

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

BH10A0300 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

FOSFORIN KIERRON SULKEMINEN SYSTEEMI-INNOVAATIONA, CASE: BIOMERI OY

**Closing the Loop of Phosphorus as a System Innovation, case:
Biomeri Oy**

Työn tarkastaja: Professori, KTT Lassi Linnanen

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija, DI Juha Kortelainen

Lappeenrannassa 24.08.2010

Anna Kuokkanen

Sisältö

1 JOHDANTO	4
1.2 Työn tavoitteita	5
2 TAUSTATIETOA FOSFORISTA	6
2.1 Fosforin kierto ekosysteemissä	7
2.1.1 Ympäristövaikutukset - rehevöityminen	8
2.2 Kierto taloudellisessa järjestelmässä	10
2.3 Taloudelliset, geopoliittiset ja sosiaaliset vaikutukset	12
3 FOSFORIN EROTTAMINEN JA TALTEENOTTOMENETELMÄT	14
3.1 Talteenottomenetelmät jätevedestä	15
3.1.1 Talteenotto nestefaasista	17
3.1.2 Talteenotto kuivatusta lietteestä	18
3.1.3 Talteenotto lietteen tuhkasta	20
3.2 Erotus ja kierrätys lannasta	21
3.3 Merien potentiaali fosforin lähteenä	21
4 CASE: BIOMERI OY	23
4.1 Biomeri Oy:n liiketoimintakonsepti	24
4.2 Markkinoille tuonnin haasteet	26
4.3 Ratkaisumalleja	28
5 SYSTEEMI-INNOVAATIO JA SEN KEHITTYMINEN	30
5.1 Systeemi-innovaation määritelmä	31
5.2 Ohjaaminen	32
5.2.1 Erilaiset ohjauskeinot ja niiden vaikutus	33
5.3 Systeemi-innovaation kehittyminen ja sosio-tekni- sen järjestelmän rakenteellinen siirtymä	36
5.3.1 Muutosprosessi	38
5.3.2 Muutosprosessin ohjaus	40
5.3.3 Ideaaliset muutosprosessityypit	42
6 FOSFORIN KIERRÄTYKSEN INNOVAATIOTARKASTELU	44

6.1 Kierrätyksen kehittyminen	45
6.2 Ohjausmekanismit fosforin kierrätyksen edistämiseen	47
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	49
8 YHTEENVETO	53
LÄHTEET.....	55

LIITTEET

LIITE 1. Fosforin globaali kierto

SYMBOLILUETTELO

H₂O Veden kemiallinen merkintä

MgNH₄PO₄ Struviitin kemiallinen merkintä

Lyhenteet:

CFC Kloorifluorihiiivedyt

EBPR Enhanced Biological Phosphorus Removal eli fosforin tehostettu biologinen poisto

EU-15 Euroopan Unioniin vuoteen 1995 mennessä liittyneet 15 valtiota

EU-27 Euroopan Unionin kaikki nykyiset 27 valtiota

HCHC Osittain halogenoidut kloorifluorihiiivedyt

OECD Organization for Economic Cooperation and Development

OPEC Organization of the Petroleum Exporting Countries

SYKE Suomen Ympäristökeskus

Selitykset:

Konvektio Lämpötilaerojen aiheuttamat voimakkaat pystyvirtaukset.

Niche Kapea ja rajattu erikoisala, jossa kehitetään uusia innovaatioita.

Struviitti Fosfaattimineraali, joka sisältää lisäksi ammoniumia ja magnesiumia.

1 JOHDANTO

Kestävä kehitys on viime aikoina noussut monissa asioissa ja yhteyksissä ohjaavaksi tekijäksi yhteiskunnassamme. Fossiilisten polttoaineiden ja etenkin öljyn ehtyminen on luonut pelkoa tavallisille ihmisille ja synnyttänyt painetta tiedemaailmalle, keksiä öljylle korvike. Kuitenkin jopa suuremmaksi ongelmaksi tulevaisuudessa voi nousta neitseellisen fosforin loppuminen. Ihminen on vuosien ajan louhinut ja käyttänyt sitä kestävien periaatteiden vastaisella tavalla ja nyt on muodostunut uhka, että se voi loppua kokonaan. (Vaccari 2009, 54- 59.)

Fosfori on elintärkeä aine kaikelle elolliselle lähtien kasveista ja ihmisistä. Ihmiset tarvitsevat fosforia luuston ja hampaiden rakennusaineeksi sekä solujen toiminnan ylläpitämiseksi (Fineli®, 2009). Kasveille fosfori on yksi kolmesta ravinteesta, joiden saanti on edellytyksenä kasvien kasvamiselle. Maailman väestön kasvu lisää ruoan tarpeen määrää eli fosfori on tulevan väestön ruokkimisen ehto. Nykyteknologian käytettävissä olevat fosforivarannot riittävät seuraaviksi noin 90 vuodeksi nykyisellä kulutuksella. Kulutus kuitenkin todennäköisesti kasvaa, sekä väestön kasvun että kehitysmaiden elintason nousun myötä. Lihan sekä maitotuotteiden kulutuksen kasvu lisää paineita entisestään. Vastoin kuin öljylle, fosforille ei löydy korvaavaa ainetta. (Vaccari 2009, 54- 59.)

Suurin osa louhitusta fosforista käytetään maataloudessa lannoitteena. Vuosien mittaan lannoitteita on käytetty holtittomasti ja nykyinen maatalous ja maankäyttö ovat kiihdyttäneet ravinteiden huuhtoutumista maaperästä. Ravinteet kulkeutuvat myös jätevesien mukana vesistöihin, joista ne päätyvät merien pohjiin. Ongelmaksi on muodostunut se, että nykyisellä käytöllä fosfori poistuu ravinnekierrosta huuhtoutumalla meriin. Kestävä käyttö ja tulevaisuuden fosforivarastojen turvaaminen edellyttää sen, että fosfori pystytään palauttamaan takaisin kiertoon. (Vaccari 2009, 54- 59.)

Fosforin kierrätystä tutkitaan kiivaasti tällä hetkellä. Työssä keskitytään pitkälti fosforin kierrätyspotentiaaliin orgaanisista aineista, kuten jätevedestä, jätevesilietteestä ja lannasta, joiden avulla fosfori saadaan palautettua takaisin kiertoon. Huomioitavaa on, että puhuttaessa tässä työssä fosforin erotuksesta, tarkoitetaan pelkästään fosforin ja muiden ravinteiden erottamista jätevedestä. Talteenotolla puolestaan tarkoitetaan, että fosfori otetaan talteen sellaisessa muodossa, että se voidaan hyödyntää uudestaan. Kierrätyksen kannalta on olennaista kehittää tehokkaita talteenottomenetelmiä. Fosforin kierron sulkemiseksi on muitakin menetelmiä, joita ovat muun muassa tehokkaampi lannoitteiden käyttö. Merissä on suuret fosforivarastot, joten tulevaisuuden kannalta meret saattavat olla yksi varteenotettava tai ainakin tutkimisen arvoinen vaihtoehto. Meristä voidaan tuottaa fosforia useilla eri menetelmillä.

Ongelmana useimmissa fosforikierrätyksen koelaitoksissa on niiden taloudellinen kannattamattomuus. Neitseellisen fosforin hinta on edelleen niin alhainen, että kierrätetyn fosforin hinta nousee liian kalliiksi siihen nähden. Tämän lisäksi tarvitaan uudenlainen järjestelmä, systeemi-innovaatio, joka mahdollistaisi kierrätyksen toimivuuden yhteiskunnassamme. Pelkästään uuden teknologian kehittäminen ei ratkaise tätä ongelmaa, vaan tarvitaan uudistuksia lainsäädäntöön, politiikkaan, infrastruktuuriin ja muihin yhteiskunnallisiin rakenteisiin.

1.2 Työn tavoitteita

Tämän työn tavoitteena on tutustua fosforin kiertoon ja erilaisiin mahdollisuuksiin kierron sulkemiseen. Fosforia käytetään eniten maataloudessa, jossa se aiheuttaa sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä ekologisia, taloudellisia, geopoliittisia sekä sosiaalisia ongelmia ja haasteita (Cordell 2010, 87- 88). Työssä pyritään esittelemään kaikkia näkökulmia lyhyesti, mutta laajimmin perehdytään ekologisiin vaikutuksiin, koska ne liittyvät oleellisesti fosforin kierrätykseen ja case -tapaukseen. Fosforin käytöllä on monia ekologisia vaikutuksia, joista rehevöityminen on merkittävin, siksi siihen perehdytään tarkemmin. Fosforin kierron

sulkemiseksi tarvitaan useita keinoja: maankäytön muuttaminen, ravinteiden huuhtoutumisen estäminen sekä tehokkaampi lannoitteiden käyttö. Tässä työssä keskitytään kuitenkin ensisijaisesti fosforin kierrätykseen, sillä siinä on eniten kehittymisen varaa ja suurin potentiaali.

Työn lopussa tarkastellaan case Biomeri Oy:tä, jonka ympäristöinnovaatio liittyy nimenomaan mahdollisuuteen kierrättää fosforia. Innovaation avulla pyritään estämään fosforin aiheuttamaa rehevöitymistä, neitseellisen fosforin tulevaisuuden tuotantopulaa sekä saamaan tästä taloudellista voittoa. Biomeri Oy:n liiketoimintakonsepti on ainutlaatuinen ja sillä on mahdollisuus olla pioneeri sekä tällä alalla että tällaisen innovaation markkinoille tuonnissa.

Fosforin kierron kautta pyritään hahmottamaan systeemi-innovaation perimmäistä luonnetta, jota on toistaiseksi tutkittu hyvin vähän. Systeemi-innovaation ajatellaan olevan ratkaisun avain pyrittäessä kohti kestävämpää kehitystä. Sillä voidaan saavuttaa suurempi ympäristötehokkuus kuin pelkästään teknologia-, tuote- tai palveluinnovaatioilla (Elzen et al. 2004, 1-2). Työssä on esitelty systeemi-innovaation kehitysprosessi sekä pyritty arvioimaan fosforin kierrätystä systeemi-innovaation näkökulmasta.

2 TAUSTATIETOA FOSFORISTA

Fosfori on elintärkeä rakennusaine kaikelle elolliselle. Fosfori on typen ja kaliumin lisäksi välttämätön edellytys kasvien kasvamiselle ja täten ratkaiseva tekijä maataloudessa. Fosfori on erittäin reaktiivinen aine, minkä vuoksi se esiintyy luonnossa erilaisina fosfaatteina, jotka ovat sitoutuneena orgaaniseen kiveen, maaperään sekä sedimentteihin. Fosfori kiertää useissa ekosysteemeissä, jotka kaikki sisältävät fosforin suureen kiertoon, josta on havainnollistava kuva liitteessä 1. (The Environmental Literacy Council 2008.)

2.1 Fosforin kierto ekosysteemissä

Fosforin kierto poikkeaa muista biokemiallisista kierroista kuten veden, hiilen, typen tai rikin kierroista, sillä siitä puuttuu kaasufaasi. Suurimmat fosforipitoisuudet ovat sedimenttikivessä, josta fosforin kierto alkaa. Korroosion seurauksena fosfaatti rapautuu kivistä ja vapautuu maaperään tai veteen, josta kasvit voivat ottaa fosforin käyttöönsä. Näin fosfori kulkeutuu ravintoketjun alkupäähän, josta se kulkee koko ketjun läpi. Se palautuu takaisin maaperään eläinten ulosteiden mukana sekä kasvien ja eläinten kuoleman jälkeen niiden maatuessa ja hajotessa sienten ja bakteerien toimesta. Fosfori kiertää luonnollisesti maan ekosysteemissä keskimäärin 46 kertaa ennen kuin se päättyy vesistöjen kautta valtameriin. Toisaalta ihmisen toiminta voi muuttaa tämän vain yhdeksi kierroksi. Valtamerissä fosfori voi kiertää jopa 800 kertaa päättyen lopulta sedimentteihin, jotka miljoonien vuosien päästä muuttuvat takaisin fosfaattikiveksi. Maa-aineksen miljoonia vuosia kestävien liikkeiden jälkeen fosfaattikivi on taas epäorgaanisen kierron alussa. (The Environmental Literacy Council, 2008; Vaccari 2009, 54- 59.)

Fosfaatit eivät ole helposti veteen liukenevia, joten ne ovat tiukasti sitoutuneena maa-aineksen molekyyliin, joiden mukana ne yleensä huuhtoutuvat vesistöihin. Fosforia päättyy vesistöihin lannoitteiden ja jäteveden valuman, muiden teollisuusjätteiden ja luonnollisten esiintymien kautta. Nämä fosfaatit asettuvat yleensä merien ja järvien pohjalle. Sedimenttien sekoittuminen ja eroosio voivat irrottaa fosfaatteja kasviston käyttöön. (The Environmental Literacy Council, 2008)

Suurin osaa vesien fosforista esiintyy sitoutuneena kiintoaineeseen, kuten leväbiomassaan tai maahiukkasiin. Fosfori voi esiintyä myös liukoisina epäorgaanisina fosfaatteina sekä liuenneina tai kolloidisina orgaanisina fosforiyhdisteinä. Fosforia joutuu vesistöön laskeuman

kautta tai valuma-alueelta ja pistekuormituksesta. Fosfori poistuu vesistöistä ulos virtaavan veden mukana ja sedimentoitumalla. (Salonen et al. 1992, 12.)

Pintavedessä levien sitoma fosfori on orgaanisessa muodossa kunnes se vajoaa pohjalle bakteerien hajotettavaksi, jolloin fosfori muuttuu epäorgaaniseen muotoon. Kiintoaineeseen sitoutunut fosfori sedimentoituu. Fosforipitoisuuden kannalta olennaista on se, kuinka pysyvä sedimentin fosforivarasto on. Sitoutuminen sedimentteihin riippuu saatavissa olevasta hapenmäärästä. Hapettomissa olosuhteissa fosfori liukenee takaisin veteen. Sedimentistä vapautuvan fosforin määrää säätelee sedimentin pinnan hapetus- pelkistys -potentiaali, pH-taso, lämpötila ja veden virtaukset (konvektio, turbulenssi). Sedimenteistä vapautunut fosfori sitoutuu kolloideihin, joista se liukenee fosfaattina veteen. Fosfaatti voi edelleen sitoutua kiintoaineeseen tai kiintoaineeseen sitoutunut fosfori voi liueta fosfaatiksi. Kumpuamisen ansiosta ravinteet voivat nousta takaisin pintaan. (Salonen et al. 1992, 12; Itämeriportaali 2010)

2.1.1 Ympäristövaikutukset - rehevöityminen

Asiantuntijoiden mukaan jäljellä olevien fosfaattireservien laatu alkaa laskea, koska niiden fosforipitoisuus alenee ja raskasmetallipitoisuudet (kadmium ja uraani) nousevat. Sekä kadmium että uraani ovat myrkyllisiä niin luonnolle kuin ihmiselle, joten ne täytyy erotella ja poistaa. Jokainen louhittu fosfaattitonni tuottaa keskimäärin viisi tonnia radioaktiivista sivutuotetta, jota ei voi uusiokäyttää vaan se täytyy varastoida. Erotus, poisto ja varastoiminen kuluttavat paljon energiaa ja rikkiä sekä tuottavat valtavan määrän jätettä. Tästä huolimatta merkittävin fosforin aiheuttama ympäristövaikutus on rehevöityminen. (Cordell 2010, 87.)

Veden rehevöitymisellä tarkoitetaan veden eliöstön lisääntynyttä kasvunopeutta, joka johtuu kasvaneesta ravinteiden määrästä. Rehevöitymisen mittarina on perustuotannon lisääntyneet

tuottavuus. Veden rehevöittämistä aiheuttavat erilaiset luontaiset prosessit sekä ihmisten toiminta, jolla on erittäin suuri vaikutus rehevöitymisen kiihtymiseen. Rehevöitymisen aikaansaama tuotannon lisääntyminen ei itsessään ole haitallista ihmiselle, mutta siihen liittyy monia veden käytön kannalta haitallisia ilmiöitä. (Salonen et al. 1992, 10, 22- 24.)

Rehevöityminen aiheuttaa planktonlevätuotannon ja –biomassan lisääntymisen, mistä johtuu veden samentuminen. Tämän seurauksena yhä suurempi osa levälajistosta kelpaa huonosti eläinplanktonin ravinnoksi, jolloin ravintoketjun alkupäässä jää paljon ainesta hyödyntämättä. Tämä lisää vedessä ja pohjalla hajoavan orgaanisen aineen määrää. Kuollut levämassa vajoaa pohjaan ja hajotessaan kuluttaa happivarastoa. Tämän seurauksena fosforin pysyvä pidättymisen pohjalietteessä häiriintyy ja aiemmin lietteeseen saostuneet fosfaatit liukenevat uudelleen veteen. Tätä ilmiötä kutsutaan sisäiseksi kuormitukseksi, joka on yksi suurimmista ongelmista vesien suojelun kannalta. (Salonen et al. 1992, 10, 22- 24.)

