. Esimerkiksi Swing-menetelmässä (von Winterfeldt ja Edwards, 1986) kaikkien kriteerien arvot asetetaan aluksi huonoimmalle tasolle, ja painot määräytyvät sen mukaan kuin tärkeäksi arvioija näkee niiden nostamisen parhaimmalle tasolle, jolloin hänen tulee välttämättömästi ajateltua kriteerien vaihteluvälejä.

Eri sidosryhmien painotusprosessiin osallistamiseen on myös erilaisia tapoja. Eräs, tosin melko työläs tapa näkemysten selvittämiseen on ns. päätösanalyysihaastattelu (Marttunen ja Hämäläinen 1995, 2008), jossa päätösanalyytikko käy kunkin sidosryhmän edustajan kanssa erikseen läpi kriteerien painotusprosessin ja auttaa tätä ymmärtämään mallinnuksen periaatteet sekä painottamaan tavoitteita siten, että nämä mahdollisimman hyvin vastaisivat arvioijan mieltymyksiä. Haastatteluiden tuloksena saadaan vaihtoehdoille useita eri paremmuusjärjestyksiä, joista kukin vastaa jonkun sidosryhmien edustajan mieltymyksiä.

Myös monitavoitearvioinnin tukemiseen on olemassa tietokoneohjelmistoja, jotka tyypillisesti tarjoavat tukea ongelma jäsentelyyn, menetelmiä tavoitteiden painotukseen sekä havainnollisia kuvaajia tulosten visualisointiin. Katsauksia työkaluihin ovat tehneet esimerkiksi Patchak (2014) ja Mustajoki ja Marttunen (2017).

A.4. Monitavoiteoptimoinnin menetelmät

Matemaattisesti optimointitehtävä on yksinkertaisimmillaan muotoa:

$$\begin{aligned} & \min f(x) \\ & \text{sitte, että } g_i(x) \leq 0, \forall i=1, \dots, n, \end{aligned}$$

missä $f(x)$ on tavoitefunktio, x on päätösmuuttuja(vektori) ja $g_i(x)$ ovat n rajoitefunktioita.

Optimointiongelmien ratkaisemiseen on olemassa useita eri algoritmeja, joiden soveltaminen riippuu pitkälti ratkaistavan ongelman tyypistä. Esimerkiksi konveksien ongelmien ratkaisemiseen voidaan hyödyntää menetelmiä, joissa käypien ratkaisujen joukossa iteratiivisesti siirrytään koko ajan kohti parempaa ratkaisua päätyen lopulta optimiin (Dantzig, 2012). Menetelmät eivät kuitenkaan sovellu ei-konvekseihin ongelmiin, sillä niillä päädytään johonkin lokaaliin optimiratkaisuun, josta ei kuitenkaan voida tietää, onko se samalla myös globaali optimi. Hyvin haastava ongelmaryhmä on myös kombinatoriset ongelmat, joissa ongelman ratkaisemiseen tarvittava aika perinteisillä menetelmillä kasvaa eksponentiaalisesti ongelman koon myötä, jolloin ongelman suuretessa niiden soveltaminen tulee käytännössä mahdottomaksi. Tällöin voidaan hyödyntää myös erilaisia iteratiivisia heuristiikkoja (esim. geneettiset algoritmit; Whitley, 1994), joilla voidaan melko tehokkaasti päästä johonkin lokaaliin optimiratkaisuun, mutta ratkaisun globaalista optimaalisuudesta ei välttämättä ole takeita.

Monitavoitearvioinnissa eri tavoitteiden yhteismitallistamiseen voidaan hyödyntää erilaisia painokertoimia ja/tai arvofunktoita, joilla tavoitteet saadaan yhteismitallistettua yhdeksi tavoitefunktioiksi samaan tyyliin kuin monitavoitearvioinnin painotuksessa. Toinen tapa on soveltaa interaktiivisia menetelmiä, joissa menetelmä ohjaa päätöksentekijän mieltymysten mukaiseen optimiin kysymällä prosessin aikana valintakysymyksiä, joiden avulla selvitetään päätöksentekijän preferenssit (esim. Miettinen, 2012). Monitavoiteoptimointitehtävän ratkaisu on optimaalinen, jos ei ole olemassa toista ratkaisua, joka olisi kaikkien tavoitteiden suhteen vähintään yhtä hyvä ja ainakin yhden tavoitteen suhteen parempi (ns. Pareto-optimi).

