

Maatalouden fosforikuormituksen dynaamisesti optimaalinen hallinta

Antti Iho^{*)} ja Marita Laukkanen^{*)}

Tiivistelmä

Fosforilannoituksen järkevää tasoa on viime aikoina puitu niin akateemisessa kirjallisuudessa, ammattilehdissä kuin yleismediassakin. Vallitseva näkemys vaikuttaa olevan (katso mm. Valkama ym. 2009), että fosforilannoituksen taso on yhä liian korkea ja sitä voitaisiin laskea huomattavasti satojen (so. voittojen) siitä juuri kärsimättä. Lannoitustasojen alentamisen myötä vähennettäisiin myös fosforihuuhtoumia. Esimerkiksi Hilden ym (2007) esittävät, että 'fosforin käyttöä selittävät pääosin muut tekijät kuin taloudellisesti rationaalinen toiminta'.

Koska kasvien satovaste fosforin suhteen saadaan pääasiassa maan helppoliukoisen fosforin tasta, vuotuisen fosforilannoituksen taloudellisesti järkevä tasoa ei voida määritellä siitä irrallaan. Helppoliukoinen fosfori kertyy tai poistuu verkkaisesti lannoitteesta saadun ja sadon mukana poistuvan fosforin erotuksen ajamana. Näin ollen taloudellinen päätöksenteko tulee nähdä yli ajan kulkevana tehtävänä, jossa fosforilannoitus on ohjausmuuttuja ja maaperään kertynyt helppoliukoinen fosfori on ohjausmuuttujan avulla ajettava tilamuuttuja.

Tutkimuksessamme rakennetaan dynaaminen optimointimalli, joka huomioi maaperän kasveille käyttökelpoisen fosforivarannon tason, sen kehittymisdynamiikan, satotasot sekä liukoisen ja partikkelifosforin huuhtouman. Mallin avulla voidaan selvittää, mikä on yhteiskunnallisesti järkevä pitkän aikavälin fosforilannoitustaso sekä suojavyöhykkeiden leveys kaltevuudeltaan erilaisilla pelloilla. Malli ratkaisee parhaan mahdollisen vuotuisen fosforilannoituksen aikauran, kun lähdetään liikkeelle maaperäfosforin eri tasoista. Malli osoittaa, että fosforilannoitus ja maaperäfosforin taso ovat linkitetävissä yhden taloudellisen optimointitehtävän alle.

Tulokset osoittavat, että optimaalinen lannoitus vaihtelee voimakkaasti. Alhaisista fosforivarannon tasoista lähdettäessä lannoitus kannattaa pitää hyvin korkeana, jopa 70 kg/ha. Toisaalta selvästi pitkän aikavälin tason yläpuolella olevilla pelloilla optimaalinen lannoitetaso on lähellä nolaa. Tutkimuksessa myös osoitetaan, että korkeiden fosforivarantojen laskeminen on sekä yhteiskunnallisissa että viljelijän yksityisissä intresseissä. Tämä saattaa korostaa mm. neuvonnan roolia ohjauskeinona.

Asiasanat: dynaaminen ohjelmointi, fosforihuuhtouma, kasveille potentiaalisesti käyttökelpoinen maaperän helppoliukoinen fosfori, transitiofunktio, polkuanalyysi, täsmälannoitus

^{*)} *MTT taloustutkimus*

Luuhtnantintie 13

00410 Helsinki

email: antti.iho[at]mtt.fi

Johdanto

Maatalouden huuhtoumien katsotaan muodostavan merkittävän osan vesistöjen fosforikuormasta. Esimerkiksi Helcom (2004) arvioi peräti 57% Itämeren ihmisperäisestä fosforikuormituksesta olevan peräisin maataloudesta.

Fosforihuuhtouma voidaan jakaa karkeasti liukoiseen ja partikkelifosforiin. Liukoinen fosfori vaikuttaa täysimääräisesti vastaanottavien vesistöjen leville käyttökelpoisen fosforin pitoisuuteen. Peltovaluman liukoisen fosforin pitoisuuteen vaikuttaa ratkaisevasti maaperän helppoliukoisen fosforin taso. Toisaalta sama tekijä on myös kasvien fosforin suhteen saaman satovasteen takana. Näin ollen maaperään kertynyt kasveille potentiaalisesti käyttökelpoinen fosfori on lähteenä sekä yhteiskunnallisille hyödyille – sadolle – että yhteiskunnalliselle haitalle – liukoisen fosforin huuhtoumalle. Järkevän helppoliukoisen fosforitason määrittäminen edellyttää sekä taloudellisen, tulevaisuuden huomioivan päätöksenteon että maaperäfosforin hitaiden prosessien huomioimista.

