

OJITUS MALLIJÄRJESTELMÄNÄ TUOTANNON ULKOISVAIKUTUKSET HUOMIOIVASSA MAANVILJELYSSÄ

Maisterin tutkielma
Liisa Saikkonen
Op.nro: 013110259
Helsingin yliopisto
Taloustieteen laitos
Ympäristöekonomia
Lokakuu 2009

HELSINGIN YLIOPISTO

Tiedekunta Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos Taloustieteen laitos
Tekijä Liisa Saikkonen		
Työn nimi Ojitus mallijärjestelmän tuotannon ulkoisvaikutukset huomioivassa maanviljelyssä		
Oppiaine Ympäristöekonomia		
Työn laji Maisterin tutkielma	Aika Lokakuu 2009	Sivumäärä 94
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tutkielman tarkoituksena on sekä teoreettisesti että empiirisesti tarkastella ja vertailla sala- ja sarkaojituksen yksityistä sekä yhteiskunnallista kannattavuutta Suomessa. Yksityiset ja yhteiskunnalliset optimit määritellään ojittamattomalle, sekä sala- ja sarkaojitetulle pellolle. Optimeja vertailemalla pyritään määrittämään yhteiskunnallisesti kannattavin ojateknologia ja asettamaan sen saavuttamiseksi taloudelliset ohjauskeinot lannoitteen käytölle ja sarkaojituksen intensiivisyydelle.</p> <p>Yhteiskunnallisessa hyvinvoinnissa otetaan huomioon maanviljelystä aiheutuvat ulkoisvaikutukset, joilla tämän tutkielman puitteissa tarkoitetaan ravinnekuormituksesta aiheutuvaa haittaa ja sarkaojien ylläpitämisen biodiversiteetin tuomaa hyötyä. Biodiversiteettiä tarkastellaan sekä lajimääränä jossain tietyssä pisteessä ja sen läheisyydessä (alfa-diversiteetti), että yhden neliökilometrin laajuiselle maatalousmaisemalle määriteltynä maiseman monimuotoisuutena (gamma-diversiteetti). Maatalousmaiseman biodiversiteettiä määriteltäessä otetaan huomioon spatiaalisen autokorrelaation vaikutus maisematason lajimäärään.</p> <p>Empiirisen mallin tuottamat numeeriset tulokset osoittavat, että salaojitus on yksityisesti kannattavampi ojateknologia kuin sarkaojitus. Yhteiskunnallista kannattavuutta vertailtaessa, tulokset kertovat sarkaojituksen olevan yhteiskunnallisesti kannattavampi ojateknologia. Suurin syy sarkaojituksen yhteiskunnalliseen kannattavuuteen salaojitukseen verrattuna, on kuitenkin ero typpihuuhtoumissa. Typpihuuhtoumaerojen määrittämiseksi on jouduttu tekemään karkeita oletuksia, sillä tutkittua tietoa sarkaojitetun pellon typpihuuhtoumista on hyvin vähän. Näin ollen tuloksia ei voida pitää luotettavina typpihuuhtoumien osalta, eikä sarkaojituksen voida näin ollen todeta olevan yhteiskunnallisesti kannattavampi ojateknologia kuin salaojitus. Kun biodiversiteettiä tarkastellaan maiseman monimuotoisuuden näkökulmasta, on sarkaojien ylläpitämisen biodiversiteetin yhteiskunnallinen kannattavuus 22,5–23 % korkeampi, kuin alfa-diversiteettiä tarkasteltaessa. Tulosten mukaan molemmat ojateknologiat ovat sekä yksityisesti että yhteiskunnallisesti kannattavampia, kuin pellon ojittamatta jättäminen. Empiirisen mallin tarkastelu Monte Carlo -simulaation avulla osoittaa, että mallin tulokset reagoivat herkästi niiden parametrien satunnaisiin vaihteluihin. Mallin parametrien arvonta normaali- ja log-normaali-jakumista siten, että suhteellisena keskihajontana käytetään 10 % parametrien odotusarvoista, kasvattaa tulosten suhteellisen keskihajonnan jopa 38 prosenttiyksikköön.</p>		
Avainsanat ojitus, biodiversiteetti, maatalousmaisema, ravinnekuormitus, taloudellinen analyysi, Monte Carlo -menetelmät		
Säilytyspaikka Viikin tiedekirjasto, Viikinkaari 11 A, (PL 62), 00014 Helsingin yliopisto		
Muita tietoja		

UNIVERSITY OF HELSINKI

Faculty Faculty of Agriculture and Forestry		Department Department of Economics and Management
Author Liisa Saikkonen		
Title Agricultural drainage as a model system in the presence of environmental externalities		
Subject Environmental economics		
Level Master's thesis	Month and year October 2009	Number of pages 94
Abstract <p>The objective of this thesis is to examine and compare, both theoretically and empirically the private profitability and social desirability of subsurface drainage and drainage by open ditches, under cultivation in Finland. Private and social optimums for cultivation are examined for (1) field without any drainage system, (2) field with subsurface drainage and (3) field with open ditch drainage. The results of optimum solutions are compared with each other to define the optimal drainage system. Incentives for fertilizer use and intensiveness of open ditch drainage are then set accordingly.</p> <p>In defining the social desirability, environmental externalities are taken into account. Within the framework of this study, the environmental externalities are the social costs of nutrient runoffs and the social benefits of maintenance of biodiversity by open drainage ditches. The approach to biodiversity herein is twofold. First, biodiversity is perceived as local species richness (alpha diversity) and then as landscape diversity (gamma diversity). Landscape diversity is defined within an area of 1 km² and it takes into account the spatial autocorrelation of species diversity at landscape level.</p> <p>Numerical results show that subsurface drainage is privately a more profitable drainage system than open ditch drainage. When comparing the social desirability, calculations show that open ditch drainage is more desirable, but that is mostly due to the difference in nitrogen leaching compared with subsurface drainage. The empirical data used in calculations, concerning the nitrogen leaching, is partly insufficient and based on crude assumptions. Therefore it is not possible to conclude that open ditch drainage is socially more desirable. If biodiversity is perceived as landscape diversity, the value of social benefits of maintenance of biodiversity by open drainage ditches is 22.5-23 % higher than if biodiversity is calculated as local species richness. Based on the results, a cultivated field with either drainage system will lead to higher private profitability and social desirability than cultivation without a drainage system. Monte Carlo -simulation shows that the results are stochastically sensitive. If the values of empirical parameters are drawn from normal and log-normal distributions with the standard deviations of 10 % of expected values, the standard deviations of the results can be as high as 38 % of the expected values.</p>		
Keywords drainage, agrobiodiversity, agricultural landscape, nutrient load, economic analysis, Monte Carlo method		
Where deposited Viikki Science Library, Viikinkaari 11 A, (PL 62), 00014 Helsingin yliopisto		
Further information		

Sisälllys

1 Johdanto	5
1.1 Tutkimuksen taustaa.....	5
1.2 Tutkimuksen tavoite ja rakenne.....	6
2 Ojateknologiat ja salaojituksen kannattavuus	9
2.1 Ojateknologiat.....	9
2.2 Salaojituksen kannattavuus.....	13
3 Ojateknologioiden yhteys ympäristöön kohdistuviin ulkoisvaikutuksiin	18
3.1 ravinnekuormitus.....	18
3.2 Biodiversiteetti.....	22
4 Teoreettinen malli	27
4.1 Yleistä mallista.....	27
4.2 Yksityiset optimit.....	28
4.3 Yhteiskunnalliset optimit.....	31
4.4 Ohjauskeinot.....	36
5 Empiirinen malli ja parametrit	37
5.1 Satovaste sekä viljelijän tulot ja kustannukset.....	37
5.2 Ravinnehuuhtouma.....	42
5.3 Biodiversiteetti.....	47
5.4 Yhteiskunnan hyvinvointifunktiot.....	51
6 Empiirisen mallin tulokset ja herkkyysanalyysi	52
6.1 Tulokset.....	52
6.2 Osittainen herkkyysanalyysi.....	58
6.3 Herkkyysanalyysi Monte Carlo - simulaatiolla.....	60
7 Johtopäätökset	67
Lähteet	69
Liitteet	78

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen taustaa

Toimiva ojitus on tärkeä maanviljelyn kannattavuuden kannalta. Ojat ylläpitävät pellon vesitasapainoa ja edistävät näin viljelymaan tuottavuutta. Ojituksen tavoitteita maanviljelyn kannalta ovat kasvulle sopivan kosteustilan ja eri viljelytoimenpiteitä varten riittävän maan kantavuuden ylläpitäminen. Suomessa peltomaan kuivatuksen tärkeyttä lisäävät lumen sulamisvesien runsaus, sadannan epäedullinen jakautuminen, kasvukauden lyhyys, peltomaiden tiiviys sekä turvemaiden yleisyys (Vesihallitus 1986, 29). Pellon kuivatus toteutetaan joko avo-ojituksella, eli *sarkaojituksella* tai maanalaisista salaojaputkista koostuvalla *salaojituksella*. Salaojitus on mahdollista rakentaa kokonaan ojittamattomaan peltoon tai sillä voidaan korvata sarkaojitus.

Peltojen salaojitus vähentää maanviljelijän työtä pinta-alayksikköä kohti ja lisää viljeltävää peltopinta-alaa verrattuna sarkaojitukseen (Haataja & Peltola 2001, 8). Suomessa viljeltävien peltojen sarkaojia on korvattu salaojituksilla aina 1950-luvulta lähtien (Hietala-Koivu 2002). Salaojitettujen peltojen prosentuaalinen osuus Suomessa nousi vuosina 1944–1991 viidestä viiteenkymmeneen ja vuonna 2007 peltopinta-alasta oli salaojitettu noin 58 % (Ruuska & Helenius 1996, 573; Salaojayhdistys ry 2008, 3). Salaojakeskus ry:n (2002) julkaiseman salaojituksen tavoiteohjelman mukaan puolet sarkaojitetuista pelloista pyritään salaojittamaan vuoteen 2020 mennessä.

Markkinoilla esiintyy ulkoisvaikutuksia kun niiden toiminnasta aiheutuu hyötyä tai haittaa sellaiselle osapuolelle, joka ei pysty vaikuttamaan markkinoiden toimintaan, eikä se saa tai joudu maksamaan korvausta aiheutuneesta hyödystä tai haitasta. Täydellisillä markkinoilla ei esiinny ulkoisvaikutuksia. Tällöin tuotanto, joka johtaa tuottajan yksityisen voiton maksimiarvoon, toteuttaa myös yhteiskunnallisen optimin. Viljelykasvien markkinat eivät ole täydellisiä, sillä maanviljelystä aiheutuu ulkoisvaikutuksia, jotka jäävät kasvien markkinoiden ulkopuolelle. Maanviljelyssä käytettävistä lannoitteista koituvaa ravinnekuormitusta pidetään merkittävimpänä maatalouden aiheuttamista negatiivisista ulkoisvaikutuksista. Positiivisia ulkoisvaikutuksia ovat esimerkiksi maanviljelyn ylläpitämä biodiversiteetti ja maatalousmaisema. Ulkoisvaikutusten läsnä ollessa, yksityisen voiton maksimoiva

tuotanto ja yhteiskunnan hyvinvoinnin optimiarvoon johtava tuotanto yleensä poikkeavat toisistaan.

Ojateknologian valinta vaikuttaa maanviljelystä aiheutuviin ulkoisvaikutuksiin, kuten ravinnekuormitukseen sekä maisema- ja biodiversiteettivaikutuksiin. Salaojituksen rakentamista perustellaan usein sillä, että se pienentää peltojen ravinnehuuhtoumia ja vähentää näin maanviljelyn aiheuttamaa ravinnekuormitusta sarkaojituksen verrattuna. Ravinnekuormituksen kannalta, salaojavalunnan onkin sarkaoja- ja pintavaluntaan verrattuna todettu kuljettavan vähemmän fosforia, mutta toisaalta sen typpipitoisuus on korkeampi. (Turtola & Paajanen 1995; Ohio State University 1998; Skaggs, Youssef, Chescheir & William 2005, 2173.) Ylläpitämällä sarkaojien kasvillisuuden monimuotoisuutta, voidaan vaikuttaa pellon ravinnehuuhtouman suuruuteen. Oikein hoidettuina sarkaojat ja etenkin niiden kasvillisuus tuottavatkin vesistöjen suojeluun liittyviä ekosysteemipalveluita. (Herzon & Helenius 2008; Beltman, Meuleman & Scheffer 2004.)

Sarkaojat pientareineen tarjoavat elinympäristön monille eliölajeille, minkä vuoksi ne ovat merkittäviä maatalousympäristön biodiversiteetin ylläpitämisen ja maatalousmaiseman säilymisen kannalta. Sarkaojien ekologista merkitystä on kuitenkin tutkittu vain vähän ja näin ollen niiden merkitys lajiston ja maiseman monimuotoisuuden ylläpitäjänä on jäänyt varsin vähälle huomiolle. Tutkimusten mukaan salaojitukset ja valtaojien putkitukset ovat kuitenkin merkittävimpiä maatalousympäristön homogenisoitumiseen ja biodiversiteetin pienenemiseen vaikuttavia syitä. Sarkaojien piennarten eliölajeja on tutkittu huomattavasti enemmän kuin itse ojissa ja niiden luiskilla eläviä lajeja. Sarkaojat ovat tärkeitä myös muille kuin ojissa ja niiden välittömässä läheisyydessä eläville lajeille, sillä ne ovat merkittäviä useiden lajien liikkumisen, ravinnonhankinnan ja pesimisen kannalta. (Herzon & Helenius 2008; Hietala-Koivu, Lankoski & Tarmi 2003.)

1.2 Tutkimuksen tavoite ja rakenne

Tämän tutkimuksen tavoitteena on laatia malli, jonka avulla voidaan tarkastella ja vertailla sala- ja sarkaojateknologioiden yksityisiä sekä yhteiskunnallisia kannattavuuksia. Mallissa määritelty yhteiskunnan hyvinvointi eroaa yksityisestä

voitosta, sillä siinä otetaan maanviljelijän yksityisen voiton lisäksi huomioon viljelystä aiheutuvat, ympäristöön kohdistuvat ulkoisvaikutukset, joiden suuruus riippuu valitusta ojateknologiasta. Tutkimuksen hehtaarikohtainen perusmalli määrittellään ojittamattomalle sekä sarka- ja salaojitetulle ohrapellolle ja siinä käsiteltäviä ulkoisvaikutuksia ovat maanviljelyn aiheuttama ravinnekuormitus sekä ojituksen biodiversiteettivaikutukset. Ojittamattomalle sekä sarka- ja salaojitetulle pellolle määritetään kullekin yksityinen ja yhteiskunnallinen optimi, sekä niiden mukaiset lannoitustasot, yksityiset voitot ja yhteiskunnan hyvinvoinnit. Sarkaojitetulle pellolle määritetään lisäksi optimien mukaiset, sarkaojien pellosto kattamiin pinta-alaosuuksiin perustuvat *ojituksen intensiivisyydet*. Yhteiskunnallista ja yksityistä optimia vertailemalla on mahdollista arvioida viljelystä aiheutuvien ulkoisvaikutusten, sekä näiden ohjaamiseen tarvittavien taloudellisten ohjauskeinojen suuruutta.

Tutkielman toisena tavoitteena on tarkastella biodiversiteettiä ja siihen vaikuttavaa sarkaojitusta maatalousmaiseman näkökulmasta sekä määrittää biodiversiteetin ja sarkaojituksen maisemallinen merkitys yhteiskunnallisen hyvinvoinnin kannalta. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi laaditaan *peltomaisemamalli* yhden neliökilometrin kokoiselle, neljän 25 hehtaarin pellon muodostamalle, sarkaojitetulle alueelle. Alueella otetaan huomioon peltojen, sarkaojien ylläpitämien biodiversiteettien keskinäinen, *spatiaaliseen autokorrelaatioon* perustuva vaikutus. Kullakin pellolla viljellään yhtä Suomen olosuhteisiin tyypillistä viljelykasvia; ohraa, vehnää, kauraa ja rypsiä. Malli vastaa muuten sarkaojitetulle pellolle määriteltyä perusmallia, mutta huomioimalla peltojen välinen, biodiversiteettiin vaikuttava spatiaalinen autokorrelaatio, voidaan alue käsittää maisemallisena kokonaisuutena. (Luoto, Kuussaari & Toivonen 2004.)

Seuraavassa eli toisessa luvussa esitellään sala- ja sarkaojituksen periaatteita ja niihin liittyviä käsitteitä, sekä perustellaan toimivan ojituksen merkitystä maanviljelyn kannattavuuden näkökulmasta. Lisäksi luvussa käydään läpi salaojitusten kannattavuuteen ja yleistymiseen liittyviä syitä. Kolmannessa luvussa käsitellään ojituksen vaikutuksia maanviljelystä aiheutuviin, ympäristöön kohdistuviin ulkoisvaikutuksiin eli ravinnekuormituksesta aiheutuvaan haittaan ja biodiversiteetin tuomaan hyötyyn. Neljännessä luvussa esitellään teoreettinen malli, jota sovelletaan

empiirisesti viidennessä luvussa. Kuudennessa luvussa esitellään mallin tulokset sekä niiden osittainen ja Monte Carlo simulaatioon perustuva herkkyystarkastelu. Viimeinen luku sisältää johtopäätökset.

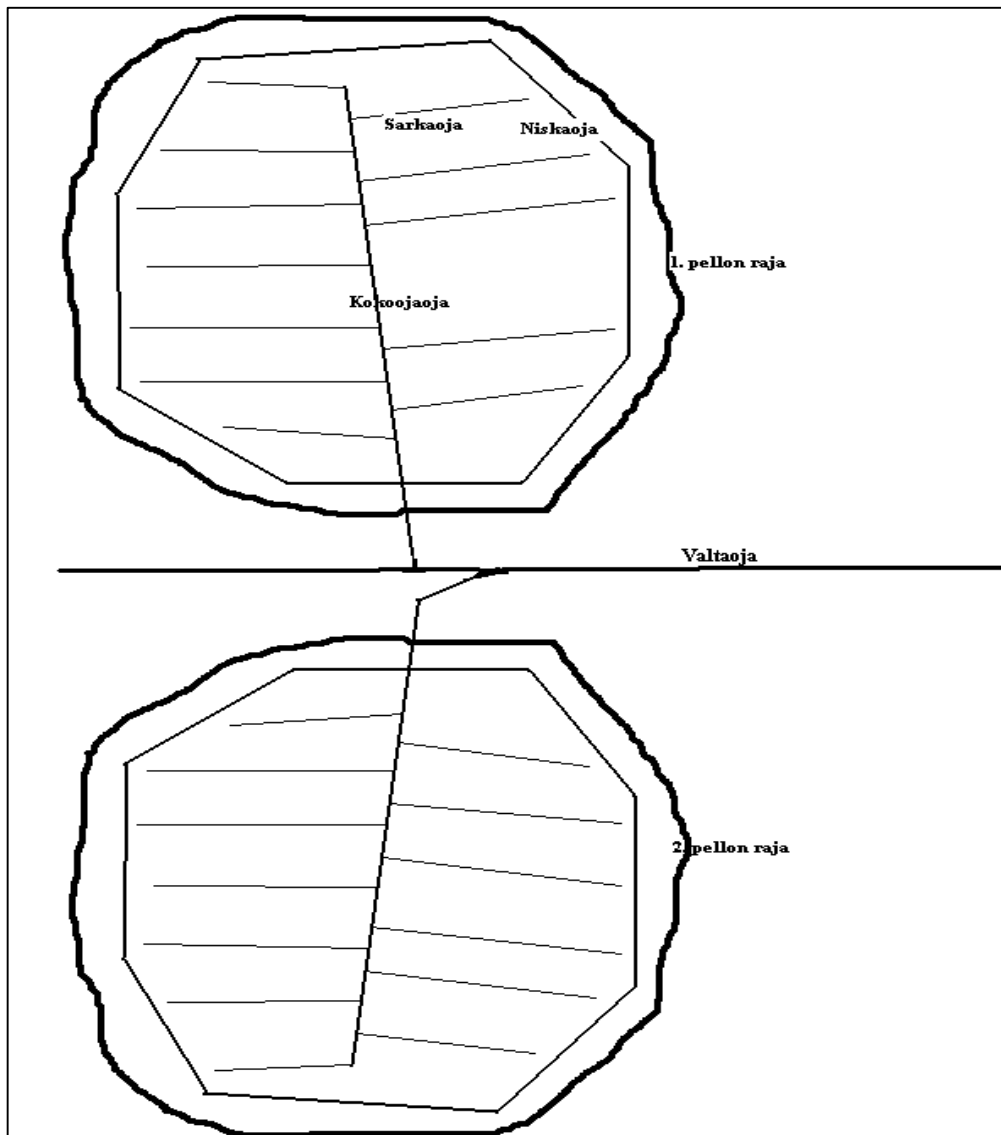
2 Ojateknologiat ja salaojituksen kannattavuus

2.1 Ojateknologiat

Maanviljelyssä ojituksella tarkoitetaan keinotekoisia uomia joiden avulla pyritään johtamaan viljelyn kannalta ylimääräinen vesi pois viljelymaalta. Ojituksen tarkoituksena on lisätä maanviljelyn kannattavuutta pellon vesitaloutta parantamalla. Hyvä vesitalous johtaa parempiin satoihin ja helpottaa maanviljelijän työtä.

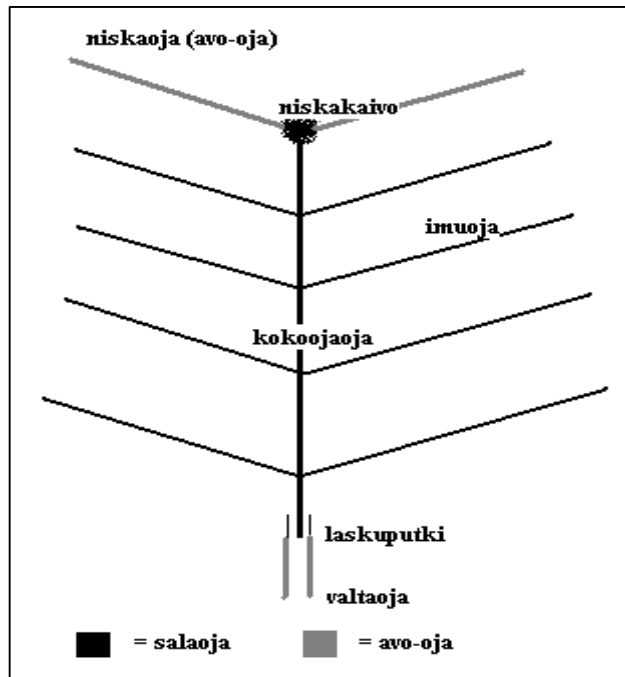
Ojitus voidaan jakaa peruskuivatukseen ja paikalliskuivatukseen. Peruskuivatus koostuu yleensä valtaojista, jotka johtavat useammilta peltolohkoilta paikalliskuivatukseen avulla kerätyn veden vesistöihin. Paikalliskuivatuksen tehtävänä on yksittäisten peltolohkojen kuivatus ylimääräisestä vedestä ja se toteutetaan avo- eli sarkaojituksella tai salaojituksella. (Maa- ja metsätalousministeriö 2003, 11.) Ojateknologian valintaan ja ojitusrakenteeseen vaikuttavat maalaji, maan jakaminen eri toiminnoille, viljelymaan kaltevuus, sateiden määrä ja niiden ajallinen jakautuminen sekä viljeltävä kasvilaji (Herzon & Helenius 2008, 1172).

Kuvassa 2.1 esitetään tyypillinen sarkaojajärjestelmä, joka koostuu pellon sarkojen välisistä sarkaojista tai laskuojista, sekä yleensä kokoojaojasta. Mikäli pellolla ei ole kokoojaojaa, laskevat sarkaojat ja laskuojat suoraan valtaojaan. Peltoa voi lisäksi ympäröidä niskaoja, jonka avulla kerätään viljelyalueen ulkopuolelta tuleva vesi. Pienimmät sarkaojat voivat olla vain 20 cm levyisiä, kun taas suurimmat valtaojat voivat olla leveydeltään jopa useita metrejä. Suomessa peltojen sarkaojat ovat pientareineen yleensä noin metrin levyisiä ja ne sijoitetaan noin 10-20 metrin välein.



Kuva 2.1 Avo-ojitus eli sarkaojitus

Kuvassa 2.2 esitetään salaojitus, joka koostuu maanalaisista imuojista, kokoojaojasta ja valtaojasta sekä laskuputkesta. Salaojitus rakennetaan uusiin peltoihin tai sillä korvataan sarkaojitusta. Salaojaputket valmistetaan yleensä tiilestä tai muovista ja ne upotetaan noin metrin syvyyteen, 10-20 metrin välein. (Herzon & Helenius 2008.)



Kuva 2.2 Salaojitus

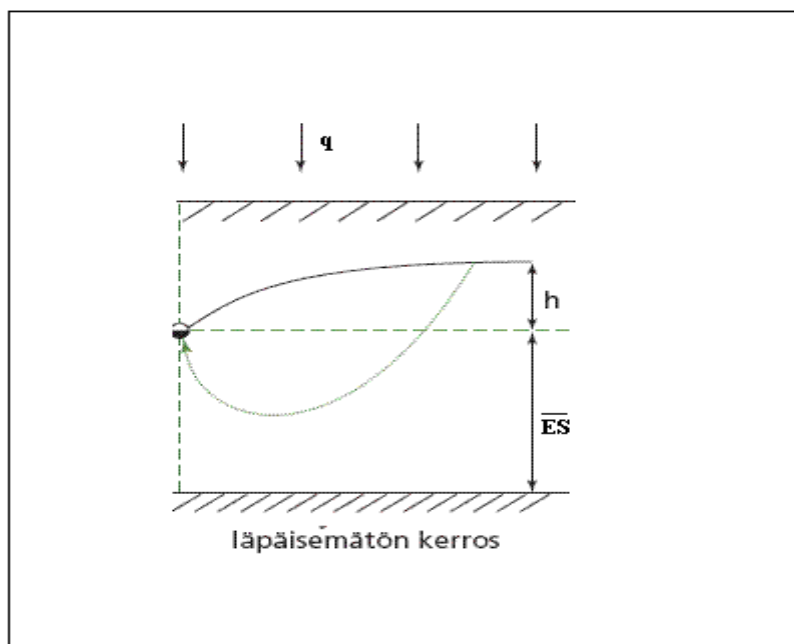
Säätösalaajitus on nimensä mukaisesti salaajitus, jonka tehokkuutta voidaan säätää säätökaivojen avulla. Säätämällä pyritään pitämään pohjaveden taso niin korkealla, kuin se viljelyn kannalta on tarkoituksenmukaista. Näin voidaan säästää kasteluvettä kuiville kasvukausille ja vähentää sadetuksen tarvetta. Säätösalaajitus parantaa myös ravinteiden käytön hyötysuhdetta ja sen avulla voidaan estää keväällä annettujen ravinteiden huuhtoutumista vesistöihin. (Maa- ja metsätalousministeriö 2005.) Suomalaisilla tiloilla on saatu positiivisia kokemuksia myös ns. tiheistä salaajituksista. Tiheä salaajitus poikkeaa rakenteeltaan perinteisestä salaajituksesta siten että se koostuu halkaisijaltaan pienemmistä, tiheämpään asetetuista salaajaputkista. Tiheän salaajituksen avulla pyritään pitämään pohjavesi sellaisella tasolla, ettei siitä ole haittaa viljelykasvin kasvun kannalta. (Vilja-alan yhteistyöryhmä 2008.) Ilmastonmuutos saattaa kuitenkin pitkällä aikavälillä vähentää ojituksen tarvetta ja näin ollen liian tehokas salaajitus voi johtaa peltojen kuivumiseen ja kastelutarpeen kasvuun (Herzon & Helenius 2008, 1179). Lisäksi valtaojien putkitukset ovat yleistyneet maatalouden tuottavuusvaatimusten kasvaessa. Siirtymällä maanalaiseen peruskuivatukseen voidaan kasvattaa peltojen lohkokokoa ja mahdollisesti lisätä maanviljelyn kannattavuutta. (Myyrä 2006.)