A.5. Portfolioanalyysin menetelmät

Portfolio-ongelmissa yksittäisen vaihtoehdon sijasta arvioidaan toimenpideyhdistelmiä. Yksittäisen toimenpiteen x^i kokonaisarvo $v(x^i)$ voidaan portfolioanalyysissä laskea vastaavasti kuin monitavoitearvioinnissa vaihtoehdon arvo, eli

$$v(x^j) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(x_i^j), \forall j=1, \dots, m,$$

missä n on arvopuussa olevien alimmat tason kriteerien määrä, m on toimenpiteiden määrä, $w_i \in [0, 1]$ on kriteerin i saama kokonaispainoarvo, x_i^j toimenpiteen x^j seuraus kriteerin i suhteen ja $v_i(x_i^j)$ sen saama pistemäärä asteikolla 0–1 (Keeney ja Raiffa, 1976). Painojen w_i summa normeerataan yhdeksi.

Koko portfolio voidaan kuvata vektorina $z \in \{0, 1\}^m$ niin, että $z_j = 1$, jos toimenpide j kuuluu kyseiseen portfolioon ja $z_j = 0$, jos se ei kuulu. Portfolion z kokonaisarvo $V(z)$ lasketaan summaamalla kaikkien portfolioon valittavien toimenpiteiden portfoliolle tuoma lisäarvo yhteen (esim. Golabi ym., 1981):

$$V(z) = \sum_{j=1}^m (z_j v(x^j) + (1 - z_j) v^B)$$

missä v^B on vertailuarvo, jos toimenpidettä ei toteuteta. Vertailuarvon valinnasta tarkemmin ovat kirjoittaneet esimerkiksi Liesiö ja Punkka (2014).

A.6. Taloudellisen arvottamisen menetelmät

Kustannus-hyötyanalyysistä voidaan tunnistaa kaikkiaan yhdeksän perusvaihetta (Boardman ym., 2017):

1. Määritellään vaihtoehtoisten hankkeiden joukko
2. Päätetään, kenen hyötyjä ja kustannuksia lasketaan
3. Tunnistetaan arvioitavat vaikutukset ja valitaan mittayksiköt
4. Arvioidaan vaikutukset laskennallisesti koko hankkeen eliniän ajalta
5. Rahamitallistetaan kaikki vaikutukset
6. Diskontataan tulevaisuuden hyödyt ja kustannukset nykyarvon laskemiseksi
7. Lasketaan nettonykyarvo jokaiselle vaihtoehdolle
8. Tehdään herkkyysanalyysi
9. Laaditaan suositukset perustuen nettonykyarvoon ja herkkyysanalyysiin

Ominaista kustannus-hyötyanalyysille on tulevaisuuden vaikutusten diskonttaaminen nettonykyarvoon (*Net Present Value* – NPV), jonka avulla pystytään ottamaan huomioon se, että tulevaisuuden hyödyt ja kustannukset eivät välttämättä ole samalla viivalla välittömästi saatavien hyötyjen ja kustannusten kanssa. Matemaattisesti vaihtoehdon nettonykyarvo saadaan kaavasta:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t},$$

missä B_t on vaihtoehdolle lasketut rahalliset hyödyt ja C_t vaihtoehdon kustannukset ja rahalliset haitat vuonna t , n projektin kokonaiskesto ja r diskonttaus korko. Mikäli nettonykyarvo on positiivinen, ovat vaihtoehdon hyödyt suuremmat kuin sen kustannukset, minkä perusteella se kannattaa toteuttaa.

Diskonttaukseen liittyy tosin menetelmän yksi sudenkuoppa, sillä diskonttauskoron r valinnalla voi olla suuri vaikutus lopputulokseen. Tämän vuoksi vaiheessa 8 tehtävä herkkyysanalyysi on olennainen, sillä sen avulla voidaan tutkia laskennassa tehtyjen oletusten vaikutusta lopputulokseen. Yhteiskunnallisissa hankkeissa haasteena voi myös olla määrittää se, kenen hyötyjä arvioidaan. Esimerkiksi vesivoimahankkeissa hyödyt kohdistuvat usein vesivoimayhtiöille, mutta haitat ympäristölle, jolloin näiden suora vertailu ei välttämättä ole mielekäästä.

