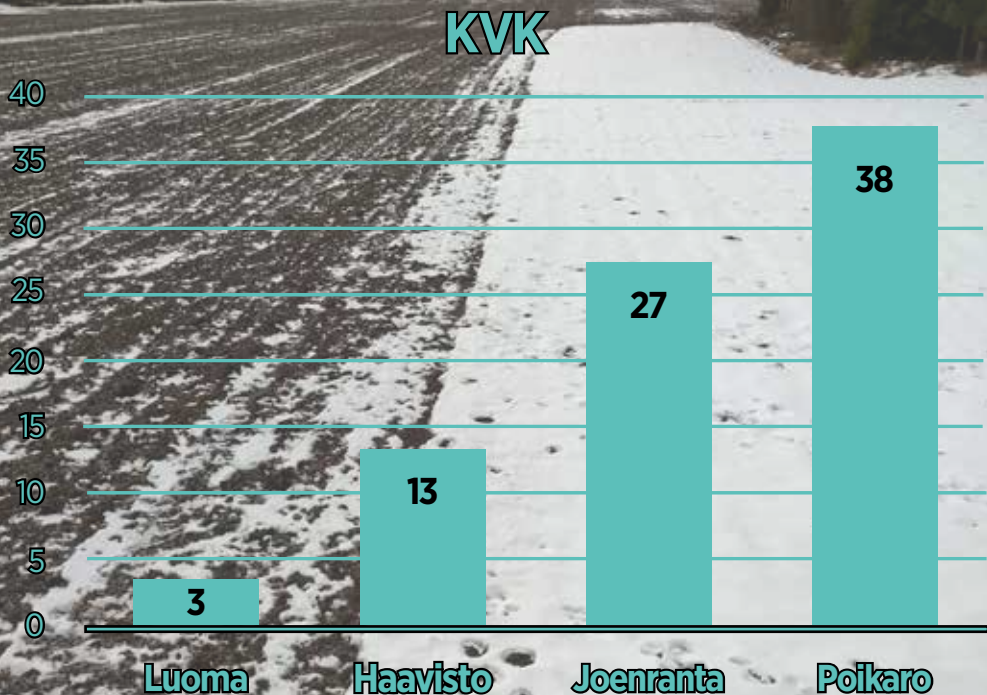




RAPORTEJA 179

KATIONINVAIHTOKAPASITEETIN MÄÄRITYS JA KÄYTTÖ VILJAVUUSANALYYSIN TULKINNASSA

TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA



KATIONINVAIHTOKAPASITEETIN MÄÄRITYS JA KÄYTTÖ VILJAVUUSANALYYSIN TULKINNASSA

TUOMAS J. MATTILA JA JUKKA RAJALA



Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

PRO
Agria



HELSINGIN YLIOPISTO
RURALIA-INSTITUUTTI

2018

OSMO - Osaamista ja työkaluja resurssitehokkaaseen maan kasvukunnon hoitoon yhteistyöllä -hanketta rahoittavat Varsinais-Suomen ELY-keskus / Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelma 2014-2020 / Vesiensuojelun ja ravinteiden kierrätyksen erillisaioitus, yritykset, viljelijät ja säätiöt.

Julkaisija Helsingin yliopisto
Ruralia-instituutti
www.helsinki.fi/ruralia

Kampusranta 9 C
60320 SEINÄJOKI

Lönnrotinkatu 7
50100 MIKKELI

Sarja Raportteja 179

Kannen kuvat Jukka Rajala

ISBN 978-951-51-3756-2 (pdf)

ISSN 1796-0630 (pdf)

ESIPUHE

Maatalouden tärkeimmät resurssit ovat viljelijän osaaminen ja peltomaan kasvukunto. Maan kasvukunto vaikuttaa ratkaisevasti saavutettuihin satotasoihin ja sitä kautta käytettävien tuotantopanosten hyötysuhteisiin, viljelyn kannattavuuteen sekä ympäristövaikutuksiin. Peltomaa on monimutkainen järjestelmä, jonka kokonaisvaltainen hallinta vaatii uudenlaista osaamista sekä uusia työkaluja ja käytäntöjä. Viljelijöitä askarruttaa monen lohkon kohdalla, miksi tällä lohkolla sato jää huomattavasti pienemmäksi kuin muilla lohkoilla. Kasvukunnon ongelmat voivat johtua useasta tekijästä, jotka tyypillisesti luokitellaan kemialliseen, fysikaaliseen ja biologiseen viljavuuteen.

Tässä raportissa paneudutaan maan kemialliseen viljavuuteen ja etenkin maaperän kykyyn varastoida ravinteita kasveille käyttökelpoiseen muotoon. Raportissa pyritään vastaamaan mm. seuraaviin kysymyksiin: Mistä ravinteiden varastointikyky eli kationinvaihtokapasiteetti KVK riippuu? Millä eri tavoin se voidaan määrittää ja miten eri määritysmenetelmät eroavat toisistaan? Miten laskennallista KVK:n määrittästä voidaan tarkentaa? Ja miten maalaji voitaisiin määrittää edullisesti ja tarkasti? Voidaanko KVK:n perusteella antaa kalkitus-suosituksia? Kysymyksiin haetaan vastauksia sekä kirjallisuudesta että OSMO-hankkeen tilakoeaineiston avulla.

Kalkitustarpeen määrittäminen ja kalkituksen suunnittelu ovat tärkeitä kysymyksiä maan kasvukunnon hoidon kannalta. Raportissa vertaillaan useita kalkitustarpeen määritysmenetelmiä sekä pH:n että ravintesuhteiden tasapainottamisen näkökulmista. Miten kationinvaihtokapasiteetin, emäskyllästysasteen ja tärkeimpien kationien suhteita voidaan hyödyntää käytännön viljavuustutkimuksen tulosten ja maan kunnostustoimien suunnittelun hyödyntämisessä on tärkeä osa raporttia. Konkreettisten erimerkkilohkojen avulla annetaan käytännön ohjeita menetelmän hyödyntämisestä viljelijälle ja neuvonnalle.

Nyt julkaistava raportti on tuotettu osana OSMO - Osaamista ja työkaluja resurssitehokkaaseen maan kasvukunnon hoitoon yhteistyöllä-hanketta. Hankkeen tilatutkimusosiossa pyritään selvittämään monipuolisesti maan kasvukunnon tilaa kahdeksalla ongelmalohkolla Etelä-Pohjanmaalla, Satakunnassa ja Varsinais-Suomessa. Verranteina käytetään hyväkasvuisia lohkoja.

Tarkoituksena on myös kehittää tilatasolle soveltuvia maan kasvukunnon analysointi- ja havainnointimenetelmiä sekä selvittää millä toimenpiteillä ongelmalohkojen kasvukuntoa voidaan parantaa. Nyt julkaistavaan raporttiin on koottu keskeiset tulokset tutkittavien lohkojen kationinvaihtokapasiteetista ja sen hyödyntämisestä viljavuustutkimuksen tähänastisia käytäntöjä monipuolisemmassa hyödyntämisessä.

OSMO - Osaamista ja työkaluja resurssitehokkaaseen maan kasvukunnon hoitoon yhteistyöllä-hanketta toteuttavat Helsingin yliopiston Ruralia-instituutti, ProAgria Etelä-Pohjanmaa ja ProAgria Länsi-Suomi. Hanketta rahoittavat Varsinais-Suomen ELY-keskus Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelmasta 2014-2020, Vesienhuollon ja ravinteiden kierrätyksen erillishoiduksella, Eurofins Viljavuuspalvelu Oy, Soilfood Oy, Tyynelän Maanparannus Oy, Ecolan Oy, viljelijät sekä Luomusäätiö ja Rikalan Säätiö. Kiitämme rahoittajia tämän työn mahdollistamisesta.

Kiitämme OSMO-tilakokeen viljelijöitä koelohkojen antamisesta tutkimuksen käyttöön ja koelohkojen viljelytöiden suorittamisesta ja tutkimustulosten saamisesta. Yhteistyöstä analyysitulosten tulkinnassa kiitämme Kalevi Koivusta Eurofins Oy:stä. Raportin taitosta ja ulkoasusta kiitämme graafinen suunnittelija Jaana Huhtalaa. Toivomme raportin palvelevan suomalaisia viljelijöitä maanalyyysin tulkinnassa, kalkitus-suositusten muodostamisessa ja peltomaihin tutustumisessa.

Mikkelissä huhtikuussa 2018

Tekijät

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	9
1 JOHDANTO	11
2 MISTÄ KATIONINVAIHDOS SA ON KYSE?	12
2.1 Sähkövaraus pidättää ravinteita maahiukkasten pinnalle.....	12
2.2 Vaihtuva varaus riippuu maan happamuudesta	13
3 KATIONINVAIHTOKAPASITEETIN MÄÄRITYSMENETELMÄT	14
3.1 Analyysi- ja laskennalliset menetelmät	14
3.2 Menetelmien antamien tulosten vertailu.....	15
4 MAALAJIN JA SAVIMINERAALIEN KOOSTUMUKSEN ARVIOINTI	19
5 KATIONISUHTEET JA MAAN RAKENNE	21
6 KALKITUSTARPEEN LASKENTA JA VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN	22
7 ESIMERKKEJÄ KATIONINVAIHTOKAPASITEETIN HYÖDYNTÄMISESTÄ ONGELMALOHKOILLA	26
8 YHTEENVETO	30
9 LÄHTEET	31

TIIVISTELMÄ

Kationinvaihtokapasiteetti (KVK) kuvaa maan kykyä varata positiivisesti varautuneita ravinteita (kationeja) kasveille käyttökelpoiseen (vaihtuvaan) muotoon. KVK riippuu maan savipitoisuudesta ja multavuudesta, joten sitä voidaan käyttää maan viljavuustilan arviointiin. Tämän lisäksi KVK:ta on käytetty viljavuusanalyysin tulosten tulkintaan, etenkin Ca, Mg, K ja Na osalta. Tämä mahdollistaa tarkemman tulkinnan kuin maalajiluokkiin pohjautuva tarkastelu, mutta toisaalta tarkastelun

pohjaksi tarvitaan arvio KVK:sta. KVK voidaan joko mitata tai määrittää laskennallisesti. Tässä raportissa esitetään tuloksia erilaisista tavoista määrittää KVK hyödyntäen 24 koelohkon aineistoa. Sen lisäksi raportissa käydään läpi tieteellistä kirjallisuutta KVK-pohjaisten suositusten käytettävyydestä sekä esitetään esimerkkejä KVK:n hyödyntämisestä viljavuusanalyysin tulkinnassa erilaisten esimerkkilohkojen kautta.

ABSTRACT

INTERPRETING SOIL ANALYSIS RESULTS WITH CATION EXCHANGE CAPACITY

Cation exchange capacity (CEC) is a measure of the soil's ability to store positively charged nutrients (cations) in a plant available (exchangeable) form. The amount of clay and organic matter influence the CEC of a specific soil and CEC can be used as a measure of the overall fertility potential of a soil. In addition CEC has been used to interpret concentrations of Ca, Mg, K and Na in relation to the overall CEC of the soil. This presents a more detailed

interpretation of soil analysis than interpretation which is based on soil type classifications, but it also requires the estimation of CEC. 24 test fields were used as a test case for comparing different methods of measuring or estimating CEC. Example fields are used to demonstrate the use of CEC in making soil management recommendations and the scientific literature on using CEC as a basis for fertilizer recommendations is reviewed.

1 JOHDANTO

Kasvit käyttävät ainakin 21 alkuainetta kasvuunsa (C, H, O, N, S, P, Mg, Ca, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Mo, B, Cl, Na, Si, Co, Se, Al) ja näistä 16 on tunnistettu kasvulle välttämättömiksi ravinteiksi (Kirkby, 2012). Ravinteet ovat maassa eri olomuodoissa, monet niistä ovat sähköisesti varautuneina ioneina pidättyneitä maan pinnalla ns. vaihtuvassa muodossa. Positiivisesti varautuneita ioneja kutsutaan kationeiksi ja negatiivisesti varautuneita anioneiksi. Tärkeimmät positiivisesti varautuneet ravinneionit ovat ammoniumtyyppi (NH_4^+), kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}) ja magnesium (Mg^{2+}), mutta myös monet hivenravinteet ovat positiivisesti varautuneita. Kationinvaihtokapasiteetillä (KVK) kuvataan maan kykyä varastoida positiivisesti varautuneita ravinteita kasveille käyttökelpoiseen muotoon. KVK riippuu maan multavuudesta, maalajista sekä mineraalikoostumuksesta ja on mittari maan luontaiselle viljavuudelle (Weil ja Brady, 2016). Mitä suurempi kationinvaihtokapasiteetti, sitä enemmän maahan voi varastoitua (joitain) keskeisiä kasvinravinteita sähköisin varauksin.

Suomalaisessa viljavuusanalyysissä tulosten tulkinnat on totuttu tekemään luokittelemalla pelot maalajin ja multavuuden perusteella (Viljavuuspalvelu, 2008). Sama ravinnepitoisuus voidaan luokitella viljavuusluokkiin välttävä, tyydyttävä tai hyvä, riippuen maalajista. Ongelmana luokittelussa on se, että lohkon päätyminen väärään maalajiluokkaan johtaa vääränlaisen tulkintaan. Toisaalta luokkien sisällä on vaihtelua ja esimerkiksi lohkot, joissa on 4 % multavuutta ja 25 % savea sekä 6,9 % multavuutta ja 49 % savea päätyvät tarkastelussa samaan luokkaan (Viljavuuspalvelu, 2008). Kationinvaihtokapasiteettiin pohjautuva tulkinta tarkentaa tätä tarkastelua korvaamalla luokat jatkumolla, jossa ravinnesuositukset suhteutetaan pellon kykyyn pidättää ravinteita.

