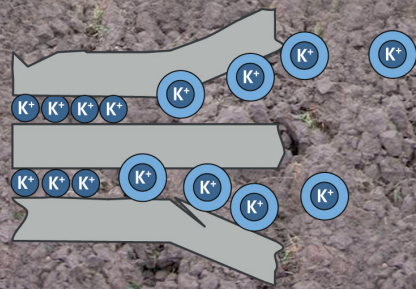


MTT RAPORTTI 165

Nurmien kaliumtalous

Maan reservikaliumin merkitys kaliumlannoituksen suunnittelussa

Perttu Virkajärvi, Sanna Kykkänen, Mari Rätty, Maarit Hyrkäs, Kirsi Järvenranta, Mika Isolahti ja Raimo Kauppila



Nurmien kaliumtalous

Maan reservikaliumin merkitys kaliumlannoituksen suunnittelussa

**Perttu Virkajärvi, Sanna Kykkänen, Mari Rätty, Maarit Hyrkäs, Kirsi Järvenranta,
Mika Isolahti ja Raimo Kauppila**



Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus

Rajiois-Pohjanmaa



Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin.



ISBN: 978-952-487-580-6 (Painettu)

ISBN: 978-952-487-581-3 (Verkojulkaisu)

ISSN: 2324-0016 (Painettu)

ISSN: 1798-6419 (Verkojulkaisu)

URN: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-581-3>

<http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti165.pdf>

Copyright: MTT

Kirjoittajat: Perttu Virkajärvi, Sanna Kykkänen, Mari Rätty, Maarit Hyrkäs, Kirsi Järvenranta, Mika Isolahti ja Raimo Kauppila

Julkaisija ja kustantaja: MTT Jokioinen

Julkaisuvuosi: 2014

Kannen kuva: Jenni Airaksinen, Mari Rätty, Arja Seppälä

Nurmen kaliumtalous

Maan reservikaliumin merkitys kaliumlannoituksen suunnittelussa

**Perttu Virkajärvi¹⁾, Sanna Kykkänen¹⁾, Mari Rätty¹⁾ Maarit Hyrkäs¹⁾ Kirsi Järvenranta¹⁾,
Mika Isoahti²⁾ ja Raimo Kauppila³⁾**

¹⁾Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus, Kotieläintuotannon tutkimus, Halolantie 31A, 71750 Maaninka, etunimi.sukunimi@mtt.fi

²⁾Boreal Kasvinjalostus Oy, Myllytie 10, 31600 Jokioinen, mika.isoahti@boreal.fi

³⁾Yara Suomi Oy, Kotkaniementie 100, 03250 Ojakkala, raimo.kauppila@yara.com

Tiivistelmä

Kalium on nurmen sadontuoton kannalta heti typen jälkeen tärkein ravinne. Se vaikuttaa paitsi sadon tuottoon myös nurmen ravitsemukselliseen laatuun. Nurmet käyttävät runsaasti kaliumia ja sadon mukana kaliumia voi poistua 50-400 kg hehtaarilta kasvukaudessa. Vuotuinen kaliumlannoituskustannus voi nousta hyvinkin korkeaksi, mutta toisaalta kaliumin käytön kannattavuus on usein hyvä vahvan satovasteen vuoksi. Kaliumlannoituksen suunnittelu perustuu viljavuusanalyysissä analysoitavaan maan viljavuuskaliumpitoisuuteen. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa tehdyissä kaliumlannoitustutkimuksissa viljavuuskalium on osoittautunut nurmilla heikoksi kaliumtarpeen ennustajaksi. Maan kaliumtilaa laajemmin kuvaavaa reservikaliumpitoisuutta onkin ehdotettu paremmaksi lannoitustarpeen mittariksi. Tästä lähtökohdasta päätettiin selvittää meta-analyysin avulla selittääkö maaperän reservikalium (2 M HCl-uutto) paremmin nurmien kaliuminottoa ja lannoitustarvetta Suomessa.

Meta-analyysiaineistoon sisällytettiin yhteensä 17 koesarjaa, jotka oli suoritettu nurmenviljelyalueella ja joista oli saatavilla analyysin kannalta välttämättömät maaperätiedot sekä pintamaasta että jankosta (mm. maalajikoostumus, reservikalium, jankon ominaisuudet). Erisuuruisia lannoitustasoja aineistossa oli yhteensä 36 ja kaliumlannoitus vaihteli välillä 0-320 kg ha⁻¹ v⁻¹. Tärkeimmäksi vastemuuttujaksi valittiin kuiva-ainesato. Aineistossa oli hyvin vähän 0-ruutuja, joten lähestymistavaksi valittiin ns. suhteellisen sadon menetelmä. Tämän tarkoituksena oli saattaa eri vuosien ja koepaikkojen sadot toisiinsa nähden paremmin vertailukelpoisiksi. Yksittäisiä satotietueita oli 642. Kunkin kokeen sisällä suhteellista satoa selitettiin kaliumlannoituksella käyttäen satofunktiona joko lineaarista kuvausta tai Mitscherlichin funktioita. Kun kunkin kokeen satofunktio oli ratkaistu, derivoitiin satofunktiot ja laskettiin funktion derivaatan arvo kohdalla 50 kg/ha/v K. Näin eri koesarjat voitiin yhdistää ja verrata kaliumin antamaa sadonlisää kokeen maaperätietoihin korrelaatio- ja regressioanalyysillä. Lopuksi maa jaettiin reservikaliumin perustella kahteen ryhmään ja ryhmille sovitettiin satovastefunktiot (kuiva-ainesato, kaliumpitoisuus, kaliumtase ja talvituho).

Reservikalium selitti kaliumlannoituksella saatua nurmien satovastetta selvästi paremmin kuin viljavuuskalium. Pintamaan ja jankon reservikalium selitti satovastetta yhtä hyvin. Kun maan reservikaliumin pitoisuus oli luokkaa 500 mg/l, oli satovasteen vaihtelu suurta. Sen sijaan alhaisilla reservikaliumin arvoilla (<400 mg/l) sadonlisä oli lähes säännöllisesti huomattava. Reservikaliumpitoisuuden ollessa > 600 mg l⁻¹, kaliumlannoituksen vaikutus satoon oli pieni. Rehun K/N -suhde ja kaliumpitoisuus selittivät yhtä hyvin suhteellista satoa. Kun sadon kaliumpitoisuus on 17,5 - 20 g/kg ka, sadontuotto oli 95 % maksimisadosta. Vastavat raja-arvot K:N -suhteelle olivat 0,85-0,86. Nurmen kaliumpuutteen rajaksi saatiin noin 17 g/kg ka. Korkean reservikaliumin mailla rehun kaliumpitoisuus on yleensä korkea riippumatta kaliumlannoitusmäärästä. Tämä vaikuttaa märehitjän kannalta tärkeisiin kivennäissuhteisiin yleensä epäedullisesti (mm. laidun- ja poikimahalvaus). Korkean reservikaliumin mailla nurmenviljelykokeissa on lähes mahdotonta välttää voimakkaan negatiivisia kaliumtaseita, erityisesti silloin, kun halutaan välttää märehitjän kannalta liian korkeita kaliumpitoisuuksia

Tulosten pohjalta voidaan luoda uudet lannoitussuosituksia, jotka perustuvat maan reservikaliummääritykseen. Käytännössä heikon kaliumtilan mailla lannoitusmäärä tulisi lisätä ja korkean kaliumtilan mailla kaliumlannoitusta vähentää tai lopettaa kokonaan, etenkin jos nurmen juuriston kasvumahdollisuudet ovat hyvät. Kannattavan kaliumlannoituksen yläraja heikon kaliumtilan mailla sijoittuisi ensimmäisenä satovuonna 100-120 kg K/ha/v tasolle ja siitä eteenpäin noin 220-240 kg K/ha/v tasolle silloin kun pyritään korkeaan satotasoon. Käytännössä on syytä seurata myös rehun kaliumpitoisuutta, joka kertoo viime kädessä lannoituksen onnistumisen.

Avainsanat: Nurmi, kaliumlannoitus, viljavuuskalium, reservikalium, satotaso, kaliumtase, talvituho

Potassium fertilization of grass in Finland

Use of soil acid-soluble potassium as a basis for potassium fertilization

**Perttu Virkajärvi¹⁾, Sanna Kykkänen¹⁾, Mari Rätty¹⁾ Maarit Hyrkäs¹⁾ Kirsi Järvenranta¹⁾,
Mika Isoaho²⁾ ja Raimo Kauppila³⁾**

¹⁾ Agrifood Research Finland, Animal production research, Halolantie 31A, 71750 Maaninka, firstname.lastname@mtt.fi

²⁾ Boreal Plant Breeding Ltd, Myllytie 10, 31600 Jokioinen, mika.isoaho@boreal.fi

³⁾ Yara Suomi Oy, Kotkaniementie 100, 03250 Ojakkala, raimo.kauppila@yara.com

Abstract

Potassium (K) is of almost equal importance to nitrogen as a key nutrient for grass development and growth. It affects not only the dry matter (DM) yield but also the nutritive value of grass, especially as nutrient imbalances linked to excessive K concentrations in livestock diets increase the risk of milk fever and grass tetany. Because grass growth requires large amounts of K the annual amounts of K removed in grass are also typically high. In Finland, the recommendation of K fertilization for cultivated short-term grasslands is based on the soil concentration of acid ammonium acetate-extractable K (mg K_{AAc} l⁻¹ soil). However, recent studies suggest that the concentration of soil acid-extractable potassium (K_{HCl}) might provide a better basis for the recommendation. The aim of this study was to test this hypothesis using data originating from field experiments conducted in Finland during the years 1973-2006.

The database consisted of 17 series of field experiments that provided sufficient DM yield data and also information on soil attributes, from both topsoil and subsoil. The experimental leys were mainly mixes of timothy (*Phleum pratense* L.) and meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.) Potassium fertilization rates ranged from 0 to 320 kg K ha⁻¹ year⁻¹ although not all experiments included a treatment of 0 kg K ha⁻¹ year⁻¹. Therefore, the method of relative yields expressed as a percentage of maximum yield in each experiment was used in the first stage. The entire dataset comprised 642 combinations of year × cut × K rate. For each experiment the DM yield was explained by potassium application, using a linear function ($Y = a + bx$) or Mitscherlich's type of function $Y = a + b(1 - e^{-cx})$ where Y is the relative DM yield (% of maximum yield) and x is K application (kg K ha⁻¹), and a, b and c are constants. The equations were derived and solved for the point at which the K application was 50 kg ha⁻¹ K (dy/dx_{50K}). Using the values of dy/dx_{50K} it was possible to examine the relationship between the yield responses for K rates and the corresponding soil characteristics analysis on 27 different soils: these were in subsets of the 1st 2nd and 3rd cuts, annual DM yield, 1st 2nd and 3rd - year leys and 1st 2nd and 3rd ley rotations. Finally, the dataset was divided into soils of low and high K status based on K_{HCl} concentration in the topsoil and subsoil. The effects of K fertilization rates on DM yield, grass K concentration, K removal and winter damage were studied for both groups individually.

