

# Maan viljavuusfosforipitoisuus vaikuttaa ohran satoon fosforilannoitusta voimakkaammin

Maarit Termonen, Arja Louhisuo, Kirsi Järvenranta ja Perttu Virkajärvi

Luonnonvarakeskus (Luke), Tuotantojärjestelmät, Halolantie 31 A, 71750 Maaninka

e-mail: maarit.termonen@luke.fi

Fosforin (P) lannoituskokeita on tyypillisesti tehty koeasetelmalla, jossa P-lannoittamatonta koejäsentä verrataan erisuuruisiin P-lannoituksiin viljavuus-P-luokaltaan tasaisella koealueella. Ohran tiedetään hyötyvän P-lannoituksesta säilörehunurmia enemmän matalissa viljavuus-P-luokissa. Eri peltolohkoilla tehtyjä eri kasvilajien kokeita ei kuitenkaan voi verrata toisiinsa tilastollisesti, eikä tutkimustietoa maan P-luokan ja lannoitefosforin yhdysvaikutuksesta juurikaan ole. Tässä kokeessa haluttiin selvittää maan viljavuus-P-luokan vaikutusta satotasoon, sadon laatuun ja P-pitoisuuteen sekä P-taseeseen. Lisäksi tutkittiin maan P-luokan ja P-lannoituksen välistä mahdollista yhdysvaikutusta. Koe toteutettiin osana Makera-rahoitteista (MMM) FOMARE-hanketta. Kenttäkoe toteutettiin v. 2020–2023 Luke Maaningalla tutkimuskentällä, jossa matalan viljavuus-P:n (runsasmultainen hiesusavi, vilj.-P keskimäärin 5.3 mg l<sup>-1</sup>) lohkolle on luotu kolmena toistona keskimääräisen (vilj.-P 13.6 mg l<sup>-1</sup>) ja korkean (vilj.-P 22.9 mg l<sup>-1</sup>) P-luokan pääruudut kaksoissuperfosfaattilannoituksella vuosina 2017–2018. Kokeessa oli mukana sekä puitava ohra että säilörehunurmi. Tässä raportoidaan ohratulokset. Osaruutuna toteutettiin P-lannoitukset 0, 10, 20 ja 40 kg P ha<sup>-1</sup> ohran kylvön yhteydessä. Ohra reagoi selvästi maan P-luokkaan. Korkeimmassa P-luokassa saatiin suurempia jyväsatoja riippumatta kylvön yhteydessä annetun P-lannoituksen määrästä, vaikka erot eivät aina olleet tilastollisesti merkitseviä. Fosforilannoitus lisäsi jyväsatoa matalimmassa P-luokassa. Viljavuus-P laskee kokeen aikana matalassa P-luokassa keskimäärin 0.3 mg l<sup>-1</sup>, keskimääräisessä luokassa 2.7 mg l<sup>-1</sup> ja korkeassa luokassa 5.4 mg l<sup>-1</sup>. Koko koejakson aikana 40 kg P ha<sup>-1</sup> lannoituksella viljavuus-P aleni vähemmän kuin muilla lannoituksilla. Karjatiloilla, joilla tyypillisesti on nurmikierrossa mukana ohraa, ohran nurmesta poikkeava fosforintarve on syytä ottaa huomioon.

*Avainsanat:* fosfori, fosforilannoitus, ohra

## Johdanto

Laajat viljojen fosforilannoituksen porraskokeet on tehty Suomessa pääosin noin 40 vuotta sitten. Ilmastonmuutos on kuitenkin muuttanut kasvuoloja huomattavasti. Roudan väheneminen, lumisen ajan lyheneminen ja lumi-peitteen oheneminen ovat muuttaneet alkukesän kasvuoloja, samalla kun kuivuus- ja hellejaksot ovat pidentyneet. Kevätohra on Suomen toiseksi yleisin peltokasvi, jonka osuus viljelystä alasta on 20 % (SVT Luonnonvarakeskus 2024a). Lyhyen kasvuajan takia sitä viljellään sekä puhdaskasvustoina että nurmen suojakasvina yleisesti aina pohjoisinta Suomea myöten. Siksi se on myös tärkein karjatalousalueen viljalaji. Samalla kun fosforilannoitusrajoja on vesistökuormituksen vähentämiseksi alennettu, on uusien ja korkeamman satopotentiaalain nurmi- ja ohralajikkeiden fosforintarpeen kriittisiä tekijöitä – maan viljavuusfosforin pitoisuutta, lannoitusta ja näiden yhdysvaikutusta samoissa ympäristöoloissa – tutkittu vasta vähän.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että ohra hyötyy selvästi fosforilannoituksesta, kun maan P-tila on matala (Yli-Halla 1989, Rajala ja Hyrkäs 2018). Nurmella fosforilannoituksen hyöty on ollut selvästi heikompi (Mustonen ym. 2024). Tutkimuksissa on havaittu myös viitteitä siitä, että maan P-tilalla on vaikutusta sadon määrään ja esimerkiksi jyvien P-pitoisuuteen (Rajala ja Hyrkäs 2018). Maan eri viljavuusfosforiluokkia ei ole kuitenkaan voitu verrata tarkasti toisiinsa vakioiden kaikki muut kasvuolot, tai tutkia maan P-luokan ja P-lannoituksen välistä yhdysvaikutusta.

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää maan P-tilan, P-lannoituksen ja näiden yhdysvaikutuksen vaikutusta ohran satoon, sadon laatuun ja P-taseeseen tätä tarkoitusta varten valmistetulla koealustalla, jossa useita maan P-tiloja voidaan tutkia samalla peltolohkolla samoissa sääoloissa. Keskeinen kysymys oli, voidaanko korkealla P-lannoituksella saada matalan P-tilan maalla sama määrällinen ja laadullinen sato, kuin korkeammassa maan P-tilassa ilman P-lannoitusta. Lisäksi tutkittiin, kuinka maan viljavuusfosforipitoisuus muuttuu kokeen edetessä eri käsittelyillä.

## Materiaali ja menetelmät

Vuosina 2017–2018 Luonnonvarakeskuksen Kuopio (Maaninka) toimipaikalle valmistettiin tutkimusalusta, jolla voidaan samoissa olosuhteissa tutkia maan viljavuusfosforiluokan (maan P-tila), P-lannoituksen sekä edellisten yhdysvaikutusta rehukasvien satoon. Aikaisempien tutkimusten perustella etsittiin peltolohkoa, jolla fosforin satovaste olisi todennäköinen (Valkama ym. 2009, Belangér ym. 2017). Valitulla matalan P-tilan loholla oli viljelty ohraa pitkään ilman välikasveja. Peltoon muodostettiin kolme viljavuus-P-pitoisuudeltaan erilaista 70 × 70 m pääruutua 3 × 3 latinalaisena neliönä: matala, keskimääräinen ja korkea. Matalan tilan ruudut eivät saaneet fosforia. Viljavuusluokan nostamiseen tarvittavan P-lannoituksen määrää arvioitiin Ekholm ym. (2005) ja Uusitalo ym. (2016) ennusteyhtälöiden perusteella. Keskimääräisen P-tilan saavuttamiseen käytettiin fosforia 325 kg P ha<sup>-1</sup> ja korkean 650 kg P ha<sup>-1</sup>. Lisätty P-määrä oli noin puolet ennusteyhtälöiden määrästä. Lannoitus annettiin kaksoisuperfosfaattina (P 20%) ja alue kynnettiin neljästi eli pelto oli perustamisen aikana avokesanto (ks. tarkemmin Mustonen ym. 2022). Ennen varsinaisen kokeen alkua peltolohkolla viljeltiin ohraa vuonna 2018 ja italianraiheinää vuonna 2019. Maan P-tilan vakiintumista seurattiin maanäytteillä.