Kansainvälisesti kationinvaihtokapasiteettia on käytetty viljavuusanalyysin tulkinnassa eri tavoilla. Yleisin tapa on määrittää KVK ja käyttää sitä mitarina maan yleisestä viljavuudesta (Weil ja Brady, 2016). Osa yksityisistä neuvojista (esim. Neil Kinsey, Gary Zimmer) käyttää kationinvaihtokapasiteetin avulla laskettuja kationiosuuksia suositusten

määrittämiseen pitoisuuksien sijaan (Kinsey ja Walters, 1999; Zimmer ja Zimmer-Durand, 2016). Tutkimuksessa tätä lähestymistapaa kutsutaan *base cation saturation ratio* (BSCR) -menetelmäksi ja se on ollut kiistanalainen jo vuosikymmeniä (Chaganti ja Culman, 2018; Magdoff ja Van Es, 2009). Aluperin menetelmä pohjautuu 1950-luvulla tehtyihin tutkimuksiin (Albrecht ja Bear), joissa tutkittiin sinimailasen kasvua. Sinimailanen kasvoi parhaiten, kun maaperässä oli 65 % Ca, 10 % Mg ja 5 % K, mitä ryhdyttiin pitämään laajemminkin ihanteellisen ravinnesuhteena maaperässä (Magdoff ja Van Es, 2009). Ajatus ihanteellisista ravinnesuhteista on myöhemmin kumottu useissa kokeissa (Eckert ja McLean, 1981; Kopittke ja Menzies, 2007; McLean et al., 1983). Toisaalta kationien suhteella on vaikutusta maan rakenteeseen, esimerkiksi lialliset natriumin, kaliumin, ammoniumin, tai magnesiumin määrät altistavat maan liettymiselle (Chaganti ja Culman, 2018; Dontsova ja Norton, 2002; Hartge ja Horn, 2016). Toisaalta myös liallinen kaliumin määrä maassa heikentää kasvin kalsiumin ja magnesiumin ottoa (Weil ja Brady, 2016). Ravinteiden keskinäinen kilpailu ja vaikutus maan rakenteeseen riippuvat osin siitä, kuinka suuren osuuden kationinvaihtopaikoista kukin ravinne varaa (Marschner ja Rengel, 2012; Weil ja Brady, 2016). Vaikka kationinvaihtokapasiteetin avulla ei voitaisi muodostaa ihanteellisia ravinnesuhteita, sen avulla voidaan kuitenkin syventää ymmärrystä siitä, kuinka suuri kunkin pellon kyky varastoida ravinteita on ja onko näiden ravinteiden suhteissa joitain selviä epäsuhtia.

Tämän raportin tarkoituksena on selvittää, miten kationinvaihtokapasiteettia voitaisiin hyödyntää suomalaisten viljavuustutkimuksen tulosten hyödyntämisessä ja suositusten tarkentamisessa. Aihetta lähestytään kolmella tasolla: kirjallisuuskatsauksen avulla tarkastellaan ilmiön perusteita ja sovelluksia ulkomailla; OSMO -hankkeen koelohkojen avulla tutkitaan, miten KVK voidaan määrittää laskennallisesti; ja esimerkkilohkojen avulla selvitetään, miten KVK:n avulla voidaan muodostaa suosituksia maanparannuksesta ja lannoituksesta.

2 MISTÄ KATIONINVAIHDOS- SA ON KYSE?

2.1 SÄHKÖVARAUS PIDÄTTÄÄ RAVINTEITA MAAHIUKKASTEN PINNALLE

Maaperän kyky vaihtaa positiivisesti varautuneita ravinnekationeja havaittiin ensin vahingossa. Maanviljelijät testasivat, miten käy naudan virtsan, jota suodatetaan maan läpi. Virtsa vaihtoi väriä ruskeasta kirkkaaksi ja kemiallisten analyysien perusteella virtsan ammonium oli vaihtunut kalsiumiin. Jatkotutkimukset paljastivat, että maaperän kyky vaihtaa ravinteita ei ole rajaton, vaan jokaisella maaprofiililla on oma kapasiteettinsa positiivisten ionien vaihtoon, toisin sanoen *kationinvaihtokapasiteetti* (Way, 1850; (Weil ja Brady, 2016)).

Vaikka kationinvaihtokapasiteetin sovellukset ovat melko yksinkertaisia, kemiallisesti ilmiö ei ole yksinkertaisimmasta päästä. Haastavaksi ilmiön käsittelyn tekee maaperän moninaisuuksien lisäksi se, että maassa on useita positiivisia kationeja samanaikaisesti kilpailemassa kationinvaihtopaikoista. Lisäksi maaperän erikoisominaisuutena on se, että maan kyky vaihtaa kationeja riippuu olosuhteista, ennen kaikkea happamuudesta (pH). Monimutkaisuutensa vuoksi maaperän kationinvaihtokapasiteetin kemiallisia perusteita on tutkittu vuosikymmenien ajan (Sumner ja Miller, 1996). Tämän luvun tarkoituksena ei ole toimia kattavana katsauksena koko tutkimuskenttään vaan tarjota yksinkertaistettu malli, jonka avulla ilmiön taustoja ja vaikutuksia maaperän toimintaan voidaan ymmärtää.

Savi ja orgaaninen aines ovat maaperän pienimpiä komponentteja ja niillä on erittäin suuri pinta-ala. Molempien pinnat ovat yleensä sähkökemiallisesti negatiivisesti varautuneita. Negatiivisesti varautunut pinta voi muodostaa suoraan kemiallisia sidoksia eräiden ravinteiden kanssa (esimerkiksi alumiini ja fosfori), mutta pinnalla on suurempi vaikutus maaperän ravinteisiin sähköisen kaksoiskerroksen avulla. Sähköisessä kaksoiskerroksessa negatiivisesti varautunut maahiukkanen vetää puoleensa maavedessä kelluvien ionien ympärillä olevaa vesivaippaa. Partikkelin ja ionin välissä on ikään kuin ylimääräisenä kerroksena vesimolekyylejä. Tämän seurauksena ionit ovat melko löyhästi kiinnittyneitä (adsorboituneita) ja irtoavat säännöllisesti maave-teen. Irtoamista ja kiinnittymistä tapahtuu samanaikaisesti ja reaktiot muodostavat tasapainon maaveden ja kiinnittyneiden ravinteiden välille. Kun ravinne irtoaa pinnalta, se jättää hetkellisesti tyhjän tilan, joka voi täytyä muilla maaveden ravinteilla. Kationinvaihdossa on kyse siitä, että maavedessä olevat ravinteet kiinnittyvät maapartikkelien pinnoille ja siten vapauttavat maaveeten maapartikkelien pinnoille kiinnittyneitä ravinteita.

Mitä suurempi maapartikkelien negatiivinen varaus, sitä enemmän ne voivat pidättää pinnoillaan ravinteita vaihtuvassa muodossa (Taulukko 1). Maaperän kationinvaihtokapasiteetti on peräisin pääosin saven ja orgaanisen aineen sähköisestä varauksesta, sillä hiedan ja hiesun vaikutus on hyvin vähäinen. Eri savimineraalien kationinvaihtokapasiteetissä on suuria eroja, alhaisimmat KVK:t ovat

Taulukko 1. Erilaisten maaperän kolloidien ominaisuuksia (Weil ja Brady, 2016).

Kolloidi	Pinta-ala m ² /g	Sähköinen varaus cmol/kg	Keskimääräinen varaus pH 7 cmol/kg	pH:sta riippuva osuus %
Smektiitti	630-800	80-150	100	5 %
Vermikuliitti	670-820	100-200	150	5 %
Kiillemäiset savimineraalit	70-175	10-40	30	20 %
Kloriitti	70-100	10-40	30	20 %
Kaoliiniitti	5-30	1-15	8	95 %
Orgaaninen aines	20-800	100-500	200	90 %

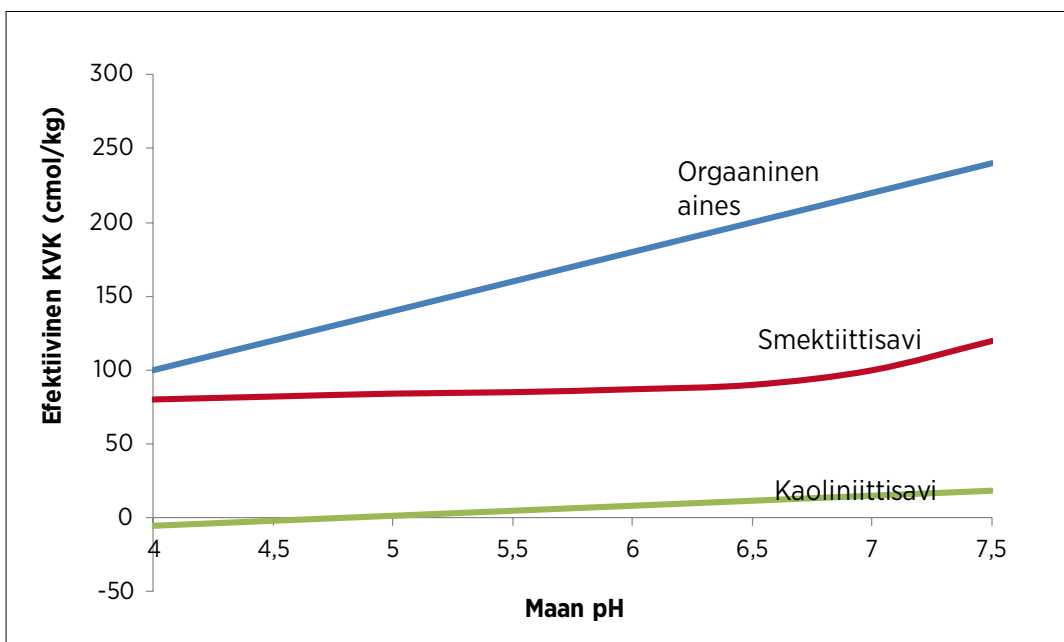
kaoliinitilla ja kiillemaisilla savimineraaleilla (illiitti, glaukoniitti) ja suurimmat KVK:t smektiitillä ja vermikuliitilla. Suomalaisissa peltomaissa yleisimmin saves on seos kiillettä/illiittiä, kloriittiä, smektiittiä ja vermikuliittiä (Sippola, 1974). Kaoliiniittiä on alueittain, sekä pieniä määriä sedimenttimaalajeissa (Åström ja Björklund, 1997). Smektiittiä ja vermikuliittiä on yleensä vähäisiä määriä (Åström ja Björklund, 1997; Sippola, 1974). KVK:n kannalta tämä tarkoittaa sitä, että suomalaisten savien varaus on keskimäärin melko alhainen, luokkaa 40 cmol/kg.

Kasvinravitsemuksen ja maaperän rakenteen kannalta oleelliset kationit ovat vety H^+ (happamuus), alumiini Al^{3+} , rauta $Fe^{2+/3+}$, kalsium Ca^{2+} , magnesium Mg^{2+} , kalium K^+ , natrium Na^+ ja ammonium NH_4^+ . Näiden vesikehät ja varaukset ovat erisuuruisia, joten ne kiinnittyvät eri voimakkuuksilla maapartikkelien pinnalle. Kiinnittymisvoimakkuus alenee järjestyksessä: $Al^{3+} > H^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ = NH_4^+ > Na^+$ (Weil ja Brady, 2016). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kalsium (Ca) syrjäyttää helposti kaliumia (K) jo melko pienillä lisäysmäärillä, mutta kalsiumin korvaaminen kaliumilla vaatii huomattavan suuren lisäysmäärän.

2.2 VAIHTUVA VARAUS RIIPPUU MAAN HAPPAMUUDESTA

Osa maapartikkelien sähkökemiallisesta varauksesta on peräisin niiden kemiallisesta rakenteesta ja on vakio eri happamuuksissa (Kuva 1). Toinen osa varauksesta on peräisin karboksyyli- ja hydroksyyli-ryhmistä ($-OH$) ja riippuu voimakkaasti happamuudesta. Alhaisessa pH:ssa maaperässä on paljon protonoita, jotka sitoutuvat hydroksyyli-ryhmiin ja neutraloivat niiden varauksen. pH:n noustessa yhä suurempi osuus vaihtopinnoista on aktiivisia. Tämän lisäksi happamassa maassa osa savimineraalien varauspaikoista sisältää alumiinihydroksi-ioneja, jotka irtoavat pH:n noustessa ja muuttuvat liukenevaksi muotoon. Peltomaan kalkitus lisää käytettävissä olevien kationinvaihtopaikkojen määrää.

Maan *potentiaalinen kationinvaihtokapasiteetti* kuvaa sitä KVK:ta, joka on käytettävissä, kun pH on neutraali tai lievästi emäksinen. Maan *efektiivinen kationinvaihtokapasiteetti* kuvaa sitä osaa kationinvaihtokapasiteetistä, joka on sen hetkessä pH:ssa käytettävissä. Efektiivisen ja potentiaalisen KVK:n ero on sitä suurempi, mitä enemmän maassa on orgaanista ainetta ja mitä happamampi maa on.



Kuva 1. Maan pH:n vaikutus kahden savimineraalin ja maan orgaanisen aineen efektiiviseen kationinvaihtokapasiteettiin (KVK). Piirretty Weil ja Brady (2016) perusteella.

3 KATIONINVAIHTOKAPASITEETIN MÄÄRITYSMENETELMÄT

3.1 ANALYYSI- JA LASKENNALLISET MENETELMÄT

Kationinvaihtokapasiteetti voidaan määrittää eri tavoin maanäytteestä ja eri menetelmät antavat myös erilaisia tuloksia, joten tulosten tulkinnan kannalta on tärkeää tietää, miten KVK on määritetty ja mitä se kuvaa.

