

SELEENIN KIERTO PELTOEKOSYSTEEMISSÄ
SELENIUM CYCLE IN FIELD ECOSYSTEM
Dnro 2652/312/2010

Maataloustieteiden laitos
PL 27
00014 HELSINGIN YLIOPISTO
puh. 050 4150381
Mervi Seppänen, mervi.seppanen@helsinki.fi
Kesto 2010 – 2014
(Loppuraportti 31.12.2014)
Rahoitus MMM:ltä saatu kokonaisrahoitus 129 000 euroa
Muista julkisista lähteistä saatu rahoitus Maj ja Tor Nesslingin säätiö 68 000 euroa
Muu ulkopuolinen rahoitus Yara Suomi Oy 8000 euroa

Avainsanat: apila, maamikrobit, orgaaninen seleeni, rapsi, seleeni, timotei, vehnä.

Tiivistelmä

Seleeni on suomalaisille maataloustuottajalle tuttu hivenaine, sillä sen puutteesta johtuvia tuotantoeläinten sairauksia paikataan lisäämällä moniravinnelannoitteisiin Na-selenaattia. Lannoitteiden seleenirikastusta on harjoitettu Suomessa 30 vuoden ajan ja se on ollut ainutlaatuinen tapa varmistaa ihmisten ja tuotantoeläinten riittävä seleeninsaanti. Päätös seleenirikastuksesta pohjautui laaja-alaisiin tutkimustuloksiin, joissa lannoitteiden kautta lisätyn seleenin todettiin olevan turvallinen ratkaisu kuluttajalle, hyödyntävän viljelykasvien kykyä muuntaa epäorgaaninen seleeni tuotantoeläimille tehokkaampiin orgaanisiin muotoihin. Seleenilannoituksen vaste on myös hyvä – lannoitustason lisäys tai alentaminen näkyi suoraan sadon seleenipitoisuudessa.

Siemensatoon lannoiteseleenistä päätyy kuitenkin vuosittain alle 10 %. Lannoitus on tehtävä vuosittain, sillä edellisenä vuonna lisätty seleeni ei ole enää kasveille käyttökelpoista. Mihin lannoiteseleeni sitten päätyy, onko lisäyksellä ympäristövaikutuksia? Voisiko viljelykasvien seleeninottoa tehostaa tai kannattaisiko lannoitus kohdistaa joillekin tietyille viljelykasveille? Tässä hankkeessa selvitettiin pelto- ja kasvihuonekokein seleenin kiertoa peltoekosysteemissä: viljelykasvien seleenin oton ja käytön tehokkuutta, puintijätteeseen ja lietteeseen sitoutuneen orgaanisen seleenin käyttökelpoisuutta kasveille, maamikrobien vaikutusta seleenin kiertoon sekä maan epäorgaanisen ja orgaanisen seleenin määrää. Kaksivuotiset peltokokeet toteutettiin Yara Oy:n tutkimusasemalla Vihdissä ja kasvihuonekokeet Helsingin yliopiston kasvihuoneissa Viikissä. Hankkeen toteuttamisesta vastasi Helsingin yliopiston maataloustieteiden sekä elintarvike- ja ympäristötieteiden laitos. Hanke kuului EU COST0905 Micronutrient dense food and feed for better health – tutkimusverkostoon. Suomalainen seleenilannoitushistoria ja seleenin kierto peltoekosysteemissä on kansainvälisestikin hyvin kiinnostava tutkimusaihe ja hankkeen tulokset ovat merkittäviä niin kansainväliselle kuin kotimaiselle tutkimukselle ja sidosryhmille.

Hankkeen tulosten perusteella voidaan todeta, että lannoittamalla viljelykasveja epäorgaanisella selenaatilla saavutetaan usein tavoitteeksi asetettu siementen ja rehujen seleenipitoisuus (0,08 mg Se/kg ka = $\mu\text{g Se/g ka}$). Seleenirikastuksen onnistumisessa voi olla kuitenkin merkittäviä vaihteluita vuosien välillä. Kun maahan lisättiin Se:ä 7,2 g Se/ha (vastaa 100 kg N lannoitustasolla lisättyä seleenimäärää kun lannoitteessa 0,015 % Se/kg), ensimmäisenä koevuonna 2011 vehnän ja rapsin siemenen seleenipitoisuus oli n. 0,2 $\mu\text{g Se/g k-a}$, toisena koevuonna 2012 vain 0,07 $\mu\text{g Se/g k-a}$. Kun seleenilannoitusmäärää lisättiin,

kohosi ensimmäisenä vuonna siementen seleenipitoisuus samassa suhteessa ja oli yli 0,8 µg Se/g ka, mutta jäi toisena vuonna alle 0,3 µg Se/kg ka. Toisena vuonna kevät oli viileä ja viljelykasvien alkukehitys hidasta. Mahdollisesti tämän seurauksena vehnän ja rapsin seleeninoton tehokkuus eli kasvimassaan sitoutuneen lannoiteseleenin osuus jäi alhaiseksi. Otto oli maksimissaan vuonna 2011, jolloin 30 – 45 % lisätystä lannoiteseleenistä sidottiin kasvimassaan, kun vuonna 2012 osuus oli vain hieman yli 8 %:a. Kun maa autoklavoitiin kasvihuonekokeissa, nousi seleenin oton tehokkuus yli 80%:iin. Tämä johtui mahdollisesti orgaaniseen aineeseen tai muuten maahan sitoutuneen seleenin vapautumisesta kasvien käyttöön. Rapsi oli vehnää hieman tehokkaampi seleeninotossa erityisesti korkeammalla seleenilisäyстasolla. Seleeninkäytön tehokkuus eli sato-osiin kertyvän seleenin osuus vaihteli 7-15 %:sta vuonna 2011 yli 30 %:iin vuonna 2012. Tulokset antavat viitteitä siitä, että seleenin oton epäonnistuttua pyrkii kasvi siirtämään suuremman osan ottamastaan seleenistä siemeniin. Kohonnut seleenin käytön tehokkuus ei nostanut siementen seleenipitoisuutta kuitenkaan vuoden 2011 tasolle. Seleeninotossa rapsi oli hieman tehokkaampi erityisesti korkeammalla seleenilisäyстasolla. Sen sijaan seleeninkäytön tehokkuudessa eli seleenin siirtymisessä siemenosiin, ei havaittu lajien välisiä eroja. Alhainen siirtymistehokkuus siemeniin onkin seleeninkäytön tehokkuuden pullonkaula vehnällä ja erityisesti rapsilla.

Siemensatokasveja tehokkaampi seleenin ottaja oli nurmet. Erityisesti nurmiheinien seleenipitoisuus kohosi myös viileänä keväänä 2012 yli 0,4 mg Se/kg ka (7,2 g Se/ha) ja korkeammalla lannoitustasolla jopa 1,1 mg Se/kg ka (25 g Se/ha). Ensimmäisen ja toisen sadon seleenipitoisuudessa ei ollut merkittävää eroa, mutta seleenin käytön tehokkuudessa sen sijaan oli. Ensimmäisessä sadossa lannoiteseleenistä päätyi korjattavaan satoon yli 46 %, mutta toisessa sadossa vain 14 %:a. Apilan seleenipitoisuus oli nurmiheiniä merkittävästi alhaisempi. Tämä saattoi johtua lajien välisestä eroista seleenin ottossa tai apilan alkukehityksen hitaudesta. Lannoitteesta lisätty seleniitti pelkistyy maassa etenkin sateisen kasvukauden aikana voimakkaammin sitoutuvaksi seleniitiksi ja voi olla, että nopealla viljelykasvien kasvuun lähdöllä varmistetaan niin korkea sato kuin tehokas seleeninotto.

Siemensatokasvien sadon mukana poistuu pellolta vuosittain 7 -15 %:a lannoiteseleenistä ja merkittävä osa palautuu takaisin peltoon orgaanisessa muodossa puintijätteeseen ja juuriin sitoutuneena (5-50 %). Kasvihuonekokeiden perusteella voidaan todeta, että orgaanisen aineen hajoamisnopeus vaikuttaa seleenin käyttökelpoisuuteen seuraavalle kasville. Voidaan kuitenkin todeta ettei orgaaniseen aineeseen sitoutunut seleeni ole juurikaan käyttökelpoista kasveille ja siemensadon seleenipitoisuus jää alhaiseksi. Myös lietelannan seleeni ei ole juurikaan kasveille käyttökelpoista vaan epäorgaaninen seleniittilannoitus tarvitaan kohottamaan sadon seleenipitoisuutta.

Mihin lannoiteseleeni lopulta päättyy pellolla? Tulosten perusteella voidaan todeta, että merkittävä osa epäorgaanisesta seleenistä sidotaan kasveissa orgaaniseksi yhdisteiksi ja palautuu puintijätteessä peltoon. Yli puolet jää epäorgaanisena seleeninä maahan ja pelkistyy todennäköisesti verrattain nopeasti kasveille käyttökeltvottomaksi seleniitiksi tai/ja käytetään maan mikrobien toimesta ja/tai sidotaan mikrobimassaan. Puintijätteessä peltoon palautuva seleeni näkyi Kotkaniemen pitkäaikaisessa lannoituskokeessa muokauskerroksen kohonneena orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n pitoisuutena, kun peltoon oli lisätty 20 vuoden ajan 140 kg N/vuosi NPK-lannoitteina. Rehuohralle ja – kauralle suositeltavalla 80 kg N lannoitustasolla ei pintamaan Se-pitoisuuksissa havaittu muutoksia. Kun orgaanisen Se lisääntyminen suhteutetaan maamassaan, on nousu 0.006 promillea. Tulokset osoittavat, että maahan takaisin kertynyt Se pystytään käytetyllä analytiikalla löytämään, mutta Se:n määrä maassa ja siinä havaitut muutokset eivät ole ympäristön kannalta ongelmallisia.