Varsinainen koe toteutettiin vuosina 2020–2023. Kullakin pääruudulla oli osaruutuina puitava ohra ja säilörehunurmi, mutta tässä raportoidaan vain ohratulokset. Osa-osaruutuna (tässä kirjoituksessa osaruutuna) olivat P-lannoitustasot 0, 10, 20 ja 40 kg P ha<sup>-1</sup> (0P, 10P, 20P ja 40P). Ohra kylvettiin 1.5 × 11 m kokosiin koeruutuihin. Itävien siementen kylvömäärä oli 500 kpl m<sup>2</sup> ja lajike keskimyöhäinen Kaarle. P-lannoitukset toteutettiin kaksoisuperfosfaatilla sijoittamalla se kylvölannoittimella kylvöriivien väleihin seoksena NK-yhdistelmälannoitteen kanssa. Typpi- (100 kg N ha<sup>-1</sup>) ja kaliumlannoitus (53 kg K ha<sup>-1</sup>) annettiin lannoitussuosituksen mukaan. Käytetyt kasvinsuojeluaineet olivat Starane XL 0.6 l ha<sup>-1</sup> (v. 2020), Primus XL 0.75 l ha<sup>-1</sup> ja Express® 50 SX 8 g ha<sup>-1</sup> (v. 2021), Ariane S 2.5 l ha<sup>-1</sup> (v. 2022) sekä Primus XL 0.75 l ha<sup>-1</sup> ja Amistar 0.4 l ha<sup>-1</sup> (v. 2023). Viljelytoimet on eritelty Taulukossa 1. Vuonna 2020 vilja kynnettiin ilman glyfosaattia, vuosina 2021 ja 2022 alue ruiskutettiin glyfosaatilla ennen kyntöä. Kyntösyvyys oli 20 cm. Maan kulkeutumista kyntöä yhteydessä ruudulta toiselle ehkäistiin sijoittamalla suojaruudut koeruutujen väliin ja kyntämällä ruudut joka toinen kerta eri suuntaan. Koealueen maalaji ja multavuus määritettiin mekaanisen maalajikoostumusmäärityksen ja hehkutushäviön avulla pääruuduittain vuonna 2017 (0–20 cm syvyys). Viljavuus-P (PAAC, hapen ammoniumasetattiutto, Vuorinen ja Mäkitie 1955) määritettiin ruuduittain keväällä 2020 ennen lannoitusta, ja syksyisin 2020–2023. Maa-analyysit tehtiin Eurofins Viljavuuspalvelu Oy:ssä.

Taulukko 1. Kokeella tehdyt viljelytoimenpiteet

Toimenpide	2020	2021	2022	2023
Alkumaanäytteet	25.5.	.	.	.
Tasauslanaus	.	20.5.	.	9.5.
Äestys, lannoitus, kylvö, jyräys	26.5.	26.5.	23.5.	11.5.
Kasvinsuojeluruiskutus	24.6.	29.6.	23.6.	14.6.
Ohran puinti	15.9.	30.8.	5.9.	22.8.
Glyfosaatti	.	15.9.	22.9.	.
Maanäytteet	8.10.	9.9.	27.9.	21.9.
Kyntö	25.11.	4.10.	7.10.	.

Tähkien määrää havainnoitiin vuonna 2023 ennen puintia laskemalla niiden lukumäärä 1 m matkalta kahdesta kohdasta ruutua. Koeruudut puitiin keltatuleentumis-asteella. Puidusta ohrasta määritettiin jyväsato 15% kosteudessa. Jyvänäytteet otettiin ruuduittain. Jyvistä määritettiin tuhannen jyvän paino (tjp), jonka jälkeen näytteistä analysoitiin Seilab Oy:n laboratoriossa mm. hehtolitrapaino (hlp) ja fosforipitoisuus (P). Lisäksi laskettiin sadon mukana poistuneen fosforin määrä ja edelleen P-tase. Säätöaineistona käytettiin Ilmatieteenlaitoksen Kuopio Maaninka -aseman tietoja avoimesta säädätystä sekä pitkän aikavälin keskiarvoja julkaisusta Jokinen ym. (2021).

Aineisto analysoitiin tilastollisesti käyttäen SAS 9.4. ohjelmiston *Mixed*-proseduuria. Mallissa maan P-tila, P-lannoitus ja näiden yhdysvaikutus olivat kiinteitä tekijöitä, ja latinalaisen neliön mukaisesti rivi, sarake ja rivi × sarake × maan P-tila satunnaisia tekijöitä. Vuodet käsiteltiin erikseen tai summaamalla yhteen kumulatiiviseksi sadoksi tai taseeksi. Viljavuus-P:n osalta tarkasteltiin myös muutosta kevään 2020 ja syksyn 2023 välillä. Mallissa käytettiin Kenward-Rogerin vapausasteiden korjausta ja parivertailut tehtiin Tukeyn testillä. Jos varianssien yhtäsuuruusoletus ei toteutunut, käytettiin tarvittaessa logaritimuunnosta. Sadon määristä tarkasteltiin erikseen vielä sitä, voitiinko

korkealla P-lannoituksella (40P) matalassa P-luokassa saada yhtä korkea sato kuin keskimääräisessä tai korkeassa luokassa ilman P-lannoitusta (0P). Nämä vertailut tehtiin kontrastitarkasteluna ilman Tukeyn parivertailukorjausta.