Sinilevien muodostuminen vähentää vesien käyttökelpoisuutta, sillä monet sinileväkukinnot synnyttävät myrkyllisiä yhdisteitä. Lisäksi vesistöjen käyttöä rajoittavat veden epämiellyttävä haju ja maku. Orgaanisten aineiden lisääntyminen aiheuttaa vedenpuhdistamoille suurempia kustannuksia kemikaalien kulutuksen kasvun myötä. (Salonen et al. 1992, 10, 22- 24.)

Usein ravinnepitoisuuden kohoaminen parantaa hajottavien mikrobien elinoloja. Mikrobiaktiivisuuden lisääntyminen kiihdyttää hitaasti hajoavan humuksen pilkkoutumista, mikä kuluttaa taas veden happivarjoja. Pienentyneet happivarastot vaikuttavat etenkin vesien eliölajiin. Eliölajikoostumus muuttuu vähitellen pienempiä happimääriä tarvitsevien eliöiden suuntaan. (Salonen et al. 1992, 10, 22- 24.)

Tyypillistä rehevöityneille vesistöille on rantojen ja vedessä olevien rakenteiden limoittuminen, joka johtuu pintakasvustolevien lisääntymisestä sekä bakteeritoiminnan vilkastumisesta.

Lima kerää helposti itseensä erilaisia kiintoainehiukkasia, joka osaltaan lisää liettymistä ja samentumista. Ravinnepitoisuuksien nousu vaikuttaa myös olennaisesti lajisuhteisiin. Esimerkiksi rakkoleväkasvustot taantuvat siinä missä rihmaisat makrolevät lisääntyvät. Kasvillisuuden lajisuhteiden muutos johtaa myös eläinyhteisöjen tasapainon muutoksiin. (Salonen et al. 1992, 10, 22- 24.)

2.2 Kierto taloudellisessa järjestelmässä

On arvioitu, että nykyteknologialla saavutettavissa olevat fosforivarannot riittäisivät seuraaviksi 90 vuodeksi tämän hetkisen kulutuksen tasolla. Kulutus tulee kuitenkin todennäköisesti kasvamaan väestön kasvun, ruokavalioiden muutosten (liha- ja maitotuotteiden lisääntynyt kulutus) sekä lisääntyneen bioenergian kysynnän vuoksi. Maailman fosfaattikiviesiintymät ovat keskittyneet Marokkoon (sisältäen valloitetun Länsi-Saharan), Kiinaan, Etelä-Afrikkaan, Yhdysvaltoihin, Jordaniaan sekä entisen Neuvostoliiton alueelle. Länsi-Euroopan ainoa kaupallinen fosfaattikiven esiintymä sijaitsee Suomessa. Fosfaattia käytetään pääosin neljään eri tarkoitukseen: maatalouteen, ihmis- ja eläinravinnon lisäravinteeseen, pesuaineteollisuuteen sekä joihinkin teollisiin sovelluksiin. (Phosphorus Recovery 2010.)

Vuosittain louhitaan yli 160 miljoonaa tonnia fosfaattikiveä (Cooper 2010, 6). Maatalouden osuus fosfaatin kokonaiskulutuksesta on noin 80- 85 %. Pesuaineissa fosfaatin rooli on veden pehmentäminen, joka optimoi pesuolosuhteet muille pesukomponenteille. Tämän lisäksi fosfaattia käytetään tiskinpesuaineissa, metallin pintakäsittelyssä, korroosion torjunnassa, liekinestoaineena, veden käsittelyssä sekä keramiikan valmistuksessa. Vaikka fosfaattia käytetään näinkin monipuolisiin tarkoituksiin, edellä listattujen sovellusten osuus on vain 3 % fosfaatin kokonaiskulutuksesta. (Phosphorus Recovery 2010.)

Fosfaattikiveä käytetään useimpien kaupallisten lannoitteiden raaka-aineena. Fosfaattikiveä voidaan käyttää suoraan lannoittamiseen, mutta sen alhainen fosforipitoisuus ja korkeat logistiikkakustannukset rajoittavat suoraa käyttöä. Sen sijaan fosfaattikivestä erotetaan ja jalostetaan fosfaattilannoitteita kuten superfosfaattia, monoammoniumfosfaatti (MAP) sekä fosfaattikivijauhetta. (IFA 2010.)

Suurin osa maailman maanviljelijöistä kärsii fosforilannoitteiden puutteesta jo nyt. Jos väestö jatkaa kasvuaan, ruoan tarve lisääntyy ja sen kautta myös lannoitteiden tarve. Tämä aiheuttaa tilanteen, jossa fosforin määrä ei ole riittävä väestön määrään nähden. On havaittu, että fosforin pitoisuus maaperässä määrää ekosysteemin populaation koon. Tästä voidaan päätellä, että fosforipitoisuus on suoraan verrannollinen kasvien kasvuun ja näin ollen ihmisten ja eläinten ravinnonlähteeseen. Fosforista voi tulla tulevaisuudessa pullonkaulatuote maataloudessa. (Déry ja Anderson 2007.)

EU-27:n alueella fosfaattilannoitteiden kulutus on ollut viime vuosina laskussa, ollen noin 3,1 miljoonaa tonnia vuodessa (Härmälä 2009). Läntisessä Euroopassa fosfaattilannoitteita on käytetty 1,3 miljoonaa tonnia vuodessa. Tällä alueella syntynyt eläinten lanta sisältää 1,6 miljoonaa tonnia fosforia. Kaikki orgaaninen jäte sisältää fosforia, mutta merkittävin on eläinten lanta. Vuonna 2005 EU-15:n jätevedenpuhdistuslaitoksilla syntyi 9,4 miljoonaa kuivaa lieteainesta, josta voitaisiin kierrättää 300 000 tonnia fosforia ja muita ravinteita. Tämä kertoo siitä, että ainakin EU-15 -alueella kierrättämällä saataisiin tuotettua fosforia jopa yli kulutuksen. (Rosemarin et al. 2009.)

Ihminen vaikuttaa fosforin luonnolliseen kiertoon vauhdittamalla fosforin siirtymistä maasta veteen. Maanviljelyssä käytetään suuria määriä lannoitteita, joiden ravinteita maaperä ei pysty pidättämään vaan ne huuhtoutuvat vesistöihin. Fosfori kulkee myös ihmisten ja eläinten ravintoketjua pitkin ylöspäin. Ulosteiden mukana ravinteet päätyvät jäteveteen ja jätevedestä edelleen vesistöihin, ellei jätevesiä puhdisteta. Ihmisen toiminta siis köyhdyttää maaperää

ravinteilta, jotka sekä huuhtoutuvat maaperästä että kulkeutuvat jätevesien mukana vesistöihin ja sieltä edelleen merien pohjiin. Liitteen 1 kuva esittää fosforin globaalia kiertoa, joka pitää sisällään kaikki pienemmät kierrot ekosysteemeissä.

2.3 Taloudelliset, geopoliittiset ja sosiaaliset vaikutukset

Fosfaatin maailmanmarkkinoilla hintaa säätelee kysynnän ja tarjonnan laki. Kysyntään vaikuttavat useat tekijät, muun muassa lannoitteiden kysyntä maataloudessa sekä biopolttoaineiden kysyntä energiantuotannossa. Fosfaatin saatavuus näkyy lannoitteiden hinnassa ja sitä kautta ruoan hinnassa. Vuosina 2007- 2008 fosfaatin hinta nousi räjähdysmäisesti osittain siksi, että biopolttoaineiden kysyntä kasvoi. Vuonna 2008 korkein hinta oli 350 €/t (Global InfoMine 2010). Lannoitteiden käyttö biopolttoaineiden valmistamiseksi muutti lannoitteiden hintarakenteen niin, että se määräytyi suoraan öljyn hinnan mukaan. Tämä johti ruoan hinnan nousuun eikä kehitysmaiden maanviljelijöillä ollut enää varaa lannoitteisiin. (Rosemarin et al. 2009, 6- 10.)

Fosfaatin hinta olisi saattanut pysyä edelleen korkeana, ellei talouden taantuma olisi alkanut vaikuttaa 2008 vuoden lopussa, jolloin hinta tippui 75 euroon tonnilta (Global InfoMine 2010). Biopolttoaineiden kysynnän laskun myötä laski myös lannoitteiden kysyntä sekä hinta. Tämä fosfaatin hintapiikki osoitti sen, että lannoiteteollisuus on erittäin haavoittuva ja riippuvainen biopolttoaineista sekä sen, ettei useilla kehitysmailla ole hinnan noustessa varaa kemikaalilannoitteisiin. Typen, kaliumin sekä sen myötä ruoan markkinahintaan vaikuttaa fosfaatin hinnan vaihtelu. Tällä hetkellä fosfaatin hinta on 90 €/t ja se on pienoisisessä kasvussa (Global InfoMine 2010). (Rosemarin et al. 2009, 6- 10.)

Lannoitteiden hinnan nousu syventää kuilua köyhien ja rikkaiden maiden välillä. Tämä aiheuttaa geopoliittisia jännitteitä tulevaisuudessa koko maailmalle. Toinen geopoliittisesti

merkittävä seikka on fosfaattivarastojen sijainti. 90 % maailman kokonaisfosfaattireserveistä sijaitsee vain viiden maan sisällä. Vertailun vuoksi 12 valtiota, jotka muodostavat OPEC – kartellin hallitsevat vain 75 % maailman öljyvaroista (Elser ja White, 2010). Kiina on alkanut jo nyt rajoittaa fosfaatin tuotantoaan asettamalla vuonna 2008 135 % tariffin vientifosfaatille. USA puolestaan on saavuttanut tuotantohuippunsa ja turvautuu tuontifosfaattiin. (Rosemarin et al. 2009, 6- 10.)

Rikkihappo on oleellinen raaka-aine fosfaattilannoitteen valmistuksessa, jolloin rikkihapon kysyntä ja tarjonta vaikuttavat myös fosfaatin hintaan. Rikkihappoa tuotetaan pääsääntöisesti kehitysmaissa, jotka voivat rikkihapon saatavuuden ja hinnan avulla säädellä fosfaatin tarjontaa. Tämä on kolmas geopoliittinen tekijä, joka voi johtaa merkittäviin jännitteisiin ja synnyttää öljyteollisuuden OPEC:n kaltaisen organisaation, joka hallitsisi fosfaatin markkinoita. (Rosemarin et al. 2009, 6- 10.)

Kaikilla maanviljelijöillä tulisi olla oikeus saada fosforilannoitteita, koska ne takaavat korkeamman sadon sekä turvaavat heidän toimeentulonsa. Kuitenkin vain ne maanviljelijät, joilla on tarpeeksi ostovoimaa, voivat osallistua lannoitemarkkinoille. Korkeampien logististen kustannusten vuoksi lannoitteet saattavat olla jopa kahdesta kuuteen kertaan kalliimpia Afrikassa kuin ne ovat Euroopassa. Tämä herättää kysymyksen, kenellä on oikeus lannoitteisiin, toimeentuloon ja ravinnon saantiin? Tällä hetkellä kehitys näyttäisi menevän siihen suuntaan, että tulevaisuudessa lannoitteet ovat yhä useampien maanviljelijöiden tavoittamattomissa. (Cordell 2010, 88.)

Toistaiseksi fosfaatin ehtyminen on saanut liian vähän huomiota valtioiden hallituksilta, YK:n edustajilta tai kansainvälisiltä kansalaisjärjestöiltä. Tällä hetkellä puuttuu kokonaan puolueeton taho, joka olisi vastuussa fosfaattiin liittyvästä seurannasta, tilastojen keräämisestä ja toimintaohjeiden laatimisesta. Fosfaattivarastojen tyhjeneminen on kuitenkin viime aikoina saanut yhä enemmän huomiota laajemmassa mittakaavassa. Esimerkiksi vuonna 2009

Vancouverissa pidettyyn ravinteiden kierrätykseen liittyvään konferenssiin osallistui osanottajia yli 30 eri maasta. (Rosemarin et al. 2009, 6- 10.)

Yksityinen sektori on ollut hyvin passiivinen ravinteiden kestävä käytön suhteen. Suurimmat fosfaattikaivosyritykset ovat pitäneet matalaa profiilia. Tosin kaivosteollisuus ei ole aikaisemminkaan osoittautunut kestävä raaka-aineiden käytön puolestapuhujaksi. Lannoiteyritykset ovat myös kiinnostuneita enemmän taloudellisista voitoista kuin rajallisen raaka-aineen suojelemisesta. Tämän takia aloitteen on tultava muualta. Epäorgaanisen fosforin hinnannousu mahdollistaisi köyhempien ja vaikeammin hyödynnettävissä olevien esiintymien hyödyntämisen sekä kierrätetyn fosforin valmistamisen. (Rosemarin et al. 2009, 6- 10; Vaccari 2009, 54- 59.)

3 FOSFORIN EROTTAMINEN JA TALTEENOTTOMENETELMÄT

Fosforivarantojen ehtyminen voidaan estää seuraavilla toimenpiteillä:

- Tehokkaampi käyttö
- Maankäytön muutos niin, että kyntöä ei tapahdu
- Maanhuuhtoutumisen ja eroosion estäminen
- Käyttöön kelpaamattoman biomassan palautus takaisin maaperään
- Eläinperäisten jätteiden (luut, yms.) palautus takaisin maaperään
- Fosforin erottaminen virtsasta
- Fosforin erottaminen ja talteenotto jätevedenkäsittelylaitoksella

Ihmisten päästämästä fosforista puolet lähtee virtsan mukana. Fosforin erottaminen virtsasta on suhteellisen helppoa, mutta se vaatii nestemäisten ja kiinteiden ulosteiden erottelun joko käsittelylaitoksella tai syntypaikallaan. Virtsasta voitaisiin erottaa myös typpi, joka tällä hetkellä otetaan ilmakehästä korkein energiakustannuksin. Jäteveden puhdistamoilla saataisiin

fosforia talteen, mutta ongelmana on jäteveden saastuneisuus kuten korkeat raskasmetallipitoisuudet. Ympäristöviranomaiset vaativat jo useilla alueilla jäteveden puhdistamista ravinteilta, joten luonnollisena jatkumona tästä voidaan nähdä ravinteiden talteenotto ja kierrätys. Ravinteiden kierrätys jätevedestä vähentää rehevöitymistä sekä turvaa arvokkaan raaka-aineen saannin. (Vaccari 2009, 54- 59; Phosphorus Recovery 2010.)

Fosfori voidaan erottaa jätevedestä joko kemiallisesti, biologisesti tai näiden yhdistelmällä. Toistaiseksi yleisin tapa on ollut kemiallinen saostus, mutta biologinen fosforinpoisto on yleistymässä. Kemiallinen ja biologinen fosforinpoisto voidaan yhdistää kolmella eri tavalla: kemiallinen puhdistus tapahtuu joko ennen tai jälkeen biologista puhdistusta tai samaan aikaan. Parhaimmillaan voidaan saavuttaa orgaanisille aineille yli 90 % erotusaste. Etenkin biologinen puhdistus soveltuu käytettäväksi useimpien talteenottoteknologioiden kanssa. (Valtion Ympäristöhallinto 2010.)

3.1 Talteenottomenetelmät jätevedestä

Fosfori voidaan ottaa talteen useilla eri menetelmillä puhdistusprosessissa syntyvästä lietteestä, lietteen poltosta syntyneestä tuhkasta tai suoraan nestefaasista, johon fosfori on anaerobisessa vaiheessa vapautunut. Menetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: kiteyttäminen tai saostaminen, märkäkemialliset menetelmät ja termokemialliset menetelmät.

Päävirtauksessa on erittäin matala fosforipitoisuus (noin 5 mg/L), mutta todella suuri massavirta. Fosforin talteenotto päävirtauksesta ei ole tehokasta eikä teknisesti soveltuvaa. Prosessivedessä eli sivuvirtauksessa ovat suuremmat fosforipitoisuudet (20- 100 mg/L), mutta massavirta on päävirtausta pienempi. Noin 30- 45 % kokonaisfosforikuormasta saadaan talteen prosessivedestä. Kuivatussa tai vesierotetusta puhdistuslietteessä on suurin potentiaali fosforin talteenottoon sillä se sisältää yli 90 % sisään tulevasta fosforista. Lietteiden pitoisuus on selkeästi korkeampi (10 g/kg kuiva-ainesta) ja käsiteltävät massat ovat pienemmät. Liet-

teen polton jälkeen tuhka sisältää edelleen yli 90 % kokonaisfosforikuormasta, sillä polton aikana fosforia ei häviä. Fosforipitoisuus kasvaa edelleen (64 g/kg) samalla kun käsiteltävät massat pienenevät. Seuraavassa taulukossa 1 on esitetty eri talteenottotekniikoita. (Schick et al. 2009.)