Yleisin tapa määrittää KVK on uutto puskuroidulla pH 7 ammoniumasetaattiliuoksella (Sumner ja Miller, 1996). Tällöin tulos kuvaa maan potentiaalista KVK:ta (TCEC, CEC_{pot}). Luku kuvaa maan KVK:ta, kun se on kalkittu neutraaliksi, muttei kuvaa maan sen hetkistä KVK:ta vallitsevassa pH:ssa. Tuloksia voidaan käyttää maaperän luokitteluun ja toisaalta arvioimaan, kuinka paljon kalkkia tarvittaisiin maan kalkitsemiseen happamuudeltaan neutraaliksi.

Jos halutaan tarkka määrittäminen efektiivisestä kationinvaihtokyvystä, määrittäminen tehdään miedolla bariumkloridiliuoksella ja arvioidaan erikseen vaihtuvan alumiinin määrä kaliumkloridilla (Sumner ja Miller, 1996). Tulos kuvaa kationinvaihtopinnoilla olevien ionien määrää sen hetkessä pH:ssa ja luku voidaan käyttää arvioimaan esimerkiksi ravinteiden käyttökelpoisuutta kasveille. Efektiivinen KVK ($ECEC$, CEC_{eff}) muuttuu kalkituksen myötä ja vastaa potentiaalista KVK:ta, kun pelto on happamuudeltaan neutraali.

Yhdysvaltalainen Woods End -laboratorio ilmoittaa analyyseissään myös laskennallisen KVK:n heikosti puskuroidulla, miedolla uuttonesteellä. Tämän ajatellaan kuvaavan kasville käyttökelpoisten ravinteiden kationisuhteita, mutta tuloksen tulkinnasta ei ole selkeitä ohjeita.

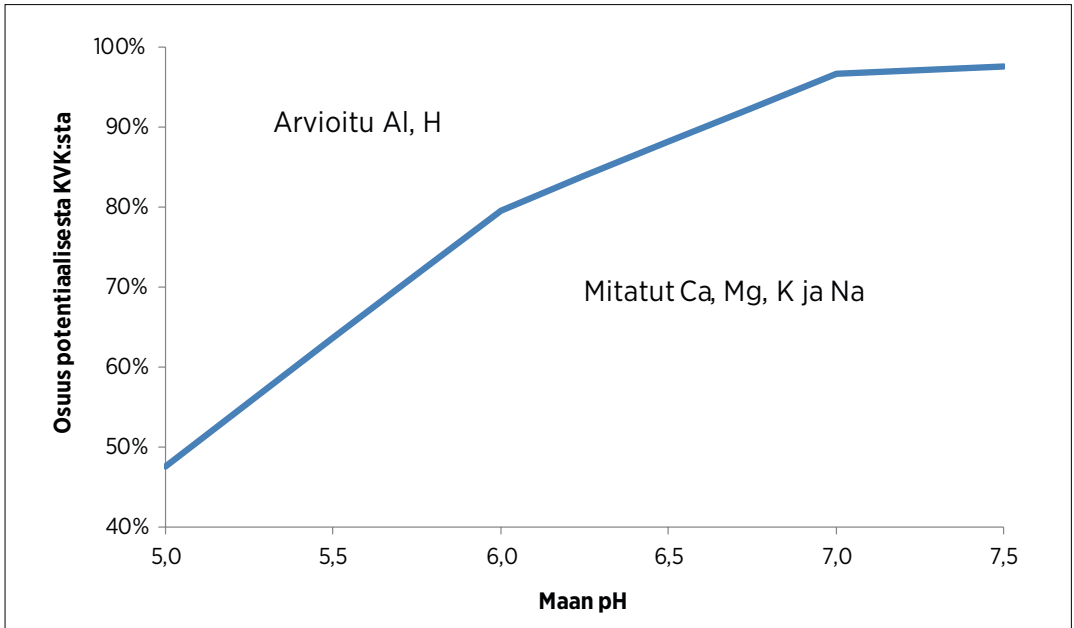
Kationinvaihtokapasiteetti voidaan arvioida laskennallisesti myös maa-analyysin tietojen perusteella. Yksinkertaisin määrittäytapa on arvioida KVK maan multavuuden ja savipitoisuuden perusteella. Esimerkiksi jos maalajiksi on määritetty runsasmultainen hiuesavi (rm HeS), siinä voidaan arvioida olevan 30-60 % savesta ja 6-12 % orgaanista ainetta. Tyypillisellä suomalaisella savekoostumuksella (ks. luku 2), saveksen KVK on noin 44 cmol/kg ja orgaanisen aineen KVK noin 200 cmol/kg. Tällöin

esimerkkimaanäytteen KVK on alimmillaan $30\% \times 44 \text{ cmol/kg} + 6\% \times 200 \text{ cmol/kg} = 25 \text{ cmol/kg}$ ja ylimmillään $60\% \times 44 \text{ cmol/kg} + 12\% \times 200 \text{ cmol/kg} = 50 \text{ cmol/kg}$. Viljelysuunnittelun kannalta vaihteluväli on huomattavan suuri ja sitä voidaan tarkentaa analysoimalla savipitoisuus ja orgaanisen aineksen pitoisuus sekä laatu tarkemmin. Toisaalta epävarmuutta tuo myös maanäytteen savimineraalikoostumus (savien varaus vaihtelee välillä 1-200 cmol/kg) sekä orgaanisen aineen laji (vaihteluväli 100-500 cmol/kg) (Taulukko 1).

Yhdysvalloissa käytetään KVK:n arvioinnissa yleisesti korjauskerrointa, jolla määritetään potentiaalinen KVK mitattujen ravinnekationien ja happamuuden perusteella (Logan Labs, 2018). Menetelmä on peräisin keskilännessä tehdystä kalibrointisarjasta (Astera, 2015), joten voidaan olettaa, että se aliarvioi suomalaisten maiden KVK:ta, sillä suomalaisissa maissa on yleisesti ottaen enemmän orgaanista ainesta ja orgaanisella aineella on suurempi osuus vaihtuvaa varausta (kuva 1, luku 2). Menetelmän virhe on sitä suurempi, mitä korkeampi multavuus ja mitä alhaisempi pH maassa on. Lisäksi vaihtuvan alumiinin määrä suomalaisissa peltomaissa voi olla korkeampi kuin alkuperäisessä kalibrointiaineistossa.

Mikäli maaperän vaihtuvan alumiinin määrä on mitattu, sitä voidaan käyttää suoraan kationinvaihtokapasiteetin arviointiin (Paasonen-Kivekäs, 2009, s. 119). Riippuen uuttoliuoksen pH:sta, analyysituloksella kuvaa joko maan potentiaalista KVK:ta (uutto tehty pH 7,0), efektiivistä KVK:ta (uutto tehty puskuroimattomalla liuoksella) tai efektiivistä KVK:ta mittausliuoksen pH:ssa (pH 4,65 suomalaisessa viljavuusanalyysissä).

Kationinvaihtokapasiteetin laskennalliseen arviointiin on kehitetty myös muita menetelmiä, jotka perustuvat esimerkiksi maan kuivumiskäyriin (Khorshidi ja Lu, 2017) tai lähi-infrapunamittauksiin (NIR) (Waruru et al., 2014; Ulusoy et al., 2016). Nämä menetelmät perustuvat siihen, että kationinvaihtokapasiteetti riippuu samoista tekijöistä kuin mitattavat muuttujat, jolloin voidaan tehdä korrelaatioita helposti mitattujen muuttujien ja vaikeammin mitattujen KVK:n välille. Tulosten luotettavuus riippuu kuitenkin siitä,



Kuva 2. Yhdysvalloissa viljavuusanalyysissä käytetty arviointimenetelmä, jolla huomioidaan pH:n vaikutus kokonaiskationinvaihtokapasiteettiin laskettaessa KVK:ta mitattujen ravinnekationien perusteella (piirretty Logan Labs 2016 perusteella).

kuinka hyvin kalibrointi vastaa olosuhteita, joissa maan ominaisuuksia haluttaisiin mitata.

3.2 MENETELMIEN ANTAMIEN TULOSTEN VERTAILU

OSMO-hankkeen koelohkoilta määritettiin ravinnepitoisuuksia usealla menetelmällä. Tämän lisäksi maanäytteistä mitattiin kationinvaihtokapasiteetti, orgaanisen aineen pitoisuus, uuttuva rauta ja alumiini, sekä puskuri pH (Mattila ja Rajala, 2017). Aineiston perusteella voidaan testata eri menetelmien soveltuvuutta KVK:n ennustamiseen.

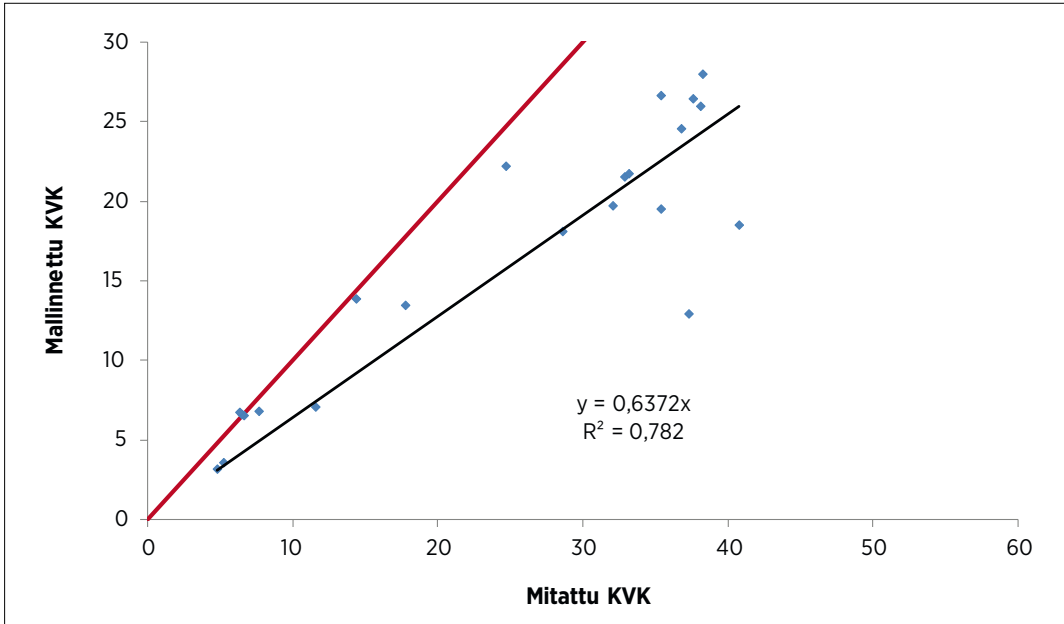
Ravinnekationien ja yhdysvaltalaisen korjauskertoimen perusteella arvioitu kationinvaihtokapasiteetti oli selvästi alempi kuin mitattu KVK (Kuva 3). Korrelaatio menetelmien välillä oli hyvä, mutta laskettu KVK oli keskimäärin 64 % mitatusta KVK:sta.

Huomionarvoista oli se, että mikäli käytettiin yhdysvaltalaisista Mehlich 3-uuttomenetelmää (maanäytteet analysoitu Logan Labs, USA), laskennallisten tulosten korrelaatio oli heikompi ja arvioitu KVK alempi (Kuva 4).

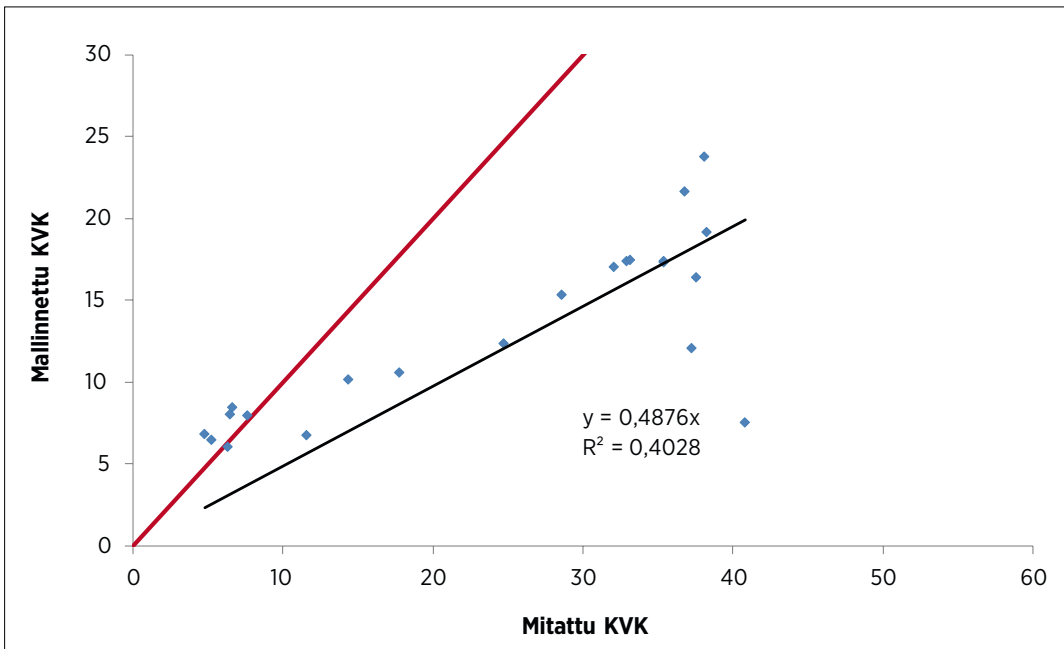
Maaperän ominaisuuksien perusteella virhe laskennallisen ja mitatun KVK:n välillä oli odotettavissa, sillä suomalaiset peltomaat eivät

vastanneet maita, joiden perusteella kalibrointi oli alun perin tehty. Aineiston perusteella yritettiin tehdä Suomen oloihin sovitettu korjauskerroin, mutta määritettyjen pääkationien osuuden mitatusta KVK:sta ja pH:n välillä ei vaikuttanut olevan selvää yhteyttä ja hajonta etenkin lievästi happamalla tai neutraalilla pH:lla oli huomattavan suurta (Kuva 5, vrt. kuva 2).