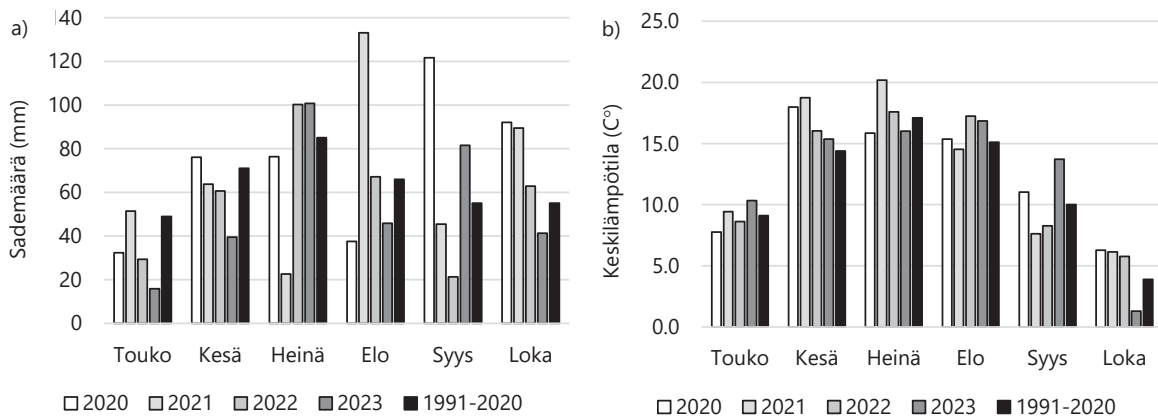
## Tulokset

### Maan ominaisuudet

Koealueen maalaji oli runsasmultainen hiesusavi (rm HsS). Koska lohkon tärkein ominaisuus oli riittävän alhainen viljavuus-P:n pitoisuus ja riittävä koko kokeen suorittamiseksi, jouduttiin muista ominaisuuksista tinkimään. Niinpä koealueen maa oli vaihtelevaa monilta ominaisuuksiltaan: saveksen osuus vaihteli pääruuduilla välillä 37–52% (keskiarvo 42%), hiesun osuus välillä 32–51% (ka 38%), ja hiedan + hiekan osuus välillä 9–30% (ka 19%). Hehku-tushäviönä määritetty orgaanisen aineksen osuus vaihteli pääruuduilla välillä 6.9–10.6% (ka 7.9%). Maan pH oli keskimäärin luokassa hyvä (6.4–6.5) ja viljavuuskalium ( $115\text{--}124\text{ mg l}^{-1}$ ) sekä rikki ( $8.0\text{--}8.9\text{ mg l}^{-1}$ ) luokassa välttävä. Korkean savespitoisuuden vuoksi alueella on todennäköisesti runsaasti reservikaliumia. Matalan fosforitilan ruuduista osa oli luokassa välttävä ja osa tyydyttävä (keskiarvo  $\pm$  keskihajonta  $5.3 \pm 0.8\text{ mg l}^{-1}$ ). Keskimääräisen fosforitilan ruuduista suurin osa oli luokassa hyvä, mutta muutama ruutu luokissa tyydyttävä ja korkea ( $13.6 \pm 4.1\text{ mg l}^{-1}$ ). Korkean fosforitilan ruuduista suurin osa oli luokassa korkea, ja muutama ruutu luokassa hyvä ( $22.9 \pm 5.1\text{ mg l}^{-1}$ ). Lohkon vaihtelun vaikutusta minimoitiin latinalaisen nelion koeasetelmalla.

### Sää

Koevuosien kasvukausista vuosi 2021 poikkesi muista erityisen kuivana (heinäkuu, Kuva 1a) ja lämpimänä (kesä- ja heinäkuu, Kuva 1b). Yleisesti oraalletulovaiheen olot (touko-kesäkuu) olivat keskimääräistä kuivempia 2020, 2022 ja 2023. Vain vuonna 2021 alkukasvukauteen saatiin keskimääräinen sadekertymä ja lämpösumma, mutta jo kesäkuun lämpötilasumma oli keskimääräistä korkeampi ja vuorokauden keskimääräinen lämpötilamaksimi yli  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuivuus ja kuumuus jatkuivat vielä heinäkuun, jolloin keskimääräinen lämpötilamaksimi oli jo yli  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kesäkuun tähkälletulovaiheen sateet ajoittuivat parhaiten vuonna 2020. Kasvukauden 2022 sääolot olivat suotuisat varhaiseen kylvöön, eikä kesäkuussa esiintynyt voimakkaita helteitä. Kasvukauden alkuaikoihin oli vähäsateinen myös vuonna 2023, mutta samanlaisia hellejaksoja kuin vuonna 2021 ei silloin esiintynyt. Kasvukauden alkamisajankohta oli myöhäisin keväällä 2020 ja aikaisin keväällä 2023.



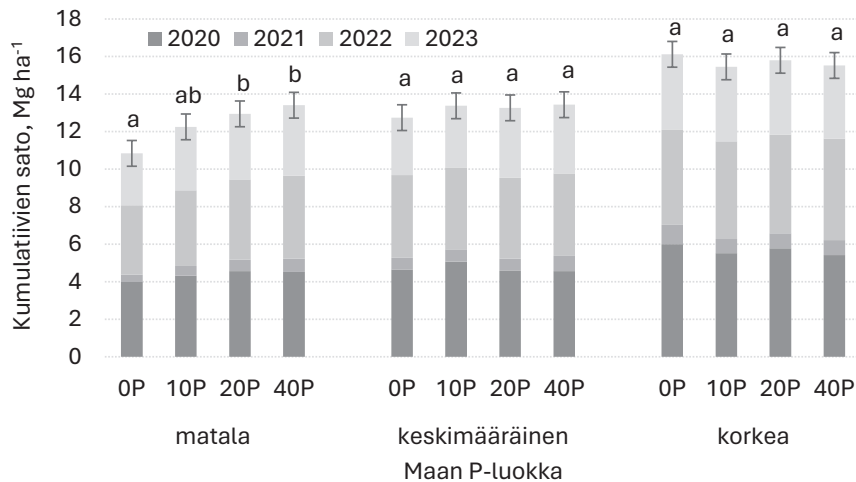
Kuva 1. Kunkin koevuoden a) sademäärät kasvukaudella kuukausittain verrattuna pitkän ajan (1991–2020) keskiarvoon ja b) kuukausien keskilämpötilat verrattuna pitkän ajan (1991–2020) keskiarvoon.

### Sato

Jyväsato oli välillä  $3600\text{--}4900\text{ kg ha}^{-1}$  lukuun ottamatta vuotta 2021, jolloin sato jäi erittäin heikoksi (keskimäärin  $700\text{ kg ha}^{-1}$ ) (Taulukko 2; Kuva 2). P-lannoituksen vaikutukset näkyivät aineistossa kaikkein selvimmin kokeen viimeisenä vuonna 2023. Tällöin sekä 10P, 20P että 40P tuottivat matalassa P-luokassa korkeamman jyväsadon kuin 0P (lisäys 22–36%,  $620\text{--}990\text{ kg ha}^{-1}$ ). Keskimääräisessä P-luokassa 20P ja 40P tuottivat korkeamman jyväsadon kuin 0P (lisäys 19–22%,  $590\text{--}670\text{ kg ha}^{-1}$ ). Korkeassa P-luokassa sadonlisää ei saatu. Vuonna 2020 aineistoissa esiintyi muita vuosia huomattavasti enemmän satunnaista vaihtelua, joka näkyy korkeana keskiarvon keskivirheenä (SEM  $485\text{ kg}$ ).

Maan P-luokan vaikutus näkyi voimakkaimmin vuonna 2022, jolloin korkeassa P-luokassa saatiin keskimäärin 21% korkeampi sato kuin matalassa tai keskimääräisessä P-luokassa. Samanlainen satovaikutus havaittiin vuonna 2023 lähes merkitsevästi (sadonlisä 15%,  $P = 0.083$ ). Kun kaikkien koevuosien sadot laskettiin yhteen (kumulatiivinen sato, Kuva 2), korkeassa P-luokassa saatiin keskimäärin korkeampi sato kuin matalassa P-luokassa (+ 27%;  $P = 0.032$ ). Lisäksi matalassa P-luokassa 20P ja 40P tuottivat korkeamman sadon kuin OP (+19% ja +24%;  $P = 0.045$  ja  $P = 0.009$ ), mutta keskimääräisessä ja korkeassa luokassa satovastetta P-lannoitukselle ei ollut.

