

Seitsemän lihavaa vuotta – vieläkö nurmen fosforilannoituksesta voidaan tinkiä?

Arja Mustonen¹⁾, Perttu Virkajärvi²⁾, Maarit Hyrkäs²⁾, Raija Suomela³⁾ ja Raimo Kauppila⁴⁾

¹⁾ *Helsingin yliopisto, Maataloustieteiden laitos, arja.mustonen(at)proagria.fi*

²⁾ *MTT, Kotieläintuotannon tutkimus, Halolantie 31 A, 71750 Maaninka, etunimi.sukunimi(at)mtt.fi*

³⁾ *MTT, Kotieläintuotannon tutkimus, Tutkimusasemantie 15, 92400 Ruukki, etunimi.sukunimi(at)mtt.fi*

⁴⁾ *Yara Suomi Oy, etunimi.sukunimi(at)yara.com*

Tiivistelmä

Suomen maatalouden ympäristötukijärjestelmään on sitoutunut 90 % viljelijöistä ja siihen kuuluu 95 % peltoalasta. Järjestelmän yhtenä tavoitteena on vähentää maatalouden ravinnekuormitusta vesistöihin rajoittamalla peltoviljelyssä käytettävän fosforin (P) määrää. Ympäristötuen sallimia fosforilannoitusmääriä ja -tapoja tutkittiin nurmella kahdella koepaikalla vuosina 2003–2011. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää fosforin varastolannoituksen, vuosilannoituksen ja karjanlannan käytön vaikutukset viljelymaan fosforivaroihin sekä nurmisatoon. Aikaisemmissa tutkimuksissa on vesiliukoista fosforia (P_{H_2O}) todettu huuhtoutuvan nurmilta enemmän kuin viljoilta, eikä varastoon annettu fosfori ole riittänyt koko nurmikierron ajaksi.

Kokeessa oli seitsemän lannoitusta, joissa fosfori annettiin kahdessa peräkkäisessä nurmikierrossa varastolannoituksena tai vuosilannoituksena. Varastolannoitus annettiin joko nopea- tai hidaslukoisen mineraalilannoitteenä. Vuosilannoitus pintaan annettiin mineraalilannoitteenä tai joko mineraalilannoitteenä ja seuraavassa nurmikierrossa lietalantana. Naudanlietteenä annettavaa fosforia käytettiin kolmella koejäsenellä. Kontrollina käytettiin fosforitonta lannoitusta. Kokeessa oli seitsemän nurmivuotta ja kaksi kokoviljavuotta. Koe toteutettiin lohkoittain satunnaistettuna kokeena.

Annettu fosfori ei millään lannoituksella lisännyt nurmisatoa fosforittomaan lannoitukseen verrattuna, mutta annettu fosfori näkyi korkeampina 1. sadon fosforipitoisuuksina viimeisinä koevuosina. Kuivina vuosina sadon fosforipitoisuus oli alhainen lannoituksesta riippumatta. Pelkästään lietalantaa toiselle sadolle saaneen koejäsenen kokonaissato jäi muita alhaisemmaksi, mutta vastaavasti fosforipitoisuus oli muita korkeampi. Lietalantamäärä mitoitettiin tässä fosforitarpeen mukaan, eikä liukoisen typen vajausta korjattu väkilannoitteenä. Tämä johti selviin satomenetyksiin. Yleisesti korkeiden satojen ottama fosforimäärä oli kaikilla lannoituksilla selvästi suurempi kuin annettu. Alijäämäiset fosforitaseet johtivat kyntökerroksen fosforipitoisuuden laskuun, ja lasku oli selvempää Maaningalla kuin Ruukissa. Pintamaan fosforipitoisuus maassa vaihteli selvästi enemmän kuin kyntökerroksessa sekä vuosien että lannoitustapojen välillä. Tulokset osoittivat, että fosforin huuhtoutumisriskiä on kyetty vähentämään ympäristötuen mukaisilla lannoitussuosituksilla, sillä toisin kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, pintamaan fosfori ei millään lannoituksella jäänyt lähtötasoa korkeammaksi. Maltillinen nautakarjan lietteen käyttö nurmiviljelyssä ei näytä olevan varsinainen ongelma fosforin rikastumisen kannalta. Riittävä typpitäydennys lietalannan kanssa ja lietteen sijoittaminen peltoon voisivat lisätä sadon mukana poistuvan fosforin määrää ja tunnetusti lietteen sijoittaminen vähentää pintamaahan kertyvää fosforia.

Asiasanat: nurmi, fosfori, lannoitus, lietalanta, sato, pitoisuus, ravinteiden otto, ravinnetase

Johdanto

Maatalouden ympäristötukijärjestelmään on sitoutunut 90 % tiloista ja siihen kuuluu 95 % peltoalasta (MMM 2011). Tuen ehdot määrittävät tarkat ravinteiden käyttörajat viljelykasveille. Rajojen avulla maatalouden aiheuttamaa vesistökuormitusta erityisesti fosforin osalta on pyritty pienentämään. Naudanlietteen pintalevityksen nurmilla on havaittu johtavan savimaalla kohoavaan pintamaan helppoliukoiseen fosforipitoisuuteen ja vesiliukoisen fosforin huuhtoutumiin jo lyhytaikaisessa käytössä, sekä typpitarpeen pohjalta lasketuilla lietemäärillä selvästi ylijäämääseen fosforitaseeseen (Uusi-Kämpä ja Heinonen-Taski 2008). Pintalannoitus lietteenä tai mineraalilannoitteena lisää fosforin huuhtoutumista nurmilla myös hienolla hiekkamaalla kun koko nurmen typpitarve annettiin lietelantana (Turtola ja Kempainen 1998). Fosforin varastolannoituksella pystytään vähentämään pintalannoituksena annettavaa fosforia ja estämään pintamaan fosforipitoisuuden nousu ja haitalliset huuhtoutumat (Saarela ja Vuorinen 2010). Fosforilannoituksella on saatu satovastetta lähinnä vain välttävän tai sitä alemman viljavuusluokan mailla (Saarela ym. 2006, Valkama ym. 2009). Näissä kokeissa nurmikierrot ovat olleet lyhyitä eikä kokeissa ole käytetty lantaa. Fosforilannoituksen vähentämisen vaikutuksista viljellyillä nurmilla, joiden fosforitila on tyydyttävä tai joilla lannoituksessa on käytetty lantaa, ei pitkissä nurmikierroissa ole Suomessa aikaisemmin tutkittu.