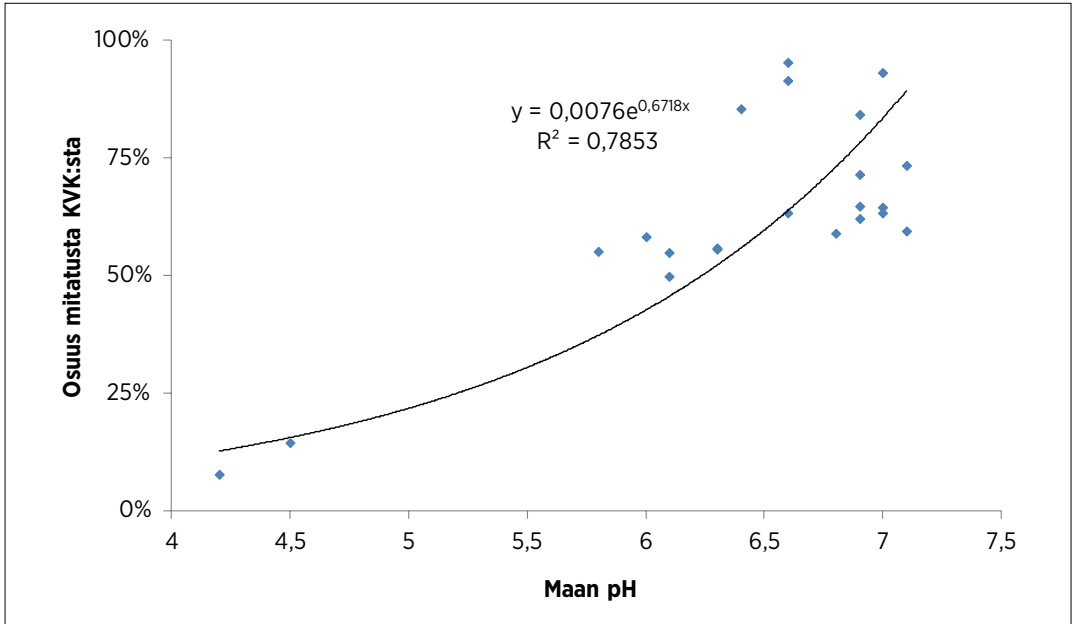
Sytä vaihtelulle korkeammilla pH-luokilla haettiin alumiinin pitoisuuksista. OSMO -hankkeen yhteydessä maanäytteistä määritettiin alumiinin ja raudan pitoisuudet viljavuusanalyysin yhteydessä happamalla ammoniumasetattiutolla. Tämä ei vastannut standarditapaa vaihtuvan alumiinin määrittämiseen, mutta tulosten käyttökelpoisuutta haluttiin tutkia, sillä ne olisivat käytettävissä viljavuusanalyysin tarkentamiseen ilman erillisiä määrittäykustaluuksia. Maasta määritetty alumiini paransi KVK:n ennustamistarkkuutta etenkin korkeimmilla KVK:n arvoilla (Kuva 6.). Erällä lohkoilla määritetty alumiinin pitoisuus olisi vastannut noin 35-40 % koko kationinvaihtokapasiteetistä, korkea-alumiinisia lohkoja löytyi sekä hietamailta, savimailta että eloperäisiltä mailta. Raudan lisääminen tarkasteluun heikensi selitystasetta, mutta tuotti arvoja, jotka vastasivat keskimäärin paremmin mitattuja lukuja. Joidenkin peltojen erittäin korkea raudan pitoisuus haittasi KVK:n määrittäystä näiden osalta.



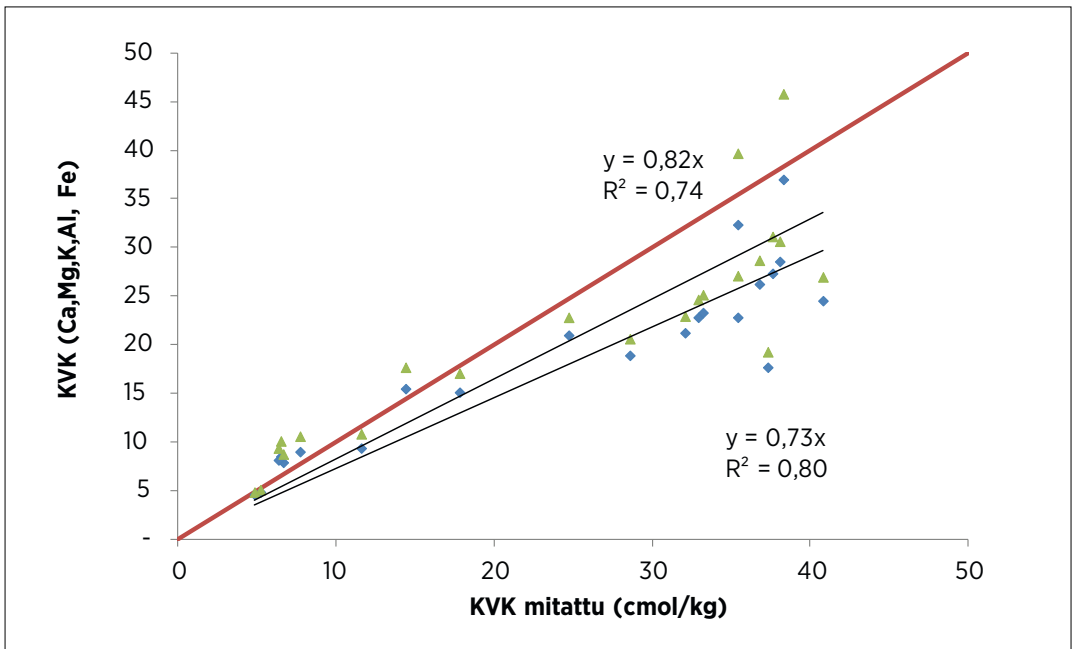
Kuva 3. Korrelaatio mitatun KVK:n ja mallinnetun KVK:n välillä osoitti, että laskennallinen KVK aliarvioi kationinvaihtokapasiteettia tutkituilla koepelloilla. (n=24). (Punainen viiva = 1:1 vastaavuus).



Kuva 4. Korrelaatio mitatun KVK:n ja Mehlich 3 uuttuvien ravinteiden perusteella lasketun KVK:n välillä oli heikko ja lisäksi menetelmä aliarvioi kationinvaihtokapasiteettia suomalaista viljavuustutkimusta enemmän tutkituilla koelohkoilla (n=24). (Punainen viiva = 1:1 vastaavuus.)



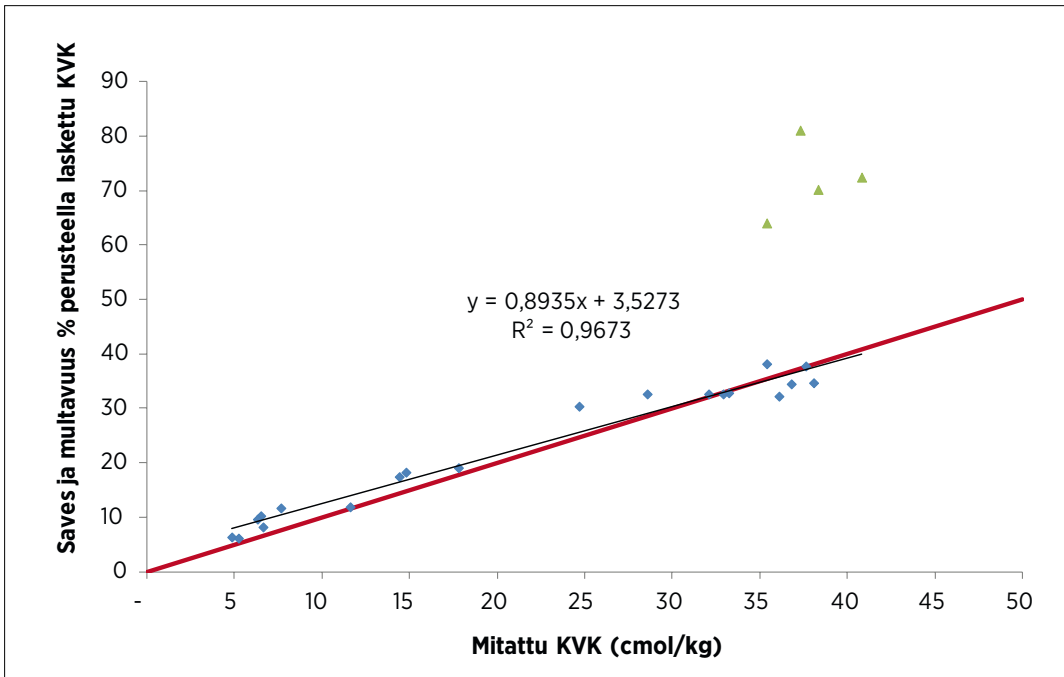
Kuva 5. Ei-happamien kationien (Ca, Mg, K ja Na) osuus määritetystä KVK:sta ("emäskyllästysaste") eri happamuuksilla OSMO-hankkeessa tutkituilla koelohkoilla vuoden 2015 maanäytteiden perusteella.



Kuva 6. Korrelaatio mitatun KVK:n ja yhteenlaskettujen ei-happamien kationien ja alumiinin (siniset vinoneliöt pallot, alempi viiva) sekä raudan (kolmiot, ylempi viiva) välillä. Punainen viiva kuvaa 1:1 suhdetta mitattujen ja mallinnettujen tulosten välillä.

Vertailun vuoksi laskettiin myös ennuste KVK:sta maalajitteiden perusteella. Multavuus oli määritetty ja sille käytettiin arvoa 200 cmol/kg. Savespitoisuus arvioitiin maalajikolmion perusteella, ja saveksen KVK:na käytettiin arvoa 44 cmol/kg (ks. osio 2.1). Kun maalajiluokan sisällä oleva vaihtelu oli suurta, käytettiin saven pitoisuutena luokan keskikohtaa (45 % hieta-, hiue- ja hiesusavimaille ja 15% hietamaille). Alhaisen KVK:n karkeille hietamaille käy-

tettiin savipitoisuutena 1 % arviota. Tulokset on esitetty kuvassa 7. Tulosten perusteella vastaavuus oli hyvä kivennäismailla, mutta heikompi eloperäisillä mailla. Tutkittujen multamaiden osalta voitaisiin olettaa, että niiden orgaanisen aineksen KVK olisi alempi kuin 200 cmol/kg. Mikäli käytettäisiin arvoa 100 cmol/kg, laskennallinen KVK vastaisi hyvin mitattua myös eloperäisillä mailla.



Kuva 7. Savespitoisuuden ja multavuuden perusteella laskettu KVK vastasi hyvin mitattua KVK:ta kivennäismailla (siniset vinoneliöt), muttei eloperäisillä mailla (vihreät kolmiot).

4 MAALAJIN JA SAVIMINERAALIEN KOOSTUMUKSEN ARVIOINTI

Mikäli KVK saadaan arvioitua kohtuullisen tarkasti, sen avulla voidaan arvioida maalaji. Kun oletetaan multavuuden olevan KVK:ltaan 200 cmol/kg ja saveksen 44 cmol/kg, kuvan 8. taulukko kuvaa multavuuden ja maalajin vaikutusta KVK:n. Sama KVK voidaan saavuttaa hyvin erilaisilla maalajien ja multavuuksien yhdistelmillä, esimerkiksi runsasmultainen hiue, multava hiuesavi ja vähämultainen aitosavi ovat kaikki kationinvaihtokapasiteetiltaan samanarvoisia.

Maan kationinvaihtokapasiteetti voidaan myös luokitella eräänlaisiin viljavuusluokkiin, jotka kuvaavat pellon ravinnevaraston potentiaalista kokoa. Mikäli KVK on alle 10 cmol/kg, pelto voidaan luokitella kationinvaihtokyvyltään alhaiseksi ("laiha" maa). Mikäli KVK on yli 25 cmol/kg, pelto on KVK:ltaan korkea ("lihava" maa). Alhaisen KVK:n mailla KVK:ta on syytä lisätä, jotta peltoon saadaan pidättymään riittävästi kasvinravinteita (etenkin Ca, Mg ja K). KVK:ta voi lisätä kasvattamalla joko multavuutta tai savimineraalien osuutta. Kuvan 8 laidoille on merkitty hehtaarin ruokamultakerrok-

sen sisältämät määrät orgaanista ainetta tai savea, joiden avulla voi arvioida lisättävien orgaanisten aineiden tai saveen määriä (oletettu ruokamultakerroksen painavan 2000 tonnia, mikä vastaa esimerkiksi 15 cm syvyyttä ja 1,33 t/m³ irtotiheyttä). Esimerkiksi multavuuden nostaminen 2 % tasolta 6 % tasolle tarkoittaa 80 tonnin lisäystä maan orgaanisen aineen määrässä hehtaarille. Vastaavan KVK lisäyksen saisi ajamalla pellolle 400 t/ha savimineraaleja (tai noin 550 t/ha aitosavea).