Taulukko 1. Talteenottomenetelmät jätevedestä. (Adam 2009)

Menetelmä	Prosessi	Status	Lopputuote
NESTEFAASI: JÄTEVESI(KÄSITELTY) TAI PROSESSIVESI(LIETEVEESI)			
saostaminen	<ul style="list-style-type: none"> Air Prex- Prosessi Prisa prosessi 	<ul style="list-style-type: none"> koelaitos soveltuu EBPR-laitokseen yhdistämiseen 	<ul style="list-style-type: none"> struviitti ei niin puhdasta kuin kiteyttämällä ei vesiliukoinen mutta soveltuu lannoittamiseen
kiteytys	<ul style="list-style-type: none"> DHV-Crystalactor® CSH- prosessi Darmstadt The OSTARA PEARL™ 	<ul style="list-style-type: none"> teollinen mittakaava toiminnallinen kokemus yhteistoiminta EBPR- laitoksen kanssa 	<ul style="list-style-type: none"> struviitti tai kalsiumfosfaatti struviitti ei ole vesiliukoinen mutta soveltuu lannoitukseen korkea puhtausaste mahdollinen kalsiumfosfaatti soveltuu fosforiteollisuuteen
KUIVATTU TAI VESIEROTETTU LIETE			
märkäkemiallinen	<ul style="list-style-type: none"> Seaborne/Gifhorn prosessi KREPRO, Cambi/KREPRO 	<ul style="list-style-type: none"> Gifhorn- koelaitos Seaborne prosessia on yksinkertaistettu 	<ul style="list-style-type: none"> myyty NP- lannoitteena ei ole vesiliukoinen mutta soveltuu lannoitukseen
terminen	<ul style="list-style-type: none"> Mephrec prosessi 	<ul style="list-style-type: none"> tekninen kokeilu (300 kg/h) 	<ul style="list-style-type: none"> kalsiumsilikofosfaatit ei vesiliukoinen mutta soveltuu lannoittamiseen
POLTETUN LIETTEEN TUHKAJÄÄNNÖS			
märkäkemiallinen	<ul style="list-style-type: none"> Sephos prosessi BioCon PASCH- prosessi 	<ul style="list-style-type: none"> laboratorio- ja pilottitason kokeita 	<ul style="list-style-type: none"> Biocon: fosforihappo kalsium-, kalsium-alumiini-fosfaatti tai magnesium-fosfaatti kalsium- ja magnesiumfosfaatit eivät ole vesiliukoisia, mutta soveltuvat lannoittamiseen
terminen	<ul style="list-style-type: none"> BAM/AshDec Prosessi Elektroterminen fosforin erotus 	<ul style="list-style-type: none"> pilottilaitos (7 Mg/d) v. 2010 koelaitos (15 000 Mg/d) teollisia sovelluksia 	<ul style="list-style-type: none"> kalsium- ja magnesiumfosfaatit eivät ole vesiliukoisia mutta soveltuvat lannoittamiseen valkoinen fosfori

3.1.1 Talteenotto nestefaasista

Kemiallisella saostuksella eli kiteyttämällä saadaan jätevedestä talteen kalsiumfosfaattia tai struviittia eli magnesiumammoniumfosfaattia ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Molempien menetelmien perustana on jäteveden rikastus anaerobisessa vaiheessa. Kalsiumfosfaatin saostus tapahtuu kalsiumoksidin avulla. Kun pH- arvo, moolisuhde ja väkevyys saavuttavat tarvittavan tason, muodostuu amorfinen sakka, joka kiteytyy fosfaatiksi. Parhaiten tunnettu kalsiumfosfaatin kiteytysmenetelmä on *DHV Crystalactor* - leijukerroskiteytin. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

Kalsiumfosfaatin saostamiseen tarvitaan suuria määriä kalkkia, jonka takia lietteen määrä kasvaa. *DHV Crystalactor*® prosessissa syntyy kalsiumfosfaattipellettejä, joista noin 50 % on kalsiumfosfaattia, josta kalsiumia on noin 20 %, happea noin 20 % ja fosforia noin 10 % ja jonka kosteuspitoisuus on 10 %. Tämän menetelmän kustannukset, sisältäen kaikki kemikaalit, käyttö- ja pääomakustannukset, ovat noin 6 €/kg talteen otettua fosforia. (Järvenpää 2008.)

Fosforin kierrätys kiteyttämällä struviittia mädätetystä lieteliemestä on uusimpien tutkimusten mukaan suositeltavaa etenkin jätevedenkäsittelylaitoksilla, joissa on tehostettu fosforin biologinen erottaminen (EBPR). Anaerobisen mädätyksen aikana polyfosfaatit vapautuvat nestefaasiin, mikä kasvattaa fosfaatin, magnesiumin sekä kaliumin pitoisuuksia liuoksessa. Lisäksi ammoniumpitoisuudet kasvavat merkittävästi proteiinien hajoamisen johdosta. Mädätetyn lietteen kuivauksesta jäävä liuos sisältää suuria määriä fosforia, ammoniumia sekä magnesiumia, mikä mahdollistaa fosforin kierrätyksen struviittikiteytyksen avulla. (Martí et al. 2010.)

Tutkimukset osoittavat, että struviitin kiteyttämistä syntyviä tuotteita voidaan käyttää tehokkaana hitaasti vapautuvana lannoitteena maataloudessa, mikä tekisi tämän menetelmän käytöstä taloudellisesti kannattavaa. Struviitin käyttö lannoitteena mahdollistaa sekä ravinteiden

kierrätyksen että ravinteiden uusiokäytön. Struviitin kerääntyminen putkien seinille ja laitteiden pinnoille sekä mädätyksen aikana että mädätyksen jälkeisissä prosesseissa tuo käytännön ongelmia ja lisää ylläpitokustannuksia. Tämä hallitsematon saostuminen vähentää fosforin pitoisuuksia lieteliemessä, mikä vähentää oleellisesti struviitin tuotantoa. (Martí et al. 2010.)

CSH- prosessi tapahtuu biologisen erotuksen yhteydessä ja siinä käytetään hyödyksi kalsiumsilikaatti-hydraattipellettejä. Pelletit syötetään reaktoriin anaerobisessa vaiheessa, jolloin biologisesti vapautunut fosfori sitoutuu suoraan CSH- pelletteihin. Tämän jälkeen pelletit erotetaan lietteestä ja niitä voidaan käyttää lannoiteteollisuudessa. Fosforin talteenottoaste on noin 30 % kokonaisfosforikuormasta. (Schick et al. 2009.)

Eräs kaupallinen reaktori, joka perustuu struviitin kiteyttämiseen, on OSTARA PEARL™, josta on saatu jo teollisen laitokseen kokemuksia. Noin 30 % jätevedenpuhdistuslaitoksen fosforikuormasta saadaan talteen tällä menetelmällä. (Schick et al. 2009)

3.1.2 Talteenotto kuivatusta lietteestä

Jäteveden puhdistuksessa syntyvän lietteen hyödyntäminen sellaisenaan maataloudessa tuottaa ongelmia, sillä se usein sisältää merkittäviä määriä raskasmetalleja sekä patogeenisiä organismeja. Liete voidaan kompostoida joko yksinään tai yhdessä erotellun yhdyskuntajätteen, biomassan tai elintarviketeollisuuden jätteiden kanssa. Kompostituotteiden käyttökelpoisuuden määräävät kuitenkin niiden raskasmetallipitoisuudet. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

Tunnetuin menetelmä fosforin talteenotosta jäteveden lietteestä on Kemiran kehittämä KREPRO prosessi, joka perustuu termiseen hydrolyysiin. Rikkihapon avulla melkein 40 %

orgaanisesta massasta saadaan muutettua nestefaasiin, jolloin se on biohajoavaa ja sitä voidaan käyttää hiilen lähteenä typen poistossa. Myös suurin osa epäorgaanisista ainesosista liukenee. Linkoamisen jälkeen liuos ohjataan reaktoriin, jossa pH nostetaan saostumiseen vaadittavalle tasolle. Tuloksena saostuu rautafosfaatti. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

Cambi/KREPRO (KEMICond) prosessi on edelleen kehitetty versio, joka koostuu kemiallisesta käsittelystä rikkihapolla ja vetyperoksidilla sekä kaksivaiheisesta vedenpoistosta. Kemiallinen käsittely helpottaa vedenpoistoa, tuottaen suurempia kuiva-ainepitoisuuksia kuin käsittelemätön liete. Ylimääräiset rautaionit voidaan käyttää neutraloivana aineena tai saostusaineena jäteveden käsittelylaitoksella. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

Mephrec- prosessi perustuu termiseen käsittelyyn, jossa kuivasta jätevesilietteestä tehdään brikettejä käyttäen apuna kuonaa muodostavia aineita ja koksia. Lämpötila voi nousta lähes 2000 °C -asteeseen, jolloin fosfori muuttuu mineraaliseksi jauheeksi. Tässä menetelmässä osa raskasmetalleista (Hg, Cd, Pb, Zn) haihtuu ja osa (Fe, Cu, Cr, Ni) muuttuu nestemäiseen muotoon. Tätä menetelmää testataan teknisessä mittakaavassa.

Saksalainen Seaborne -ympäristötutkimuslaboratorio on kehittänyt jätevesilietteen käsittelymenetelmän, jossa yhdistetään biokaasun puhdistus ja fosforin sekä typen kierrätys. Käymisprosessin jälkeinen liete ja palamisesta jäljelle jäänyt tuhka sekoitetaan ja hajoitetaan hapon lisäyksen avulla. Reaktorissa tapahtuu lietteen ja liuenneiden mineraalien hydrolyysi. Linkoamisen jälkeen orgaaninen jae poltetaan tuhkaksi ja liuoksesta muodostetaan struviitti. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

3.1.3 Talteenotto lietteen tuhkasta

BioCon prosessissa käsitellään lietteen polttamisesta (850 °C) jäljelle jäänyt tuhka. Hienonnettu tuhka käsitellään rikkihapolla (pH~1). Soveltaen ionivaihdon periaatetta voidaan komponentit erottaa eri vaiheissa. Fosfori saadaan talteen fosforihappona. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

Sephos (*SEquential precipitation PHOSphorus* -menetelmässä tuhka huuhdotaan rikkihapolla (pH~1,5). Kun lietos saadaan erotettua, nostetaan liuoksen pH-arvoa 3,5:een lisäämällä natronlipeää. Samalla suurin osa raskasmetalleista saostuu. Jäännös voidaan käyttää fosforin tuottamiseen elektrokemiallisella prosessilla. (Wzorek ja Gorazda 2007.)

PASH -prosessissa fosfori uutetaan lietteen tuhkasta suolahapon avulla. Happaman liuoksen pH-arvoa nostetaan kalkin avulla, jotta saadaan saostettua fosfori. Tästä menetelmästä on vasta laboratorio- ja pilottikokeita. Fosforin talteenottoaste potentiaali on 90 % ja arvioidut kustannukset ovat 3 €/kg fosforia. (Schick et al. 2009.)

BAM/AshDEC prosessi on termokemiallinen menetelmä, jossa tuhka sekoitetaan klooriin ja seos käsitellään termisesti. Raskaat metallikloridit erotellaan pakokaasujärjestelmässä. Kemiallisten reaktioiden seurauksena muodostuu magnesiumfosfaattia. Tätä menetelmää on testattu pilottimittakaavan laitoksessa, jossa on käsitelty 7 tonnia tuhkaa päivässä. Lähitulevaisuudessa suunnitellaan rakennettavan useita laitoksia, joissa tehdään tuhkasta lannoitteita. (Schick et al. 2009.)

3.2 Erotus ja kierrätys lannasta

Helpoin tapa kierrättää ravinteita on jätevesilietteen ja eläinten lannan levittäminen maanviljelysmaille sellaisenaan. Vastaavaa menetelmää on käytetty koko maanviljelyshistorian ajan. Olosuhteet ovat kuitenkin muuttuneet: kaupunkien kasvun myötä jäteveden tuotanto on keskittynyt kaupunkeihin - kauas sieltä, missä maanviljelyä tapahtuu. Tämä on johtanut logistisiin ongelmiin jätelietteen levityksessä. Viime vuosina huoli on noussut myös jäteveden sisältämistä raskasmetalli- sekä patogeenisten organismien pitoisuuksista. Eläinten lannan levittäminen vaikuttaisi edelleen olevan hyvä ratkaisu ravinteiden kierrättämiseen, mutta siinäkin on syntynyt vastaavanlaisia ongelmia. Tehokarjantuotanto synnyttää ylen määrän lantaa siihen nähden kuinka paljon lähellä olevat viljelysmaat voivat sitä hyödyntää. Nykyään tämä ylimäärä päättyy yleensä jätteidenpolttolaitokselle. Tämän takia on kehitettävä menetelmiä, joilla pystytään ottamaan talteen ylijäävät ravinteet puhdistetusta jätevedestä sekä eläinten lannasta. (Driver 1998.)

Vaikka lantaa voidaan käyttää lannoitteena sellaisenaan, on ongelmaksi muodostunut lannassa olevan fosforin ja typen suhde: fosforia on liikaa typpeen nähden. Kun lantaa annostellaan typen määrän mukaan, fosforia menee liikaa maaperään kasvien tarpeisiin nähden. Tutkimusten mukaan lannan fosforipitoisuutta voidaan säädellä erottamalla ylimääräinen fosfori struuvitin saostuksen avulla. Tällöin ylimääräinen fosfori voidaan käyttää lannoitteena siellä missä sitä tarvitaan. Struviitti voidaan saostaa samalla tavalla kuin jäteveden kohdalla. (Burns ja Moody 2002, 1, 6.)

3.3 Merien potentiaali fosforin lähteenä

Lähes kaikki maasta kaivettu fosfori päättyy lopulta valtameriin. Osa ravinteista jää pintaveiteen, jossa ne ovat levien käytössä, mutta suurin osa valuu merien pohjalle ja sitoutuu sedimentteihin. Valtameret on yksi suuri ravinnevarasto, jonka potentiaalia tulisi tutkia enem-

män. Yksi vaihtoehto olisi pohjan ruoppaus tai sedimenttien hyödyntäminen mekaanisesti. Toisaalta voisi olla mahdollista ottaa talteen syvänteiden ravinteet suoraan vedestä kemiallisesti. Kolmas vaihtoehto on ravinteiden nostaminen pintaan joko kumpuamisilmiötä hyödyntäen tai pumppaamalla. Pintavesien ravinteet voisi ottaa talteen joko suoraan tai kasvattamalla levää niin kuin työn case – tapauksessa. (Kronström 2010.)

Suomalaisittain olisi mielenkiintoista selvittää Itämeren potentiaali ravinteiden ja etenkin fosforin lähteenä. Itämeri on matala meri, jossa on paljon suojaisia alueita, joten talteenotto olisi luultavasti helpompaa kuin valtamerissä. Se on myös maailman saastunein meri eli siinä on suuria ravinnekertymiä, jotka aiheuttavat ongelmia ympäristölle. Ravinteiden talteenotto Itämerestä olisi jo pelkästään ympäristöllisistä näkökulmista mielekästä (rehevöitymisen ehkäisy), mutta ympäristöllis-taloudellinen näkökulma (fosforin lähde) tekee siitä erityisen mielenkiintoisen. (Kronström 2010.)

Suomenlahti on yksi Itämeren rehevöityneimmistä osa-alueista suuren ulkoisen ravinnekuormituksen vuoksi. Valtaosa ravinnekuormituksesta on peräisin Neva-joen valuma-alueelta ja Pietarin kaupungista. Useat Suomenlahden ominaisuuksiin liittyvät tekijät mahdollistavat fosforin vapautumisen sedimentistä pohjanläheiseen veteen. Suomenlahden sedimentit sisältävät korkean määrän eloperäistä ainesta sekä ravinteita, mikä johtaa sedimentin heikkoon fosforin pidätyskykyyn ja voimistuvaan fosforin vapautumiseen sedimenteistä. Huokosveden suuret liukoisien fosforin pitoisuudet (yleensä 3-10 mg/l, mutta myös yli 10 mg/l) aiheuttavat fosforin voimakkaan diffuusion kohti sedimentti-vesi rajapintaa. Taulukossa 2 esitetään Itämeren ravinnepitoisuudet. (Lehtoranta 2003, 25- 26.)

Taulukko 2. Ravinnepitoisuudet Itämeressä. (Lehtoranta 2003, 25-26.)

Sedimenttien ravinnepitoisuudet Itämeressä	Kokonaistyyppi [mg/g]	Kokonaisfosfori [mg/g]
Suomenlahti	8.6	3.2
Pohjanmeri	2	1.3
Pohjanlahti	4	1.5
Varsinainen Itämeri	7.3-7.9	1.3-1.6

4 CASE: BIOMERI OY

Biomeri Oy on yritys, joka on perustettu syksyllä 2008. Toiminta on toistaiseksi keskittynyt konsultointiin sekä tässä case:ssa esitettyyn liiketoimintamalliin. Biomeri Oy:n perustaja Kai Kronström on toiminut tämän case - tapauksen lähteenä ja auttanut työn edistymisessä. (Kronström 2010.)

Biomeri Oy:n liikeidea on syntynyt siitä ajatuksesta, että Itämeren rehevöityminen ja sen aiheuttamat leväkukinnot ovat merkittävä ongelma niin ympäristölle kuin ihmisten toiminnallekin. Toisaalta tällä hetkellä on maailmanlaajuinen tarve korvata fossiiliset polttoaineet bioenergialla. Bioenergialle löytyy toisin sanoen kysyntää. Levää on käytetty toistaiseksi lähinnä elintarviketeollisuuden raaka-ainelähteenä (agar, karrageeni), aasialaisessa ruoassa sekä luontaistuotteissa. Sitä voitaisiin kuitenkin hyödyntää muuhunkin tarkoitukseen. (Kronström 2010.)