Partikkelimuotoinen fosforihuuhtouma on puolestaan vahvasti linkittynyt maaperän eroosioherkkyyteen. Tämä herkkyys vaihtelee voimakkaasti eri peltolohkojen välillä. Näin ollen eroosiota torjuvien suojelutoimenpiteiden käyttöönotossa tulisi huomioida eroosioherkkyyden paikalliset erot. Partikkelifosforista vain osa muuntuu vesistöissä pitkänkään ajan kuluessa leville käyttökelpoiseen muotoon.

Tämän artikkelin tarkoituksena on analysoida fosforilannoituksen ja eroosiontorjuntatoimenpiteitä edustavien suojakaistojen pitkän aikavälin optimaalista tasoa. Artikkelissa rakennettavalla mallilla voidaan lisäksi tarkastella optimaalisen fosforinkäytön kerryttämistä tai köyhydyttämispolkuja, kun maaperän helppoliukoisen fosforin lähtötaso vaihtelee.

Tulosten mukaan optimaalinen fosforin käyttö vaihtelee rajusti riippuen maaperän fosforitilasta. Reilusti pitkän aikavälin optimaalisen fosforitason alla olevilla mailla vuotuinen lannoitustaso voi olla jopa 70 kg/ha. Reilusti pitkän ajan optimaalisen tasapainon yläpuolella olevilla pelloilla se on käytännössä nolla. Suojavyöhykkeiden käyttö vaihtelee mallin mukaan lähinnä eroosioherkkyyden mukaan, eikä helppoliukoisen fosforin taso juurikaan vaikuta niiden optimaalisiin leveyksiin.

Artikkeli on julkaistu englanninkielisenä MTT Discussion papers –sarjassa (Iho ja Laukkanen 2009). Tässä artikkelissa esitetään tiivistetysti mallin pää rakenne ja työn tärkeimmät tulokset.

Aineisto ja menetelmät

Tutkimusongelma ratkaistaan ensin analyttisesti ja tämän jälkeen optimiratkaisuja tarkastellaan numeerisesti sijoittamalla mallin yhtälöihin luonnontieteellisessä kirjallisuudessa raportoidut funktio- ja muuttujat kuvaamaan fosforin satovastetta, kertymistä maaperään ja huuhtoutumista pelloilta vesistöihin. Mallin ydin on kahden päätösmuuttujan (lannoitus ja suojavyöhykkeet) ja yhden tilamuuttujan (maaperän helppoliukoinen fosfori) dynaaminen ongelma:

$$\max_{x_t, b_t} \sum_{t=0}^{\infty} \left\{ \beta^t \left[\pi(s_t, x_t, b_t) \right] - D(L(s_t, b_t, \gamma)) \right\} \quad (1)$$

ehdolla $s_{t+1} = \Gamma(s_t, x_t)$, $s_0 = S_0$, $x_t \geq 0$, ja $0 \leq b_t \leq 1$, jossa β on diskonttokorosta (δ) johdettu diskonttotekijä: $\beta = \frac{1}{1+\delta}$; maaperän helppoliukoisen fosforin tasoa kuvaa (s) ja sen lähtötasoa

parametri (S_0). yhden kasvukauden vuotuista fosforilannoituksen määrää kuvaa (x) ja suojavyöhykkeen osuutta pellon pinta-alasta (b). Muuttuja (π) kuvaa yhden satokauden aikaisia rahallisia voittoja (tuotot – kulut), L saman ajanjakson fosforikuormitusta ja D tästä aiheutuvaa haittaa vastaanottavassa vesistöissä. Maaperän helppoliukoisen fosforin kehittymistä tältä periodilta seuraavalle kuvaa liikeyhtälö Γ . Se on funktio nykyisen periodin fosforitilasta ja nykyisen periodin fosforilannoitteen käytöstä. Myös satovaste määritellään näiden muuttujien kautta, ja tilayhtälön varsinainen ajava voima onkin fosforitase: lannoitteen mukana annetun ja sadon mukana poistuvan fosforin erotus.

Fosforihuuhtouma muodostuu liukoisen fosforin ja partikkelifosforin summasta. Jälkimmäistä painotetaan kertoimella, joka määrittelee partikkelifosforihuuhtouman vaikutuksen vastaanottavan vesistön leville käyttökelpoisen fosforin määrään.