Pellon sarka- ja salaojituksen rakenteen suunnittelun apuna on mahdollista käyttää Hooghoudtin perusyhtälöä, jonka avulla voidaan määrittää kuvassa 2.3 esitettävä optimaalinen ojitussyvyys ja ojitustiheys pellon vesitalouden kannalta.

Hooghoudtin perusyhtälö on muotoa:

$$q = \frac{8K\overline{ES}h + 4Kh^2}{L^2} \quad (2.1)$$

jossa q on ojituksen tehokkuuden määrittelevä mitoitusvirtaama eli pelloilta ojituksen avulla poistettava vesimäärä ja h on pohjaveden korkeus ojien välissä. L kuvaa etäisyyttä ojien välillä ja K on maaperän hydraulinen johtavuus. \overline{ES} on pellon maaperän läpäisevän kerroksen ekvivalenttisyvyys. Salaojitetulla pelloilla läpäisevän kerroksen ekvivalenttisyvyyttä voidaan nostaa kasvattamalla salaojaputken tehollista halkaisijaa, eli varsinaisen salaojaputken halkaisijaa ja sen ympärystään muodostaman kerroksen paksuutta. (Smedema 2004, 142-145; Salaojituksen tutkimusyhdistys ry 2008.) Läpäisevän kerroksen ekvivalenttisyvyuden kasvattaminen merkitsee käytännössä sitä, että yhtä tehokkaan ojituksen toteuttamiseksi, ojien syvyyden ei tarvitse olla yhtä suuri tai niiden välinen etäisyys voi olla suurempi, kuin pienemmällä ekvivalenttisyvyydellä.



Kuva 2.3 Pellon ojitussyvyys Hooghoudtin perusyhtälön mukaan (Salaojituksen tutkimusyhdistys ry 2008, 6, muokattu).

Kuten Hooghoudtin perusyhtälöstä voidaan päätellä, mitä syvemmälle ojat kaivetaan, sitä harvempaan ne voidaan sijoittaa saman kuivatustehon aikaansaamiseksi. Toisin sanoen ojitus on sitä tehokkaampi, mitä tiheämpään ja syvemmälle ojat kaivetaan. Jos suunnittelussa käytetty mitoitusvirtaama ei ole tarpeeksi suuri vastaamaan pellon vesitalouden todellisia tarpeita, valuu suurempi osa pelloilta peräisin olevista vesistä pintavaluntana, koska ojituksen kapasiteetti ei tällöin ole riittävä. Hooghoudtin yhtälöstä voidaan myös havaita, että ojituksen suunnittelussa ja rakentamisessa tulee ottaa huomioon lisäksi peltokohtaisia tekijöitä, kuten maaperän hydraulinen johtavuus ja vettä läpäisevän maakerroksen syvyys.

Hooghoudtin yhtälöön perustuvia suosituksia pienempää ojaväliä käytettäessä ojituksen suunnittelussa, ojituksesta tulee tehokkaampi, kuin mitoitusvirtaaman perusteella lasketulla ojavälillä. (Salaojituksen tutkimusyhdystys ry 2008, 5-7). Tiheämpi ja syvempi salaojitus johtaa lisääntyneeseen kokonaisvaluntaan, josta ei enää riittävän ojitustehokkuuden saavuttamisen jälkeen ole sadon kannalta hyötyä, mutta jonka on todettu johtavan korkeampiin typpi- ja fosforipäästöihin. Liian tehokas salaojitus voi vaikuttaa satoon jopa negatiivisesti. (Madramootoo & Dodds 2008; Sands, Song, Busman & Hansen 2008, 107; Kladvko & Frankenberger 2008.)

2.2 Salaojituksen kannattavuus

Käsiteltäessä salaojituksen hyötyjä, on syytä tarkastella erillään ensisalaojituksia sekä uusinta- ja täydennyssalaojituksia. Ensisalaojitukset voidaan tehdä joko ojitamattomaan tai sarkaojitettuun peltoon. Mikäli ensisalaojitus tehdään ennalta kokonaan ojitamattomaan peltoon, parantaa se pellon vesitaloutta ja näin myös satoa. Jos pellolla on aikaisemmin ollut toimiva sarkaojitus, ei salaojituksella välttämättä ole pellon vesitalouden kannalta merkittävää vaikutusta. (Haataja & Peltola 2001, 13-14.) Ensisalaojituksesta suurimmat viljelijälle koituvat hyödyt syntyvät tällöin viljeltävän peltopinta-alan, eli *viljelypinta-alan* ja työn tehokkuuden kasvusta. Sarkaojitetulla peltolohkolla työmenekki saattaa olla pinta-alayksikköä kohti jopa yli 25 % suurempi kuin salaojitetulla peltolohkolla. (Haataja & Peltola 2001, 14.) Osa tästä työn säästövaikutuksesta tosin kumoutuu sarkaojitetun peltolohkon ollessa viljelypinta-alaltaan pienempi kuin salaojitettu peltolohko. Sitä vastoin salaojitetun

pellon sato on suuremman viljelypinta-alan takia sarkaojitettun pellon satoa parempi, vaikka kosteusolosuhteet olisivat molemmilla pelloilla yhtä hyvät ja niitä lannoitettaisiin yhtä tehokkaasti.

Uusinta- ja täydennyssalaojituksilla parannetaan tai korvataan olemassa olevaa salaojitusta. Taulukossa 2.1 esitetään ensisalaojitusten sekä uusinta- ja täydennyssalaojitusten, ojitettavaan peltopinta-alaan perustuvat osuudet kaikista salaojituksista vuosina 1998-2007. Lisäksi taulukko kertoo salaojitettun viljelymaan osuudet koko viljelymaasta Suomessa. Vuonna 2007 suurin osa, eli noin 79% Suomessa tehdyistä salaojitusinvestoinneista oli ensisalaojituksia, mutta uusinta- ja täydennyssalaojitukset muodostivat myös merkittävän 21% osuuden kaikista salaojituksista. Vuonna 2002 uusinta- ja täydennyssalaojitettut peltohehtaarit muodostivat jopa 44% kaikesta salaojitetusta peltopinta-alasta ja 2000-luvulla niiden osuus on ollut vuosittain yli 12%. (Salaojayhdistys ry 2008.)

Taulukko 2.1 Salaojitukset Suomessa vuosina 1998-2007 (Salaojayhdistys 2008, muokattu).

Vuosi	Uudet salaojitukset (ha)	(%)	Uusinta- ja täydennyssalaojitukset (ha)	(%)	Salaojitukset yhteensä (ha)	Salaojitettujen peltojen osuus kaikista pelloista (%)
1998	4820	84,84	861	15,16	5681	50
1999	9925	78,76	2677	21,24	12602	54
2000	7923	87,35	1147	12,65	9070	54
2001	6282	69,45	2763	30,55	9045	54
2002	7666	56,20	5975	43,80	13641	57
2003	6637	66,05	3412	33,95	10049	57
2004	6245	67,42	3018	32,58	9263	57
2005	8794	81,08	2052	18,92	10846	58
2006	7848	77,41	2290	22,59	10138	58
2007	5942	79,11	1569	20,89	7511	58

Salaojainvestoinnin ikä on noin 30 vuotta, minkä jälkeen ojituksen toimivuuden takaamiseksi on usein tehtävä uusintaojitus. Jos salaojituksen suunnittelussa on käytetty liian pientä mitoitusvirtaamaa, voi ojitus olla kapasiteetiltaan riittämätön pellon kuivaamiseksi. Tällöin täydennysojituksella voidaan parantaa salaojituksen toimivuutta. Täydennys- ja uusintaojitusten tarkoituksena on siis täydentää tai korvata olemassa olevaa salaojitusta. Niistä koituvat hyödyt syntyvät paremman kasvun ja korkeampien keskiarvosatojen johdosta. Salaojitus voi muuttaa

kasvuolosuhteita myös siten, että viljeltävä kasvi pystyy hyödyntämään annetun lannoitteen paremmin, kuin sarkaojitetulla pellolla. (Haataja & Peltola 2001, 17-18.)

Salaojituksen vesitaloudesta riippumattomiin satovaikutuksiin liittyen on viime aikoina tehty joitakin tutkimuksia. Wesström, Bölenius ja Joel (2008) ovat todenneet, että salaojien lähellä sadot ovat suurempia kuin kauempana ojista. He selittävät osan vaikutuksesta johtuvan salaojitukselta aiheutuvasta maan muokkauksesta, jonka satovaikutukset saattavat kestää jopa 50 vuotta. Montagnen, Cornun, ja Cousinin (2009) mukaan salaojitus voi vaikuttaa peruuttamattomasti useisiin maaperän biologisiin, fysikaalisiin ja kemiallisiin prosesseihin, jotka eivät näy välittömästi satotasoissa, vaan saattavat vaikuttaa satoihin pitkälläkin viiveellä.

Salaojitus on kustannuksiltaan huomattavasti suurempi investointi, kuin sarkaojitus. Toisaalta sarkaojat saattavat vaatia jopa vuosittaista perkausta ja siksi niiden ylläpitokustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin salaojilla. Suomessa salaojituksen rakennuskustannukset ovat kuitenkin kertainvestointina korkeat suhteutettuina niistä koituviin lyhyen aikavälin hyötyihin (Salaojakeskus ry 2002, 21). Salaojituskustannukset vaihtelevat paljon maaperästä riippuen. Maaperällä on vaikutusta sekä ojien syvyyteen ja tiheyteen, että niiden materiaali- ja kaivukustannuksiin.

Salaojakeskus ry:n (2006) mukaan salaojia tehtiin Suomessa vuonna 2005 yhtä ojitettavaa hehtaaria kohti keskimäärin 660m. Suunnitellut kustannukset olivat yhtä hehtaaria kohti keskimäärin 2500€ eli yhden salaojajametrin hinnaksi tuli noin 3,75 € Tästä hinnasta urakointikustannusten osuus oli noin 1,50 € eli 40% ja tarvikkeiden 1,60 € eli 43%. Loput kustannuksista eli 17% koostui muista töistä, kuten sarkaojien umpeen kynnöstä ja pellon loppukunnostuksesta. Salaojitukselta koituvat vuotuiset investointikustannukset olivat tällöin 30 vuoden laina-ajalla ja 5 % kiinteällä korolla laskettuna 163 €/ha/v. (Salaojakeskus ry 2006, 16.) Haatajan ja Peltolan (2001) salaojituksen kannattavuutta käsittelevän tutkimuksen mukaan salaojitukselta koituvat vuotuiset investointikustannukset taas ovat noin 110 €/ha/v.

Salaojitusinvestointien kysyntää on vähentänyt vuokratilviljelyn yleistyminen. Jopa 40 % Suomen viljelystä peltoalasta on vuokrattua. Suuri osa vuokrapelloista on sellaisten tahojen omistuksessa, jotka eivät itse harjoita maanviljelyä elinkeinonaan. Tällaisten omistajien halukkuutta tehdä pitkän aikavälin investointeja viljelytuotannon tehostamiseksi ei tunneta kunnolla, mutta voidaan olettaa heidän pyrkivän maksimoimaan lyhyen aikavälin tuottoja. Nykyinen markkinatilanne ja lainsäädäntö, joka ei mahdollista 10 vuotta pidempiä vuokrasopimuksia pelloille, ei kannusta myöskään vuokratilviljelijöitä salaojitusinvestointeihin. Toisaalta peltojen lohkokokojen ja tehtyjen tilusjärjestelyjen määrän kasvu ovat lisänneet salaojitusinvestointien kysyntää. (Myyrä & Pitkänen 2008; Peltola, Mattila & Kasteenpohja 2006.)

EU:n maatalouspolitiikka on muuttanut salaojituksen kannattavuutta yksittäisen viljelijän kannalta. Hintatuesta hehtaaritukeen siirtyminen on pienentänyt salaojitusinvestointien yksityistä kannattavuutta, koska sarkaojien viemä pinta-ala lasketaan mukaan tuettavaan peltopinta-alaan, eikä viljelijä saa tukea salaojituksella saavutettavien suurempien satojen johdosta. Näin ollen salaojitus ei lisää peltopinta-alan perusteella maksettavaa tukea, vaikka viljelypinta-ala ja peltopinta-alkohtainen sato kasvaisivatkin. (A 329/2007.) Ennen hehtaaritukia salaojitus saattoi lisätä maanviljelijän tuloja jopa 15 %, mutta nykyisellä tukijärjestelmällä enää noin 7 %. Monilla viljelykasveilla satohyödyt ja työn tehokkuuden kasvaminen tekevät salaojituksesta kuitenkin yhä kannattavan investoinnin. (Salaojakeskus ry 2002, 20.) Salaojitus saattaa nykyisen tukipolitiikan vallitessa nostaa pellon arvoa jopa 20–25 %. Ennen hehtaaritukeen siirtymistä salaojituksen tuottama pellon arvon nousu oli noin 28–34 %. (Peltola ym. 2006.)

Salaojituksia tuetaan maaseutuelinkeinojen rahoituslain mukaisella investointituella, mutta salaojainvestointien tukeminen on riippuvaista myös muista laeista ja asetuksista. Tämä johtuu siitä, että ojitukset toteutetaan joko tilakohtaisesti tai tilojen yhteishankkeina, jolloin niiden saama tuki määräytyy eri perustein. (Salaojakeskus ry 2006, 13.) Tilakohtaisia ensisalaojituksia tuettaessa, tuen perusteena käytettävä enimmäiskustannus on 2,80 €/m. Täydennys- ja uusintasalaojituksella laskennallinen enimmäiskustannus on 2,50 €/m. Tuen perusteena käytettävät salaojien enimmäismetrimäärät hehtaaria kohti vaihtelevat maalajeittain. Ensisalaojituksilla ne

vaihtelevat välillä 500 - 1000 m/ha. Uusinta- ja täydennyssalaojituksilla tuen perustana käytettävä enimmäismetrimäärä on 550m/ha. (A 333/2008.) Investointituki koostuu enintään 70 % tuen perusteena käytettävistä enimmäiskustannuksista kattavasta korkotukilainasta ja 20 % kattavasta investointiavustuksesta. Näiden yhteenlasketun tukitason ei kuitenkaan tule ylittää 40 % enimmäiskustannuksista. Korkotuen määrä on korkeintaan neljä prosenttiyksikköä ja sen edellytyksenä on, että laina-aika on enintään 30 vuotta. (L 1476/2007.)

Säätösalojituksista tuetaan ympäristötuen erityistuella enintään 54 €/ha. Maksettavan erityistuen suuruus määräytyy viljelijälle säätösalojituksista aiheutuvien kustannusten ja siitä saatavien ravinnekuormituksen pienenemiseen liittyvien hyötyjen perusteella. Yhdestä, 1-2 hehtaarin alalle riittävästä säätökaivosta aiheutuvat kertainvestointikustannukset olivat vuonna 2004 noin 650 € (Maa- ja metsätalousministeriö 2005 ja 2009.)

Tiheä salaojitus on rakennus- ja materiaalikustannuksiltaan metriä kohti edullisempi kuin perinteinen salaojitus ja sitä tuetaan käyttäen enimmäiskustannuksena 1,50 €/m. Tuen kokonaissuuruus määritellään kuitenkin siten, että sen perustana oleva hehtaarikohtainen enimmäiskustannus on sama kuin perinteisessä salaojituksessa ja näin sama tukimäärä mahdollistaa tiheämmän ojituksen. (A 333/2008; Vilja-alan yhteistyöryhmä 2008.)

Salaojitukseen liittyvien ohjauskeinojen oikeudenmukaisuutta ja niiden mahdollisuuksia edistää yhteiskunnan hyvinvointia pohditaan enemmän luvuissa 6 ja 7.

3 Ojateknologioiden yhteys ympäristöön kohdistuviin ulkoisvaikutuksiin

3.1 ravinnekuormitus

Suomessa maatalous aiheuttaa suuren osan vesistöjen ja etenkin ravinnekuormitukselle herkän Itämeren rehevöitymisestä. Vuonna 2000 ainoastaan hieman yli kymmenesosa Itämereen kulkeutuvista typpipäästöistä ja noin neljännes fosforipäästöistä oli peräisin pistemäisistä lähteistä. Valtaosa Itämeren ravinnekuormituksesta onkin hajakuormitusta, jonka suurin aiheuttaja on maatalous. (HELCOM 2005.) Kokonaisuudessaan maatalous aiheuttaa noin 60 % vesistöihin joutuvista fosforipäästöistä ja puolet typpipäästöistä, jos luonnon aiheuttamaa ravinnehuuhtoumaa ei oteta huomioon. Suurin osa maatalouden typpi- ja fosforipäästöistä syntyy keinolannoitteiden käytöstä ja karjanlannasta, jotka huuhtoutuvat pellolta veden valunnan mukana. Vesistöjen rehevöitymisen, eli perustuotannon kasvun niukkuustekijänä on yleensä typpi tai fosfori, joiden määrä toimii kasvun rajoittajana. Kasvit käyttävät ravinnokeeseen nitraatti- ja ammoniummuodossa olevaa typpeä. Vaikka ilmakehästä 78 % onkin typpeä, ei se sellaisenaan ole viljelykasvien hyödynnettävissä, eli epäorgaanisessa muodossa. Fosforia on useimmissa viljelymaissa huomattavasti suurempia määriä kuin mitä vuotuiseen satoon tarvittaisiin, mutta suurin osa siitä on viljelykasveille käyttökelvottomassa muodossa, eli maaperään kertyneenä viljavuusfosforina. Peltoja lannoitetaankin, jotta lisättäisiin ravinteiden biosaatavuutta, eli viljelykasveille käyttökelpoisten ravinteiden määrää pelloissa. (Lyytimäki & Hakala 2008, 52-63.)

Ravinnehuuhtouma muodostuu partikkelifosforista ja liukoisesta fosforista sekä typen orgaanisista ja epäorgaanisista muodoista. Liukoinen fosfori sekä epäorgaanisessa muodossa oleva typpi ovat vesistöön kulkeutuessaan suoraan vesikasvien ja levien käytettävissä. Partikkelifosfori on kiinnittynyt pelloilta irronneeseen maa-ainekseen ja näin se varastoituu usein vesistön pohjan sedimentteihin, josta sitä vapautuu viiveellä perustuotannon käytettäväksi. Vesistöjen bakteerit ja sinilevät pystyvät muuttamaan orgaanisessa muodossa olevaa typpeä vesikasvillisuudelle käyttökelpoiseen muotoon.

Maatalouden ravinnehuuhtoumia ja niihin vaikuttavia tekijöitä on tutkittu paljon. Myös salaojavaluntaan ja salaojitettun pellon pintavaluntaan liittyviä ravinnehuuhtoumatutkimuksia on tehty runsaasti. Sarkaojavalunnan ja ojittamattoman pellon pintavalunnan mukana kulkeutuvia ravinteita on sen sijaan tutkittu hyvin vähän. Salaojavaluntojen ravinnehuuhtoumiin liittyvien tutkimustulosten kirjo on suuri, sillä niihin vaikuttavat esimerkiksi ojituksen ikä ja rakenne sekä muut tekijät, kuten maan kaltevuus, maalaji ja ilmasto. Jopa saman maalajin pellot saattavat vaihdella paljon keskenään sekä fysikaalisilta että kemiallisilta ominaisuuksiltaan sitoa ja suodattaa ravinteita. Salaojavaluntaan ja ravinnehuuhtoumaan vaikuttavissa tekijöissä voi olla suuria eroja jopa samalla pellolla. (Paasonen-Kivekäs, Vakkilainen & Karvonen 2008.) Tässä luvussa käydään läpi eri tekijöiden vaikutuksia typpi- ja fosforihuuhtoumiin eri ojateknologioilla. Suurin osa esitetyistä tekijöistä ja niiden vaikutuksista koskee kuitenkin ainoastaan salaojitettun pellon ravinnehuuhtoumia, koska sarkaojitettun ja ojittamattoman pellon ravinnehuuhtoumiin liittyvää tutkittua tietoa on olemassa hyvin vähän.

Useat tutkimustulokset osoittavat salaojavalunnan etenkin savipelloilla kasvattavan typpihuuhoutoumaa sekä vähentävän fosforihuuhoutoumaa ja eroosiota pintavaluntaan ja sarkaojavaluntaan verrattuna (Turtola & Paajanen 1995; Ohio State University 1998; Skaggs ym. 2005, 2173). Toisaalta on myös tutkimustuloksia, jotka kertovat salaojavalunnan sisältävän enemmän huuhtoutunutta maa-ainesta ja näin oletettavasti myös suurempia määriä fosforia kuin pintavalunnan (Turtola, Alakukku, Uusitalo & Kaseva 2007, 342). Salaojituksen rakenteella ja rakennusmateriaalilla on vaikutusta salaojavalunnan mukana huuhtoutuvien ravinteiden määrään. 1980-luvulle asti salaojat rakennettiin pääasiassa tiiliputkista, kun taas nykyisten salaojitusten rakennusmateriaalina on yleensä muovi (Salaojakeskus ry 2002, 28). Tiiliputkista ja huokoisesta putkien ympärysaineesta koostuvalla salaojituksella partikkelifosforihuuhoutouma saattaa olla merkittävän korkea etenkin savisilla pelloilla (Paasonen-Kivekäs ym. 2008). Salaojituksen iän on myös todettu vaikuttavan sen toimivuuteen ja pellolta huuhtoutuvien ravinteiden määrään, siten että ojituksen vanhetessa typpihuuhoutouma pienenee ja fosforihuuhoutouma kasvaa pintavalunnan osuuden kasvaessa. (Turtola & Paajanen 1995.)

Uusien salaojamateriaalien ja -teknologioiden tehokkuutta ravinnehuuhtoumien kannalta tutkitaan parhaillaan mm. Vakkilaisen ym. (2008) toimesta. Uusien, ympäristön kannalta parempien salaojamateriaalien käyttöönotossa on ongelmana se, ettei valtio tue investointituella kuin tietyt laatuvaatimukset täyttäviä salaojainvestointeja, eli ns. perinteisin menetelmin toteutettuja salaojituksia. Valtio tukee kuitenkin säätösalojitusta, jonka on huomattu pienentävän etenkin typpihuuhtoumaa normaaliin salaojitukseen verrattuna.

Grant ym. (1996) mukaan yksittäiset sääilmiöt saattavat vaikuttaa huomattavasti vuotuisen fosforihuuhtoumaan salaojitetulla pellolla. Esimerkiksi kerran vuodessa esiintyvä myrsky voi lisätä huomattavasti salaojitetun pellon kokonaisvaluntaa, ja näin kasvattaa koko vuoden ajalta mitattavaa fosforihuuhtoumaa. Huiput fosforihuuhtoumissa selittyvät usein salaojituksen kapasiteetin ylittymisillä, eli sillä että ojan suunnittelun perusteena käytetty mitoitusvirtaama ei ole riittävä veden poistamiseksi pellolta ja osa vesistä poistuu pellolta pintavaluntana, jonka mukana fosforia huuhtoutuu enemmän. Näin ollen ravinnehuuhtoumien kannalta merkittävät sääilmiöt tulisi ottaa huomioon salaojamittauksia tehdessä ja salaojituksia suunniteltaessa. Myös sarkaojien tapauksessa yksittäiset myrskyt saattavat vaikuttaa huomattavasti sarkaojien kykyyn varastoida ylimääräisiä ravinteita, sillä ojissa oleva veden määrä ja valuntanopeus kasvavat. Saman tutkimuksen mukaan sarkaojien puhdistuspotentiaalia ja sen tekijöitä ei kuitenkaan tunneta kunnolla. (Kröger, Holland, Moore & Cooper 2007.)

Typpi- ja fosforihuuhtouman on todettu olevan sitä suurempi mitä tiheämpi salaojaverkosto on ja mitä syvemälle maahan se rakennetaan. Kuivatustehoa ajatellen on lähemmäs maan pintaa upotetut salaojat sijoitettava tiiviimmin toisiinsa nähden kuin syvemälle maahan upotettavat salaojat. (Skaggs ym. 2005; Skaggs & Chescheir 2003.) Kladvko ym. (2008) ovat todenneet, etteivät satovaihtelut enää tietyn salaojatiheyden jälkeen merkittävästi kasva. Typpihuuhtouma sen sijaan jatkaa kasvuaan myös tämän tiheyden jälkeen. Olisikin tärkeää pystyä määrittämään salaojituksen tiheys mahdollisimman hyvin, jotta saavutettaisiin optimaalinen sato ja samalla mahdollisimman pieni typpihuuhtouma. (Kladvko ym. 2008.)

Salaojitetun pellon partikkelifosforin huuhtoutumaa lisää salaojavalunnan kasvaminen. Liukoisen fosforin huuhtouman suuruuteen salaojien kautta valuvan veden määrällä ei yhtä merkittävää vaikutusta (Ulen & Persson 1999, 2806-2807). Sarkaojissa maahan sitoutunutta fosforia on runsaasti ja siksi fosforihuuhtoumat ovat sarkaojitetuilla pelloilla usein korkeita. Olisikin tärkeää kehittää etenkin sellaisia sarkaojien ylläpitomenetelmiä, joilla saavutetaan mahdollisimman pieni fosforihuuhtouma. (Nguyen & Sukias 2001.) Myös Vaughan, Needelman, Kleinman ja Allen (2007) korostavat sellaisten ylläpitomenetelmien tärkeyttä, joiden avulla pystyttäisiin pienentämään sarkaojitetun pellon ravinnehuuhtoumia. Tämä tosin edellyttäisi lisätutkimusta etenkin sarkaojaverkostojen sisäisten viljavuusfosforierojen ja ojakasvillisuuden vaikutuksen osalta.

Sarkaojitetun pellon ravinnehuuhtoumaan voidaan vaikuttaa kasvillisuuden avulla. Ojien viereen sijoitettavat suojakaistat vähentävät ravinnekuormitusta vaihtelevasti ja sarkaojien kasvillisuus puhdistaa niissä virtaavaa vettä. (Herzon & Helenius 2008, 1176–1178; Beltman ym. 2004; Mankin, Ngandu, Barden, Hutchinson & Geyer 2007; Mulholland, Helton, Poole, Hall & Hamilton 2008; Borin, Bigon, Zanin & Fava 2004; Dorioz, Wang, Poulencard & Trevisan 2006; Lovell & Sullivan 2006.) Suojakaistojen puhdistustehoa on tutkittu myös salaojien tapauksessa. Salaojien päälle sijoitettujen suojakaistojen ei kuitenkaan todettu vähentävän ravinnehuuhtoumaa salaojitetulla pellolla. (Bhattarai, Kalita & Patel 2009.)

Myös ojan piennarten ja luiskien kasvillisuus sitoo pelloilta huuhtoutuvia ravinteita, mutta niiden kyky sitoa ravinteita vaihtelee suuresti alueittain ja vuodenajoittain (Herzon & Helenius 2008, 1178). Eri kasvilajien vaikutuksia ravinnehuuhtoumien säätelyyn on tutkittu hyvin vähän. Monimuotoisempi kasvillisuus sitoo ravinteita todennäköisesti paremmin, kuin yksipuolinen kasvillisuus. Ojien perkaamisen on todettu vähentävän fosforipäästöjen määrää etenkin kasvukauden ulkopuolisena aikana. Monimuotoisuuden kannalta, vierekkäisiä ojia ei kuitenkaan tulisi perata samana vuonna, jotta niissä elävät eliölajit eivät tulisi uhatuiksi. (Herzon & Helenius 2008, 1175–1176.)