Maan P-luokan ja lannoituksen yhdysvaikutusta tarkasteltaessa matalan P-luokan sadot eivät jääneet keskimääräisen P-luokan OP-lannoituksen satoa heikommiksi edes OP-lannoituksella ( $P = 0.26$ ;  $P = 0.22$ ;  $P = 0.26$ ) vuosina 2020, 2021 ja 2023. Vuonna 2022 matalassa P-luokassa tarvittiin 10P lannoitus tuottamaan sama satotaso kuin keskimääräisen P-luokan OP-lannoituksella ( $P = 0.22$ ) ja vuonna 2023 matalan P-luokan 40P tuotti korkeamman jyväsadon kuin keskimääräisen P-luokan OP ( $P = 0.025$ ). Kun matalaa ja korkeaa P-luokkaa verrataan keskenään, nähdään että vuosina 2020 ja 2022 edes 40P-lannoitus matalassa P-luokassa ei riittänyt tuottamaan yhtä korkeaa satoa kuin korkean P-luokan OP ( $P = 0.032$ ;  $P = 0.035$ ), kun taas vuonna katovuonna 2021 se riitti juuri ja juuri ( $P = 0.097$ ). Vuonna 2023 40P riitti ( $P = 0.31$ ) nostamaan matalan P-luokan sadon korkean P-luokan OP:n tasalle, ja myös 20P oli lähes riittävä ( $P = 0.069$ ).



Kuva 2. Kumulatiivinen jyväsato 2020–2023. Virhepalkki on keskiarvon keskivirhe (SEM). Kussakin maan P-luokassa samalla kirjaimella merkityt eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi. Pääruuduista matala ja korkea erosivat toisistaan, kun taas keskimääräinen ei eronnut kummastakaan.

## Sadon laatu

Maan P-tilalla tai P-lannoituksella ei ollut vaikutusta hehtolitrapainoon vuosina 2020, 2021 ja 2023 (Taulukko 2). Erittäin heikon sadon hlp vuonna 2021 oli keskimäärin vain 52.8 kg, mikä oli selvästi vähemmän kuin muina vuosina (58.2–62.7 kg). Vuonna 2022 korkean tilan maalla hlp oli 2.0 kg korkeampi kuin matalassa tai keskimääräisessä luokassa.

Vuonna 2020 tuhannen jyvän painoa ei määritetty. Vuosina 2021–2023 havaittiin, että korkeassa P-luokassa oli merkitsevästi (2021, 37.7 g vs. 35.8 g,  $P = 0.030$ ) tai lähes merkitsevästi (2022, 40.3 g vs. 38.4 g,  $P = 0.077$ ; 2023, 40.1 g vs. 37.1 g,  $P = 0.061$ ) korkeampi tjp kuin matalassa P-luokassa. Vuosina 2021 ja 2022 P-lannoituksella ei ollut vaikutusta tjp:hen. Vuonna 2023 lannoitus nosti tuhannen jyvän painoa siten, että 20P tuotti korkeamman painon kuin OP (39.4 g vs. 37.4 g;  $P = 0.008$ ). Yhdysvaikutusta P-lannoituksen ja maan P-tilan välillä ei havaittu. Keskimääräinen tähkien määrä vuonna 2023 oli 552 kpl m<sup>-2</sup>. Maan P-luokalla tai P-lannoituksella ei ollut tähän vaikutusta.

Maan P-tilalla oli vaikutusta jyvien P-pitoisuuteen vain vuonna 2022, jolloin korkean tilan maalla P-pitoisuus oli 5–6% korkeampi kuin muissa luokissa (Taulukko 2). P-lannoitus ei vaikuttanut jyvien P-pitoisuuteen minään vuonna, eikä P-tilalla ja P-lannoituksella ollut yhdysvaikutusta. Keskimääräinen vuotuinen P-pitoisuus vaihteli välillä 4.0–5.6 g kg<sup>-1</sup> ka.

Taulukko 2. Jyväsato, jyvien P-pitoisuus ja hehtolitraino vuosittain

Viljavuusluokka	P-lann.	Sato (15 % kosteus, kg ha <sup>-1</sup> )				Jyvän P-pitoisuus (g kg <sup>-1</sup> ka)				Hehtolitraino (hlp, kg hl <sup>-1</sup> )			
		2020	2021	2022	2023	2020	2021	2022	2023	2020	2021	2022	2023
Matala		4340	560	4110 a	3350	4.0	5.5	5.2 a	4.6	59.6	52.2	57.5 a	62.5
Keskimääräinen		4720	680	4370 a	3440	4.0	5.5	5.3 a	4.5	60.3	53.3	57.5 a	62.4
Korkea		5680	850	5240 b	3960	4.0	5.8	5.6 b	4.7	60.8	53.0	59.5 b	63.3
SEM		445	108	113	151	0.09	0.14	0.11	0.09	0.62	0.42	0.35	0.51
	0	4880	690	4390	3280 a	4.0	5.5	5.3	4.6	60.3	53.0	57.7	62.4
	10	4970	640	4540	3550 b	3.9	5.5	5.4	4.6	60.1	52.6	58.2	62.2
	20	4980	680	4620	3730 b	4.0	5.6	5.3	4.6	60.4	52.8	58.2	63.3
	40	4830	780	4740	3770 b	4.0	5.7	5.4	4.7	60.2	52.8	58.6	63.1
SEM		367	91	127	106	0.09	0.13	0.11	0.10	0.42	0.45	0.38	0.54
Matala	0	3980	400	3690	2760 a	4.1	5.3	5.3	4.8	59.6	50.6 a	57.3	62.0
Matala	10	4320	510	4040	3380 b	4.0	5.6	5.1	4.4	59.3	52.3 a	57.1	62.4
Matala	20	4560	610	4280	3500 b	3.9	5.3	5.1	4.5	59.8	53.3 a	57.6	62.2
Matala	40	4510	710	4420	3760 b	4.0	5.6	5.4	4.6	59.7	52.7 a	58.0	63.2
Keskimääräinen	0	4660	620	4400	3070 a	3.9	5.5	5.2	4.4	60.4	54.2 a	56.5	61.6
Keskimääräinen	10	5070	650	4360	3290 ab	3.8	5.2	5.3	4.5	60.3	53.0 a	58.1	62.0
Keskimääräinen	20	4580	640	4310	3730 b	4.0	5.7	5.4	4.6	60.8	52.6 a	57.5	63.4
Keskimääräinen	40	4560	820	4400	3660 b	4.1	5.6	5.3	4.7	59.9	53.3 a	57.9	62.7
Korkea	0	5990	1030	5060	4030 a	4.0	5.7	5.4	4.6	60.8	54.2 a	59.3	63.5
Korkea	10	5520	750	5210	3970 a	4.0	5.6	5.7	4.8	60.8	52.7 a	59.4	62.1
Korkea	20	5790	790	5270	3950 a	3.9	5.9	5.5	4.8	60.6	52.5 a	59.5	64.1
Korkea	40	5420	810	5410	3890 a	3.9	5.8	5.6	4.8	60.8	52.5 a	59.9	63.5
<b>Keskiarvo</b>		<b>4910</b>	<b>700</b>	<b>4570</b>	<b>3580</b>	<b>4.0</b>	<b>5.6</b>	<b>5.4</b>	<b>4.6</b>	<b>60.2</b>	<b>52.8</b>	<b>58.2</b>	<b>62.7</b>
SEM		485	130	209	178	0.13	0.18	0.16	0.16	0.73	0.65	0.60	0.75
P-arvot	Vilj.luokka			***	0			**		0	***		
	P-lann.				***								
	Yhd.v.		0		**					*			

SEM = keskiarvon keskivirhe. Eri kirjaimella merkityt (yhdysoikutuksessa kullakin viljavuusluokalla erikseen) eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (P < 0.05). \*\*\* (P < 0.001), \*\* (P < 0.01), \* (P < 0.05) ja 0 (P < 0.10).