Concentration of K_{HCl} both in topsoil and in subsoil explained the plant availability and utilization of potassium better than the concentration of K_{AAc} (R^2 0.78-0.80 vs. 0.39-0.40). When concentrations of K_{HCl} were low (<400 mg l⁻¹) both in topsoil and subsoil, the yield response to K fertilization was strong. On the other hand, at high levels of K_{HCl} concentration (>600 mg l⁻¹) either in topsoil or subsoil, minor responses to K fertilization were occasionally observed. Between these two levels of K_{HCl} concentration the impact of K fertilization was not consistent. Grass K concentration and K/N-ratio explained yield production equally well, and 95% of the maximum yield was achieved when the grass K concentration was 17.5-20 g kg⁻¹ DM or when the K/N-ratio was 0.85-0.86. Potassium fertilization increased the K concentration of grass, but when K_{HCl} concentration of soil was high the K concentration of grass was also high despite the fertilization rate. K balance (input – output) was almost always highly negative especially on soils with high K_{HCl} concentration.

In conclusion, grass K-fertilization recommendations should be based on soil K_{HCl} rather than on the currently used K_{AAc} . If K_{HCl} concentration of soil is low, the K fertilization rate should be higher than the present recommendation; however, in contrast, if the K_{HCl} concentration is high, the K fertilization rate should be clearly lower or even omitted. The economic optimum rate of K fertilization varies with K fertilizer and grass prices and also with the age of the ley. In this dataset an approximate economic optimum was 100-120 kg K ha⁻¹ year⁻¹ for the first-year leys and 220-240 kg K ha⁻¹ year⁻¹ for subsequent years. Furthermore, it is considered sensible to monitor changes in the K concentration of grass and adjust fertilization rates accordingly.

Keywords: Grass, potassium fertilization, extractable potassium, non-extractable potassium, yield

Kalium on nurmenviljelyssä monessa suhteessa merkittävä ravinne: Sen vaikutus kasvin kasvuun ja sadon tuottoon on huomattava ja käyttömäärät lannoitteena hehtaaria kohti ovat suuria. Koska kalium on myös kallis ravinne, sen lannoituskustannus on nurmiviljelyssä korkea. Sadon tuoton lisäksi kalium on märehtijöiden terveydelle tärkeä ravinne, siten kaliumlannoituksen suunnittelun ja toteutuksen tieteelliset perusteet tulisi tuntea hyvin.

Perinteisesti kaliumlannoitus on perustunut viljavuusanalyysin kaliumlukuun. MTT:n ja Yara Suomen yhteistyönä tehtiin 1990–2000 -luvuilla useita nurmien kaliumlannoitusta selvittäviä tai eri kaliumlannoitustasojen sisältäviä kokeita. Näissä kokeissa kaliumlannoituksella saatu sadonlisä vaihteli selkeästi koepaikkojen välillä, eikä eroja voitu selittää maan helppoliukoisen kaliumin pitoisuudella. Siksi päätettiin selvittää laajemmin, voidaanko kaliumlannoituksen nykyistä ohjeistusta parantaa. Kantavana ajatuksena oli selvittää, selittääkö maaperän reservikalium paremmin nurmien kaliuminottoa ja lannoitustarvetta kuin viljavuuskalium. Selvitys päätettiin suorittaa meta-analyysinä käyttäen hyväksi suomalaisia, julkaistuja nurmitutkimuksia sekä MTT:n ja Yara Suomen yhteisiä aineistoja.

Tutkimuksen suunnittelivat Perttu Virkajärvi, Mika Isolahti ja Raimo Kauppila. Vuosien varrella siihen ovat osallistuneet erityisesti Ulla Sihto, Maarit Hyrkäs, Mari Rätty, Kirsi Järvenranta sekä Sanna Kykkänen. Työtä rahoittivat alkuvaiheessa MTT ja Yara Suomi. Alun perin päämääränä oli tutkijayhteisön sisäinen raportti, jonka pohjalta voitaisiin suunnitella uusia kaliumlannoitustutkimuksia. Tulosten valmistuessa todettiin, että niiden merkitys on niin käytännönläheinen, että raportista on syytä tehdä julkinen ja helposti saatavilla oleva. Tulosten lisäksi halusimme liittää raporttiin lyhyen katsauksen kaliumin esiintymiseen maassa, ja sen merkityksiin kasvissa ja eläimessä, koska kaliumin ja nurmiviljelyn yhdistävä katsausta ei ole aiemmin julkaistu. Työn loppuunsaattamisen rahoitti InnoTietoa! -hanke, jota on rahoitettu Euroopan maaseudun kehittämisen maatalousrahastosta. Tuki on myönnetty Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskuksen kautta. Tästä lämmin kiitos sekä hankkeen vetäjille Erkki Joki-Tokolalle ja Arto Huuskoselle että hankkeen ohjausryhmälle: Maarit Ilola (pj., A-Tuottajat Oy) Sanna Suomela (ProAgria Oulu), Matti Järvi (Oulun seudun ammattikorkeakoulu), Erkki Joki-Tokola (MTT), Pirjo Onkalo (Pohjois-Pohjanmaan ELY-keskus) ja Eemeli Tuura (maatalousyrittäjä).

Maaningalla lokakuussa 2014

Perttu Virkajärvi

MTT Kotieläintuotannon tutkimus

Sisältö

1 Kalium maassa, kasveissa ja eläimissä.....	7
1.1 Johdanto.....	7
1.2 Kalium maaperässä.....	7
1.2.1 Kasveille käyttökelpoisen kaliumin määrittäminen maasta.....	7
1.2.2 Maanesteen kalium ja vaihtuva kalium	9
1.2.3 Mineraalien hilarakenteiden ja hilavälien kalium sekä vaikeasti vaihtuva kalium	10
1.3 Kalium kasveissa	12
1.4 Lannan, lannoitteiden ja maanparannusaineiden kalium.....	13
1.5 Kalium eläinravitsemuksessa	14
1.6 Kaliumlannoituksen tutkimustarve ja tutkimuksen lähtökohta	15
2 Aineisto ja menetelmät	17
2.1 Tutkimuksen tavoite	17
2.2 Aineistot	17
2.3 Tutkimuksen kulku ja tilastollinen käsittely.....	20
3 Tulokset ja tulosten tarkastelu	21
3.1 Koealueiden maaperä	21
3.2 Maaperämuuttujien vaikutus satovasteeseen.....	22
3.3 Satovasteiden ja maan reservikaliumin välinen yhteys	23
3.4 Kasvianalyysit kaliumtarpeen kuvaajina	27
3.5 Kaliumlannoituksen satofunktiot.....	29
3.6 Kaliumlannoituksen vaikutus rehun kaliumpitoisuuteen.....	31
3.7 Kaliumlannoituksen vaikutus nurmen kaliumtaseeseen.....	33
3.8 Kaliumlannoituksen vaikutus nurmen talvehtimiseen.....	35
3.9 Kaliumlannoitussuosituksien tarkastelu	36
4 Käytännön sovellutukset	40
4.1 Miksi kalium on tärkeä ravinne nurmenviljelyssä?.....	40
4.2 Miten määritän nurmen kaliumtarpeen?.....	40
4.3 Miten määritän reservikaliumin maasta?.....	40
4.4 Miten säädän nurmen kaliumlannoitusta?	41
4.5 Miten kauan maan kaliumvarat riittävät?	41
4.6 Miten alentaa eläinten kannalta haitallisia kivennäissuhteita korkean kaliumtilan mailla?	41
4.7 Miten kannattavaa kaliumlannoitus on?	42
5 Yhteenveto.....	43
6 Kirjallisuus	44
7 Liitteet	49

1 Kalium maassa, kasveissa ja eläimissä

1.1 Johdanto

Kalium (K) on yleinen alkuaine: Maankuoressa sen kokonaispitoisuus on keskimäärin 2,6 % (26 g K kg⁻¹, yleisyydeltään 7. alkuaine) (Huang 2005). Kalium ei ole orgaanisten molekyylien rakenneosana, minkä vuoksi maan kaliumin kemia liittyy lähes pelkästään epäorgaaniseen ainekseen. Kasviravinteena kalium on typen ja fosforin lisäksi yksi kolmesta pääravinteesta. Se osallistuu mm. kasvien vedenottoon, osmoottisen potentiaalın säätelyyn, fotosynteesiin sekä entsyymitoimintaan. Lisäksi kalium on tärkeä kivennäisaine ihmisten ja eläinten ravitsemuksessa. Sillä ei tiedetä olevan haitallisia ympäristövaikutuksia.

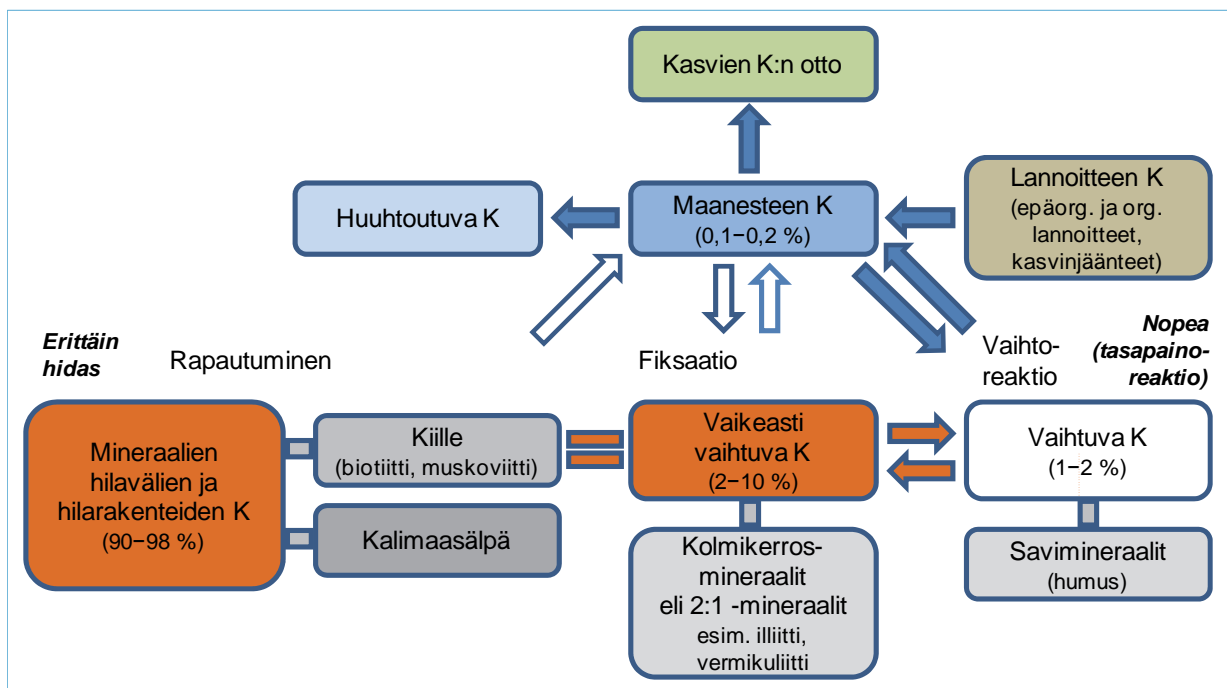
Valtaosa maan kaliumista on sitoutunut kalimaasälpään, kiilteisiin ja savimineraaleihin. Kasvintuotannon kannalta tärkeimpiä kaliumin luontaisia lähteitä ovat kiilteet (etenkin biotiitti) ja kiilteiden kaltaiset savimineraalit, joiden hilaväleihin kalium on tiukasti pidättynyt. Suuri osa maan kaliumista on kuitenkin liukenevassa muodossa, eikä siten kasvien käytettävissä. Kun mineraalit aikojen saatossa rapautuvat ja hilavälit avautuvat, kaliumia vapautuu maanesteeseen ja kasvien käyttöön. Maalajista riippuen on kasvien kaliuminsaanti turvattava kaliumpitoisilla lannoitteilla ja maanparannusaineilla. IFA:n tilastojen mukaan vuonna 2013 kaliumlannoitteita käytettiin maailmanlaajuisesti 29,1 miljoonaa tonnia (IFA 2014).