Ongelmalliseksi kaavion käytön tekee se, että suomalaisen viljavuusanalyysin luokat ovat huomattavan suuria. Virhettä voi tarkentaa hehkuskevennyksellä, jonka avulla multavuus saadaan määritettyä tarkasti. Tällöin kuvaa 8 voi käyttää savipitoisuuden arviointiin ja maalajiluokituksen tarkentamiseen, mikäli KVK on tiedossa. Tällä hetkellä (2017) käytetty laskennallinen KVK kuitenkin aliarvioi KVK:n, joten laskennallinen arvo on kerrottava luvulla 1,56 (ks. kuva 9.), jotta se vastaisi mitattua KVK:ta.

KVK (cmol/kg)		Ht/Hs/He			HtS/HsS/HeS			AS		t OM	
OM%	Saves	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%		80%
vm	0%	1	5	10	14	18	23	27	31	35	0
	1%	3	7	12	16	20	25	29	33	37	20
	2%	5	9	14	18	22	27	31	35	39	40
	3%	7	11	16	20	24	29	33	37	41	60
m	4%	9	13	18	22	26	31	35	39	43	80
	5%	11	15	20	24	28	33	37	41	45	100
	6%	13	17	22	26	30	35	39	43	47	120
	7%	15	19	24	28	32	37	41	45	49	140
rm	8%	17	21	26	30	34	39	43	47	51	160
	9%	19	23	28	32	36	41	45	49	53	180
	10%	21	25	30	34	38	43	47	51	55	200
	11%	23	27	32	36	40	45	49	53	57	220
erm	12%	25	29	34	38	42	47	51	55	59	240
	13%	27	31	36	40	44	49	53	57	61	260
	14%	29	33	38	42	46	51	55	59	63	280
	15%	31	35	40	44	48	53	57	61	65	300
	16%	33	37	42	46	50	55	59	63	67	320
	17%	35	39	44	48	52	57	61	65	69	340
	18%	37	41	46	50	54	59	63	67	71	360
	19%	39	43	48	52	56	61	65	69	73	380
t savea	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	400	

Kuva 8. Jos kationinvaihtokapasiteetti (KVK, cmol/kg) on analysoitu maanäytteestä, voidaan tämän kaavion avulla arvioida lohkon multavuus ja savipitoisuus. Laidoilla on kuvattu hehtaarin ruokamultakerroksen sisältämät saveksen ja orgaanisen aineen määrät massoina ja suhteellisina osuuk-

KVK (cmol/l)		Ht/Hs/He			HtS/HsS/HeS				AS		t OM
Multavuus	Saves	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	t OM
vm	0 %	1	5	8	11	14	15	18	21	24	0
	1 %	3	7	9	12	16	17	20	22	25	20
	2 %	5	8	11	14	17	18	21	24	26	40
	3 %	6	10	12	15	18	19	22	25	28	60
m	4 %	8	11	13	17	20	20	23	26	29	80
	5 %	9	13	15	18	21	21	24	27	30	100
	6 %	11	14	16	19	22	23	25	28	31	120
	7 %	13	16	17	21	24	24	26	29	32	140
rm	8 %	14	17	19	22	25	25	28	30	33	160
	9 %	16	19	20	23	26	26	29	31	34	180
	10 %	17	20	21	24	27	27	30	32	35	200
	11 %	18	22	23	26	29	28	31	33	36	220
erm	12 %	20	23	24	27	30	29	32	34	37	240
	13 %	21	25	25	28	31	30	33	35	38	260
	14 %	23	26	26	29	32	31	34	36	39	280
	15 %	24	27	27	30	33	32	35	37	40	300
	16 %	25	29	29	31	34	33	36	38	41	320
	17 %	27	30	30	33	35	34	37	39	42	340
	18 %	28	31	31	34	36	35	37	40	42	360
	19 %	29	32	32	35	37	36	38	41	43	380
20 %	30	33	33	36	38	37	39	42	44	400	
t savea		0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	

Kuva 9. Jos kationinvaihtokapasiteetti (KVK, cmol/l) on laskettu viljavuusanalyysituloksista, voidaan tämän kaavion avulla arvioida lohkon multavuus ja savipitoisuus. Laidoilla on kuvattu hehtaarin ruokamultakerroksen sisältämät saveksen ja orgaanisen aineen määrät massoina ja suhteellisuina osuuk-
sina.

Analyysiä voi tarkentaa entisestään, mikäli tiedetään maan savipitoisuus. Savipitoisuuden voi arvioida karkeasti kerrostumiskokeella (FAO), jossa kuivuttua ja jauhettua maata lietetään vedessä, johon on lisätty hieman suolaa. Maanäyte ravistetaan sekaisin ja maalajien annetaan laskeutua rauhassa. Savi laskeutuu viimeisenä, jolloin pintaan jäänyt kerros voidaan mitata viivoittimella. Tarkemman määrityksen aikaansaamiseksi tarvitaan tilavuuspainomittari ja saostuskemikaaleja (ks. esim. Weil ja Brady, 2016), mutta suuruusluokkaan pääsee yksinkertaisemmalla testillä.

Toinen tapa arvioida savipitoisuus aistinvaraisesti on käyttää ns. nauhakoetta (*ribbon test*). Siinä noin ruokalusikallinen maata murennetaan ja kostutetaan muovailtavaksi. Maanäytteestä muovailtaan pieni pallo, jota litistetään etusormen yli ohueksi nauhaksi, kunnes nauha katkeaa. Katkenneen nauhan pituus mitataan ja sitä suhteutetaan taulukkoarvoihin (Taulukko 2).

Mikäli maan multavuus ja savipitoisuus on selvitetty, mitatun KVK:n avulla voi selvittää, mikä on pellon savimineraalien koostumus. Mikäli KVK on huomattavan korkea verrattuna kuvan 8 arvoihin verrattuna, voidaan epäillä, että savi on smektiittia tai vermikuliittia. Nämä ovat korkeasta ravinteiden pidätyskyvystään huolimatta ongelmallisia, sillä ne turpoavat voimakkaasti vetyessään ja halkeilevat kuivuessaan. Taipumusta voidaan vähentää

Taulukko 2. Nauhatestin vastaavuus erilaisiin savipitoisuuksiin ja USDA maalajeihin. Maalajille ei ole suoraviivaista vastaavuutta suomalaisen maalajiluokittelun kanssa, joten maalajit on jätetty kääntämättä sekaannuksen välttämiseksi.

USDA maalaji	Nauhan pituus mm	Savipitoisuus %
Sandy loam	20	0-20
Sandy clay loam	25-40	20-35
Clay loam	40-50	25-40
Sandy clay	50-75	35-55
Light medium clay	75-85	40-60
Medium clay	85-100	60-80
Heavy clay	yli 100	80-100

lisäämällä kalsiumin määrää maassa, mutta toimenpiteen tarpeellisuuden kannalta kannattaa selvittää onko kyseessä turpoava savi, vai onko maan rakenteessa muutoin ongelmia. Mikäli KVK on selvästi alempi kuin kuvaajan perusteella voisi olettaa, voidaan epäillä savimineraalien olevan esimerkiksi kaoliinia, jolla on huomattavan heikko ravinteidenpidätyskyky. Tällöin kalkituksen ja ravinnehuollossa voi olla syytä käyttää hie- ja hiesumaiden suosituksia savimaiden suositusten sijasta, jotta vältytään pH:n liialliselta nousulta tai ravinneepäsuhdilta.

5 KATIONISUHTEET JA MAAN RAKENNE

Maan kationinvaihtopaikoille pidättyneillä katio-neilla on vaikutusta myös maan murustumiseen (Dontsova ja Norton, 2002; Schmidt, 2016; Zhang ja Norton, 2002). Kansantajuisesti on kuvattu, että kalsium muodostaa sillan savimineraalien välille (Schmidt, 2016). Kemiallisesti ajatellaan olevan kyse siitä, että kalsiumin ympärillä oleva vesikehä on ohuempi kuin esimerkiksi magnesiumin, joten se mahdollistaa savikolloidien päätyksen etäisyydelle, jossa ne tarttuvat toisiinsa (Hartge ja Horn, 2016). Kun savikolloidit tarttuvat toisiinsa, ne voivat liittyä toisiinsa ja muodostaa mikroskooppisia aggregaatteja ja vähitellen suurempia muruja flokkulaatio-ilmion kautta (Dontsova ja Norton, 2002). Vesikehältään suuremmat ja sähkövaraukseltaan heikommat kationit (Na, K, Mg, NH_4) pitävät savikolloideja erillään ja altistavat ne liettymiselle (Dontsova ja Norton, 2002). Ilmiö on tunnettu parhaiten maan suolaantumisen kautta (Na -ylimäärä) (Weil ja Brady, 2016), mutta sama ilmiö vaikuttaa myös maan rakenteen heikkenemisessä liiallisen kaliumin, ammoniumin tai magnesiumin yhteydessä (Schmidt, 2016).

Maan rakenteen kannalta on annettu erilaisia suosituksia ihanteellisista kationisuhteista. Amerikkalainen neuvoja Neil Kinsey on popularisoinut eräät kationisuhteet, joihin viitataan Albrecht-analyysinä (Ca 60-70 %, Mg 10-20 %, K 2-5 % ja Na 1 %), mutta saman tyyppisiä suosituksia on myös Saksassa käytettyjen kalkitus-suositusten perustana (Ca 70-80 %, Mg 10-15 %, K <5 %, Na <1 %, keveillä mailla Mg pitoisuus voi olla suurempi, savimaille suositellaan lisäksi 1 % reagoimatonta vapaata kalkkia) (Schmidt, 2016).

Selvien ihanteellisten kationisuhteiden sijasta voi olla hyvä ajatella tilannetta jatkumona. Mitä enemmän maassa on savea, sitä tärkeämpää on estää saven liettyminen ja edistää kestävää mururakennetta. Kalsiumin määrä maassa parantaa murustumista ja liiallinen magnesium, kalium tai natrium heikentää murustumista. Lisäämällä kalsiumia selvästi ylimäärin muihin ravinteisiin nähden saadaan kestäviä muruja, mutta samalla voidaan heikentää magnesiumin ja kaliumin käyttökelpoisuutta sekä kalkitusaineiden tapauksessa nostaa pH:n hivenravinteiden kannalta liian korkeaksi.

6 KALKITUSTARPEEN LASKENTA JA VERTAILU MUIHIN MENETELMIIN

Kationinvaihtokapasiteetin avulla voidaan myös laskea tarvittava kationien lisäysmäärä, jotta kationien suhde maassa olisi suotuisa. Kalkitustarve voidaan laskea kaavalla:

$$m = (Ca\% - Ca\%_{opt}) \times KVK \times e \times 2 \times \frac{1}{C_{Ca} - kalkki} \quad (1)$$

missä m = kalkitustarve [kg/ha]

$Ca\%$ = kalsiumin osuus kationinvaihtokapasiteetista [-]

$Ca\%_{opt}$ = kalsiumin osuus kationinvaihtokapasiteetista tavoitetilassa [-]

KVK = potentiaalinen kationinvaihtokapasiteetti (cmol/kg)

e = ekvivalenssikerroin (kalsiumilla 200 mg Ca/cmol)

2 = muuntokerroin kg/ha / mg/kg

$C_{Ca-kalkki}$ = kalsiumin pitoisuus kalkitusaineessa.

Esimerkiksi jos kationinvaihtopinnoilla on 50 % Ca-ioneja ja tavoitteena olisi 70 % Ca-ioneja, maahan olisi lisättävä kalsiumia siten, että ionikyllästy muuttuu 70 % - 50 % = 20 %. Jos maan kationinvaihtokapasiteetti on 20 cmol/kg, tämä tarkoittaa 20 % x 20 cmol/kg = 4 cmol/kg. Kalsiumin moolimassa on 40 g/mol ja varaus on +2, joten yksi cmol/kg varausta vastaa 200 mg Ca/kg maata. Tässä tapauksessa maaperän kalsiummäärän olisi noustava 4 cmol/kg x 200 mg Ca/cmol = 800 mg Ca/kg. Jos hehtaari pellon ruokamultakerrosta painaa 1,3 t/m³ x 10 000 m² x 0,15 m = 1950 t = 1950 000 kg, kalsiumin lisäystarve on 1950 000 kg/ha x 800 mg/kg ≈ 2 x 800 = 1600 kg/ha. Jos kalkitusaineessa kalsiumia on 30 %, kalkkia tarvitaan noin 5 300 kg/ha.

Kalkitustarve voidaan laskea vastaavalla tavalla myös magnesiumin suhteen, käyttäen ekvivalenssikerroinena 120 mg Mg/kg maata tai kaliumin suhteen käyttäen ekvivalenssikerroinena 390 mg K/kg maata. Jos maassa on liikaa magnesiumia, menetelmän avulla voidaan laskea, paljonko maahan olisi lisättävä kalsiumia, jotta saadaan magne-

sium syrjäytettyä. Tällöin kaavassa (1) vaihdetaan $Ca\%$ ja $Ca\%_{opt}$ tilalle vastaavat magnesiumin osuudet kationinvaihtopinnoista (esim. 25 % Mg, tavoite 12 % Mg, ylimäärin 13 %, tarvitaan 13 % lisää Ca syrjäyttämään Mg).