Mikrolevillä on suurta potentiaalia bioenergian uudeksi lähteeksi ja sitä on tutkittu laajasti maailmalla (Suokko 2010, 64). Tässä case:ssa on kyse kuitenkin makrolevistä, joita voi hyödyntää usealla tavalla. Elintarvikekäytön lisäksi makrolevää voidaan hyödyntää teollisuuden materiaalina ja biolannoitteiden valmistuksessa. Yhtenä vaihtoehtona on biokaasun tuottaminen, mutta se ei ole toistaiseksi osoittautunut kannattavaksi. Alustavat

kasvutestit ovat kuitenkin osoittaneet, että maanparannusaineena makrolevä on lähes yhtä tehokasta kuin kaupalliset lannoitteet. Haittapuolena on kuitenkin levän mahdollinen kontaminaatio. Myös biodieselin valmistus makrolevästä on mahdollista. (Filipkowska et al. 2008, 261- 270.)

Leviä voidaan hyödyntää usealla tavalla ja ne voivat olla yksi tulevaisuuden energiantuotannon ratkaisuista. Toistaiseksi kaupallista toimintaa on kuitenkin vielä vähän ja ongelmana on bioenergian taloudellinen kannattavuus. Useimmat kokeet osoittavat, että sekä leväöljyn että biokaasun tai biodieselin tuottaminen on kannattamatonta. Kannattava toiminta vaatii integroitua toimintaa sekä useiden tuotteiden jalostamista levästä. (Filipkowska et al. 2008, 261- 270.)

4.1 Biomeri Oy:n liiketoimintakonsepti

Biomeri Oy:n liikeidea on ”*kehittää ja kaupallistaa makrolevien kasvatusteknologia, joka mahdollistaa suurien makrolevämäärien tuottamisen kustannustehokkaasti avoimilla vesialueilla*”. Makrolevän viljely tapahtuu siis rantojen ulkopuolella ja ajatuksena on, että makrolevä kiinnittyy ja kasvaa kuitukankaaseen. Kuitukankaiset kasvualustat helpottavat levän keräämistä ja nostamista vedestä. Kuitukangasalustoista on tehty jo alustavia prototyyppisiä ja koeviljelmiä tehdään kevät-kesällä 2010. (Kronström 2010.)

Leväviljelyyn liittyy toistaiseksi vielä paljon epätietoisuutta. On epäselvää, kuinka paljon levä kasvaa vuosittain ja mikä on levien loppukäyttö keräämisen jälkeen. Todennäköisimpiä vaihtoehtoja ovat biokaasun tuottaminen, ravinteiden erottaminen makrolevästä sekä suora hyödyntäminen maanparannusaineena. (Kronström 2010.)

Biodieselin valmistukseen makrolevän lipidipitoisuus sekä lämpöarvo ovat liian alhaisia verrattuna esimerkiksi mikrolevän vastaaviin arvoihin. Bioetanolin tuottaminen on sen sijaan vartenotettava vaihtoehto, jos se integroidaan muihin levän hyödyntämismahdollisuuksiin. Bioetanolin tuottamisella levästä on monia etuja verrattuna bioetanolin valmistukseen viljelykasveista. Tällä hetkellä makrolevästä on energiahyötykäytön kannalta potentiaalisinta valmistaa biokaasua. Makrolevät eivät sisällä ligniiniä ja niillä on matala selluloosapitoisuus, joten metaanin valmistaminen mädätyksen avulla on suhteellisen yksinkertaista. Mädätyksen lisäksi biokaasu voidaan tuottaa termisellä kaasuttamisella. Yksi vaihtoehto on myös ravinteiden kierrätys, joko käyttämällä levää suoraan lannoitteena tai erottamalla siitä ravinteet. Kun levää käytetään sellaisenaan lannoitteena, ongelmaksi muodostuu suuri kontaminaatoriski. Toistaiseksi kannattavin vaihtoehto näyttäisi olevan makrolevän hyödyntäminen useampaan tarkoitukseen. (Kronström 2010.)

Biomeri Oy:n liikeideaa voidaan pitää ympäristöinnovaationa. Innovaation ansiosta voidaan puhdistaa Itämeren leväkukinnoilta ja taistella rehevöitymistä vastaan. Toisaalta yritys saa käyttöönsä biomassaa, josta voidaan hyödyntää taloudellisesti. Usein ympäristöinnovaatiossa yhdistyy pitkän ajan ympäristöllinen päämäärä sekä lyhyen tähtäimen liiketoiminnallinen tavoite. Ympäristöinnovaatio ei olisi ympäristöinnovaatio, ellei siinä jollain lailla pyritäisiin ratkaisemaan ympäristöongelmaa tai parantamaan ympäristön tilaa tavanomaiseen tilanteeseen nähden (business as usual). Toisaalta yrityksen kannalta millä tahansa innovaatiolla tulee olla myös liiketoimintaa parantava aspekti. Biomeri Oy:n tavoitteena on kehittää teknologia, jolla levää voidaan kasvattaa ja kerätä pois sekä saada tästä taloudellista hyötyä. Taloudellinen hyöty määräytyy tässä tapauksessa biomassan hyötykäytön arvon perusteella. Toisaalta yrityksen toiminnasta saadaan myös ympäristöhyöty, joka voitaisiin muuttaa myös taloudelliseksi eduksi, jos sille löytyy maksajia. Haastavinta ympäristöinnovaatiossa on juurikin pitkän- ja lyhyen ajan tähtäimien yhdistäminen niin, että molemmat täyttävät tavoitteensa.

4.2 Markkinoille tuonnin haasteet

Leväviljelyn kannalta kysymysmerkkejä herättävät levän vuosittainen tuotantomäärä sekä kasvunopeus. SYKE:n makrolevätutkijan FT Kirsi Kostamon johdolla suoritetaan kesällä 2010 kenttäkokeita ja kaksi koeviljelyä Helsingin ja Turun alueella. Tällöin saadaan tarkempaa tietoa kasvatukseen liittyvistä epävarmuuksista. Tämänhetkisten karkeiden arvioiden mukaan voimakasravinteisista vesistä olisi saatavissa kuivapainoltaan 2000 kg/ha suuruinen kertatuotto. Sitä ei kuitenkaan tiedetä, että kuinka usein tällainen tuotto olisi vuoden aikana saatavissa. Vastaavanlaisessa levämässä oletetaan olevan 1100 kg hiiltä, 183 kg typpeä ja 27 kg fosforia. (Kronström 2010.)

Levän loppukäyttö on vielä pohdinnan alla, koska kannattavaa toimintamallia ei ole vielä löytynyt. Jos oletetaan, että jäteveden puhdistamojen kustannustaso on typen osalta 5 €/kg ja vastaavasti fosforin osalta 36 €/kg (vrt. epäorgaanisen fosforin hinta on noin 1 €/kg), niin oletetun hehtaariuoton ravinnemäärän vaihtoehtoiskustannus on 1887 € Biokaasun arvo on 560 € jos oletetaan, että 60 % hiilestä muuttuu metaaniksi ja biokaasun arvo on sama kuin maakaasun hinta. (Kronström 2010.)

Fosforin kierrätyksen kannalta levän fosforipitoisuudet ovat liian alhaiset. Fosforin erotus pitäisi integroida muuhun levän hyötykäyttöön, esimerkiksi biokaasun tuottamiseen. Kierrätetyn fosforin hinta on toistaiseksi merkittävästi suurempi kuin fosforin markkinahinta fosfaattikivestä louhittuna. Myös biokaasun hinta on maakaasun hintaa selvästi korkeampi. Leväbiomassan hyödyntäminen ravinteiden kierrätyksen ja biokaasun tuottamisen näkökulmasta on sellaisenaan kannattamatonta. (Kronström 2010.)

Itämereen päästettävä fosforikuorma aiheuttaa rehevöitymistä. Rehevöitymistä voidaan pitää maatalouden, lannoiteteollisuuden ja fosforin jalostusketjun ulkoiskustannuksena. Näiden

toimijoiden toiminta aiheuttaa negatiivisia ympäristövaikutuksia, joista yhteiskunta kärsii ja joutuu lopulta maksamaan. Ulkoiskustannuksella ei ole tällä hetkellä hintaa, mutta jos sellainen olisi, voitaisiin määrittää kerätyn biomassan arvo.

Yhden hehtaarin leväviljely tuotto vastaa noin 4000 kirjolohikilon päästöjä. Koko Suomen kalankasvatuksen fosforikuorma poistuisi noin 25 km²:n kokoisella alueella. Yhtenä vaihtoehtona on leväviljely jokisuistoissa ja kalankasvattamojen lähellä, joissa on runsaasti ravinteita. Kun ravinteiden poisto pystytään hinnoittelemaan, voidaan luoda kuluttaja- tai organisaatiotuotteita. Esimerkkinä voisi olla kauppakettjulle oma ravinnepestötön kirjolohifille. Tällainen brändi- yhteistyömalli toimisi kuitenkin melko pienillä volyymeillä. (Kronström 2010.)

Tällä hetkellä on käynnissä koeprojekteja, joiden rahoitus tulee useista lähteistä. Samalla yritetään selvittää levien hyödyntämispotentiaali ja yhteistyökumppanit, jotka olisivat kiinnostuneina leväbiomassasta. Leväbiomassan keräämisestä voisi olla hyötyä useille erisidosryhmille. Ympäristöviranomaiset ovat kiinnostuneita Itämeren puhdistamisesta. Lannoiteyritykset tarvitsevat fosforia ja he voisivat jalostaa suoraan levästä biolannoitetta tai valmistaa erotetusta fosforista kierrätyslannoitetta. Kierrätyslannoitteesta voitaisiin tehdä luomuelintarvikkeiden tapainen tuote, josta kuluttajat tietäisivät, että sen käyttäminen on ympäristömyönteistä. Bioenergialaitokset voisivat käyttää leväbiomassaa energian tuotantoon. Kalankasvattamot, karjantuotantolaitokset, maatilat ja muut vastaavat tuotantolaitokset voisivat kompensoida ravinnekuormaansa leväkeruulla. Levästä voidaan jalostaa erilaisia luontaistuotteita sekä aineita kosmetiikka- ja lääketeollisuuteen. (Kronström 2010.)

Ravinteiden kierrätyksen kannalta Biomeri Oy:n toiminta olisi kannattamatonta, koska kierrätetyille ravinteille ei ole vielä kunnollisia markkinoita ja niiden hinta on todella korkea. Merien ravinnekuormituksesta aiheutuva rehevöityminen on selkeä ulkoiskustannus, jolle on kuitenkin vaikea asettaa hintaa. Tämä on hyvin tyypillistä ympäristöinnovaatioiden kohdalla.

Yritysten toiminta aiheuttaa päästöjä, joista yhteiskunta joutuu kärsimään ja maksamaan. Täten tarvitaan taloudellisia kannustimia, kuten tuet, verovähennykset tai syöttötariffit, tai liiketoimintakonseptin kehittämistä, jotta Biomeri Oy:n innovaatio saataisiin kaupallistettua.

4.3 Ratkaisumalleja

Biomeri Oy:lle haasteita aiheuttavat menetelmän teknisen osaamisen sijaan erityisesti tuotteen kysyntäpuoli, jolla on vielä paljon epävarmuustekijöitä. Varsinaista kysyntää tuotteelle ei vielä ole, koska sille ei ole valmiita markkinoita. Potentiaalisin käyttökohde erotetulle fosforille on maanviljely. Lopullinen kuluttaja on siis maanviljelijä, jonka kysyntä on edellytyksenä Biomeri Oy:n toiminnalle fosforin kierrätyksen saralla. Vastaavaa kysyntäketjua ei tällä hetkellä ole olemassa, joten se täytyy luoda, mikäli halutaan kaupallinen toiminta käyntiin. Tämän työn kannalta mielenkiintoisinta on tarkastella fosforin erotusta ja talteenottoa leväbiomassasta.

Fosforin talteenotto leväbiomassasta voidaan toteuttaa mädätyksen kautta samalla tavoin kuin jäteveden puhdistuslaitoksella. Talteenottoon voidaan yhdistää myös poltto, jolloin saadaan lisäksi bioenergiaa. Leväbiomassan keräämisen jälkeen se täytyy kuljettaa sopivalle jatkokäsittelylaitokselle, joka on joko integroituna valmiiseen laitokseen tai rakennettu juuri leväkäsittelyä varten. Tämän jälkeen erotettu fosfori käytetään joko sellaisenaan tai jalostetaan vielä pidemmälle esimerkiksi lannoitetehtaalla.

Kierrätetyn fosforin hinta on liian korkea epäorgaaniseen fosforiin nähden. Kysyntä pitäisi synnyttää joko muuttamalla lopputuotteen yhteiskunnallista merkitystä tai hintakilpailulla, jota pohditaan laajemmin kappaleessa 6. Hintakilpailu vaatii ennen kaikkea valtion puuttamista markkinoihin asettamalla tiukat ohjauskeinot. Ennemmin tai myöhemmin epäorgaanisen fosforin hinta tulee nousemaan joko varastojen ehtymisen vuoksi tai valtiovallan ohjauk-

sen avulla. Fosforin hinta maailmanmarkkinoilla on ollut vuoden 2008- 2009 hintapiikin jälkeä toistaiseksi varsin stabiili. Erilaisten määräysten ja markkinalähtöisten ohjauskeinojen avulla epäorgaanisen ja orgaanisen fosforin hinnat saadaan kohtaamaan.

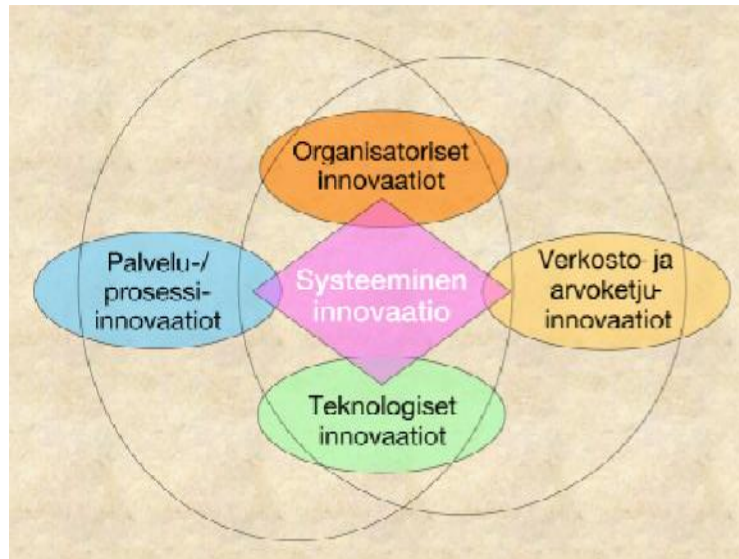
Kysyntä voidaan synnyttää muuttamalla lopputuotteen eli kierrätetyn fosforin arvoa ja symbolista merkitystä. Kierrätetty fosfori edustaa puhtaampaa luontoa ja kestävämpää luonnon käyttöä. Se vetoaa kuluttajien vihreisiin arvoihin. Epäorgaaniseen fosforiin verrattuna orgaanisen fosforin tulisi edustaa korkeampiluokkaista tuotetta. Kuluttajamarkkinoilla tämä voisi tarkoittaa sitä, että orgaanisen fosforin käyttäjät saisivat tietyn ekomerkin tai -sertifikaatin lopputuotteisiinsa. Esimerkeiksi käyvät ravinnepäästöttömät lohifileet tai orgaanisesti tuotetut maataloustuotteet. Nämä tuotteet on tuotettu kestävien ympäristöarvojen, kuten kierrätetyn fosforin avulla ja ne ovat muutenkin korkealuokkaisia, joten ne vetoavat ympäristötietoisiin kuluttajiin.

Tällä hetkellä Biomeri Oy:n suurin huolenaihe on kannattamaton toiminta heikon fosforin hinnan vuoksi. Ratkaisua voitaisiin hakea PPP- mallista eli Public-Private-Partnership -mallista, joka on yksityisrahoitusmalli julkisessa palveluntuotannossa. Julkisen sektorin intressi on ensisijaisesti Itämeren puhdistaminen ravinteista ja toissijaisesti fosforin kierrätyksen tukeminen. Julkinen sektori voisi ostaa puhdistus- ja kierrätyspalveluita Biomeri Oy:ltä, jolloin Biomeri Oy hoitaisi kaikki käytännön asiat ja kantaisi vastuun järjestelmän toimimisesta. Julkinen sektori maksaisi sopimuksen mukaisen palkkion, joka auttaisi Biomeri Oy:tä saamaan toiminnastaan kannattavan.