Maanmuokkauksen on todettu vaikuttavan eroosiota kiihdyttävästi mikä lisää irronneen maa-aineksen ja partikkelifosforin määrää salaojavalunnoissa, etenkin

savisilla pelloilla (Turtola ym. 2007). Oygardenin, Kvarnerin ja Jenssenin (1997) mukaan maanmuokkaus lisää huomattavasti irronneen maa-aineksen määrää savipeltojen salaojavalunnoissa. Syyskynnettäessä salaojavalunnan maa-aines saattaa muodostaa jopa yli puolet pelloilta huuhtoutuvasta maa-aineksesta. Maanmuokkauksen ja suorakylvön vaikutukset tulevat ravinnehuuhtoumissa ilmi aikaviiveellä ja siksi tutkimusta olisi tehtävä pitkältä aikaväliltä, jotta todella pystyttäisiin määrittämään niiden vaikutukset ravinnehuuhtoumien suuruuteen. (Roper ym. 2008.)

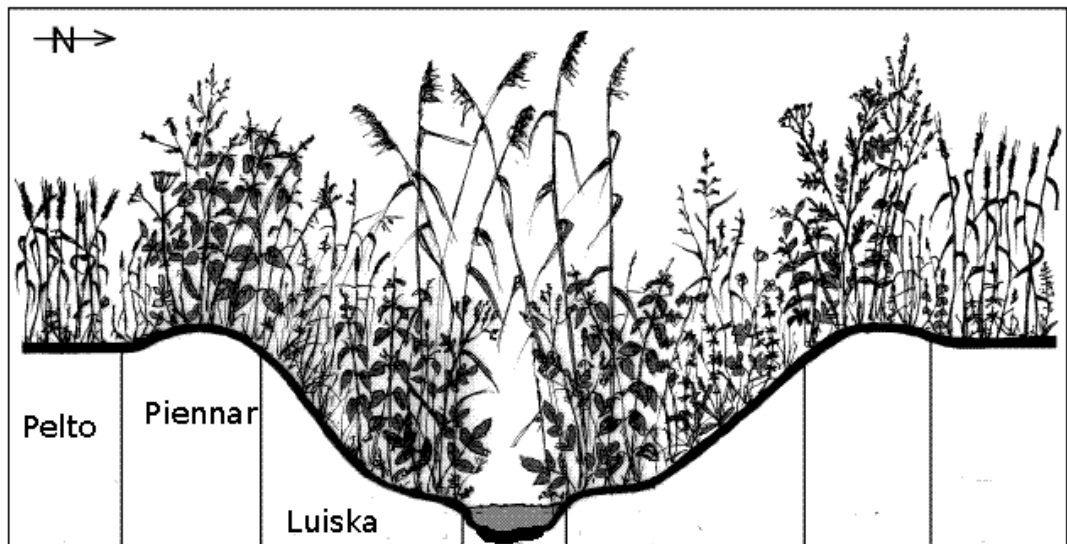
3.2 Biodiversiteetti

Biodiversiteetillä eli luonnon biologisella monimuotoisuudella tarkoitetaan kaikkea elollisessa luonnossa esiintyvää vaihtelua. Biodiversiteettiä ilmenee geenitasolla, lajitasolla sekä eliöyhteisöjen ja toimintojen tasolla. Lajitason biodiversiteetti voidaan jakaa erikseen alfa-diversiteettiin, jolla tarkoitetaan lajien esiintymistä jossain pisteessä tai sen välittömässä läheisyydessä, sekä gamma-diversiteettiin joka kuvaa lajien runsautta koko maisemassa. Näiden välinen yhteys voidaan esittää beta-diversiteetin avulla, joka määrittää lajimäärän riippuvuuden tarkasteltavan alueen suuruudesta. (Whittaker 1970; Rosenzweig 1995, 33.)

Maatalouden biodiversiteetti on suurelta osin ihmisen luomaa. Maatalousympäristö sijoittuukin käsitteenä kaupunkiympäristön ja luonnonympäristön väliin, sillä se tarjoaa runsaasti elinympäristöjä eliöille, joilla ei olisi mahdollisuutta selvitä luonnontilaisessa ympäristössä, eikä kaupunkiympäristössä. Toisaalta maatalous on hävittänyt paljon alkuperäisiä luonnontilaisia elinympäristöjä, kuten soita. Maatalousympäristöt poikkeavat Suomessa paljon toisistaan, johtuen maatalousalueiden pirstaleisuudesta sekä erilaisista tuotantosunnista ja luonnonolosuhteista. (Tiainen, Kuussaari, Laurila & Toivonen 2004, 16–21; Lyytimäki & Hakala 2008, 294–300.)

Suomessa maatalouden biodiversiteettiin liittyvää tutkimusta on tehty yhä enemmän Suomen Euroopan unioniin liittymisestä ja unionin yhteiseen maatalouspolitiikkaan sitoutumisesta lähtien. Euroopan unionin maatalouspolitiikan yhtenä tarkoituksena on pitää yllä maatalousympäristöjen biodiversiteettiä. (Kuussaari, Heliölä, Tiainen &

Helenius 2008.) Sarkaojien ekologista merkitystä on kuitenkin tutkittu vain vähän. Näin ollen niiden vaikutus lajiston ja maiseman monimuotoisuuden ylläpitäjänä on jäänyt vähälle huomiolle. Kansainvälisesti eniten on tutkittu ojan piennarten eliöitä, kuten putkilokasveja, mutta sarkaojissa ja niiden luiskilla eläviin lajeihin liittyen on tehty hyvin vähän tutkimusta. (Herzon & Helenius 2008, 1173.) Suomessa sarkaojien merkitystä lintujen laji- ja yksilömäärien kannalta on myös tutkittu jonkin verran. Salaojituksen vaikutuksia biodiversiteettiin ei kuitenkaan ole tutkittu kattavasti, eikä niitä siten oteta kunnolla huomioon ojitukseen liittyvässä maatalous- ja ympäristöpolitiikassa. Suurin osa sarkaojien biodiversiteettivaikutuksiin liittyvistä tutkimuksista koskee myös muita avo-ojia, kuten valta- ja kokoojaojia. Tässä luvussa käsitelläänkin pääasiassa kaikkia avo-ojatyyppejä koskevia tutkimustuloksia.



Kuva 3.1 Poikkileikkauskuvaa sarkaojan ekosysteemistä (Dajdok & Wuczynski 2005, muokattu).

Ekosysteemillä tarkoitetaan yhtenäisen alueen elollisen ja elottoman luonnon muodostamaa kokonaisuutta. Ekosysteemit tarjoavat ihmisille niiden toiminnan mahdollistamia palveluita eli ns. ekosysteempalveluita (Millennium Ecosystem assessment 2005, 29). Kuvassa 3.1 kuvataan sarkaojan ekosysteemiä. Sen osia ovat varsinainen oja, ojan kalteva seinämä eli luiska ja ojan piennar. Ojakoosysteemin muodostavat sen osien eloton aines sekä niissä elävät eliölajit, jotka elävät jatkuvassa vuorovaikutussuhteessa ympäröivän peltoekosysteemin kanssa.

Tärkeimpiä sarkaojien tarjoamia ekosysteemipalveluita ovat

- eroosion ehkäisy
- maan kuivaus ja viljelymaan parantaminen
- vaikutukset maanviljelyn ravinne- ja kasvinsuojeluainepäästöihin
- vaikutukset hydrologiseen kiertoon
- pölyttävien lajien ja luonnollisten petojen ylläpitäminen
- lajiston ja maiseman monimuotoisuuden ylläpitäminen

(Herzon & Helenius 2008, 1175).

Monissa homogeenisissä maatalousmaisemissa avo-ojat, kaikki avo-ojatyypit mukaan lukien, saattavat toimia ainoana verkostona, jossa esiintyy muita kuin viljelyyn liittyviä kasvilajeja. Liiallinen kasvillisuus voi kuitenkin häiritä veden kulkeutumista ojissa ja näin heikentää niiden kykyä poistaa vettä pelloilta. Toisaalta veden virtaamisen hidastuminen voi vaikuttaa siihen, että avo-ojissa ehtii tapahtua ravinteiden kemiallista pidättymistä ja laimenemista, mikä saattaa johtaa ravinnehuuhtoumien pienemiseen. (Herzon & Helenius, 2008.)

Avo-ojitettujen, kosteiden alueiden on todettu olevan lajistollisesti rikkaita, vaikka useat ojissa ja niiden läheisyydessä viihtyvät eliölajit hyötyvätkin ojista vain jossain vaiheessa lisääntymissyklään. Ojat tarjoavat hyvin erilaisen elinympäristön, verrattuna muihin vesialueisiin. Ne ovat lineaarisia elementtejä, joiden pinta-alan suhde ulkoreunan pituuteen on hyvin pieni, minkä vuoksi ne vaihtavat runsaasti aineita ja organismeja muun ympäristön kanssa. Suurin osa avo-ojissa elävistä eliölajeista tarvitsee ympäristöltään sekä kosteutta että maata tai kasvillisuutta. Useat ojien ja ojanvarsien kasvilajeista ovat alkujaan peräisin ojitetuista soista ja nämä kasvit ovatkin kadonneet monelta alueelta soiden kuivattamisen myötä. Avo-ojat tarjoavat niille soita muistuttavan kostean ympäristön. (Herzon & Helenius 2008, 1172-1173.)

Herzonin ja Heleniuksen (2008) mukaan peltolintulajien määrä kertoo hyvin viljelyalueiden heterogeenisyydestä. Ojat pienetareineen sisältävät paljon hyödyllisiä resursseja peltolinnuille: monipuolista ravintoa, märän maaperän, vettä, monipuolisen esiin työntyvän kasvillisuuden, sekä pensas- ja puuryhmiä laulamista

ja pesintää varten. Avo-ojan koko ja kasvillisuus ovat merkittäviä tekijöitä monien lintulajien esiintymisen kannalta. (Herzon & Helenius 2008, 1174.)

Useat kotimaiset tutkimukset ovatkin osoittaneet avo-ojien ja niiden piennarten olemassaolon vaikuttavan positiivisesti lintujen lajimäärään ja esiintymistiheyteen. Vepsäläisen (2007) mukaan ojien määrällä on merkittävä positiivinen vaikutus etenkin avoimissa peltoekosysteemeissä elävien lintujen lajirunsauteen. Pihan (2007) mukaan avo-ojat ovat tärkeitä monille peltolintulajeille ja sarkaojien säilyttämistä olisi pyrittävä kannustamaan etenkin sellaisissa maatalousympäristöissä, jotka ovat muutenkin edullisia elinympäristöjä peltolinnuille. Avo-ojien sekä ruoho- ja laidunmaan määrä selittävätkin yhdessä jopa 28,6 % kiurujen tiheydessä esiintyvistä vaihtelusta (Piha 2007, 48). Schulmanin, Heliölän ja Kuussaaren (2005) Ahvenanmaan maatalousluonnon monimuotoisuutta käsittelevässä tutkimuksessa todetaan useiden eri lintulajien yksilömäärien kasvaneen avopiennarten määrän kasvaessa.

Suuremmissa avo-ojissa, kuten valtaojissa voi viihtyä kalalajeja. Suomessa esimerkiksi taimenta on havaittu esiintyvän isommissa, runsasvetisemmissä ojissa. (Näreaho, Jormola, Laitinen & Sarvilinna 2006.) Myös joitakin rapulajeja, kuten jokirapua on tavattu avo-ojista (Herzon & Helenius 2008). Sammakoita esiintyy etenkin vähävetisissä sarkaojissa, sillä ne tarjoavat sammakoille kostean ympäristön, ilman että ne kuitenkaan joutuvat petokalojen uhreiksi. Pysyvä vesi on ehtona useiden nisäkkäiden esiintymiselle ojissa, kuten vesipäästäiselle ja saukolle. Sarkaojitetuilla pelloilla on myös runsaasti muita pikkunisäkkäitä, kuten pelto- ja kenttämyyriä, sekä päästäisiä. Sarkaojat toimivatkin etenkin pienten nisäkkäiden liikkumiskäytävinä, mahdollistaen niiden turvallisen liikkumisen paikasta toiseen, joka ei pelloilla muuten olisi mahdollista. (Herzon & Helenius 2008.) Ojanpientareet ja luiskat ovat tärkeitä myös useille hyönteisille, kuten perhosille, joille ne ovat merkittäviä ravinnonhankinnan kannalta (Kuussaari, Heliölä, Tiainen & Helenius 2008, 62-65).

Liira ja Aavik (2009) ovat tutkineet avo-ojien määrän ja läheisyyden vaikutusta kasvien lajimäärään Virossa. He jakavat kasvit agrotolerantteihin ja luontoarvoa indikoiviin kasveihin. Agrotolerantteja kasvilajeja ovat sellaiset, joita esiintyy

vähintään kymmenellä prosentilla maanviljelyn viemästä pinta-alasta. Muut kasvit edustavat luontoarvoa indikoivia kasvilajeja. Avo-ojien olemassaolo ja määrä vaikuttavat Liiran ja Aavikin (2009) mukaan positiivisesti etenkin luontoarvoa indikoivien kasvilajien määrään, sekä alfa- että gamma-diversiteettiä tarkasteltaessa.

4 Teoreettinen malli

4.1 Yleistä mallista

Tässä luvussa esitellään teoreettinen malli, jonka perusteella voidaan määrittää viljelytuotannon yksityiset ja yhteiskunnalliset optimit. Ensiksi käsitellään yksityistaloudellista ongelmaa, jossa tarkastellaan sadon muodostumista, siitä saatavia tuloja sekä viljelijälle tuotannosta koituvia kustannuksia. Nämä yhdessä muodostavat viljelijän yksityisen voittofunktion, jonka maksimiarvo määrittää yksityisen optimin. Yksityiset voittofunktiot määritellään, ja niiden yksityiset optimit määrittävät, ensimmäisen kertaluvun ehdot ratkaistaan erikseen ojittamattomalle, salaojitetulle sekä sarkaojitetulle peltohehtaarille.

Seuraavaksi tarkastellaan yhteiskuntataloudellista ongelmaa, jossa otetaan yksityisen voiton lisäksi huomioon viljelytuotannosta yhteiskunnalle koituvat ulkoisvaikutukset, eli ravinnehuuhtoumahaitta ja sarkaojien ylläpitämisen biodiversiteetin arvo. Näin saadaan määriteltyä funktio tuotannosta aiheutuvalla yhteiskunnan hyvinvoinnille, jonka maksimiarvo toteutuu ensimmäisen kertaluvun ehdot täyttävässä yhteiskunnallisessa optimissa. Yhteiskunnan hyvinvointia kuvaavat funktiot määritellään, ja niiden optimeihin johtavat ensimmäisen kertaluvun ehdot ratkaistaan erikseen ojittamattomalle sekä sala- ja sarkaojitetulle peltohehtaarille. Lisäksi määritellään yhteiskunnan hyvinvointifunktio ja sen ensimmäisen kertaluvun ehdot sarkaojitetulle, yhden neliökilometrin laajuiselle peltomaisemalle, joka koostuu neljästä 25 hehtaarin kokoisesta pellostä. Maisemassa jokaisen pellon biodiversiteettiin ja sen arvoon vaikuttaa myös maiseman muiden peltöjen biodiversiteetit, eli siinä huomioidaan biodiversiteettiin vaikuttava spatiaalinen autokorrelaatio.

Teoreettisen mallin hehtaariohtaisissa funktioissa yläindeksillä ⁰ tarkoitetaan ojittamatonta peltoa. Vastaavasti yläindeksillä ¹ merkitään salaojitettua ja yläindeksillä ² sarkaojitettua peltoa. Alaindeksit kuvaavat osittaisderivaattoja. Peltomaisemalle määritellyissä funktioissa yläindeksit kuvaavat eri peltoja.

4.2 Yksityiset optimit

Kosteusolosuhteiltaan huonon, ojittamattoman pellon satoa kuvaa satovastefunktio $f^0(N)$, jossa N on lannoitustaso. Satovastefunktio salaojitetulle pellolle on $f^1(N)$. Salaojitetulla pellolla salaojituksen määrä ja laatu oletetaan vakioiksi, eli satoon vaikuttaa ainoastaan lannoitustaso. Koska vesitalous on salaojitetulla pellolla parempi kuin ojittamattomalla pellolla, on salaojitetulta pellolta saatava sato aina vähintään yhtä hyvä kuin ojittamattoman pellon sato, lannoitustason ollessa yhtä suuri molemmilla pelloilla.

Satovastefunktio sarkaojitetulle pellolle on $f^2(N, m)$. Sarkaojitetun pellon satoon vaikuttaa lannoitustason N lisäksi ojien pellostä viemä pinta-alaosuus, eli sarkaojituksen intensiivisyys m^1 , siten että maksimissaan sarkaojitetun pellon satovastefunktio vastaa salaojitetun pellon satovastetta. Maksimisatovasteen toteuttavalla ojituksen intensiivisyydellä, sato kuitenkin jää sarkaojitetulla pellolla pienemmäksi, kuin salaojitetulla pellolla, vaikka lannoitustaso olisikin sama. Tämä johtuu siitä, että sarkaojitus vie osan pellon viljelypinta-alasta, eli satovastefunktio kerrotaan sarkaojitetun pellon tapauksessa sarkaojituksen pinta-alavaikutusta kuvaavalla kertoimella $(1 - m)$. Jos sarkaojituksen intensiivisyys saa arvon nolla, vastaa satovaste ojittamattoman pellon satovastefunktiota. Sarkaojitetun pellon satovaste kasvaa tässä mallissa ojituksen intensiivisyyden suhteen tiettyyn arvoon asti, jolla satovastefunktio on sama kuin salaojitetulla pellolla. Tätä suuremmilla arvoilla intensiivisyyden lisäämisellä ei enää ole vaikutusta satovasteeseen. Viljelykasvin myyntihinnan p ja satovastefunktion f^i arvon tulo määrittävät viljelytuotannon arvon. Viljelykasvin hinta oletetaan mallissa eksogeeniseksi muuttujaksi, eikä se näin ollen ole riippuvainen viljelykasvin tarjonnasta.

Tuotannon kustannukset muodostuvat investointi-, ylläpito- ja työkustannuksista sekä lannoitteen käytöstä aiheutuvista kustannuksista. Vakiomääräiset, viljelypinta-alaa kohti määritetyt työkustannukset M^i aiheutuvat pellolla tehdystä työstä. Ne ovat yhtä suuria ojittamattomalla ja salaojitetulla pellolla, eli niitä merkitään M^{01} . Sarkaojitetun pellon viljelypinta-alakohtaiset työkustannukset M^2 ovat tässä mallissa

¹ Sarkaojituksen intensiivisyyteen lasketaan mallissa mukaan kaikki paikalliskuivatukseen kuuluvat ojat, mutta ei peruskuivatukseen kuuluvia valtaojia.

ojituksen intensiivisyydestä riippumattomia. Todellisuudessa ojituksen intensiivisyydellä on kuitenkin merkitystä viljelypinta-alaan kohdistuvien työkustannusten kannalta, sillä sarkaojien määrä vaikuttaa sarkojen leveyteen ja tätä kautta työmenekkiin. Tämän mallin mukaiset muutokset ojitetussa pinta-alassa ovat kuitenkin niin pieniä, ettei niillä ole suurta vaikutusta sarkaleveyden ja työmenekin kannalta. Sarkaojitettun pellon työkustannukset ovat viljelypinta-alaa kohti suuremmat kuin salaojitettun ja ojittamattoman pellon, mutta sarkaojituksen pienentäessä viljelypinta-alaa, vaikuttaa se sarkaojitettun pellon kokonaistyökustannuksiin. Sarkaojitettun pellon kokonaistyökustannukset ovat täten $(1-m)M^2$. Sama pinta-alavaikutus $(1-m)$ pätee myös lannoituksesta aiheutuviin kustannuksiin cN siten että lannoituksen kokonaiskustannukset ovat $(1-m)cN$. Lannoitteen hinta c on sama pellon ojateknologiasta riippumatta.

Ojittamattomalla pellolla ei ole investointi- tai ylläpitokustannuksia ϕ . Salaojituksen investointi- ja ylläpitokustannukset ϕ^1 sisältävät salaojituksen rakentamisesta aiheutuvat investointikustannukset sekä salaojituksen toimivuuden säilyttämisestä syntyvät ylläpitokustannukset. Sarkaojitettun pellon investointi- ja ylläpitokustannukset ϕ^2 muodostuvat ojien kaivusta koituvista investointikustannuksista sekä sarkaojien perkauksesta aiheutuvista ylläpitokustannuksista. Sarkaojitettun pellon investointi- ja ylläpitokustannukset oletetaan tässä vakiomääräisiksi ja viljelypinta-alasta riippumattomiksi, eivätkä ne siten muutu ojituksen intensiivisyyden suhteen, edes pinta-alavaikutuksen $(1-m)$ kautta. Näin ollen ne muodostavat ainoan lannoitustasosta tai ojituksen intensiivisyydestä riippumattoman kustannustekijän sarkaojitettun pellon yksityisessä voittofunktiossa.

Viljelijän yksityiset voittofunktiot määritellään ojittamattomalle, salaojitetulle sekä sarkaojitetulle peltohehtaarille vähentämällä viljelijälle koituvat kustannukset tuotannon arvosta. Voittofunktioiden avulla voidaan esittää yksityisen viljelijän maksimointiongelmat:

$$\max_N \pi^0 = pf^0(N) - cN - M^{01} \quad (4.1)$$

$$\max_N \pi^1 = pf^1(N) - cN - M^{01} - \phi^1 \quad (4.2)$$

$$\max_{N,m} \pi^2 = [pf^2(N,m) - cN - M^2](1-m) - \phi^2 . \quad (4.3)$$

Derivoimalla yhtälöt lannoitustason N ja sarkaojituksen intensiivisyyden m suhteen, saadaan viljelytuotannon yksityiset optimit määrittävät ensimmäisen kertaluvun ehdot:

$$\pi_N^0 = pf_N^0 - c = 0 \quad (4.4)$$

$$\pi_N^1 = pf_N^1 - c = 0 \quad (4.5)$$

$$\pi_N^2 = [pf_N^2 - c](1-m) = 0 \quad (4.6)$$

$$\pi_m^2 = (1-m)pf_m^2 - [pf^2 - cN - M^2] = 0 . \quad (4.7)$$

Yksityinen optimi toteutuu kun tuotannon rajakustannus on yhtä suuri kuin sen rajatulo. Ojittamattomalla ja salaojitetulla pellolla muuttuvat kustannukset aiheutuvat mallin mukaan ainoastaan lannoituksesta. Tällöin yksityinen optimi saavutetaan, kun lannoituksen rajatuotoksen arvo on yhtä suuri kuin lannoitteen panoshinta, eli kun $pf_N^0 = c$, $pf_N^1 = c$ ja $pf_N^2 = c$. Sarkaojitetulla pellolla lannoitteen panoshintaa ja lannoituksen rajatuotoksen arvoa pienentää pinta-alavaikutus $(1-m)$. Sillä ei kuitenkaan ole vaikutusta optimaaliseen lannoitustasoon, koska pinta-alavaikutus pienentää lannoitteen panoshintaa ja rajatuotoksen arvoa suhteessa saman verran.

Sarkaojitetulla pellolla pitää lisäksi päteä ojituksen intensiivisyyteen liittyvä ehto $(1-m)pf_m^2 = pf^2 - cN - M^2$. Näin ollen yksityisesti optimaalinen sarkaojituksen intensiivisyys saavutetaan, kun ojituksen intensiivisyyden rajatuotoksen arvo, pinta-alavaikutus huomioituna, on yhtä suuri kuin ilman pinta-alavaikutusta saavutettava katetuotto².

4.3 Yhteiskunnalliset optimit

Yhteiskunnalliset optimit hehtaaria kohti

Ojittamattomalla sekä salaojitetulla pellolla yhteiskunnan hyvinvoinnit muodostuvat yksityisistä voitoista π^0 ja π^1 sekä maanviljelyssä käytettävien lannoitteiden aiheuttamista ravinnehuuhtoumahaitoista $d(z^0)$ ja $d(z^1)$. Ravinnehuuhtouman häitää kuvaava funktio $d(z^i)$ on mallissa lineaarinen ja sama riippumatta ojateknologiasta.

$z^0 = g^0(N)$ ja $z^1 = g^1(N)$ kuvaavat typpi- ja fosforihuuhtoumien määriä ojittamattomalla sekä salaojitetulla pellolla, ja niiden arvoihin vaikuttavat peltojen lannoitustasot. Sarkaojitetulla pellolla ravinnehuuhtoumahaitta on vastaavasti $d(z^2)$ jossa $z^2 = g^2(\hat{N})$ kuvaa typpi- ja fosforihuuhtouman määrää ja $\hat{N} = (1-m)N$ on pinta-alavaikutuksella korjattu lannoitustaso. Sarkaojitetulla pellolla ravinnehuuhtoumahaitta $d(z^2)$ kerrotaan pinta-alavaikutuksella $(1-m)$, sillä mallissa oletetaan, että ravinnehuuhtouma on lähtöisin ainoastaan lannoitetulta viljelypinta-alalta, josta se kulkee sarkaojavalunnan mukana vesistöihin. Toisin sanoen sarkaojien kattamalla pinta-alalla ei synny ravinnepestöjä, vaikka ravinteiden huuhtoutuminen tapahtuukin sarkaojien kautta. Sarkaojitetulla pellolla yhteiskunnan hyvinvointifunktioon lasketaan yksityisen voiton π^2 ja pinta-alavaikutuksella kerrotun ravinnehuuhtoumahaitan $(1-m)d(z^2)$ lisäksi mukaan sarkaojien ylläpitämisen biodiversiteetin arvo $v(b(m))$, jossa $b(m)$ kuvaa sarkaojien ylläpitämää biodiversiteettiä. Biodiversiteetin arvoa ei kerrota sarkaojituksen pinta-alavaikutuksella, koska biodiversiteetin arvo lasketaan koko pellolle, eli myös sarkaojien kattamalle osuudelle peltopinta-alasta.

² Katetuottoa laskettaessa, kokonaistyökustannukset käsitetään mallin puitteissa muuttuviksi kustannuksiksi, sillä ne riippuvat ojituksen intensiivisyydestä, jolle pyritään määrittämään optimiarvo. Todellisuudessa kokonaistyökustannuksiin vaikuttava ojituksen intensiivisyys ei kuitenkaan muutu lyhyellä aikavälillä tuotannon mukaan.