Tutkimuksen päätavoite oli selvittää, voidaanko erilaisilla lannoitustavoilla pienentää fosforinhuuhtoutumisriskiä nurmenviljelyssä ilman että sadonmuodostus vaarantuu. Tiedetään, että perustamisvaiheessa superfosfaattina varastoon annettu fosfori ei riitä koko nurmikierrolle (Saarela ja Vuorinen 2010), mutta lannoitteen liukoisuutta hidastamalla tämä voisi olla mahdollista. Lisäksi haluttiin verrata myös karjanlantana annetun fosforin riittävyyttä nurmikierrossa erilaisilla levitystavoilla sekä karjanlannan sekoittamista muokkauskerrokseen tiheystylysti ns. lyhytkiertonurmessa. Kontrollikäsittelynä olivat ympäristötuen mukainen vuosittainen fosforilannoitus ja ilman fosforia viljelty koejäsen. Koska fosforin reaktiot maassa ovat hitaita, koeaineistona oli yhdeksän vuoden jakso. Kokeessa haluttiin tarkastella lannoituksen vaikutusta kuiva-ainesatoon, kasvuston P-pitoisuuteen, P-taseeseen ja maan P-tilan muutoksiin.

Aineisto ja menetelmät

MTT ja Yara Suomi Oy aloittivat eri fosforilannoitusvaihtoehtoja selvittävän yhteistutkimuksen vuonna 2003. Kokeet perustettiin vuonna 2003 lohkoittain satunnaistettuna kokeena, neljänä kerranteena, MTT Maaningalle ja MTT Ruukkiin. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan kokeen kahden ensimmäisen koejakson tuloksia vuoteen 2011 saakka. Kokeen kolmas koejakso jatkuu edelleen. Kokeessa oli seitsemän fosforilannoituskäsittelyä, jotka esitetään taulukossa 1.

Taulukko 1. Koejäsenten fosforilannoitus. NPK= moniravinteinen fosforipitoinen mineraalilannoite, NLL=naudan lietelanta.

Lannoitus	I jakso		II jakso	
	Kokovilja	Nurmi	Kokovilja	Nurmi
	v. 2003	v. 2004–2006	v.2007	v. 2008–2011
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
L1 Fosforiton	0 P	0 P	0 P	0 P
L2 Suositus P+pinta P	NPK 25 P	NPK 10 P	NPK 20 P	NPK 8 P
L3 Nopea varasto	Superfosf. 55 P	0 P	Superfosf. 52 P	0 P
L4 Hidas varasto 1	Hidasliuk. 55 P	0 P	Hidasliuk. 1 52 P	0 P
L5 Perusliete	NLL 1. v. tarve	0 P	NLL 40 tn ha ⁻¹	0 P
L6 Perusliete+pinta P	NLL 1. v. tarve	NPK 10 P	NLL 40 tn ha ⁻¹	NLL 20 tn ha ⁻¹
L7 Lyhytkierto/Hidas varasto 2	NLL 1. v. tarve v. 2003 ja 2005	0 P v. 2004 ja 2006	Hidasliuk. 2 44 P	1-3 vuosi 0 P, 4. vuosi NPK 8 P

Nurmi perustettiin timotei-nurminataseoksena (70:30, 25 kg ha⁻¹) kokoviljaan (ohra) vuonna 2003 ja uudelleen samoille ruuduille vuonna 2007. Fosforilannoitus annettiin pintalannoituksena, ja perustamisen yhteydessä annettu varastolannoitus mullattiin äestämällä. Typpeä annettiin 80 kg ha⁻¹

kokoviljalle ja 100 kg ha⁻¹ nurmisatoa kohden, paitsi lietekoejäsenille, jotka saivat keskimäärin 37 kg liukoista typpeä ha⁻¹ ja 64 kg kokonaistyppeä ha⁻¹ toiselle sadolle. Kaliumlannoitus perustui viljavuusanalyysiin. Nurmi korjattiin kahdesti kesässä.

Koeruuduista analysoitiin perustamisvuoden alussa sekä jokaisen satovuoden lopussa helppoliukoinen fosfori (P_{AC}; Vuorinen ja Mäkitie, 1955) ja vesiliukoinen fosfori (P_{H2O}; Saarela, 1992) pintakerroksesta (0–2 cm) ja kyntökerroksesta (0–20 cm). Uuttosuhde vesiliukoisen fosforin määrittämisessä oli 1:60. Maalajina oli molemmilla koepaikoilla multava karkea hieta. Koealueiden lähtötiedot esitetään taulukossa 2.