5 SYSTEEMI-INNOVAATIO JA SEN KEHITTYMINEN

Nykyään on olemassa paljon uutta teknologiaa, uusia laitteita ja koneita, joita ei kuitenkaan käytetä. Osaksi tämä johtuu taloudellisista syistä, mutta osaksi myös siitä, ettei ole olemassa sopivaa infrastruktuuria, lainsäädäntöä, kulttuuria tai yhteiskuntaa. Monet nykyiset yhteiskunnalliset järjestelmät on suunniteltu ja kehitetty vuosikymmeniä sitten. Olemassa olevat systeemit näyttäisivät olevan lukkiutuneina monista ulottuvuuksista. Uuden teknologian käyttöönotto vaatisi muutoksia käyttäjätoiminnoissa, lainsäädännössä sekä infrastruktuurissa. Systeemi-innovaatioiden uudet ideat syntyvät vallitsevien järjestelmien ulkopuolella yrityksissä ja kansalaisyhteisöissä. Systeemi-innovaatioiden merkitystä on viime aikoina korostettu kestävässä kehityksessä, mutta silti ei tiedetä miten systeemi-innovaatio ilmenee ja miten poliittiset päättäjät voivat siihen vaikuttaa. Systeemi-innovaatioiden ymmärtäminen vaatii innovaatiokäsitteen ja -ajattelun uudistamista ja laajentamista organisatoristen, institutionaalisten ja sosiaalisten innovaatioiden suuntaan. (Elzen et al. 2004, 19; Hämäläinen 2007.)

Seuraava kuva 1 pyrkii havainnollistamaan systeemi-innovaatioiden eri ulottuvuudet. Näiden kehittäminen vaatii yhteistyötä yksityisen, julkisen ja kansalaissektorin kesken. Organisointiin liittyy niin sanottu julkishyödykeongelma, eli projekti hyödyttää kaikkia yhteistyön osapuolia, mutta organisoinnista aiheutuvat kustannukset rasittavat vain yhteistyön organisoijia. Tämän vuoksi systeemi-innovaatioiden kehittämiseen ja niiden organisointiin vaaditaan julkista panostusta ja erillistä yhteistyötä tukevaa organisaatiota. Systeemi-innovaatiot voisivat olla Suomen tulevaisuuden vientivaltti, mutta se vaatii määrätietoista politiikkaa systeemi-innovaatioiden kehittämiseksi. Tämän hetken ongelmana on se, että projektien kokemukset eivät kumuloidu minnekään, hyvät käytännöt eivät leviä ja samoja virheitä toistetaan yhä uudestaan. (Hämäläinen 2007.)



Kuva 1. Systeemi-innovaation kehittämisskaavio. (Kivisaari ja Saranummi 2006, 1.)

5.1 Systeemi-innovaation määritelmä

Systeemi-innovaatio on laaja-alainen muutos yhteiskunnan järjestelmässä kuten liikenteessä, viestinnässä, asumisessa tai ruokailussa. Yksinkertaisesti sanottuna systeemi-innovaatio on muutos yhdestä sosioteknisestä järjestelmästä toiseen. ”Sosiotekninen järjestelmä on teknis-yhteiskunnallinen kokonaisuus, jonka puitteissa yhteiskunnassa tuotetaan jokin funktionaalinen kokonaisuus (esimerkiksi energia-, liikenne- tai terveydenhuollon järjestelmä) tai sen osa-alue(sähköjärjestelmä, joukkoliikennejärjestelmä, neuvolajärjestelmä).” (Lovio, 2010)

Systeemi-innovaatio voidaan määritellä seuraavien neljän käsitteen avulla:

1. Muutokset tarjonta- sekä kysyntäpuolen rakenteissa
 - a. Tarjontapuolella teknologia, tietotaito ja teollisuuden rakenteet muuttuvat
 - b. Kysyntäpuolella käyttäjämieltymykset, kulttuuriset tai symboliset käsitykset ja infrastruktuuri muuttuvat
2. Rakenteellinen innovaatio
 - a. Perusteelliset muutokset kaikkialla sosio-tekni- sen järjestelmän rakenteissa, mukaan lukien käyttäjäpuolen

3. Multitoimijaprosessi
 - a. Vuorovaikutusta ei pelkästään yhteiskunnallisen ryhmän sisällä vaan myös eri yhteiskunnallisten ryhmien kesken
 - b. Sidosryhmät pitävät sisällään muun muassa yritykset, toimittajat, alihankkijat, yliopistot, tieteelliset laitokset, viranomaiset, julkiset järjestöt ja käyttäjät
 - c. Sidosryhmien toiminta ja kanssakäyminen synnyttää ja ylläpitää sosioteknisen järjestelmän
4. Systeemi-innovaatiot vaativat pitkiä ajanjaksoja, usein muutamia vuosikymmeniä tapahtuakseen. (Elzen et al. 2004, 4-7.)

5.2 Ohjaaminen

Yhteiskunnan eri päättäjätahot pohtivat miten systeemi-innovaatioihin voi vaikuttaa ja miten voidaan tunnistaa mahdollisia lupaavia kehityssuuntia. Tämä on vaikeaa, sillä systeemi-innovaatioiden kohdalla on huomioitava, että julkinen valta on vain yksi toimija muiden yhteiskunnallisten ryhmien joukossa. Sillä on muiden ryhmien tavoin rajallinen valta, rajallinen näkökulma ja rajalliset voimavarat. Poliitiikkaopissa voidaan erottaa kolme erilaista politiikkamallia:

1. Perinteinen ylhäältä alas malli, jossa hallinnolla (valtiolla) on keskeinen rooli ja hierarkkiset suhteet.
2. Alhaalta ylös tai markkinalähtöinen malli, jossa paikallisilla toimijoilla on laaja autonomian aste.
3. Governance tai poliittinen verkostomalli, jossa itsenäisillä toimijoilla on jaettu valta sääntöjen ja sopimusten tekoon.

Nämä kolme mallia eroavat perusfilosofioidensa lisäksi ohjausvälineiden perusteella. Muodolliset säännöt ja säännöstöt ohjaavat perinteisessä command-and-control -mallissa.

Markkinalähtöistä mallia ohjaavat valtiontuet, verot ja taloudelliset kannustimet. Kolmannessa mallissa ohjausvälineinä ovat verkoston hallinta, oppimisprosessit, kokemukset ja interaktiivinen päätäntävalta. Näitä kaikkia kolmea mallia esiintyy nykyisissä demokraattisissa yhteiskunnissa, mutta eri suhteissa. Tämä vaikeuttaa entisestään systeemi-innovaatioiden hallintaa sekä herättää kysymyksen: onko olemassa yhdenlainen politiikkamalli, jonka avulla voidaan parhaiten siirtyä sosioteknisestä systeemistä toiseen vai tarvitaanko yhdistettyjä malleja? (Elzen et al. 2004, 8- 9.)

5.2.1 Erilaiset ohjauskeinot ja niiden vaikutus

Erilaisilla poliittisilla ohjauskeinoilla saadaan aikaiseksi kiihokkeita, jotka vaikuttavat yritysten ja kotitalouksien ympäristöteknologian kehittämiseen ja omaksumiseen eri tavoin. Sopivien ohjauskeinojen löytäminen voi edistää ympäristöinnovaatioiden kehittymistä ja leviämistä kaikkialle yhteiskuntaan. Ohjauskeinot voidaan luokitella markkina-, määräys- tai informaatiopohjaisiksi. (Horbach 2005, 22.)

MARKKINAMEKANISMIT:

1. Verot

- Tuotantopanosten suhteellinen hinta
 - o Yritykset pyrkivät säästämään kuluissa, joita syntyy ympäristön vahingoittamisesta
- Kiinteä hinta esimerkiksi päästöille
- Sijoittajan näkökulmasta turvallisempia kiinteän hinnan vuoksi
- Innovaation aste voi olla korkeampi
- Ympäristöpolitiikan linja voi olla lievempi

2. Päästöoikeudet

- Tuotantopanosten suhteellinen hinta

- Yritykset pyrkivät säästämään kuluissa, joita syntyy ympäristön vahingoittamisesta
- Kiinteä määrä esimerkiksi päästöille
- Sijoittajan näkökulmasta riskialttiimpaa
- Oikeuksien ilmaisaon tapauksessa innovaation aste voi olla korkea, jos ympäristöpolitiikka on tiukka

3. Tukiohjelmat ja verohelpotukset

- Tehokkaita uusien teknologioiden levittämisessä
- Ongelma on erottaa ne investoijat jotka investoivat ainoastaan tukien myötä niistä, jotka investoisivat joka tapauksessa
- Innovaatioiden ja niiden leviämisen suuntausta voidaan ohjata

MÄÄRÄYKSET:

1. Tuotantonormit

- Määrälliset rajoitukset tietyille tuotantopanoksille tai päästöille
- Kannustaa innovaatioiden kehittämiseen ja levittämiseen → saavutetaan kustannussäästöjä
- Hallinnollinen riski

2. Teknologianormit

- Tietyn teknologian käyttäminen
- Ei kannusta merkittäviin innovaatioihin
- Taloudellinen sekä hallinnollinen riski

3. Tuotantopanoskielto

- Korvaavan materiaalin kehittäminen
- Innovaation suuntaus voi olla väärä
 - CFC- aineiden käyttökielto edisti HCFH- aineiden käyttöä, jolla on myös merkittävä otsonia heikentävä vaikutus
- Muutos tapahtuu kerran, ei ole siis kannustimena jatkuvaan parantamiseen

INFORMAATIO-OHJAUS:

- Vetoavat havaintoihin, suhtautumiseen sekä mieltymyksiin
- Esittelevät vaihtoehtoiset tuotanto- ja toimintatavat
- Harvoin yksinään ratkaisevat ongelmia
 - o Tehokkaita rinnakkaisvälineitä
- Edistävät ympäristömyönteistä kehitystä
 - o Usein asianmukaisen tiedon puute vaikeuttaa ympäristömyönteisten päätösten tekoa

(Horbach 2005, 22- 38.)

Yleisesti voidaan sanoa, että markkinapohjaiset ohjauskeinot ovat tehokkaita ympäristömyönteisen tutkimus- ja kehitystyön, innovaatioiden sekä uusien teknologioiden leviämisen edistämässä. Empiirinen kokemus tästä on rajallista, sillä markkinainstrumenttien joustava luonne vaikeuttaa tarkoitustenmukaisten riippuvuuksien tunnistamista. Todistusaineistoa saadaan kuitenkin Yhdysvaltalaisesta Acid Rain -ohjelmasta. Acid Rain (happamoitumisen ehkäisy ohjelma) -ohjelmassa pyrittiin vähentämään rikkidioksidipäästöjä kaupattavien päästöoikeuksien avulla (päästökauppa). Ohjelmaa edelsi Clean Air Act - määräykset, jotka edellyttivät savukaasujen puhdistamista yhdellä ainoalla keinolla (pesurien asentaminen). Päästökauppa antoi yrityksille joustavimmat vaihtoehdot päästöjen vähentämiseksi ja vain 10 % yrityksistä käytti enää pesureita. Päästökauppaohjelma sen sijaan rohkaisi yrityksiä kehittämään erilaisia innovaatioita. (Horbach 2005, 26.)

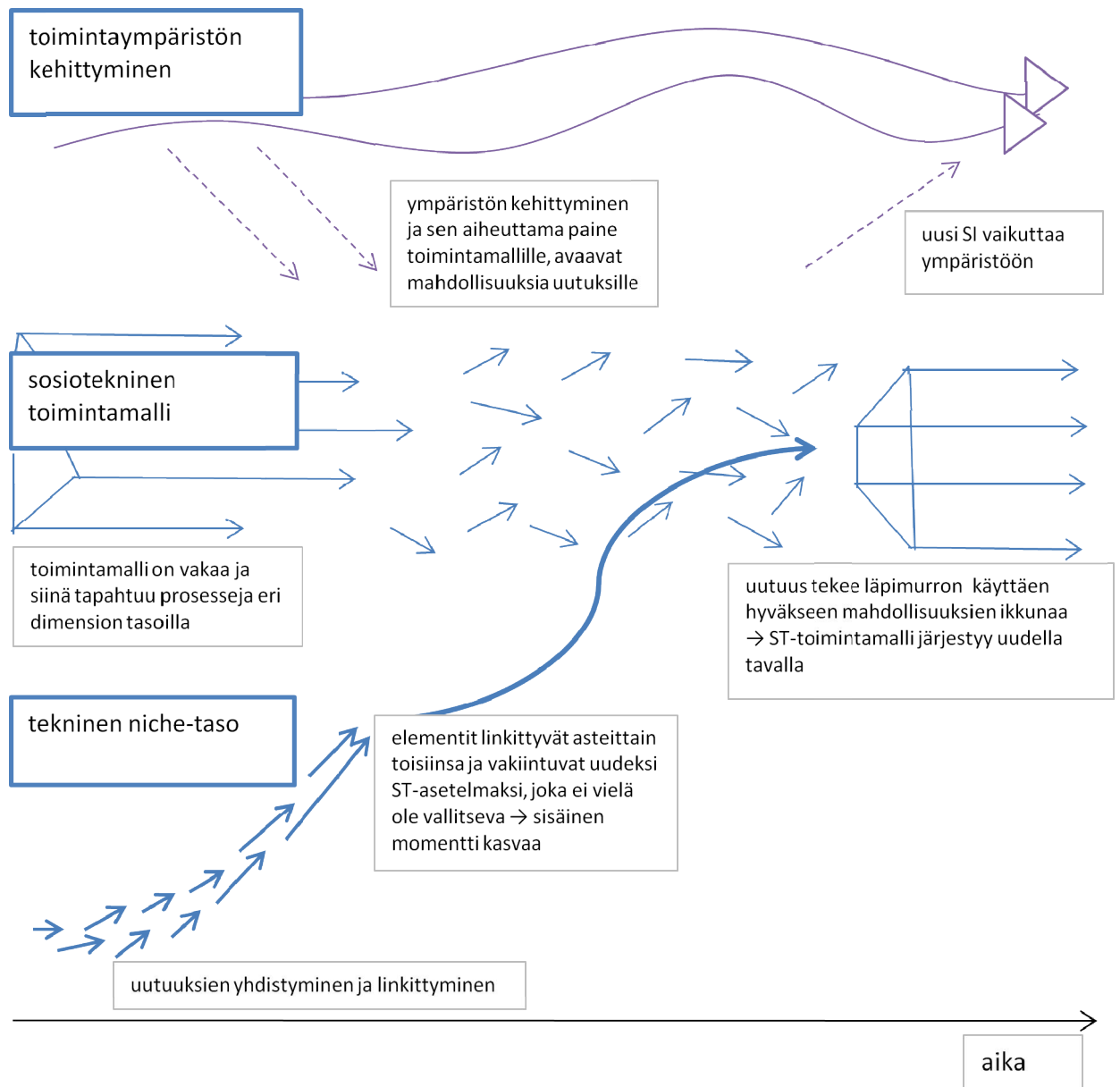
Jotta innovaation suuntaus olisi oikea, ohjausmekanismit tulisi pyrkiä asettamaan mahdollisimman lähelle lopullista ympäristövahinkoa. Samalla pitäisi valita ratkaisu, joka on mahdollisimman kustannustehokas pitkällä aikavälillä ja joka samalla täyttää annetut ympäristölliset tavoitteet. Valittaessa sopivia ohjausvälineitä on tarkasteltava markkinoiden rakennetta, tuotantoon liittyviä teknologioita tekijöitä sekä arvioitava alaan liittyvää ympäristövahinkoa. Yleisesti ottaen pitäisi valita ne ohjauskeinot, jotka antavat joustavuutta

päämäärään pääsemiseksi sekä tarjoavat kannustimia jatkuvaan parantamiseen. (Horbach 2005, 38)

5.3 Systeemi-innovaation kehittyminen ja sosio-tekni­sen järjestelmän rakenteellinen siirtymä

On tärkeää ymmärtää sosioteknisen muuttumisen perusteita, jotta muutokseen voitaisiin myötävaikuttaa. Monilla sidosryhmillä ja etenkin päättäjillä on kova halu ymmärtää muutosta ja kyetä vaikuttamaan siihen. Etenkin ympäristöongelmat ovat tänä päivänä päättäjien päänvaivana. Siinä missä ennen haettiin ratkaisuja piipunpääteknologialla, nyt halutaan perusteellisempaa muutosta ja kehitystä kaikkialla järjestelmän rakenteissa. Vain kokonaisvaltaisella systeemi-innovaatiolla voidaan saavuttaa korkeampi ympäristötehokkuus; piipunpääteknologian ympäristötehokkuuskerroin on 2, osittaisen systeemimuutoksen kerroin on 5 ja kokonaisvaltaisen systeemin muutoksen eli täysin uuden systeemin kerroin on 10. (Elzen et al. 2004, 1- 2.)

Sosio-tekni­sen järjestelmän rakenteellinen siirtymä tarkoittaa, että jokin sosio-tekni­nen järjestelmä siirtyy uuteen hallitsevaan toimintamalliin. Siirtymän hetkellä tapahtuu samanaikaisesti systeemi-innovaatio. Rakenteellisen siirtymän teoreettinen malli perustuu multitasoperspektiivi, jota voidaan analysoida kolmen tason välillä ja niiden sisällä tapahtuvien vuorovaikutusten kautta. Kuva 2 pyrkii havainnollistamaan multitasoperspektiivin elementtejä ja niiden vuorovaikutusta.



Kuva 2. Multitasoperspektiivi-malli. (Elzen et al. 2004, 38.)