Vähentämällä ravinnehuuhtoumahaitat voittofunktioista, ja lisäämällä sarkaojitettun pellon tapauksessa tarkasteltavan pellon ojituksen intensiivisyydestä riippuva, ympäröivästä alueesta ja spatiaalisesti riippumaton biodiversiteetin arvo, saadaan määriteltyä yhteiskunnan hehtaarikohtaiset hyvinvointifunktiot. Niiden avulla voidaan esittää yhteiskunnan säätelijän maksimointiongelmat:

$$\max_N SW^0 = \pi^0 - d(g^0(N)) \quad (4.8)$$

$$\max_N SW^1 = \pi^1 - d(g^1(N)) \quad (4.9)$$

$$\max_{N,m} SW^2 = \pi^2 - (1-m)d(g^2(\hat{N})) + v(b(m)) . \quad (4.10)$$

Derivoimalla yhtälöt lannoitustason N ja sarkaojituksen intensiivisyyden m suhteen, saadaan viljelytuotannon yhteiskunnalliset optimit määrittävät ensimmäisen kertaluvun ehdot:

$$SW_N^0 = pf_N^0 - c - d'(\cdot)g_N^0 = 0 \quad (4.11)$$

$$SW_N^1 = pf_N^1 - c - d'(\cdot)g_N^1 = 0 \quad (4.12)$$

$$SW_N^2 = [pf_N^2 - c - d'(\cdot)g_N^2(1-m)](1-m) = 0 \quad (4.13)$$

$$SW_m^2 = (1-m)pf_m^2 - [pf^2 - cN - M^2] + d(\cdot) + (1-m)d'(\cdot)g_N^2N + v'(\cdot)b_m = 0 . \quad (4.14)$$

Viljelytuotannon yhteiskunnalliset optimit toteutuvat, kun tuotannon yhteiskunnalliset rajakustannukset ovat yhtä suuria kuin tuotannon yhteiskunnalliset rajahyödyt. Ojittamattomalla sekä sarka- ja salaojitetulla pellolla yhteiskunnallisesti optimaalinen lannoitustaso saavutetaan, kun lannoitteen panoshinnan ja lannoituksesta yhteiskunnalle koituvan ravinnehuuhtouman rajahaitan summa, eli lannoituksen yhteiskunnallinen rajakustannus on yhtä suuri kuin viljelijän voittoon

vaikuttava lannoituksen rajatuotoksen arvo, eli kun $pf_N^0 = c + d'(\cdot)g_N^0$, $pf_N^1 = c + d'(\cdot)g_N^1$ ja $pf_N^2 = c + d'(\cdot)g_N^2(1-m)$. Sarkaojitetulla pellolla lannoituksen rajakustannuksia ja -hyötyä pienentää pinta-alavaikutus $(1-m)$, mutta sillä ei yhteiskunnan hyvinvoinninkaan kannalta ole vaikutusta optimaaliseen lannoitustasoon, koska pinta-alavaikutus pienentää lannoituksen yhteiskunnallisia rajakustannuksia ja -hyötyä suhteessa saman verran. Yhteiskunnallisesti optimaaliseen sarkaojituksen intensiivisyyteen vaikuttaa ravinnehuuhtoumahaitan sekä yksityisten voiton lisäksi sarkaojituksen ylläpitämä biodiversiteetti ja sen arvo, eli sarkaojitetun pellon yhteiskunnallisissa optimissa on pädeittävä ehdon:

$$(1-m)pf_m^2 + (1-m)d'(\cdot)g_N^2N + v'(\cdot)b_m = pf^2 - cN - M^2 - d(\cdot). \quad (4.15)$$

Yhteiskunnallisesti optimaalinen sarkaojituksen intensiivisyys toteutuu kun ojituksen yhteiskunnallisen rajahyödyn ja yhteiskunnallisten rajakustannusten erotus pinta-alavaikutus $(1-m)$ huomioituna on yhtä suuri kuin ilman pinta-alavaikutusta saavutettava yhteiskunnan katetuotto, siltä osin kun on kysymys tuloista ja kustannuksista, joiden kannalta pinta-alavaikutuksella on merkitystä. Toisin sanoen yhteiskunnan katetuotossa ei oteta huomioon biodiversiteetin arvoa.

Peltomaiseman yhteiskunnallinen optimi

SW^{spa} kuvaa neljän 25 hehtaarin laajuisen pellon muodostaman peltomaiseman yhteiskunnan hyvinvointia, jossa otetaan huomioon koko alueen maisematason biodiversiteettiin vaikuttava spatiaalinen autokorrelaatio. Peltomaisemamallissa numeroin 1, 2, 3, 4 merkityt yläindeksit kuvaavat eri peltoja, joilla oletetaan viljeltävän eri viljelykasveja. Peltomaisemamallissa yksityistä voittoa, biodiversiteetin arvoa ja ravinnehuuhtoumahaittaa kuvaavat funktiot ovat samoja kuin sarkaojitetulla pellolla, paitsi että ne on kerrottu 25:llä kuvaamaan yhtä 25 hehtaarin kokoista peltoa. Ravinnehuuhtoumafunktio on peltomaisemamallissa sama kuin sarkaojitetulla pellolla.

Monimuotoisuus riippuu gamma-diversiteettiä, eli maisematason biodiversiteettiä tarkasteltaessa koko neljän pellon muodostamasta maisemasta, eikä sarkaojien ylläpitämää biodiversiteettiä näin ollen voida peltomaisemamallissa määrittellä

hehtaarikohtaisesti, kuten muita yhteiskunnan hyvinvointiin vaikuttavia funktioita. Biodiversiteettiä kuvaava funktio $bs(m^1, m^2, m^3, m^4)$ poikkeakin sarkaojitettun pellon vastaavasta funktiosta, koska peltomaisemamallin biodiversiteettiä laskettaessa otetaan huomioon siihen vaikuttava spatiaalinen autokorrelaatio. Biodiversiteetti lasketaan tällöin erikseen kullekin pellolle, mutta peltojen ojitusten intensiivisyyksien ja näiden perusteella laskettujen biodiversiteettien vaikuttaessa toisten peltojen biodiversiteetteihin, on koko maiseman yhteiskunnan hyvinvointi ja yhteiskunnallinen optimi laskettava summaamalla yhteen peltojen yhteiskunnan hyvinvoinnit ja ratkaisemalla näin saadun summan SW^{spa} maksimiarvo.

Yhteiskunnan suunnittelijan hyvinvoinnin maksimointiongelma peltomaisemmalle on muotoa:

$$\begin{aligned} \max_{N^1, N^2, N^3, N^4, m^1, m^2, m^3, m^4} SW^{spa} &= \sum_{i=1}^4 SW^i = \sum_{i=1}^4 \pi^i \\ &- \sum_{i=1}^4 (1 - m^i) d(g^i(\hat{N}^i)) + \sum_{i=1}^4 v(bs^i(m^1, m^2, m^3, m^4)). \end{aligned} \quad (4.16)$$

Olettaessa biodiversiteetin arvoa kuvaavan funktion $v(\cdot)$ olevan lineaarinen, voidaan peltomaiseman biodiversiteetin arvo määrittää peltojen biodiversiteettien summalle. Tällöin yhteiskunnan suunnittelijan hyvinvoinnin maksimiongelma on muotoa:

$$\begin{aligned} \max_{N^1, N^2, N^3, N^4, m^1, m^2, m^3, m^4} SW^{spa} &= \sum_{i=1}^4 SW^i = \sum_{i=1}^4 \pi^i - \sum_{i=1}^4 (1 - m^i) d(g^i(\hat{N}^i)) \\ &+ v\left(\sum_{i=1}^4 bs^i(m^1, m^2, m^3, m^4)\right). \end{aligned} \quad (4.17)$$

Derivoimalla peltomaiseman peltojen yhteiskunnan hyvinvointien summa lannoitustasojen ja ojituksen intensiivisyyksien suhteen, saadaan yhteiskunnallisen optimin määrittävät ensimmäisen kertaluvun ehdot :

$$SW_{N^j}^{spa} = \sum_{i=1}^4 SW_{N^j}^i = \pi_{N^j}^j - (1-m^j)^2 d'(\cdot) g_{N^j}^j = 0 \quad \text{kun } j = 1, 2, 3, 4 \quad (4.18)$$

$$SW_{m^j}^{spa} = \sum_{i=1}^4 SW_{m^j}^i = \pi_{m^j}^j + d(\cdot) + (1-m^j)d'(\cdot) g_{N^j}^j N^j + v'(\cdot) \sum_{i=1}^4 bs_{m^j}^i = 0$$

kun $j = 1, 2, 3, 4$. (4.19)

Vertailemalla yhtälöitä 4.13 ja 4.18, voidaan todeta peltomaiseman yhteiskunnan hyvinvoinnin derivaatan lannoitustason suhteen olevan muodoltaan sama kuin sarkaojitetulla peltohehtaarilla. Peltomaiseman kullakin pellolla yhteiskunnallisesti optimaalinen lannoitustaso saavutetaan, kun lannoituksen yhteiskunnallinen rajakustannus on yhtä suuri kuin viljelijän voittoon vaikuttava lannoituksen rajatuotoksen arvo. Yhden pellon lannoitustason valinta ei vaikuta muiden peltojen optimiratkaisuun, ellei myös sarkaojituksen intensiivisyyttä muuteta. Yhteiskunnan hyvinvointi sarkaojituksen intensiivisyyksien suhteen derivoituna poikkeaa sarkaojitetulle peltohehtaarille määritellystä vastaavasta derivaatasta. Peltomaiseman yhteiskunnan hyvinvoinnin derivaatta peltojen ojitusten intensiivisyyksien suhteen derivoituna on auki kirjoitettuna muotoa:

$$SW_{m^j}^{spa} = \sum_{i=1}^4 SW_{m^j}^i = \pi_{m^j}^j + d(\cdot) - (1-m^j)d'(\cdot) g_{N^j}^j N^j$$

$$+ v'(\cdot)(bs_{m^j}^1 + bs_{m^j}^2 + bs_{m^j}^3 + bs_{m^j}^4) = 0$$

kun $j = 1, 2, 3, 4$. (4.20)

Peltomaisemassa yhden pellon sarkaojituksen intensiivisyyden muutos vaikuttaa gamma-diversiteettiä tarkasteltaessa kaikkien muiden peltojen yhteiskunnan hyvinvointeihin biodiversiteettiä kuvaavan funktion kautta. Vastaavasti yhden pellon yhteiskunnan hyvinvointi on riippuvainen kaikkien muiden peltojen ojitusten intensiivisyyksistä. Sarkaojitusten intensiivisyydet määrittävien ehtojen on optimissa toteuduttava samanaikaisesti lannoitustasot määrittävien ehtojen kanssa ja siksi peltomaiseman yhteiskunnallisen optimointiongelman muodostaa kahdeksan ratkaistavaa ehtoa ja tuntematonta muuttujaa.

4.4 Ohjauskeinot

Viljelytuotannon yhteiskunnallisen optimin saavuttamiseksi on suunnittelijan asetettava viljelijän tuotantoon kohdistuvat ohjauskeinot siten, että yhteiskunnallisissa optimeissa toteutuvat ³ $SW_N^1 = \pi_N^{1pol}$, $SW_N^2 = \pi_N^{2pol}$ ja $SW_m^2 = \pi_m^{2pol}$, joissa $\pi_N^{i pol}$ tarkoittaa taloudellisella ohjauskeinolla korjattua yksityistä voittofunktiota. Peltomaiseman tapauksessa ohjauskeinot olisi asetettava siten, että yhteiskunnallisessa optimissa pätee $\pi_{N^i}^{i pol} = SW_{N^i}^{spa}$ ja $\pi_{m^i}^{i pol} = SW_{m^i}^{spa}$ kun $i=1,2,3,4$, mutta peltomaiseman ohjauskeinoja ei tässä analysoida tarkemmin, eikä niille määritetä numeerisia arvoja tämän tutkielman puitteissa. Tässä yhteydessä tarkasteltavia ohjauskeinoja ovat lannoitteen hintaan lisättävä vero t ja ojituksen intensiivisyydelle asetettava tuki s . Lannoitteen hintaan lisättävän veron suuruudeksi salaojituksella saadaan $t^1 = d'(\cdot)g_N^1$. Sarkaojituksella lannoitteen hintaan lisättävän veron suuruus on $t^2 = (1-m)^2 d'(\cdot)g_N^2$ sekä sarkaojituksen intensiivisyydelle asetettava tuki on $s^2 = d(\cdot) + (1-m)d'(\cdot)g_N^2 N + v'(\cdot)b_m$.

³ Ohjauskeinojen, eli veron ja tuen numeeriset arvot määritellään empiirisessä mallissa ainoastaan sala- ja sarkaojitetulle peltohehtaarille. Teoreettiset, optimaalisten ohjauskeinojen arvot määritellään siksi ainoastaan sala- ja sarkaojitetulle pellolle.

5 Empiirinen malli ja parametrit

5.1 Satovaste sekä viljelijän tulot ja kustannukset

Empiirisen mallin funktioissa yläindeksillä ⁰ tarkoitetaan ojittamatonta peltoa. Vastaavasti yläindeksillä ¹ merkitään salaojitettua ja yläindeksillä ² sarkaojitettua peltoa. Alaindeksillä merkitään funktioissa eri viljelykasveja. Alaindeksillä ₃ tarkoitetaan ohraa. Alaindeksillä ₄, ₅ ja ₆ merkitään vastaavasti vehnää, kauraa ja rypsiä tässä järjestyksessä.

Empiirisen mallin satovasteet laaditaan siten, että sarkaojituksella on maksimissaan sama vaikutus satoon, kuin salaojituksella, ja että tämä vaikutus toteutuu, kun sarkaojituksen intensiivisyys on noin 15 % peltopinta-alasta ohraa, vehnää ja rypsiä, sekä 14,5 % kauraa viljeltäessä. Sadon maksimoivat sarkaojituksen intensiivisyydet perustuvat Haatajan & Peltolan (2001) tutkimukseen, jonka mukaan yksityisessä optimissa sarkaojituksen intensiivisyys on noin 13 % peltopinta-alasta, sillä sarkaojitukselta salaojitukseen siirtyminen lisää viljeltävää pinta-alaa noin 15 %. Mallissa sarkaojitetulta ohra-, vehnä-, sekä rypsipelloilta saadaan ilman pinta-alavaikutuksen huomiointia maksimisato, kun ojituksen intensiivisyys on 15 % pellon pinta-alasta, mutta koska viljelijän voittoon vaikuttaa myös sarkaojien viemä pinta-ala, niin voitto maksimoituu sarkaojituksen intensiivisyyden ollessa noin 13 % pinta-alasta. Mallin sarkaojitetun kaurapellon maksimisato toteutuu, kun ojituksen intensiivisyys on 14,5 %, sillä tällöin yksityisen optimin mukainen ojituksen intensiivisyys saa likimain arvon 13 %. Mallissa oletetaan, ettei ojateknologialla ole vesitalouden lisäksi muuta merkitystä sadon kannalta, eli sarkaojitetun pellon maksimisato on sama kuin hyvin toimivalla salaojituksella varustetulla pellolla, ilman pinta-alavaikutuksen huomiointia.

Ojituksen, vesitalouden kautta satoon vaikuttavat satokerroimet, ovat vakiokerroin k^1 salaojituksella ja sarkaojituksella ojituksen intensiivisyydestä m riippuva kvadraattinen funktio $k^2(m)$. Satokerroinfunktion $k^2(m)$ kertoimet määritellään siten, että $k^{2'}(m_{\max}) = 0$ ja m_{\max} on sarkaojituksen pinta-alaosuus, joka johtaa pellon optimaaliseen vesitalouteen, eli tämän jälkeen sato ei kasva vaikka ojitusta lisättäisiin. Tällöin kerroin saa saman arvon kuin salaojituksella, eli $k^2(m) = k^1$, kun $m \geq m_{\max}$.

$k^2(m)$ on empiirisessä mallissa sama funktio ohraa, vehnää ja rypsiä viljeltäessä, ja sitä kuvataan funktiolla $k_{ovr}^2(m)$, jossa $m_{\max_{ovr}} = 0,15$. Kauraa viljeltäessä satokerroin on $k_{ka}^2(m)$, jossa $m_{\max_{ka}} = 0,145$. Satokerroinfunktiot ovat muotoa:

$$k_{ovr}^2(m) = \begin{cases} A_{ovr}(B_{ovr}m^2 + C_{ovr}m), & \text{kun } m \leq m_{\max_{ovr}} \\ A_{ovr}(B_{ovr}m_{\max_{ovr}}^2 + C_{ovr}m_{\max_{ovr}}), & \text{kun } m > m_{\max_{ovr}} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$k_{ka}^2(m) = \begin{cases} A_{ka}(B_{ka}m^2 + C_{ka}m), & \text{kun } m \leq m_{\max_{ka}} \\ A_{ka}(B_{ka}m_{\max_{ka}}^2 + C_{ka}m_{\max_{ka}}), & \text{kun } m > m_{\max_{ka}} \end{cases} \quad (5.2)$$

Ohran, vehnän ja kauran hehtaarikohtaisen sadon kilogrammoissa määrittävät Mitscherlich-satovastefunktiot ojittamattomalle ja salaojitetulle pellolle ovat muotoa:

$$f_j^0(N) = \alpha_j(1 - \beta_j e^{-\gamma_j N}) \text{ kun } j = 3, 4, 5 \quad (5.3)$$

$$f_j^1(N) = (1 + k^1)\alpha_j(1 - \beta_j e^{-\gamma_j N}) \text{ kun } j = 3, 4, 5. \quad (5.4)$$

Sarkaojitetulla pellolla satokertoimella korjattu Mitscherlich-satovastefunktio on ohraa tai vehnää viljeltäessä, pinta-alavaikutus huomioon otettuna:

$$(1 - m)f_j^2(N, m) = (1 - m)(1 + k_{ovr}^2(m))\alpha_j(1 - \beta_j e^{-\gamma_j N}), \text{ kun } j = 3 \text{ tai } 4 \quad (5.5)$$

ja kauraa viljeltäessä:

$$(1 - m)f_5^2(N, m) = (1 - m)(1 + k_{ka}^2(m))\alpha_5(1 - \beta_5 e^{-\gamma_5 N}) \quad (5.6)$$

N kuvaa lannoitustasoa kaikissa empiirisen mallin funktioissa. Mitscherlich-satovastefunktioissa (5.3-5.6) α_j on pellon maksimisato ojittamattomalla pellolla ja β_j sekä γ_j ovat muita satoon vaikuttavia, viljelykasvikohtaisia parametreja.

Rypsin hehtaarikohtaisen sadon kilogrammoissa määrittävät kvadraattiset satovastefunktiot ojittamattomalle ja salaojitetulle pellolle ovat:

$$f_6^0(N) = \alpha_6 + \beta_6 N + \gamma_6 N^2 \quad (5.7)$$

$$f_6^1(N) = (1 + k^1)(\alpha_6 + \beta_6 N + \gamma_6 N^2) \quad (5.8)$$

Sarkaojitetun rypsipellon kvadraattinen satovastefunktio, sarkaojituksen pinta-alavaikutus huomioon otettuna on:

$$(1 - m)f_6^2(N, m) = (1 + k_{ovr}^2(m))(\alpha_6 + \beta_6 N + \gamma_6 N^2) \quad (5.9)$$

Rypsin kvadraattisissa satovastefunktioissa (5.7–5.9) α_6 kuvaa satoa lannoittamattomalla ja ojittamattomalla pellolla. β_6 ja γ_6 ovat muita rypsisatoon vaikuttavia parametreja.

Viljelijän viljelykasvikohtaiset voittofunktiot ovat ojittamattomalle, sekä sala- ja sarkaojitetulle pellolle muotoa:

$$\pi_j^0(N) = p_j f_j^0(N) - c_j N - M^{01}, \text{ kun } j = 3, 4, 5, 6 \quad (5.10)$$

$$\pi_j^1(N) = p_j f_j^1(N) - c_j N - M^{01} - \phi^1, \text{ kun } j = 3, 4, 5, 6 \quad (5.11)$$

$$\pi_j^2(N, m) = (1 - m)[p_j f_j^2(N, m) - c_j N - M^2] - \phi^2, \text{ kun } j = 3, 4, 5, 6, \quad (5.12)$$

joissa p_j kuvaa viljelykasvien tuottajahintaa ja sen arvo vaihtelee viljelykasveittain. Myös lannoitteen hinta c_j riippuu viljeltävästä kasvista ⁴. Työ- ja investointikustannusten suuruudet määritellään seuraavasti: Ojittamattomalla ja salaojitetulla pellolla työkustannukset M^{01} ovat noin 25 % pienemmät kuin sarkaojitetulla pellolla, kun sarkojen leveys on 10m (Työtehoseuran maataloustiedotus 1980). Haatajan ja Peltolan (2001) mukaan 25 % säästö työkustannuksissa on noin 45 €/ha. Tämä säästö korjataan vastaamaan henkilötyön osalta vuoden 2006 palkkoja, jolloin salaojitetulla pellolla säästetään työkustannuksissa sarkaojitettuun peltoon verrattuna 50 €/ha. Säästön ollessa 25 % ovat työkustannukset sarkaojitetulla pellolla $M^2 = 200$ €/ha ja ojittamattomalla sekä salaojitetulla pellolla $M^{01} = 150$ €/ha. Työkustannukset kerrotaan sarkaojitetun pellon voittofunktiossa lisäksi pinta-alavaikutuksella $(1-m)$.

Investointi- ja ylläpitokustannusten osalta käytetään Haatajan ja Peltolan (2001) määrittelemiä, tämän tutkielman luvussa kaksi esiteltyjä arvoja. Salaojitetun pellon investointi- ja ylläpitokustannukset ovat yhteensä 123,95 €/ha/v. Sarkaojitetun pellon investointikustannukset määriteltiin siten, että ne vastaavat salaojituksen kaivusta aiheutuvia kustannuksia. Ne ovat näin ollen 40% salaojituksen investointikustannuksista, eli noin 44 €/ha/v. Sarkaojitetun pellon investointi- ja ylläpitokustannukset ovat yhteensä 69,5 €/ha/v. (Haataja & Peltola, 2001.)

Parametrisoidut muodot viljelijän yksityisistä voittofunktioista ojittamattomalle, sekä sala- ja sarkaojitetulle ohrapellolle (5.13–5.15) saadaan sijoittamalla voittofunktioihin (5.10–5.12) ohran satovastefunktiot (5.3–5.5), siten että $j = 3$:

$$\pi_3^0(N) = p_3\alpha_3(1 - \beta_3e^{-\gamma_3N}) - c_3N - M^{01} \quad (5.13)$$

$$\pi_3^1(N) = p_3(1 + k^1)\alpha_3(1 - \beta_3e^{-\gamma^N}) - c_3N - M^{01} - \phi^1 \quad (5.14)$$

⁴ Lannoitteiden hinnat c_j on määritelty jokaiselle viljelykasville erikseen, mutta hintojen vaihtelun perustana olevat ravinnesisältöerot on jätetty alaluvun 5.2 fosforihuuhtoumafunktioissa huomioimatta.

$$\pi_3^2(N, m) = \begin{cases} (1-m) \begin{bmatrix} p(1 + A_{ovr}(B_{ovr}m^2 \\ + C_{ovr}m))\alpha_3(1 - \beta_3e^{-\gamma_3N}) \\ - c_3N - M^2 \end{bmatrix} - \phi^2, \text{ kun } m \leq m_{\max_{ovr}} \\ (1-m) \begin{bmatrix} p(1 + A_{ovr}(B_{ovr}m_{\max_{ovr}}^2 \\ + C_{ovr}m_{\max_{ovr}}))\alpha_3(1 - \beta_3e^{-\gamma_3N}) \\ - c_3N - M^2 \end{bmatrix} - \phi^2, \text{ kun } m > m_{\max_{ovr}} \end{cases} \quad (5.15)$$

Satovastefunktioiden saamat parametrit, viljelykasvien hinnat, sekä tuotannon kustannustekijät esitetään taulukossa 5.1.

Taulukko 5.1 Satovasteiden parametrit, viljelykasvien hinnat ja tuotannon kustannustekijät

Parametri	Symboli	Arvo
Salaojituksen satokerroin	k^l	0,4446
Sarkaojituksen satokertoimen parametrit ohralle, vehnälle ja rypsilille ^a	A_{ovr}	19,76
	B_{ovr}	- 1
	C_{ovr}	0,30
	$m_{\max_{ovr}}$	0,150
Sarkaojituksen satokertoimen parametrit kauralle ^a	A_{ka}	21,15
	B_{ka}	- 1
	C_{ka}	0,29
	$m_{\max_{ka}}$	0,145
Satovasteen parametrit sekä lannoitteen ja viljelykasvin hinnat ohralle ^{a, b}	α_3	3612
	β_3	0,8280
	γ_3	0,0168
	p_3	0,189
	c_3	1,73
Satovasteen parametrit sekä lannoitteen ja viljelykasvin hinnat vehnälle ^{a, b}	α_4	3430
	β_4	0,7624
	γ_4	0,0105
	p_4	0,215
	c_4	1,61

Satovasteen parametrit sekä lannoitteen ja viljelykasvin hinnat kauralle ^{a, b}	α_5	3295
	β_5	0,7075
	γ_5	0,0197
	p_5	0,155
	c_5	1,61
Satovasteen parametrit sekä lannoitteen ja viljelykasvin hinnat rypsille ^{a, b}	α_6	715,77
	β_6	12,57
	γ_6	- 0,0260
	p_6	0,322
	c_6	1,75
Työkustannukset ^{c, d, e}	M^{01}	200
	M^2	150
Investointikustannukset ^{c, f}	ϕ^1	123,95
	ϕ^2	69,5

Lähteet: a) Tekijä tuottanut; b) J. Lankoski (Henkilökohtainen tiedonanto 14.5.2009); c) Haataja & Peltola 2001; d) Työteho-seura 1980; e) Myyrä 2006; f) Salaojakeskus 2006.

5.2 Ravinnehuuhtouma

Turtola ja Paajanen (1995) ovat verranneet salaojitettua savipellon ravinnehuuhtoumaa vanhalla toimimattomalla salaojituksella sekä uusitulla, toimivalla salaojituksella. Toimimattoman salaojituksen ravinnehuuhtouman oletetaan mallissa vastaavan ojittamattoman pellon ravinnehuuhtoumaa, eli ojittamattomalla pellolla typpihuuhtouma on 50 % salaojitettua pellon typpihuuhtoumasta, kun lannoitustasot ovat pelloilla samat. Vastaavasti ojittamattoman pellon liukoisen fosforin huuhtouma on mallissa 33 % ja partikkelifosforin huuhtouma 19 % suurempi kuin salaojitettulla pellolla, kun peltojen lannoitustasot ovat yhtä suuret. Sarkaojitettua pellon ravinnehuuhtoumafunktiota vastaa mallissa muuten ojittamattoman pellon ravinnehuuhtoumaa, mutta sen laskemisessa otetaan huomioon sarkaojituksen lannoitustasoon kohdistuva pinta-alavaikutus, joka pienentää sarkaojitettua pellon ravinnehuuhtoumaa verrattuna ojittamattoman pellon ravinnehuuhtoumaan. Sarkaojituksen vaikutuksia ravinnehuuhtouman määrään ei tunneta kunnolla, mutta voidaan olettaa sarkaojituksen aiheuttaman ravinnehuuhtouman vastaavan enemmän ojittamattoman kuin salaojitettua pellon

ravinnehuuhtoumaa. Tämän vuoksi sarkaojitetun pellon ravinnehuuhtouma asetetaan ilman lannoitustason pinta-alavaikutuksen huomiointia vastaamaan mallissa ojittamattoman pellon ravinnehuuhtoumaa.

Typen hehtaarikohtaiset huuhtoumafunktiot ojittamattomalle, salaojitetulle ja sarkaojitetulle pellolle ovat (Simmelsgaard 1998; Simmelsgaard & Djurhuus 1998):

$$z_{typ}^0 = \varpi(\theta e^{\Theta_0 + \Theta N / 100}) \quad (5.16)$$

$$z_{typ}^1 = \theta e^{\Theta_0 + \Theta N / 100} \quad (5.17)$$

$$z_{typ}^2 = \varpi(\theta e^{\Theta_0 + \Theta N(1-m) / 100}) \quad (5.18)$$

joissa N on lannoitustaso ja m on sarkaojituksen intensiivisyys. θ^5 on typen huuhtouma keskimääräisellä typpilannoituksella ohraa viljeltäessä ($N=100$). Θ_0 ja Θ ovat funktion liittyviä vakioita ja ϖ on kerroin jolla määritellään ero sarkaojitetun sekä ojittamattoman ja salaojitetun pellon typpihuhtoumille, eli se saa arvon 0,50 (Turtola & Paajanen 1995).