Satonäytteet otettiin ruuduittain ja niistä määritettiin kuiva-aine, D-arvo ja raakavalkuainen NIR-menetelmällä sekä P ICP-menetelmällä (Valio Oy). Kokoviljasta määritettiin D-arvo sellulaasiliukoisuuden ja tuhkan avulla (MTT). Vuosisadot laskettiin yhteen kumulatiiviseksi sadoksi ja lisäksi laskettiin kokonaisfosforin tase (P_{anto} - P_{otto}). Tulokset analysoitiin sekamallilla (SPSS ver. 20 Mixed model), jossa kiinteinä muuttujina olivat paikkakunta, lannoitus ja vuosi, sekä näiden kaikki yhdysvaikutukset. Satunnaisena muuttujana käytettiin kerrannetta kunkin koepaikka*vuosi -termin sisällä. Kumulatiivisen sadon mallissa vuosi-termi ei ollut mukana. Päävaikutusten parivertailu tehtiin fosforittoman ja suosituslannoituksen (L1 ja L2), nopean ja hitaan varastolannoituksen (L3 ja L4) sekä suosituslannoituksen ja perusliete-pintalannoituksen (L2 ja L6) kesken. Lyhytkierto-hidas varastolannoitus (L7) ei ollut mukana kaikissa analyyseissä, sillä sen ylimääräinen kokoviljasato vuonna 2005 ja lannoituskäsittelyn suuri muutos karjanlannasta hidasliukoiseen mineraalilannoitukseen vaikeutti vertailua muihin käsittelyihin ja vuosiin. Parivertailut tehtiin LSD-testillä. Yhdysvaikutuksissa neljän SE:n suuruinen ero katsottiin tilastollisesti merkitseväksi; toisin sanoen ero oli merkitsevä, kun 95 % luottamusvälit eivät leikanneet toisiaan.

Taulukko 2. Koealueiden fosforitila maassa ja happamuus kokeen alussa neljän kerranteen keskiarvona sekä maan orgaanisen aineksen määrä.

	Maaninka	Ruukki
Vesiliukoinen fosfori (P _{H2O}), mg kg ⁻¹ ka	17,8*	16,1
Helppoliukoinen fosfori (P _{AC}), mg l ⁻¹	19,5	14,8
Kokonaisfosfori, mg l ⁻¹	1840*	1280
pH	6,08	6,21
Orgaaninen aines, %	2,8	5,1

* syksy 2003 fosforiton-koejäsen

Tulokset ja tulosten tarkastelu

Sää ja nurmen sato

Tutkimusjakson vuodet olivat keskimäärin hyvin lämpimiä, Maaningalla keskimääräinen touko–syyskuun tehoisa lämpösumma oli 1298 ja Ruukissa 1166 °C vrk. Keskimääräinen touko–syyskuun sadesumma oli Maaningalla 317 ja Ruukissa 286 mm. Korkea lämpötila ja vähäinen sade yhdistyivät Maaningalla vuosina 2006, 2009 ja 2010. Ruukissa vuosi 2006 oli myös ennätyksellisen lämmin ja vähäsateinen, mutta heinäkuu ei ollut tavanomaista lämpimämpi. Vuonna 2008 koko kasvukausi oli runsassateinen ja koko koejakson viilein molemmilla koepaikoilla.

Satoeroa fosforittoman koejäsenen (L1) ja suositusten mukaan lannoitetun koejäsenen (L2) välillä ei ollut kummallakaan paikkakunnalla. Muillakaan fosforilannoituksilla ei saatu korkeampaa kuiva-ainesatoa kuin fosforittomalla lannoituksella. Perusliete-pintalannoitetun koejäsenen (L6) sato Maaningalla oli 11 500 kg ka ha⁻¹ ja Ruukissa 7400 kg ka ha⁻¹ suosituslannoitusta (L2) pienempi. Lyhytkierto-hidas varastolannoitus (L7) tuotti n. 3600 kg ka ha⁻¹ korkeamman sadon Ruukissa (koepaikka*lannoitus, p<0,021) kuin Maaningalla.

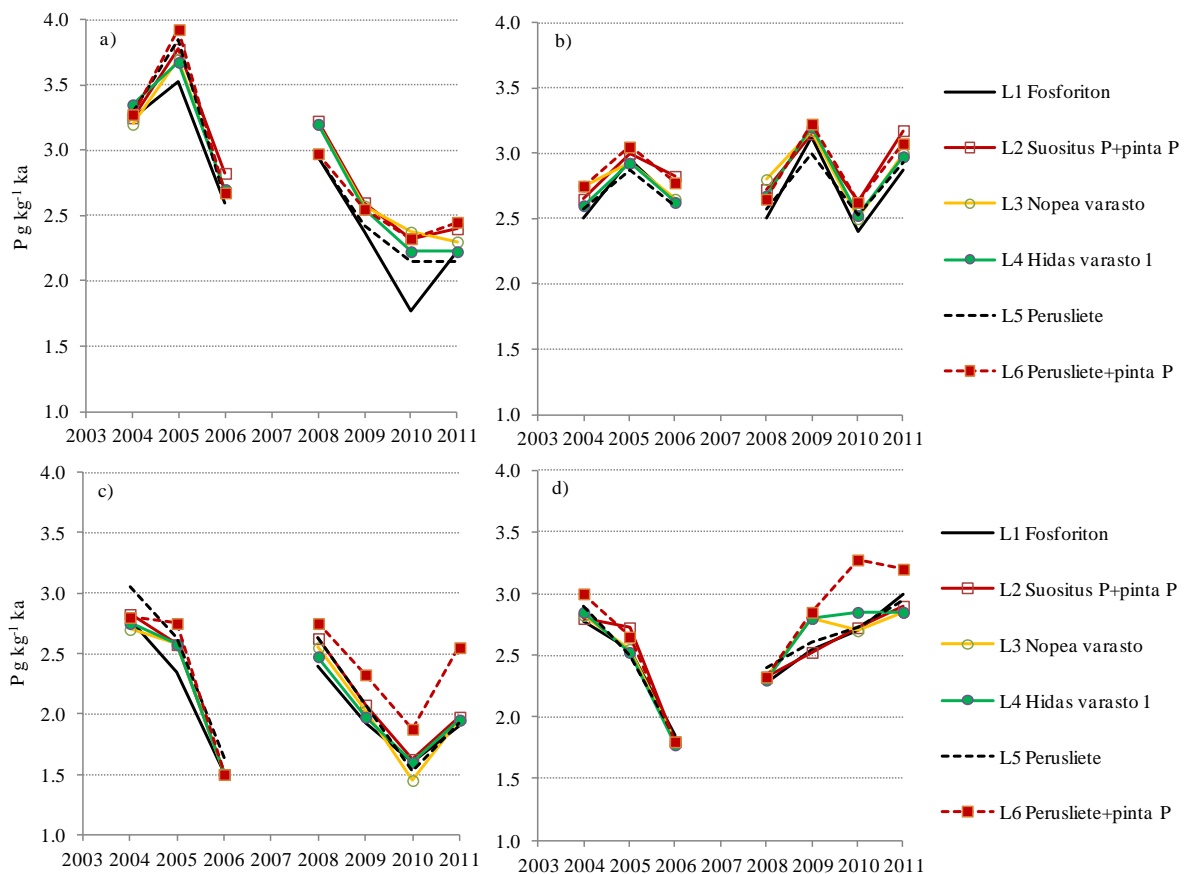
Fosforilannoituksen vaikutukset satoon eivät tässä kokeessa olleet merkitseviä. Tulos osoittaa, että viljavuusluokassa hyvä tai tyydyttävä fosforilannoituksesta voidaan tinkiä useita vuosia ilman satomenetyksiä, mikäli hyväksytään viljavuusfosforiluvun aleneminen. Tämä vahvistaa Saarelan ym. (1995) ja Valkaman ym. (2009) tuloksia. Pienin kumulatiivinen sato saatiin perusliete-pintalannoituksella (L6). Tällä lannoituksella sadot pienenevät jaksolla II selvästi. P-oton pieneminen tapahtui yksinomaan nurmen toisessa sadossa, kun lannoitus annettiin lietteenä ja syntynyttä typpivajausta ei täydennetty. Vähentyminen oli merkittävää, vaikka sadon P-pitoisuus oli