Ongelman tasapainoratkaisun ensimmäisen kertaluvun ehdot löydetään muodostamalla ja ratkaisemalla tehtävään liittyvä Bellmanin yhtälö. Tehtävän (1) ensimmäisen kertaluvun ehdot voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\begin{aligned}\pi_x(s^*, x^*, b^*) + \beta\lambda^*\Gamma_x(s^*, x^*) &= 0 \\ \pi_b(s^*, x^*, b^*) - D_L(L(s^*, b^*, \gamma))L_b(s^*, b^*, \gamma) &= 0 \\ \lambda^* &= \pi_s^f(s^*, x^*, b^*) - D_L(L(s^*, b^*, \gamma))L_s(s^*, b^*, \gamma) + \beta\lambda^*\Gamma_s(s^*, x^*) \\ s^* &= \Gamma(s^*, x^*).\end{aligned}\tag{2}$$

Ylimmän rivin ehdon mukaan lannoitteenkäytön marginaalivaikutuksen tulee olla saman suuruinen kuin siitä seuraavalla periodilla koituvaa hyötyä. Tämä hyöty lasketaan STP:n varjohinnan (λ) ja lannoitteen STP:hen kohdistaman rajavaikutuksen tulona. STP:n varjohinta kuvaa sen marginaalisen muutoksen vaikutusta koko tarkasteluvälin (ääretön) diskontattuun tulovirtaan. Koska tämä hyöty koituu seuraavalla periodilla, se pitää diskontata. Toisen rivin mukaan suojavyöhykkeen staattinen rajahaitta on optimissa yhtä suuri kuin staattinen rajahyöty. Kolmas rivi määrittelee varjohinnan teknisesti ja neljäs takaa tasapainoratkaisun. Ehtojen (2) tarkempi käsittely löytyy mm. Iho (2008).

Ehtojen (2) määrittämän pitkän aikavälin ohjaus- ja tilamuuttujien tason saavuttaminen tapahtuu optimaalista polkua pitkin. Tämä polku riippuu maaperäfosforin lähtötasosta ja se määritellään approksimoimalla arvofunktiota kollokaatiomentelmää käyttäen. Ratkaisualgoritmina käytettiin CompEcon Toolbox -ohjelmistopakettia.¹ Polun määrittäminen lähtee optimipolitiikan määrittelemisestä. Optimipolitiikka määrittelee kullekin maaperäfosforin tasolle optimaaliset valintamuuttujien tasot eli lannoitteenkäytön ja suojavyöhykkeiden leveyden. Optimipolku simuloidaan tätä optimipolitiikkaa ja liikeyhtälöä käyttäen. Optimipolku on siis mistä tahansa maaperäfosforin lähtötasosta määritelty polku, joka lopulta johdattaa maaperäfosforin ehtojen (2) määräämälle pitkän aikavälin tasapainotasolle. Polkua ohjaava tekijä on vuotuinen lannoitteen käyttö, mutta sen varrella määritellään myös toinen valintamuuttuja eli suojavyöhykkeen leveys.

Empiirinen sovellus

Empiirinen sovellus tehdään kolmelle hehtaarin kokoiselle, neliön muotoiselle, edustavalle lohkolle. Lohkon jyrkkyys on joko 0,5%, 2% tai 7%, maalajina hietasavi ja viljelyskasvina ohra. Laskelmia varten mallin funktioille määritellään parametrisoidut vastineet kirjallisuudesta. Maaperän helppoliukoisen fosforin mittarina on ammoniumasetaattiuton tuottama STP-suure (Vuorinen ja Mäkitie 1955). Satovaste fosforin suhteen omaksutaan julkaisusta Myyrä ym. (2007):

$$Y(s, x) = 3367(1 - 0,74e^{-0,37s}) + (21,7 - 0,414s)\sqrt{x} + \frac{(17,01 - 0,18x)x}{s} + 5,86 \tag{3}$$

STP:n vuotuista muutosta kuvaava transitiofunktio määritellään julkaisussa Ekholm ym. (2005). On huomattava, että tämä transitiofunktio on tarkoitettu estimoimaan useamman vuoden muuttumattomina pysyvien fosforitaseiden aiheuttamaa STP:n muutosta ja sen käyttö polkuanalyysissä sisältää näin ollen virhelähteen. Mitä lähemmäs pitkän ajan tasapainoa tullaan, sitä pienemmäksi tämä virhe tulee:

$$\Gamma(s, x) = 0,9816s + (0,0032 + 0,00084s)\left[x - (0,000186\ln(s) + 0,003)Y(s, x)\right] \tag{4}$$

Yhtälön (4) hakasulkeissa oleva osa kuvaa vuotuista fosforitasetta. Jyvien mukana poistuvan fosforin pitoisuus riippuu STP:stä suluissa olevan yhtälön mukaan (parametrit estimoitu julkaisusta Saarela ym. 1995). Muut parametrit julkaisusta Ekholm ym. (2005).