Liukoisen fosforin hehtaarikohtaiset huuhtoumafunktiot ojittamattomalle, salaojitetulle ja sarkaojitetulle pellolle ovat Lankoskea ja Ollikaista (2009) mukailten, Suomen olosuhteisiin räätälöitynä muotoa:

$$z_{DRP}^0 = \lambda[\psi(0.021(\Phi + 0.01 * P) - 0.015)]/100 \quad (5.19)$$

$$z_{DRP}^1 = [\psi(0.021(\Phi + 0.01 * P) - 0.015)]/100 \quad (5.20)$$

$$z_{DRP}^2 = \lambda[\psi(0.021(\Phi + 0.01 * (1-m)P) - 0.015)]/100 \quad (5.21)$$

⁵ Mallissa keskimääräistä ohrapellon hehtaarikohtaista typpihuhtoumaa ϕ on käytetty myös muiden viljelykasvien typpihuhtoumien määrittämiseen. Keskimääräiset typpihuhtoumat kuitenkin vaihtelevat viljelykasveittan. (Simmelsgaard 1998.)

Partikkelifosforin hehtaarikohtaiset huuhtoumafunktiot ojittamattomalle, salaojitetulle ja sarkaojitetulle pellolle ovat Lankoskea ja Ollikaista (2009) mukailten, Suomen olosuhteisiin räätälöitynä muotoa:

$$z_{pp}^0 = \Delta[\zeta(250\ln(\Phi + 0.01 * P) - 150)] * 10^{-6} \quad (5.22)$$

$$z_{pp}^1 = [\zeta(250\ln(\Phi + 0.01 * P) - 150)] * 10^{-6} \quad (5.23)$$

$$z_{pp}^2 = \Delta[\zeta(250\ln(\Phi + 0.01 * (1 - m)P) - 150)] * 10^{-6} \quad (5.24)$$

Fosforin huuhtoumafunktioissa ψ on veden valunta pellolta ja Φ on viljavuusfosfori pellolla. $P = \overline{NP} * N$ kuvaa fosforilannoituksen tasoa, joka määrittää typpilannoitustason perusteella, siten että \overline{NP} on fosforin ja typen määrän suhde lannoitteessa⁶. ζ on eroosion määrä ja λ sekä Δ kuvaavat ojittamattoman ja sarkaojitetun pellon liukoisen fosforin ja partikkelifosforin huuhtoumien suuruutta salaojitetun pellon huuhtoumiin verrattuna. Mallissa ne saavat arvot $\lambda = 1,33$ ja $\Delta = 1,19$. Kokonaisfosforihuuhtouma saadaan laskemalla yhteen liukoisen fosforin ja partikkelifosforin huuhtoumat:

$$z_{phos}^i = z_{DRP}^i + z_{PP}^i \quad (5.25)$$

Laskettaessa typen ja fosforin kokonaisravinnehuuhtoumaa, täytyy fosfori muuttaa ensin typpiekvivalentiksi kertomalla se Redfield-suhteella R , joka kuvaa sinilevän kasvulle optimaalista typen ja fosforin suhdetta (Lankoski, Ollikainen & Uusitalo 2006). Huuhtoumat voidaan näin laskea yhteen, jolloin summa vastaa typpihuuhtoumaa kilogrammoissa:

$$z^i = z_{typ}^i + R * z_{phos}^i \quad (5.26)$$

⁶ Fosforin ja typen suhde lannoitteessa on mallissa sama kaikille viljelykasveille, vaikka se todellisuudessa vaihtelee viljelykasveittain.

Sarkaojitetulla pellolla ravinteiden huuhtoutumista oletetaan tapahtuvan ainoastaan lannoitetulla viljelypinta-alalla, joten sarkaojitetun pellon kokonaisravinnehuuhtouma on pinta-alavaikutus huomioituna $(1 - m)z^2$.

Ravinnehuuhtouman aiheuttama lineaarinen haittafunktio on ojittamattomalla ja salaojitetulla pellolla muotoa

$$d(z^i) = D^* z^i, \text{ kun } i = 0 \text{ tai } 1, \quad (5.27)$$

jossa z on yhdestä huuhtoutuneesta typpikilosta koituva haitta. Typpikilosta koituvan haitan arvon määrittäminen perustuu siihen hyötyyn joka saavutetaan, kun vähennetään Itämereen huuhtoutuvan typen määrää yhdellä kilogrammalla (Gren 2001, 49). Haittafunktion ollessa lineaarinen, voidaan sarkaojituksen pinta-alavaikutus siirtää haittafunktion eteen, jolloin sarkaojitetun pellon ravinnehuuhtouman haitaksi saadaan:

$$(1 - m)d(z^2) = (1 - m)D^* z^2. \quad (5.28)$$

Ravinnehuuhtoumiin ja niistä aiheutuviin yhteiskunnallisiin kustannuksiin liittyvien funktioiden parametrit ja niiden arvot esitetään taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2 Ravinnehuuhtoumafunktioiden parametrit ja ravinnehuuhtoumahaitta

Parametri	Symboli	Arvo
Typen huuhtouma keskimääräisellä typpilannoituksella ^{a, b}	θ	15 kg/ha
Typpihuuhtoumaan liittyvät vakiot ^{a, b}	Θ_0	- 0,7
	Θ	0,7
Sarkaojitetun ja ojittamattoman pellon typpihuuhtouman osuus salaojitetun pellon typpihuuhtoumasta ^c	ϖ	0,50
Veden valunta pellolta ^h	ψ	270 mm
Viljavuusfosfori pellolla ^d	Φ	10,6 mg/l
Lannoitteen fosforipitoisuus, joka esitetään fosforin osuutena tpestä ^e	\overline{NP}	0,23
Sarkaojitetun ja ojittamattoman pellon liukoisen fosforin huuhtouman osuus salaojitetun pellon liukoisen fosforin huuhtoumasta ^c	λ	1,33
Eroosion määrä ^h	ζ	800 kg/ha
Sarkaojitetun ja ojittamattoman pellon partikkelifosforihuuhtouman osuus salaojitetun pellon partikkelifosforihuuhtoumasta ^c	Δ	1,19
Redfield-suhde ^f	R	7,2
Yhden typpikilogramman aiheuttama ravinnehuuhtoumahaitta ^g	D	6,8 €/kg

Lähteet: a) Simmelsgaard 1998; b) Simmelsgaard & Djurhuus 1998; c) Turtola & Paajanen 1995; d) Myyrä, Ketola, Yli-Halla & Pietola 2005; e) J. Lankoski (Henkilökohtainen tiedonanto 14.5.2009); f) Lankoski ym. 2006; g) Gren 2001; h) Lankoski & Ollikainen 2009.

5.3 Biodiversiteetti

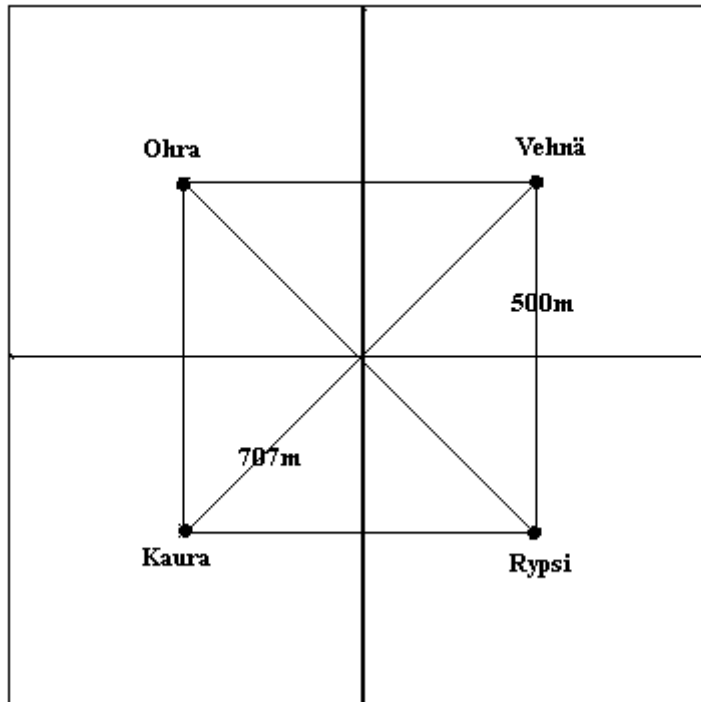
Lintujen lajimäärä biodiversiteetin kuvaajana spatiaalinen autokorrelaatio huomioiden

Spatiaalisissa viivemalleissa ilmiöitä tarkastellaan maantieteellisessä tilassa, jossa merkittäviä ovat alueiden naapuruussuhteet ja etäisyydet. Niiden perusteella voidaan määrittää kunkin alueen painotus vierekkäisten alueiden suhteen. Painotusten lisäksi vierekkäisten alueiden ilmiöiden vaikutukset toisiinsa riippuvat koko mallinnettavalle alueelle tai ilmiölle ominaisesta spatiaalisesta autokorrelaatiosta. (Anselin 1999.) Spatiaalinen autokorrelaatio liittyy Toblerin (1970) maantieteen ensimmäiseen lakiin, jonka mukaan kaikki vaikuttaa kaikkeen, mutta toisiaan lähellä sijaitsevat asiat vaikuttavat enemmän toisiinsa, kuin kaukana toisistaan sijaitsevat asiat. Spatiaalista autokorrelaatiota esiintyy usein tarkasteltaessa ekologisia muuttujia, jotka ovat jakautuneet maantieteelliselle alueelle.

Vepsäläinen (2007) on tutkinut peltolintujen lajimääriä ja niihin vaikuttavia ympäristötekijöitä Etelä-Suomessa yhteensä 60,25 neliökilometrin alueelta. Alue koostui 4 erillisestä osasta, jotka olivat kooltaan 6,25-30 neliökilometriä. Nämä osat jaettiin edelleen pienempiin 25 hehtaarin tutkimusalueisiin. Tutkimusalueiden koko määriteltiin siten, että ne vastaisivat mahdollisimman hyvin keskimääräistä viljeltävää aluetta Suomalaisilla tiloilla, ja 25 hehtaarin koko piti sisällään myös riittävästi lintujen esiintymiseen vaikuttavien ympäristötekijöiden vaihtelua. Kaikki tutkimusalueet käsittivät ainakin 5 hehtaaria viljeltyä aluetta. Yhdellä tutkimusalueella avoimia oja oli keskimäärin 1066m. (Vepsäläinen 2007, 4-7.)

Vepsäläisen (2007) tutkimuksessa avo-ojien ⁷ pituuden vaikutusta lintujen lajimäärään tarkasteltiin log-muunnetulla spatiaalisella viivemallilla. Tämän tutkimuksen kuvan 5.1 mukaisessa neljän, 25 hehtaarin laajuisen, neliön muotoisen pellon muodostamassa peltomaisemamallissa käytetään tätä spatiaalista viivemallia määrittämään sarkaojamäärän vaikutus biodiversiteettiä kuvaavaan lintujen lajimäärään.

⁷ Vepsäläinen (2007) tarkoittaa avo-ojilla myös valtaojia.



Kuva 5.1 Peltomaisemamalli

Hehtaarikohtaisessa biodiversiteettiä kuvaavassa funktiossa spatiaalista viivemallia käytetään normaalin log-muunnetun regressioyhtälön tavoin, ilman spatiaalista viivettä kuvaavaa tekijää. Hehtaarikohtaista biodiversiteettiä kuvaava funktio saa muodon:

$$b(m) = x(m)\hat{\beta}, \quad (5.29)$$

jossa $b(m)$ on lintujen lajimäärä, eli biodiversiteetti ja $\hat{\beta}$ on ojen määrän ja lintujen lajimäärän välinen regressiokerroin⁸. $x(m)$ on ojen määrästä pituudessa otettu luonnollinen logaritmi:

$$x(m) = \ln\left(\frac{am}{l} + 1\right), \quad (5.30)$$

⁸ Regressiokerrointa merkitään $\hat{\beta}$:llä, jotta se voidaan erottaa satovastefunktioissa käytetystä symbolista β .

jossa a on Vepsäläisen (2007) tutkimuksen mukaisen tutkimusalueen pinta-ala 250000 m², eli pinta-ala jolle spatiaalinen viivemalli on määritelty. m on sarkaojituksen intensiivisyys ja l on keskimääräinen ojaleveys⁹ pellolla.

Peltomaiseman biodiversiteetti on muotoa (Anselin 1999 ja 2006):

$$\mathbf{Y} = \rho \mathbf{WY} + \mathbf{X}\hat{\beta}, \quad (5.31)$$

jossa \mathbf{Y} on biodiversiteettejä, eli kullakin pellolla tavattujen lintujen lajimääriä bs^i kuvaava 4x1 vektori. \mathbf{X} on peltojen ojien määristä pituudessa otetut luonnolliset logaritmit sisältävä 4x1 vektori. Ojien määrät pituudessa on määritelty samoin kuin yhdelle hehtaarille. Peltomaiseman biodiversiteetissä otetaan huomioon lisäksi spatiaalista viivettä kuvaava tekijä $\rho \mathbf{WY}$, jossa ρ on autoregressiivinen parametri, joka kuvaa spatiaalista autokorrelaatiota. \mathbf{W} on 4x4 painotusmatriisi, joka perustuu peltojen keskipisteiden välisten etäisyyksien käänteislukuihin (Kuva 5.1). Matriisin kertoimet on standardisoitu siten, että painotusmatriisiin yhden rivin alkioiden summa, eli kaikkien muiden alueiden yhteenlaskettu yhteen alueeseen kohdistuva painotus on yksi. Peltomaisemalle laadittu painotusmatriisi on muotoa:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} & \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} & \frac{1}{\sqrt{2} + \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}}} \\ \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2} + \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}}} & \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} \\ \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} & \frac{1}{\sqrt{2} + \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}}} & 0 & \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} \\ \frac{1}{\sqrt{2} + \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}}} & \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} & \frac{1}{2 + \frac{1}{\sqrt{2}}} & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.32)$$

⁹ Keskimääräinen ojaleveys koskee mallissa ainoastaan paikalliskuivatukseen kuuluvia avo-ojia, eikä siinä siten oteta huomioon valtaojia. Vepsäläisen (2007) luomassa mallissa ja täten myös korrelaatiokerrointa laadittaessa valtaojat on laskettu mukaan avo-ojiin.

Peltomaiseman biodiversiteetin määrittävää spatiaalista mallia voidaan iteroida kierroksittain siten että spatiaalinen viive lasketaan aina edellisen kierroksen tuloksesta, eli peltomaiseman biodiversiteetti iteraatiokierrosten t funktiona saa muodon:

$$\mathbf{Y}(t) = \begin{cases} \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}, & \text{kun } t = 0 \\ \rho\mathbf{W}\mathbf{Y}(t-1) + \mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}}, & \text{kun } t \in \mathbf{N}. \end{cases} \quad (5.33)$$

Jokainen iteraatiokierros kasvattaa biodiversiteettiä. Biodiversiteetin rajakasvu iteraatiokierroksella t on $(\rho\mathbf{W})^t(\mathbf{X}\hat{\boldsymbol{\beta}})$, eli biodiversiteetin määrä kasvaa iteraatiokierrosten määrän kasvaessa, mutta sen kasvu on hidastuvaa, kun $0 \leq \rho \leq 1$. Näin ollen iteraatiokierrosten lähestyessä ääretöntä muodostaa biodiversiteetin rajakasvujen summa suppenevan geometrisen sarjan, eli biodiversiteetti lähestyy arvoa

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{Y}(t) = \frac{\hat{\boldsymbol{\beta}}\mathbf{X}}{\mathbf{I} - \rho\mathbf{W}}, \quad (5.34)$$

jossa \mathbf{I} on 4x4 yksikkömatriisi, eli diagonaalimatriisi, jonka lävistäjän alkiot saavat arvon yksi ja muut alkiot arvon nolla.

Biodiversiteetin lineaarinen arvostusfunktio on muotoa:

$$v(bd) = \overline{va} * (bd(m)), \quad (5.35)$$

jossa \overline{va} on biodiversiteetin arvostus hehtaaria kohti (Lankoski & Ollikainen 2003; ks. tarkemmin Aakkula 1999). Biodiversiteetin arvostus \overline{va} perustuu Aakkulan (1999) tutkimukseen, jossa pyrittiin selvittämään Suomalaisten maksuhalukkuutta maatalouden ympäristöön kohdistuvien positiivisten ulkoisvaikutusten lisäämiseksi ja negatiivisten ulkoisvaikutusten pienentämiseksi.

Taulukossa 5.3 esitetään biodiversiteettiin ja sen arvostukseen liittyvien funktioiden parametrit ja niiden arvot.

Taulukko 5.3 Biodiversiteettiin ja sen arvostukseen liittyvien funktioiden parametrit

Parametri	Symboli	Arvo
Tutkimusalueen pinta-ala ^a	a	250000 m ²
Keskimääräinen ojaleveys pellolla ^d	l	1 m
Autoregressiivinen parametri ^a	ρ	0,183
Regressiokerroin ^a	$\hat{\beta}$	0,035
Biodiversiteetin arvostus ^{b, c}	\overline{va}	57,2 €

a) Vepsäläinen 2007; b) Aakkula 1999; c) Lankoski & Ollikainen 2003; d) Tekijä tuottanut

5.4 Yhteiskunnan hyvinvointifunktiot

Parametrisoidut muodot yhteiskunnan hyvinvointia kuvaavista funktioista ojittamattomalle, sekä sala- ja sarkaojitetulle ohrapeltohehtaarille saadaan vähentämällä yksityisistä voittofunktioista (5.10–5.12) ravinnehuuhtoumahaitat ja sarkaojitetun pellon tapauksessa lisäämällä sarkaojien ylläpitämisen biodiversiteetin arvo:

$$SW_3^0 = \pi_3^0 - D(\overline{\omega}(\theta e^{\Theta_0 + \Theta N / 100}) + R(\lambda[\psi(0.021(\Phi + 0.01 * P) - 0.015)]/100 + \Delta[\zeta(250 \ln(\Phi + 0.01 * P) - 150)] * 10^{-6})) \quad (5.36)$$

$$SW_3^1 = \pi_3^1 - D(\theta e^{\Theta_0 + \Theta N / 100} + R([\psi(0.021(\Phi + 0.01 * P) - 0.015)]/100 + [\zeta(250 \ln(\Phi + 0.01 * P) - 150)] * 10^{-6})) \quad (5.37)$$

$$SW_3^2 = \pi_3^2 - (1 - m)D(\overline{\omega}(\theta e^{\Theta_0 + \Theta N(1-m) / 100}) + R(\lambda[\psi(0.021(\Phi + 0.01 * (1 - m)P) - 0.015)]/100 + \Delta[\zeta(250 \ln(\Phi + 0.01 * (1 - m)P) - 150)] * 10^{-6})) + \overline{va}((\ln(\frac{am}{l} + 1))\hat{\beta}) \quad (5.38)$$

6 Empiirisen mallin tulokset ja herkkyysanalyysi

6.1 Tulokset

Yksityiset optimit

Taulukoissa 6.1, 6.2 ja 6.3 esitetään ojittamattoman, salaojitetun ja sarkaojitetun pellon hehtaariohaiset yksityiset optimit ohraa, vehnää, kauraa ja rypsiä viljeltäessä. Taulukoissa esitetyt yksityiset voitot saavat maksimiarvonsa ja yhteiskunnan *ex-post* hyvinvoinnit määräytyvät yksityisten optimien mukaisesti. Tulokset laaditaan kaikille neljälle viljelykasville, jotta voidaan vertailla niitä neljän sarkaojitetun, edellä mainituilla kasveilla viljellyn pellon muodostaman sadan hehtaarin peltomaisemamallin tuloksiin, joissa otetaan huomioon biodiversiteettiin vaikuttava spatiaalinen autokorrelaatio. Hehtaarin viljelyalaa koskevan mallin pääkohteena on kuitenkin ohran viljely, jota tarkastellaan lähemmin myös herkkyysanalyysissä. Ohra on valittu tarkasteltavaksi kasviksi siksi, että se on suomessa yleisimmin viljeltävä viljelykasvi (Tike 2009). Tulosten tarkastelussa ei siis niinkään pyritä vertailemaan eri viljelykasvien viljelyn kannattavuutta, vaan sarka- ja salaojituksen yksityis- ja yhteiskuntataloudellista kannattavuutta.

Taulukko 6.1 Yksityiset optimit ilman ojitusta

	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
Ohra	N -> 101,4	254,3	144,7
Vehnä	N -> 123,7	234,9	116,3
Kaura	N -> 75,5	157,5	56,7
Rypsi	N -> 137,2	238,1	113,4

Taulukko 6.2 Yksityiset optimit salaojituksella

	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
Ohra	N = 123,3	396,0	230,3
Vehnä	N = 158,8	382,4	182,5
Kaura	N = 94,1	230,6	87,2
Rypsi	N = 169,4	406,0	194,1

Taulukko 6.3 Yksityiset optimit sarkaojituksella

	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
Ohra	N = 122,9, m = 0,1280	335,2	258,5
Vehnä	N = 158,2, m = 0,1292	323,2	235,2
Kaura	N = 93,9, m = 0,1270	193,7	124,6
Rypsi	N = 169,0, m = 0,1296	343,4	251,4

Kuten taulukoiden 6.1, 6.2 ja 6.3 arvoja vertailemalla voidaan huomata, että ojittamattomalla pellolla yksityinen voitto ja yhteiskunnan hyvinvointi¹⁰ ovat kaikissa viljelykasvikohtaisissa yksityisissä optimeissa merkittävästi pienempiä, kuin sarka- tai salaojitetulla pellolla. Tämä tulos tukee oletusta, jonka mukaan ojitus parantaa pellon vesitaloutta ja on viljelijän sekä yhteiskunnan kannalta kannattava investointi.

Ohran, samoin kuin muiden viljelykasvien viljely, on yksityistaloudellisesti kannattavinta salaojitetulla pellolla. Yhteiskunnan hyvinvointi on sen sijaan kaikissa yksityisissä optimeissa suurin sarkaojitetulla pellolla. Salaojitetun ohrapellon tuottama voitto on yksityisessä optimissa 396,0 €/ha. Tällöin yhteiskunnan hyvinvointi on 230,3 €/ha ja lannoitustaso 123,3 kg/ha. Sarkaojitetulla pellolla vastaavat arvot ovat 335,2 €/ha, 258,5 €/ha ja 122,9 kg/ha. Yksityisten optimien mukaiset ojituksen intensiivisyydet vaihtelivat viljelykasveittain 0,127 ja 0,130 välillä, eli niiden arvo oli noin 13 %¹¹.

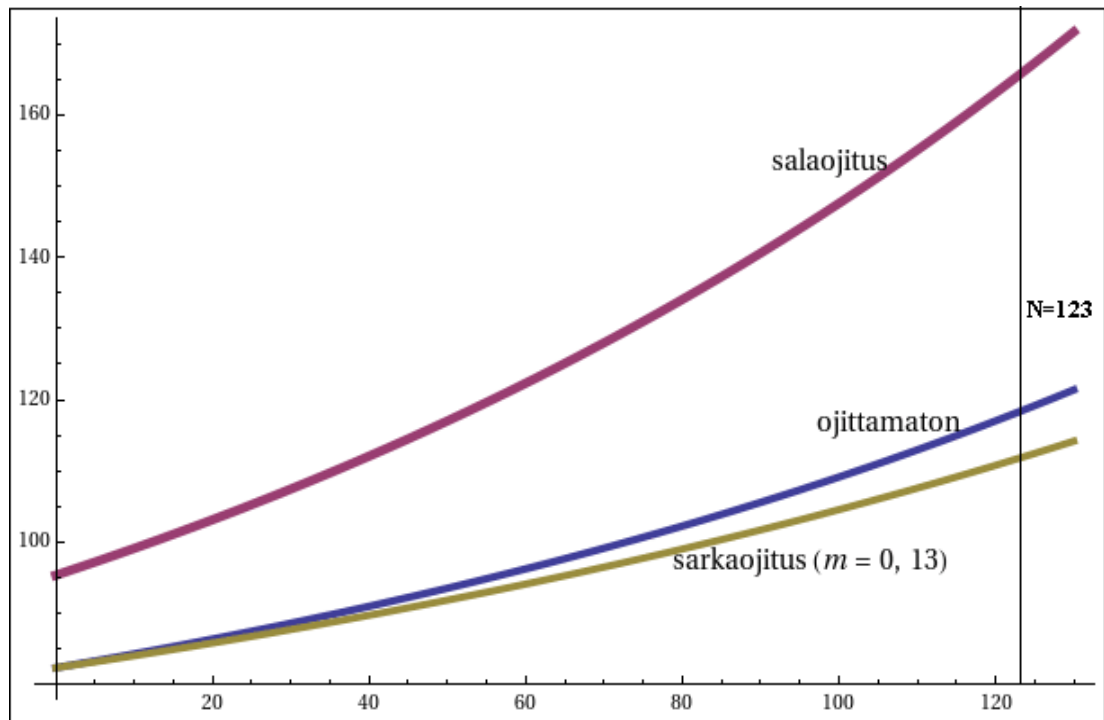
Taulukoista 6.2 ja 6.3 voidaan päätellä, että sarka- ja salaojitetun pellon väliset yhteiskunnan hyvinvointierot ovat sitä suurempia, mitä korkeampi on kyseisen kasvin viljelylle optimaalinen lannoitustaso. Esimerkiksi ohraa viljeltäessä yhteiskunnan hyvinvointi on salaojitetulla pellon yksityisessä optimissa ainoastaan noin 28 €/ha pienempi, kuin sarkaojitetulla pellolla, kun taas vehnän viljelyssä vastaava ero on yli 50 €/ha, vaikka yhteiskunnan hyvinvointi on ohraa viljeltäessä molemmilla ojateknologioilla suurempi kuin vehnällä. Vehnän viljelyn yksityisen optimin mukainen lannoitustaso on salaojitetulla pellolla 158,8 kg/ha ja sarkaojitetulla pellolla 158,2kg/ha. Ohraa viljeltäessä vastaavat arvot ovat 123,3 kg/ha ja 122,9 kg/ha.

Kuvassa 6.1 on esitetty hehtaarikohtainen ravinnehuuhtomahaitta lannoitusmäärän suhteen ojittamattomalle, salaojitetulle ja sarkaojitetulle ohrapellolle. Alimmaisena kuvassa on sarkaojitetun pellon ravinnehuuhtomahaitan kuvaaja, kun sarkaojituksen intensiivisyys on 0,13. Keskimäinen kuvaaja esittää ravinnehuuhtomahaittaa

¹⁰ Tässä yhteiskunnan hyvinvoinneilla tarkoitetaan yksityisiä optimeja käsittelevissä tuloksissa aina ex-post hyvinvointeja.

¹¹ Sarkaojituksesta salaojitukseen siirtyminen lisää viljelypinta-alaa noin 15 %, joka toteutuu kun sarkaojituksen intensiivisyys on noin 13 %. Katso luku 5.1.

ojittamattomalla pellolla ja ylimpänä on salaojitettun pellon ravinnehuuhtoumahaitan kuvaaja.



Kuva 6.1 Hehtaariohtainen hajakuormitushaitta lannoitustason suhteen ojittamattomalla sekä sala- ja sarkaojitettulla ohrapellolla

Kuvasta 6.1 nähdään, että salaojitettun ohrapellon ravinnehuuhtoumahaitta on huomattavasti suurempi kuin avo-ojitettun ja ojittamattoman pellon ravinnehuuhtoumahaitta, lannoitustason ollessa sama. Asettamalla ohranviljelyn lannoitustasoksi 123 kg/ha ja sarkaojituksen intensiivisyydeksi 0,13, saadaan ravinnehuuhtoumahaitan arvoksi salaojitettulla pellolla 165,6 €/ha ja sarkaojitettulla pellolla 111,8 €/ha. Tässä tuloksessa ei ole otettu huomioon pinta-ala kerrointa ($1-m$) eli 0,87, joka vähentää sarkaojitettun pellon ravinnehuuhtoumahaittaa entisestään arvoon 97,4 €/ha.