korkea. Aikaisemmissa tutkimuksissa pienet typpimäärät ovat vähentäneet nurmien fosforin ottoa (Bélanger ym. 2002) ja lisänneet taseen fosforyylijäätymää (Riley 2007). Kokoviljasadot olivat Ruukissa selvästi paremmat kuin Maaningalla, mikä selittää koepaikkojen välisen eron P-otossa suurimmalta osalta.

Ensimmäisen ja toisen nurmisadon fosforipitoisuudet

Ensimmäisen sadon fosforipitoisuudessa oli eroja sekä vuosi*koepaikka-yhdysvaikutuksessa ($p < 0,001$), että vuosi*lannoitus-yhdysvaikutuksessa ($p < 0,001$; Kuvat 1a ja 1b). Sen sijaan molemmilla koepaikoilla lannoitus vaikutti samalla tavalla (koepaikka*lannoitus, $p = \text{NS}$). Koepaikka*lannoitus*vuosi-yhdysvaikutus oli lähes merkitsevä ($p = 0,051$); suurimmat erot fosforittoman ja suosituslannoituksen välillä syntyivät Maaningalla v. 2010 ($L2-L1 = 0,55 \text{ g kg}^{-1} \text{ ka}$) ja Ruukissa vuonna 2011 ($L2-L1 = 0,30 \text{ g kg}^{-1} \text{ ka}$). Maaningalla fosforipitoisuudet olivat aluksi korkeammat, mutta jaksolla II vuodesta 2009 alkaen matalammat kuin Ruukissa.

Kuvista 1c ja 1d nähdään, että eri lannoitusten vaikutukset toisen sadon fosforipitoisuuteen erosivat eri vuosina ja eri koepaikoilla (koepaikka*lannoitus*vuosi, $p = 0,001$). Maaningalla pintalannoitettujen (L2 ja L6) keskinäinen ero kasvoi koko jakson II ajan, kun L6 alkoi saada lietettä pintalevityksenä. Viimeisenä vuonna L6 sadon fosforipitoisuus oli merkitsevästi ($0,58 \text{ g kg}^{-1} \text{ ka}$) suurempi kuin L2:n pitoisuus.



Kuva 1. Nurmen fosforipitoisuudet ($\text{g kg}^{-1} \text{ ka}$) eri fosforilannoituksilla. a) 1. sato Maaninka, b) 1. sato Ruukki, $\text{SE}=0,07$, c) 2. sato Maaninka ja d) 2. sato Ruukki, $\text{SE}=0,07$.

Ruukissa vuosina 2009 ja 2011 Maaninkaa korkeampi ruohon P-pitoisuus johtui ennen kaikkea nurmen nuoremmasta korjuuasteesta, sillä kehitysasteeltaan nuoren kasvuston fosforipitoisuus on vanhempaa kasvustoa korkeampia (Bélanger ja Ziadi 2008). Samasta syystä lietelannoitettujen koejäsenten sadon fosforipitoisuus oli toisessa niitossa muita koejäseniä korkeampi, sillä alhaisemmasta liukoisen typen määrästä johtuen kasvusto oli nuorempaa kuin muilla koejäsenillä.

Maaningalla toisen sadon P-pitoisuudet olivat alimmillaan kuivina vuosina 2006 ja 2010, joskin vuonna 2010 myös sadon vanhenemisellä oli vaikutuksensa (koejakson alhaisin D-arvo). Japp ja

Newman (1987) havaitsivat, että vedenpuute pysäyttää kasvin fosforin oton vaikka nurmen kasvu jatkuisikin ja maassa olisi riittävästi fosforia. Lisäksi kuivassa maassa epäorgaanisen fosforin diffuusio on hidas (Bhadoria ym. 1991). Alhaiset sadon fosforipitoisuudet liittyivätkin tässä kokeessa kuivuuteen, mutta vielä 1,5–1,7 g kg⁻¹ ka pitoisuudet eivät käytetyillä fosforimäärillä aiheuttaneet eroja kokonaissadoissa, vaikka pitoisuudet alittavat ns. kriittisen fosforipitoisuuden 2,0–2,6 g kg⁻¹ ka (Whitehead 2000). Sinänsä kuivia vuosia lukuun ottamatta havaitut fosforipitoisuudet eivät ole kovin alhaisia verrattuna rehutaulukoiden antamaan vaihteluväliin (2,5–3,5 g kg⁻¹ ka; MTT 2006).