1.2 Kalium maaperässä

Suomessa maan lajitekoostumuksella eli tekstuurilla on suuri merkitys maan ominaisuuksien määräytymisessä, sillä vaikka kallioperä sinänsä onkin vanhaa, on maaperä verrattain nuorta, eivätkä maannostumisprosessit ole edenneet kovin pitkälle. Maaperän kivennäisaines on syntynyt mannerjäätikön peruskalliosta mekaanisesti rouhimasta aineksesta, minkä takia kallioperän kivilaji- ja mineraalikoostumus heijastuu myös maaperän ominaisuuksiin. Maalajitteiden välillä on eroja raekoossa ja mineralogiassa, mitkä vaikuttavat maalajien reaktioaktiivisuuteen ja ravinteisuuteen (Hartikainen 1992, 2009a), kuten kaliumpitoisuuteen. Kaliumia on maassa maanesteessä, vaihtuvana kationina, mineraalihilojen väliin pidättyneenä sekä mineraalien hilarakenteissa (Jaakkola 1992). Maan kaliumvarat voidaan jaotella kuvan 1 mukaisesti neljään eri luokkaan. Kaliumreservien käyttökelpoisuus kasveille ja mikrobeille riippuu siitä, onko kalium helposti vaikeasti vaihtuvassa muodossa. Biologinen käyttökelpoisuus alenee seuraavassa järjestyksessä: maanesteeseen K > vaihtuva K > vaikeasti vaihtuva K > mineraalien (hilarakenteiden) K (Sparks 2000, Huang 2005). Vaikka kaliumia on maassa verrattain runsaasti (yleensä 0,4–30 g K/kg), valtaosa maan kokonaiskaliumista (n. 98 %) on mineraalien hilarakenteissa ja hilaväleissä, ja siten maanesteessä ja vaihtuvana olevan kaliumin osuus kokonaiskaliumista on hyvin pieni (Sparks 2000, Huang 2005). Suomalaisten pohjamaiden kokonaiskaliumpitoisuuden on raportoitu vaihtelevan välillä 24–34 g K/kg maalajista riippuen (Kaila 1965b, Sippola 1974). Monivuotisuutensa sekä laajan ja syvän juuristonsa ansiosta nurmikasvit voivat hyödyntää pintamaan kaliumin lisäksi myös pohjamaan eli jankon kaliumvaroja (Joy ym. 1973).

1.2.1 Kasveille käyttökelpoisen kaliumin määrittäminen maasta

Viljavuustutkimuksessa määritetään kasveille käyttökelpoinen helposti vaihtuva kalium eli ns. viljavuuskalium (K_{AAC}) uuttamalla maata happamalla ammoniumasetaattiliuoksella (0,5 M CH₃COONH₄, 0,5 M CH₃COOH, pH 4,65; uuttosuhde 1:10 v/v, uuttoaika 1 h) (Vuorinen & Mäkitie 1955). Maan vaikeasti vaihtuva kalium eli ns. reservikalium (K_{HCl}) määritetään yleensä suolahappouutolla (Kaila 1967, Sippola 1980, Saarela ym. 1998, Isolahti & Virkajärvi 2005). Reservikalium voidaan määrittellä myös happouuttoisen kaliumin ja ammoniumasetaattiuuttoisen viljavuuskaliumin välisenä erotuksena (reservikalium = $K_{HCl} - K_{AAC}$). Reservikaliumin pitoisuutta maassa ei voida luotettavasti ennustaa viljavuustutkimuksen vaihtuvan kaliumin pitoisuuden tai maalajin perusteella. Poikkeuksena ovat kuitenkin savimaat, joilla reservikaliumin pitoisuus on tyypillisesti korkea (Saarela ym. 1998, Saarela & Mäntylähti 2002).



Kuva 1. Maan kaliumreservit (kuva on modifioitu Sparksin (2000) esittämästä kuvasta). Jaottelu primaaristen kiillemineraalien ja kolmikerrossavimineraalien silikaattikerrosten välissä olevan kaliumin välillä on liukuva. Kuvassa jaottelu on tehty siten, että "mineraalien hilavälien K" = rapautumattomien kiillemineraalien silikaattikerrosten välissä oleva K ja "vaikeasti vaihtuva K" = kiilteiden rapautumistuotteina syntyvien savimineraalien silikaattikerrosten välissä oleva K. "Mineraalien hilarakenteiden K" tarkoittaa kalimaasälvässä olevaa kaliumia.

Maailmalla on käytössä laaja kirjo erilaisia uuttomenetelmiä (reagenssi, pitoisuus, uuttoaika ja lämpötila vaihtelevat), joiden avulla luonnehditaan maan kaliumvaroja ja arvioidaan niiden potentiaalista käyttökel-
poisuutta kasveille (Taulukko 1). Koska menetelmien käyttö usein vaihtelee eri tutkimusten välillä, tulosten
suora vertailu voi olla vaikeaa. Tässä kirjoituksessa viljavuuskaliumilla (viljavuus-K) tarkoitetaan maasta
happamalla ammoniumasetaatilla uuttuvia helposti vaihtuvia kaliumvaroja (sis. maanesteessä liuenneena
olevan ja kationinvaihtopaikoille pidättyneen kaliumin). Reservikaliumilla (reservi-K) tarkoitetaan maan
happouuttoisia, vaikeasti vaihtuvia kaliumvaroja (sis. myös edellä mainitut kaliumfraktiot), jotka on saatu
Viljavuuspalvelu Oy:n käyttämällä uuttomenetelmällä, ellei toisin mainita (uutto 2 M HCl-liuoksella kiehu-
vassa vesihautteessa; uuttosuhde 1:4 v/v, uuttoaika 2 h).

Taulukko 1. Kaliumfraktioiden jaottelu liukoisuuden ja vastaavan analyysimenetelmän mukaisesti.

Maa-analyysinimi	Lyhenne	Menetelmä/Uuttoliuos	Kaliumfraktio
Viljavuus-K, Kaliumluku	K_{AAc}	Hapan ammoniumasetaattiuutto (HAAC, AAAC, AAC, AC)	Helppoliukoinen K (Maanesteen K, vaihtuva K)
Reservi-K, Varasto-K	K_{HCl} K_{HNO_3} $K_{aqua\ regia}$	Suolahappouutto (HCl)* Typpihappouutto (HNO_3), Kuningasvesiuutto (HCl- HNO_3)	Hidasliukoinen K (Maanesteen K, vaihtuva K, vaikeasti vaihtuva K (mineraalien hilavälien K))
Kokonais-K, Totaali-K	$K_{TOT\ XRD}$ K_{TOT} XRPD $K_{TOT\ XRF}$	Röntgendiffraktio Röntgenjauhediffraktio Röntgenfluoresenssi	Kokonais-K (Maanesteen K, vaihtuva K, vaikeasti vaihtuva K, mineraalien hilavälien ja hilarakenteiden K)

* Uutto voi olla joko kuumalla suolahappoliuoksella (HCl) tehtävä ns. kuumauutto tai laboratoriolämpötilassa (n. 20 °C:ssa) olevalla suolahappoliuoksella tehtävä ns. kylmäuutto.

Happouutto kuvastaa kasveille potentiaalisesti käyttökelpoisina pidettyjä kaliumvaroja. Reservikaliumin lähteenä olevat kiilteet ja savimineraalit liukenevat osin happouutossa, kun taas runsaasti kasveille käyttökelvotonta kaliumia sisältävät maasälvät eivät ole happoliukoisia (Saarela & Mäntylähti 2002, Andrist-Rangel ym. 2006). Suomalaisessa tutkimuksessa happo (1 M HCl; 20 h, 50 °C) uutti suuremman osan savimaiden kuin karkeampien maiden kokonaiskaliumista, sekä suuremman osan syvempien kerrosten kuin pintakerroksen kokonaiskaliumista (2–26 %) (Kaila 1967). Ruotsalaisessa tutkimuksessa happo uutti 1–17 % ja kuningasvesi 4–45 % viljelysmaiden kokonaiskaliumista, ja uuttunut osuus oli hienojakoisilla mailla karkeita maita suurempi (Taulukko 2) (Andrist-Rangel ym. 2006).

Taulukko 2. Eri maalajien happouuttoisten (2 M HCl; 2 h, 100 °C) kaliumvarojen osuus maan kokonaiskaliumin pitoisuudesta (17–31 g K/kg) Ruotsalaisissa viljelysmaissa (Andrist-Rangel ym. 2006).

Maalaji	K _{HCl}	K _{aqua.regia}
	Uuttotehokkuus, %-osuus kokonais-K:sta*	
Moreeni	1–3	6–11
Hieta	3–8	4–31
Savi	11–17	27–45

* Kokonaiskaliumin pitoisuus on analysoitu röntgenfluoresenssimenetelmällä.

1.2.2 Maanesteen kalium ja vaihtuva kalium

Kasvien kannalta tärkeimpiä kaliumin lähteitä ovat maanesteen välittömästi käyttökelpoinen kalium sekä vaihtuva kalium, josta maanesteen kaliumvarat ovat peräisin (Jaakkola 1992). Humidissa ilmastossa, missä sadanta on suurempaa kuin haihdunta, viljelysmaiden maanesteen kaliumpitoisuus on välillä 2–5 mg K/l, kun se aridissa ilmastossa on tätä korkeampi. Koska vain murto-osa maan kaliumista on maanesteessä, se ei yleensä riitä kuin hetkellisesti täyttämään kasvien kaliumin tarvetta. Kaliumreservien välillä vallitsee dynaaminen tasapainotila, ja maanesteen kaliumpitoisuus riippuu reaktioiden suunnasta ja nopeudesta sekä vallitsevista olosuhteista (esim. kosteus, kationit, kasvien kaliuminotto, huuhtoutuminen, lannoitus) (Sparks 2000, Huang 2005).