## P-tase ja viljavuus-P:n muutos maassa

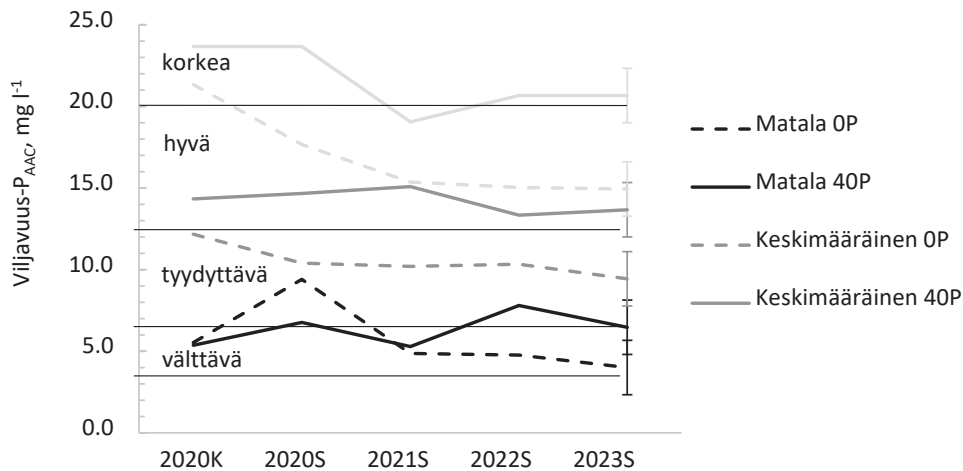
Mitä korkeampi P-lannoitus oli, sitä korkeampi oli myös P-tase (Taulukko 3). Jos vuotta 2021 ei oteta huomioon, 10P-lannoitus tuotti kaikissa P-luokissa negatiivisen taseen, ja 20P- ja 40P-lannoitukset positiivisen, lukuun ottamatta vuotta 2022, jolloin korkeassa P-luokassa myös 20P tuotti negatiivisen taseen. Tällöin korkea P-luokka tuotti keskimäärin matalamman P-taseen kuin matala ja keskimääräinen P-luokka. Ilmiö oli vastaava vuonna 2023, mutta ei parivertailuissa aivan tilastollisesti merkitsevä ( $P = 0.059$  ja  $P = 0.084$ ).

Taulukko 3. Vuotuinen P-tase sekä maan viljavuus-P keväällä 2020 (K) ja syksyisin (S)

Viljavuusluokka	P-lann.	P-tase(kg ha <sup>-1</sup> )				Viljavuus-P <sub>AAC</sub> (mg l <sup>-1</sup> )				
		2020	2021	2022	2023	2020K	2020S	2021S <sup>1</sup>	2022S	2023S
Matala		2.7	14.9	-0.8 a	4.5 a	5.3 a	6.7 a	5.1 a	5.5 a	5.0 a
Keskimääräinen		1.7	14.3	-2.1 a	4.2 a	13.6 ab	12.4 a	12.0 b	11.4 a	10.9 b
Korkea		-1.7	13.3	-7.2 b	1.6 a	22.9 b	20.5 b	17.9 b	18.2 b	17.5 c
SEM		1.56	0.56	0.72	0.71	2.42	1.84	.	2.01	1.53
	0	-16.5 a	-3.3 a	-19.8 a	-12.8 a	13.0 a	12.5 a	9.1 a	10.0 a	9.5 a
	10	-6.6 b	7.0 b	-10.8 b	-3.8 b	12.8 a	11.7 ab	9.0 a	10.4 ab	9.5 a
	20	3.2 c	16.7 c	-1.0 c	5.3 c	15.4 b	13.6 ab	11.9 b	12.4 bc	11.9 b
	40	23.5 d	36.2 d	18.1 d	25.0 d	14.5 ab	15.0 b	11.5 b	13.9 c	13.6 b
SEM		1.20	0.50	0.78	0.52	2.06	1.78	.	1.96	1.38
Matala	0	-13.9	-1.8	-16.8	-11.3	5.5	9.4 a	4.9	4.8	4.0
Matala	10	-4.6	7.6	-7.4	-2.7	4.8	5.0 a	4.5	4.1	4.4
Matala	20	4.8	17.2	1.3	6.6	5.5	5.8 a	5.7	5.2	5.1
Matala	40	24.5	36.6	19.8	25.3	5.4	6.8 a	5.3	7.8	6.5
Keskimääräinen	0	-15.2	-2.9	-19.5	-11.5	12.2	10.4 a	10.2	10.3	9.4
Keskimääräinen	10	-6.3	7.1	-9.8	-2.5	12.4	10.3 a	9.7	10.1	8.5
Keskimääräinen	20	4.3	16.8	0.4	5.5	15.3	14.0 a	14.0	11.9	12.0
Keskimääräinen	40	24.2	36.1	20.3	25.3	14.3	14.7 a	15.1	13.3	13.7
Korkea	0	-20.4	-5.0	-23.2	-15.6	21.3	17.7 a	15.4	15.0	14.9
Korkea	10	-8.9	6.4	-15.2	-6.2	21.3	19.7 ab	16.7	17.0	15.7
Korkea	20	0.6	16.0	-4.8	3.9	25.3	21.0 ab	20.8	20.0	18.7
Korkea	40	21.9	36.0	14.3	24.2	23.7	23.7 b	19.0	20.7	20.7
<b>Keskiarvo</b>		<b>0.9</b>	<b>14.2</b>	<b>-3.4</b>	<b>3.4</b>	<b>13.9</b>	<b>13.2</b>	<b>11.8</b>	<b>11.7</b>	<b>11.1</b>
SEM		1.72	0.66	1.15	0.91	2.42	2.08	.	2.17	1.67
P-arvot	Vilj.luokka			***	*	*	*	***	*	**
	P-lann.	***	***	***	***	*	**	***	***	***
	Yhd.v.		0				*			

SEM = keskiarvon keskivirhe. Eri kirjaimella merkityt (yhdyksvaikutuksessa kullakin viljavuusluokalla erikseen) eroavat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi ( $P < 0.05$ ). \*\*\* ( $P < 0.001$ ), \*\* ( $P < 0.01$ ), \* ( $P < 0.05$ ) ja 0 ( $P < 0.10$ ). <sup>1</sup>Käytetty logaritimuunnosta, SEM:iä ei esitetä.