Fosforilannoituksen ja sadon vaikutus fosforitaseeseen

Jatkuvasti keskimäärin 10–21 kg ha⁻¹ alijäämäiset taseet nurmivuosina johtivat suureen kumulatiiviseen fosforialijäämään kaikilla lannoituksilla (Taulukko 3). Fosforittoman lannoituksen (L1) alijäämä oli huomattava. Annettu fosforilannoitus karkeasti puolitti alijäämäisen taseen lukuun ottamatta peruslietelannoitusta (L5), jossa karjanlannan mukana tuleva fosforimäärä on vain noin neljännos muiden lannoitusten fosforimäärästä. Ruukissa lyhytkierto-hidas varasto 2 (L7) neljännes vuoden 8 kg ha⁻¹ fosforin pintalannoitus jäi pois. Ruukin fosforitase on tämän, mutta toisaalta pienemmän sadossa otetun fosforimäärän vuoksi noin 4 kg ha⁻¹ Maaningan tasetta alijäämäisempi.

Taulukko 3. Vuosien 2003–2011 yhteenlaskettu kuiva-ainesato, P-anto, P-otto ja fosforitase (P-anto-P-otto) eri fosforilannoituksilla Maaningalla ja Ruukissa. Kuiva-ainesadon keskiarvon keskivirhe 1,17 tn.

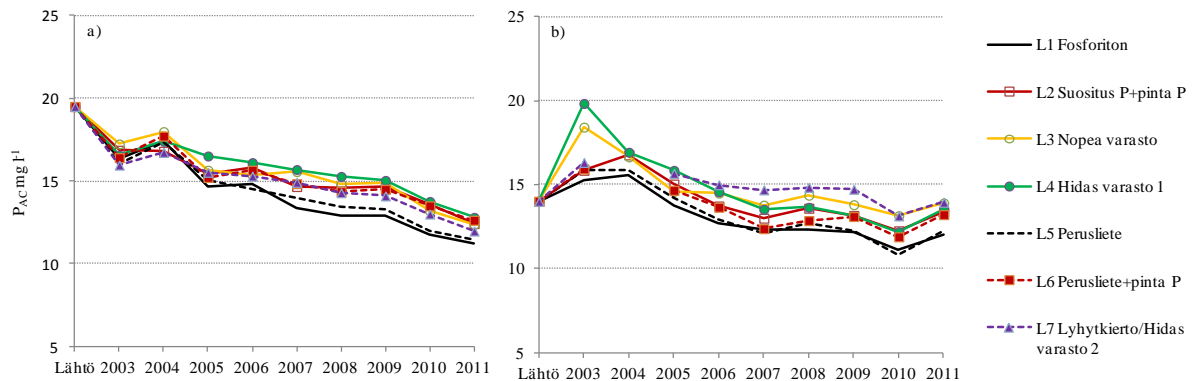
	Maaninka				Ruukki			
	Ka-sato tn ka ha ⁻¹	P-anto kg ha ⁻¹	P-otto kg ha ⁻¹	Tase kg ha ⁻¹	Ka-sato tn ka ha ⁻¹	P-anto kg ha ⁻¹	P-otto kg ha ⁻¹	Tase kg ha ⁻¹
L1 Fosforiton	76.5	0	186	-186	76.4	0	202	-202
L2 Suositus P+pinta P	78.6	107	201	-94	76.0	107	205	-98
L3 Nopea varasto	76.0	107	190	-83	78.0	107	209	-102
L4 Hidas varasto 1	79.3	107	201	-94	77.3	107	208	-101
L5 Perusliete	75.7	18	191	-174	76.3	17	202	-185
L6 Perusliete+pinta P	67.1	86	182	-96	68.6	90	191	-101
L7 Lyhytkierto/Hidas varasto 2	72.2	78	181	-103	75.8	74	208	-134