Yhteiskunnan ex-post hyvinvointi saa maisematason biodiversiteetin spatiaalisen autokorrelaation huomioivalla peltomaisemamallilla, sarkaojitettun pellon yksityisessä optimissa arvoksi 222,1 €/ha. Ilman spatiaalista autokorrelaatiota, neljän eri kasvin viljelystä koituvien, yksityisten optimien mukaisten yhteiskunnan hyvinvointien keskiarvo on sarkaojitettulla pellolla 217,4 €/ha. Näin ollen neljän pellon peltomaisemamalli antaa samoilla lannoitustasoilla ja sarkaojituksen intensiivisyyksillä yhteiskunnan hyvinvoinnille noin 4,7 €/ha suuremman arvon kuin

ilman spatiaalista autokorrelaatiota laskettuna. Tämä arvo nostaa koko hyvinvoinnin arvoa ainoastaan 2,2 %, mutta se kasvattaa ilman spatiaalisen autokorrelaation vaikutusta laskettua biodiversiteetin arvoa 20,7 eurosta 25,4 euroon hehtaaria kohti, eli noin 23 %.

Yhteiskunnalliset optimit

Taulukoissa 6.4, 6.5 ja 6.6 esitetään ojittamattoman, salaojitetun ja sarkaojitetun pellon yhteiskunnalliset optimit ohraa, vehnää, kauraa ja rypsiä viljeltäessä. Taulukoissa esitetyt yhteiskunnalliset hyvinvoinnit saavat maksimiarvonsa ja yksityiset ex-post voitot määräytyvät yhteiskunnallisten optimien mukaisesti.

Taulukko 6.4 Yhteiskunnalliset optimit ilman ojitusta

Ojittamaton	Lannoitus (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
Ohra	N = 90,5	252,5	146,8
Vehnä	N = 103,7	231,2	120,7
Kaura	N = 66,9	156,3	58,1
Rypsi	N = 113,2	233,3	119,1

Taulukko 6.5 Yhteiskunnalliset optimit salaojituksella

Salaojitus	Lannoitus (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
Ohra	N = 102,2	388,8	239,6
Vehnä	N = 119,3	367,2	204,8
Kaura	N = 77,6	225,7	93,2
Rypsi	N = 132,1	389,2	215,7

Taulukko 6.6 Yhteiskunnalliset optimit sarkaojituksella

Sarkaojitus	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
Ohra	N = 113,1, m = 0,1350	333,4	260,5
Vehnä	N = 139,1, m = 0,1370	319,6	239,5
Kaura	N = 86,2, m = 0,1349	192,2	126,1
Rypsi	N = 152,9, m = 0,1375	339,9	255,4

Taulukoiden 6.4, 6.5 ja 6.6 tuloksista käy ilmi, että ojittamattomalla pellolla yksityinen voitto¹² ja yhteiskunnan hyvinvointi ovat yhteiskunnallisissa optimissa kaikilla viljelykasveilla pienempiä, kuin sarka- ja salaojitetulla pellolla. Tämä

¹² Tässä yksityisillä voitoilla tarkoitetaan yhteiskunnallisia optimeja käsittelevissä tuloksissa aina ex-post voittoja.

vahvistaa entisestään oletusta, jonka mukaan sala- ja sarkaojitus ovat yksityis- ja yhteiskuntataloudellisesti kannattavia investointeja.

Tulosten mukaan yhteiskuntataloudellisesti kannattavinta viljely on sarkaojitetulla pellolla, riippumatta viljeltävästä kasvista. Salaojitetun ohrapellon tuottama yhteiskunnan hyvinvointi on yhteiskunnallisessa optimissa 239,6 €/ha. Yksityinen voitto on tällöin 388,8 €/ha ja lannoitustaso 102,2 kg/ha. Sarkaojitetulla ohrapellolla vastaavat arvot ovat 260,5 €/ha, 333,4 €/ha ja 113,1 kg/ha. Sarkaojitetulla pellolla ojituksen pinta-alaosuus on viljelykasvista riippumatta, suurempi yhteiskunnallisessa optimissa kuin yksityisessä optimissa. Ohrapellon yhteiskunnallisesti optimaalinen sarkaojituksen intensiivisyys on 0,1350, kun se yksityisessä optimissa on 0,1280. Tämä muutos on pinta-alaksi muutettuna noin 70 m² /ha.

Yhteiskunnalliset optimit poikkeavat yksityisistä optimeista eniten salaojitetulla pellolla; lannoitustasot pienenevät yksityisten optimien mukaisista arvoista, viljeltävästä kasvista riippuen jopa 16,5–39,5 kg/ha, yksityiset voitot pienenevät 4,8–16,8 €/ha ja yhteiskunnan hyvinvoinnit kasvavat 6,0–22,3 €/ha. Sarkaojitetun pellon yhteiskunnallisissa optimeissa lannoitustasot pienenevät 7,7–19,1 kg/ha, yksityiset voitot pienenevät 1,4–3,5 €/ha ja yhteiskunnan hyvinvoinnit kasvavat 1,5–4,3 €/ha. Kuten yksityisiä optimeja tarkasteltaessa huomattiin, ovat samasta lannoitustasosta aiheutuvat hajakuormitushaitat huomattavasti suurempia sala- kuin sarkaojitetulla pellolla. Tämä selittää sen, että salaojitetulla pellolla yhteiskunnallisten optimien mukaiset arvot poikkeavat yksityisten optimien mukaisista arvoista enemmän kuin sarkaojitetulla pellolla.

Taulukossa 6.7 esitetään sarkaojitettujen peltojen yhteiskunnalliset optimit, kun optimien ratkaisemisessa on käytetty maisematason biodiversiteettiin vaikuttavan spatiaalisen autokorrelaation huomioivaa peltomaisemamallia. Tällöin yhteiskunnan hyvinvoinnin arvo on 225,1 €/ha ja biodiversiteetin arvo 25,6 €/ha. Ilman spatiaalisen autokorrelaation huomioimista, eri viljelykasveille määriteltujen, sarkaojitetun pellon yhteiskunnallisten optimien mukaisten, yhteiskunnan hyvinvointien keskiarvo on 220,4 €/ha. Biodiversiteetin arvo on tällöin 20,9 €/ha. Otettaessa spatiaalinen autokorrelaatio otetaan huomioon, yhteiskunnan hyvinvointi ja biodiversiteetin arvo kasvavat 4,7 €/ha, eli absoluuttisesti saman verran kuin

yksityisten optimien tapauksessa. Suhteellisesti spatiaalisen autokorrelaation huomioon ottaminen kasvattaa yhteiskunnallisen optimin mukaista biodiversiteetin arvoa 22,5 %, joka on noin 0,5 % vähemmän kuin yksityisten optimien mukaisia biodiversiteetin arvoja tarkasteltaessa.

Taulukko 6.7 Yhteiskunnalliset optimit biodiversiteetin spatiaalinen autokorrelaatio huomioituna

	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	
Ohra	N = 113,2, m = 0,1351	
Vehnä	N = 139,2, m = 0,1372	
Kaura	N = 86,2, m = 0,1351	
Rypsi	N = 152,9, m = 0,1377	
Yhteiskunnan hyvinvointien hehtaarikohtainen keskiarvo peltomaisemassa (€/ha)	225,1	
Biodiversiteetin arvon hehtaarikohtainen keskiarvo peltomaisemassa (€/ha)	25,6	

Vertailemalla taulukoita 6.6 ja 6.7, huomataan, ettei spatiaalisen autokorrelaation huomioiminen yhteiskunnallisten optimien määrittämisessä vaikuta merkittävästi sarkaojitettun pellon lannoitustasoon tai ojituksen intensiivisyyteen. Esimerkiksi ohraa viljeltäessä lannoitustason optimi kasvaa noin 6g/ha ja sarkaojituksen intensiivisyys noin 1m²/ha.

Ohjauskeinot

Taloudelliset ohjauskeinot yhteiskunnallisesti optimaalisen tuotannon saavuttamiseksi, määritellään numeerisesti sala- sekä sarkaojitetulle ohrapellohehtaarille. Tässä tarkasteltavia, luvussa neljä teoreettisesti johdettuja ohjauskeinoja ovat lannoitteelle asetettava vero t ja sarkaojituksen intensiivisyydestä maksettava tuki s . Yhteiskunnalliseen optimiin mukainen lannoitusvero t saa salaojitetulla ohrapellolla arvon 0,73 €/kg. Sarkaojitetulla ohrapellolla lannoitteeseen kohdistuvan veron optimaalinen arvo on 0,27 €/kg. Sarkaojituksen intensiivisyydestä maksettava tuki s on tällöin 0,016 €/m². Näin asetetuilla ohjauskeinoilla maanviljelijän voitto salaojitetulla ohrapellolla on 313,8 €/ha ja sarkaojitetulla pellolla 324,1 €/ha. Voiton ollessa sarkaojituksella parempi, kannustaa se viljelijöitä siirtymään mallin tulosten mukaisesti, yhteiskunnan kannalta kannattavampaan sarkaojitukseen.

Nämä arvot ovat ristiriidassa Suomessa käytettävien, ojitukseen kohdistuvien ohjauskeinojen kanssa. Suomen maatalous- ja ympäristöpolitiikka kannustaa siirtymistä sarkaojituksesta salaojitukseen. Poliittikaa perustellaan osittain sillä, että salaojitukseen siirtyminen pienentää maatalouden aiheuttamaa ravinnekuormitusta ja siitä koituvaa haittaa, mikä ei tämän tutkielman mallin oletusten ja tulosten perusteella pidä paikkaansa.

6.2 Osittainen herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysissa arvioidaan mallin tulosten epävarmuutta. Osittaisella herkkyysanalyysillä voidaan tutkia yksittäisten parametrien muutosten vaikutusta mallin antamaan tulokseen. Herkkyysanalyysin kohteena olevan parametrin arvoa muutetaan alkuperäisestä arvosta ja muiden parametrien arvot pidetään muuttumattomina. Tässä luvussa tarkastellaan seuraavien parametrien muutosten vaikutusta mallin lopputulokseen ohraa viljeltäessä:

- § viljelykasvin, eli ohran tuottajahinta
- § lannoitteen hinta
- § työkustannukset
- § investointikustannukset
- § biodiversiteetin arvostus
- § ravinnekuormitushaitta
- § sarkaojitetun pellon typpi- ja fosforihuuhtoumien prosentuaaliset osuudet salaojitetun pellon huuhtoutumista
- § sarkaojien keskimääräinen leveys

Kaikkien muiden parametrien, paitsi typpi- ja fosforihuuhtoumien prosentuaalisten osuuksien vaihteluiden merkitystä mallin tuloksiin arvioidaan muuttamalla niitä alkuperäisistä arvoista vaihteluvälillä – 25 % - 25 %, viiden prosenttiyksikön välein. Lisäksi tarkastellaan, miten mallin tulokset muuttuvat, jos näitä parametreja pienennetään tai suurennetaan 50 % alkuperäisestä arvosta. Peltomaisemamallia tarkastellaan osittaisella herkkyysanalyysillä ainoastaan sarkaojien leveyden ja ravinnehuuhtoumien osuuksien muutosten osalta. Liitteissä 1-9 esitetyistä osittaisen herkkyysanalyysin tuloksista voidaan havaita, että suurin osa parametrien muutoksista ei ole merkittäviä mallin kannalta. Mallin kannalta merkittäviä ovat sellaiset muutokset parametreissa, jotka muuttavat sarkaojituksen yksityisesti

kannattavammaksi kuin salaojituksen, tai salaojituksen yhteiskunnallisesti kannattavammaksi kuin sarkaojituksen.

Merkittävimmät parametrien muutokset herkkyyksianalyysin kannalta ovat muutokset sarkaojitettun pellon typpihuuhtouman prosentuaalisessa osuudessa salaojitettun pellon typpihuuhtoumasta. Sitä tarkastellaan lähemmin seuraavassa alaluvussa. Ohran tuottajahinnan kasvattaminen 25 % alkuperäisestä arvosta muuttaa salaojituksen sarkaojitusta yhteiskunnallisesti kannattavammaksi ojateknologiaksi (kts. liite 1). Investointi- ja ylläpitokustannuksia tai ravinnehuuhtoumahaittaa pienennettäessä 50 %, on yhteiskunnallisesti kannattavampaa viljellä ohraa sala- kuin sarkaojitettulla pellolla (kts. liitteet 4 ja 6). Muilla osittaisessa herkkyyksianalyysissä tarkasteltavilla parametrien muutoksilla ei ole merkittäviä vaikutuksia mallin tulosten kannalta (kts. liitteet 2, 3, 5, 7, 8 ja 9).

Typpihuuhtouma

Taulukoissa 6.8 ja 6.9 esitetään sarkaojituksen typpihuuhtouman muutoksen vaikutusta viljelyn yksityiseen ja yhteiskunnalliseen kannattavuuteen ohraa viljeltäessä. Mallin alkuperäisillä arvoilla sarkaojitettun pellon typpihuuhtouma on ojituksen pinta-alavaikutusta ja pinta-alalla korjattua lannoitustasoa huomioimatta 50 % salaojitettun pellon typpihuuhtoumasta, lannoitustason ollessa molemmilla pelloilla sama. Jos tätä osuutta korotetaan 75 prosenttiyksikköön tai sitä suuremmaksi, on salaojitus yhteiskunnallisesti kannattavampi ojateknologia kuin sarkaojitus. 75 % arvolla sarkaojitettun pellon yhteiskunnan hyvinvointi saa yhteiskunnallisessa optimissa arvon 239,1 €/ha kun se salaojitettun pellon yhteiskunnallisessa optimissa on 239,6 €/ha. Sarkaojitettun pellon typpihuuhtouman ollessa ojituksen pinta-alavaikutusta lukuun ottamatta sama kuin salaojitettulla pellolla, on salaojitus yhteiskunnallisesti huomattavasti sarkaojitusta kannattavampaa. Tällöin sarkaojitettun pellon yhteiskunnan hyvinvointi yhteiskunnallisessa optimissa on ainoastaan 218,2 €/ha.

Taulukko 6.8 Yksityiset optimit sarkaojitettun pellon typpihuuhtouman muuttuessa suhteessa salaojitettun pellon typpihuuhtoumaan

Typpipäästöt (% salaojituksen typpipäästöistä)	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
112,5	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	200,1
100	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	211,7
87,5	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	223,4
75	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	235,1
62,5	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	246,8
50	N -> 122,9, m -> 0,1280	335,2	258,5
37	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	270,2
25	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	281,9
12,5	<i>N -> 122,9, m -> 0,1280</i>	335,2	293,6

Taulukko 6.9 Yhteiskunnalliset optimit sarkaojitettun pellon typpihuuhtouman muuttuessa suhteessa salaojitettun pellon typpihuuhtoumaan

Typpipäästöt (% salaojituksen typpipäästöistä)	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
112,5	<i>N -> 104,1, m -> 0,1392</i>	328,8	207,9
100	<i>N -> 105,7, m -> 0,1383</i>	329,9	218,2
87,5	<i>N -> 107,4, m -> 0,1375</i>	330,9	228,6
75	<i>N -> 109,2, m -> 0,1367</i>	331,8	239,1
62,5	<i>N -> 111,1, m -> 0,1358</i>	332,6	249,7
50	N -> 113,1, m -> 0,1350	333,4	260,5
37	<i>N -> 115,3, m -> 0,1341</i>	334,0	271,5
25	<i>N -> 117,6, m -> 0,1332</i>	334,5	282,6
12,5	<i>N -> 120,0, m -> 0,1323</i>	334,9	293,9

6.3 Herkkyysanalyysi Monte Carlo -simulaatiolla

Monte Carlo -simulaation perustuvassa herkkyysanalyysissä parametrien arvot arvotaan tilastollisesta jakaumasta. Sen avulla voidaan tutkia useamman parametrin muutoksen yhtäaikaista vaikutusta mallin antamien tulosten tilastollisiin jakaumiin. Tämän vuoksi se soveltuu hyvin sellaisten mallien tarkasteluun, joiden parametrien arvojen määräytymisessä esiintyy satunnaisuutta. Tässä tutkimuksessa Monte Carlo -simulaatiota sovelletaan sarka- ja salaojitettun ohrapellon hehtaarikohtaisten, yksityisten ja yhteiskunnallisten optimien mukaisten tulosten herkkyysanalyysiin, mutta sitä ei sovelleta peltomaisemamallin herkkyystarkasteluun. Monte Carlo -simulaatiolla pyritään tarkastelemaan etenkin mallin parametrien satunnaisuuden vaikutusta mallin antamiin tuloksiin.

Monte Carlo herkkyysanalyysi tehdään samoille parametreille, kuin osittainen herkkyysanalyysi, lukuun ottamatta sarkaojien keskimääräistä leveyttä. Kaikki

taloudelliset parametrit arvotaan log-normaaleista jakaumista, eivätkä ne näin ollen voi saada negatiivisia arvoja. Sarkaojitettun pellon ravinnehuuhtoumien prosentuaaliset osuudet salaojitettun pellon huuhtoumista sen sijaan arvotaan normaalijakaumasta, ja ne voivat täten saada myös negatiivisia arvoja. Kaikkien parametrien odotusarvo on niiden mallissa käytetty alkuperäinen arvo. Keskihajontana käytetään 10 % alkuperäisistä arvoista. Taloudellisten parametrien log-normaalit jakaumat $X \sim \text{Log} - N(\mu, \sigma^2)$ määritellään niiden odotusarvojen E ja varianssien $\overline{\text{var}}$, eli keskihajontojen neliöiden perusteella seuraavasti (Vose 1996, 79):

$$\mu = \ln\left(\frac{E^2}{\sqrt{\overline{\text{var}} + E^2}}\right) \quad (6.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\ln\left(\frac{\overline{\text{var}}}{E^2} + 1\right)} \quad (6.2)$$

Parametrien arvonnat suoritetaan täysin toisistaan riippumatta ja näin ollen simulaatiossa ei oteta huomioon niiden välillä mahdollisesti vallitsevia korrelaatioita. Parametrien saamat arvot eivät myöskään ole riippuvaisia edellisen arvonnin tuloksista, eli kyseessä on ns. Monte Carlo -simulaatioon perustuva Markov-prosessi. Monte Carlo -simulaatiot toteutetaan kussakin optimissa suorittamalla parametrien arvonta ja tulosten laskenta 10000 kertaa.

Tulosten jakaumista lasketaan keskiarvot, keskihajonnat, vinoudet ja huipukkuudet . Nämä esitetään taulukoissa 6.10 ja 6.11, sekä niiden laskentakaavat määritellään liitteessä 14. Kuvissa 6.2-6.5 esitetään tulosten jakaumat histogrammeina. Jakauman keskiarvo määrittää jakauman odotusarvon. Keskihajonta taas kuvaa todennäköisintä poikkeamaa odotusarvosta. Vinouden ja huipukkuuden avulla voidaan tarkastella kuinka hyvin tulosten jakauma noudattaa normaalijakaumaa. Mitä lähempänä vinoutta kuvaava arvo on nollaa, sitä symmetrisempi jakauma on. Normaalijakauma on symmetrinen ja sen mediaani on yhtä suuri kuin sen odotusarvo. Vinouden ollessa negatiivinen, jakauma on vino vasemmalle ja sen mediaani on keskiarvoa suurempi.

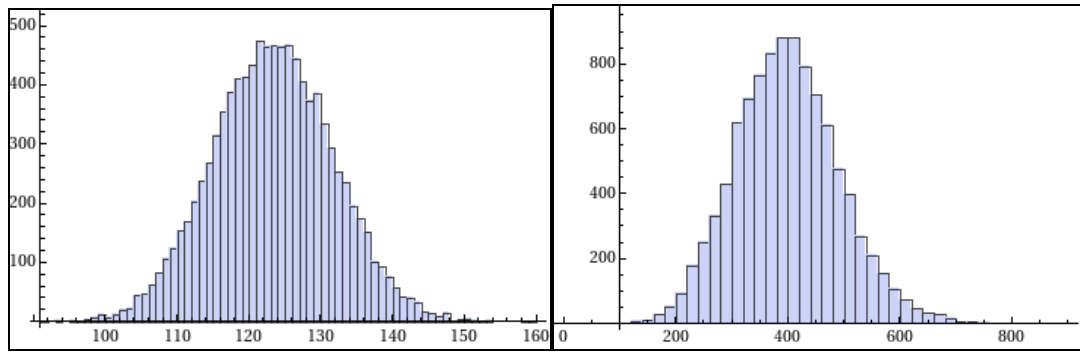
Vastaavasti, vinouden ollessa positiivinen, jakauma on vino oikealle ja sen mediaani on pienempi, kuin sen keskiarvo. Huipukkuus kuvaa jakauman kasvuvauhtia, eli sitä missä määrin havainnot kasautuvat jakauman odotusarvon ympärille. Normaalijakauman huipukkuus saa arvon kolme. (Vose 1996, 293-295).

Taulukko 6.10 Tulosten jakaumien tilastolliset tunnusluvut salaojitetulla ohrapellolla

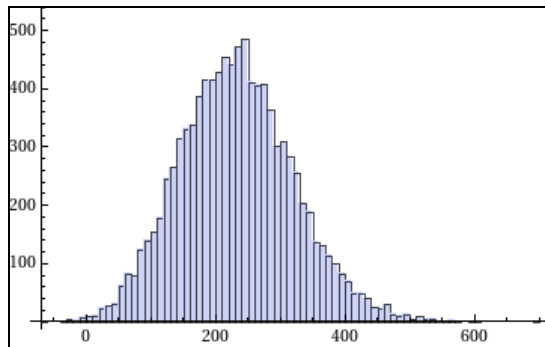
	Odotusarvo	Keskihajonta	Suhteellinen keskihajonta	Vinous	Huipukkuus
Yksityinen optimi					
Lannoitustaso (kg/ha)	123,4	8,41	6,8 %	0,0357	3,0164
Yksityinen voitto (€ha)	398,8	92,63	23,2 %	0,2682	3,2018
Yhteiskunnan hyvinvointi (€ha)	232,7	88,51	38,0 %	0,2673	3,2080
Yhteiskunnan optimi					
Lannoitustaso (kg/ha)	102,1	6,71	6,6 %	0,0092	2,9876
Yksityinen voitto (€ha)	390,2	92,68	23,8 %	0,3295	3,1714
Yhteiskunnan hyvinvointi (€ha)	241,1	89,52	37,1 %	0,3344	3,1670

Taulukko 6.11 Tulosten jakaumien tilastolliset tunnusluvut sarkaojitetulla ohrapellolla

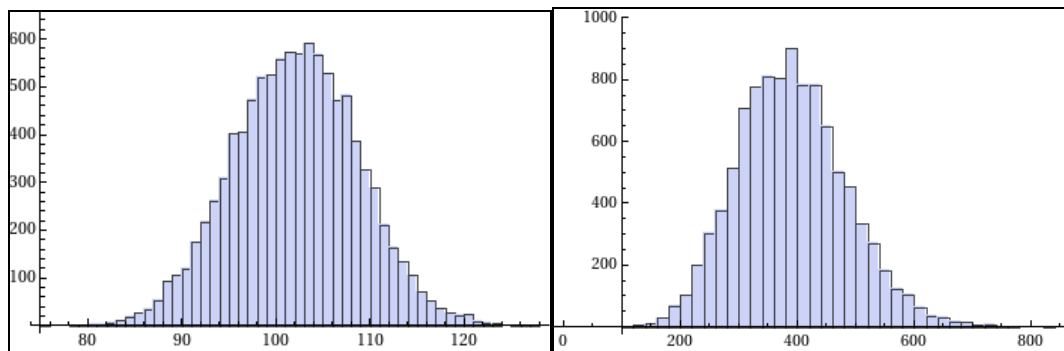
	Odotusarvo	Keskihajonta	Suhteellinen keskihajonta	Vinous	Huipukkuus
Yksityinen optimi					
Lannoitustaso (kg/ha)	122,8	8,36	6,8 %	- 0,0507	2,9568
Ojituksen intensiivisyys	0,1281	0,002	1,6 %	0,3787	3,1645
Yksityinen Voitto (€/ha)	335,8	81,15	24,2 %	0,2639	3,0294
Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)	259,2	79,75	30,8 %	0,2606	3,0459
Yhteiskunnan optimi					
Lannoitustaso (kg/ha)	113,1	7,31	6,5 %	- 0,0570	3,0461
Ojituksen intensiivisyys	0,1352	0,003	2,2 %	0,0026	3,3492
Yksityinen Voitto (€/ha)	334,5	79,56	23,8 %	0,2909	3,1561
Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)	261,7	78,17	29,9 %	0,2950	3,1785



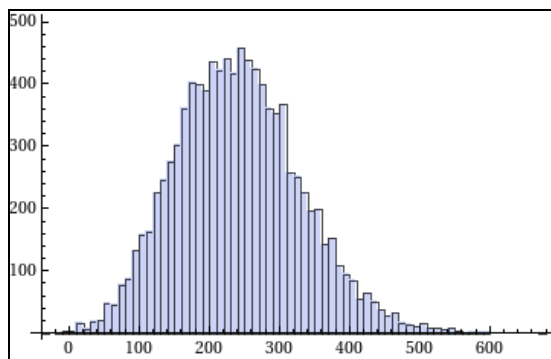
Kuva 6.2 Lannoitustaso ja yksityinen voitto salaojitettun ohrapellon yksityisessä optimissa



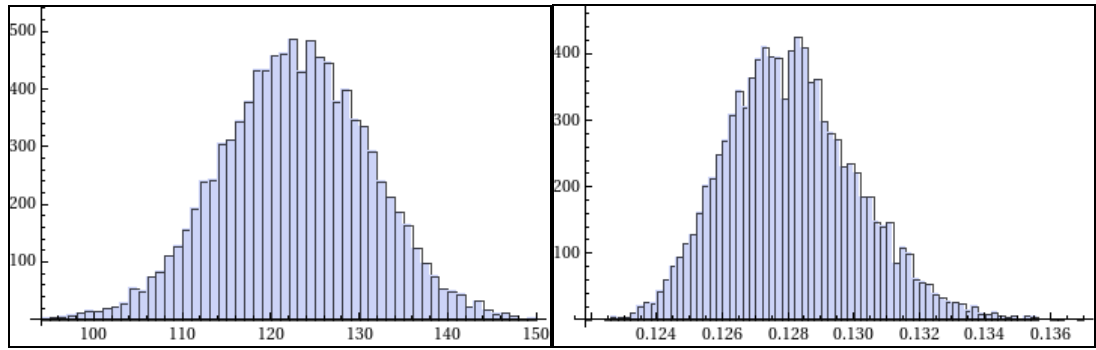
Kuva 6.3 Yhteiskunnan hyvinvointi salaojitettun ohrapellon yksityisessä optimissa