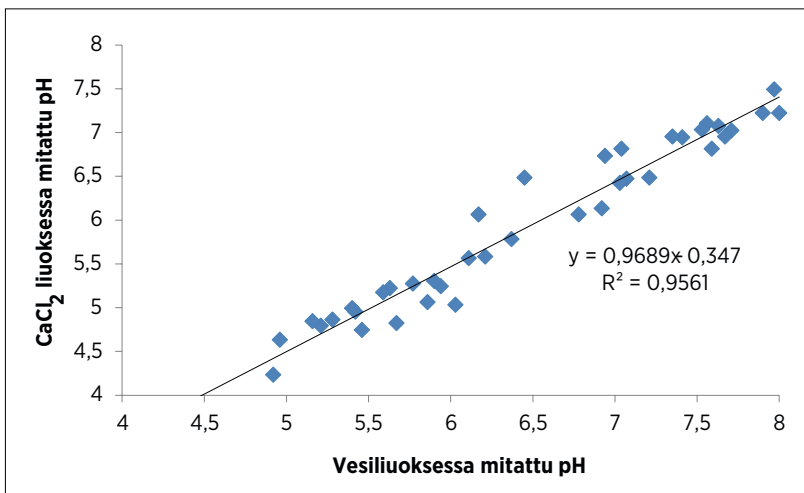
Käytännössä kationinvaihtokapasiteettiin pohjautuva kalkitussuositusmenetelmä aliarvioi kalkitustarvetta, sillä siinä oletetaan, että kaikki maahan lisättävä kalsium, magnesium tai kalium päätyy vaihtopinnoille ja syrjäyttää vastaavasti muita kationeja. Lisäksi laskennallinen kationinvaihtokapasiteetti on alhaisempi kuin mitattu kationinvaihtokapasiteetti. Tämän johdosta laskennalla saadut arvot voi käytännössä kertoa 1,5-2:lla. Toisaalta pienillä määrillä toteutettu toistuva kalkitus välttää ylikalkituksen riskejä.

Seuraavassa testattiin kationinvaihtokapasiteettiin pohjautuvaa kalkitussuositusta ja verrattiin sitä kolmeen muuhun kalkitussuositusmenetelmään: suomalaiseseen viljavuusanalyysiin pohjautuvaan kalkituslaskuriin, puskuri-pH pohjaiseen kalkitustarvearvioon ja saksalaiseen VDLUFA kalkitussuositukseen (VDLUFA, 2000). Vertailun aineistona käytettiin 24 OSMO-hankkeen koelohkoja, joiden tiedot on kuvattu aiemmassa raportissa (Mattila ja Rajala, 2017).

Suomalaisen viljavuusanalyysiin perustuva kalkituslaskelma tehtiin kaksivaiheisesti. Ensimmäiselle lohkolle määritettiin maalajin ja multavuuden perusteella tavoite-pH (Viljavuusanalyysin tulkinta -opas), minkä jälkeen Nordkalk Kalkilaattorilla laskettiin suositus kalkitustarpeesta tavoite-pH:n saavuttamiseksi. Kalkituslaskennassa hyödynnettiin eri koelohkojen sijaintia siten, että käytettiin läheltä saatavia kalkitusaineita.

Puskuri-pH pohjainen suositus tehtiin Woodsend laboratoriodien tulosten perusteella. Alkuperäinen suositus laskettiin olettaen 100 % käyttökelpoisuus ja ilmoitettiin kalsiumkarbonaattina. Tulos muunnettiin kalsiittikalkiksi jakamalla se luvulla 0,6, mikä ottaa huomioon kalsiitin heikomman käyttökelpoisuuden.

Saksalainen VDLUFA suositus tehtiin kolmessa vaiheessa. Ensimmäiset maalajit luokiteltiin kuuteen luokkaan savipitoisuuden mukaan ja neljään luokkaan multavuuden perusteella. Sen jälkeen käytet-



Kuva 10. Vastavuus vesiliuoksessa ja kalsiumkloridiliuoksessa mitattujen pH arvojen välillä oli hyvä yhden Yhdysvaltalaisen aineiston perusteella (Midwest Laboratories, 2016).

tiin yhtälöä ($\text{pH}_{\text{CaCl}_2} = 0,96 \times \text{pH}_{\text{vesi}} - 0,347$) muuttamaan Suomessa käytetty vesi-pH-lukema Saksassa käytettyyn CaCl_2 -pH-lukemaksi (yhtälö tehty Midwest labs aineiston perusteella, Kuva 10). Lopuksi VDLUFA -taulukosta (VDLUFA, 2000) luettiin kullekin maalajiluokalle ja pH:lle sitä vastaava kalkitusmäärä, jolla pH saadaan nostettua optimitasolle. Kalkitusmäärät oli annettu kalsiumoksidina, joten ne kerrottiin kahdella, jotta ne saatiin vastaamaan suunnilleen kalsiittikalkitusta (Schmidt, 2016).

Eri kalkitussuositusmenetelmillä saadut kalkitussuosituksia on esitetty taulukossa 3. Suomalainen kalkituslaskuri antoi suosituksia kuudelle lohkolle, joilla pH oli alle tavoitetaso. Kaksi lohkoista oli savimaita, kaksi hietamaita ja kaksi erittäin runsasmultaista hiekkamoreenia. Savimailla OSMO-hankkeessa tuotettuun KVK-laskuriin pohjautuva suositus vastasi hyvin suomalaista kalkitussuositusta, ero oli noin 1 t/ha. Puskuri-pH menetelmä antoi näille lohkoille noin puolet alhaisemman kalkitussuosituksen suomalaisiin suosituksiin verrattuna. Saksalainen VDLUFA antoi toiselle savi-lohkolle samansuuruisen kalkitussuosituksen kuin suomalainen suositus ja KVK-pohjainen laskelma, mutta toiselle lohkolle (Hy K) suositus oli yli kaksinkertainen (noin 10 t/ha). Ero johtui lohkojen multavuudesta ja siitä, että saksalaisissa suosituksissa vähämultaisille savimaille suositellaan suurta kalkitusmäärää rakenteen parantamiseksi. Hiekkamoreenille suositukset poikkesivat toisistaan selvästi, happamuuden (pH 4,9-5,2) johdosta suomalainen kalkitussuositus oli 14-20 t/ha pH:sta riippuen. KVK:n perusteella lasketut kalkitusmäärät olivat huomattavasti alempia (3-6 t/ha kalsiittia ja 3-4 t/ha dolomiittia). Puskuri-pH-menetelmällä saadut kalkitussuosituksia olivat näiden kahden väliltä

(6-7 t/ha). Saksalaisissa suosituksissa kalkitussuosituksia ei ole tuotettu yli 30 % multavuuden maille. Hietamailla kalkitussuosituksia olivat samansuuntaisia, kaikki menetelmät suosivat lievää kalkitusta välillä 0,8-1,5 t/ha.

KVK:n perusteella voitiin laskea kalkitussuositus myös viidelle lohkolle, joille ei suomalaisten suositusten perusteella ollut kalkitustarvetta sekä kipsikäsittelysuositus kuudelle lohkolle. Näillä lohkoilla pH on suositusten rajoissa, mutta kalsiumin osuus kationinvaihtokapasiteetistä on liian alhainen. Useimmilla lohkoilla KVK-pohjainen suositus oli samansuuntainen puskuri-pH ja VDLUFA menetelmien avulla laskettuihin suosituksiin. Merkittävin ero oli multamailla (Ha 0 ja Ha 1), joilla puskuri-pH-menetelmä suositteli huomattavasti suurempaa kalkitusta (6-7 t/ha) KVK-pohjaiseen suositukseen verrattuna (noin 2 t/ha).

Tulosten perusteella KVK:n avulla lasketut suosituksia ovat samansuuntaisia muilla menetelmillä saataviin suosituksiin verrattuna. Suurin ero on happamilla eloperäisillä mailla, joilla KVK-pohjainen laskelma aliarvioi KVK:n ja sen perusteella myös kalkitustarpeen. Kä 0 ja Kä 1 lohkoilla mitattu KVK oli noin kolminkertainen verrattuna laskettuun ja Ha 0 ja Ha 1 lohkoilla noin kaksinkertainen. Mikäli KVK-pohjaiset suositukset kerrottaisiin multamailla kahdella, suositukset vastaisivat melko hyvin muilla menetelmillä saatuja suosituksia. KVK-menetelmän etuna on se, että se huomioi pH:n lisäksi myös maaperän Ca ja Mg pitoisuudet sekä KVK:n. Koska yhden maalajiluokan sisällä KVK voi vaihdella merkittävästi (esimerkiksi multava HeS, KVK 20-39 cmol/kg), kationinvaihtokapasiteettiin perustuva laskenta huomioi maaperän vaihtelua tarkemmin kuin maalajiluokkiin perustuva.

Taulukko 3. Eri kalkitussuositusmenetelmien vertailu 24 koelohkon viljavuustietojen perusteella.

Lohkojen tiedot						Kalkitussuositus t/ha						
Lohko	pH vesi	pH vesi	pH puskuri	Maalaji	Multavuus	Kalkkilaattori	Kalkitusaine (K = kalsiitti, Mg = magnesiumipitoinen)	Puskuri-pH menetelmä	KVK laskuri kalsiitti	KVK laskuri dolomiitti	KVK laskuri kipsi	VDLUFA metodi, kalsiitti
He 0	6,5	6,1	6,5	HeS	rm	-	-	1,8	-		3,4	3,6
He 1	6,6	6,2	6,5	HeS	m	-	-	1,8	-		4,6	3,6
He K	6,8	6,2	6,6	HtS	rm	-	-	1,7				3,6
Hy 0	6,1	5,6	6,1	HtS	rm	-	-	3,7	2,8		-	3,2
Hy 1	5,7	5,5	6,1	HeS	rm	6,7	K	3,8	7,3		-	6,0
Hy K	5,9	5,8	6,4	HeS	rm	4,0	K	2,3	3,0		-	9,8
Ju 0	6,5	6,2	6,7	HtS	rm	-	-	1,3	-		3,3	3,6
Ju 1	6,3	6,1	6,7	HtS	rm	-	-	1,3	2,5		-	3,8
Ju K	6,8	6,3	6,6	HeS	m	-	-	-				3,6
Kä 0	5,2	5,3	5,6	HkMr	erm	14,3	Mg	5,8	3,1	3,2	-	-
Kä 1	4,9	5,1	5,4	HkMr	erm	20,4	Mg	7,2	5,9	4,3	-	-
Kä K	6,6	6,1	6,7	KHt	m	-	-	1,2				-
Lu 0	6,0	5,7	6,7	KHt	m	1,5	K	1,2	1,1		-	1,2
Lu 1	6,1	5,9	6,7	KHt	m	0,8	K	1,2			-	1,2
Lu K	6,9	6,2	6,9	KHt	m	-	-	-		1,2		-
HA 0	5,9	6,0	5,5	Mm		-	-	6,5	1,8		-	-
HA 1	5,9	5,4	5,4	Mm		-	-	6,8	1,7		-	-
HA K	5,9	5,3	5,6	Mm		-	-	6,0	2,0		-	1,8
PA 0	6,9	6,3	6,7	HHt	rm	-	-	-				-
PA 1	6,6	6,2	6,8	HHt	m	-	-	-				-
PA K	6,5	6,1	6,6	HHt	rm	-	-	1,5				-
SA 0	7,2	6,6	6,9	Hs	m	-	-	-			2,0	-
SA 1	7,1	6,6	6,8	Hs	m	-	-	-			2,0	3,0
SA K	7,0	6,7	6,8	Hs	rm	-	-	-			2,0	3,0

Kationinvaihtokapasiteettiin perustuva kalkitus-suositus ei sisällä oletuksia ylläpitokalkituksesta. *Ylläpitokalkituksen määrä* riippuu muun viljely-tekniikan vaikutuksista, etenkin ravinnepoistumis-ta ja käytetyistä lannoitteista. Luontaisesti sadevesi on lievästi hapanta (pH 5,6) mikä aiheuttaa maan happamoitumista ja huuhtelee Ca, Mg, K ja Na io-neja maasta. Ravinnehuhtouma voi vastata noin 1-1,5 t kalkitusmäärää vuosittain (Schmidt, 2016). Kationien huuhtoutuminen riippuu myös maape-rän anionien määrästä, joten kloridien, nitraattien ja sulfaattien korkea pitoisuus lisää myös kationi-en huuhtoutumista. Huuhtoutumisen lisäksi lan-noitus vaikuttaa happamoitumiseen myös kasvien ravinteiden oton kautta. Kun kasvit ottavat katio-niravinteita (NH₄, Ca, Mg, K), ne erittävät samalla vetyioneja maahan ja happamoittavat juuriston ympäristöä. Lisäksi typpilannoitteiden muuttumi-nen nitraatiksi tuottaa maahan vetyä ja happamoit-taa maata (Schmidt, 2016).

Peruskalkituksessa ja ylläpitokalkituksessa on tarpeen ottaa huomioon maalaji ja multavuus maan pH:n, kalsium- ja magnesiumpitoisuuksien lisäksi (kuva 11).

Eri lannoitteiden vaikutus kalkitustarpeen voidaan laskea Pierre-Sluijmsanin kaavalla (Harmsen et al., 1990). Alkuperäisessä muodossaan kaava ilmoittaa eri lannoiteseosten vaikutuksen kalkitustarpeeseen kalsiumoksidina ja ravinnepi-toisuudet syötetään kaavaan oksideina. Kun kaava muunnetaan vastaamaan suomalaista käytäntöä, jossa ravinteet ilmoitetaan alkuaineina ja kalkitus-

tarve vastaa kalsiittia (2 t kalsiittia vastaa 1 t CaO), kaava on:

$$m = -2,8 \times Ca - 4,64 \times Mg - 1,45 \times K - 2,43 \times Na + 1,83 \times P + 3,5 \times S + 1,6 \times Cl + 2 \times N \quad (2)$$

missä m = kalkitustarve (kg/ha kalsiittikalkkia)

Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, N = ravinteiden määrä lannoitteessa (kg/ha).