Hehtaarikohtainen, vuotuinen fosforihuuhtouma (kg/ha) koostuu kahdesta komponentista, liukoisesta ja partikkelifosforista, joista jälkimmäinen vaikuttaa yhteismitallistettuun fosforihuuhtoumaan vain osin. Liukoisen fosforin huuhtouman määrittelee valuman liukoisen fosforin pitoisuus kertaa valuman keskimääräinen volyyymi (Uusitalo ja Jansson 2002; Ekholm ym. 2005) $L_{DP} = 0,27(0,0567s - 0,0405)$. Partikkelifosforin huuhtouma ehdollistetaan lohkon jyrkkyteen ja

¹ CompEcon Toolbox on Mirandan ja Facklerin kirjaan (2002) liittyvä taloustieteen ongelmiin soveltuvien Matlab-funktioiden kokoelma. Ladattavissa: <http://www4.ncsu.edu/~pfackler/compecon/toolbox.html>.

se saa muodon: $L_{pp} = 0,035\mu^2 + 0,12\mu + 0,37$. Parametrit on estimoitu Uusitalo ym (2007) tiedoista. Vakiotermit voidaan tulkita salaojissa kulkeutuvaksi partikkelifosforiksi. Se osa partikkelifosforista, joka lasketaan liukoisen fosforin kanssa yhteismitalliseksi, saadaan kertomalla L_{pp} kertoimella r , joka määräytyy STP:n tasosta ja vakiotermitä yhtälön $r = 0,0048s + 0,197$ mukaan (estimoitu Uusitalo ym 2003 tiedoista). Yhteismitallistettu liukoisen fosforin huuhtouma on näin ollen $L = L_{DP} + rL_{pp}$. Suojavyöhykkeiden huuhtoumaa vähentävä vaikutus tulee toisaalta siitä, että niiden alueelta ei katsota tahtuvan partikkelifosforin pintahuuhtoumaa. Toisaalta niiden oletetaan poistavan pintahuuhtoumasta partikkelifosforia yhtälön $R = b^{0.3}$ mukaan (Lankoski ym 2006). Näin ollen lopulliseksi fosforihuuhtoumaksi STP:n jyrkkyyden ja suojavyöhykkelevyden funktiona saadaan:

$$L = 0,27(0,0567s - 0,0405) + (0,0048s + 0,197)(1-b) \left[0,37 + (1-b^{0.3})(0,035\mu^2 + 0,12\mu) \right] \quad (5)$$

Haitan oletetaan olevan lineaarinen fosforihuuhtouman suhteen, eli yksi lisäyksikkö huuhtoumaa lisää koettua haittaa samalla tavoin riippumatta vallitsevasta huuhtouman tasosta. Rajahaitaksi muokataan Grenin ja Folmerin (2003) estimaatista 47€/kg. Ohran ja fosforilannoitteen hinnat (0,11€/kg ja 1,22 €/kg) ovat Myyrän ym (2007) julkaisusta, ja viljelyn muut kustannukset (113 €/ha) julkaisusta Helin ym (2006). Suojavyöhykkeen perustamis- ja hoitokustannukset ovat 96 €/ha, joten suojavyöhykettä kohti ne ovat $C = b96€$ (Palva 2003; Pentti ja Laaksonen 2005). Diskonttokoroksi valitaan 5%.

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Tulosten tarkastelu on luontevaa aloittaa pitkän aikavälin tasapainojen tarkastelusta. Taulukko 1 esittelee pitkän aikavälin optimaalisen STP-tason ja näitä vastaavat optimilannoitetasot sekä optimaaliset suojavyöhykkelevydet.