Helppoliukoisen fosforin (P_{AC}) pitoisuus kyntökerroksessa

Lannoitusvaikutus kyntökerroksen (0–20 cm) P_{AC}:n oli erilainen eri vuosina Maaningalla ja Ruukissa (koepaikka*lannoitus*vuosi, p=0,004). Koko tarkastelujakson aikana kyntökerroksen P_{AC} laski Maaningalla lähtötasosta 19, 5 mg l⁻¹ yhden viljavuusluokan verran viljavuusluokasta hyvä luokkaan tyydyttävä (<17 mg l⁻¹) kaikilla lannoituksilla (Kuva 2a). Ruukissa P_{AC}:n lähtötaso (14,0 mg l⁻¹) sekä lasku olivat Maaninkaa pienemmät ja viljavuus pysyi koko ajan luokassa tyydyttävä (9–17 mg l⁻¹; Kuva 2b). Molemmilla paikkakunnilla P_{AC} väheni eniten fosforittomalla lannoituksella (L1). Maaningalla fosforittoman lannoituksen fosforipitoisuus oli kokeen lopussa 1,2 mg l⁻¹ ja Ruukissa 1,4 mg l⁻¹ alempi kuin suosituslannoituksella. Perusliete lannoitus (L5) myötäili fosforittoman lannoituksen (L1) P_{AC} pitoisuutta ja muut lannoitetut myötäilivät suosituslannoituksen (L2) P_{AC} pitoisuutta. Mikään lannoitus ei ylläpitänyt kyntökerroksen P_{AC} pitoisuutta ennallaan. Luottamusvälitarkastelussa fosforittoman (L1) ja suosituslannoituksen (L2) välinen ero ei kummallakaan paikkakunnalla ollut merkitsevä. Ruukin koepaikan havainnot vuodelta 2004 koejäseniltä L6 ja L7 puuttuvat. Kyntökerroksen helppoliukoisen (P_{AC}) fosforin määrät vähenivät molemmilla paikkakunnilla fosforitaseen alijäämän suuruuden mukaisessa järjestyksessä. Keskimääräisen kyntökerroksen P_{AC} laskun vuoden 2003 syksystä alkaen oli 0,43 mg v⁻¹ ja Valkaman ym. (2009) esittämä P_{AC} 10 mg l⁻¹ kynnyksarvo, jossa fosforilannoituksella saadaan satovaste, saavutettaisiin noin viidessätoista vuodessa ja fosforittomalla lannoituksella jo mahdollisesti hieman aikaisemmin. Maaningalla tarvittiin keskimäärin 26 kg:n ja Ruukissa 36 kg:n tasealijäämä, jotta P_{AC} pitoisuus kyntökerroksessa pieneni 1 mg l⁻¹. Maaningalla tasealijäämä vastaa Saarelan ym. (1995) hiesu- ja hietamaiden tulosta (10 - 23 kg/ha) kun Ruukissa tasealijäämä on lähempänä Yli-Hallan (1989) savimaiden tulosta (32 - 46 kg/ha).

Lannan fosfori nosti maan fosforilukuja eri tavalla Ruukissa kuin Maaningalla. Ruukissa lyhytkierto-hidas varastolannoituksen (L7) P_{AC} pitoisuus oli lannan lisäämisen jälkeen merkitsevästi

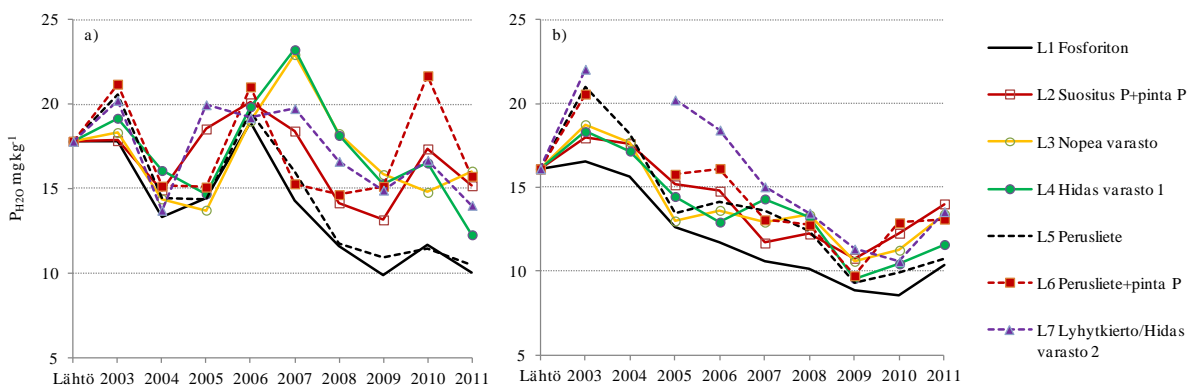
korkeampi kuin Maaningalla. Koepaikkojen erilaisella orgaanisen aineen määrällä voi olla yhteys erilaiseen fosforin pidättymiseen (esim. Michaud ja Laverdière 2004).



Kuva 2. Helppoliukoisen fosforin (P_{AC}) pitoisuus (mg l^{-1}) kyntökerroksessa (0–20 cm) eri fosforilannoituksilla a) Maaningalla ja b) Ruukissa. $SE=0,6$.

Vesiliukoisen fosforin (P_{H_2O}) pitoisuudet pintamaassa ja kyntökerroksessa

Huuhoutumisriskiä kuvaavan maan pintakerroksen P_{H_2O} pitoisuudet vaihtelivat vuosittain eri koepaikoilla ja eri lannoituksilla suuresti (koepaikka*lannoitus*vuosi, $p<0,001$). Fosforittoman lannoituksen (L1), hitaan varastolannoituksen (L4) ja perusliete-pintalannoituksen (L6) P_{H_2O} pitoisuuden väheneminen syksystä 2003 syksyyn 2011 oli merkitsevä ($5,5\text{--}7,7 \text{ mg kg}^{-1}$) (kuva 3). Lämpimät ja kuivat kesät 2006 ja 2010 näkyivät Maaningan tuloksissa, sillä vesiliukoisen fosforin pitoisuus lisääntyi lähes kaikilla lannoituksilla, myös fosforittomalla lannoituksella (kuva 3a). Vuoden 2006 pitoisuuden nousu edellisvuoteen verrattuna oli varastolannoitetuilla (L3 ja L4) merkitsevä ($5,3$ ja $5,2 \text{ mg kg}^{-1}$), samoin kuin perusliete-pintalannoitetun (L6) P_{H_2O} pitoisuuden nousu ($5,9 \text{ mg kg}^{-1}$). Vuonna 2010 vain perusliete-pintalannoitetun (L2) P_{H_2O} pitoisuuden nousu edellisvuoteen oli merkitsevä ($6,5 \text{ mg kg}^{-1}$). Vuonna 2007 varastolannoitukset (L3, L4 ja L7) näkyivät nousuina P_{H_2O} pitoisuudessa. Lyhytkierto-hidas varasto 2 lannoituksella (L7) P_{H_2O} kasvu näkyi myös vuonna 2005, kun kiertoon kuulunut kokovilja lannoitettiin lietteellä. Kokoviljavuonna 2007 fosforittomalla lannoituksella (L1) ja perusliete-pintalannoitetuilla (L6) P_{H_2O} laski edellisestä vuodesta merkitsevästi ($4,6$ ja $5,7 \text{ mg kg}^{-1}$). Suosituslannoituksen (L2) vuosien 2010 ja 2011 P_{H_2O} pitoisuudet olivat merkitsevästi ($4,1$ ja $5,8 \text{ mg kg}^{-1}$) suuremmat kuin fosforittoman lannoituksen (L1) ja perusliete-pintalannoitettu myötäili suosituslannoitusta.