Liite B. Esimerkkejä menetelmien soveltamisesta

B.1. Ongelmien jäsentelymenetelmät (ns. pehmeät menetelmät)

Walters ym. (2016): <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2016.04.015>

Artikkelin kuvassa 4 on esimerkki maataloustuotannon vaikutuksia kuvaavasta vaikutuskaaviosta. Kaaviossa on + ja - merkeillä kuvattu vaikutuksen suuntaa. Tavoitteena on auttaa ymmärtämään minkä eri tekijöiden kautta karjankasvatus ja viljely vaikuttaa sosiaalisiin ja ympäristötekijöihin sekä kustannuksiin.

Ness ym. (2010): <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2009.12.005>

Artikkelin kuvassa 1 on esimerkki DPSIR-kehikon avulla tunnistetuista kansallisen tason toimista Itämeren rehevöitymisen estämiseksi DPSIR-kehikossa tunnistetaan, miten ajurit aiheuttavat paineiden kautta muutoksia ympäristön tilaan, ja miten nämä edelleen vaikuttavat ihmisiin. Tavoitteena ymmärtää, miten näihin voidaan vastata.

Ragnarsdottir ym. (2011): <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.03.088>

Artikkelin kuvassa 1 on esimerkki vaikutuskaaviosta, jolla kuvataan erilaisten poliittikkavaihtoehtojen vaikutuksia kulutukseen ja fosfaattien kautta ympäristöön. Kaavion avulla voidaan tunnistaa mitä kautta eri vaihtoehdot (siniset vinoneliöt) vaikuttavat esimerkiksi ympäristön tilaan.

Myllyviita ja Rintamäki (2018): <http://hdl.handle.net/10138/276964>

Raportin taulukossa 6 on esimerkki SWOT-analyysistä (*Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*), jossa on tarkasteltu kierrätyslannoitteiden käyttöön liittyviä sisäisiä (vahvuudet ja heikkoudet) ja ulkoisia (mahdollisuudet ja uhat) tekijöitä ruoantuottajille suunnatun kyselyn avulla.

B.2. Systemidynaamiset mallit

Stave ja Kopainsky (2016): <https://doi.org/10.1109/5.771073>

Artikkelin kuvassa 4 on esimerkki varasto-virtaus -kaaviosta, jolla mallinnetaan ruoantuotantoon liittyviä massavirtoja tuotannosta kulutukseen. Mukana ruokavirtojen lisäksi myös niistä syntyvien jätevirtojen ja niihin liittyvien esimerkiksi energiavirtojen mallinnus.

Treadwell ym. (2018): <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.018>

Artikkelissa kuvataan tapaustutkimus Montrealin alueen fosforivirtoja mallintavasta systeemidynaamisesta tarkastelusta. Artikkelin kuvassa 2 olevan mallin avulla ensin tunnistettiin virtojen kulkeutuminen mallien eri osien välillä. Tämän jälkeen tutkittiin simuloimalla talteen otettavan fosforin määrää neljässä eri skenaariossa (kuvat 5–9).

Cooper ym. (2018):

https://www.researchgate.net/publication/325569450_Using_systems_modeling_to_design_safe_operating_spaces_for_shallow_lakes

Esityksessä kuvataan tapaustutkimusesimerkki fosforin kulkeutumisen mallintamisesta järviin varasto-virtaus -mallin avulla. Kalvolla 4 on virtoja kuvaava kaavio ja kalvolla 6 kolmessa eri skenaariossa mallin avulla simuloituja järven fosforipitoisuuksia ajan funktiona.

B.3. Monitavoitearvioinnin menetelmät

Dantsis ym. (2010): <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.05.007>

Artikkelissa kuvataan esimerkki maatalouden kestävyys arvioinnista monitavoitearvioinnilla. Artikkelin kuvassa 1 on arviointiin käytetty kriteerihierarkia ja kuvassa 3 arvio kahden alueen kestävydestä jaoteltuna kolmen kestävyys pääkriteerin mukaan.