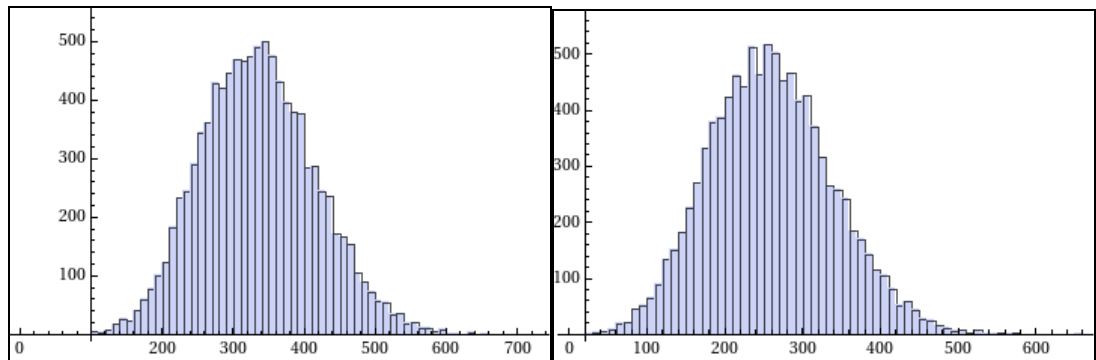
Kuva 6.4 Lannoitustaso ja yksityinen voitto salaojitettun ohrapellon yhteiskunnallisessa optimissa



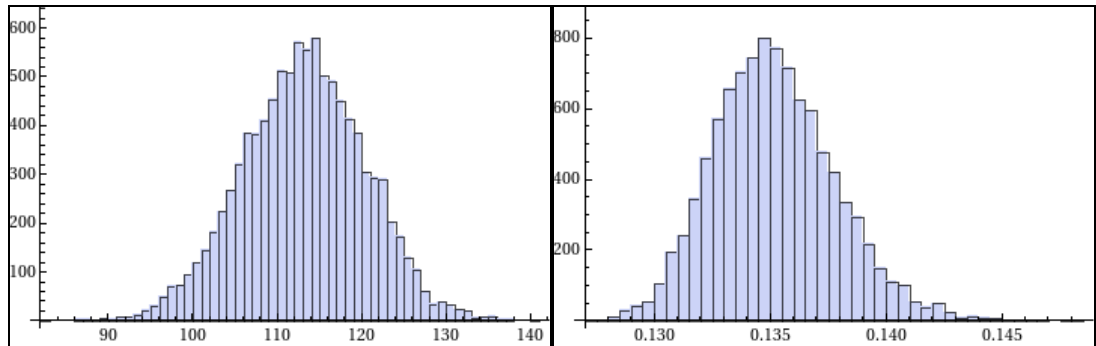
Kuva 6.5 Yhteiskunnan hyvinvointi salaojitettun ohrapellon yhteiskunnallisessa optimissa



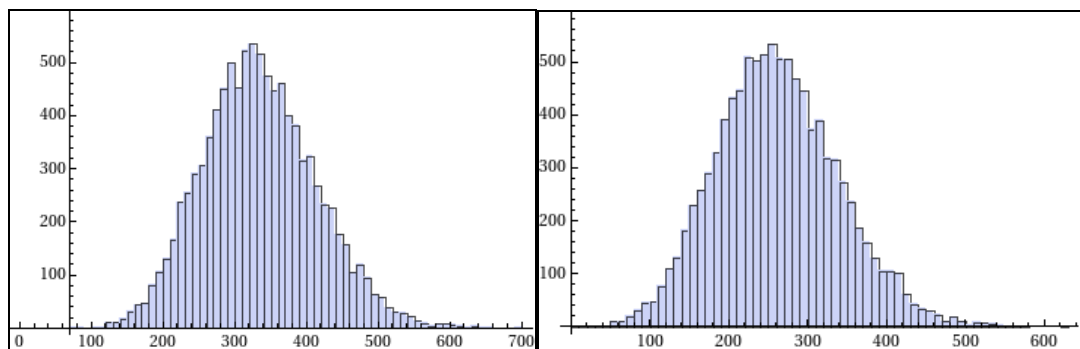
Kuva 6.6 Lannoitustaso ja ojituksen intensiivisyys sarkaojitetun ohrapellon yksityisessä optimissa



Kuva 6.7 Yksityinen voitto ja yhteiskunnan hyvinvointi sarkaojitetun ohrapellon yksityisessä optimissa



Kuva 6.8 Lannoitustaso ja ojituksen intensiivisyys sarkaojitetun ohrapellon yhteiskunnallisessa optimissa



Kuva 6.9 Yksityinen voitto ja yhteiskunnan hyvinvointi sarkaojitetun ohrapellon yhteiskunnallisessa optimissa

Tulosten jakaumien huipukkuutta ja vinoutta kuvaavat arvot kertovat jakaumien olevan lähellä normaalijakaumaa. Kaikkein eniten normaalijakaumaa muistuttavat lannoitustasojen jakaumat. Muiden tulosten jakaumat ovat vinoja oikealle ja niiden huipukkuusarvot ovat normaalijakauman huipukkuuden arvoa kolme suurempia. Tämä voidaan selittää osittain sillä, että taloudellisten parametrien log-normaalit jakaumat eivät ole täydellisen symmetrisiä ja niiden huipukkuusarvot ovat suurempia kuin kolme. Näin ollen tulosten jakaumien poikkeamat normaalijakaumasta voidaan tulkita johtuvan ainakin jossain määrin mallin parametrien jakaumien poikkeamisista normaalijakaumasta. (Vose 1996, 293-295.)

Lannoitustasojen ja ojituksen intensiivisyyksien keskihajonnat ovat suhteessa huomattavasti pienemmät verrattuna yksityisten voittojen ja yhteiskunnan hyvinvointien keskihajontoihin. Lannoitustasojen suhteelliset keskihajonnat, eli keskihajontojen osuudet odotusarvoista vaihtelevat 6,5 % ja 6,8 % välillä. Ojituksen intensiivisyyden suhteellinen keskihajonta on ainoastaan 1,6 % sarkaojitetun pellon yksityisessä optimissa ja 2,2 % yhteiskunnallisessa optimissa. Yksityisten voittojen ja yhteiskunnan hyvinvointien keskihajonnat sen sijaan ovat merkittäviä. Yksityisten voittojen suhteelliset keskihajonnat eivät juuri eroa sala- ja sarkaojitetulla pellolla, vaihdellen 23,2 % ja 24,2 % välillä. Erot yhteiskunnan hyvinvointien suhteellisissa keskihajonnoissa sarka- ja salaojitetulla pellolla ovat huomattavat. Salaojitetulla pellolla suhteellinen keskihajonta on jopa 38,0 % yksityisessä optimissa ja 37,1 % yhteiskunnallisessa optimissa. Sarkaojitetulla pellolla vastaavat arvot ovat 30,8 % ja 29,9 %. Sekä sala- että sarkaojitetulla pellolla yksityisten voittojen ja yhteiskunnan hyvinvointien suhteelliset keskihajonnat ovat kuitenkin merkittäviä, ottaen huomioon että mallin parametrien suhteellinen keskihajonta on ainoastaan 10 %.

7 Johtopäätökset

Tutkielman tarkoitus oli tarkastella ja vertailla sala- ja sarkaojituksen yksityistä ja yhteiskunnallista kannattavuutta suomessa. Toisena tavoitteena oli tarkastella biodiversiteettiä ja siihen vaikuttavan ojituksen intensiivisyyden merkitystä maatalousmaiseman näkökulmasta. Tutkimuksen tärkein tavoite ei ollut niinkään tarkkojen tulosten saaminen, vaan teoreettisen sekä empiirisen mallin luominen ja kehittäminen.

Edellisessä luvussa esitettyjen tulosten mukaan voidaan sanoa salaojituksen olevan yksityistaloudellisesti kannattavampi vaihtoehto kuin sarkaojitus. Osittaisessa herkkyytarkastelussa ei löydetty sellaisia parametrien muutoksia, jotka olisivat muuttaneet sarkaojituksen yksityisesti kannattavammaksi kuin salaojituksen. Sarkaojitus oli sen sijaan mallin mukaan, yhteiskunnallisesti salaojitusta kannattavampi vaihtoehto. Herkkyysanalyysissa kuitenkin tuli ilmi, että suurin syy sarkaojituksen yhteiskunnalliseen kannattavuuteen oli ero typpihuuhtoumassa salaojitukseen verrattuna. Empiirisen mallin parametrisoinnissa, sarkaojitettun pellon typpihuuhtouman kertoimeksi salaojitettun pellon huuhtoumaan verrattuna määritettiin 0,50, joka perustui toimivan ja toimimattoman salaojituksen valuntojen typpihuuhtoumaeroon. Tämän lisäksi sarkaojitettun pellon typpihuuhtouman määrään mallissa vaikutti pienentävästi pinta-alakerroin, jolla kerrottiin koko funktion lisäksi sen parametrina ollut lannoitustaso. On todettava, että tulosten ja herkkyysanalyysin perusteella ei voida todeta, sarkaojituksen olevan yhteiskunnallisesti kannattavampaa kuin salaojitus, sillä sarkaojavaluntojen ravinnehuuhtoumista ei ole olemassa tarpeeksi tutkittua tietoa, jota olisi voitu käyttää empiirisen mallin laatimisessa ja sen parametrisoinnissa.

Monte Carlo simulaatioon perustuvassa herkkyysanalyysissa määriteltiin tulosten jakaumien suhteelliset keskihajonnat, kun niiden laskennassa käytetyt parametrit noudattivat jakaumia joiden keskihajonnat olivat 10 % odotusarvoista. Yksityisten voittojen ja yhteiskunnan hyvinvointien suhteelliset keskihajonnat olivat huomattavia. Tämä vaikeuttaa taloudellisten ohjauskeinojen optimaalista asettamista lannoitustasolle ja sarkaojituksen intensiivisyydelle. Taloudellisten ohjauskeinojen tulisi reagoida nopeasti parametreissa tapahtuviin muutoksiin, jotta ne olisivat

tehokkaita. Monet mallin parametreista, kuten viljan tuottajahinta ovat alttiita jatkuville muutoksille. Lisäksi monet parametreista saattavat poiketa huomattavasti odotusarvoista, peltokohtaisista tekijöistä johtuen. Tätä varten ohjaukskeinot tulisi määrittää myös mahdollisimman paikallisesti. Tehokkaan, taloudellisiin ohjaukskeinoihin perustuvan, ojitukseen kohdistuvan maatalous- ja ympäristöpolitiikan laatiminen ja toimeenpano on näistä syistä äärimmäisen haasteellista.

Peltomaisemalle määritellyssä mallissa tutkittiin spatiaalisen autokorrelaation huomioimisen merkitystä sarkaojituksen intensiivisyyden perusteella määriteltyyn biodiversiteettiin eli lintujen lajimäärään. Spatiaalisen autokorrelaation huomioiminen sadan hehtaarin peltomaisemamallissa kasvatti yhteiskunnan hyvinvoinnin arvoa yhteiskunnallisessa sekä yksityisessä optimissa noin 4,7 €/ha. Arvon nousu on suhteellisen vähän verrattuna koko yhteiskunnan hyvinvoinnin arvoon, mutta sen vaikutus biodiversiteetin arvoon oli huomattava. Biodiversiteetin arvo kasvoi yksityisessä optimissa 23 %, sekä yhteiskunnallisessa optimissa 22,5 %. Spatiaalisen autokorrelaation huomioiminen peltomallin yhteiskunnallisen optimin määrittämisessä ei vaikuttanut ojituksen optimaalisiin intensiivisyyksiin tai lannoitustasoihin. Näin ollen sillä ei ollut vaikutusta myöskään yksityisiin voittoihin tai ravinnehuuhtoumiin, vaan ainoastaan biodiversiteettiin ja yhteiskunnan hyvinvointiin.

Lähteet

Aakkula, J.J. 1999. Economic value of pro-environmental farming - A critical and decision-making oriented application of the contingent valuation method. Agricultural Economics Research Institute. Publications 92.

Aavik, T. & Liira, J. 2009. Agrotolerant and high nature-value species - Plant biodiversity indicator groups in agroecosystems. *Ecological Indicators* 9, 892-901.

Anselin, L. 1999. *Spatial Econometrics*. Bruton Center. School of Social Sciences, University of Texas. Viitattu 19.9.2009

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.141.1868&rep=rep1&type=pdf>.

Anselin, L. 2006. *Spatial Regression*. Spatial Analysis Laboratory, Department of Geography and National Center for Supercomputing Applications. University of Illinois.

Beltman, B., Meuleman, A.F.M. & Scheffer, R.A. 2004. Water pollution control by aquatic vegetation of treatment wetlands, *Wetlands Ecology and Management* 12, 459–471.

Bhattacharai, R., Kalita, P.K. & Patel, M.K. 2009. Nutrient transport through a vegetative filter strip with subsurface drainage. *Journal of Environmental Management* 90, 1868-1876.

Borin, M., Bigon, E., Zanin, G. & Fava, L. 2004. Performance of a narrow buffer strip in abating agricultural pollutants in the shallow subsurface water flux. *Environmental Pollution* 131, 313-321.

Dajdok, Z. & A. Wuczyński. 2005. Zróżnicowanie biocenotyczne, funkcje i problemy ochrony drobnych cieków śródpolnych. *Środowiskowe aspekty gospodarki wodnej*, 227-252.

Dorioz, J.M., Wang, D., Poulenard, J. & Trevisan, D. 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics - A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 117, 4-21.

Grant, R., Laubel, A., Kronvang, B., Andersen, H.E., Svendsen, L.M. & Fuglsang, A. 1996. Loss of Dissolved and particulate phosphorus from arable catchments by subsurface drainage. *Water Resources* 30(11), 2633-2642.

Gren, I.M. 2001. International Versus National Actions Against Nitrogen Pollution of the Baltic Sea. *Environmental and Resource Economics* 20, 41-59.

Haataja, K. & Peltola, J. 2001. Salaojituksen kannattavuus Suomessa. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. Taloustutkimus MTTL selvityksiä 20.

HELCOM. 2005. Nutrient Pollution to Baltic Sea in 2000. Helsinki Commission. *Baltic Sea Environmental Proceedings* 100.

Herzon, I. & Helenius, J. 2008. Agricultural drainage ditches, their biological importance and functioning. *Biological conservation* 141, 1171-1183.

Hietala-Koivu, R. 2002. Landscape and Modernizing agriculture: a case study of three areas in Finland in 1954-1998. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91, 273-281.

Hietala-Koivu, R., Lankoski, J. & Tarmi, S. 2004. Loss of biodiversity and its social cost in an agricultural landscape. *Agriculture Ecosystems and Environment* 103, 75-83.

Kladivko, E. & Frankenberger, J. 2008. Nitrate-N Loads to Subsurface Drains as Affected by Drainage Intensity and Agronomic Management Practices. *Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage*, 8-14.

Kröger, R., Holland, M.M., Moore, M.T. & Cooper, C.M. 2007. Hydrological Variability and Agricultural Drainage Ditch Inorganic Nitrogen Reduction Capacity. *Journal of Environmental Quality* 36, 1646-1652.

Kuussaari, M., Heliölä, J., Tiainen, J. & Helenius, J. 2008. Maatalouden ympäristötuen merkitys luonnon monimuotoisuudelle ja maisemalle: MYTVAS-loppuraportti 2000–2006. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 4/2008. Helsinki.

Lankoski, J. & Ollikainen, M. 2003. Agri-environmental externalities: a framework for designing targeted policies. *European Review of Agricultural Economics* 30(1), 51-75.

Lankoski, J., Ollikainen, M. & Uusitalo, P. 2006. No-till technology: benefits to farmers and the environment? Theoretical analysis and application to Finnish Agriculture. *European Review of Agricultural Economics* 33, 193-221.

Lankoski, J. & Ollikainen, M. 2009. Biofuel policies and the environment: the effects of biofuel feedstock production on climate, water quality and biodiversity. Contributed Paper prepared for presentation at the International Association of Agricultural Economists Conference, Beijing, China, August 16-22, 2009. Viitattu 5.10.2009
<http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/51677/2/Lankoski%20and%20Ollikainen%20614.pdf>.

Lovell, S.T. & Sullivan, V.C. 2006. Environmental benefits of conservation buffers in the United States: evidence, promise and open questions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112, 249-260.

Luoto, M., Kuussaari, M. & Toivonen, T. 2004. Maisemarakenteen merkitys luonnon monimuotoisuudelle. Teoksessa: Tiainen, J., Kuussaari, M., Laurila, I.P. & Toivonen, T. (toim.). *Elämää pellossa - Suomen maatalousympäristön monimuotoisuus*. Helsinki: Edita Publishing Oy.

Lyytimäki, J. & Hakala, H. 2008. Ympäristön tila ja suojele Suomessa. Helsinki: Gaudeamus.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2003. Ojitusoimitusopas. MMM:n julkaisuja 4/2003. Helsinki.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2005. Säätosalaojitus, säätokastelu, kuivatusvesien kierrätys. Viitattu 16.9.2009

<http://www.salaojakeskus.fi/pdf/saatosalaojitus.pdf> .

Maa- ja metsätalousministeriö. 2009. Säätosalaojituksen, säätokastelun tai kuivatusvesien kierrätyksen hoitotoimenpiteet. Viitattu 10.8.2009

http://www.mavi.fi/attachments/mavi/ymparistotuki/5FyGvxJE6/Salaojitus_2009_suomi.pdf .

Madramootoo, A.C. & Dodds, G.T. 2008. Reducing nutrient loads in agricultural land drainage systems. Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage, 79-97.

Mankin, K.R., Ngandu, D.M., Barden, C.J., Hutchinson, S.L. & Geyer, W.A. 2007 Grass-shrub riparian buffer removal of sediment phosphorus, and nitrogen from stimulated runoff. Journal of American Water Resource Association 43, 1108-1116.

Montagne, D. , Cornu, S., Le Forestier, L. & Cousin, I. 2009. Soil Drainage as an Active Agent of Recent Soil Evolution: A review. Pedosphere 19(1), 1-13.

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. World Resources Institute, Washington DC.

Mulholland, P.J., Helton, A.M., Poole, G.C., Hall, R.O. & Hamilton, S.K. 2008. Stream denitrification across biomes and its response to anthropogenic nitrate loading. Nature 452, 202-205.

Myyrä, S. 2006. Putkituksen hyödyt maankuivatushankkeissa. MTT:n selvityksiä 130.

Myyrä, S., Ketola, E., Yli-Halla, M. & Pietola, K. 2005. Land improvements under land tenure insecurity: the case of pH and phosphate in Finland. *Land Economics* 81, 557-569.

Myyrä, S. & Pitkänen, T. 2008. Farmer and landowner choices over drainage systems - profit maximisation and environment. *Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage*, 68-77.

Nguyen, L. & Sukias, J. 2001. Phosphorus fractions and retention in drainage ditch sediments receiving surface runoff and subsurface drainage from agricultural catchments in the North Island, New Zealand. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 92, 49-69.

Näreaho, T., Jormola, J., Laitinen, L. & Sarvilinna, A. 2006. Environmental management of cleaned ditches in agricultural areas. *Suomen ympäristökeskus. The Finnish Environment* 52. Helsinki.

Ohio State University, 1998. *Agricultural Drainage bulletin* 871-98. Viitattu 25.7.2009

http://ohioline.osu.edu/b871/b871_4.html .

Oygarden, L., Kvarner, J. & Jenssen, P.D. 1997. Soil erosion via preferential flow to drainage systems in clay soils. *Geoderma* 76, 65-86.

Paasonen-Kivekäs, M., Vakkilainen, P. & Karvonen, T. 2008. Nutrient transport through tile drains on a clayey field. *Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage*, 142-152 .

Peltola, R., Mattila, P. & Kasteenpohja, E. 2006. Pellon Arvo. *Maanmittauslaitoksen julkaisu* 102.

Piha, M. 2007. Spatial and Temporal Determinants of Finnish Farmland Bird Populations. University of Helsinki. Department of Biological and Environmental Sciences. Dissertation. Helsinki: Helsinki University Printing house.

Roper, J., Wood, J.D., Madani, R., Gordon, R., Burton, D., Stratton, G.W. & Thiagarajan, A. 2008. Influence of Tillage on Nitrate-Nitrogen Leaching in Agricultural Drainage Water. Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage, 21-30.

Rosenzweig, M. 1995. Species diversity in space and time. Cambridge: Cambridge University Press.

Ruuska, R. & Helenius, J. 1996. GIS analysis of change in an agricultural landscape in Central Finland. Agricultural and Food Science in Finland 5, 567-576.

Salaojakeskus ry. 2002. Salaojituksen tavoiteohjelma. Helsinki.

Salaojakeskus ry. 2006. Salaojakeskus ry:n jäsenjulkaisu 1/2006. Helsinki.

Salaojayhdistys ry. 2008. Salaojitettut peltohehtaarit Suomessa. Viitattu 10.7.2009 <http://www.salaojayhdistys.fi/tilastot/salaojatilastot.pdf> .

Salaojituksen tutkimusyhdistys ry. 2008. Pellon vesitalouden optimointi, Väliraportti 2008. Salaojituksen tutkimusyhdistys ry:n tiedote 29. Helsinki.

Sands, G.R., Song, I., Busman, L.M. & Hansen, B. 2008. Drainage Design to achieve both agronomic and Environmental objectives. Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage, 98-109.

Schulman, A., Heliölä, J. & Kuussaari, M. 2005. Ahvenanmaan maatalousluonnon monimuotoisuus ja maatalouden ympäristötuen vaikuttavuuden arviointi. Suomen ympäristökeskus. Suomen ympäristö 734. Helsinki.

Simmelsgaard, S.E. 1998. The effect of crop, N-level, soil type and drainage on nitrate leaching from Danish soil. *Soil Use and Management* 14, 30-36.

Simmelsgaard, S.E. & Djurhuus, J. 1998. An Empirical model for estimating nitrate leaching as affected by crop type and long-term N fertilizer rate. *Soil Use and Management* 14, 37-43.

Skaggs, R.W. & Chescheir III, G.M. 2003. Effects of Subsurface Drainage Depth on Nitrogen Losses from Drained Lands. *Transactions of ASAE* 46(2), 237-244.

Skaggs, R.W., Youssef, M.A., Chescheir, G.M. & Williams, J.W. 2005. Effect of Drainage on Nitrogen Losses from Drained Land. *Transactions of ASAE* 48(6), 2169-2177.

Smedema, L.K. 2004. *Modern Land Drainage. Planning, Design and Management of Agricultural Drainage Systems*. Leiden: A.A. Balkema.

Tiainen, J., Kuussaari, M., Laurila, I.P. & Toivonen, T. 2004. Millainen on suomalainen maatalousympäristö. Teoksessa: Tiainen, J., Kuussaari, M., Laurila, I.P. & Toivonen, T. (toim.), *Elämää pellossa - Suomen maatalousympäristön monimuotoisuus*. Helsinki: Edita Publishing.

Tike. 2009. Käytössä oleva maatalousmaa vuonna 2008. Maa- ja metsätalousministeriön tietopalvelukeskus (Tike), Helsinki. Viitattu 19.9.2009 http://www.matilda.fi/pls/portal30/rpportal.matilda_julkaisut.showfile?docid=826&versio=1253695195&fileid=7749 .

Tobler, W.R. 1970. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography* 46, 234-240.

Turtola, E. & Paajanen, A. 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management* 28, 295-310.

Turtola, E., Alakukku, L., Uusitalo, R. & Kaseva, A. 2007. Surface Runoff, subsurface drainflow and soil erosion as affected by tillage in a clayey Finnish soil. *Agricultural and food science* 16, 332-351.

Työtehoseura. 1980. Työmenekki sarka- ja salaojitetulla pellolla. Työtehoseuran maataloustiedotus 269.

Ulen, B. & Persson, K. 1999. Field-scale Phosphorus losses from a drained clay soil in Sweden. *Hydrological Processes* 13, 2801-2812.

Vakkilainen, P., Alakukku, L., Myllys, M., Nurminen, J., Paasonen-Kivekäs, M., Puustinen, M., Peltomaa, R. & Äijö, H. 2008. Nutrien load from two drainage systems - a fieldscale research project on clay soil. *Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage*, 383-384.

Vaughan, R., Needelman, B., Kleinman, P. & Allen, A. 2007. Spatial Variation of Soil Phosphorus Within a Drainage Ditch Network. *Journal of Environmental Quality* 36, 1096-1104.

Vepsäläinen, V. 2007. Farmland Birds and Habitat Heterogeneity in Intensively Cultivated Boreal Agricultural Landscapes. Helsingin yliopisto. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Väitöskirja.

Vesihallitus. 1986. Maankuivatuksen suunnittelu. *Vesihallitus tiedotus* 278. Helsinki.

Vilja-alan yhteistyöryhmä. 2008. Valtioneuvoston vahvistama investointituki salaojitukseen. *Viljaviestitiedote* 10/2008. Viitattu 24.9.2009

<http://www.vyr.fi/uutiskirjeet/Viljaviestitiedote/2008/marraskuu/salaojitustuki.php> .

Vose, D. 1996. *Quantitative Risk Analysis, A guide to Monte Carlo Simulation Modelling*. Chichester: John Wiley & Sons.

Wesström, I., Bölenius, E. & Joel, A. 2008. Long-term effects of tile drainage on soil physical properties and crop yields. Proceeding of the 10th International Drainage Workshop of ICID Working Group on Drainage, 125-133.

Whittaker, R.H. 1972. Evolution and Measurement of Species Diversity. *Taxon* 21, 213-251.

A 28.5.2008/333. Valtioneuvoston asetus tuettavan peltosalaojituksen laatuvaatimuksista ja tukikelpoisista enimmäiskustannuksista.

L 28.12.2007/1476. Laki maatalouden rakennetuista.

A 30.3.2007/329. Maa- ja metsätalousministeriön asetus perus- ja kasvlohkoista ja niiden ulko- ja sisärajoja koskevista tuen myöntämisen edellytyksistä.