Kuva 3. Vesiliukoisen fosforin (P_{H_2O}) pitoisuus (mg kg^{-1}) pintamaassa (0–2 cm) eri lannoituksilla a) Maaningalla ja b) Ruukissa. $SE=1,1$.

Ruukissa vuosierot eri lannoituksien välillä olivat selvästi pienempiä kuin Maaningalla, mutta lasku kokeen alusta kokeen loppuun oli selvä. Fosforittoman lannoituksen (L1), varastolannoitusten (L3 ja L4) sekä perusliete-pintalannoituksen (L6) lasku syksyn 2003 P_{H_2O} pitoisuudesta syksyn 2011 pitoisuuteen oli merkitsevä ($5,3\text{--}7,5 \text{ mg kg}^{-1}$). Lyhytkierto/hidas varastolannoitus (L7) erottui muita korkeammilla vesiliukoisen fosforin pitoisuuksilla. Lyhytkiertonurmen (L7) kokoviljavuonna 2005

vesiliukaisen fosforin pitoisuus ja oli $5,1 \text{ mg kg}^{-1}$ suurempi kuin suosituslannoituksen (L2). Lannoitusten L6 ja L7 tulokset vuodelta 2004 puuttuvat.

Sekä pintamaan että kyntökerroksen P_{H_2O} pitoisuuksissa tapahtui samansuuntaisia muutoksia kuin P_{AC} :n osalta, mutta muutokset pintamaassa oli äärevämpiä. Pintakerroksessa jyrkät nousut P_{H_2O} määrässä osuvat Maaningalla vuosille 2006 ja 2007, jolloin myös P_{AC} pitoisuudet kasvoivat. Peltovuori ja Soinne (2005) havaitsivat, että lämpimästä ja kuivaneesta maasta vapautuu huomattava määrä vesiliukoista fosforia ja samalla fosforin sorptiokapasiteetti kasvaa. Kuivumisen seurauksena myös fosforipartikkelikoko muuttuu (Soinne ym. 2010). Muutokset korostuvat pintamaan ohuessa maakerroksessa. Lisäksi kasvin P-oton ylittävillä kertafosforimäärillä (esim. kertalannoitetut koejäsenet L3, L4 ja L7 vuonna 2007) näytti olevan pintamaan P_{H_2O} pitoisuutta lisäävä vaikutus Maaningalla. Maltillinen nautakarjan lietteen käyttö (nurmivuosina 20 - 24 tn/ha pintalevityksenä toiselle sadolle, L6) ei tässä kokeessa nostanut radikaalisti maan pintakerroksen P_{H_2O} pitoisuutta lukuunottamatta kuivaa vuotta 2010 Maaningalla. Suuremmilla vuotuisilla lietteen levitysmäärillä tilanne voi olla toinen, jos lietteen liukoista tyyppiä ei täydennetä sadon ja fosforipoistuman maksimoimiseksi. Alhaisissa ja keskimääräisissä viljavuusluokissa ($4,5\text{--}9,1 \text{ mg } P_{AC} \text{ l}^{-1}$) satotason ylläpitäminen edellyttää suuria, keskimäärin 35 kg ha^{-1} vuosittaisen fosforilannoituksen käyttöä (Saarela ym. 2006). Näin suurien fosforimäärien käytön pintalannoituksessa on todettu nostavan pintamaan P_{AC} määrää, nostavan fosforin kyllästymisastetta pintamaassa ja lisäävän pintavaluman fosforia selvästi, vaikka maan muokkauskerroksen P_{AC} määrä olisikin alhainen (Turtola ja Yli-Halla 1999). Varastolannoituksen antaminen sijoittamalla pienentää huuhtoutumisriskiä. Toisaalta, maan viljavuutta tyydyttävässä viljavuusluokassa ylläpitävän fosforimäärän antaminen pintalannoituksena voi olla järkevä vaihtoehto, koska kerralla annettava määrä pysyy kohtuullisena.

Yhteenveto ja johtopäätökset

Hyvän ja tyydyttävän fosforitilan mailla eri fosforilannoitusvaihtoehdot eivät vaikuttaneet nurmien kuiva-ainesatoon. Satovaikutus syntyi vain kun nurmi ei saanut riittävästi tyyppiä naudon liettelannasta. Koska tässä kokeessa ei saatu lainkaan satovastetta fosforilannoitukselle, jäivät hidashiukoisen tai superfosfaattina annetun varastolannoituksen erot hyvin pieniksi. Annettu fosfori näkyi korkeampina I. sadon fosforipitoisuuksina viimeisinä koevuosina. Kuivuuden ja korjuuhetken vaikutus nurmen fosforipitoisuuteen oli selvästi suurempi kuin lannoitusvaihtoehtojen väliset erot. Nurmen kasvun kannalta kriittistä fosforipitoisuusrajaa ei voida tämän tutkimuksen perustella antaa. Hyvän ja tyydyttävän fosforitilan mailla voidaan siis viljellä nurmea useita vuosia ilman fosforilannoitusta, kun tiedostetaan maan viljavuusfosforiluvun alentuminen. Viljavuusluvun alentuminen saattaa vaikuttaa tulevan sadon määrään, eikä tiedetä korvaako alemman luokan suurempi P-lannoitus sadonmenetyksiä.