1 TAVOITTEET

Hankkeen tavoitteena oli selvittää lannoitteissa lisätyn Se:n kiertoa peltoekosysteemissä sekä tarkastella eri viljelykasvien seleeninoton tehokkuutta ja Se:n rikastumista sato-osiin. Tulosten perusteella arvioidaan joka vuotuisen Se-lannoituksen mahdollisia ympäristövaikutuksia sekä pohditaan tehokkainta tapaa rikastaa Se:ä elintarvikeketjuun.

2 HANKKEEN ERI OSAPUOLET JA YHTEISTYÖ

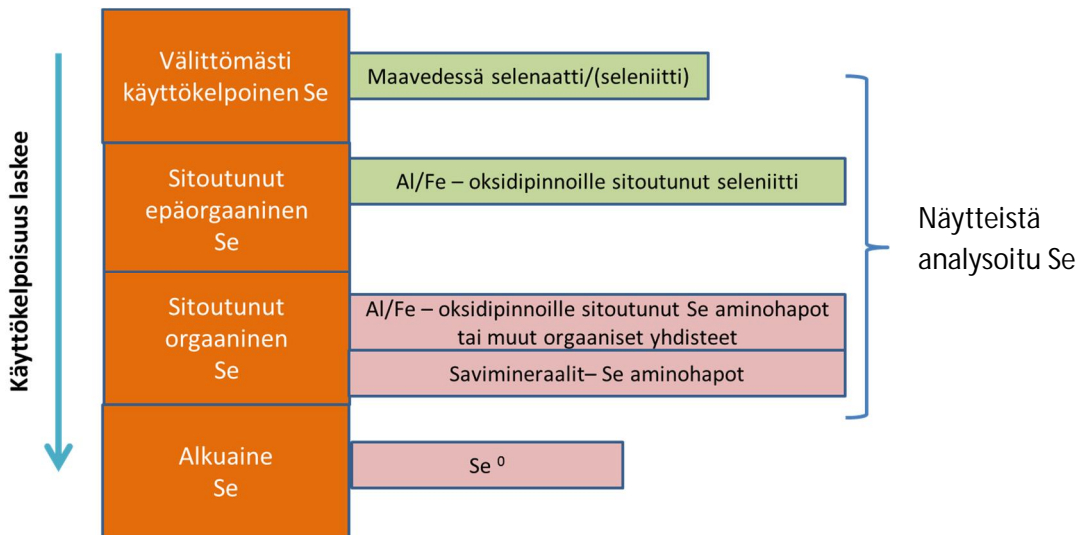
Hankkeen toteutti Helsingin yliopiston maataloustieteiden ja elintarvike- ja ympäristötieteiden laitosten tutkijat (Mervi Seppänen, Helinä Hartikainen, Martina Metzger, Päivi Ekholm, Tuula Sontag-Strohm, Anthony Owusu-Sekuyere) ja tekninen henkilökunta (kasvihuone- ja laboratorio). Hankkeessa työskenteli pääsääntöisesti yksi jatko-opiskelija (Nashmin Ebrahimi, Nesslingin säätiö). Hankkeen kaksivuotiset peltokokeet toteutettiin Yara Oy:n Kotkaniemen tutkimusasemalla Vihdissä ja kasvihuonekokeet Viikissä. Osa maanäytteiden analysoinnista hankittiin ostopalveluna Metropolilab Oy:ltä. Hankkeen ohjausryhmään kuului kolme jäsentä Maa- ja metsätalousministeriön seleeniseurantaryhmästä ja jäseniä rehu- ja lannoiteteollisuudesta sekä EVIRA:sta. Hanke kuului EU COST0905 Micronutrient dense food and feed for better health – tutkimusverkostoon, joka kautta kansainvälistä yhteistyötä.

3 TULOKSET

Maan seleenipitoisuus

Pitkäaikaisen Se-lannoituksen vaikutusta maan seleenipitoisuuteen selvitettiin Kotkaniemen tutkimusasemalta kerätyistä maanäytteistä. Peltokokeessa samoja lannoitustasoja (0, 80, 160 kg N/ha, NPK-lannoitteena) oli käytetty lannoitteiden Se-rikastuksen alkamisvuodesta 1984 lähtien. Tutkimuksessa analysoitiin maan seleenipitoisuuksia muokkauskerroksessa (0-5 cm) sekä jankossa (30 cm) 20 vuoden Se-lannoituksen jälkeen. NPK lannoitteiden Se-pitoisuudet ovat vaihdelleet tuona aikana 6 – 16 mg Se lannoitekiloa kohti. Kahdenkymmenen vuoden aikana maahan oli siten lisätty NPK-lannoitteiden Se-tasojen muutokset ja N-tasot huomioiden 75 – 150 g Se/ha.

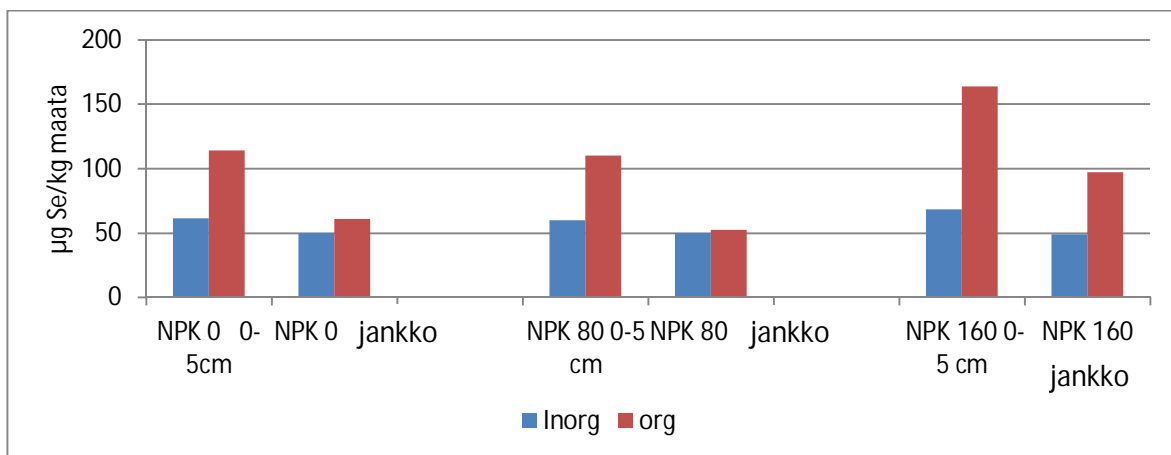
Hankkeen ensimmäisessä vaiheessa kehitettiin maanäytteiden Se-analytiikkaa, jotta pienet Se-lisäysmäärät pystyttäisiin havaitsemaan. Lisäksi haluttiin selvittää maan epäorgaanisen ja orgaanisen Se:n määrä. Maanäytteiden valmistamisessa päätettiin käyttää kahta peräkkäistä uuttoa, joista ensimmäinen, K_2HPO_4 – uutto vapauttaa analysoitavaksi oksidipinnoille sitoutuneen epäorgaanisen Se:n ja sitä seuraava NaOH-uutto orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n. Kasveille käyttökelpoista Se on maavedessä selenaattina sekä kiinnittyneenä Al/Fe-oksidiin pinnoille (Kuva 1). Orgaaniseen ainekseen sitoutunut Se on kasveille käyttökeltvottomasta Se:stä. Näytteiden uutot tehtiin Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitoksella (HY) ja analysoitiin Metropolilab Oy:ssä. Ongelmana oli näytteiden alhainen Se-pitoisuus ja sen vuoksi näytteistä määritettiin kokonais-Se koko näytteestä sekä orgaaniseen fraktioon sitoutunut Se. Epäorgaaninen Se todettiin laskennallisesti erotuksena.



Kuva 1. Maan Se:n eri muodot ja niiden käyttökelpoisuus kasveille (vihreä: käyttökelpoinen, punainen: käyttökeltoton) sekä maanäytteistä analysoidut Se-muodot.

Kotkaniemen pitkäaikainen lannoituskoe

Pitkäaikaisista NPK-lannoituskokeista (20 vuotta 0, 80, 160 kg N/ha/v) otetuista maanäytteistä analysoitiin Se-pitoisuudet kahdesta syvyydestä, muokkauskerroksesta (0-5 cm) sekä jankosta (30 cm) (Kuva 2). Orgaaniseen fraktioon sitoutuneen Se:n määrä kasvoi muokkauskerroksessa korkeammalla N-tasolla 114 → 160 µg Se/kg maata. Käytettäessä vuosittain tavanomaista rehuohran ja -kauran typpilannoitustasoa (80 kg N/ha) orgaaniseen ainekseen sitoutuneen Se:n määrässä ei havaittu muutosta. Epäorgaanisen Se:n määrä ei kohonnut kummallakaan lannoitustasolla. Myöskään jankossa ei maan epäorgaanisen Se-pitoisuus kohonnut, mikä osoittaa, ettei lannoite-Se huuhtoutumista syvempiin maakerroksiin ollut tapahtunut. Korkeammalla lannoitustasolla orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se-pitoisuus jankossa oli hieman kohonnut. Koska sitoutunut Se liikkuu maassa huonosti, epäillään kohonneen pitoisuuden johtuvan muokkauskerroksen maa-aineksen sekoittumisesta joko näytteenoton tai kynnön yhteydessä. Tulokset tukevat aiempia havaintoja siitä, että maasta lannoite-Se löytyy kasvukauden jälkeen orgaaniseen aineeseen sitoutuneena ja siten kasveille käyttökeltottomassa muodossa.