Tällöin esimerkiksi 100 kg typpilannoitus ammo-niumsulfaatilla (21 N, 24 S) lisää kalkitustarvetta seuraavasti: $m = 2 \times 100 \text{ kg N/ha} + 3,5 \times 114 \text{ kg S/ha} = 600 \text{ kg/ha}$. Jos typpilannoitus toteutettaisiin moniravinnelannoitteella (esim. 23-3-8-3S-7Cl) kalkitustarve olisi noin 270 kg/ha ja kalsiumammo-niumnitraatilla noin 100 kg/ha. Typpilannoitteen valinnalla voidaan vaikuttaa huomattavasti ylläpi-tokalkituksen tarpeeseen.

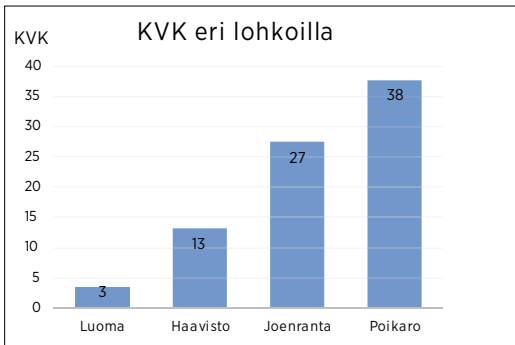
Luonnonmukaisessa viljelyssä, jossa väkylan-noitteita ei käytetä, ylläpitokalkitustarve on pie-nempi. Lisäksi esimerkiksi lannan ja viherlannoit-tuksen mukana maahan tulee runsaasti yhdisteitä, joilla on kalkitusvaikutusta. Pierre-Sluijmsanin kaavalla laskettuna esimerkiksi 8 tonnin maahan silputtu viherlannoitusnurmiseos vastaa 200-600 kg/ha kalkitusta riippuen kasvuston palkokasvipi-toisuudesta ja typen huuhtoutumismääristä. Nau-dan lietalannalla kalkitusvaikutus on noin 200 kg/ha (50 m³/ha), kanan kuivikelannalla samoin 3 t/ha käyttömäärällä, sian lietalannalla vaikutus on pienempi (n. 75 kg/ha 25 m³/ha käyttömäärällä).



Kuva 11. Kalkitus on tarpeen tehdä lohkon eri osille maalajin ja multavuuden mukaan. Kuvan savimaan loholla karkean maalajin alue on jätetty kokonaan kalkitsematta. Kuva Jukka Rajala.

7 ESIMERKKEJÄ KATIONINVAIHTO- KAPASITEETIN HYÖDYNTÄMISESTÄ ONGELMALOHKOILLA

Kationinvaihtokapasiteetin KVK avulla voidaan arvioida pellon kykyä varastoida ravinteita kasveille käyttökelpoiseen muotoon. Toisaalta suhteuttamalla ravinnepitoisuudet pellon kationinvaihtokapasiteettiin voidaan arvioida eri ravinteiden saatavuutta kasveille (Marschner ja Rengel, 2012), tai toisaalta ravinteiden osuuden vaikutusta maan murustuvuuteen (Dontsova ja Norton, 2002). Tässä luvussa tarkastellaan eri tiloilla havaittuja ongelmalohkoja ja niiden viljavuutta kationinvaihtokapasiteetin avulla. Esimerkkilohkoilla KVK vaihtelee varsin paljon (kuva 12).



Kuva 12. Esimerkkilohkojen KVK (cmol/l) vaihtelee kolmesta 38:aan maalajista ja multavuudesta sekä happamuudesta johtuen.

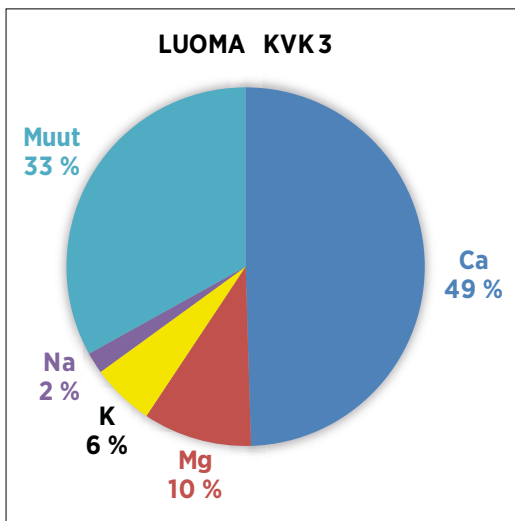
VÄHÄMULTAINEN HIETAMOREENI

Ensimmäinen esimerkki on vähämultainen hietamoreenilohko, jossa kationinvaihtokapasiteetti on äärimmäisen alhainen (Taulukko 4 ja kuva 13). Lohkon multavuutta ei ole mitattu hehkuskevennyksellä, mutta sen arvioitu kationinvaihtokapasiteetti on 3,4 cmol/l, mikä merkitsee erittäin alhaista multavuutta ja saveksen määrää (Kuva 9). Maaperän kyky varastoida ravinteita on erittäin alhainen, mikä asettaa haasteita tasapainoiselle kasvinravitsemukselle. Lannoitus tulisi jakaa useisiin pieniin käyttömääriin, jotta vältetään ravinteiden huuhtoutumiselta tai epätasapainoilta kasvin ravinteiden otossa. Lisäksi alhainen multavuus merkitsee sitä, että maaperästä ei vapaudu juurikaan typpeä, joten kasvin typentarve on katettava joko lannoituksella tai käyttämällä palkokasveja ei-palkokasvien esikasveina (kerääjä- ja aluskasvit, jne).

Mikäli lohkon multavuus saataisiin lisättyä tasolle 5 %, lohkon kyky pidättää ravinteita olisi hyvä. Samalla vaikutettaisiin positiivisesti myös maaperästä vapautuvan typen määrään sekä pellon kykyyn varastoida vettä. Tarvittava orgaanisen aineen lisäsmäärä on kuitenkin huomattavan suuri, noin 100 tonnia hehtaarille. Kun lisäksi huomioidaan se, että hietamaalla lisätystä orgaanisesta aineesta hajoo suurin osa (80-96 %) nopeasti, lisäys on

Taulukko 4. Vähämultaisen hietamaan ("Luoma") ravinnetilanne kationinvaihtokapasiteetin kautta tarkasteltuna. Liian alhaiset lukemat on merkitty punaisella ja liian korkeat sinisellä.

	Ravinnepitoisuus mg/l	Ravinnepitoisuus cmol/l	% potentiaalisesta KVK:sta	% efektiivisestä KVK:sta
Maalaji ja multavuus	vm HtMr			
pH	5,6			
Ca	336	1,68	49 %	74%
Mg	40	0,33	10 %	15%
K	75	0,19	6 %	8%
Na	15	0,07	2 %	3%
	Efektiivinen KVK yht.	2,27	67 %	100%
	Happamuus	1,13	33 %	
	Potentiaalinen KVK arvioituna	3,40	100 %	



Kuva 13. Vähämultaisen hietamaan ("Luoma") kationien suhteelliset osuudet. "Muut" -osuus on varsin suuri.

pidempiaikainen prosessi. Parhaiten orgaanisen aineen lisäys onnistuisi lisäämällä mahdollisimman pysyvässä muodossa olevaa orgaanista ainetta (ts. mädätysjäännös, kypsä komposti tai biohiili). Puukuiduilla tai metsäteollisuuden lietteillä voitaisiin ympäristökorvauksen puitteissa lisätä suuria määriä orgaanista ainetta, mutta aineen alhaisen pysyvyyden johdosta lisäysten pitäisi olla toistuvia. Joka tapauksessa lohkolla kannattaa pyrkiä lisäämään multavuutta viljelytekniikan avulla vähentäen muokkausta (eroosio, murujen hajoaminen) ja hyödyntämällä syysviljoja sekä kerääjäkasveja (lisäyhteytys, juuristo ja kate). Lohkon alhaisen multavuuden johdosta pienilläkin orgaanisen aineen lisäyksillä on todennäköisesti suuri vaikutus lohkon viljeltävyyteen.

Lohkon alhaisen kationinvaihtokapasiteetin lisäksi lohkolla on ravinteiden epäsuhtia. Happamuus on liian suurta (pH alhainen), kalsiumia ja magnesiumia on liian vähän ja kaliumia on liikaa suhteessa kationinvaihtokapasiteettiin. Eloperäisen lannoituksen myötä maahan tulisi kaliumia, mutta samalla on huolehdittava kalsiumin ja magnesiumin lisäämisestä (kalkitus tai puukuidut), jotta ravinne-epäsuhtia ei pahene.

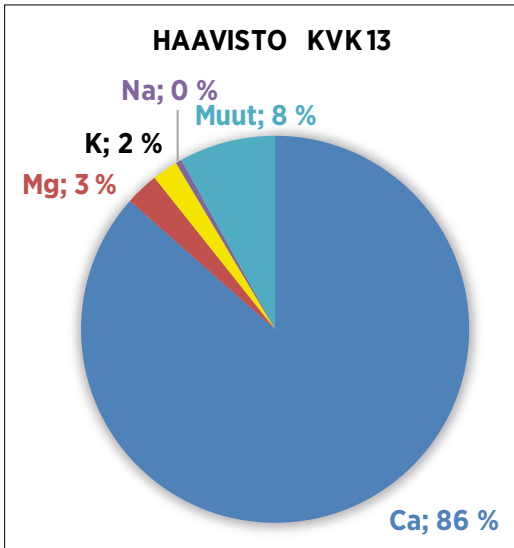
RUNSASMULTAINEN HIENO HIETA

Toinen esimerkki on runsasmultainen hieno hieta, jossa KVK on kohtalaisella tasolla, mutta ravinteiden suhteet eivät ole tasapainoisia (Taulukko 5 ja kuva 14). Pellon arvioitu KVK on 13 cmol/l, mikä vastaa 6-8 % multavuutta (Kuva 9). Multavuuden perusteella pellostä vapautuu todennäköisesti runsaasti tyypeä, jos kasvukunto on muutoin hyvä. Pellossa on edellytyksiä varastoida ravinteita kasveille käyttökelpoiseen muotoon, mutta suurin osa KVK:sta on kalsiumin kyllästämää (86 % potentiaalisesta KVK:sta, 94 % efektiivisestä KVK:sta). Tämä haittaa kasvin magnesiumin ja kaliumin saantia. Lisäksi pellon pH on korkea, mikä voi vähentää hivenravinteiden käyttökelpoisuutta.

Lohkon ravinnesuhteita voisi korjata lisäämällä magnesiumia ja kaliumia, jotka syrjäyttävät vähitellen kalsiumia. Koska kalsium pidättyy maahan voimakkaammin kuin magnesium ja kalium, lisäysmäärien on oltava suuria. Jos pellossa pyritäisiin esimerkiksi 18 % osuuteen KVK:sta magnesiumin osalta, peltoon olisi lisättävä noin 500 kg/ha magnesiumia, olettaen, että kaikki syrjäyttäisi kalsiumia. Suositukseen nähden kalsiumia on maassa ylimäärin noin 1300 kg/ha. Magnesiumin ja kaliumin lisäys kalkitusaineiden tai esimerkiksi biotiitin kautta lisäisi maahan myös kalsiumia ja saattaisi nostaa maan pH:ta entisestään. Mikäli käytetään

Taulukko 5. Runsaasmultaisen hietamaan ("Haavisto") ravinnetilanne kationinvaihtokapasiteetin kautta tarkasteltuna. Liian alhaiset lukemat on merkitty punaisella ja liian korkeat sinisellä.

	Ravinnepitoisuus mg/l	Ravinnepitoisuus cmol/l	% potentiaalisesta KVK:sta	% efektiivisestä KVK:sta
Maalaji ja multavuus	rm HHT			
pH	6,7			
Ca	2280	11,4	86 %	94 %
Mg	44	0,37	3 %	3 %
K	110	0,28	2 %	2 %
Na	15	0,07	0 %	1 %
	Efektiivinen KVK yht.	12,1	92 %	100 %
	Happamuus	1,12	8 %	
	Potentiaalinen KVK arvioituna	13,2	100 %	



Kuva 14. Runsasmultaisen hietamaan ("Haavisto") kationien suhteelliset osuudet. Kalsiumin osuus on erittäin suuri ja magnesiumin hyvin pieni.

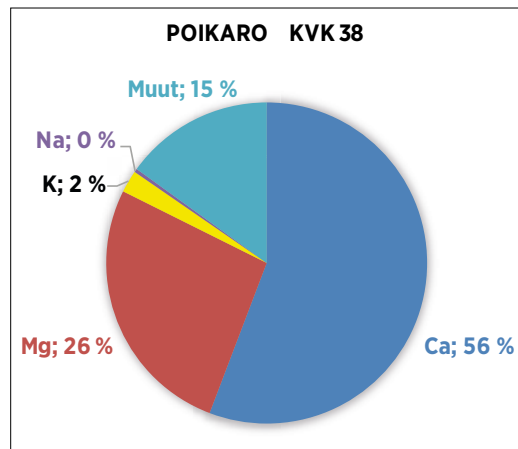
happamoittavia lannoitteita, pH laskisi ajan mittaan ja seuraavilla kalkituskerroilla biotiitilla saataisiin tasapainoisempi ravinnetilanne. Luonnonmukaisessa viljelyssä magnesiumia ja kaliumia saa lisättyä ilman pH:n nousua esimerkiksi kiseriitillä (magnesiumsulfaatti) tai patenttikalilla (kaliummagnesium-sulfaatti).