Taulukko 1. Yksityisesti ja yhteiskunnallisesti optimaaliset tasapainoratkaisut

	Lannoitus kg/ha	Vyöhy- ke m	STP mg/l	PP kuor- ma kg/ha	DP kuor- ma kg/ha	Biologisesti käyttökelpoisen P:n kuorma kg/ha/vuosi
Yhteiskunnallinen optimi						
Jyrkkyys 0,5%	24,4	0	6,1	0,44	0,31	0,41
Jyrkkyys 2%	24,4	0,06	6,1	0,71	0,31	0,47
Jyrkkyys 7%	24,1	0,60	6,0	2,35	0,30	0,83
Yksityinen optimi						
Jyrkkyys 0,5%	25,6	0	7,3	0,44	0,37	0,47
Jyrkkyys 2%	25,6	0	7,3	0,75	0,37	0,55
Jyrkkyys 7%	25,6	0	7,3	2,97	0,37	1,0

Pitkän aikavälin tasapainotuloksissa on neljä piirrettä, jotka kannattaa nostaa esiin. Ensinnäkin, sekä yksityisesti että yhteiskunnallisesti optimaalinen hehtaariohtainen fosforilannoitus näyttää varsin korkealta. Ne ovat mm huomattavasti korkeampia kuin Valkama ym (2009) tai Saarela ym (1995) suositellaan. Tämä johtuu siitä, että tässä mallissa taloudellisesti optimaalinen fosforilannoitteen käyttö määräytyy fosforin molempien roolien kautta: välittömän fosforin satovasteen, sekä STP:n ylläpidon. Kuten satovastefunktiosta (3) nähdään, välitön satovaste pienenee korkeammilla STP-tasoilla. Optimaalista lannoitusta ei voi kuitenkaan jaotella STP:tä ylläpitävään ja välitöntä kasvua tuottavaan osuuteen. Pelkkä STP:n ylläpitäminen 6,1 mg/l:ssa edellyttää noin 13,5 kg/ha vuotuista fosforiylijäämää (Ekholm ym 2005) ja sadon mukana poistuu 10,9 kg/ha. Satovastefunktiosta voidaan laskea lannoituksen ja STP:n osittaisderivaatat optimissa, mutta optimiratkaisussa näitä komponentteja ei voi erottaa toisistaan. Tämä alleviivaa fosforilannoituksen dynaamista luonnetta. Myös politiikkasuositusten tulee perustua dynaamiseen analyysiin.

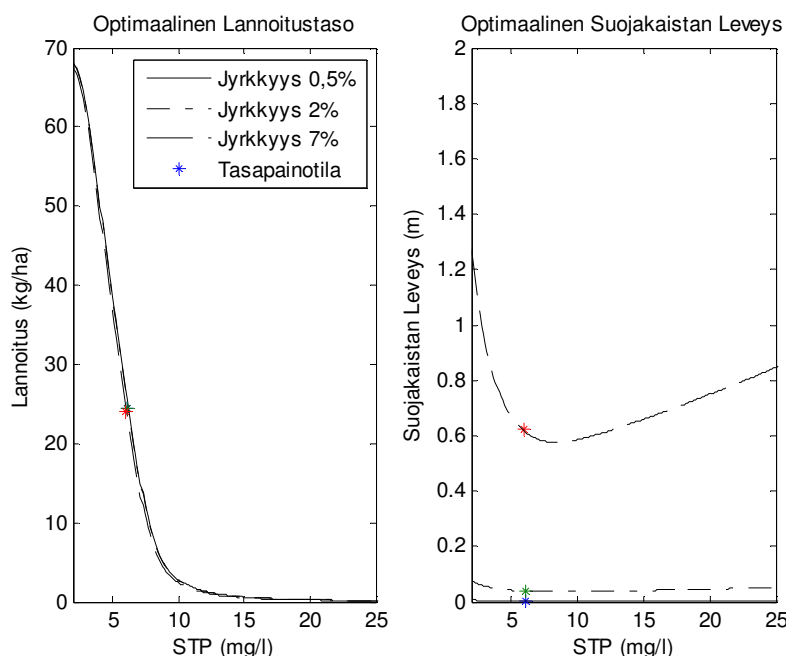
Toisekseen huomio kiinnittyy erittäin kapeisiin optimaalisiin suojavyöhykkelevyksiin, huolimatta siitä, että valittua puhdistusfunktiota voidaan pitää fosforin suhteen varsin optimistisena. Tämän tuloksen yhteydessä tulee huomioida, että suojavyöhykkeillä on muitakin ympäristöhyötyjä kuin fosforihuuhtouman hillitseminen. Tässä mallissa huomioidan vain hyödyt fosforivähennemästä. Mielekäs tulkinta tulokselle saattaisikin olla se, että fosforihuuhtouman vähennysvaikutusten tulisi vaikuttaa