Kuva 2. Kotkaniemen pitkäaikaisen NPK-lannoituskokeen maanäytteiden (muokkauskerros 0-5 cm ja jankko 30 cm) epäorgaanisen Se ja orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se määrä.

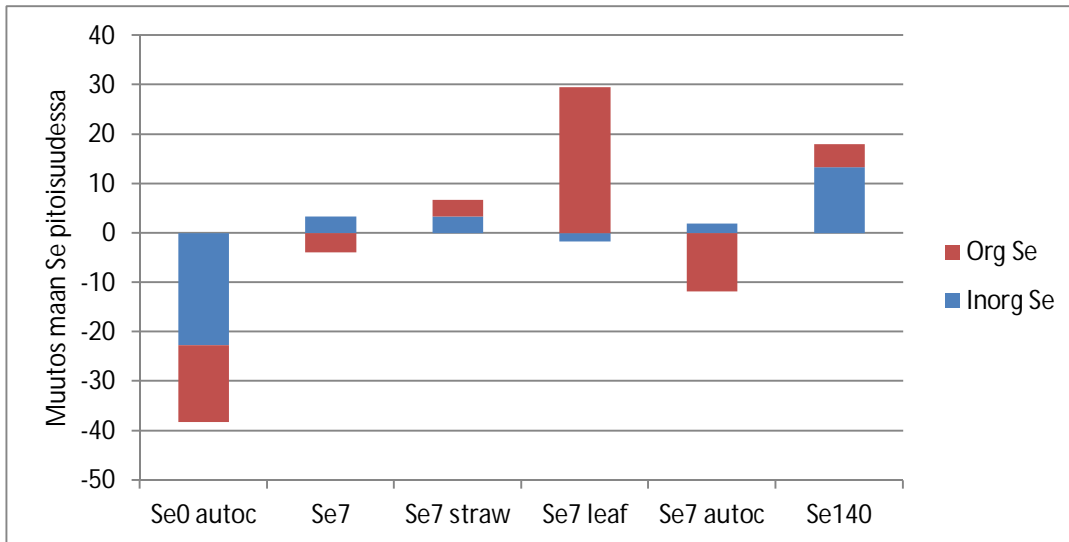
Kasvihuonekokeet

Kasvihuonekokeessa selvitettiin, kuinka käyttökelpoista puintijätteessä maahan palautuva Se on kasveille. Lisäksi osassa koejäsenistä maa autoklavoitiin, jotta maahan sitoutuneen Se:n määrää ja käyttökelpoisuutta voitaisiin selvittää (Taulukko 1). Kokeen päätteeksi maahan jääneen epäorgaanisen ja orgaanisen Se määrää mitattiin ja laskettiin Se- tase kuvaamaan Se käyttökelpoisuutta (Kuva 3).

Taulukko 1. Puintijätteeseen sitoutuneen Se käyttökelpoisuutta selvittävän kasvihuonekokeen koejäsenet.

	Koejäsen	Tavoite
Se0	Ei seleenilisäystä	Kontrolli. Peltomaan olemassa oleva Se taso
Se7	Epäorgaaninen 7 µg Se/kg maata	
Se0 autok	Ei seleenilisäystä, autoklavoitu maa	Maahan sitoutuneen Se:n käyttökelpoisuus
Se7 autok	Epäorgaaninen 7 µg Se/kg maata, autoklavoitu maa	
Se0 lehdet	Ei seleenilisäystä, lehdet	Kontrolli. Seleenitöntä lehtimassaa lisättiin astiaan sama määrä kuin vastaavassa Se lannoituskäsitelyssä
Se7 lehdet	Orgaaninen Se, lehdet 7 µg Se/kg maata	Seleenipitoista lehtimassaa lisättiin astiaan siten, että seleenilisäykseksi saatiin 7 µg Se/kg maata
Se0 olki	Ei seleenilisäystä, olki	Kontrolli. Seleenitöntä olkimassaa lisättiin astiaan sama määrä kuin vastaavassa Se lannoituskäsitelyssä
Se7 olki	Orgaaninen Se, olki 7 µg/kg maata	Seleenipitoista olkimassaa lisättiin astiaan siten, että seleenilisäykseksi saatiin 7 µg Se/kg maata
Se140	Epäorgaaninen 140 µg Se/kg maata	

Kasvihuonekokeissa kasvien Se- otto oli tehokasta ja maan Se-pitoisuus olikin kokeen jälkeen osassa koejäsenistä alentunut (Kuva 3). Erityisesti maan orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrä laski maan autoklavoinnin seurauksena. Maan autoklavointi vapautti Se:ä, mikä nähtiin negatiivisina Se-taseina Se0 autok ja Se7 autok -käsitelyissä. Sen sijaan Se-pitoisen lehtimassan käyttö (Se7 leaf) lisäsi huomattavasti maan orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrää ja korkea epäorgaaninen Se lisäys (Se140) puolestaan epäorgaanisen Se määrää maassa. Seleenipitoisen olkimassan lisääminen ei kohottanut orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrää samalla tapaa kuin lehtimassan lisääminen. Syytä havaintoon ei tiedetä. Voi olla, että maaunton yhteydessä olkimassaan sitoutunutta Se:ä ei onnistuttu uuttamaan riittävän hyvin.



Kuva 3. Muutos maan epäorgaanisen ja orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrässä kasvihuonekokeen aikana. Koejäsenet on kuvattu taulukossa 1.

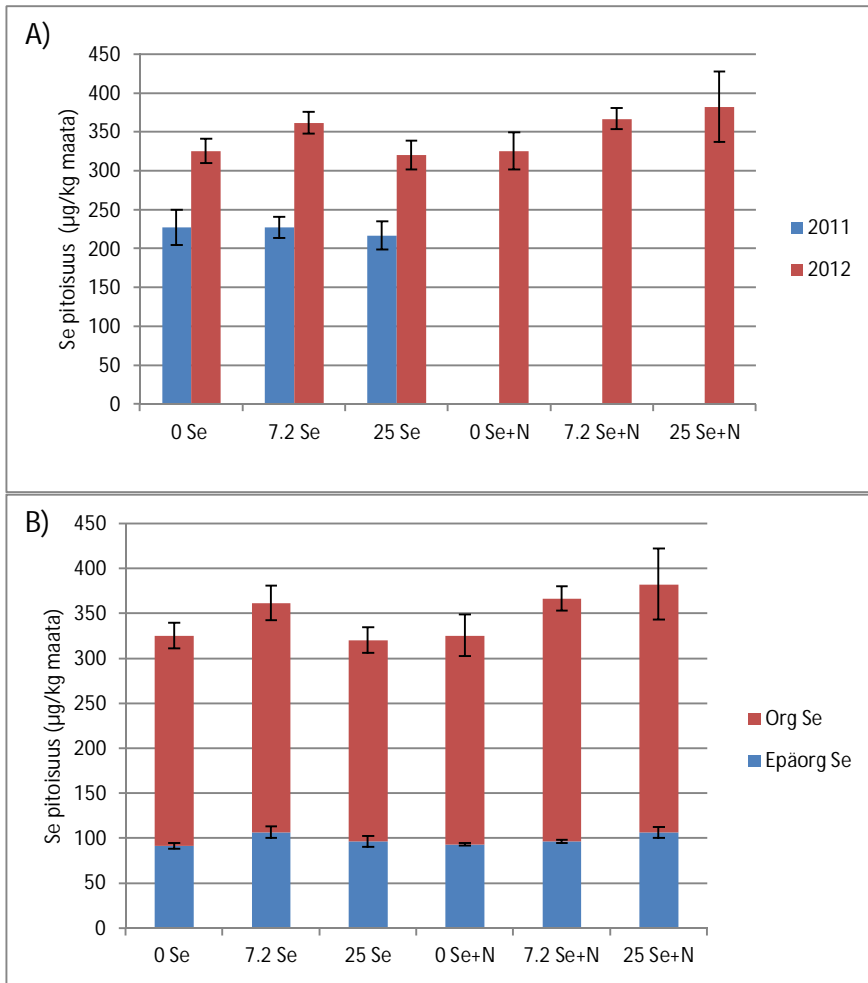
Peltokokeet Kotkaniemen koetilalla

Peltokokeissa selvitettiin viljelykasvien (vehnä, rapsi ja nurmet) Se-oton ja –käytön tehokkuutta. Koejäsenet on esitelty taulukossa 2. Toisena koevuonna annettiin Se-käsittelyjen lisäksi lehtilannoitus (40 kg N/ha). Lehtilannoituksella haluttiin selvittää typen vaikutusta Se käytön tehokkuuteen ja erityisesti tehostuuko Se:n kulkeutuminen siemeniin.

Taulukko 2. Kotkaniemen peltokokeen koejäsenet (2011-2012).

	Koejäsen	Tavoite
Se0	Ei Se lisäystä	
Se7	7,2 g Se/ha	
Se25	25 g Se/ha	
Se7 + N	7,2 g Se/ha + N lehtilannoitus	Typen vaikutus Se mobilisaatioon (vain 2012)
Se20 + N	25 g Se/ha + N lehtilannoitus	Typen vaikutus Se mobilisaatioon (vain 2012)

Peltokokeiden jälkeen otettiin maanäytteet muokkauskerroksesta. Näytteistä analysoitiin vuonna 2011 kokonais-Se ja vuonna 2012 analyysia tarkennettiin siten, että epäorgaaninen ja orgaaninen Se fraktioitiin ja analysoitiin erikseen. Vuonna 2011 kasvien Se:n otto oli tehokkaampaa (Kuva 6a) mikä saattoi näkyä myös alempana maan Se-pitoisuutena (Kuva 4a). Vuonna 2012 maan seleenipitoisuus kohosi hieman Se-lisäysten myötä erityisesti koejäsenillä, jotka saivat myös N:ä lehtilannoituksena. Maanäytteen fraktioidin perusteella voidaan todeta, että lisääntyminen johtui orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrän lisääntymisestä epäorgaanisen fraktion pysyessä muuttumattomana (Kuva 4b). On hyvin todennäköistä, että kohonnut orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrä johtuu maahan kasvukauden aikana ja tuleentumisvaiheessa pudonneista kasvijätteistä.