Viljavuus-P ei ollut pääruuduilla koealustan perustamisen jälkeen täysin tasainen, mikä näkyy mm. siinä, että lieviä eroja lannoitustasojen välillä havaittiin jo keväällä 2020 ennen lannoitusten aloittamista. Kevään 2020 ja syksyn 2023 ja välisenä aikana viljavuus-P:n laski matalassa P-luokassa keskimäärin  $0.3 \text{ mg l}^{-1}$ , keskimääräisessä luokassa  $2.7 \text{ mg l}^{-1}$  ja korkeassa luokassa  $5.4 \text{ mg l}^{-1}$  ( $P < 0.001$ ). Yhdyksvaikutusta P-luokan ja P-lannoituksen välillä ei havaittu, vaan 40P poikkesi ainoana muista kolmesta lannoituksesta viljavuus-P:n laskua vähentäen ( $-0.9 \text{ mg l}^{-1}$  vs.  $-3.3$ – $-3.6 \text{ mg l}^{-1}$ ). Tämä maan P-tilan laskua hillitsevä vaikutus näkyy erityisesti korkeassa luokassa (Kuva 3, Taulukko 3), jossa viljavuus-P lähti OP-lannoituksella nopeaan laskuun ( $21.3 \rightarrow 14.9 \text{ mg l}^{-1}$ ;  $-30\%$ ). Matalassa P-luokassa vastaava lasku oli  $5.5 \rightarrow 4.0 \text{ mg l}^{-1}$  ( $-28\%$ ). Selkeää maan P-tilan nousua korkeiden P-lannoitusten seurauksena ei koejakson aikana nähty. Ainoa P-luokan ja P-lannoituksen välinen yhdyksvaikutus havaittiin syksyllä 2020, jolloin korkean P-luokan OP-lannoituksella maan viljavuus-P oli  $6.0 \text{ mg l}^{-1}$  alempi kuin 40P-lannoituksella (Taulukko 3). P-luokasta riippumatta P-lannoitus eriytti koejäseniä toisistaan siten, että viljavuus-P oli OP- ja 10P-lannoituksilla samaa tasoa, ja 20P- ja 40P-lannoituksilla tätä korkeampi, mutta keskenään samaa tasoa. 10P- ja 20P-lannoitusten välisen eron merkitsevyys vaihteli vuosien välillä.



Kuva 3. Maan viljavuusfosforin (PAAC) muutos maassa kokeen aikana. Vuonna 2023 kuvassa mukana keskiarvon keskivirhe (SEM) virhepalkkeina.

## Tulosten tarkastelu

### Sato ja sadon laatu

Kolmena neljästä satovuodesta saatiin keskimäärin vähintään kohtuullinen jyväsato (Taulukko 1). Vuosina 2020 ja 2022 satoa voi pitää hyvänä verrattuna Pohjois-Savon keskisatoihin (2020 3130 kg ha<sup>-1</sup> ja 2022 3260 kg ha<sup>-1</sup>; SVT Luonnonvarakeskus 2024b). Vuosi 2021 oli katovuosi viljoilla koko maassa (Pohjois-Savon keskisato 2240 kg ha<sup>-1</sup>). Kokeella sato oli v. 2021 alueen keskisatoja matalampi, johtuen vaikeista kylvöoloista seuranneesta maan liettymisestä, helteistä johtuneesta itämisestä vaikeuttaneesta kuorettumasta sekä heinäkuun helteistä. P-lannoituksesta tai hyvästä viljavuus-P-tasosta maasta ei saada odotettua satohyötyä, jos muut olosuhteet rajoittavat sadonmuodostusta voimakkaammin.

P-lannoitus lisäsi jyväsatoa erityisesti vuonna 2023 matalassa ja keskimääräisessä maan P-luokassa. Korkeassa P-luokassa saatiin muita suurempi sato v. 2022. Sadon määrän lisääntyminen voi selittyä yhdellä tai useammalla satokomponentilla, suuremmalla tähkien tai jyvien määrällä tai painavammilla jyvillä. Rajalan ja Hyrkkään (2018) raportoimissa matalan P-luokan kokeissa ohran sadonlisä oli kytköksissä tähkien ja jyvien määrään neliöllä, eikä niinkään tuhannen jyvän painoon. Tässä tutkimuksessa jyvien määrää tähkissä ei laskettu ja tähkien määrä laskettiin vain vuonna 2023, eikä se näyttänyt selittävän sadonlisästä ainakaan toteutetulla mittaustarkkuudella. Vuonna 2023 matalassa P-luokassa havaitulla P-lannoituksella saadulla sadonlisällä ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä hehtolitrapainoon eikä tjp:hen, sen sijaan vuoden 2022 korkeampi sato korkeassa P-luokassa verrattuna matalaan ja keskimääräiseen P-luokkaan yhdistyi tilastollisesti merkitsevästi korkeampaan hehtolitrapainoon sekä lähes merkitsevästi korkeampaan tjp:hen. Kokeessa hehtolitrapainot jäivät yleisesti matalammaksi kuin mitä viljakaupan laatuvaatimuksien perushinta (noin 62 kg hl<sup>-1</sup>) edellyttää. Suurissa testiaineistoissa on havaittu, että P-lannoitus selittää hehtolitrapainosta ja tuhannen siemenen painosta vain alle 10 % (Salo ym. 2007), kun sen sijaan sää on vahva selittäjä.

Kevään sääolojen merkitys ohran sadonmuodostukselle ja ravinteiden otolle on merkittävä. Sääolot korostivat tai vaimensivat eri maan P-luokissa tehdyn P-lannoituksen vaikutusta satoon. Kevätohralla alkukehitys tapahtuu suhteellisen kylmässä maassa, jossa fosforin saatavuus on heikentynyt (Ylivainio ja Peltovuori 2012). Kylvön jälkeen lämpösusmaa alkaa Suomen pitkän päivän oloissa kertyä nopeasti, mikä johtaa muuta Eurooppaa kiihkeämpään alkukehitykseen ja biomassan kertymiseen (Peltonen-Sainio ym. 2005). Mitä lyhyemmällä jaksolla kehitys tapahtuu, sitä vähemmän satokomponentteja (versoja, tähkiä, jyviä, jyväpainoa) ehtii muodostua. Maa oli todennäköisesti vielä viileää keväällä 2020, sillä lämpösusmaa alkoi kertyä vain kahdeksan päivää ennen kylvöjä. Viileän kevään jälkeen seurasi kuitenkin nopea lämpeneminen ja lämpösusmaan kertyminen, mikä lyhentää satokomponenttien muodostumisaikaa ja pienentää mahdollisuutta käsittelyerojen syntyymiseen alkukehityksen aikana. Satokomponentteja ei kuitenkaan 2020 laskettu. Vuoden 2020 kesäkuun sadesusmaa oli muita vuosia suurempi ja turvasi versojen ja niissä kehittyvien jyvääiheden pölyttymistä ja kasvua (Rajala ym. 2011). Vuoden 2020 sato olikin koejakson paras. Vuonna 2021 nopeasti kehittyvä kuivuus vaikutti tuloksiin. Keväällä 2022 lämpösusmaa oli kertynyt ennen kylvöjä maltillisesti 17 päivän ajan ja kylvön jälkeenkin lämpösusmaa kehittyi vielä rauhallisesti jättäen aikaa

satokomponenttien muodostumiseen ja maan lämpenemiselle. Keväällä 2023 kosteusolot olivat sellaiset, että kylvö päästiin tekemään aikaisin, vain neljä päivää kasvukauden alkamisen jälkeen, vielä kylmään maahan. Pölyttymisen aikaan kesäkuussa 2023 satoi erittäin vähän, mikä on todennäköisesti yksi keskeinen syy vuosien väliseen vaihteluun verrattuna vuoteen 2020 ja 2022. Havainnot P-lannoituksen vahvimasta satovasteesta juuri vuonna 2023 viittaavat kuitenkin Ylivainion ja Peltovuoren (2012) tuloksiin kylmän maan fosforinsaantia rajoittavasta vaikutuksesta.