Sosio-tekni- sen järjestelmän ylin taso on toimintaympäristö, joka on ulkoinen ympäristö hallitsevan toimintamallin ulottumattomissa. Siihen kuuluvat muun muassa taloudellinen

kehitys, maastamuutto, materiaallinen infrastruktuuri, luonnollinen ympäristö, makroekonomia, sosiaaliset arvot, laajat poliittiset ryhmittymät ja kulttuuriset arvot, jotka luovat puitteet vallitseville toimintamalleille. Keskimäinen taso on vallitseva toimintamalli, jolla sosio-tekniinen järjestelmä toimii. Järjestelmän toimijat määrittelevät toimintamallin säännöt, jotka ylläpitävät järjestelmän pysyvyyttä. Mallin alin taso muodostuu rajatuista sovellusalueista, joilla tapahtuu uudenlaisten, innovatiivisten ratkaisujen kehittäminen ja kokeilu. Niche -alan tarkoitus on suojella kokeilu- ja tutkimustoimintaa, jossa kehitetään vallitsevasta toimintamallista eroavia uusia normeja ja käytäntöjä. (Elzen et al. 2004, 37- 38.)

5.3.1 Muutosprosessi

Sosio-tekniisen järjestelmän rakenteellinen muutos tapahtuu edellä mainittujen eritasoisten prosessien vuorovaikutuksesta. Niche -tason kokeista voidaan oppia, parantaa ja kehittää edelleen uutta teknologiaa. Niche -tasolla kehitetyt innovaatiot muodostavat verkostoja ja voivat linkittyä toisiinsa. Kun ulkoiset olosuhteet ovat niille suotuisat, ne voivat tulla hyväksytyksi ja levitä laajempaan käyttöön. Toimintamallin ja toimintaympäristön vuorovaikutukset voivat avata mahdollisuuksien ikkunan näille uusille radikaaleille innovaatioille. Tähän vaikuttavat vallitsevan toimintamallin jännitteet. Painetta toimintamallia kohtaan voivat synnyttää toimintaympäristön muutokset, kuten tämänhetkinen ilmastonmuutos, tai toimintamallin sisäiset paineet, kuten pullonkaulat, ulkoishaitat tai muuttuneet käyttäjämieltymykset. Uuden teknologian leviäminen ja läpimurto ovat useiden yhteen kytkeytyneiden kehitysvaiheiden tuloksia. Taloudelliset tekijät, kuten hinta- laatusuhde ajavat vanhan teknologian korvaamista uudella. (Elzen et al. 2004, 37- 42.)

Yhtenä esimerkkinä toimintamallin siirtymisestä uuteen voidaan esittää merenkulun kehitys purjelaivoista höyrylaivoihin. Tässä esimerkissä niche -elementit tekivät läpimurron kytkeytymällä vallitsevaan toimintamalliin. Höyrylaivat ratkaisivat silloisen toimintamallin jännitteet, jotka syntyivät purjelaivojen epäsäännöllisistä aikatauluista. Tässä esimerkkitapauksessa kyse

ei ollut niinkään höyrylaivojen paremmasta kilpailukyvyistä, vaan enemmänkin siitä, että uusi teknologia pystyi ratkaisemaan vanhan teknologian pullonkaulan ja tekemään läpimurron. Toimintamallin jännitteinä toimivat muutokset toimintaympäristössä, kuten laajat taloudelliset ja väestöä koskevat muutokset. Miljoonat eurooppalaiset lähtivät Amerikkaan 1800- 1900 luvuilla, mikä aiheutti voimistuvan tarpeen Atlantin ylisin laivakuljetuksiin. (Elzen et al. 2004, 55- 56.)

Tänä päivänä paineita muodostuu terveydenhoitoalalle väestön ikääntymisestä, ympäristöalalle luonnonvarojen holtittomasta käytöstä, energiantuotannolle ja liikennesektorille hiili-intensiivisyydestä sekä maatalouteen kemikaali-intensiivisyydestä. Tällaisissa tapauksissa muutos tapahtuu yleensä ylhäältä alas eli muutoksen toimintamallissa käynnistää toimintaympäristö. Tällaisten muutosten yhteydessä puhutaan usein myös politiikkainnovaatioista. Niiden rakenteellinen siirtyminen edellyttää laajaa yhteisymmärrystä ja julkisen sektorin merkittävää roolia muutosprosessin tukijana. Nykypäivänä OECD:n ja EU:n kaltaiset organisaatiot synnyttävät tämän tyyppisiä politiikkainnovaatioita. (Lovio ja Kivisaari 2010, 34- 36.)

Muutosprosessien välillä ilmenee syvyyseroja, joita voidaan kuvata tarkastelemalla muutoksen alkujuurta ja kohdetta sekä toimijoiden roolia. Muutosprosesseista voidaan erottaa kolme muutoksen astetta: uusintaminen, muuntuminen ja rakennemuutos. Uusintaminen vastaa pienimuotoisinta muutoksen astetta ja viittaa lähinnä uudistamiseen toimintamallin tasolla. Muuntuminen on uusintamista merkittävämpi muutos, jossa esiintyy paljon toimintamallin ja toimintaympäristön välistä vuorovaikutusta, mutta vain vähän nichejen vaikutusta. Muutos tapahtuu, kun vakiintuneet toimijat suuntaavat innovaatiotoimintansa uudelleen. Rakennemuutoksessa on kyse kokonaisvaltaisesta systeemi-innovaatiosta, joka saa alkunsa epäjatkuvuuskohdasta järjestelmän kehityksessä. (Kivisaari ja Saranummi 2006, 16- 17.)

Rakennemuutoksessa muutosprosessi käynnistyy, kun toimintaympäristössä ilmenee muutoksia, jotka asettavat huomattavia ongelmia ja jännitteitä toimintamallille. Vakiintuneilla toimijoilla on yleensä pyrkimys vähätellä rakennemuutoksen tarvetta ja osittain siksi he eivät onnistu ratkaisemaan ongelmaa. Ulkopuolisten on myös helpompi kyseenalaistaa vallitsevia oletuksia ja esittää uusia ideoita. Tästä avautuu mahdollisuuden ikkuna uusille niche-innovaatioille. Uuden radikaalin innovaation läpimurtotilanteessa osa vallitsevista toimijoista joutuu siirtymään syrjään. Rakennemuutoksen jälkeen tilanne rauhoittuu ja vakautuu, jonka jälkeen uusintaminen voi taas alkaa. (Kivisaari ja Saranummi 2006, 16- 18.)

5.3.2 Muutosprosessin ohjaus

Systeemi-innovaatioille on ominaista, ettei niitä voi täysin hallita, mutta niitä voi ohjata haluttuun suuntaan. Ensimmäinen ja tärkein vaihe ohjauksessa on vision määrittäminen. Niche-tason kokeet uusilla sosio-teknisillä kokoonpanoilla luovat olosuhteet oppimiselle. Kokeiden oppia tulisi hyödyntää vision arvioimiseen ja mahdollisesti muuttamiseen. Lupaavimmat keksinnöt leviävät aktiivisen poliittisen väliintulon avulla. Uusi kompetenssi ja uudet taidot syntyvät samalla kun luodaan uudet markkinat ja edistetään asiakkaiden kysyntää. Uuden kokoonpanon asema vahvistuu ja syrjäyttää vallitsevan toimintamallin. Koko kehityksen aikana koetinkivenä on kuitenkin visio, joka on koko ajan tarkastelun kohteena ja ohjaa kohti muutosprosessin hallintaa. (Elzen et al. 2004, 56- 57.)

Innovaatiotoiminta on monitahoinen prosessi, jossa täytyy ottaa huomioon kaikki eri ulottuvuudet poliittisessa päätöksenteossa. Tämä edellyttää kokonaisvaltaista ja systemaattista lähestymistapaa, joka pyrkii vaikuttamaan sekä käynnissä olevan dynamiikan mukauttamiseen että käytävien avaamiseen tulevalle kehitykselle. Poliitiikan harjoittajien tulisi pyrkiä edistämään yhteiskunnallisesti suotuisaa kehitystä ja samalla asettamaan esteitä vähemmän toivotulle kehitykselle. Päätäjät voivat tässä suhteessa toimia ikään kuin prosessijohtajan roolissa. (Kivisaari ja Saranummi 2006, 19- 20.)

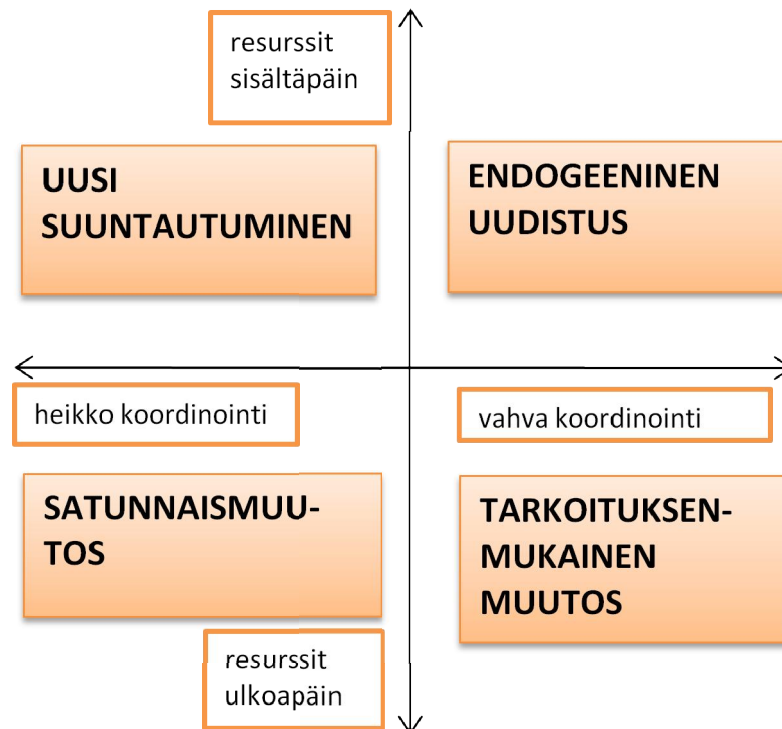
Prosessijohtamisen helpottamiseksi on luotu useita malleja ja työkaluja, mutta niille kaikille on ominaista korostaa avaintoimijoiden välistä vuoropuhelua, vuoropuhelua uusien innovaatioiden ja ympäristön välillä. Mikään yksittäinen taho ei pysty yksinään johtamaan monitahoisen toimijajoukon toimintaa. Tavoitteena on päinvastoin luoda kommunikaatiota osapuolten välille ja pitää niitä yllä prosessin aikana. Tärkeitä yhteisiä intressejä ja arvoja edustavia toimijoita ovat esimerkiksi ympäristöpäätäjät, palveluntuottajat ja teknologiatoimittajat. (Kivisaari ja Saranummi 2006, 20- 21.)

Ympäristöasioissa kehityskulku tapahtuu useimmiten ylhäältä alaspäin eikä niche -perusteisesti alhaalta ylös. Ympäristövaikuttajat lobbaavat, boikotoivat, valtaavat rakennuksia ja järjestävät mielenosoituksia. Tämä on kuitenkin eri asia kuin edellä mainitut esimerkit paineiden luomisesta vallitsevaan toimintamalliin. Edellä mainituissa tapauksissa muutokset toimintaympäristössä eivät kohdistu tiettyyn toimintamalliin, mutta ne luovat silti paineita. Muutokset ympäristössä syntyvät tavallaan itsestään eikä niiden tarkoituksena ole asettaa mitään tiettyä toimintamallia paineen alle. (Elzen et al. 2004, 59- 61.)

Kun yhteiskunnalliset ryhmät yrittävät poliittisin keinoin aiheuttaa muutoksia toimintaympäristöön, heillä on vaikutuskohteena yleensä yksi tai useampi toimintamalli. Esimerkiksi ympäristökampanjat jätehuollon kehittämiseksi oli osoitettu päätäjille, joiden toivottiin luovan muutoksia pakkaussysteemeihin, materiaalikäyttöön, jätekeräykseen ja kierrätykseen. Toisena esimerkkitapauksena voidaan esittää ydinvoiman vastustaminen. Aktivistit ovat vastustaneet ydinvoimaa ja yrittäneet vaikuttaa jokaiseen toimintamallin dimensioon: ydinvoiman status edistyksellisenä teknologiana (symbolinen merkitys), investoinnin perusta energiakysyntälaskelmissa (politiikka), määräysten ehdot ja rahoitus (teollisuuden rakenne), luotettavuuden tiedollinen uskottavuus (tieto), polttoaineen tuotannon ja jätehuollon toimivuus sekä oikeutus ja laillisuus (infrastruktuuri). (Elzen et al. 2004, 59- 61.)

5.3.3 Ideaaliset muutosprosessityypit

Muutos voidaan erotella kahden eri dimension avulla. Ensimmäinen dimensio kuvaa muutoksen tarkoituksiperää eli tapahtuuko muutos tarkoituksella vai itsestään. Toinen dimensio taas kuvaa resurssien alkuperää. Toisissa muutoksissa käytetään hyväksi resursseja, jotka tulevat järjestelmän sisältä, mutta toiset vaativat resursseja järjestelmän ulkopuolelta. Näiden tekijöiden avulla voidaan erotella neljä ideaalista tyyppiä muutosprosessille, jotka ovat esitetty kuvassa 3. (Elzen et al. 2004, 66- 70.)



Kuva 3. Neljä ideaalista muutosprosessityyppiä. (Elzen et al. 2004, 67)

1. Sisäsyntyinen eli endogeeninen uudistus. Tällaisen muutoksen saavat aikaan toimintamallin toimijat kuten yritykset, asiakkaat, tuottajat tai lainsäätäjät. Toimijat

tekevät tietoisia ponnisteluja löytääkseen ratkaisuja kilpailussa kysynnästä, joka uhkaa vallitsevaa järjestelmää. Muutosvoima ohjataan vahvasti järjestelmän sisältä, jolloin innovatiivinen toiminta muokkaantuu järjestelmän mukaan. Toisin sanoen sitä ohjataan senhetkisten arvojen, tapojen ja rutiinien avulla. Menneisyyden kokemukset ohjaavat yleensä myös tulevaisuuden ratkaisuja. Yleensä tällainen muutos on kasvunnovaatio. Joskus näin voin syntyä myös radikaaleja muutoksia, mutta silloin se tapahtuu useiden pienempien muutosten kautta. Esimerkkitapauksia ovat savukaasujen puhdistus rikkipäästöistä, termisen kapasiteetin kasvatus höyryvoimalaitoksissa ja hiilidioksidin talteenotto. (Elzen et al. 2004, 66- 70.)

2. Kehityskaaren uusi suuntautuminen. Tällaiset radikaalit muutokset tapahtuvat, kun jokin kriisi iskee joko toimintamallin sisältä tai ulkopuolelta. Muutoksen ohjaus on siis hyvin vähäistä, mutta resurssit tulevat järjestelmän sisältä. Yksi tällainen esimerkki on kombivoimalaitoksen leviäminen Iso-Britanniassa. Vastaavaa radikaalia suunnanmuutosta teknisissä sekä toiminnallisissa ominaisuuksissa sähköntuotantojärjestelmässä ei oltu ennakoitu. Muutosprosessi käynnistyi huonosti koordinoitujen teknologisten mahdollisuuksien, markkinoiden sääntömuutosten ja hiili- sekä ydinvoimasähköntuotannon parannusten ansiosta. Kuitenkin muutos tapahtui vallitsevassa sähköntuotantojärjestelmässä, eikä niin, että kehitys olisi tullut ulkoapäin. (Elzen et al. 2004, 66- 70.)

3. Satunnaismuutos eli vahvistuva muutos. Tämä on klassinen muutoksen malli, joka on täysin autonominen. Vastaava muutos tapahtuu kun syntyy löyhästi ohjattua painetta ja ratkaisuja toimintamallin ulkopuolelta. Usein tällaisen muutoksen alkuperä on tieteellisessä tutkimuksessa yliopistoissa tai pienissä yrityksissä, jotka toimivat olemassa olevan teollisuuden ulkopuolella. Energiasektorilta löytyy esimerkki primaarienergiälähde ketjusta, joka muuttui ajan myötä. Puun jälkeen vallitsi hiili, sitten öljy ja tämän jälkeen maakaasu. (Elzen et al. 2004, 66- 70.)

4. Tarkoituksenmukainen muutos. Tämä muutoksen tyyppi eroaa edellisestä siinä, että muutosta ohjataan ja muutoksella pyritään vastaamaan odotuksiin, jotka tulevat järjestelmän ulkopuolisilta tahoilta. Hyvä esimerkki löytyy ydinvoiman valjastamisesta energiakäyttöön sekä uusiutuvien energianlähteiden käyttöönotosta. Ydinvoimaa pidettiin pitkään kriittisenä teknologiana, jolla oli potentiaalia saada aikaan laajaa taloudellista ja poliittista hyötyä. Tieteelliset, poliittiset sekä teollisuuden sidosryhmät omaksuivat vision ja muodostivat voimakkaan etujärjestön, joka oli useimmiten vastakkain sähköjärjestelmän etujärjestön kanssa. (Elzen et al. 2004, 66- 70.)