Kuva 4. a) Maan kokonais Se-pitoisuus peltokokeiden jälkeen vuosina 2011-12 sekä b) maan Se:n jakautuminen epäorgaaniseen ja orgaaniseen fraktioon vuonna 2012 kahdella Se-lannoitustasolla (7.2 ja 25 g Se/ha).

Seleniumipitoisuus sekä seleeninoton ja -käytön tehokkuus

Viljelykasvien eroja niiden Se-pitoisuudessa sekä Se-oton ja -käytön tehokkuudessa selvitettiin Kotkaniemessä vuosina 2011-12 järjestetyissä peltokokeissa. Ensimmäisenä koevuonna koekasveina olivat vehnä ja rapsi, toisena vuonna edellisten lisäksi nurmi-apila-seos. Toisena koevuonna lisättiin Se mobilisaation tutkimiseksi N-lehtilannoitus yhdeksi koejäseneksi (Taulukko 2). Selenin oton dynamiikkaa tutkittiin analysoimalla kasvin ottama Se (lehdet, varret, juuret, siemenet, siemenkuoret/lidut) kolme-neljä kertaa kasvukauden aikana. Yhteensä Se analyysyjä tehtiin jokaisen koevuoden aikana noin 2000 kpl. Koevuodet poikkesivat sääoloiltaan merkittävästi (Taulukko 3). Vuonna 2011 kasvukauden aikana kertyi lämpösummaa n. 1550 ja vuonna 2012 n. 1280 astetta. Myös sateiden ajoittumisessa oli vuosien välillä eroa.

Taulukko 3. Lämpösummakertymä ja sademäärä (mm) koevuosina 2011-2012 Kotkaniemen koetilalla.

	2011		2012	
	Lämpösumma	Sademäärä	Lämpösumma	Sademäärä
Huhtikuu	46,2	31,4	30,6	52,4
Toukokuu	204,3	18,5	198,8	34,6
Kesäkuu	547,7	53,1	431,1	75,6
Heinäkuu	1005,9	117,4	805,9	49,7
Elokuu	1340,5	53,6	1096,9	55,1
Syyskuu	1553,8	94,5	1276,5	133,5

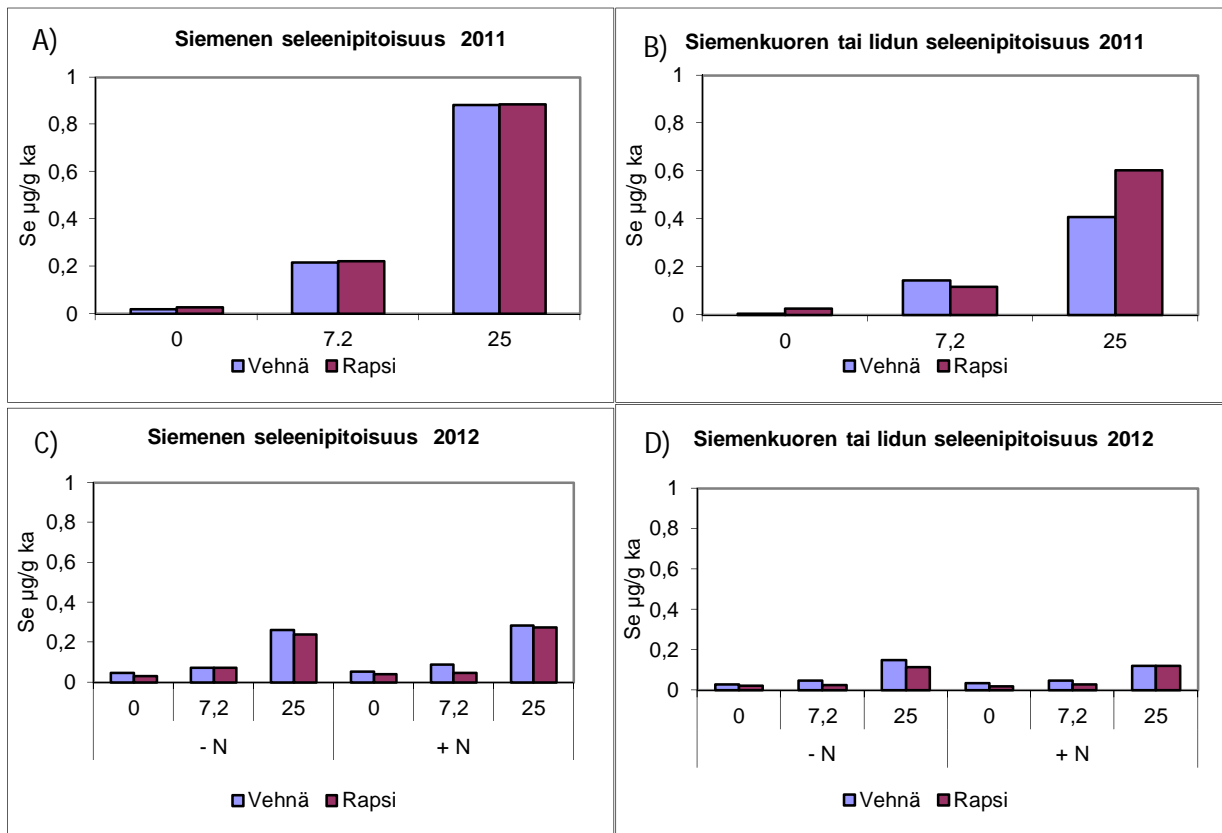
Kumpi on tehokkaampi seleenin rikastaja vehnä vai rapsi?

Vehnän ja rapsin siementen Se-pitoisuus ei eronnut toisistaan merkittävästi kumpanakaan koevuonna (Kuva 5 a, c) vaan koko kasvin ja siemenen Se-pitoisuus oli suoraan verrannollinen lisätyn Se:n määrään. Siementen Se-pitoisuudessa oli sen sijaan vuosien välillä merkittävää vaihtelua. Vuonna 2011 sama siementen Se-pitoisuus (0,2 µg/g ka) saavutettiin lisäämällä 7,2 g Se/ha kun taas vuonna 2012 vastaavaan Se-rikastumiseen vaadittiin 25 g Se/ha. Jos siementen Se-pitoisuuden tavoitteena pidetään yleisesti hyväksyttyä 0.08 – 0.1 mg Se/kg ka tasoa, oli siementen Se-pitoisuus vuonna 2011 korkeammalla Se lisäystasolla arveluttavan korkea (n. 0.9 µg Se/g ka) niin vehnällä kuin rapsillakin (Kuva 5a). Tulee kuitenkin huomioida, että vastaavia vehnän siemenen Se-pitoisuuksia mitataan normaalissa peltoviljelyssä esimerkiksi Kanadassa (Zhu ym. 2009).

Merkittävä osa kasvin ottamasta Se:stä jäi siemenkuoreen tai lituun eikä kulkeutunut siemeneen (Kuva 5 b, d). Heikko kulkeutuminen siemeneen alensi myös Se käytön tehokkuutta (SeUE – Selenium use efficiency, siementen Se-pitoisuus x kuivapaino) erityisesti vuonna 2011, jolloin kasvin Se otto (biomassan Se-pitoisuus x biomassa) oli tehokasta (Kuva 6b). Se otto epäonnistui vuonna 2012, joka näkyi alhaisena Se-pitoisuutena. Tästä huolimatta suurempi osa (%) kasvin ottamasta Se:stä kulkeutui siemeneen (Kuva 6 d). Typen lisäyksellä tähkälletulo- tai kukintavaiheessa ei ollut vaikutusta kasvin Se-ottoon. Lisätyypen vaikutusta tutkittiin vuonna 2012, jolloin kasvien Se-pitoisuus jäi erittäin alhaiseksi. Riittävän typensaannin on havaittu vaikuttavan positiivisesti monien hivenaineiden ottoon ja kuljetukseen. Norjassa tehdyissä peltokokeissa typpilisäys paransi kasvien Se-ottoa Govasmark (2005).