optimaalisiin suojavyöhykeleveyksiin niitä kasvattavasti taulukossa 1 esitetyllä voimakkuudella. Kapeisiin vyöhykkeisiin vaikuttaa oleellisesti muiden tuotantokustannusten valinta, joka tässä tapauksessa on hyvin alhainen. Nuosevat muut kustannukset laskevat voittoja, mikä puolestaan tekee maan vaihteitoiskustannuksista alhaisempia ja näin ollen myös suojavyöhykkeistä. Tuloksissa ei tuliskaan kiinnittää niinkään huomiota vyöhykkeiden absoluuttisiin leveyksiin, vaan niiden eroavaisuuksiin eri lohkojen välillä ja vaihtelevilla STP-tasoilla. Kolmanneksi huomataan, että optimaaliset suojavyöhykeleveydet vaihtelevat radikaalisti eri peltolohkojen välillä. Mitä jyrkempi lohko, sitä leveämmät suojavyöhykkeet. Tämä johtuu siitä, että tasaisilla lohkoilla pintahuuhtouman rooli jää vähäiseksi, eivätkä pintahuuhtoumaan vaikuttavat toimenpiteet ole kannattavia. Kapeita suojavyöhykeleveyksiä selittää osaltaan myös se, että ne pidättävät huuhtoumasta vain partikkelifosforia, jonka merkitys biologisesti käyttökelpoisen fosforin määrässä on vähäinen.

Neljäs mielenkiintoinen seikka on optimaalisen fosforilannoituksen ja eroosioherkkyyden heikko yhteys, huolimatta siitä, että huuhtoumafunktiossa korkea STP-pitoisuus nostaa myös PP-huuhtouman biologista käyttökelpoisuutta.

Peilasimme yllä optimaalisia fosforilannoitustasoja vallitseviin keskimääräisiin lannoitetasoihin. Tällaiseen vertailuun sisältyy se ongelma, että vallitsevat STP-tasot vaihtelevat todellisuudessa eri lohkojen välillä. Millaiselta optimivalinnat näyttävät eri STP-tasoilla? Tätä esittää seuraava kuvaaja:

Kuva 1. Optimaaliset ohjausmuuttujien tasot kullakin tilamuuttujan tasolla

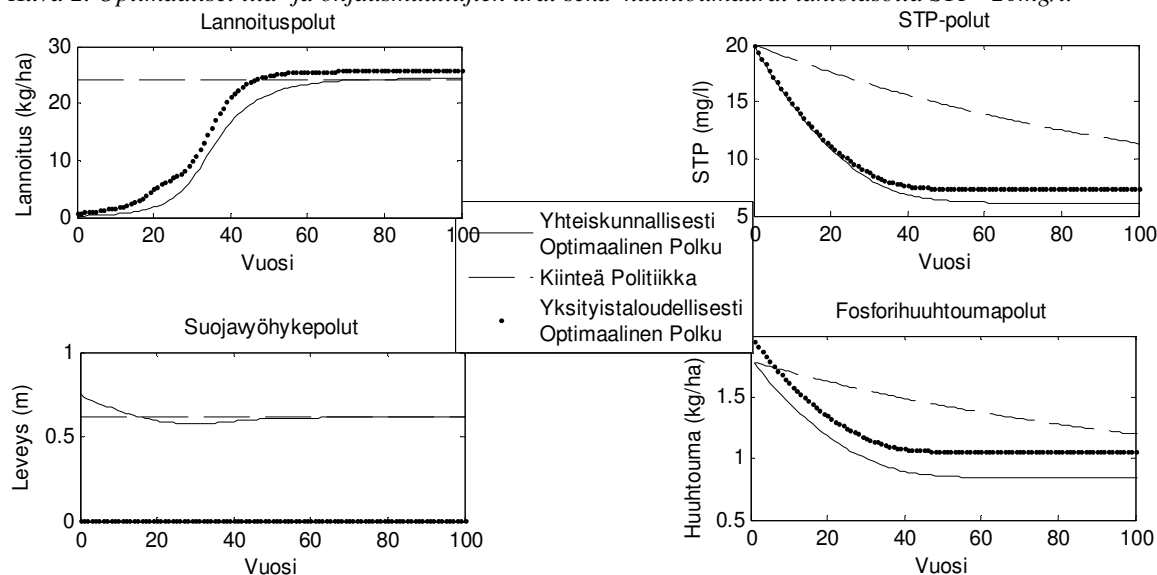


Kuvan 1 vasemmanpuoleinen kuvaaja esittää optimaalista fosforilannoitusta kullakin STP-tasolla. Oikeanpuoleinen kuvaaja esittää vastaavat tulokset suojavyöhykeleveyksille. Vasempaan kuvaajaan tiivistyy eräs tutkimuksen keskeisistä tuloksista. Taloudellisesti järkevä, pitkän aikavälin vaikutukset huomioiva fosforilannoitus vaihtelee voimakkaasti eri STP-tasoilla. Jo STP:n tasoilla 10 optimaalinen lannoitus painuu hyvin alhaiseksi. Kun STP ylittää 15 mg/l, se on käytännössä nollassa. Toisaalta fosforiköyhällä mailla fosforia tulee kerryttää voimakkaasti. Kuvaaja antaa tukea Suomessa käytössä olevalle ympäristöohjaukselle, jossa lannoitefosforin suurimmat sallitut määrät on linkitetty STP-tasoihin.