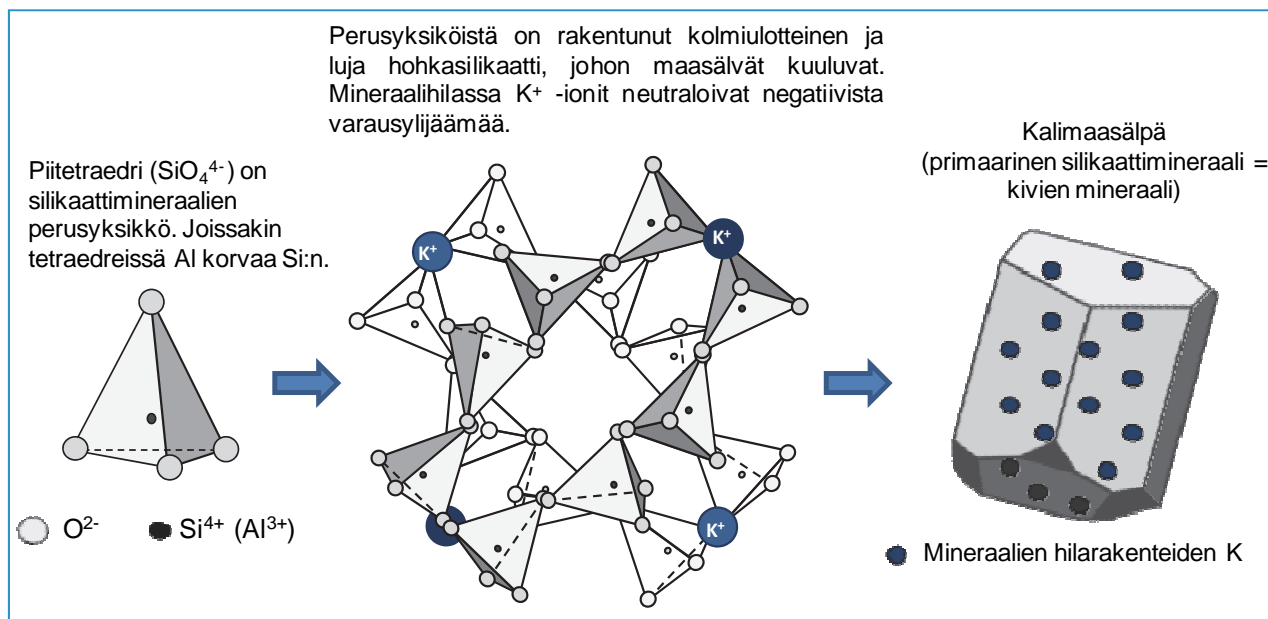
Maan tärkeimpiä kemiallisia ominaisuuksia on kyky pidättää kationeja maanesteestä vaihtuvaan muotoon. Vaihtuvaa kaliumia, kuten myös muita positiivisesti varautuneita ioneja, on maassa savimineraalien ja humuksen negatiivisilla varauspinnoilla sähköisin vetovoimin pidättyneenä. Hiukkaspinnoille pidättyneet kationit ovat kasvien käytettävissä ja ne ovat melko hyvin suojassa huuhtoutumiselta, mutta ne voivat vaihtua varaukseltaan samanmerkkisiin ioneihin. Vaihtopinnoille sitoutuneet vaihtuvat kationit muodostavat maan kationikoostumuksen, ja niiden kokonaismäärä yhdessä dissosioitumiskykyisen vedyn kanssa muodostaa maan kationinvaihtokapasiteetin (KVK) (Hartikainen 1992, 2009b). Maa pyrkii ylläpitämään tiettyä tasapainotilaa kiinteän aineksen ja sen kanssa kosketuksissa olevan maanesteen välillä. Kun maanesteen kaliumpitoisuus alenee esim. kasvien kaliuminoton, huuhtoutumisen tai mikrobitoiminnan seurauksena, kaliumia vapautuu hiukkaspinnoilta maanesteeseen. Vastaavasti maanesteen kaliumia voi pidättyä hiukkaspinnoille. Vaihtuvaan muotoon varastoituneet, helposti käyttökelpoisina pidetyt kaliumvarat ovat verrattain pienet, ja niiden kuluessa kasvien kaliuminsaanti riippuu kaliumin vapautumisesta savimineraalien silikaattikerrosten väleistä vaikeasti vaihtuvista varoista. Reaktio vaihtuvan ja vaikeasti vaihtuvan kaliumin välillä on reversiibeli eli se voi tapahtua kumpaankin suuntaan (Sparks 2000, Huang 2005).

Maanesteen kalium on altis huuhtoutumiselle etenkin karkeilla ja hyvin vettä läpäisevillä kivennäismailla. Suomessa suoritettussa neljä vuotta kestäneessä lysimetrikokeessa kaliumia huuhtoutui moninkertaisesti enemmän hietamaasta (56–94 kg/ha/v) kuin mitä savi-, hiesu- ja turvemaasta (4–24 kg/ha/v) (Ylärinta ym. 1996). Vaihtuvia kaliumvaroja kuluttavat kasvien kaliuminoton ja huuhtoutumisen lisäksi myös kaliumionien pidättyminen vaikeasti vaihtuvaan muotoon. Maahan lisätyn kaliumin huuhtoutumisherkkyys riippuu ennen kaikkea maan kationinvaihtokapasiteetista, mihin vaikuttavat maan saves- ja humuspitoisuus. Suuren kationinvaihtokapasiteetin omaavilla mailla on taipumus pidättää lisättyä kaliumia, kun taas karkeilla, alhaisen kationinvaihtokapasiteetin mailla kaliumin huuhtoutumisherkkyys on suurempi. Kalkitus voi edistää kaliumin pidättymistä, koska maan pH:n noustessa riittävän korkeaksi humuksenfunktionaalista ryhmistä irtoaa vetyioneja ja siten varauspaikkoja vapautuu muiden kationien käyttöön (Sparks 2000, Huang 2005).

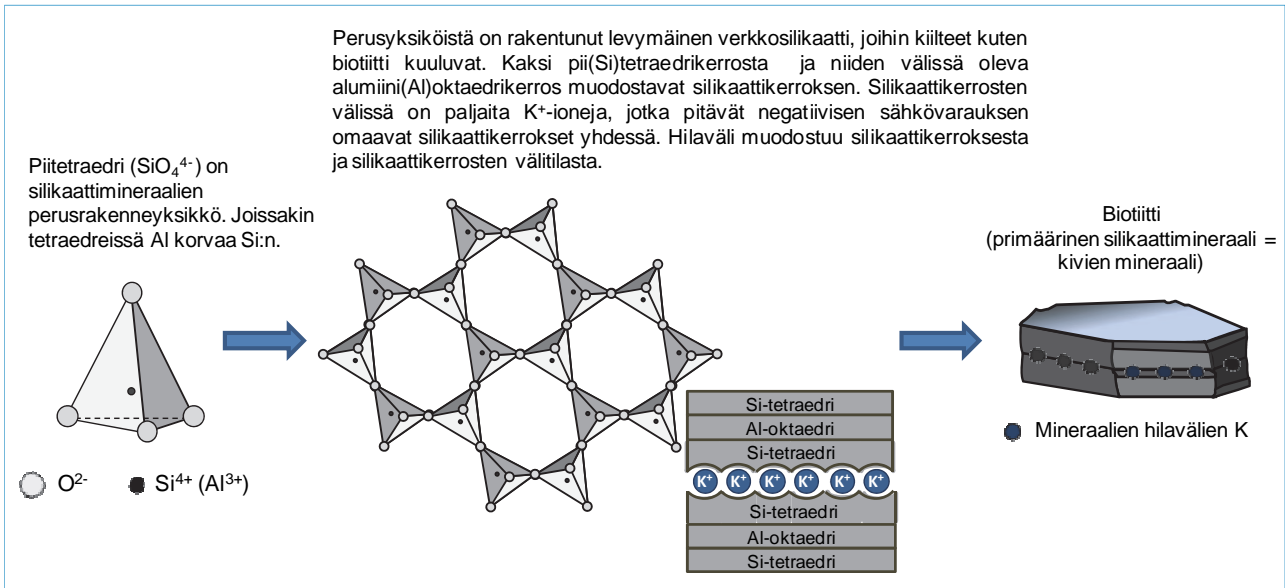
Helposti vaihtuvan kaliumin pitoisuus eri maalajeilla vaihtelee huomattavasti. Viljavuuspalvelu Oy:n julkaiseman, vuosina 1986–2000 kolme viisivuotisjaksoa kattavan peltojen viljavuusanalyysien tulosten yhteenvedon mukaan aitosavimaiden kaliumpitoisuus oli selvästi muita maita korkeampi (lähes 300 mg K/l maata). Karkeilla kivennäismailla kaliumin pitoisuudet olivat hiedoilla ja hiesuilla hieman alle 150 mg K/l maata, hiekkojen kaliumpitoisuuksien jäädessä selvästi tämän alle. Eloperäisten maiden kaliumpitoisuudet olivat muita maalajiryhmiä pienemmät (runsaasta 50 mg K/l maata vajaan 100 mg K/l maata). Kivennäismaiden kaliumpitoisuus kohosi multavuuden kohotessa vähämultaisista maista (hieman yli 100 mg K/l maata) multaviin ja runsasmultaisiin maihin (n. 150–160 mg K/l maata), ja aleni siirryttäessä erittäin runsasmultaisiin maihin (n. 140 mg K/l maata) (Mäntylähti 2003).

1.2.3 Mineraalien hilarakenteiden ja hilavälien kalium sekä vaikeasti vaihtuva kalium

Runsaasti kaliumia sisältäviä primaarisia eli kivien mineraaleja ovat kalimaasälpä ja kiilteet (biotiiitti; tumma kiille ja muskoviitti; vaalea kiille) sekä savimineraalit, jotka ovat syntyneet kivien mineraalien rapautuessa (= sekundaariset mineraalit) (Andrist-Rangel 2008). Mineraalien merkitys kasvinravinteena riippuu niiden kemiallisesta koostumuksesta ja rapautumisalttiudesta, johon taas vaikuttavat raekoko ja kiderakenne. Kalimaasälpä on hyvin kestävä rapautumista vastaan, kun taas kiilteistä biotiitti on tätä huomattavasti helpommin rapautuva (Kuvat 2 ja 3), minkä takia se on merkittävin kaliumin luontainen lähde. Karkearaikkeiset hieta- ja hiekkafraktiot sisältävät runsaasti kvartssia ja maasälpää, kun taas helpommin rapautuvien kiilteiden osuus kasvaa hiukkaskoon pienetessä (hiesufraktio). Savesfraktio koostuu ennen kaikkea kivien mineraalien rapautumistuotteista, joita ovat savimineraalit sekä Al:n, Fe:n ja Mn:n heikosti kiteytyneet oksidit, mutta se sisältää myös mekaanisesti hienoksi jauhuneita primaarisia mineraaleja kuten kiilteitä (Sippola 1974, Hartikainen 1992, 2009a). Vaikeasti rapautuvan maasälvän hilarakenteista kaliumia ei juurikaan vapaudu kasvien käyttöön, kun taas kiilteiden (etenkin biotiitti) ja kiilteiden kaltaisten savimineraalien hilaväleistä kaliumia vapautuu hitaasti maanesteeseen.

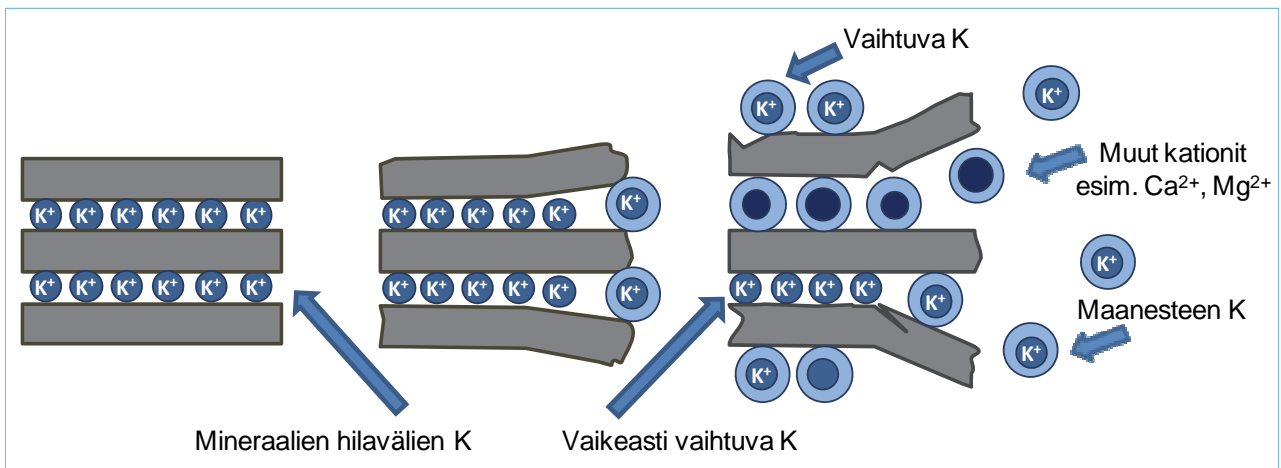


Kuva 2. Kalimaasälvän ($KAlSi_3O_8$) kidekemiallinen rakenne. Kalimaasälvällä on monimutkainen kolmiulotteinen rakenne, joka on kestävä ja hitaasti rapautuva. Kuvassa esitetty rakenne on yksinkertaistettu, eivätkä ionien ja niiden väliset mittasuhteet ole mittakaavassa. Kuva perustuu lähteisiin: Hartikainen (1992, 2009a), Schumann (1993), Piispanen & Tuisku (1998) ja Andrist-Rangel (2008).