Lannoitteessa annetun Se:n ja kasvin ottaman sekä siemeneen siirtyneen Se:n määrän perusteella laskettiin Se:n oton tehokkuus (Kuvat 6 a, c) sekä Se:n käytön tehokkuus (Kuvat 6b, 6d). Vuosien välinen vaihtelu Se:n oton tehokkuudessa oli suurta. Vehnä otti lisäystä lannoite-Se vuonna 2011 30 % ja rapsi jopa 45 % (Kuva 6a), kun taas vuonna 2012 vastaavat luvut olivat molemmilla lajeilla noin 4 – 8 %:a (Kuva 6b). Tulos tarkoittaa sitä, että ensimmäisenä koevuonna merkittävä osa lannoite-Se sitoutui kasvimassaan ja palautui puintijätteessä peltoon kun taas toisena vuonna valtaosa jäi maahan epäorgaaniseen muotoon. Vaikka lannoite-Se:n reaktioita maassa ei tarkoin tunneta, voidaan päätellä, että maahan jäänyt seleniitti pelkistyy verrattain nopeasti seleniitiksi, jonka käyttökelpoisuus kasveille on alhainen. Kasvien alkukehitys oli vuonna 2012 hidasta. Heinäkuussa oli lämpösummaa kertynyt 200 astetta vähemmän kuin edellisellä vuonna (Taulukko 3) mikä saattoi viivästyttää juurten kehittymistä ja Se:n ottoa. Lannoite-seleniitti saattoi olla kasvien aktiivisen ravinteiden oton aikaan jo merkittävältä osin pelkistynyt seleniitiksi, mikä vaikeutti Se:n ottoa. Kasvit pystyvät ottamaan seleniittiä fosfaattitransporttereilla, mutta se ei kulkeudu juurista muihin kasvinosiin. Tarkasteltaessa juuriin kertyneen Se:n määrää, ei vuosien välillä havaittu kuitenkaan eroja: kasvin ottamasta Se:stä molempina vuosina 6-8 % jäi juuriin. Kasvien seleniitin ja seleniitin hyödyntämistehokkuudessa on kuitenkin merkittäviä eroja. Seppänen ym. (2010, 2015) havaitsivat peltokokeissa lehtilannoitteena

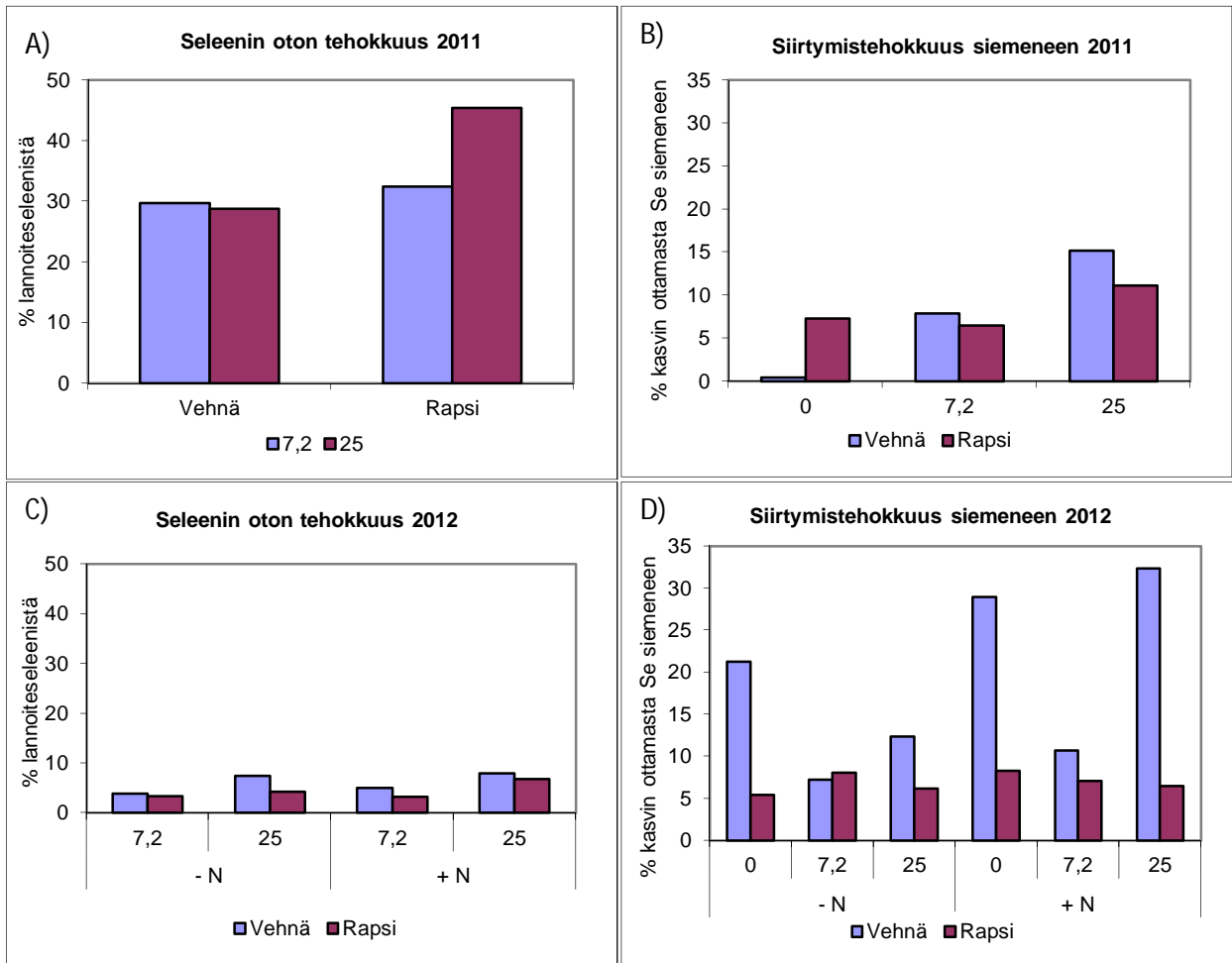
lisätyn seleniitin käyttökelpoisuuden olevan erittäin alhainen ja joissakin tapauksissa jopa häiritsevän seleniitin hyödyntämistä.



Kuva 5. Vehnän ja rapsin siementen ja siemenkuoren tai lidun Se-pitoisuus vuosina 2011 ja 2012 kahdella Se-lannoitustasolla (7.2 ja 25 g Se/ha).

Kasvihuoneessa rapsin Se:n otton tehokkuus oli jopa 80 % (Kuva 6a). Koska maassa oli tarjolla runsaasti käyttökelpoista Se:ä, pysyi koko kasvin Se-pitoisuus verrattain korkeana. Myös aiemmissa kasvihuonekokeissa on havaittu, että kasvi ottaa Se:ä koko kasvun ajan, mikäli käyttökelpoista Se:ä on tarjolla (Seppänen ym. 2015). Pelto-oloissa sen sijaan Se otto ajoittuu pensomis- tai ruusukevaiheeseen, jolloin mitattiin niin tässä kuin aiemmissa kokeissa (Seppänen ym. 2010) korkeimmat Se-pitoisuudet. Biomassan kertyminen myöhemmässä vaiheessa johtaa Se-pitoisuuden laimenemiseen, mikäli käyttökelpoista seleniattia ei ole kasvien otettavissa.

Selenin siirtymistehokkuus siemeneen oli tehokkaampaa, kun Se-pitoisuus kasvissa oli alhainen (Kuvat 6c, 6d). Siirtymistehokkuus oli vuonna 2011 n. 6 – 15 % ja vuonna 2012 vehnällä jopa 32 %. *Brassica*-suvun kasvilajit luokitellaan Se:n sekundäärisiksi kerääjiksi ja siten ne pystyvät ottamaan Se:ä tehokkaasti ja sietämään korkeita Se-pitoisuuksia ilman häiriöitä kasvussa ja kehityksessä (Zhu ym. 2009). Tämä johtuu niiden erilaisesta Se aineenvaihdunnasta yksisirkkasiin kasveihin verrattuna. Tässä tutkimuksessa rapsin Se otto oli tehokasta erityisesti korkeammalla Se-lannoitustasolla jolloin jopa 45 % lannoite-Se sidottiin kasvimassaan (Kuva 6a, Taulukko 4). Sen sijaan siirtymistehokkuus siemeneen oli suurempi vehnällä. Sekä pelto- että kasvihuonekokeissa havaittiin, että rapsin Se käytön tehokkuutta voitaisiin parantaa merkittävästi, jos siirtymistä siemeneen voitaisiin tehostaa.



Kuva 6. Vehnän ja rapsin seleeninoton tehokkuus eli kasvimassaan sidotun lannoite-Se:n osuus (a, c) ja seleenin siirtymistehokkuus siemeneen eli siemeneen kertyvän lannoite-Se osuus (b, d) vuosina 2011 ja 2012 kahdella eri Se-lannoitustasolla (7.2 ja 25 g Se/ha).

Kotkaniemen pitkäaikaisesta lannoituskokeesta saatujen tulosten perusteella maan orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n määrä voi lisääntyä 20 vuotta kestäneen Se-lannoituksen seurauksena maamassassa n. 0.006 promillea (Kuva 2). Myös Keskinen ja Hartikainen (2010) ja Keskinen ym. (2011) havaitsivat maan orgaanisen Se:n lisääntyvän 14 vuoden Se-lannoitushistorian seurauksena. Suurimmillaan lannoite-Se:stä palautuu puintijätteessä orgaaniseen aineeseen sitoutuneena vehnällä n. 25 % ja rapsilla 42-49 % (Taulukko 4). Tämä tarkoittaa Se lisäsmäärästä riippuen sitä, että orgaaniseen aineeseen sitoutunutta Se:ä palautui peltoon maksimissaan 1,7 – 12 g /ha. Vuonna 2012, jolloin Se otto oli tehotonta, palautui peltoon vastaavasti 0,18 – 3 g Se/ha.