Oikeanpuoleinen kuvaaja vahvistaa jo tasapainotuloksissa esitettyä tulosta: optimaaliset suojavyöhykeleveydet vaihtelevat vain hyvin vähän STP-tason kasvaessa tai pienentyessä.

Seuraavaksi tarkastelemme simuloituja optimipolkuja, kun STP:n lähtötaso on korkea, 20 mg/l. Otamme tarkasteluun mukaan elementin, jonka avulla havainnollistamme yksityisen ja yhteiskunnallisen päätöksentekijän eroja. Kussakin kuvan 2 kuvaajassa on havainnollistettu jyrkälle lohkolle kolme eri polkua: yhteiskunnallisesti optimaalinen, yksityistaloudellisesti optimaalinen ja kolmantena kiinteä fosforilannoituksen ja suojavyöhykkeiden taso, joka on asetettu yhteiskunnallisesti optimaaliselle pitkän aikavälin tasapainotasolle.

Kuva 2. Optimaaliset tila- ja ohjausmuuttujien urat sekä huuhtoumaurat lähtötasolta STP=20mg/l.



Vasen yläkuvaaja esittää optimaalista fosforilannoituspolkua, kun liikkeelle lähdetään STP-tasosta 20 mg/l. Oikea yläkuva esittää vastaavaa STP-polkua, vasen alakuva suojavyöhykepolkua ja oikea alakuva fosforihuuhtoumapolkua.

Oikean yläkuvan taustalla oleva tulos on erityisen tärkeä: mikäli ollaan sekä yksityistaloudellisesti että yhteiskunnallisesti liian korkealla STP-tasolla, molempien päätöksentekijöiden fosforin köyhdyttämispolut ovat ensimmäisten kymmenien vuosien ajan lähes identtiset. Vastaavasti maaperäfosforiprosessien hitautta huomioimaton politiikka – vaikkakin pitkän aikavälin yhteiskunnallisessa optimissa – ylläpitää liian korkeita STP-lukuja vielä 100 vuoden jälkeenkin. Samoin fosforihuuhtoumat pysyvät jopa yksityistaloudellista optimia korkeammalla tasolla. Vastaavaa eroa ei juurikaan havaita optimaalisten suojavyöhykevevyksien kohdalla. Yksityisessä optimissa vyöhykkeet ovat nollassa, kiinteä politiikka ja yhteiskunnallinen optimipolku tuottavat suurin piirtein samanlaisen vyöhykepolun.

Johtopäätökset

Työn selkein politiikkaimplikaatio kiteytyvät kuviin 1 ja kuvan 2 oikeaan yläkuvaajaan. Ensinnäkin, taloudellisesti järkevät fosforilannoitepäätökset eivät ole irroitettavissa maaperään kertyneen, kasveille potentiaalisesti käyttökelpoisen fosforin tasosta. Sekä yhteiskunnallisesti että yksityistaloudellisesti optimaalinen taso vaihtelevat suuresti STP:n vaihdeltaessa. Toisekseen, yksityisesti ja yhteiskunnallisesti optimaaliset maaperän köyhdyttämispolut ovat lähes identtisiä niin kauan, kun fosforipitoisuudet ovat hälyttävän korkeita. Miksi havaitsemme liian korkeita helpoliukoisen fosforin maita? Korkeat peltojen fosforitilat saattavat johtua siitä, että viljelijä ei tunne fosforitilansa kehitystä. Mikäli hänellä olisi tästä hyvä tietämys, hänen oman etunsa mukaiset valinnat olisivat hyvin lähellä yhteiskunnallisesti optimaalisia. Näin ollen viljelijäneuvonta saattaisi olla tehokas keino yhteiskunnallisen optimin lähestymiseen.

Toisaalta elintuotantoalueilla liian korkeat fosforipitoisuudet ovat seurausta muusta kuin keino-lannoituspäätöksistä. Karjanlanta keskittyy tilakeskusten läheisille lohkoille. Lannanlevitysproblematiikka ei sovi sellaisenaan käyttämäämme viitekehukseen. Työn ilmeinen laajennus olisi sen liittämisen Schnitkeyn ja Mirandan (1993) dynaamiseen lannakäyttöviitekehukseen. Näiden kehikoiden yhdistelmä auttaisi luomaan politiikkoja, joilla voitaisiin pureutua fosforihuuhtoumien kannalta kaikkein kriittisimmille alueille.