Kuva 3. Verkkosilikaatteihin kuuluvan biotiitin eli tumman kiilteen (K(Mg, Fe)₃(Al, Fe)Si₃O₁₀(OH, F)₂) kidekemiallinen rakenne. Biotiitti on alttiimpi rapautumiselle kuin kalimaasälpä, ja se on myös merkittävin kaliumin luontainen lähde (sis. myös kohtalaisesti magnesiumia) sekä tärkeä savimineraalien lähtöaine. Kiilteiden lehtimäisyys on seurausta kerroksellisesta kiderakenteesta, ja ne lohkeavat suomumaisesti silikaattikerrosten suuntaisesti. Kuvassa esitetty rakenne on yksinkertaistettu, eivätkä ionien ja niiden väliset mittasuhteet ole mittakaavassa. Kuva perustuu lähteisiin: Hartikainen (1992, 2009a), Schumann (1993), Piispanen & Tuisku (1998) ja Andrist-Rangel (2008).

Suomalaisissa maissa savimineraalien tärkeimpiä lähtöaineita ovat verkkosilikaatteihin kuuluvat kiilteet (etenkin biotiitti) ja vähäisemmässä määrin myös esim. hohkasilikaatteihin kuuluvat maasälvät. Kiilteiden rapautuminen savimineraaliksi alkaa, kun vesi tunkeutuu silikaattikerrosten väleihin ja kerroksia yhteen liittäviä kaliumioneja diffundoituu maanesteeseen (Kuva 4). Yleisimmät savimineraalimme ovat illiitti, vermikuliitti ja kloriitti sekä näiden seoshilamineraalit (Hartikainen 1992, 2009a). Suomalaiset kivennäismaat sisältävät melko runsaasti vaikeasti vaihtuvaa kaliumia. Vaikeasti vaihtuvien kaliumvarojen suuruus riippuu niin maalajitteiden mineralogiasta, rapautumisasteesta, mineraalien kaliumpitoisuudesta, mutta myös viljelykasvista ja sen kaliuminottokyvystä (Kaila 1967). Joillakin savimineraaleilla, esim. vermikuliitilla, on myös voimakas selektiivinen taipumus sitoa kaliumioneja vaikeasti vaihtuvaan muotoon (fiksatio). Maanesteen kaliumpitoisuuden noustessa esim. lannoituksen seurauksena, kaliumioneja voi siirtyä takaisin kerrosvälisiin ensimmäisen rapautumistuotteen, illiitin kaltaisen rakenteen muodostumisen). Runsaasti savesta sisältävässä maassa silikaattikerroksia yhteen sitova kalium muodostaa tärkeän ravinnevaraston. Vaikka vaikeasti vaihtuvassa muodossa olevan kaliumin mobilisoituminen on hidasta, riittää se parhaissa savimaissa turvaamaan kasvien kaliumin tarpeen (Hartikainen 1992, 2009a). Suomalaisissa kivennäismaissa lisäystä kaliumista on havaittu pidättävän vaikeasti vaihtuvaan muotoon hietamaissa keskimäärin n. 12 % ja savimaissa n. 19 % (Kaila 1965a), mutta pidättäminen voi olla huomattavasti tätä voimakkaampaa (Kaila 1965b). Yleistäen voidaan sanoa, että savespitoiset maat sisältävät vaikeasti vaihtuvaa kaliumia enemmän ja pidättävät lisättyä kaliumia tehokkaammin. Ne ovat siis kaliumin suhteen paremmin puskuroituja kuin karkeat ja eloperäiset maat. Eniten reservikaliumia on kiillepitoisissa maalajeissa ja siksi savimailla (ja myös hiesuissa) reservikaliumin pitoisuus on yleensä korkea. Sen sijaan hietojen reservikaliumin pitoisuus vaihtelee runsaasti riippuen maa-aineksen lähtömineraaleista: maasälvistä kalium ei liukene kasvien käyttöön eikä maasälpjen kalium näy reservikaliumin analyysissä, kun taas kiillepitoiset hiedat luovuttavat kaliumia kasveille jopa yhtä helposti kuin parhaat savet. Eloperäisillä mailla reservikalium on yleensä alhainen (Kähäri 1976, Saarela & Mäntylähti 2002).



Kuva 4. Biotiitin rapautuminen. Biotiitin rapautuminen alkaa silikaattikerrosten välistä, koska se on rakenteen heikoin kohta. Vesi tunkeutuu silikaattikerrosten väliin, jolloin välikationina oleva ja kerroksia yhteen sitova K^+ -ioni saa vesikehän ympärilleen eli hydratoituu, ja kerrosten väli alkaa aueta reunoilta alkaen. Rapautumisketjun eri välivaiheissa syntyy eri savimineraaleja (illiitti - vermikuliitti - smektiitti). Rapautumisen edetessä K^+ -ionit korvautuvat vähitellen muilla kationeilla, ja K^+ -ionit vapautuvat maanesteeseen ja samalla kasvien käyttöön (= hitaasti mobilisoituvaa K-varasto). Kiteen ulkopinnoille voi myös syntyä negatiivisia varauspaikkoja, joita tasapainottavat maanesteestä hiukkaspinnoille siirtyvät kationit. Kuva perustuu lähteisiin: Hartikainen (1992, 2009a) ja Andrist-Rangel (2008).

1.3 Kalium kasveissa

Kasvituotannossa kalium on yksi keskeisimpiä ravinteita. Kasveissa sitä on lähes yhtä paljon kuin typpeä, noin 1,5 % kuiva-aineesta. Mitä varhaisemmasta kasvuasteesta on kyse sitä suurempi on yleensä kasvin kaliumpitoisuus. Koska nurmikasvit korjataan yleensä ennen siementen muodostumista, on niiden kuiva-aineen kaliumpitoisuus yleensä edellä mainittua korkeampi, 2–3 %. Pitoisuuden laskiessa alle 0,8 %:iin, kaliuminpuute alkaa rajoittaa kasvua. Jos kaliumia on maassa runsaasti tarjolla, voidaan puhua luksusotosta. Tällöin nurmi ottaa kaliumia enemmän kuin sen kasvun ja elintoimintojen kannalta on tarpeen ja kuiva-aineen kaliumpitoisuus voi nousta jopa yli neljään prosenttiin (Hopper & Clement 1967). Vaikka maanesteessä on yleensä vähemmän kaliumia kuin kalsiumia tai magnesiumia, kasvi ottaa sitä enemmän eli kilpailutilanteessa kalium syrjäyttää kalsium, magnesium ja natrium -ioneja (Whitehead 2000), millä on merkitystä myös rehun laadulle (ks. luku 1.5)

Vapaa kalium liikkuu maanesteessä diffuusion avulla. Kasvi ottaa kaliumia ilmeisesti kahdella eri mekanismilla juurten välittömästä läheisyydestä. Kun maanesteen kaliumpitoisuus on alle 1mM, ioni kuljetetaan aktiivisesti solukalvon läpi kuljettajaproteiinin avulla. Aktiivinen otto tapahtuu konsentraatiogradienttia vastaan eli kaliumpitoisuus kasvin sisällä on suurempi kuin maanesteessä. Kun kaliumia on maanesteessä runsaasti, kasvi käyttää myös passiivisesti toimivia ionikanavia kaliuminottoon (Kochian & Lucas 1988).

Kasvissa kaliumilla on monia tehtäviä, joskin vain harvat niistä ovat yksinomaan kaliumista riippuvaisia. Erityisesti kalium vaikuttaa osmoottisen potentiaalın säätelyyn, ilmarakojen avautumiseen ja sulkeutumiseen ja sitä kautta transpiraatioon ja hapen ja hiilidioksidin vaihtoon. Kaliumin puutteesta kärsivät kasvit eivät pysty sulkemaan ilmarakojaan riittävän tehokkaasti, joten ne kärsivät ns. päiväkuivumisesta. Kun kaliumpitoisuus huulisolun sisällä on suurempi kuin sen ulkopuolella, solun vesipitoisuus kasvaa (osmoottinen potentiaali, turgor), ilmaraoit avautuvat ja vettä pääsee haihtumaan kasvista (Barnes ym. 2007). Kalium ei kuitenkaan ole ainoa kationi, joka vaikuttaa solun osmoottisen paineen muodostumiseen. Kalsium, magnesium, natrium sekä orgaaniset molekyylit kuten sokerit voivat osittain korvata kaliumin osmoottisen paineen säätelyssä. Täydellistä korvaavuutta ei kuitenkaan ole, esimerkiksi Barraclough & Leigh (1993) havaitsivat, että kaliuminpuutteesta kärsivän kasvuston sato pieneni jopa 60 %, vaikka saatavilla oli riittävästi kalsiumia ja magnesiumia korvaamaan kaliumia.

Kun vettä on liian vähän tarpeeseen nähden, kaliumia pumpataan ulos huulisolusta. Vesi seuraa pitoisuus-eron suuntaan ja ilmarako sulkeutuu estäen enempää vettä haihtumasta. Kaliumin puutteesta kärsivän kasvin ilmaraoit reagoivat kuivumiseen hitaammin: prosessiin voi mennä jopa tunteja, kun sen pitäisi tapahtua minuuteissa. Ilmaraoit sulkeutuvat myös löysemmin kuin normaalitilanteessa. Kaliumin kertyminen juuriin saa aikaan osmoottisen gradientin, jonka avulla juuret ottavat maasta vettä. Kaliuminpuute pienentää pitoisuuseroa ja heikentää tätä kautta myös kasvin vedenottoa (Barnes ym. 2007).

Kalium toimii ainakin 60 erilaisen fotosynteesiin, proteiini- ja, tärkkelyssynteesiin sekä kasvin kasvuun liittyvän entsyymien aktivaattorina (Barnes ym. 2007). Kalium osallistuu myös fotosynteesituotteiden kuljetamiseen lehdistä eripuolille kasvia. Entsyymien toimintaan tarvittava kaliummäärä on kuitenkin suhteellisen pieni. Jos soluliman kaliumpitoisuus putoaa alle 100 mM, proteiinisynteesi häiriintyy ja kasvu lakkaa. Koko solun tasolla tämä vastaa n. 28 mM pitoisuutta (Leigh 1989). Periaatteessa maaperän pitää olla erittäin kaliumköyhää, jotta tähän päädytään. Hopper & Clement (1966) esittivät raiheinälle kasvun rajarvoksi 15 g K/kg ka ja 95 % maksimisadosta saatiin pitoisuudella 20 g K/kg ka (Clement & Hopper 1968).

Kalium yhdistetään usein myös kasvien karaistumiseen ja kylmänkestävyyteen sen suolatasapainon säätelyyn liittyvän roolin takia. Erityisesti joidenkin lämpimämmässä ilmastossa kasvavien lajien kylmäkestävyyden on havaittu paranevan kaliumlisän jälkeen (Webster & Ebdon 2005, Broschat 2010). Kaliumlannoituksen vaikutus talvehtimiseen on kiistanalainen. Osassa tutkimuksia lannoituksella ei ole pystytty vaikuttamaan talvenkestävyyteen (Cooc & Duff 1976, Valmari 1978, Tähtinen 1979 Miller & Dickens 1996.)