Taulukko 4. Lannoiteseleenin palautuminen peltoon (% lannoite-Se) puintijätteessä vuosina 2011 ja 2012.

	g Se ha ⁻¹	Lannoite-Se:stä puintijätteessä (%)	
		Vehnä	Rapsi
2011	7.22	24.8	42.6
	25	24.8	48.5
2012	7.22	2.5	8.1
	25	7.5	9.5
	7.22 +N	4.8	3.6
	25 + N	6	11.6

Puintijätteeseen sitoutuneen Se:n käyttökelpoisuus

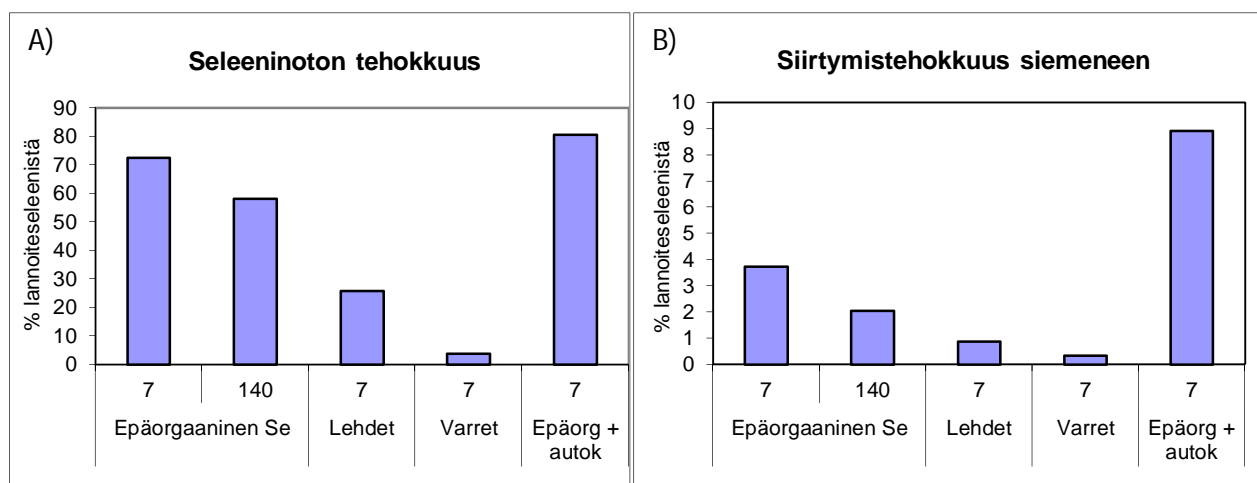
Kasvihuonekokeissa selvitettiin kasvijätteeseen sitoutuneen Se:n käyttökelpoisuutta kasveille sekä mitattiin Se-lisäyksen vaikutusta maamikrobien aktiivisuuteen. Kokeissa maahan lisättiin joko kasvimassaan (rapsin varsiin tai lehtiin) sitoutunutta Se:ä saman verran kuin epäorgaanista lannoite-Se (Taulukko 2). Tulosten perusteella voidaan todeta, että kasvimassan hajoamisnopeus vaikutti orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n käyttökelpoisuutta (Taulukko 5). Lannoitettaessa Se-rikastetulla lehtimassalla kohosi kasvinosien Se-pitoisuus hieman enemmän kuin lisättäessä Se varsiin sitoutuneena. Kasvimassa jauhettiin hienoksi jauheeksi mikä saattoi lisätä Se:n käyttökelpoisuutta kokeessa. Epäorgaanisella Se:llä lannoitettujen kasvien litujen Se-pitoisuus oli yli 3 kertaa korkeampi kuin orgaanisella Se:llä lannoitettujen. Voidaan todeta ettei puintijätteeseen sitoutunut Se ole kasveille käyttökelpoista myös tämän kokeen perusteella. Käytännössä tiedetään, että Se-lannoitus on lisättävä vuosittain jotta sadon Se-pitoisuus saadaan tavoitetasolle.

Maan autoklavointi sen sijaan lisäsi Se käyttökelpoisuutta kasveille. Autoklavointi pilkkoi maan orgaanista ainesta ja mikrobibiomassaa ja vapautti niistä Se:ä kasvien käyttöön (Taulukko 5). Seleenin vaikutusta maan mikrobitoimintaan selvitettiin myös mittaamalla maahengityksen määrää epäorgaanisen Se-lisäyksen jälkeen. Se-lisäys tai maan autoklavointi eivät vaikuttaneet merkittävästi maahengityksen määrään (Ebrahimi ym. 2015).

Kasvihuonekokeissa Se oton tehokkuus oli jopa yli 80 %:a (Kuva 7a). Tehokkainta otto oli koejäsenellä, jossa maa oli autoklavoitu. Sen sijaan lisättäessä Se-rikastettuja varsia oli oton tehokkuus vain 7 % ja lehtimassaa lisättäessä n. 25%:a. Lisättäessä hyvin korkea määrä epäorgaanista Se:ä oton tehokkuus laski alle 60 %:iin. Siirtymistehokkuus siemeneen oli kokeessa hyvin alhainen vaihdellen 0,3:sta 9:ään prosenttiin (Kuva 7b). Siirtymistehokkuuteen voi vaikuttaa muun muassa siemenen täyttymisvaiheen pituus, joka voi kasvihuoneoloissa olla merkittävästi pelto-oloja lyhyempi.

Taulukko 5. Rapsin eri kasvinosien seleenipitoisuus kasvihuonekokeissa lisättäessä kasvualustaan joko epäorgaanista seleeniä (0, 7 tai 140 µg Se /kg maata) tai orgaanisessa muodossa sitoutuneena lehtiin tai varteen (7 µg kasvimassaan sitoutunutta Se/kg maata). Maan mikrobitoiminnan vaikutusta kasvien Se ottoon selvitettiin lisäämällä koejäsen, jossa maa oli autoklavoitu ennen epäorgaanisen Se:n lisäystä.

µg Se kg ⁻¹ maata	Se pitoisuus (µg g ⁻¹ ka), siemenen täyttymisvaihe			
	Juuret	Varret	Lehdet	Lidut
0	0.018 ^c	0.030 ^{de}	0.013 ^{cd}	0.018 ^d
7	0.144 ^b	0.129 ^{bc}	0.324 ^b	0.240 ^{bc}
140	1.400 ^a	2.344 ^a	6.166 ^a	3.631 ^a
Lehdet				
0	0.016 ^c	0.021 ^e	0.005 ^{cd}	0.005 ^e
7	0.002 ^d	0.059 ^{cd}	0.141 ^b	0.060 ^{cd}
Varret				
0	0.015 ^c	0.015 ^e	0.012 ^d	0.002 ^e
7	0.001 ^d	0.003 ^f	0.016 ^c	0.074 ^{cd}
Epäorg + autok				
0	0.018 ^c	0.019 ^e	0.013 ^{cd}	0.027 ^d
7	0.172 ^b	0.155 ^b		0.372 ^b
SE	0.051	0.066	0.197	0.062



Kuva 7. Rapsin seleenin otton tehokkuus ja siirtymistehokkuus siemeneen kasvihuonekokeissa. Koejäsenet kuvattu taulukossa 2.

Nurmikasvien seleeninoton tehokkuus

Nurmiheinien ja –palkokasvien Se otton tehokkuutta tutkittiin peltokokeessa vuonna 2012. Vehnästä ja rapsista poiketen kohosi nurmisadon Se-pitoisuus verrattain korkealle tasolle, alemmalla Se-lisäyстasolla timotein Se-pitoisuus oli 0,43 µg Se/g ka (Taulukko 6). Toisen sadon Se-pitoisuus oli hieman alhaisempi. Tiloilta kerätyissä näytteissä nurmirehun Se-pitoisuuden vaihteluväli on ollut 0,03 – 0,37 µg Se/g ka Se-lannoitusmäärien vaihdeltaessa 6 – 15 g Se/ha (Eurola ym. 2011). Timotein Se-pitoisuus oli kokeessa moninkertainen verrattuna apilan pitoisuuteen (Taulukko 6). Ero voi johtua

kasvilajien välisestä kilpailusta sekä apilan hitaammasta alkukehityksestä. Myös apilan juurten Se-pitoisuus on huomattavan korkea kun sitä verrataan vehnään ja rapsiin.

Taulukko 6. Timotein ja apilan juurten sekä lehtimassan Se-pitoisuus ensimmäisessä ja toisessa sadossa vuonna 2012.

	Se (g ha ⁻¹)	Se pitoisuus (µg g ⁻¹ ka)		
		juuret (timotei ja apila)	Timotei	Apila
I sato	7.22	0.28	0.43	0.16
	25	0.31	1.10	0.42
II sato	7.22	0.34	0.35	0.18
	25	0.60	1.07	0.52

Nurmikasveilla Se:n otton tehokkuus oli korkea ensimmäisessä sadossa, jopa yli 46 %:a lannoite-Se päätyi rehumassaan (Taulukko 7). Vaikka toisen sadon Se-pitoisuus oli korkea, johti alhaisempi satotaso heikkoon Se otton tehokkuuteen (10-14 %). Apilan osuus nurmirehun Se:n otossa oli alhainen 0,5 – 1,5 %:a. Tulokset viittaavat siihen, että siemensatokasveihin verrattuna pystytään nurmien Se-lannoituksella turvaamaan karkearehua syövien tuotantoeläinten Se saanti tehokkaammin. Toisessa sadossa Se otton tehokkuus on alhainen ja merkittävä osa lannoite-Se:stä jää peltoon. Tästä huolimatta Se lannoitus kannattaa, sillä se takaa tuotantoeläinten tasaisen Se saannin koko sisäruokintakauden ajan.

Taulukko 7. Timotein ja apilan Se otton tehokkuus ensimmäisessä ja toisessa sadossa vuonna 2012.