6 FOSFORIN KIERRÄTYKSEN INNOVAATIOTARKASTELU

Fosforin kierron sulkeminen on ideaalinen tarkastelukohde systeemi- innovaation kannalta, sillä se täyttää kaikki systeemi-innovaation ominaisuudet. Fosforin kierron sulkeminen vaatii muutoksia ja uudistuksia sekä kysyntä- että tarjontapuolelle. Tarvitaan uutta teknologiaa, uutta tietotaitoa ja uusi teollisuuden rakenne. Toisaalta pitää muuttaa myös kierrätetyn materiaalien symbolista merkitystä. Monesti primäärisiä raaka-aineita pidetään parempina ja ensiluokkaisina verrattuna kierrätettyyn raaka-aineeseen. Materiaalin kierrätykseen pitäisi kuitenkin pyrkiä ja fosforin tapauksessa se on jopa elinehto. Kierrätyksen symbolista merkitystä pitäisi muuttaa hippimielikuvasta tulevaisuuden ekotehokas yhteiskunta -mielikuvaksi, koska se vaikuttaa ennen kaikkea kuluttajien kokemuksiin ja mieltymyksiin, joiden kautta he voivat muuttaa vanhat tapansa ja rutiininsa. Etenkin maanviljelijöitä tulisi rohkaista aktiiviseksi toimijoiksi tässä prosessissa.

Fosforin kierron sulkeminen vaatii muutoksia koko sosio-tekniiseen järjestelmään, sen elementteihin ja rakenteisiin, eli se voidaan luokitella rakenteelliseksi innovaatioksi. Edellisessä kappaleessa on esitelty valtaosa muutosta vaativista kohteista, mutta muutosta vaativat

useat muutkin osa-alueet. Fosforin kierrätys on aivan uusi asia eikä sitä ole aiemmin teollisessa mittakaavassa sovellettu. Tämän johdosta koko järjestelmä pitää luoda ikään kuin tyhjästä. Tarvitaan uusia järjestöjä, organisaatioita, ohjauskeinoja ja pelisääntöjä pitämään tätä järjestelmää koossa sekä lainsäädäntöä ja määräyksiä, jotka mahdollistaisivat toiminnan. Tarvitaan myös markkinoiden uudelleenjärjestäytymistä, jotta uudenlainen tuote voisi menestyä.

Fosforin kierron sulkeminen on prosessi joka pitää sisällään useita eri toimijoita. Prosessiin liittyy muun muassa epäorgaanisen eli neitseellisen fosforin tuottajat, jätevedenpuhdistuslaitokset, koko fosforin jalostusketju, lannoitteenvalmistajat, talteenottoteknologian yritykset, maanviljelijät, muut fosforin käyttäjät, viranomaiset, valtiot ja kuluttajat. Tarvitaan uudenlaista yhteistyötä eri toimijaryhmien välille sekä uudenlaisia organisaatioita.

Systeemi-innovaation kehittyminen vaatii pitkiä aikajaksoja ja niin myös fosforin kierron sulkemisen tapauksessa. Fosforin kierrätysjärjestelmän kehitysprosessi täytyy aloittaa mahdollisimman nopeasti, koska se ei tapahdu hetkessä, mutta se on kuitenkin välttämätön edellytys tulevaisuuden kannalta. Kehitysprosessin täytyy olla päämäärätietoinen ja pitkäjänteinen. Pitää olla selkeä visio johon tähdätään ja pyritään pienempien askelten kautta. Jokaisessa kehityskaaren vaiheessa pitää tarkastuttaa visio ja tarvittaessa muuttaa sitä. Näiden neljän edellä mainitun kohdan perusteella voidaan sanoa, että fosforin kierrätysjärjestelmä on systeemi-innovaatio.

6.1 Kierrätyksen kehittyminen

Monissa tieteellisissä yhteisöissä ja jopa tiedotusvälineissä on todettu, että fosforin loppuminen on ajankohtainen haaste. Fosforin kierron sulkeminen on ainoa ratkaisu tähän haasteeseen

ja fosforin kierrätyksellä on suuri potentiaali ongelman ratkaisemiseksi. Tällä hetkellä on jo olemassa niche -tason yrityksiä, jotka ovat kehittäneet menetelmiä fosforin poistoon jäteveden eri muodoista sekä lannasta. On menossa vaihe, jossa yritetään oppia mahdollisimman paljon sekä parantaa ja kehittää menetelmiä entistä tehokkaammiksi. Useita eri tekniikoita on kehitetty ja kokeiltu, mutta selkeää voittajaa ei vielä ole löytynyt. Struviitin kiteyttäminen vaikuttaisi olevan tällä hetkellä vahvoilla. Eri teknologiat ovat toistaiseksi vielä eri vaiheissa, toisista on vain demoversioita, kun taas toisia on testattu jo teollisuuden laitoskoossa. Tärkeintä tässä vaiheessa on tutkia ja kokeilla mahdollisimman paljon sekä pyrkiä jatkuvaan oppimisprosessiin.

Teknologian kehittymisen jälkeen seuraava vaihe on kierrätysjärjestelmän rakentaminen. Asiantuntijoiden mukaan fosforin kierrättäminen edellyttää integraatiota esimerkiksi jätevedenpuhdistuslaitosten kanssa sekä kierrätysjärjestelmän luomista. Pelkästään teknologian kehittäminen ei siis riitä. Fosforin tapauksessa alhaalta ylös -malli tuskin tulee toimimaan sillä, kierrätetyn fosforin edut ja hinta tuskin pääsevät samalle tasolle epäorgaanisen fosforin kanssa ilman keinotekoisia ohjauskeinoja. Ylhäältä alas mallissa sosioteknisessä ympäristössä tapahtuu muutoksia, jotka asettavat paineita vallitsevan toimintamallin ylle.

Jo nyt pieniä muutoksia ympäristössä alkaa tapahtua, sillä fosforin varastojen ehtyminen on havaittu ja siitä keskustellaan laajalti tiedeyhteisöissä. Muutos on kuitenkin vielä liian pieni horjuttaakseen vallitsevaa toimintamallia. Paineet ovat toistaiseksi olleet niin vaatimattomia, että muuntuminen on riittänyt vallitsevan toimintamallin sisällä. Toimintamallissa on tapahtunut muuntumista kun on pyritty tehostamaan lannoitteiden käyttöä, hidastamaan ravinteiden huuhtoutumista sekä lannan ja lietteen avulla kierrättämään ravinteita. Epäorgaanisen fosforin saanti kuitenkin vaikeutuu ennen pitkää tai ainakin kallistuu, mikä aiheuttaa huomattavia jännitteitä nykyiselle toimintamallille. Viimeistään silloin toimintamallin rakennemuutos on edellytyksenä fosforin saannille.

Kehitystyö, jota tällä hetkellä tehdään niche -tason yrityksissä, on välttämätöntä ja edesauttaa muutoksen tapahtumista. Tämän tyyppisen ongelman ratkaisussa valtioiden päättäjät ovat ensisijaisen tärkeässä roolissa. Tällä hetkellä fosforitalous on pitkälti kiinni fosfaattikiven louhintateollisuudesta, lannoiteteollisuudesta ja ruoantuotantoteollisuudesta. Näiden tekijöiden toiminnassa määräävin tekijä on hinta ja sitä kautta kannattava toiminta, joten heidän aloitteesta muutos tuskin tulee tapahtumaan, koska päätökset perustuvat lyhyen ajan tähtäimiin. Ja niin kuin aikaisemmin on jo mainittu, yksityinen sektori on ollut hyvin passiivinen asian suhteen.

Uusiutumattomien luonnonvarojen turvaaminen ja kestävä käyttö edellyttävät kauaskantoisia päätöksiä ja pitkän tähtäimen ratkaisuja. Valtioiden hallitusten ja päättäjien tulisi myöntää fosforiin liittyvät ongelmat ja niiden tulisi nostaa asia esille, jotta toimintamallille kohdistuisi paineita. Silloin systeemi-innovaatiolle tarjoutuisi *mahdollisuuksien ikkuna*. Neljästä ideaalisesta muutostyypistä parhaiten tähän sopisi tarkoituksenmukainen muutos, eli neljäs tyyppi. Fosforin kierron sulkemisen ympäristö-innovaatio vaatii vahvaa koordinoitua ja resursseja ulkoapäin.

6.2 Ohjausmekanismit fosforin kierrätyksen edistämiseen

Fosforin kierron sulkeminen on laaja-alainen sosio-tekniinen systeemi, johon vaikuttavat ja joka vaikuttaa moniin tekijöihin ja yhteiskuntaryhmiin. Tämän johdosta ei ole helppoa valita sopivaa ohjausmekanismia, jolla saavutetaan tarpeeksi korkea innovaation aste ja joka suuntautuu oikein. Lisäksi, fosforin kierron sulkemiseksi on monia erilaisia menetelmiä ja mahdollisuuksia, joten on mahdotonta valita vain yhtä ohjaustapaa, joka ohjaisi kaikkia samalla kertaa. Tässä työssä pohditaan ja arvioidaan vain niitä ohjauskeinoja, jotka sopisivat fosforin kierrätykseen.

Markkinaohjautuvien mekanismien puolesta puhuu niiden joustava luonne. Fosforin kierrästyä on tutkittu vasta suhteellisen vähän aikaa, joten tällä saralla on paljon potentiaalia kehittää uusia ja ennen kaikkea erilaisia innovaatioita. Päästökaupan tapainen järjestely antaisi osanottajille vapaat kädet ongelman ratkaisussa. Osanottajat voisivat ostaa tai saada oikeuksia neitseellisen fosfaatin käyttöön ja muun fosfaatin he joutuisivat hankkimaan kierrätyksen kautta. Julkisella vallalla olisi näin ollen mahdollisuus säädellä louhitun fosforin käyttöä. Tällaisessa kaupassa toiset olisivat oikeuksien ostajia (lannoitteen valmistajayritys) ja toiset olisivat myyjinä(jätevedenpuhdistuslaitokset). Päästökauppa voitaisiin järjestää useilla tavoilla, mutta tärkeintä olisi saada mahdollisimman laaja osanottajajoukko eri sidosryhmistä, joka takaisi kustannustehokkaan ja toimivan järjestelmän fosforin kierrättämiseksi.

Markkinamekanismien ideana on, että päästöoikeuksien määrä pysyy kiinteänä hinnan vaihdellessa. Fosforin hinta vaikuttaa lannoitteisiin, joka edelleen vaikuttaa maanviljelyyn ja sitä kautta ruoan tuotantoon. Tilanne voi muuttua kuluttajille ongelmalliseksi, jos fosforin hinnan heilahtelut synnyttävät voimakasta vaihtelua ruoan hinnoissa. Verotus puolestaan tarjoaa edun, jossa hinta pysyy vakiona, mutta volyymia ei rajoiteta. Volyymia voidaan säätää asettamalla lisäksi tuotantopanosrajoituksia tai kierrätysastetavoitteita. Verotuksen avulla fosforin kierrätyksen hinta saataisiin siirrettyä kuluttajalle näkyvämmiin. Myös bioenergian lisäämiseksi käyttöön otetut syöttötariffit voisivat olla varteenotettava vaihtoehto fosforin kierrätyksessä.

Erilaisten säännösten ja määräysten asettaminen voi olla hyvä lisä muiden ohjausmenetelmien tukena, mutta yksinään ne voivat olla tehottomia ja suuntautua väärin. Fosforin käyttämisessä ympäristövahinko tapahtuu vasta, kun maaperästä on valuman myötä huuhtoutunut ravinteita. Tätä on hankala mitata, joten raja-arvojen asettaminen voi olla ongelmallista. Todellinen fosforin käytön ympäristövahinko on luonnonvarojen riisto, joka ei tapahdu yksittäisen teollisuuden alan vaan koko kansakunnan toimesta. Jos asetettaisiin rajoitteita mahdollisimman lähelle loppukäyttäjää, ne pitäisi asentaa yksittäisille ihmisille. Kullakin

ihmisellä olisi kiintiö kuinka paljon fosforia saisi päivässä käyttää. Tämä ei olisi kovin mielekästä, saati edes mahdollista.

Fosforin kierrätyksellä on kaksi merkittävää etua. Sen lisäksi, että turvataan tulevaisuuden fosforitarpeet, vähennetään vesistöihin joutuvan ravinnekuorman määrää. Fosforin rehevöitymisvaikutus on tällä hetkellä yritysten aiheuttama ulkoiskustannus, jolla ei ole hintaa. Jos pystytään määräämään ulkoiskustannuksen hinta, voidaan se sisäistää yhteiskunnan sijasta yritysten maksettavaksi. Hinta voisi määräytyä kierrätyskustannusten perusteella, jolloin yritykset maksaisivat aiheuttamastaan ympäristövahingosta osuutensa ja kierrätystä hoitavat yritykset saisivat vastaavan korvauksen, jonka ansiosta kierrätyksestä tulisi kannattavaa. Tällaista järjestelyä voitaisiin käyttää hyväkseen myös Biomeri Oy:n innovaation markkinoille tuonnissa.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kierrätyksen avulla saadaan fosforin kierto suljettua ja tulevaisuuden fosforitarpeet turvattua. Fosforin kierrätyksen suurin haaste on taloudellisissa tekijöissä. Kierrätyksen hinta on toistaiseksi moninkertainen neitseelliseen fosforiin nähden. Lisäksi fosforin eri talteenottomenetelmistä on tuloksena erilaisia lopputuotteita. Kunnollisia markkinoita näille tuotteille ei ole vielä olemassa, joten kierrätys toimii hyvin pienellä mittakaavalla ja volyymilla.

Kierrätyksessä on taloudellisten haasteiden lisäksi useita muitakin ongelmakohtia. Lainsäädäntö, ohjeet, standardit, toimintamallit, valvovat organisaatiot ja verkostot puuttuvat kokonaan, tällä hetkellä ei siis ole minkäänlaista kierrätysjärjestelmää. Kierrätysjärjestelmän kehittäminen ratkaisee osittain taloudelliset ongelmat ja yhtäläillä asia on toisinkin päin, taloudellisten esteiden väistyessä järjestelmän kehittäminen helpottuu. Nämä kietoutuvat vah-

vasti yhteen ja oleellista olisi lähteä rakentamaan kokonaisvaltaista ratkaisua, jossa taloudellinen puoli yhdistyy järjestelmän kehittämiseen.

Fosforin talteenottolaitosten on jatkettava kehitystyötä uusien ja parempien teknologioiden parissa. Nykyään on kehitetty useita eri menetelmiä fosforin erottamiseksi ja talteenotoksi jäteveden puhdistuslaitoksilla. Harvoista menetelmistä on kuitenkin vielä olemassa kaupallisen tason laitoksia ja nekin menetelmät, joista on kaupallista kokemusta, ovat osoittautuneet taloudellisesti kannattamattomiksi. Menetelmistä pitäisi kehittää entistä tehokkaampia ja menetelmien kirjosta tulisi löytää paras vaihtoehto, jota voitaisiin alkaa soveltamaan laajemmin. Talteenottolaitosten pitäisi olla integroituna muihin toimintayksikköihin, kuten jäteveden puhdistuslaitoksiin tai biovoimalaitoksiin. Integroitu toiminta vaatii yhteistyötä molemmilta osapuolilta. Toiminta voi olla yhden tai useamman yrityksen koordinoimaa, jolloin hyödyt ja haitat jakaantuvat osapuolille tasapuolisesti.

Kierrätetyn fosforin kaupallistaminen vaatii yhteistyötä valtion ja neitseellisen fosforin tuottajien kanssa. Niin pitkään kuin fosfaattikivestä tuotetun fosforin hinta on alhainen, fosforin kierrätys on kannattamatonta. Neitseellisen fosforin hinta täytyisi siis saada joko yhtä korkeaksi kierrätetyn fosforin kanssa tai kierrätetyn fosforin hintaa tulisi pystyä tiputtamaan neitseellisen fosforin tasolle. Jälkimmäinen vaihtoehto on näillä näkymin epätodennäköistä. Vaikka fosforin talteenottoteknologioita saataisiin tehostettua entisestään, kierrätyksen hinta tuskin tippuu tarpeeksi alas.

Tällä hetkellä fosforin kierron sulkeminen vaatii tuoreita panoksia ketjun alkupäähän, sillä muuten fosforin määrä kierrossa pienenee. Ideaalisessa tapauksessa fosforin kierrätysaste olisi 100 %, mikä on kuitenkin todellisuudessa utopiaa. Fosfaattikivivaroja tulisi tämän vuoksi säästää tulevaisuuden varalle ja sen louhimista tulisi rajoittaa. Rajoitustoimilla voitaisiin luoda hinnoittelumekanismia, joilla neitseellisen fosforin ja kierrätetyn fosforin hinnat saataisiin kohtaamaan.