P-lannoituksella ei havaittu vaikutusta jyvien P-pitoisuuteen, ja maan P-luokallakin vain yhtenä vuonna neljästä. Rajala ja Hyrkäs (2018) määrittivät P-pitoisuuden myös korresta ja havaitsivat, että matalan P-tilan mailla korren P-pitoisuus oli selvästi matalampi kuin hyvän P-tilan mailla. Nurmella P-lannoituksen puuttuminen on alentanut kasvuston P-pitoisuutta jo ennen kuin fosforintarve näkyy sadon alenemana (Mustonen ym. 2024). Ohrasatojen P-pitoisuudet olivat tässä kokeessa korkeampia kuin mitä rehutaulukoissa esitetty keskimääräinen ohrasadon P-pitoisuus (3.6 g kg<sup>-1</sup>; Kuoppala ym. 2024). Jyväsadon korkeat P-pitoisuudet viittaavat siihen, että fosforia on kyllä ollut hyvin saatavilla maan lämmentyessä, tai ohra on siirtänyt saatavilla olevan fosforin ensisijaisesti jyviin.

### P-tase ja viljavuus-P:n muutos maassa

Tukiehtojen mukaan viljalle saa ilman lantapoikkeusta antaa fosforia 16 kg ha<sup>-1</sup> välttävissä luokassa, 10 kg ha<sup>-1</sup> tyydyttävässä luokassa, 5 kg ha<sup>-1</sup> hyvässä luokassa eikä ollenkaan korkeassa luokassa (Ruokavirasto 2023). Kun taseita verrataan näihin lannoitusrajoihin, matalassa luokassa suurimmilla sallituilla P-lannoituksilla päädytään lievästi negatiivisiin tai hyvin lähellä nolaa oleviin taseisiin, ja keskimääräisessä luokassa negatiivisiin, kun heikon sadon vuotta 2021 ei huomioida. Toisaalta vesistökuormituksen huiput syntyvät usein juuri poikkeuksellisten olosuhteiden seurauksena, joten lannoitemääriä tulee tarkastella myös näiden vuosien kautta. Korkeassa P-luokassa, jossa P-lannoitusta ei saa antaa, päädytään väistämättä selkeästi negatiivisiin taseisiin, ja alempiin viljavuus-P:n arvoihin, mikä onkin tavoite vesistökuormituksen hillinnän osalta. Kokeen tulokset siis vahvistavat nykyisten P-lannoitusrajojen olevan suuruusluokiltaan kohdallaan, kun halutaan välttää positiivisia taseita ja alentaa vesistökuormitusta. Tutkimusta tullaan täydentämään siten, että kokeelta nostetuilla maalaatoilla tehdään keväällä 2024 huuhtouma-koe pintavaluntasimulaattorissa (SIMU; Järvenranta ja Virkajärvi 2020), mikä antaa taseita suurempaa lisätietoa eri käsittelyiden vaikutuksista fosforin huuhtoutumisriskiin.

Koealueen pH oli luokassa hyvä. Kalkitus on keskeinen toimenpide maan P-tilan ylläpidossa. Viljavuus-P:n määrä koealueella vaihteli sekä koeruudulta toiselle että ajallisesti osin koejärjestelyistä riippumatta. Selityksenä oli todennäköisesti mm. alumiinin ja raudan pidätyspaikkojen määrän vaihtelu koealueen eri osissa (tuloksia ei esitetty tässä) sekä hieman vaihteleva kyntösyvyys. Satunnaisen vaihtelun vaikutusta vähennettiin tarkastelemalla kevään 2020 ja syksyn 2023 välistä viljavuus-P:n muutosta ruuduittain. Keskimäärin maan P-tila kokeella laski, ja lasku oli sitä nopeampaa mitä korkeampi oli lähtötilanne. Korkealla P-lannoituksella (40P) laskua pystyttiin hillitsemään, mutta näin korkeaa lannoitusta ei voida nykyisten rajoitusten mukaan käyttää. Tilastollisesti merkitsevää maan P-luokan nousua ei havaittu neljän vuoden aikajaksolla. Tämän kaltaisilla mailla maan P-tilaa on vaikea nostaa nykyisillä viljan P-lannoitusrajoituksilla, jos P-tila laskee yhtä alas kuin tutkimuksessa.

### Yhteenveto ja johtopäätökset

Koevuosien kumulatiivinen sato oli matalassa P-luokassa (viljavuus-P 5.3 mg l<sup>-1</sup>) 21% matalampi kuin korkeassa P-luokassa (22.9 mg l<sup>-1</sup>), mutta ei poikennut keskimääräisestä (13.6 mg l<sup>-1</sup>) P-luokasta. Matalassa P-luokassa P-lannoituksella saatiin 24% sadonlisää, mutta keskimääräisessä ja korkeassa luokassa satohyötyä ei saatu. Tulokset poikkeavat säilörehunurmien fosforilannoituksen satovasteista ja johtopäätöksistä (Bélanger ym. 2017, Kykkänen ym. 2018, Louhisuo ym. 2024).

Tutkimuksen pääkysymys oli selvittää maan P-tilan ja P-lannoituksen keskinäistä kompensatiota. Yksinkertaistaen haluttiin tietää, voidaanko matalan P-tilan mailla tuottaa P-lannoituksen avulla yhtä korkeita satoja kuin hyvän P-tilan mailla ilman P-lannoitusta. Koska sää, erityisesti ohran kylvöaikaan ja tähkälle tullessa, vaikuttaa ohran sadonmuodostukseen voimakkaasti, selkein vastaus kysymykseen saatiin neljän vuoden kumulatiivisen sadon määrästä. Tulosten perusteella nykyisillä lannoitusrajoituksilla (16 kg P ha<sup>-1</sup> v<sup>-1</sup>) matalan P-tilan loholla kompensatio ei onnistu vaan sato jäi hyvän P-tilan maiden satoa pienemmäksi. Sallittua selkeästi korkeammalla P-lannoitustasolla (40 kg P ha<sup>-1</sup> v<sup>-1</sup>) kompensatio onnistui kahtena vuonna neljästä, joista toinen oli katovuosi.



Vuosien välillä oli vaihtelua satovaikutusten voimakkuudessa, mikä kertoo sään ratkaisevasta vaikutuksesta. Maan lämpötila ja lämpösunnan kehitys tulisi huomioida viljojen lannoituskokeissa nykyistä systemaattisemmin. Satokomponenttien tarkempi analyysi antaisi oleellista lisätietoa P-tilan ja P-lannoituksen satovasteen mekanismeista.

Lannoitusrajoitusten tavoite on vähentää sellaisten peltojen osuutta, joilla on tarpeettoman korkeita viljavuus-P:n arvoja. Tulosten perusteella P-luku aleni tavoitteen mukaan ja määrällisesti eniten juuri korkeimmassa luokassa. Merkittävää on, ettei korkeintaan P-lannoitusmäärä nostanut matalan P-luokan viljavuus-P:tä. Niinpä tämän tutkimuksen kaltaisilla mailla maan P-luokan nostaminen on vaikeaa nykyisten viljan P-lannoitusrajoitusten puitteissa. Mikäli viljanviljely on merkityksellinen osa nurmi- ja nautakarjatilan toimintaa, on tämä näkökohta hyvä huomioida viljelykiertoa suunnitellessa.