B.4. Monitavoiteoptimoinnin menetelmät

Groot ym. (2012): <https://doi.org/10.1016/j.agry.2012.03.012>

Artikkelissa kuvataan esimerkki maatalon toiminnan optimointimallista. Artikkelin kuvassa 1 on arviointia havainnollistava skemaattinen kaavio, jossa näkyvät optimoinnin ylätavoitteet muuttujien vaikutukset toisiinsa. Kuvassa 4 on tuloksia 2-uloitteisissa kuvaajissa, joista jokainen piste kuvaa yhtä maatalon toimintavaihtoehtoa kahden eri tavoitteen (esim. tuotto vs. maaperän typpipitoisuus) suhteen.

B.5. Portfolioanalyysin menetelmät

Marko ym. (2017): <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184198>

Artikkelissa kuvataan esimerkki portfolioanalyysin hyödyntämisestä parhaan soijansiemenien lajike-yhdistelmän löytämiseksi eri alueille. Siemenlajikkeiden soveltuvuudessa otettiin alueellisesti huomioon esim. lämpötila, sadanta ja monia eri maaperän laatutekijöitä. Artikkelin kuvassa 3 on analyysi, jossa tunnistettiin yleisesti parhaat lajikkeet satotuoton ja niihin liittyvien riskien perusteella. Kuvassa 14 on analyysin tuloksena syntynyt kartta, joka kuvaa, mitä lajiketta kannattaa viljellä missäkin.

B.6. Taloudellisen arvottamisen menetelmät

Ahtiainen ym. (2014): <https://doi.org/10.1080/21606544.2014.901923>

Artikkelin kuvassa 2 on esimerkki maksuhaluuskyselyn tuloksista. Käyrät kuvaavat sitä, kuinka suuri osa eri maiden vastaajista on valmis maksamaan vähintään kyseisen summan Itämeren tilan parantamisesta.

Tiwari ym. (1999): [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(99)00021-9)

Artikkelin kuvassa 1 on esimerkki kestävien kastelujärjestelmien monitavoitearvioinnista, jossa taloudelliset tarkastelut on otettu osaksi vaikutusten arviointia.

Tattari ja Puustinen (2017): <https://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=22701>

Raportin kuvassa 15 on esimerkki vesien ja merenhoidon kustannusten ja hyötyjen arviointikehikosta.

Yrjölä ja Kola (2001): <https://doi.org/10.23986/afsci.5706>

Artikkelin kuvassa 2 on esimerkki ongelmien jäsentelymenetelmien hyödyntämisestä muiden menetelmien kanssa, eli vaikutuskaavio, jota voidaan hyödyntää maatalouden tukien vähentämisestä tai tuotteiden hintojen putoamisesta johtuvien välillisten vaikutusten arviointiin.

B.7. Skenaarioanalyysin menetelmät

Rikkonen (2017): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-457-1>

Raportin kuvassa 1 on esimerkki skenaarioiden luomisesta nelikentän avulla (jossa varioimalla kahta muutoksen kannalta merkittävimäksi tunnistettua ajuria (markkinoiden vapaus sekä maa- ja elintarviketalouden kilpailukyky) on muodostettu runko neljälle eri skenaariolle Suomen maatalouden kehityksestä vuoteen 2030 saakka. Luvussa 3 on taulukko, jossa makrotasolla arvioitiin näiden skenaarioiden vaikutuksia eri tekijöihin.

Niemi ja Rikkonen (2010): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-282-9>

Raportin liitteen kuvissa on esimerkkejä skenaarioanalyysistä, joissa on arvioitu maataloustuotannon muutoksia viidessä eri skenaariossa: nykytila jatkuu (business-as-usual), kasvihuonekaasupäästöjen rajoittaminen, maailmanlaajuisen talouskasvun heikkeneminen, EU:n maataloustukien alasajo ja radikaali maatalouskaupan liberalisointi.

Kärkkäinen ym. (2019): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-618-8>

Raportin taulukossa 1 on esimerkki, jossa kahden eri maankäyttöä vuoteen 2050 tarkastelevan skenaarion tulevaisuuden vaikutuksia on arvioitu eri tekijöiden suhteen.



ISBN 978-952-11-5083-8 (nid.)

ISBN 978-952-11-5084-5 (PDF)

ISSN 1796-1718 (pain.)

ISSN 1796-1726 (verkkoj.)