Kaliumin tarve kasvissa riippuu myös kasvin typpipitoisuudesta. Mitä korkeampi on kasvin typpipitoisuus, sitä enemmän se tarvitsee myös kaliumia. Lisäksi eri-ikäisten versojen kaliumpitoisuus on erilainen, aivan kuten typpipitoisuuskin (Bélangier & Ziadi 2008). Tästä syystä onkin ehdotettu, että kasvin K/N -suhde kuvaa kaliumin riittävyyttä suoraan kaliumpitoisuutta paremmin (Talibudeen ym 1976, Dampney 1992, Saarela 1998.). Kun kaliumin määrä suhteessa typenmäärään on riittävä (≥ 1), kalium ei yleensä rajoita kasvu. Muun muassa Tähtisen ym. (1979) tutkimuksessa kaliumlannoitus vaikutti satoon vasta, kun typpilannoituksen taso oli riittävä (100 kg/ha). Myös Hernes ym. (1978) ja Saarela (1983) osoitti nimenomaan riittävän korkean (N/K=1) typen ja kaliumin suhteen olevan merkityksellinen kaliumin otolle. Jos suhde on alle 1, kasvi kärsii kaliuminpuutteesta (Prins ym. 1985) ja jos suhdeluku on reilusti yli 1, on kyse luksusotosta. Maaperän korkea kaliumpitoisuus ilman riittävää typpilannoitusta saattaa vaikuttaa negatiivisesti myös rehun säilönnälliseen laatuun (Keady & O'Kiely 1998).

Kasvin K/N -suhteen lisäksi maan K/Mg -suhdetta pidetään tärkeänä kaliumlannoituksen mittarina. Maan runsas kaliumpitoisuus voi johtaa jopa satotason laskuun, jos Mg-otto maasta vaikeutuu korkean kaliumpitoisuuden vuoksi (Lunnan 1993). Myös muiden ravinnekationien otto (Ca^{2+}) voi hankaloitua, kun kaliumin määrä maassa kasvaa suhteessa kationin määrään. Tähän vaikuttaa muun muassa maan happamuuden vaikutus aineiden liukoisuuteen. Happamassa maassa alumiinia ja mangaania liukenee maanesteeseen, mikä haittaa kasvien kalsiumin ja magnesiumin ottoa. Maan magnesiumpitoisuus voi vaikuttaa sadon kaliumlannoitusvasteeseen (Hahlin 1980, Hahlin & Ericsson 1994). Ruotsin kaliumlannoitusosuutuksissa maan K/Mg -suhde huomioidaan (Yara 2013a, Liite 8). Riippuen maan kaliumluokassa K/Mg -suhteen raja-arvo asettuu välille 1,5–2,5. Kun suhdeluku ylittää tämän arvon, magnesiumlannoitus on suositeltavaa. Hahlin ja Ericsson (1984) pitää kaliumlannoitusta suositeltavana jos suhde on alle 2. Suhdeluvun ollessa yli 3 Mg-lannoitus on suositeltavaa Mg-puutteen välttämiseksi. Riippuen maan Mg-pitoisuudesta kaliumlannoitusta voi joko pienentää tai Mg-lannoitusta lisätä.

Kasvin kaliumin saantiin vaikuttavat monet tekijät. Savimailla, missä kaliumia yleensä on riittävästi, kaliumin näennäinen puute voi johtua sen hitaasta otosta aikaisin keväällä tai niiton jälkeen, mikä voi johtaa heikentyneeseen kasvuun. Myös maan kosteus vaikuttaa kaliuminottoon (Kuchenbuch ym. 1986, Hahlin ym. 2005). Kuivuus häiritsee paitsi juuriston kasvua myös kaliumin kulkeutumista juuriin. Siten kuivuus voi johtaa kaliumin puutteeseen myös runsaasti reservikaliumia sisältävillä mailla, kuten Saarelan ym. (1998) aineisto osoittaa.

Nurmet eroavat muista viljelykasveista kaliuminoton suhteen. Kaliumin tehokkaaseen ottoon vaikuttaa tiheä ja syväle ulottuva juuristo. Kationienoton tehokkuuteen vaikuttaa myös juurtenkationinvaihtokapasiteetti, mikä on yksisirkkaisilla kasveilla usein pienempi kuin kaksisirkkaisilla. Mitä pienempi on juuren kationinvaihtokapasiteetti, sitä tehokkaammin kasvi ottaa yksiarvoisia kationeja, kuten kaliumia (Woodward ym. 1984, Hahlin ym. 2005). Palkokasvien kaliumintarvetta lisää niiden runsas valkuaispitoisuus, sillä kaliumilla on keskeinen rooli proteiinisynteesissä (Blevins & Barker 2007). Nurmikasvien kaliumtarvetta lisää lisäksi se, että nurmisato korjataan 2–3 kertaa kasvukaudessa, minkä jälkeen kasvi tarvitsee kaliumia uusien vegetatiivisten kasvosien kasvuun. Sadon mukana poistuu huomattavia määriä kaliumia, tyypillisesti 150–250 kg/ha/v (Saarela ym. 1998, Pakarinen ym. 2008).

1.4 Lannan, lannoitteiden ja maanparannusaineiden kalium

Koska nurmirehuissa on yleensä runsaasti kaliumia eläinten tarpeeseen nähden, ylimääräinen kalium poistuu elimistöistä enimmäkseen virtsan mukana. Lietelantasysteemissä eritteet sekoittuvat, joten tällä ei ole merkitystä, mutta kuivalantasysteemissä lanta sisältää vähemmän kaliumia kuin virtsa (Taulukko 3).

Sonnan ja virtsan kalium on lähes täysin mineraalimuodossa eli suoraan käyttökelpoista kasveille. Runsas lietelannan käyttö lannoitteena nostaa nurmen kaliumpitoisuutta (Mattila ym. 2003). Pitkäaikaisessa käytössä myös maan kaliumpitoisuus nousee (Barraclough & Leigh 1993), vaikka ionimuodossa oleva kalium huuhtoutuukin helposti (Kayser & Isselstein 2005).

Kokeissa lannan kaliumvaste saattaa olla vaikea erottaa lannan typpivasteesta, koska usein maaperässä on riittävästi kaliumia kasvin tarpeisiin. Lisäksi lannassa tulee myös fosforia ja muita ravinteita, jotka vaikuttavat sadon määrään ja laatuun (Smith & Van Dijk 1987).

Koko kasvukauden kaliumtarpeen antaminen kerralla saattaa nostaa rehun kaliumpitoisuuden eläinten terveyden kannalta haitallisen korkeaksi ja aiheuttaa huuhtoutumisriskin, vaikka osa kaliumista pidättyykin maahiukkasten hilaväleihin ja vapautuu tarvittaessa. Kalium ei ole ympäristön kannalta haitallinen aine, joten huuhtoutumisesta ei sinällään ole haittaa, mutta huuhtoutuminen on vähintään taloudellinen tappio ja vastoin resurssitehokkaan viljelyn perusteita. Lannoituksen jakaminen kahteen tai kolmeen osaan kaliumia tarvitsevilla mailla pitää rehun pitoisuuden alempana. Lietelantaa käytettäessä kaliumlannoituksen pääpaino tulee yleensä kakkosadolle.

Taulukko 3. Ympäristötuen ehtojen (2007–2013) ohjeelliset lannan ja virtsan ravinnepitoisuudet (Mavi 2009).

	Liukoinen N kg/m ³	Fosfori kg/m ³	Kalium kg/m ³
KUIVIKELANTA			
Nauta	1,2	1,2	3,2
Sika	1,5	2,5	2,8
Kana	4,5	4,4	4,5
Broileri	5,1	3,5	4,5
Kettu	3,8	11,5	1,2
Minkki	2,4	9,5	1,3
Hevonen	0,4	0,5	2,0
Lammas	1,2	1,5	6,5
LIETELANTA			
Nauta	1,8	0,5	2,9
Sika	2,7	0,8	1,9
VIRTSA			
Nauta	1,8	0,1	4,5
Sika	1,6	0,2	1,5

1.5 Kalium eläinravitsemuksessa

Kaliumilla on huomattava vaikutus nurmen ravitsemukselliseen arvoon märehitijöiden rehuna. Kalium on yksi tärkeimmistä elimistön osmoottista tasapainoa ja happo-emästasapainoa säätelevistä kivennäisaineista. Kalium ja natrium toimivat vastinparina niin, että solunulkoisessa nesteessä on eniten natriumia ja solun sisällä kaliumia. Kalium on oleellinen hermoston toiminnan kannalta ja osallistuu eläimen energia-aineenvaihduntaan. Koska kaliumia on rehuissa yleensä runsaasti, sen puute on harvinaista. Enemmän ongelmia koituu liian kaliumin vuoksi, koska rehun korkea kaliumpitoisuus haittaa muiden kivennäisaineiden imeytymistä ja metaboliaa. Liika kalium ei kuitenkaan varastoidu elimistöön, vaan poistuu elimistöstä nopeasti pääasiassa virtsan mukana (McDonald ym. 1995).

Ennen poikimista rehun korkea kaliumpitoisuus altistaa lehmän poikimahalvaukselle. Mekanismi kohonneen riskin taustalla liittyy elimistön happo-emästasapainoon. Elimistössä on aina vallittava sähköinen tasapaino positiivisten ja negatiivisten ionivarausten välillä. Verenkierrrossa ja solunesteessä positiivinen kaliumioni syrjäyttää positiivisen vetyionin ja koska pH on suoraan riippuvainen vetyionien pitoisuudesta,

elimistön pH nousee (Goff 2006). Kohonnut pH haittaa tärkeimmän kalsiumaineenvaihduntaa säätelevän hormonin eli lisäkilpirauhashormoni PTH:n toimintaa. Tämän seurauksena eläimen kyky irrottaa kalsiumia luustosta ja imeyttää sitä tehokkaasti ruoansulatuskanavasta heikkenee oleellisesti. Maidontuotannon alkaessa lehmä ei pystykään reagoimaan kasvaneeseen kalsiumtarpeeseen riittävän tehokkaasti vaan sairastuu poikimahalvaukseen (Taurianen 2001, Lean ym. 2006). Poikimisen jälkeen kalium ei ole enää samassa mittakaavassa haitallinen, vaan sillä on saattaa olla jopa positiivinen vaikutus lehmän tuottamaan maitomäärään (Harrison ym. 2012).

Kun rehun kaliumpitoisuus ylittää 30 g/kg ka, siitä voi olla haittaa märehijöille. Varsinkin umpikaudella tulisi lehmille tarjota suhteellisen kaliumköyhää rehua. Kuten edellä todettiin, timotein kaliumpitoisuus on moniin muihin nurmikasveihin verrattuna usein matalampi (Tremblay ym. 2006). Suomalaiset nurmet ovat yleensä timotei-nurminata/ruokonata -seoksia ja nurmiviljelyssä yleinen lietelannankäyttö kakkossadon lannoitteena nostaa helposti nurmen kaliumpitoisuuden umpilehmien kannalta haitallisen korkeaksi (Mattila ym. 2003).