Kirjallisuus

Ekholm, P., Turtola, E., Grönroos, J., Seuri, P & Ylivainio, K. 2005. "Phosphorus Loss from Different Farming Systems Estimated from Soil Surface Phosphorus Balance." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 110: 266-278.

- Gren, I-M. & Folmer, H.** 2003. "Cooperation with Respect to Cleaning of an International Water Body with Stochastic Environmental Damage: the Case of the Baltic Sea." *Ecological Economics* 47:33–42.
- Helcom** 2004. "The Fourth Baltic Sea Pollution Load Compilation." Helsinki: Baltic Sea Environment Proceedings 93.
- Helin, J., Laukkanen, M. & Koikkalainen, K.** 2006. "Abatement Costs for Agricultural Nitrogen and Phosphorus Loads: a Case Study of Crop Farming in South-Western Finland." *Agricultural and Food Science* 15(4): 351-374.
- Hildén, M., Huhtala, A., Koikkalainen, K., Ojanen, M., Grönroos, J., Helin, J., Isolahti, M., Kaljonen, M., Kangas, A., Känkänen, H., Puustinen, M., Salo, T., Turtola, E. & Uusitalo, R.** 2007. Ympäristöministeriön raportteja 15/2007.
- Iho, A.** 2008. Spatially Optimal Steady State Phosphorus Policies in Crop Production. University of Helsinki, Department of Economics and Management. Discussion Papers 25.
- Iho, A. & Laukkanen, M.** 2009. Dynamically Optimal Phosphorus Management and Agricultural Water Pollution Control. MTT Discussion Papers 4.
- 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(2): 193-221.
- Miranda, J.M. & Fackler, P.L.** 2002. *Applied Computational Economics and Finance*. Cambridge: MIT Press.
- Myyrä, S., Pietola, K. & Yli-Halla, M.** 2007. "Exploring Long-Term land Improvements under Land Tenure Insecurity." *Agricultural Systems* 92:63-75.
- Palva, R.** 2003. "Vegetative Filter Strip Maintenance." *Agricultural Bulletin* 4/2003 (555). Work Efficiency Institute, Helsinki, Finland (in Finnish).
- Pentti, S. & Laaksonen, K.** 2005. "Machinery Costs and Statistical Contractor Prices. *Agricultural Bulletin* 4/2005 (577)." Work Efficiency Institute, Helsinki, Finland (in Finnish).
- Saarela, I., Järvi, A., Hakkola, H. & Rinne, K.** 1995. "Field Trials on Fertilization 1977-1994." *Agrifood Research Finland Bulletin* No. 16. Agrifood Research Finland, Jokioinen, Finland (in Finnish).
- Schnitkey, G.D. & Miranda M.J.** 1993. "The Impact of Pollution Controls on Livestock-Crop Producers." *Journal of Agricultural and Resource Economics* 18(1): 25-36.
- Uusitalo, R. & Jansson, H.** 2002. "Dissolved Reactive Phosphorus in Runoff Assessed by Soil Extraction with an Acetate Buffer." *Agricultural and Food Science in Finland* 11: 343-353.
- Uusitalo, R., Turtola, E., Puustinen, M., Paasonen-Kivekäs, M. & Uusi-Kämppe, J.** 2003. "Contribution of Particulate Phosphorus to Runoff Phosphorus Bioavailability." *Journal of Environmental Quality* 32: 2007-2016.
- Uusitalo, R., Ekholm, P., Turtola, E., Pitkänen, H., Lehtonen, H., Granlund, K., Bäck, S., Puustinen, M., Räike, A., Lehtoranta, J., Rekolainen, S., Walls, M. & Kauppila, P.** 2007. "Agriculture and Baltic Sea Eutrophication." *Agriculture and Food Production* 96, Agrifood Research Finland. Jokioinen, Finland (in Finnish).
- Valkama, E., Uusitalo, R., Ylivainio, K., Virkajärvi, P., Turtola, E.** 2009. Phosphorus fertilization: a meta-analysis of 80 years of research in Finland. *Agriculture, ecosystems & environment* 130, 3-4: 75-85. doi:10.1016/j.agee.2008.12.004
- Vuorinen, J. & Mäkitie, O.** 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agrogeological Publications* 63.