## Kiitokset

Koevuosi 2020 toteutettiin Luken omarahoitteisessa FOMA-hankkeessa. Koevuosia 2021–2023 rahoitti Maa- ja metsätalousministeriö (Makera) sekä Yara Suomi FOMARE-hankkeessa. Kiitos rahoittajille sekä Luke Maaningan tekniselle henkilöstölle kokeen käytännön toteutuksesta.

## Kirjallisuusluettelo

Bélanger, G., Ziadi, N., Lajeunesse, J., Jouany, C., Virkajarvi, P., Sinaj, S. & Nyiraneza, J. 2017. Shoot growth and phosphorus-nitrogen relationship of grassland swards in response to mineral phosphorus fertilization. *Field Crops Research* 204: 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.006>

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 & Environment* 110: 266–278. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.04.014>

Jokinen, P., Pirinen, P., Kaukoranta, J.-P., Kangas, A., Alenius, P., Eriksson, P., Johansson, M. & Wilkman, S. 2021. Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1991-2020. Raportteja 2021:8. Ilmatieteen laitos, Helsinki. 169 s. <http://hdl.handle.net/10138/336063>

Järvenranta, K. & Virkajärvi, P. 2020. The effect of spring melt conditions on phosphorus losses in surface runoff from grassland fertilised with mineral P or slurry. Teoksessa: Virkajärvi, P. ym. (toim.) Meeting the future demands for grassland production. Proceedings of the 28th General Meeting of the European Grassland Federation Helsinki, Finland 19-22 October 2020. *Grassland Science in Europe* 25: 433–435. [https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed\\_Matter/Proceedings/EGF2020.pdf](https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed_Matter/Proceedings/EGF2020.pdf)

Kuoppala, K., Vattulainen, J., Perttilä, S., Saastamoinen, M. & Rinne, M. 2024. Rehutaulukot ja ruokintasuosittukset: Märehtijät, siat, siipikarja, hevoset. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 17/2024. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 98 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-883-6>

Kykkänen, S., Hartikainen, M., Hyrkäs, M., Virkajärvi, P., Toivakka, M. & Kauppila, R. 2018. Forage grasses effectively use soil P-pools in low-PAAC soils in Finland. Teoksessa: Horan, B., Hennessy, D., O'Donovan, M., Kennedy, E., McCarthy, B., Finn, J.A. & O'Brien, B. (toim.) Sustainable meat and milk production from grasslands. Proceedings of the 27th General Meeting of the European Grassland Federation Cork, Ireland 17-21 June 2018. *Grassland Science in Europe* 23: 271–273. [https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed\\_Matter/Proceedings/EGF2018.pdf](https://www.europeangrassland.org/fileadmin/documents/Infos/Printed_Matter/Proceedings/EGF2018.pdf)

Louhisuo, A., Yli-Halla, M., Termonen, M., Kykkänen, S., Järvenranta, K. & Virkajärvi, P. 2024. Long-term changes in soil phosphorus in response to fertilizer application and negative phosphorus balance under grass rotation in mineral soils in Nordic conditions. *Soil Use and Management* 40: e13013. <https://doi.org/10.1111/sum.13013>

Mustonen, A., Kykkänen, S., Termonen, M. & Virkajärvi, P. 2024. Maan viljavuusfosforin pitoisuus laskee nurmikierrossa, pitäisikö olla huolissaan? Teoksessa: Puhakainen, T. & Jokela, V. (toim.) Maataloustieteen Päivät 2024, 10.-11.1.2024 Viikki, Helsinki, Esitelmä- ja posteritivistelmät. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote no 41. Helsinki. s. 214. <https://journal.fi/smst/issue/view/10836/2204>

Mustonen, A., Termonen, M., Järvenranta, K., Virkajärvi, P. & Yli-Halla, M. 2022. Maan fosforivarantojen ja lannoituksen tutkimiseen kehitettiin uusitutkimusallusta - mihin lannoitefosfori maassa päättyy? Teoksessa: Puhakainen, T. & Jokela, V. (toim.) Maataloustieteen Päivät 2022, 14.-15.6.2022 Viikki, Helsinki, Esitelmä- ja posteritivistelmät. Suomen maataloustieteellisen seuran tiedote no 39. Helsinki. s. 205. <https://journal.fi/smst/issue/view/8286/1504>

Peltonen-Sainio, P., Rajala, A. & Seppälä, R. T. 2005. Viljojen kehityksen ja kasvun ABC. Maa- ja elintarviketalous 67. s. 72. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-729-955-9>

Rajala, A., Hakala, K., Mäkelä, P. & Peltonen-Sainio, P. 2011. Drought effect on grain number and grain weight at spike and spikelet level in six-row spring barley. *Journal of Agronomy and Crop Science* 197: 103–112. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00449.x>

Rajala, A. & Hyrkäs, M. (toim.). 2018. Fosforilannoituksen satovasteet moderneilla korkean satopotentialin lajikkeilla (FOSA) -hankkeen loppuraportti. MMM (julkaisematon).

Ruokavirasto 2023. Ehdollisuuden opas 2023. 3.5 Lannoita ehtojen mukaisesti. Noudata fosforilannoituksen enimmäismääriä. [Viitattu 26.2.2024] <https://www.ruokavirasto.fi/tuet/maatalous/perusehdot/ehdollisuus/ehdollisuuden-opas/ehdollisuuden-opas-2023/#id-noudata-fosforilannoituksen-enimmaismaaria>

- Salo, T., Eskelinen, J. & Jauhiainen, L. 2007. Reduced fertiliser use and changes in cereal grain weight, test weight and protein content in Finland in 1990-2005. *Agricultural and Food Science* 16: 407–420. <https://doi.org/10.2137/145960607784125375>
- SVT Luonnonvarakeskus 2024a. Suomen virallinen tilasto SVT: Käytössä oleva maatalousmaa [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu: 26.2.2024]. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/kaytossa-oleva-maatalousmaa/kaytossa-oleva-maatalousmaa-2022>
- SVT Luonnonvarakeskus 2024b. Satotilasto. Suomen virallinen tilasto (SVT): Viljelykasvien hehtaarisadot vuosina 1998-2022 [verkkojulkaisu]. Helsinki: Luonnonvarakeskus [viitattu 26.2.2024]. <https://www.luke.fi/fi/tilastot/satotilasto/sato-ja-luomusato-2022>
- Uusitalo, R., Hyväluoma, J., Valkama, E., Ketoja, E., Vaahtoranta, A., Virkajärvi, P., Grönroos, J., Lemola, R., Ylivainio, K., Rasa, K. & Turtola, E. 2016. A simple dynamic model of soil test phosphorus responses to phosphorus balances. *Journal of Environmental Quality* 45: 977–983. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.09.0463>
- 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: 75–85. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.12.004>
- Vuorinen, J. & Mäkitie, O. 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agrogeological Publications* 63: 1–44.
- 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. *Agricultural and Food Science* 61: 361–370. <https://doi.org/10.23986/afsci.72363>
- Ylivainio, K. & Peltovuori, T. 2012. Phosphorus acquisition by barley (*Hordeum vulgare* L.) at suboptimal soil temperature. *Agricultural and Food Science* 21: 453–461. <https://doi.org/10.23986/afsci.6389>