Liitteet

Liite 1: Osittainen herkkyysanalyysi ohran tuottajahinnalle

Yksityiset optimit ohran tuottajahinnan muuttuessa

Salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Ohran hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,0945	N -> 81,9913	-25,6801	-160,981
-25,00%	0,14175	N -> 106,126	179,112	27,0572
-20,00%	0,1512	N -> 109,968	221,775	66,7859
-15,00%	0,16065	N -> 113,576	264,842	107,024
-10,00%	0,1701	N -> 116,979	308,265	147,715
-5,00%	0,17955	N -> 120,197	352,006	188,812
0	0,189	N -> 123,25	396,033	230,275
5,00%	0,19845	N -> 126,154	440,318	272,07
10,00%	0,2079	N -> 128,923	484,837	314,168
15,00%	0,21735	N -> 131,569	529,569	356,542
20,00%	0,2268	N -> 134,103	574,495	399,171
25,00%	0,23625	N -> 136,532	619,6	442,035
50,00%	0,2835	N -> 147,385	847,371	659,317
Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Ohran hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,0945	N -> 81,9687, m -> 0,144727	-28,3429	-92,1374
-25,00%	0,14175	N -> 105,901, m -> 0,133383	147,725	76,5633
-20,00%	0,1512	N -> 109,704, m -> 0,132019	184,552	112,172
-15,00%	0,16065	N -> 113,276, m -> 0,13082	221,756	148,216
-10,00%	0,1701	N -> 116,644, m -> 0,129758	259,294	184,645
-5,00%	0,17955	N -> 119,83, m -> 0,128809	297,129	221,417
0	0,189	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00%	0,19845	N -> 125,729, m -> 0,127184	373,568	295,851
10,00%	0,2079	N -> 128,471, m -> 0,126482	412,124	333,457
15,00%	0,21735	N -> 131,092, m -> 0,12584	450,878	371,29
20,00%	0,2268	N -> 133,602, m -> 0,125251	489,811	409,333
25,00%	0,23625	N -> 136,009, m -> 0,124708	528,91	447,567
50,00%	0,2835	N -> 146,767, m -> 0,122522	726,471	641,137

Yhteiskunnalliset optimit ohran tuottajahinnan muuttuessa

Salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Ohran hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	0,0945	N -> 65,0988	-30,2487	-155,378
-25,00 %	0,14175	N -> 86,8928	173,108	34,6266
-20,00 %	0,1512	N -> 90,3395	215,507	74,7244
-15,00 %	0,16065	N -> 93,5716	258,316	115,324
-10,00 %	0,1701	N -> 96,6138	301,488	156,372
-5,00 %	0,17955	N -> 99,4869	344,983	197,819
0	0,189	N -> 102,209	388,769	239,627
5,00 %	0,19845	N -> 104,794	432,818	281,763
10,00 %	0,2079	N -> 107,255	477,105	324,196
15,00 %	0,21735	N -> 109,604	521,609	366,901
20,00 %	0,2268	N -> 111,85	566,312	409,856
25,00 %	0,23625	N -> 114,002	611,198	453,042
50,00 %	0,2835	N -> 123,581	837,921	671,881
Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Ohran hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,0945	ei tulosta (m > 1)		
-25,00%	0,14175	N -> 97,1049, m -> 0,142661	146,001	78,4307
-20,00%	0,1512	N -> 100,714, m -> 0,140715	182,808	114,07
-15,00%	0,16065	N -> 104,098, m -> 0,139014	219,989	150,147
-10,00%	0,1701	N -> 107,283, m -> 0,137514	257,501	186,612
-5,00%	0,17955	N -> 110,294, m -> 0,13618	295,307	223,42
0	0,189	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00%	0,19845	N -> 115,857, m -> 0,133905	371,688	297,931
10,00%	0,2079	N -> 118,44, m -> 0,132927	410,213	335,577
15,00%	0,21735	N -> 120,906, m -> 0,132035	448,935	373,451
20,00%	0,2268	N -> 123,265, m -> 0,131218	487,837	411,534
25,00%	0,23625	N -> 125,527, m -> 0,130467	526,904	449,809
50,00%	0,2835	N -> 135,612, m->0,127458	724,302	643,586

Liite 2: Osittainen herkkyyshanalyysi lannoitteen hinnalle

Yksityiset optimit lannoitteen hinnan muuttuessa

Salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Lannoitteen hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,865	N -> 164,509	518,444	312,147
-25,00%	1,2975	N -> 140,374	452,865	271,676
-20,00%	1,384	N -> 136,532	440,89	263,325
-15,00%	1,4705	N -> 132,924	429,238	254,988
-10,00%	1,557	N -> 129,522	417,889	246,69
-5,00%	1,6435	N -> 126,303	406,825	238,448
0	1,73	N -> 123,25	396,03	230,28
5,00%	1,8165	N -> 120,346	385,499	222,18
10,00%	1,903	N -> 117,577	375,21	214,172
15,00%	1,9895	N -> 114,931	365,155	206,256
20,00%	2,076	N -> 112,398	355,323	198,437
25,00%	2,1625	N -> 109,968	345,707	190,717
50,00%	2,595	N -> 99,1152	300,564	153,667
Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Lannoitteen hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,865	N -> 163,953, m->0,12393	441,868	350,598
-25,00%	1,2975	N -> 139,906, m -> 0,126069	384,679	302,324
-20,00%	1,384	N -> 136,08, m -> 0,126464	374,252	293,206
-15,00%	1,4705	N -> 132,486, m -> 0,126849	364,109	284,267
-10,00%	1,557	N -> 129,098, m -> 0,127226	354,234	275,504
-5,00%	1,6435	N -> 125,893, m -> 0,127594	344,611	266,915
0	1,73	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00%	1,8165	N -> 119,962, m -> 0,12831	326,074	250,241
10,00%	1,903	N -> 117,205, m -> 0,128658	317,135	242,148
15,00%	1,9895	N -> 114,571, m -> 0,128999	308,403	234,212
20,00%	2,076	N -> 112,049, m -> 0,129335	299,868	226,429
25,00%	2,1625	N -> 109,63, m -> 0,129665	291,523	218,794
50,00%	2,595	N -> 98,828, m -> 0,131239	252,386	182,718

Yhteiskunnalliset optimit lannoitteen hinnan muuttuessa

Salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Lannoitteen hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,865	N -> 123,719	503,047	336,89
-25,00%	1,2975	N -> 112,182	442,657	285,94
-20,00%	1,384	N -> 110,074	431,399	276,327
-15,00%	1,4705	N -> 108,026	420,391	266,895
-10,00%	1,557	N -> 106,033	409,623	257,637
-5,00%	1,6435	N -> 104,095	399,085	248,55
0	1,73	N -> 102,209	388,769	239,627
5,00%	1,8165	N -> 100,371	378,669	230,866
10,00%	1,903	N -> 98,5807	368,775	222,262
15,00%	1,9895	N -> 96,8353	359,083	213,81
20,00%	2,076	N -> 95,133	349,584	205,508
25,00%	2,1625	N -> 93,4718	340,274	197,351
50,00%	2,595	N -> 85,726	296,346	158,632
Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	Lannoitteen hinta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	0,865	N -> 142,747, m -> 0,131686	437,863	355,63
-25,00%	1,2975	N -> 126,293, m -> 0,133361	382,113	305,286
-20,00%	1,384	N -> 123,442, m -> 0,13369	371,867	295,927
-15,00%	1,4705	N -> 120,71, m -> 0,134017	361,883	286,782
-10,00%	1,557	N -> 118,089, m -> 0,134342	352,148	277,84
-5,00%	1,6435	N -> 115,57, m -> 0,134664	342,65	269,095
0	1,73	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00%	1,8165	N -> 110,811, m -> 0,135301	324,323	252,16
10,00%	1,903	N -> 108,559, m -> 0,135616	315,474	243,958
15,00%	1,9895	N -> 106,383, m -> 0,135929	306,822	235,925
20,00%	2,076	N -> 104,281, m -> 0,136239	298,361	228,054
25,00%	2,1625	N -> 102,246, m -> 0,136548	290,082	220,34
50,00%	2,595	N -> 92,9576, m -> 0,138055	251,202	183,966

Liite 3: Osittainen herkkyyshanalyysi työkustannuksille

Yksityiset optimit työkustannusten muuttuessa

Salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	työkustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	75	N -> 123,25	471,03	305,28
-25,00%	112,5	N -> 123,25	433,53	267,78
-20,00%	120	N -> 123,25	426,03	260,28
-15,00%	127,5	N -> 123,25	418,53	252,78
-10,00%	135	N -> 123,25	411,03	245,28
-5,00%	142,5	N -> 123,25	403,53	237,78
0	150	N -> 123,25	396,03	230,28
5,00%	157,5	N -> 123,25	388,53	222,78
10,00%	165	N -> 123,25	381,03	215,28
15,00%	172,5	N -> 123,25	373,53	207,78
20,00%	180	N -> 123,25	366,03	200,28
25,00%	187,5	N -> 123,25	358,53	192,78
50,00%	225	N -> 123,25	321,03	155,28
Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	työkustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	100	N -> 122,674, m -> 0,123459	422,659	345,217
-25,00%	150	N -> 122,767, m -> 0,1257	378,887	301,798
-20,00%	160	N -> 122,785, m -> 0,12615	370,147	293,128
-15,00%	170	N -> 122,803, m -> 0,1266	361,41	284,463
-10,00%	180	N -> 122,82, m -> 0,127051	352,679	275,803
-5,00%	190	N -> 122,837, m -> 0,127503	343,951	267,147
0	200	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00%	210	N -> 122,853, m -> 0,127956	326,508	249,775
10,00%	220	N -> 122,853, m -> 0,127956	317,788	241,055
15,00%	230	N -> 122,853, m -> 0,127956	309,067	232,334
20,00%	240	N -> 122,853, m -> 0,127956	300,347	223,614
25,00%	250	N -> 122,853, m -> 0,127956	291,627	214,894
50,00%	300	N -> 122,853, m -> 0,127956	248,024	171,291

Yhteiskunnalliset optimit työkustannusten muuttuessa

Salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	työkustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	75	N -> 102,209	463,77	314,63
-25,00%	112,5	N -> 102,209	426,27	277,13
-20,00%	120	N -> 102,209	418,77	269,63
-15,00%	127,5	N -> 102,209	411,27	262,13
-10,00%	135	N -> 102,209	403,77	254,63
-5,00%	142,5	N -> 102,209	396,27	247,13
0	150	N -> 102,209	388,77	239,63
5,00%	157,5	N -> 102,209	381,27	232,13
10,00%	165	N -> 102,209	373,77	224,63
15,00%	172,5	N -> 102,209	366,27	217,13
20,00%	180	N -> 102,209	358,77	209,63
25,00%	187,5	N -> 102,209	351,27	202,13
50,00%	225	N -> 102,209	313,77	164,63
Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	työkustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	100	N -> 112,943, m -> 0,130329	420,799	347,272
-25,00%	150	N -> 113,048, m -> 0,132648	377,032	303,846
-20,00%	160	N -> 113,069, m -> 0,133114	368,293	295,175
-15,00%	170	N -> 113,088, m -> 0,13358	359,557	286,508
-10,00%	180	N -> 113,108, m -> 0,134047	350,827	277,847
-5,00%	190	N -> 113,127, m -> 0,134515	342,1	269,189
0	200	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00%	210	N -> 113,165, m -> 0,135453	324,661	251,889
10,00%	220	N -> 113,183, m -> 0,135923	315,949	243,246
15,00%	230	N -> 113,201, m -> 0,136393	307,241	234,608
20,00%	240	N -> 113,219, m -> 0,136865	298,537	225,974
25,00%	250	N -> 113,236, m -> 0,137337	289,838	217,345
50,00%	300	N -> 113,317, m -> 0,139707	246,411	174,271

Liite 4: Osittainen herkkyyssanalyysi investointi- ja ylläpitokustannuksille

Yksityiset optimit investointikustannusten muuttuessa

salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	investointikustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	61,975	N -> 123,25	458,008	292,25
-25,00 %	92,9625	N -> 123,25	427,019	261,26
-20,00 %	99,16	N -> 123,25	420,822	255,063
-15,00 %	105,3575	N -> 123,25	414,625	248,866
-10,00 %	111,555	N -> 123,25	408,428	242,669
-5,00 %	117,753	N -> 123,25	402,231	236,472
0	123,95	N -> 123,25	396,033	230,275
5,00 %	130,148	N -> 123,25	389,836	224,077
10,00 %	136,345	N -> 123,25	383,639	217,88
15,00 %	142,5425	N -> 123,25	377,442	211,683
20,00 %	148,74	N -> 123,25	371,245	205,486
25,00 %	154,9375	N -> 123,25	365,048	199,289
50,00 %	185,925	N -> 123,25	334,058	168,3
sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	investointikustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00%	34,75	N -> 122,853, m -> 0,127956	369,979	293,246
-25,00 %	52,125	N -> 122,853, m -> 0,127956	352,604	275,871
-20,00 %	55,6	N -> 122,853, m -> 0,127956	349,129	272,396
-15,00 %	59,075	N -> 122,853, m -> 0,127956	345,654	268,921
-10,00 %	62,55	N -> 122,853, m -> 0,127956	342,179	265,446
-5,00 %	66,025	N -> 122,853, m -> 0,127956	338,704	261,971
0	69,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00 %	72,975	N -> 122,853, m -> 0,127956	331,754	255,021
10,00 %	76,45	N -> 122,853, m -> 0,127956	328,279	251,546
15,00 %	79,925	N -> 122,853, m -> 0,127956	324,804	248,071
20,00 %	83,4	N -> 122,853, m -> 0,127956	321,329	244,596
25,00 %	86,875	N -> 122,853, m -> 0,127956	317,854	241,121
50,00 %	104,25	N -> 122,853, m -> 0,127956	300,479	223,746

Yhteiskunnalliset optimit investointikustannusten muuttuessa

salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	investointikustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	61,975	N -> 102,209	450,744	301,602
-25,00 %	92,9625	N -> 102,209	419,755	270,613
-20,00 %	99,16	N -> 102,209	413,558	264,416
-15,00 %	105,3575	N -> 102,209	407,361	258,219
-10,00 %	111,555	N -> 102,209	401,164	252,022
-5,00 %	117,753	N -> 102,209	394,967	245,825
0	123,95	N -> 102,209	388,769	239,627
5,00 %	130,148	N -> 102,209	382,572	233,43
10,00 %	136,345	N -> 102,209	376,373	227,233
15,00 %	142,5425	N -> 102,209	370,176	221,036
20,00 %	148,74	N -> 102,209	363,979	214,839
25,00 %	154,9375	N -> 102,209	357,782	208,642
50,00 %	185,925	N -> 102,209	326,794	177,652
sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	investointikustannukset (€/ha)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	34,75	N -> 113,146, m -> 0,134984	368,129	295,287
-25,00 %	52,125	N -> 113,146, m -> 0,134984	350,754	277,912
-20,00 %	55,6	N -> 113,146, m -> 0,134984	347,279	274,437
-15,00 %	59,075	N -> 113,146, m -> 0,134984	343,804	270,962
-10,00 %	62,55	N -> 113,146, m -> 0,134984	340,329	267,487
-5,00 %	66,025	N -> 113,146, m -> 0,134984	336,854	264,012
0	69,5	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00 %	72,975	N -> 113,146, m -> 0,134984	329,904	257,062
10,00 %	76,45	N -> 113,146, m -> 0,134984	326,429	253,587
15,00 %	79,925	N -> 113,146, m -> 0,134984	322,954	250,112
20,00 %	83,4	N -> 113,146, m -> 0,134984	319,479	246,637
25,00 %	86,875	N -> 113,146, m -> 0,134984	316,004	243,162
50,00 %	104,25	N -> 113,146, m -> 0,134984	298,629	225,787

Liite 5: Osittainen herkkyysanalyysi biodiversiteetin arvostukselle

Yksityiset optimit biodiversiteetin arvostuksen muuttuessa

Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	biodiversiteetin arvostus €	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	28,6	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	248,112
-25,00 %	42,9	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	253,304
-20,00 %	45,76	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	254,342
-15,00 %	48,62	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	255,381
-10,00 %	51,48	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	256,419
-5,00 %	54,34	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	257,457
0	57,2	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00 %	60,06	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	259,534
10,00 %	62,92	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	260,572
15,00 %	65,78	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	261,611
20,00 %	68,64	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	262,649
25,00 %	71,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	263,688
50,00 %	85,8	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	268,879

Yhteiskunnalliset optimit biodiversiteetin arvostuksen muuttuessa

Sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	biodiversiteetin arvostus €	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	28,6	N -> 113,132, m -> 0,134635	333,429	250,101
-25,00 %	42,9	N -> 113,139, m -> 0,13481	333,404	255,319
-20,00 %	45,76	N -> 113,141, m -> 0,134844	333,399	256,362
-15,00 %	48,62	N -> 113,142, m -> 0,134879	333,394	257,406
-10,00 %	51,48	N -> 113,143, m -> 0,134914	333,389	258,45
-5,00 %	54,34	N -> 113,145, m -> 0,134949	333,384	259,493
0	57,2	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00 %	60,06	N -> 113,147, m -> 0,135018	333,373	261,581
10,00 %	62,92	N -> 113,149, m -> 0,135053	333,368	262,624
15,00 %	65,78	N -> 113,15, m -> 0,135088	333,363	263,668
20,00 %	68,64	N -> 113,152, m -> 0,135123	333,358	264,712
25,00 %	71,5	N -> 113,153, m -> 0,135157	333,353	265,756
50,00 %	85,8	N -> 113,16, m -> 0,135331	333,326	270,975

Liite 6: Osittainen herkkyyshanalyysi ravinnehuuhtoumahaitalle

Yksityiset optimit ravinnehuuhtoumahaitan muuttuessa

salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	ravinnehuuhtoumahaitta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	3,4	N -> 123,25	396,033	313,154
-25,00 %	5,1	N -> 123,25	396,033	271,715
-20,00 %	5,44	N -> 123,25	396,033	263,427
-15,00 %	5,78	N -> 123,25	396,033	255,139
-10,00 %	6,12	N -> 123,25	396,033	246,851
-5,00 %	6,46	N -> 123,25	396,033	238,563
0	6,8	N -> 123,25	396,033	230,275
5,00 %	7,14	N -> 123,25	396,033	221,987
10,00 %	7,48	N -> 123,25	396,033	213,699
15,00 %	7,82	N -> 123,25	396,033	205,411
20,00 %	8,16	N -> 123,25	396,033	197,123
25,00 %	8,5	N -> 123,25	396,033	188,835
50,00 %	10,2	N -> 123,25	396,033	147,396
sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	ravinnehuuhtoumahaitta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	3,4	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	307,246
-25,00 %	5,1	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	282,871
-20,00 %	5,44	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	277,996
-15,00 %	5,78	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	273,121
-10,00 %	6,12	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	268,246
-5,00 %	6,46	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	263,371
0	6,8	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00 %	7,14	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	253,621
10,00 %	7,48	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	248,746
15,00 %	7,82	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	243,871
20,00 %	8,16	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	238,996
25,00 %	8,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	234,121
50,00 %	10,2	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	209,746

Yhteiskunnalliset optimit ravinnehuuhtoumahaitan muuttuessa

salaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	ravinnehuuhtoumahaitta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha)	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	3,4	N -> 111,144	393,751	315,8
-25,00 %	5,1	N -> 106,393	391,485	277,293
-20,00 %	5,44	N -> 105,515	390,973	269,696
-15,00 %	5,78	N -> 104,659	390,445	262,133
-10,00 %	6,12	N -> 103,823	389,9	254,601
-5,00 %	6,46	N -> 103,007	389,342	247,099
0	6,8	N -> 102,209	388,769	239,627
5,00 %	7,14	N -> 101,428	388,184	232,185
10,00 %	7,48	N -> 100,664	387,586	224,77
15,00 %	7,82	N -> 99,9154	386,977	217,383
20,00 %	8,16	N -> 99,1825	386,357	210,023
25,00 %	8,5	N -> 98,4642	385,726	202,688
50,00 %	10,2	N -> 95,0722	382,437	166,386
sarkaojitus				
Muutos alkuperäisestä arvosta	ravinnehuuhtoumahaitta (€/kg)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	3,4	N -> 117,651, m -> 0,131848	334,693	307,811
-25,00 %	5,1	N -> 115,322, m -> 0,133421	334,12	284,067
-20,00 %	5,44	N -> 114,875, m -> 0,133734	333,985	279,345
-15,00 %	5,78	N -> 114,434, m -> 0,134047	333,842	274,631
-10,00 %	6,12	N -> 113,999, m -> 0,13436	333,694	269,925
-5,00 %	6,46	N -> 113,57, m -> 0,134672	333,539	265,227
0	6,8	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00 %	7,14	N -> 112,728, m -> 0,135295	333,212	255,855
10,00 %	7,48	N -> 112,314, m -> 0,135607	333,039	251,181
15,00 %	7,82	N -> 111,906, m -> 0,135918	332,861	246,515
20,00 %	8,16	N -> 111,503, m -> 0,136229	332,677	241,856
25,00 %	8,5	N -> 111,104, m -> 0,136539	332,488	237,205
50,00 %	10,2	N -> 109,18, m -> 0,13809	331,465	214,061

Liite 7: Osittainen herkkyyshanalyysi keskimääräisen ojaleveyden muuttuessa

Yksityiset optimit keskimääräisen ojaleveyden muuttuessa

Ojaleveys				
Muutos alkuperäisestä arvosta	keskimääräinen ojaleveys pientareineen (m)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto (€/ha)	Yhteiskunnan hyvinvointi (€/ha)
-50,00 %	0,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	259,883
-25,00 %	0,75	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	259,072
-20,00 %	0,8	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,942
-15,00 %	0,85	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,821
-10,00 %	0,9	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,707
-5,00 %	0,95	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,598
0	1	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
5,00 %	1,05	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,398
10,00 %	1,1	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,305
15,00 %	1,15	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,216
20,00 %	1,2	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,131
25,00 %	1,25	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,049
50,00 %	1,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	257,684
100,00 %	2	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	257,108

Yhteiskunnalliset optimit keskimääräisen ojaleveyden muuttuessa

Ojaleveys				
Muutos alkuperäisestä arvosta	keskimääräinen ojaleveys pientareineen (m)	Lannoitustaso (kg/ha) ja sarkaojituksen intensiivisyys	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
-50,00 %	0,5	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	261,925
-25,00 %	0,75	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	261,113
-20,00 %	0,8	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,984
-15,00 %	0,85	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,862
-10,00 %	0,9	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,748
-5,00 %	0,95	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,64
0	1	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
5,00 %	1,05	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,439
10,00 %	1,1	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,346
15,00 %	1,15	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,257
20,00 %	1,2	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,172
25,00 %	1,25	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,09
50,00 %	1,5	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	259,725
100,00 %	2,0	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	259,149

Ojaleveyden muutoksen vaikutus peltomaisemamallin tulokseen

kun leveys = 0,5m	226,76
kun leveys = 2,0m	223,26

Liite 8: Osittainen herkkyysanalyysi sarkaojitetun pellon fosforihuuhtoumien osuuksille salaojitetun pellon ravinnehuuhtoumista

Yksityiset optimit sarkaojitetun pellon liukoisen fosforin huuhtouman muuttuessa suhteessa salaojitetun pellon liukoisen fosforin huuhtoumaan

liukoinen fosfori (% enemmän kuin salaojituksella)	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
115,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	238,26
99	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	242,307
82,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	246,354
66	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	250,402
49,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	254,449
33	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
16,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	262,543
0	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	266,59
-16,5	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	270,637

Yhteiskunnalliset optimit liukoisen fosforin huuhtouman muuttuessa suhteessa salaojitetun pellon liukoisen fosforin huuhtoumaan

liukoinen fosfori (% enemmän kuin salaojituksella)	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
115,5	N -> 113,064, m -> 0,136088	333,168	240,52
99	N -> 113,08, m -> 0,135867	333,212	244,521
82,5	N -> 113,097, m -> 0,135646	333,255	248,523
66	N -> 113,113, m -> 0,135425	333,298	252,527
49,5	N -> 113,13, m -> 0,135204	333,339	256,531
33	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
16,5	N -> 113,162, m -> 0,134763	333,417	264,544
0	N -> 113,179, m -> 0,134543	333,455	268,551
-16,5	N -> 113,195, m -> 0,134323	333,492	272,56

Yksityiset optimit partikkelifosforin huuhtouman muuttuessa suhteessa salaojitetun pellon partikkelifosforin huuhtoumaan

partikkelifosfori (% enemmän kuin salaojituksella)	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
95	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	246,919
76	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	249,813
57	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	252,708
38	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	255,602
19	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	258,496
0	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	261,39
-19	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	264,284

Yhteiskunnalliset optimit partikkelifosforin huuhtouman muuttuessa suhteessa salaojitetun pellon partikkelifosforin huuhtoumaan

partikkelifosfori (% enemmän kuin salaojituksella)	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
95	N -> 113,133, m -> 0,135611	333,271	249,071
76	N -> 113,136, m -> 0,135454	333,299	251,936
57	N -> 113,14, m -> 0,135297	333,326	254,803
38	N -> 113,143, m -> 0,13514	333,353	257,67
19	N -> 113,146, m -> 0,134984	333,379	260,537
0	N -> 113,149, m -> 0,134827	333,404	263,405
-19	N -> 113,152, m -> 0,13467	333,429	266,273

Liite 9: Herkkyysoanalyysi ilman ravinnehuuhtoumaeroja ja osittaisilla ravinnehuuhtoumaeroilla

Yksityiset optimit ilman huuhtoumaeroja

Ilman huuhtoumaeroja			
Sarkaojitus	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
Ohra	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	222,733
Vehnä	N -> 158,21, m -> 0,129221	323,201	188,363
Kaura	N -> 93,8874, m -> 0,127014	193,666	96,3184
Rypsi	N -> 168,967, m -> 0,129581	343,399	200,778
Pelkästään typen huuhtoumaerolla(- 50% salaojituksen verrattuna)			
sarkaojitus			
Ohra	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	269,484
Vehnä	N -> 158,21, m -> 0,129221	323,201	246,211
Kaura	N -> 93,8874, m -> 0,127014	193,666	135,56
Rypsi	N -> 168,967, m -> 0,129581	343,399	262,495
Pelkästään fosforin huuhtoumaerolla (liukoinen:+33% ja partikkeli:+19% salaojituksen verrattuna)			
sarkaojitus			
Ohra	N -> 122,853, m -> 0,127956	335,229	211,744
Vehnä	N -> 158,21, m -> 0,129221	323,201	177,324
Kaura	N -> 93,8874, m -> 0,127014	193,666	85,3731
Rypsi	N -> 168,967, m -> 0,129581	343,399	189,723

Yhteiskunnalliset optimit ilman huuhtoumaeroja

Ilman huuhtoumaeroja			
sarkaojitus	Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	Yksityinen voitto	Yhteiskunnan hyvinvointi
Ohra	N -> 105,759, m->0,137731	330,008	229,031
Vehnä	N -> 126,016, m -> 0,140278	313,124	201,905
Kaura	N -> 80,2687, m -> 0,137574	189,839	100,786
Rypsi	N -> 139,793, m -> 0,141088	332,774	213,657
		ka	186,34
Pelkästään typen huuhtoumaerolla(-50% salaojitukseen verrattuna)			
sarkaojitus			
Ohra	N -> 113,182, m -> 0,134387	333,479	271,421
Vehnä	N -> 139,198, m -> 0,136433	319,691	250,384
Kaura	N -> 86,272, m -> 0,134163	192,351	136,983
Rypsi	N -> 152,94, m -> 0,136984	339,981	266,294
		ka	231,25
Pelkästään fosforin huuhtoumaerolla (liukoinen:+33% ja partikkeli:+19% salaojitukseen verrattuna)			
sarkaojitus			
Ohra	N -> 105,735, m -> 0,138343	329,859	218,205
Vehnä	N -> 125,981, m -> 0,140896	312,946	191,074
Kaura	N -> 80,2428, m -> 0,138346	189,682	90,0059
Rypsi	N -> 139,76, m -> 0,141664	332,59	202,81
		ka	175,523725

Yhteiskunnalliset optimit ilman huuhtoumaeroja peltomaisemamallilla

Ilman huuhtoumaeroja	
Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	
N->105,7661, m->0,1379	
N->126,0270, m->0,1404	
N->80,2745, m->0,1378	
N->139,8037, m->0,1412	
	191,03
Pelkästään typen huuhtoumaerolla(-50% salaojitukseen verrattuna)	
Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	
N->113,1882, m->0,1345	
N->139,2076, m->0,1366	
N->86,2775, m->0,1344	
N->152,9491, m->0,1371	
	235,95
Pelkästään fosforin huuhtoumaerolla (liukoinen:+33% ja partikkeli:+19% salaojitukseen verrattuna)	
Lannoitus (kg/ha) ja sarkaojituksen osuus peltopinta-alasta	
N->105,7420 m->0,1385	
N->125,9920, m->0,1410	
N->80,2484, m->0,1385	
N->139,7706, m->0,1418	
	180,22

Liite 10: Tilastollisten tunnuslukujen laskentaan liittyvät kaavat

Tulosten jakauman kolmas momentti, eli sen vinous lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti.

$$S^3 = \left(\sum_{i=1}^{10000} (x_i - \bar{x})^3 \right) / \sigma^3$$

jossa x_i kuvaa tulosta ja \bar{x} tulosten keskiarvoa. σ on tulosten keskihajonta.

Tulosten jakauman neljäs momentti, eli sen huipukkuus lasketaan seuraavan kaavan mukaisesti.

$$S^4 = \left(\sum_{i=1}^{10000} (x_i - \bar{x})^4 \right) / \sigma^4$$

jossa x_i kuvaa tulosta ja \bar{x} tulosten keskiarvoa. σ on tulosten keskihajonta.