Se (g ha ⁻¹)	Seleenin otton tehokkuus (% lannoiteseleenistä)			
	I sato		II sato	
	timotei	apila	timotei	apila
7.22	46.6	0.7	14.1	0.5
25	33.6	0.9	10.3	1.5

Orgaanisten lannoitteiden Se:n käyttökelpoisuus

Typpilannoitteiden korkea hinta sekä pyrkimykset maataloustuotannon kestävään tehostamiseen ja ravinteiden kierrätykseen on lisännyt orgaanisten lannoitteiden kuten liete- ja karjanlannan käyttöä tiloilla. Kasvihuonekokeissa selvitettiin vehnän, härkäpavun ja valkolupiinin Se otton tehokkuutta kun NPK lannoitteiden tyyppistä korvattiin 50 %:a lietelannan tyyppillä (Taulukko 8) (yhteistyössä MMM KESTE – hanke 2012-14). Siementen Se-pitoisuus oli lietekäsittelyillä koejäsenillä lähellä kontrollikasvien tasoa (0,03 -0,07 µg Se/g ka) kun NPK-lannoitetuissa koejäsenissä pitoisuus oli 0,10-0,14 µg Se/g ka. Myös seleenin otton tehokkuus oli lietekäsittelyissä alhainen (8 – 15 %) verrattuna NPK lannoitekäsittelyyn (23-44 %). Lietteen orgaaniseen aineeseen sitoutunut Se ei siten ollut kasveille käyttökelpoista. Tutkittavista kasvilajeista oli Se otton tehokkuus tässä kokeessa korkein härkäpavulla. Korvattaessa peltomaa inertillä kvartsihiekalla nousi vehnällä Se:n otton tehokkuus vain hieman (8 → 12 %) ja maahan sitoutuneen Se:n määrä vaikutti vähäiseltä. Härkäpapu ja valkolupiini eivät menestyneet kvartsihiekassa eivätkö tuottaneet kokeen aikana siemensatoa

Taulukko 8. Härkäpavun, valkolupiinin ja vehnän siementen seleenipitoisuus sekä seleenioton tehokkuus korvattaessa 50 % lannoitetyypistä lietteen tyyppillä. Härkäpapu ja valkolupiini eivät tuottaneet siemeniä korvattaessa maa kvartsihiekalla.

Kasvilaji	Käsittely	KA (g)	µg Se/g ka	Se otto	Seleenin oton tehokkuus (SeUE %)
Härkäpapu	Kontrolli (maa)	1,12 ± 0,0	0,01 ± 0,0	0,01 ± 0,0	-
	NPK (N 100%)	2,33 ± 0,4	0,13 ± 0,0	0,31 ± 0,0	43,5
	Liete (N 50%)+ NPK (N 50 %)	1,71 ± 0,1	0,04 ± 0,0	0,08 ± 0,0	15,4
	Kvartsihieikka + Liete (N 50%) + NPK (N 50 %)	-	-	-	-
Valkolupiini	Kontrolli (maa)	0,98 ± 0,2	0,08 ± 0,0	0,08 ± 0,0	-
	NPK (N 100%)	1,61 ± 0,1	0,10 ± 0,0	0,16 ± 0,0	23,4
	Liete (N 50%)+ NPK (N 50 %)	1,66 ± 0,0	0,03 ± 0,0	0,05 ± 0,0	11,8
	Kvartsihieikka + Liete (N 50%) + NPK (N 50 %)	-	-	-	-
Vehn'	Kontrolli (maa)	1,05 ± 0,0	0,07 ± 0,0	0,08 ± 0,0	-
	NPK (N 100%)	2,41 ± 0,1	0,14 ± 0,0	0,34 ± 0,1	38,5
	Liete (N 50%)+ NPK (N 50 %)	2,27 ± 0,1	0,05 ± 0,0	0,11 ± 0,0	8,4
	Kvartsihieikka + Liete (N 50%) + NPK (N 50 %)	1,85 ± 0,1	0,07 ± 0,0	0,13 ± 0,0	12

Toteutusvaiheen arviointi

Toteutuksessa haasteellisinta oli Se:n maa-analytiikka. Maan Se-pitoisuus on hyvin alhainen ja lisättävät määrät vähäisiä. Tätä kuvaa laskennallinen lopputulos, jossa maan orgaaniseen ainekseen kertyvän Se:n määrä maamassassa oli 0,006 promillea. Hankkeen palkkakustannuksista valtaosa käytettiin maa-analyysien kehittämiseen. Maanäytteiden fraktiointia helppoliukoiseen (0,25 M KCl), absorboituneeseen (0,1 M KH₂PO₄/K₂HPO₄ pH 8.0), orgaaniseen (0,1 M NaOH), alkuaine (0,25 M Na₂SO₃ pH 8.0) ja orgaaniseen Se ja metalliselenidifraktioihin (5% NaOCl) kehitettiin ja Se analyysi pyrittiin siirtämään ICP-OES -laitteelle. Alhaisten Se-pitoisuuksien vuoksi analyysi ei onnistunut ja päädyttiin kahteen peräkkäiseen uuttoon; KH₂PO₄ / K₂HPO₄ - uuttoon, joka vapauttaa analysoitavaksi oksidipinnoille sitoutuneen epäorgaanisen Se:n ja sitä seuranneeseen 0,1 M NaOH uuttoon, joka vapauttaa analysoitavaksi orgaaniseen aineeseen sitoutuneen Se:n. Analyysimenetelmän kehittämisestä vastanneen MMM Martina Metzlerin siirrettyä kesken hankkeen toisiin työtehtäviin, päätettiin uutot tehdä Helsingin yliopistolla ja Se-analyysit ICP-MS:llä Metropolilab Oy:ssä. Analysoitavien näytteiden lukumäärää jouduttiin karsimaan, mutta jokaisen kokeen maanäytteitä analysoitiin siten, että Se:n kierrosta ja mahdollisesta kertymisestä maan epäorgaaniseen tai orgaaniseen fraktioon saatiin hankkeen aikana tulos. Analytiikan haasteiden vuoksi Se/P kilpailua maassa sorptiokokein tai Se huuhtoutumisherkkyttä eroosiosimulaatiokokein ei pystytty toteuttamaan. Selleen huuhtoutumisherkkydestä saatiin tosin tulos Kotkaniemen pitkäaikaisten lannoitekokeiden jankon näytteitä analysoimalla.

Seleenin kierrossa yksi merkittävä osa on metyloituneet haihtuvat Se-yhdisteet. Niiden määrää mitattiin peltokokeissa 2011 sekä kasvihuonekokeissa asettamalla keräilykammiot kasvien ympärille vuorokauden ajaksi. Kertyvät määrät haihtuvia Se-yhdisteitä ovat kuitenkin pienillä Se-lisäysmäärillä niin alhaisia ettei luotettavia, mittaukseen perustuvia lukuja Se:n haihtumisesta voida esittää. Kaliforniassa, missä maaperä sisältää luontaisesti erittäin runsaasti Se:ä, kasvit haihduttavat merkittäviä määriä metyloituneita Se-yhdisteitä. Hankkeessa lisätystä lannoite-Se:stä pystyttiin jäljittämään vuodesta ja kokeesta riippuen 30-90% ja osa kadonneesta Se:stä on voitu kasvien tai maamikrobien toimesta haihduttaa ilmaan.

Yhteenvedossa esitetään laskennallisia arvioita (kasvin maksimaalinen kokonais-Se otto – kokonais-Se sadonkorjuun aikana) Se:n hävikistä kasvukauden aikana.

Hankkeessa oli lisäksi tavoitteena selvittää vihannesten käsittelytavan (keitto vs. suede vide-kypsennys) vaikutusta terveystuotteiden Se-yhdisteiden määrään. Kokeet järjestettiin suunnitelmien mukaan, mutta yhdisteiden analyysiä ei hankkeen puitteissa tehty. Hankkeen loppuvaiheessa päätettiin keskittyä maa-analysien ja lietteen orgaaniseen ainekseen sitoutuneen Se:n hyväksikäytön selvittämiseen. Tällä valinnalla saatiin Se kierrosta parempi kokonaiskuva.

Julkaisut

Tieteelliset julkaisut:

- Owusu-Sekyere, A. , Hajiboland, R. ,Kontturi, J. Ebrahimi, N.,Hartikainen, H., Seppänen, M.M 2013. Influence of selenium (Se) on carbohydrate metabolism, nodulation and growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Plant and Soil* 373 (1):541-552.
- Ebrahimi N., Hartikainen H., Simojoki A., Hajiboland R. and Seppänen M. 2015. Dynamics of dry matter and selenium accumulation in oilseed rape (*Brassica napus* L.) in response to organic and inorganic selenium treatments. Hyväksytty julkaistavaksi *Agricultural and Food Science* 1/2015.
- Seppänen, M.M., Kontturi, J., Ebrahimi, N., Hartikainen, H. 2015. The dynamics of selenium uptake and metabolism of organic selenium species in the leaves and seeds of *Brassica napus* L. Käsikirjoitus.
- Seppänen, M.M., Ebrahimi, N., Hartikainen, H. 2015. Agronomic biofortification of *Brassica* with Selenium - The fate of applied Selenium. Tulosten käsittelyvaiheessa.

Yleistajuiset julkaisut:

- Seppänen, M.M. Muistitko seleenin ? Kotieläin 2/2011. ss. 14-15.
- Seppänen, M.M., Hartikainen, H. Seleenin kierto peltoekosysteemissä. Yliökirjoitus sovittu ja valmisteilla MT 2015.

Puheet kansainvälisissä ja kotimaisissa kokouksissa:

- Seppänen M., Kontturi, J., Lopez Heras, I, Madrid, Y., Camara, C., Hartikainen, H. 2011. Translocation and biotransformation of applied selenium in Brassica and accumulation of valuable selenium compounds. 3rd International Symposium on Trace Elements and Health (TRACEL) 24.-27.5.2011, Murcia, Spain. p. 145-146.
- Hartikainen, H. 2012. Biogeochemistry of selenium and food chain quality. Food and Agriculture COST action 0905: Workshop 'Improving the composition of plant foods for better mineral nutrition'. 4-5. June 2012, ETH Zurich, Switzerland.
- Ebrahimi, N., Hartikainen, H., Hajiboland, R., Seppänen, M. 2012. The effects of organic and inorganic selenium fertilizer on photosynthesis and yield of *Brassica napus* L. 7th Scandinavian Plant Physiology Society Sep 2012, University of Tartu.