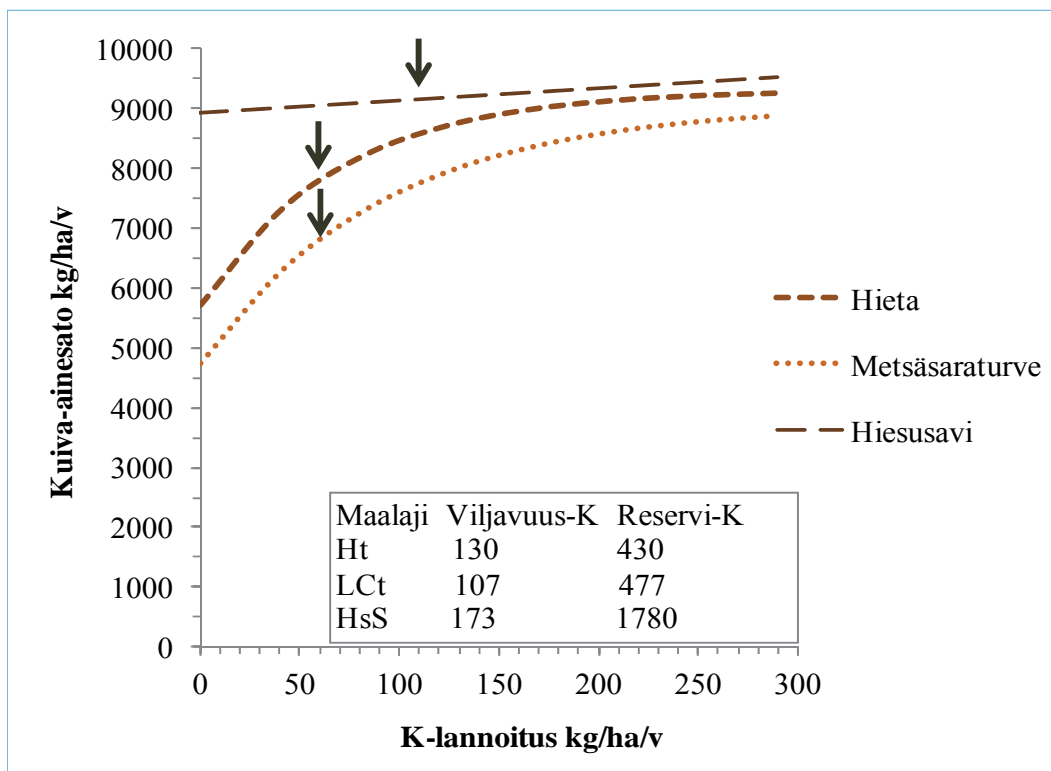
Rehujen korkea K-pitoisuus häiritsee myös magnesiumin imeytymistä. Toisin sanoen rehussa voi olla riittävästi magnesiumia, mutta jos sen kaliumpitoisuus on korkea, lehmä voi siitä huolimatta kärsiä Mg-puutoksesta (Goff 2007). Magnesiumin imeytyminen pötsistä tapahtuu pötsin seinämän sisä- ja ulkopinnan potentiaalieron mukaan. Tämä mekanismi häiriintyy, jos pötsin sisällä on runsaasti positiivisesti varautuneita ioneja kuten K^+ -ioneja (Leonhard-Marek & Martens 1996). Magnesiumin puute aiheuttaa laidunhalvausta ja kasvattaa poikimahalvausriskiä. Alkukesän laidunruohossa K/(Ca + Mg) suhde on usein korkea ja alkukesä onkin laidunhalvausten kannalta riskialtista aikaa.

1.6 Kaliumlannoituksen tutkimustarve ja tutkimuksen lähtökohta

Kalium on kiistattomasti merkittävä ravinne nurmenviljelyssä kasvien kasvun, märehijöiden terveyden sekä tuotannon taloudellisuuden kannalta. Niinpä kaliumlannoituksen suunnittelun ja toteutuksen tieteelliset perusteet tulisi tuntea erityisen hyvin.

Perinteisesti kaliumlannoitus on perustunut viljavuusanalyysin kaliumlukuun. MTT:n ja Yara Suomen yhteistyönä on tehty useita nurmien kaliumlannoitusta selvittäviä tai eri kaliumlannoitustasoja sisältäviä kokeita 1990–2000 luvulla (esimerkiksi nurmen natriumlannoituksen vaikutus, vähäkalisen NK-lannoksen kehitystyö sekä muokatun biotiitin käyttöarvo). Näissä kokeissa kaliumlannoituksella saatu sadonlisä vaihteli selkeästi koepaikkojen välillä, eikä eroja voitu selittää maan helppoliukoisen kaliumin pitoisuudella (Pakarinen ym. 2008). Kuten johdannossa on kuvattu, erojen taustalla epäiltiin olevan maan reservikaliumin määrä (Saarela ym. 1998.). Jo Joy ym. (1973) sekä Kähäri (1976) esittivät, että maan reservikalium on ainakin osittain käyttökelpoinen kaliumlähde.

Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 5, jossa esitetään tyypillinen kaliumlannoituksen satovaste kolmessa eri kokeessa. Hietamaan (Ht) ja saraturpeen (LCt) kokeet on tehty Tohmajärvellä (Koikkalainen ym. 1990) ja hiesusaven (HsS) koe Mouhijärvellä (Saarela ym. 1998). Kuvassa näkyy, että viljavuuskaliumin osalta tyydyttävän luokan kokeissa satovaste on selvä ja tyypillinen vähenevän rajatuoton lain mukainen, mutta välttävissä luokassa olevan hiesumaan kokeessa satovaste on lähes olematon ja suoraviivainen.



Kuva 5. Kaliumlannoituksen vaikutus nurmen kokonaissatoon kolmessa eri kokeessa (Koikkalainen ym 1990, Saarela ym 1998). Nuolet osoittavat nykyisten kaliumlannoitussuositusten mukaista lannoitusta.

Edellä mainituista viittauksista huolimatta ei reservikaliumin käyttö lannoitustarpeen pohjana ole yleistynyt. Yhtenä syynä voidaan pitää viljavuuskaliumin vakiintunutta määritysmenetelmää. Toiseksi käyttöönottoa hankaloittaa reservikaliumin määritysmenetelmien runsaus ja se, ettei yksiselitteisesti parasta menetelmää ole voitu osoittaa. Kolmanneksi, nurmet ovat näytelleet kaliumlannoituskokeissa toisarvoista osaa. Esimerkiksi kattavimmassa kaliumlannoitusta käsittelevässä koesarjassa (MTT 1977–1994) oli aineistona 305 satovuotta, joista vain 23 oli nurmia (Saarela ym. 1998). Neljänneksi, monet maaperätutkimukset ovat usein rajoittuneet nurmenviljelyalueen ulkopuolelle (mm. Sippola 1974, Kähäri 1976). Reservikaliumin merkitys nurmen kaliuminottoon erilaisilla maalajeilla on parhaiten todistettu astiakokeilla (Kähäri 1976, Saarela ja Mäntylähti 2002). Näin ollen tuloksia ei ole voitu varsinaisesti muokata satofunktioksi tai suosituksiksi asti.

Näiden syiden pohjalta päätettiin selvittää yleisemmin, selittääkö maaperän reservikalium paremmin nurmien kaliuminottoa ja lannoitustarvetta kuin viljavuuskalium. Mikäli näin on, olisi syytä selvittää myös voidaanko lannoitussuosituksia tarkentaa reservikaliumanalyysin pohjalta. Selvitys päätettiin tehdä meta-analyysinä käyttäen hyväksi suomalaisia nurmitutkimuksia.

2.1 Tutkimuksen tavoite

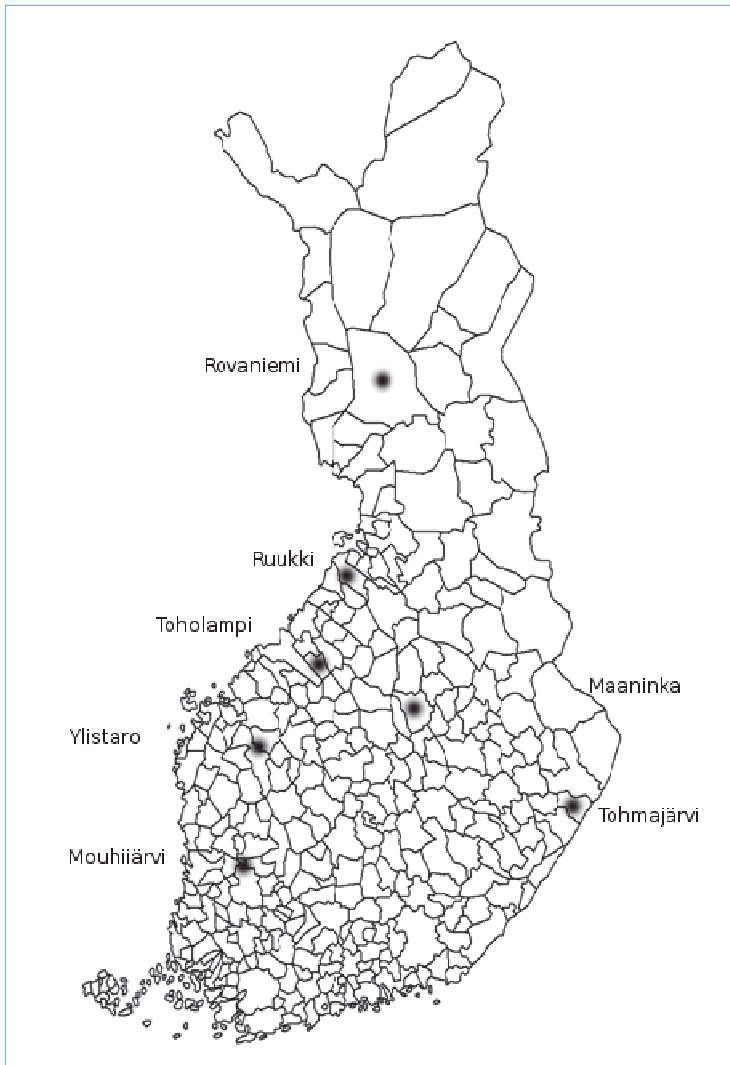
Edellä esitetyn perusteella päätettiin yhdistää kaliumlannoitusportaita sisältävien kenttäkokeiden aineisto, ja

1. Selvittää, mitkä maaperämuuttujat selittävät parhaiten kaliumlannoituksella saatua satovastetta sekä pintamaassa että jankossa.
2. Luokitella koeaineistot parhaimman maaperätiedon pohjalta ja luoda kaliumlannoituksen satofunktio kullekin ryhmälle erikseen.
3. Selvittää, kuinka hyvin kasvien K-pitoisuus ja K/N -suhde toimivat kaliumtarpeen indikaattoreina.