Viljelyn fosforitase oli voimakkaan alijäämäinen kaikilla lannoitusvaihtoehdoilla, mikä alensi helppoliukaisen fosforin pitoisuutta kyntökerroksessa. Lasku oli selvempi Maaningalla, jossa lähtötilanne oli korkeampi. Tässä kokeessa maan fosforiluokan laskun johdosta ympäristötuen mukaista lannoitusta voidaan jatkossa nostaa, minkä vaikutus maan fosforitilaan tullaan näkemään tulevana vuosina. Pintamaan vesiliukaisen fosforin pitoisuus vaihteli huomattavan paljon niin vuosien kuin koejäsenten välillä, mutta keskimäärin pitoisuus laski kokeen aikana. Fosforilannoitteen multaaminen kerralla nurmen perustamisen yhteydessä sekä superfosfaattina tai hidashiukoisena lannoitteena aiheutti Maaningalla hetkellistä vesiliukaisen fosforin pitoisuuden nousua, mikä lisää huuhtoutumisriskiä. Karjanlannan pintalevitys lisäsi hieman maan pintakerroksen vesiliukaisen fosforin pitoisuutta, mutta ero suositusten mukaisen mineraalilannoituksen oli pieni.

Tulokset osoittivat, että fosforin huuhtoutumisriskiä on kyetty vähentämään ympäristötuen mukaisilla lannoitussuosituksilla, sillä toisin kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, pintamaan fosfori ei millään lannoituksella jäänyt lähtötasoa korkeammaksi. Maltillinen nautakarjan lietteen käyttö nurmiviljelyssä ei näytä olevan varsinainen ongelma fosforin rikastumisen kannalta. Suuremmilla vuotuisilla lietteen levitysmäärillä tilanne voi olla toinen, etenkin ellei lietteen liukoista tyyppiä täydennetä. Riittävä typpitäydennys liettelannan kanssa ja lietteen sijoittaminen peltoon voisivat lisätä sadon mukana poistuvan fosforin määrää ja tunnetusti lietteen sijoittaminen vähentää pintamaahan kertyvää fosforia.

Kirjallisuus

- Bhadoria, P. B. K., Kaselowsky, J., Claassen, N. & Jungk, A.**, 1991 Phosphate diffusion coefficients in soil as affected by bulk density and water content. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 154: 53–57.
- Bélanger, G., Brégar, A. & Michaud, R.**, 2002. Phosphorous uptake and concentration of timothy genotypes under varying N applications. *Crop science* 42: 2044–2048.
- Bélanger, G. & Ziadi, N.** 2008. Phosphorus and nitrogen relationships during spring growth of an aging timothy sward. *Agronomy Journal* 100: 1757–1762.
- Japp, P. A. & Newman, E.I.**, 1987. Phosphorus uptake from soil by *lolium perenne* during and after severe drought. *Journal of Applied Ecology* 24: 979–990.
- Michaude, A. R. & Laverdière, M. R.**, 2004. Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability. *Canadian journal of soil science* 84: 295–305.
- Peltovuori, T. & Soinne, H.**, 2005. Phosphorus solubility and sorption in frozen, air-dried and field-moist soil. *European Journal of Soil Science* 56: 821–826.
- Riley, H.** 2007. Long-term fertilizer trials on loam soil at Møystad south-eastern Norway: Crop yields, nutrient balances and soil chemical analyses from 1983 to 2003. *Acta Agriculturae Scandinavica; Soil and Plant Science*. 57:2 140-154.
- Saarela, I., Huhta, H. & Virkajärvi, P.** 2006. Effects of repeated phosphorus fertilisation on field crops in Finland 2. Sufficient phosphorus application rates on silty and sandy soils. *Agricultural and Food Science* 15: 423–443.
- Saarela, I.** 1992. A simple diffusion test for soil phosphorus availability. *Plant and Soil* 147: 115–126.
- Saarela, I., Järvi, A., Hakkola, H. ja Rinne, K.**, 1995. Fosforilannoituksen porraskokeet 1977–1994. Vuosittain annetun fosforimäärän vaikutus maan viljavuuteen ja peltokasien satoon monivuotisissa kenttäkokeissa. Maatalouden tutkimuskeskus tiedote 16/95. Jokioinen: MTT. 94 s.
- Saarela, I. & Vuorinen, M.**, 2010. Stratification of soil phosphorus, pH, and macro-cations under intensively cropped grass ley. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 86: 367–381.
- Soinne, H., Rätty, M. & Hartikainen, H.** 2010. Effect of air-drying on phosphorus fractions in clay soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173: 332–336.
- Turtola, E. & Kemppainen, E.**, 1998. Nitrogen and phosphorus losses in surface runoff and drainage water after application of slurry and mineral fertilizer to perennial grass ley. *Agricultural and Food Science in Finland* 7:569–581.
- Turtola, E. & Yli-Halla, M.** 1999. Fate of phosphorus applied in slurry and mineral fertilizer: accumulation in soil and release into surface runoff water. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55:165–174.
- Uusi-Kämpä, J. & Heinonen-Tanski, H.**, 2008. Evaluating slurry broadcasting and injection to ley for phosphorus losses and fecal microorganisms in surface runoff. *Journal of environmental quality* 37: 2339–2350.
- 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 and Environment* 130: 75–85.
- Vuorinen, J. & Mäkitie, O.**, 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agrogeological Publications* 63. 44 s
- Whitehead, D.C.**, 2000. *Nutrient Elements in Grassland: Soil–Plant–Animal Relationships*. Cambridge, UK: Cabi Publishing 369 s.
- Yli-Halla, M.** 1989. Effect of different rates of P fertilization on the yield and P status of the soil in two long-term field experiments. *Journal of Agricultural Science in Finland* 61: 361–370.