RUNSMULTAINEN HIETASAVI

Kolmas pelto on runsasmultainen hietasavi, jonka pH on 6,3 (Taulukko 6 ja kuva 15). Suomalaisen viljavuusanalyysin tulkinnan perusteella pellon kalsiumpitoisuus on korkea. Pellon arvioitu KVK on kuitenkin 38 cmol/l, mikä vastaisi erittäin runsasmultaista hietasavea tai runsasmultaista aitosavea. Pellon kyky varastoida ravinteita on erittäin suuri, mihin verrattuna kalsiumin määrä on alhainen. Sen

sijaan magnesiumia on maassa runsaasti (yli 20 % KVK:sta). Suuri magnesiumin määrä suhteessa kalsiumiin voi johtaa maan heikentyneeseen mururakenteeseen ja liettyvyyteen. Kaliumin taso on hyvä suhteessa viljavuusanalyysin tulkintaan, mutta suhteutettuna pellon kykyyn varastoida ravinteita taso on melko alhainen.

Tavoitetasoihin (esim. Ca 68 % Mg 12 %) verrattuna pellossa on 12 % liian vähän kalsiumia ja 15 % liikaa magnesiumia. Kalsiumin lisääminen syrjäyttäisi magnesiumia. Esimerkiksi kalkitus 6 t/ha kalsiittikalkilla lisäisi maahan noin 2000 kg/ha kalsiumia ja syrjäyttäisi magnesiumia, mikä voisi parantaa maan rakennetta. Tämä kalkitusmäärä nostaisi pH:ta alle 0,4 yksikköä kalkitustaulukoiden perusteella, jolloin pH voisi nousta tasolle "korkea". Jos magnesiumia haluttaisiin syrjäyttää kalsiumilla ilman pH:n nousua, pelolle voitaisiin käyttää kipsiä (kalsiumsulfaatti). Koska kipsissä on vähemmän kalsiumia kuin kalsiittikalkissa, käyttömäärä olisi suurempi (noin 8 tonnia/hehtaari).



Kuva 15. Runsasmultaisen hietasaven ("Poikaro") kationien suhteelliset osuudet. Magnesiumin osuus on varsin suuri ja kalsiumista on vajausta.

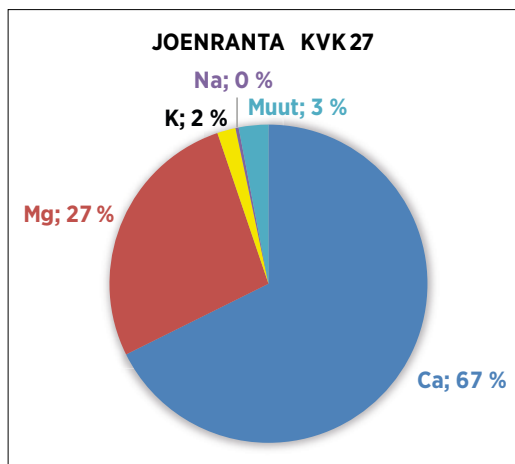
Taulukko 6. Runsasmultaisen hietasaven ("Poikaro") ravinnetilanne kationinvaihtokapasiteetin kautta tarkasteltuna. Liian alhaiset lukemat on merkitty punaisella ja liian korkeat sinisellä.

	Ravinnepitoisuus mg/l	Ravinnepitoisuus cmol/l	% potentiaalisesta KVK:sta	% efektiivisestä KVK:sta
Maalaji ja multavuus	rm HtS			
pH	6,3			
Ca	4200	21	56 %	66 %
Mg	1200	10	27 %	31 %
K	330	0,8	2 %	3 %
Na				
	Efektiivinen KVK yht.	31,8	85 %	100 %
	Happamuus	5,8	15 %	
	Potentiaalinen KVK arvioituna	37,6	100 %	

SAVIMAA, JOSSA ON MAGNESIUMIA LIIKAA JA PH KORKEA

Neljäs esimerkkilohko on savimaa, jossa on magnesiumia liikaa, mutta pH on jo korkea (Taulukko 7 ja taulukko 16). Suomalaisen viljavuusanalyysin perusteella lohkolla on korkean ja arveluttavan korkean välissä oleva pH ja kalsiumin pitoisuus on korkea. KVK tarkastelun perusteella pellon KVK on 27 cmol/l, mikä vastaa hyvin maalajia (rm HeS). Toisaalta edelliseen peltoon verrattuna KVK on noin 10 cmol/l alempi, vaikka molemmat pellot ovat savisuudeltaan ja multavuudeltaan samaa maalajiluokkaa, mikä tuo hyvin esiin maalajiluokkien suurpiirteisyyden. Pellosta mitattu hehkutushäviö oli 7,3 %, mikä on runsasmultaisen luokan alarajalla, joten suuren osan KVK:sta voi päätellä olevan peräisin saveksesta ja pellon savisuuden olevan korkea. Magnesiumin osuus KVK:sta on suuri, mikä voi heikentää saven murustumista, lisätä liettymistä ja heikentää pellon rakennetta. Kaliumin osuus KVK:sta on alhainen, mikä heikentää kaliumin käyttökelpoisuutta.

Jos suositeltavana kalsiumin ja magnesiumin osuutena voitaisiin pitää aluetta Ca 60–80 % ja Mg 10–20 % pellossa olisi noin 7–17 % liikaa magnesiumia ja 0–13 % liian vähän kalsiumia. Kalsiumin lisäyksellä voitaisiin syrjäyttää magnesiumia ja parantaa ravinteiden käyttökelpoisuutta sekä rakennetta. Suosituksiin nähden peltoon pitäisi lisätä noin 800 kg/ha kalsiumia ja poistaa noin 600 kg/



Kuva 16. Runsmultaisen hiesaven ("Joenranta") kationien suhteelliset osuudet. Magnesiumin osuus on suuri ja "muut"-osuus pieni.

ha magnesiumia. Koska pH on valmiiksi korkea, kalsiumin lisäys kannattaisi tehdä kipsillä (käyttömäärä noin 3 t/ha). Kipsi lisää maahan kalsiumia, joka syrjäyttää magnesiumia, joka huuhtoutuu maasta sulfaatin myötä. Toisaalta samalla poistuu myös kaliumia, josta maassa on puutetta, joten kaliumin määrää olisi hyvä täydentää maahan esimerkiksi naudantai kananlannalla.

Taulukko 7. Runsmultaisen hiesaven ("Joenranta") ravinnetilanne kationinvaihtokapasiteetin kautta tarkasteltuna. Liian alhaiset lukemat on merkitty punaisella ja liian korkeat sinisellä.

	Ravinnepitoisuus mg/l	Ravinnepitoisuus cmol/l	% potentiaalisesta KVK:sta	% efektiivisestä KVK:sta
Maalaji ja multavuus	rm HeS			
pH	7,0			
Ca	3700	19	67 %	70 %
Mg	890	7	27 %	28 %
K	200	0,5	2 %	2 %
Na	20	0,09	0 %	0 %
	Efektiivinen KVK yht.	26,5	97 %	100 %
	Happamuus	0,9	3 %	
	Potentiaalinen KVK arvioituna	27,4	100 %	

8 YHTEENVETO

Kationinvaihtokapasiteetti kuvaa maan kykyä varastoida positiivisesti varautuneita ravinteita kasveille käyttökelpoiseen muotoon. Sitä voidaan pitää indikaattorina maan viljavuudelle ja ravinteikkuudelle. Toisaalta kationinvaihtokapasiteetti määrytyy maan saves- ja multavuuspitoisuuksien perusteella, joten sen avulla voidaan tarkentaa maalajien määrittämistä sekä hahmottaa eroja maalajiluokkien sisällä.

Kationinvaihtokapasiteetti voidaan määrittää kemiallisesti, mutta se voidaan myös arvioida suomalaisen viljavuusanalyysin perusteella. Tämän raportin tulosten perusteella suomalainen viljavuusanalyysi tuottaa tarkemman arvion kuin maailmalla yleisemmin käytetty Mehlich 3 -uuttoneesteeseen pohjautuva arviointi. Laskennallinen KVK on sa-

mansuuntainen mitatun kanssa, mutta tuottaa keskimäärin liian alhaisia KVK:n arvioita.

Kationinvaihtokapasiteettia voidaan hyödyntää viljavuusanalyysin tulkinnessa maalajien tarkempaan määrittämiseen, maaperän koostumuksen arviointiin, kalkitussuosituksen muodostamiseen ja erilaisten ravinne-epäsuhtien tunnistamiseen. Laskennallisen kationinvaihtokapasiteetin avulla muodostetut kalkitussuositukset ovat samansuuntaisia kuin muut tutkitut menetelmät. KVK:n perusteella saadaan kuitenkin muodostettua kalkitussuosituksia myös lohkoille, joiden pH on riittävä, mutta kalsiumin tai magnesiumin määrä on riittämätön. Toisaalta KVK:n avulla voidaan myös arvioida lisätävän kipsin määrää tilanteissa, joissa on syrjäytettävä ylimääräistä magnesiumia maan rakenteen parantamiseksi.

9 LÄHTEET

- Astera, M., 2015. The Ideal Soil v2.0: A Handbook for the New Agriculture.
- Åström, M., Björklund, A., 1997. Geochemistry and acidity of sulphide-bearing postglacial sediments of western Finland. *Environ. Geochem. Health* 19, 155–164.
- Chaganti, V.N., Culman, S.W., 2018. Historical perspective of soil balancing theory and identifying knowledge gaps: A review. *Crops Soils* 51, 40–47.
- Dontsova, K.M., Norton, L.D., 2002. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Sci.* 167, 184–193.
- Eckert, D.J., McLean, E.O., 1981. Basic Cation Saturation Ratios as a Basis for Fertilizing and Liming Agronomic Crops: I. Growth Chamber Studies 1. *Agron. J.* 73, 795–799.
- Harmen, K., Loman, H., Neeteson, J.J., 1990. A derivation of the Pierre-Sluijsmans equation used in the Netherlands to estimate the acidifying effect of fertilizers applied to agricultural soils. *Fertil. Res.* 26, 319–325. <https://doi.org/10.1007/BF01048770>
- Hartikainen, H., 2009. Maaperän reaktiot, teoksessa Paasonen-Kivekäs, M. (Toim.), 2009. Maan vesi- ja ravinnetalous : ojitus, kastelu ja ympäristö. Salaojayhdistys, Helsinki. ss.119.
- Hartge, K.H., Horn, R., 2016. Essential soil physics: an introduction to soil processes, functions, structure and mechanics = An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics, 1st edition, based on the fourth, completely revised and extended German edition. ed. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart. 391 s.
- Khorshidi, M., Lu, N., 2017. Determination of Cation Exchange Capacity from Soil Water Retention Curve. *J. Eng. Mech.* 143, 04017023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001220](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001220)
- Kinsey, N., Walters, C., 1999. Neal Kinsey's Hands-On Agronomy. Acres USA, Metairie. 352 s.
- Kirkby, E., 2012. Introduction, definition and classification of nutrients. Teoksessa in: Marschner, P. (toim.) Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Elsevier, ss. 3–5.
- Kopittke, P.M., Menzies, N.W., 2007. A Review of the Use of the Basic Cation Saturation Ratio and the "Ideal" Soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71, 259–265.
- Logan Labs, 2018. Logan Labs . Background documents. TEC Formulas. URL <http://www.loganlabs.com/customer-tools.html> (katsottu 4.4.18).
- Magdoff, F., Van Es, H., 2009. Building soils for better crops: sustainable soil management, 3. painos. SARE, Beltsville, MD. 294 s.
- Marschner, P., Rengel, Z., 2012. Chapter 12 - Nutrient Availability in Soils, teoksessa: Marschner, P. (toim.), Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, San Diego, ss. 315–330.
- Mattila, T.J., Rajala, J., 2017. Mistä ja miten tunnistaa maan hyvän kasvukunnon? Helsingin yliopisto Ruralia-instituutti. Julkaisuja 171. 40 s.
- McLean, E.O., Hartwig, R.C., Eckert, D.J., Triplett, G.B., 1983. Basic Cation Saturation Ratios as a Basis for Fertilizing and Liming Agronomic Crops. II. Field Studies 1. *Agron. J.* 75, 635–639.
- Schmidt, M., 2016. Kalkdüngung gesunde Ackerböden - optimale Erträge. DLG-Verlag, Frankfurt am Main. 126 s.
- Sippola, J., 1974. Mineral composition and its relation to texture and to some chemical properties in Finnish subsoils. *Annales agriculturae Fenniae* 13(4):169-234.
- Sumner, M.E., Miller, W.P., 1996. Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients. Methods Soil Anal. Part 3—Chemical Methods SSSA Book Series, 1201–1229.
- Ulusoy, Y., Tekin, Y., Tümsavaş, Z., Mouazen, A., 2016. Prediction of soil cation exchange capacity using visible and near infrared spectroscopy. *Biosyst. Eng.* 152: 79-93.
- VDLUFA, 2000. Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden (Standpunkte). VDLUFA. <https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/0-9-kalk.pdf>
- Viljavuuspalvelu, 2008. Viljavuustutkimuksen tulointa peltoviljelyssä. Viljavuuspalvelu, Mikkelin.

- Waruru, B., Shepherd, K., M. Ndegwa, G., T. Kamoni, P., Sila, A., 2014. Rapid estimation of soil engineering properties using diffuse reflectance near infrared spectroscopy. *Biosyst. Eng.* 121, 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2014.03.003>
- Weil, R.R., Brady, N.C., 2016. *The Nature and Properties of Soils*, 15 painos. Pearson, Columbus. 1086 s.
- Zhang, X.C., Norton, L.D., 2002. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. *J. Hydrol.* 260, 194–205.
- Zimmer, G.F., Zimmer-Durand, L., 2016. *The Biological Farmer*, 2. painos. Acres U.S.A., 536 s.

WWW.HELSINKI.FI/RURALIA



HELSINGIN YLIOPISTO
RURALIA-INSTITUUTTI