Seppänen: 'Ravinnerikkaat viljelykasvit kansanterveyden perustana'-puhe Maailman ruokapäivä- seminaari Viikki 16.10.2013.

Seppänen, Ebrahimi, Owusu-Sekuyere, Hartikainen 2013. Selenium cycle in field ecosystem. COST 0905 conference on Essential and Detrimental Trace Elements entering Food Chain via Plants. 9-13.6.2013 Ås, Norja.

Posterit kansainvälisissä kokouksissa:

Hajiboland, R., Kontturi, J., Rahmat, S., Owusu, A., Aliasgharзад, N., Hartikainen, H., Seppänen, M. 2011. Effect of Selenium supplementation in nodulated alfalfa plants. 3rd International Symposium on Trace Elements and Health (TRACEL) 24.-27.5.2011, Murcia, Spain. p. 213-214.

Ebrahimi, N., Hartikainen, H., Hajiboland, R., Seppänen, M. 2012. The effect of the selenium soil application on selenium accumulation and yield of oilseed rape (*Brassica napus* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.), 12th Congress of the European Society for Agronomy, Helsinki, Finland, 20-24 August 2012.

Owusu-Sekyere, A., Kontturi, J., Hartikainen, H., Hajiboland, R., Aliasgharзад, N., Seppänen, M.M. 2013. Selenium enhances carbohydrate metabolism with stimulatory effects on nodulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.). Kasvitieteen päivät toukokuu 2013, Helsinki.

Owusu-Sekyere, A., Kontturi, J., Hartikainen, H., Hajiboland, R., Aliasgharзад, N., Seppänen, M.M. Influence of Selenium on carbohydrate metabolism and nodulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.). COST 0905 conference on Essential and Detrimental Trace Elements entering Food Chain via Plants. 9-13.6.2013 Ås, Norja.

Ebrahimi, Hartikainen, Hajiboland, Seppänen 2013. Comparison of Se utilization efficiency (SeU) in wheat (*Triticum aestivum* L.) and rapeseed (*Brassica napus* L.). 7th European Plant Science Organization September 2013, Greece.

TULOSTEN ARVIOINTI

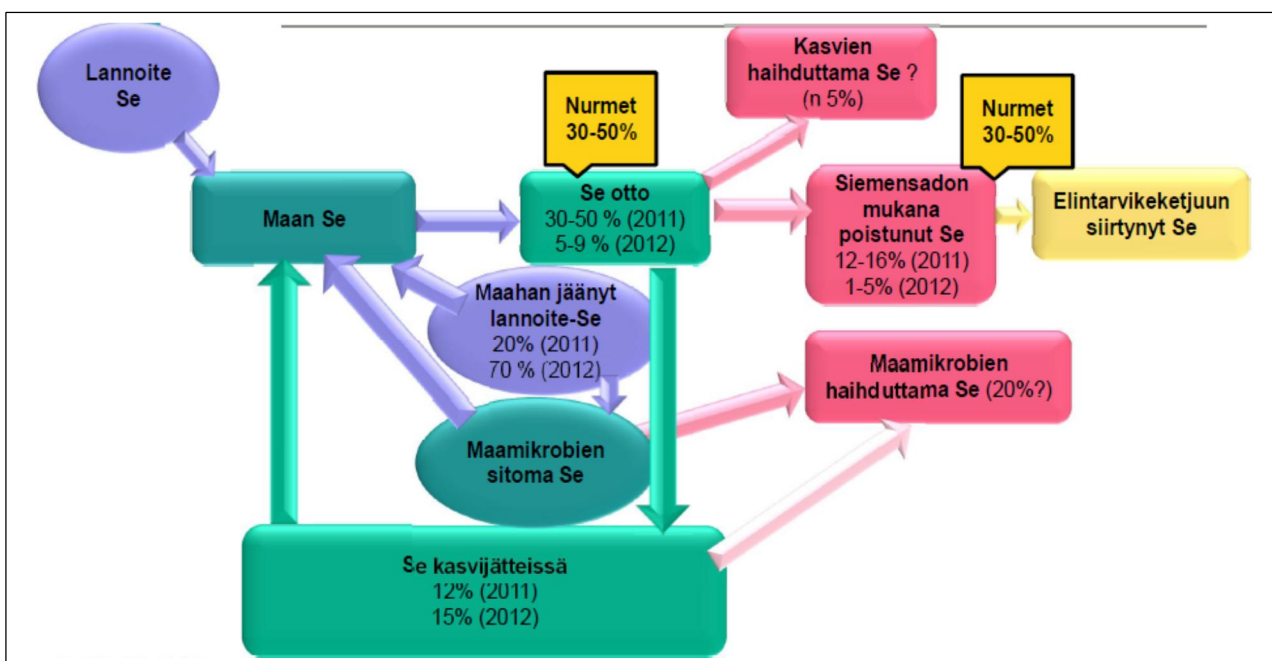
Hankkeen tulosten perusteella saatiin ensimmäistä kertaa kokonaiskuva lannoite-Se:n kohtalosta suomalaisessa peltoekosysteemissä (Kuva 8). Voidaankin todeta, että seleenilannoitus on edelleenkin hyvä tapa varmistaa kotimaisen ruoan ja rehun riittävä pitoisuus. Lannoituksen lisäksi etenkin tuotantoeläinten seleeninsaantia voidaan turvata myös rehulisillä, kuten Na-selenaatilla (epäorgaaninen Se) sekä selenohiivalla (orgaaninen Se) sekä käyttämällä rehunvalmistuksessa seleenipitoisia säilöntäaineita. Käytettäessä useita Se-valmisteita täytyy tuotantoeläinten kokonais-Se saantiin kiinnittää erityistä huomiota.

Lannoite-Se:stä merkittävä osa jää peltoon puintijätteessä sitoutuneena orgaaniseen muotoon. Toisaalta lannoituskäytänteet ovat muuttuneet ja rehujen sisältämää Se:ä päätyy peltoon yhä enemmän myös lietelannassa. Tutkimuksessa todettiin, että puintijätteen ja lietelannan sisältämän Se:n käyttökelpoisuus kasveille on huono ja epäorgaanista Se lannoitusta tarvitaan, jotta sadon Se-pitoisuudessa päästään tavoitetasolle. Viljelykasvien lannoite-Se:n oton tehokkuus voi kaksivuotisten tulosten perusteella vaihdella merkittävästi ja siten jyväsaiemen sadon seleenipitoisuus voi poiketa merkittävästi vuosien välillä. Vaihtelun syyksi arveltiin viileän kevään aiheuttamaa hidasta alkukehityksestä ja lannoite-selenaatin pelkistymisestä kasveille käyttökelvottomaksi seleniitiksi ennen kasvin aktiivista ravinteidenottoa. Sen sijaan nurmirehun Se-pitoisuus oli viileänkin alkukeväänä korkea. Nurmikasvien todettiin olevan siemensatokasveja tehokkaampia lannoite-Se hyödyntäjiä etenkin ensimmäisessä sadossa.

Siemensatokasveista rapsi oli usein tehokkaampi Se ottaja, mutta siirtyminen siemeneen oli yhtä tehokasta niin rapsilla kuin vehnälläkin.

Pitkäaikaisten lannoituskokeiden perusteella voidaan todeta, ettei lannoite-Se:n huuhtoutumista jankkoon ole tapahtunut 20 vuoden lannoitushistorian aikana. Koska merkittävä osa lannoite-Se:stä palautuu peltoon vuosittain puintijätteessä, havaittiin korkealla, 160 kg N/ha lisäystasolla maamassan orgaanisen Se:n lisääntyvän 0,006 promillen verran.

Suomalainen Se-lannoitushistoria on kansainvälisesti ainutlaatuinen ja tulokset ovat siten myös kansainvälisesti merkittäviä. Kansainvälisesti on erityistä mielenkiintoa herättänyt Se:n kertyminen maahan ja mahdolliset ympäristövaikutukset. Tämän hankkeen perusteella voidaan ensimmäistä kertaa esittää kokonaisvaltaiset laskelmat Se:n kierrosta peltoekosysteemissä.



Kuva 8. Selenin kierto peltoekosysteemissä.

KIRJALLISUUS

Ebrahimi, E., Hartikainen, H., Simojoki, A., Hajiboland, R., Seppänen M.M. 2015 Dynamics of dry matter and selenium accumulation in oilseed rape (*Brassica napus* L.) in response to organic and inorganic selenium treatments. Hyväksytty Agricultural and Food Science 1/2015.

Hartikainen, H. ja Keskinen, R. 2010. Selenin sitoutuminen ja biosaatavuus suomalaisissa maissa. Hankkeen DRNO MMM 4822/501/2005 loppuraportti.

Keskinen, R., Rämö, M., Yli-Halla, M. 2011. Selenium fractions in selenate-fertilized field soils of Finland. Nutrient Cycling in Agroecosystems 91:17-29.

Govasmark 2005. Trace element status of soil and organically produced herbage in relation to animal requirement. Norwegian University of Life Sciences, Doctoral thesis 7/2005.

Seppänen, M.M., Kontturi, J., Lopez-Heraz, I., Madrid, M., Camara, C., Hartikainen, H. 2010. Agronomic biofortification of Brassica with selenium – enrichment of SeMet and its identification in Brassica seeds and meal. *Plant and Soil*

Seppänen, M.M., Kontturi, J., Ebrahimi, N., Hartikainen, H. 2015. The dynamics of selenium uptake and metabolism of organic selenium species in the leaves and seeds of *Brassica napus* L. käsikirjoitus

Zhu ym. 2009 Selenium in higher plants: understanding mechanisms behind biofortification and phytoremediation. *Trends in Plant Science* 14:336-440.