Kierrätetylle fosforille voitaisiin myöntää valtiontukia tai veronhelpotuksia, kun vastaavasti neitseelliselle fosforille voitaisiin asettaa korkeampi vero. Orgaaniselle eli kierrätetylle fosforille voitaisiin myös asettaa syöttötariffi. Neitseellisen fosforin käyttöä voitaisiin rajoittaa joko lakisääteisesti tai markkinavoimien avulla, esimerkiksi päästökauppamekanismilla. Maanviljelijöiden ja lannoitteiden valmistajille voitaisiin jakaa oikeuksia käyttää neitseellistä fosforia tai asettaa tavoiteindeksi, joka kuvaisi esimerkiksi kierrätetyn fosforin käyttöä suhteessa neitseelliseen fosforiin. Indeksien yläpuolella pysyvät toimijat saisivat oikeuksia neitseellisen fosforin käyttöön.

Valtioiden välille voitaisiin määrittää tietyt kiintiöt, jotta fosforin hinta pysyisi kurissa tarjonnan vähentyessä. Tämäkin voitaisiin toteuttaa joko erilaisten kansainvälisten sopimusten avulla tai päästökauppamekanismilla. On arvioitu, että suurimmat fosfaattikiven varastot sijaitsevat Marokossa ja tulevaisuudessa useimmat valtiot ovat riippuvaisia Marokon tuotannosta. Kansainväliset sopimukset ovat siis välttämättömiä, jotta vältytään kiistoilta ja konflikteilta sekä samalla turvataan tasapuolinen fosforin saanti.

Kysyntäpuolella tärkein tekijä on lannoiteteollisuus ja maanviljely sekä suoraan että välillisesti lannoitteiden kautta. Kierrätetyn fosforin tuottajat ja maanviljelijät pitäisi saada yhteistyöhön, jotta maanviljelijät hyväksyisivät kierrätetyn fosforin. On varmistettava, että kierrätetty fosfori on käyttökelpoinen (muun muassa metallipitoisuuksien suhteen) ja maanviljelijät on saatava vakuuttuneiksi tästä. Toistaiseksi maanviljelijöiden suhtautuminen kierrätettyyn fosforiin on ollut skeptistä ja tämä on osaltaan vaikeuttanut myös sen kaupallistamista. Maanviljelijöitä pitäisi rohkaista ja kannustaa orgaanisen fosforin käyttöön. Markkinoilla voitaisiin mainostaa tuotteita, jotka on viljelty orgaanisesti tuotettujen lannoitteiden avulla ja näin on säästetty luonnonvaroja.

Lannoitetehtaat voisivat tehdä tiiviimpää yhteistyötä kierrätetyn fosforin eri tuottajien kanssa. Fosforia voidaan ottaa talteen useista eri lähteistä, joten joko sen tuottaminen on keskitettävä suuriin yksikköihin tai hajautettava pieniin syntypaikallaan tapahtuviin tuotantoyksikköihin. Pitäisi tehdä tarkempi arviointi siitä, kumpaa menetelmää tulisi käyttää. Joka tapauksessa lannoitetehtaat voisivat olla suoraan yhteydessä näihin laitoksiin ja käyttää ensisijaisesti kierrätettyä fosforia ja vasta sen saatavuuden huonontuessa siirtyä neitseelliseen fosforiin.

Valtamerien potentiaali fosforin lähteenä on varteenotettava vaihtoehto tulevaisuudessa ja sen tähden meret ovat tutkimisen arvoisia. Biomeri Oy:n kehittämä konsepti levän kasvatuksesta ja keruusta on yksi mahdollisuus saada ravinteita talteen merien pinnasta. Markkinoille tuonin haasteena on kuitenkin biolevämässan tuotannon jälkeinen vaihe. Tällä hetkellä puuttuu lähes kokonaan kysyntä biomassalle sekä sen jatkojalostusketju. Tämän lisäksi ravinteiden erottaminen sekä energiahyötykäyttö ovat suhteettoman kalliita, eikä toistaiseksi ole olemassa taloudellisia kannustimia tai valtion tukia, mitkä tekisivät toiminnasta kannattavan.

Biomeri Oy:n rooli kierrätysjärjestelmässä olisi leväbiomässan tuottaminen ravinteiden erotuslaitoksille, joiden yhteydessä voisi olla myös biokaasulaitos. Biomeri Oy:tä voidaan pitää niche – yrityksenä, jonka tutkimukset ja kehitystyö ovat arvokkaita kokemuksia ja ne auttavat myös fosforin kierrätysjärjestelmän rakentamisessa. Onnistuessaan tuomaan tällaisen ympäristöinnovaation markkinoille, Biomeri Oy:n case voisi toimia mallina ja avata väyliä muille vastaaville hankkeille. Niche – alan kasvaessa, se muodostaa uudet säännöt ja toimintatavat, jotka voivat mahdollisuuden tullen syrjäyttää vallitsevan toimintamallin. Tällöin systeemi-innovaatio kehittyy alhaalta ylös – eli niche – mallin mukaan.

Biomeri Oy:n näkökulmasta yhteistyön kehittäminen kaikkien eri sidosryhmien välille on liian hajanaista ja monimutkaista, etenkin siihen nähden, että biomassavolyymit eivät ole valtavat. Niche - mallia todennäköisempää on ylhäältä alas – malli, jossa toimintaympäristön muutokset saavat aikaan jännitteitä vallitsevalle toimintamallille. Tällöin tarvitaan

rakennemuutos eli systeemi-innovaatio, johon Biomeri Oy:n kaltainen niche- yritys voi linkittyä yhtenä osana. Ylhäältä alas – mallissa on yhtäläillä tärkeää, että on olemassa paljon erilaisia niche – yrityksiä, joissa kehitetään uudenlaisia ja jopa radikaaleja innovaatioita. Kun mahdollisuuksien ikkuna avautuu, nämä innovaatiot ovat valmiita ottamaan oman paikkansa uudessa toimintamallissa.

Tärkeintä fosforin kierron sulkemisessa on luoda kokonaisvaltainen systeemi, jossa eri tekijöiden välinen yhteistyö ja tehtäväjako on hiottu saumattomasti yhteen. Valtion pitäisi ottaa vahva rooli systeemin koordinoimisessa ja ottaa mukaan tärkeimpien tekijöiden etujärjestöt. Globaalilla tasolla eri valtioiden pitäisi tehdä yhteistyötä ja luoda kansainvälisiä sopimuksia, joiden avulla fosforivarastot turvataan ja taataan kaikille tasapuolinen saanti. Kansallisella tasolla voitaisiin luoda organisaatio, jossa olisi eri sidosryhmien edustajia sekä valtion edustajia, jotka hoitaisivat fosforin käytön valvontaa, laskentaa, ohjausta ja sääntelyä. Vain tiiviillä yhteistyöllä eri sidosryhmien välillä ja pitkäjänteisellä työllä voidaan luoda systeemi fosforin kierron sulkemiseksi. Edellytyksenä tälle on hyvä ja vahva verkostojen johtaminen ja hallinta.

8 YHTEENVETO

Fosforin saanti on edellytys kaikelle elolliselle. Öljyn tavoin maailman fosforivarastot alkavat kuitenkin ehtyä. Suurin syy tähän on ollut lannoitteiden holtiton käyttö ja fosforin tehoton jalostusketju. Samanaikaisesti kun kaivokset ovat tyhjentyneet fosfaattikivestä, maaperästä on valuman myötä huuhtoutunut ravinteita vesistöihin. Kotitalouksien ja teollisuuden jätevesistä ravinteita on myös päätynyt järvien kautta meriin, joissa ravinteet ovat aiheuttaneet perustuotannon lisääntymistä eli rehevöitymistä.

Fosforiin liittyy kaksi ongelmaa. Toisaalta se on elintärkeää raaka-aine, joka on loppumassa ja toisaalta se aiheuttaa rehevöitymisen kautta vedenkäytön ongelmia merissä ja järvissä. Maaperässä fosforivarastot köyhtyvät, kun taas vesistöissä ja etenkin valtamerissä ne kasvavat. Fosforin globaalia kiertoa voidaan pitää avoimena kiertona, joka tulevaisuuden kannalta olisi elintärkeää pystyä sulkemaan. Fosforin kierron sulkeminen vaatii muutoksia kaikissa taloudellisen kierron vaiheissa ja kehitystyötä ravinteiden kierrätyksessä.

Ravinteiden kierrätyksessä piilee valtava potentiaali tulevaisuuden kannalta. Sen lisäksi, että turvataan raaka-aineen saanti, estetään ravinteiden pääsy vesistöihin. Kierrätyksen kannalta eniten on tutkittu jätevesiä ja eläinten lantaa. Useita erilaisia menetelmiä ja prosesseja on jo kehitetty, mutta kaupallinen toiminta on ollut toistaiseksi hyvin vähäistä. Tämä johtuu pitkälti siitä, että neitseellisen fosforin louhinta on halpaa ja kierrättäminen taas kallista. Lisäksi kierrättäminen edellyttää kokonaisvaltaista järjestelmää, joka tällä hetkellä puuttuu.

Kierrätysjärjestelmän rakentaminen vaatii systeemi-innovaation kehittämisen, mikä tarkoittaa pitkäjänteistä työtä useiden eri toimijoiden kesken. Useat eri toimijat linkittyvät toisiinsa muodostaen laajan verkoston. Verkoston johtaminen ja koordinointi ovat ensisijaisen tärkeitä kierrätysjärjestelmän rakentamisessa. Biomeri Oy:n kaltainen yritys on yksi toimija tällaisessa verkostossa. Biomeri Oy:n innovaation markkinoille tuonnissa on tällä hetkellä paljon haasteita, mutta kierrätysjärjestelmän kokonaisuuden kannalta jo pelkkä kehitystyö on erittäin arvokasta. Vallitseva toimintamalli tulee ennen pitkään pisteeseen, jossa tarvitaan järjestelmän kokonaisvaltainen rakennemuutos. Tällöin Biomeri Oy:n innovaatiolle voi avautua ainutlaatuinen mahdollisuus kytkeytyä uuteen toimintamalliin.

LÄHTEET

Kirjallisuuslähteet:

Adam, Christian. 2009. Techniques for P-recovery from waste water, sewage sludge and sewage sludge ashes- an overview. Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice BALTIC 21, Berliini.

Burns, Robert T.; Moody, Lara B. 2002. Phosphorus recovery from animal manures using optimized struvite precipitation. Proceedings of Coagulants and Flocculants: Global Market and Technical Opportunities for Water Treatment Chemicals. The University of Tennessee, Biosystems Engineering & Environmental Science Department. Chicago, Illinois. Sivuja 7.

Cordell, Dana. 2010. The Story of Phosphorus: Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security. Doctoral Thesis. Linköping University, Department of Water and Environmental Studies. Linköping. Sivuja 220. ISBN 978-91-7393-440-4.

Elser, James; White, Stuart. 2010. Peak Phosphorus. Foreign Policy, argument.

Elzen, Boelie; Geels, Frank W.; Green, Ken. 2004. System Innovation and the Transition to Sustainability. Bodmin, Cornwall, MPG Books LTD. Sivuja 315. ISBN 1843766833.

Filipkowska, Anna et al. 2008. Utilisation of macroalgae from the Sopot beach (Baltic Sea). Oceanologia Vol: 50 No: 2. Sivut: 255- 273. ISSN 0078-3234.

Horbach, Jens (toim.). 2005. Indicator Systems for Sustainable Innovation. Heidelberg, Physica-Verlag. Sivuja 206. ISBN 9783790816204

Hämäläinen, Timo. 2007. Innovaatiotoiminnan ja –Politiikan Tulevaisuuden Haasteet. Sitramuistio. [Sitran www-sivuilla]. Päivitetty 26.9.2007. [viitattu 20.7.2010].

Saatavissa: http://www.sitra.fi/NR/rdonlyres/7AD415AC-753D-45F4-9AF7-F4B3CB399E77/0/Innovaatiotoiminnan_haasteet_Timo_Hamalainen.pdf

Härmälä, Esa. 2009. Good Agricultural Practice and Protection of waters. HELCOM and Baltic 21 Agriculture Seminar, Helsinki 8-9.6.2009.

Kivisaari, Sirkku; Saranummi, Niilo. 2006. Terveysthuollon systemiset innovaatiot vuorovaikutteisen kehittämisen kohteena. VTT Tiedotteita 2324. Sivuja 77+ 4. ISBN 1455-0865. PDF- tiedosto.

Lehtoranta, Jouni. 2003. Dynamics of sediment phosphorus in the brackish Gulf of Finland.

Monographs of the Boreal Environment Research No. 24. Sivuja: 58. ISBN 952-11-1399-5. PDF- tiedosto.

Lovio, Raimo; Kivisaari, Sirkku. 2010. Julkisen Sektorin innovaatiot ja innovaatiotoiminta. VTT- tiedotteita 2540. Sivuja 50. ISBN 978-051-38-7634-0.

Martí, N. et al. 2010. Phosphorus recovery by struvite crystallization in WWTPs: Influence of the sludge treatment line operation. Water research [0043-1354]. Vol: 44 No: 7 .Sivut: 2371 - 2379.

Rosemarin, Arno; De Bruijne, Gert; Caldwell, Ian. 2009. Peak Phosphorus. The Broker No: 15. Sivut 6- 10.

Salonen, Seija et al. 1992. Fosfori ja typpi- vesien rehevöittäjinä – vaikutusten arviointi. Vesi- ja Ympäristöhallinnon julkaisuja - sarja A. Helsinki: Valtion painatuskeskus. Sivuja 139. ISBN 951-47-5715-7.

Schick, Judith et al. 2009. Techniques for P-recovery from waste water and sewage sludge and fertilizer quality of P-recycling products. Conclusions from the P-recycling conference, Berlin 2009.

Smil, Vaclav. 2000. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. Annual Review of Energy and Environment Vol: 25. Sivut: 53 -88.

Suokko, Aki. 2010. Lignoselluloosaetanolin ja synteetikaasusta fermentoitujen polttonesteiden teknologiatarkastelu. VTT-tiedotteita 2533. Sivuja 88. ISBN 978-951-38-7576-3 (nid.). PDF- tiedosto.

Vaccari, David A. 2009. Phosphorus: A looming crisis. Scientific American [0036-8733]. Vol: 300 No: 6. Sivut: 54- 59. ISSN 0036-8733.

Wzorek, Zbigniew; Gorazda, Katarzyna. 2007. Phosphorus recovery from waste - methods review. Polish Journal of Chemical Technology [1509-8117]. Vol: 9, No: 2. Sivut: 57- 60. ISSN 1509-8117.

Internet- lähteet:

Déry, Patrick; Anderson, Bart. 2007. Peak Phosphorus. Energy Bulletin [verkkolehti]. Päivitetty 13.8.2007. [viitattu 3.6.2010].

Saatavissa: <http://energybulletin.net/node/33164>

Driver, John. 1998. Phosphates recovery for recycling from sewage and animal wastes. Alkuperäinen julkaisu lehdessä: Phosphorus & Potassium, No: 216. [Technische Universität Darmstadt www-sivuilla]. Päivitetty 19.3.2010. [viitattu 17.6.2010]

Saatavissa: http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de/index.php?option=com_content&task=view&id=46&Itemid=1

The Environmental Literacy Council. Phosphorus cycle. [The Environmental Literacy Council www-sivuilla]. Päivitetty 2.3.2008. [viitattu 9.6.2010].

Saatavissa: <http://www.enviroliteracy.org/article.php/480.html>

Fineli®. Ravitsemusyksikkö, Terveiden ja Hyvinvoinnin Laitos. [Finelin www-sivuilla]. Päivitetty 30.6.2009. [viitattu 24.6.2010].

Saatavissa: <http://www.fineli.fi/component.php?compid=2223&lang=fi>

Global InfoMine. Investment. [Global InfoMine www-sivuilla]. Päivitetty 7.6.2010. [viitattu 9.6.2010].

Saatavissa:

<http://www.infomine.com/investment/charts.aspx?mv=1&f=f&r=10y&c=cphosphates.xusd.uz,cphosphates.xeur.umt#chart>

IFA. International Fertilizer Industry Association, Fertilizers & the Industry. [IFA www-sivuilla]. Päivitetty 1.8.2008. [viitattu 21.6.2010].

Saatavissa: <http://www.fertilizer.org/ifa/Home-Page/FERTILIZERS-THE-INDUSTRY/What-are-fertilizers>

Itämeriportaali. Tietoa Itämerestä. [Itämeriportaalin www-sivuilla]. Päivitetty 17.5.2010. [viitattu 9.6.2010].

Saatavissa: http://www.itameriportaali.fi/fi/tietoa/sanakirja/fi_FI/fosforinkierto/

Phosphorus Recovery. Technische Universität Darmstadt, IWAR. [IWAR www-sivuilla]. Päivitetty 19.03.2010. [viitattu 21.6.2010].

Saatavissa:

http://www.phosphorus-recovery.tu-darmstadt.de/index.php?option=com_content&task=view&id=26&Itemid=40

Valtion Ympäristöhallinto. Jätevesien puhdistus. [Valtion Ympäristöhallinnon www-sivuilla]. Päivitetty 3.6.2010. [viitattu 8.6.2010].

Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=6572&lan=fi>

Henkilökohtainen haastattelu:

Kronström, Kai. 2010. Tuotantotalouden Diplomi-insinööri; Biomeri Oy:n perustaja, Biomeri Oy. Helsinki. Henkilökohtainen haastattelu, 15.6.2010.

Fosforin globaali kierto (Smil 2000).