2.2 Aineistot

Aineistoon sisällytettiin yhteensä 17 koesarjaa (Taulukko 4), jotka oli suoritettu nurmenviljelyalueella (Kuva 6) ja joista oli saatavilla analyysin kannalta välttämättömät maaperätiedot sekä pintamaasta että jankosta (mm. maalajikoostumus, reservikalium, jankon ominaisuudet). Erisuuruisia kaliumlannoitustasoja aineistossa oli yhteensä 36 ja kaliumlannoitus vaihteli välillä 0–320 kg/ha/vuosi. Typeä ja fosforia annettiin kunkin kokeen aikainen suositusmäärä. Typen määränä oli siis yleisesti 2 niiton kokeissa n. 200 kg/ha/vuosi maalajista riippuen, yhdessäkään kokeessa ei käytetty karjanlantaa. Vain muutamissa kokeissa on nurmi-nurmikierto, ja suurimmassa osassa on vilja-nurmi -kierto, joten sikäli aineisto ei kuvaa kovin hyvin nyky-aikaisen karjatilän viljelykiertoa. Haluttuja maaperämuuttujia ei ollut saatavilla kaikista kokeista. Koska maaperän maalajikoostumus sekä reservikalium muuttuvat hitaasti, päädyttiin siihen, että kokeista, joiden sijainti tiedettiin riittävän tarkasti, otettiin uudet maaperän yleisnäytteet, jotka analysoitiin näiden hitaasti muuttuvien muuttujien osalta. Niissä tapauksissa, joissa alkuperäisestä aineistosta oli pintamaan tiedot raportoitu, mutta jankon tiedot eivät, otettiin jankkonäytteiden yhteydessä myös uudet pintamaanäytteet ja käytettiin vastaavuuden vuoksi molempien osalta saman näytepäivän tietoa. Näiltä osin käytetyt lukuarvot voivat hieman erota alkuperäisen julkaisun lukuarvoista, mutta erot ovat käytännössä pieniä. Luonnollisesti joidenkin kokeiden osalta pieni riski näytteiden edustavuuden osalta on olemassa. Koemaiden ominaisuuksien välillä erot ovat huomattavat, joten pienten virheiden ei voi katsoa johtavan varsinaisesti vääriin tulkitoihin. Aineisto on tarkemmin kuvattu liitteessä 1.

Kukin koe tallennettiin vuosi- ja koejäsentasolla eli tutkimuksessa käytettiin ns. käsittelykeskiarvoja (keranteiden keskiarvo koejäsenittäin). Mikäli julkaisussa ei annettu vuotuisia tuloksia, tallennettiin tulokset käsittelykeskiarvoina yli vuosien (mm. Virkajärvi & Huhta 1994) ja saatua arvoa käytettiin kuvaamaan toisen vuoden nurmien tilannetta.



Kuva 6. Koepaikat kartalla.

Kokeista tallennettiin identtimuuttujiksi

- koepaikka
- koesarja
- kasvilaji
- nurmijakso (1, 2 tai 3 nurmijakso peräkkäin)
- nurmen ikä (1,2,3 tai 4 vuosi)
- vuosi
- niitto (1,2 tai 3 niitto)

Kokeista tallennettiin niittokohtaisesti identtimuuttujien lisäksi

- lannoitustasot (kg/ha/niitto N, P, K)
- sato (kg/ka/ha)
- K- ja N -pitoisuus kuiva-aineessa (g/kg ka)
- ja laskettiin nurmisadon kaliumin otto (kg/ha/niitto) ja sadon K/N -suhde

Kokeiden maaperämuuttujista tallennettiin pintamaan (muokkauskerros) ja pohjamaan (jankko):

- viljavuus-K kokeen alussa (K_{AAC} , Viljavuuspalvelu Oy; Vuorinen & Mäkitie 1955)
- reservi-K (K_{HCl} , Viljavuuspalvelu Oy; 2 M HCl, kiehuva vesihaude, 2 h)
- perusviljavuus (Viljavuuspalvelu Oy; Vuorinen & Mäkitie 1955, ICP)
- maan lajitekoostumus (Viljavuuspalvelu Oy; mekaaninen maa-analyysi; Elonen 1971)

Tärkeimmäksi vastemuuttujaksi valittiin kuiva-ainesato, sillä se on käytännössä merkityksellisempi kuin kaliumin otto. Aineistossa ei ollut saatavissa riittävän kattavasti rehuarvotietoja esimerkiksi energiasatojen laskemiseksi. Aineistossa oli hyvin vähän 0-ruutuja, joten lähestymistavaksi valittiin ns. suhteellisen sadon menetelmä (Øgaard ym. 2002, Saarela ym. 2006). Suhteellinen sato laskettiin siten, että kunkin kokeen

maksimisato sai arvon 100 % ja muiden koejäsenten sadot suhteutettiin tähän. Tämän tarkoituksena oli saattaa eri vuosien ja koepaikkojen sadot toisiinsa nähden paremmin vertailukelpoisiksi. Yksittäisiä sato-tietueita oli 642 kpl.

Taulukko 4. Aineistona käytetyt koesarjat. Samasta kokeesta saattoi olla käytössä useampia nurmijaksoja tai pääruutuja (esim. Mg-lannoitus tai kasvilajipääruudut). Koesarjat ovat MTT:n ja Yara Suomen yhteisiä aineistoja paitsi niissä tapauksissa, joissa kirjallisuusviite on annettu.

Paikkakunta	Kasvilaji	Maalaji	Vuodet	Jaksoja	Satovuosia	K-lannoitusportaavat kg/ha/v
Maaninka	TNN	HeS	1995-97	1	3	80,160
Ruukki	T	KHt	1995-97	1	3	80,160
Maaninka	TNN	HeS	1992-95	1	4	0,40,80,120,160
Toholampi	T	Mm	1992-93	1	2	0,40,80,120,160
Maaninka	TNN	hsHHt	2005-06	1	2	8,118
Maaninka	T, NN	hsHHt	2002-03	1	2	6,155
Rovaniemi	T, NN	Ct/Mm	2002-03	1	2	0, 220
Ruukki	T, NN	KHt	2002-03	1	2	0,90
Ruukki	T	HHt	2000	1	1	0,150
Maaninka	T	He	1999-2001	1	3	33,80,140
Rovaniemi	T, NN	HtMr/Hs	1999-2001	1	3	32,63,103
Ruukki	T	HHt	1999-2001	1	3	32,63,103
Tohmajärvi*	T	LCt	1973-85	3	10	0,42,83,124,166,250
Tohmajärvi*	T	Ht	1973-85	3	11	0,42,83,124,166,250
Mouhijärvi**	PAT, KH	HeS	1979-88	2	7	0,40,80,120,160
Ylistaro**	T	He	1989-91	1	3	0,40,80,120,160
Valkeasuo***	T	LCt	1980-89	2	8	0,80,160,240,320

* Koikkalainen ym.1990 ** Saarela ym .1997*** Virkajärvi & Huhta 1993

T=timotei, NN=nurminata, PA=puna-apila, KH= koiranheinä

Aineiston rajoitukset ja puutteet

Aineistossa on **kolme** puutetta, jotka vaikeuttavat tulosten tulkintaa. Ensinnäkään, **kokeissa ei käytetty lainkaan karjanlantaa**, joka on keskeinen osa nurmiviljelyä. Vaikka lietelannan kalium on täysin rinnastettavissa lannoitekaliumiin, sen tyyppi ei ole (Kemppainen 1989) ja siten nurmilohkojen kaliumtase voi muodostua toisenlaiseksi kuin koeaineistossa. Eurooppalaisissa tutkimuksissa karjanlanta on osoittautunut, ei ainoastaan hyväksi kaliumin lähteeksi, vaan se on myös nostanut maan kationinvaihtokapasiteettia ja sitä kautta vaikuttanut edullisesta kasvin kaliumtalouteen (Blake ym. 1999).

Toiseksi, **kokeet painottuivat lyhyisiin koesarjoihin** (vain yksi 2–4 -vuotinen nurmijakso). Näin ollen aineistosta ei voitu nähdä muutoksia maan kaliumvaroissa ja sen seurauksia nurmen kaliumin otolle. Tätä tarkastellaan erikseen tulososiossa.

Kolmanneksi, **aineistossa ei ollut saatavissa riittävästi sadon tai maaperän muiden kivennäisten tai ravinteiden pitoisuuksia**, joten maaperän tai kasvien kivennäissuhteiden tarkastelu jäi väistämättä puutteelliseksi. Tämä on otettava huomioon tulosten tulkinnassa ja käytäntöön soveltamisessa.

2.3 Tutkimuksen kulku ja tilastollinen käsittely

Kunkin kokeen sisällä suhteellista satoa selitettiin kaliumlannoituksella käyttäen satofunktiona joko lineaarista kuvausta:

$$Y = a + bx \quad [1]$$

tai käyräviivaisen yhteyden ollessa ilmeinen, Mitscherlichin funktioita:

$$Y = a + b(1 - e^{-cx}) \quad [2]$$

joissa Y = suhteellinen kuiva-ainesato (%) ja x on kaliumlannoituksen määrä (kg K/ha/niitto tai vuosi).

Yhtälön parametrit laskettiin SAS-ohjelmiston NLIN-proseduurilla ja lineaariset suoraan MS EXCEL-trendisuoran sovituksella. Satovasteen muuttaminen funktiomuotoon mahdollisimman tarkasti oli tärkeää, koska näin kokeiden vertaaminen toisiinsa oli mahdollista, vaikka kokeissa käytettiin hyvin erilaisia lannoitustasoja. Tämän vuoksi jokainen sovitus tarkistettiin myös graafisesti. Kun kunkin kokeen satofunktio oli ratkaistu, derivoitiin satofunktiot seuraavasti

$$Y = a + bx \Rightarrow dy/dx = b \quad [3]$$

ja

$$Y = a + b(1 - e^{-cx}) \Rightarrow dy/dx = cbe^{-cx} \quad [4]$$

ja laskettiin funktion derivaatan (dy) arvo kohdalla 50 kg K/ha/vuosi. Tämä lannoitustaso valittiin sen vuoksi, että osassa kokeita ei käytetty 0-ruutuja lainkaan, joten funktion kohdalla $x = 50$ kg K/ha/vuosi sisältyy vähemmän aineiston ekstrapolointia kuin lannoitustasoa 0 kg K/ha/vuosi käytettäessä. Näin eri koe-sarjat voitiin yhteismitallistaa. Tämä tehtiin siirtämällä saadut derivaatan arvot yhteiseen tietokantaan kokeen maaperämuuttujien kanssa, jolloin oli mahdollista analysoida saatujen lannoitusvasteiden ja maaperämuuttujien yhteyttä korrelaatio- ja regressioanalyysillä (SAS CORR-, REG-, ja NLIN -proseduurit). Näin tietueita syntyi 27.

Koska on hyvin osoitettu, että kaliumlannoituksen optimi on ainakin heikosti kaliumia pidättävillä mailla erilainen eri-ikäisillä nurmilla (Koikkalainen ym. 1990), vertailu suoritettiin erikseen eri-ikäisille nurmille. Koska neljännen vuoden nurmia oli vähän, yhdistettiin ne kolmannen vuoden nurmien kanssa samaan aineistoon, sillä oletuksella, että mikäli maissa oli helppoliukoista kaliumia, olisi se ollut jo minimissään kolmantena vuonna. Mikäli aineistoa ei saatu vuosittain, yhdistettiin yli vuosien julkaistut keskiarvot toisen vuoden nurmien kanssa samaan aineistoon. Koska toisen vuoden nurmia voidaan pitää vasteeltaan keskimääräisenä, käytettiin niiden derivaatan arvoja maaperäerojen selvittämisessä. Lisäksi toisen vuoden nurmien tuloksia käytettiin selvittäessä eroavatko ensimmäinen ja toisen niiton satovasteet toisistaan kaliumin suhteen ja miten hyvin kasvin K-pitoisuus ja K/N -suhde selittävät satovastetta.

Viimeisessä vaiheessa alkuperäinen satoaineisto jaettiin tulosten perustella kahteen osaan: matalan ja korkean kaliumtilan maihin. Kummallekin ryhmälle estimoitiin satovasteyhtälöt (lineaarinen tai Mitscherlich) sekä nurmen kaliumpitoisuutta ennustavat yhtälöt SAS MIXED proseduurilla käyttäen satunnaiskertoimista regressiomallia.

3 Tulokset ja tulosten tarkastelu

3.1 Koealueiden maaperä

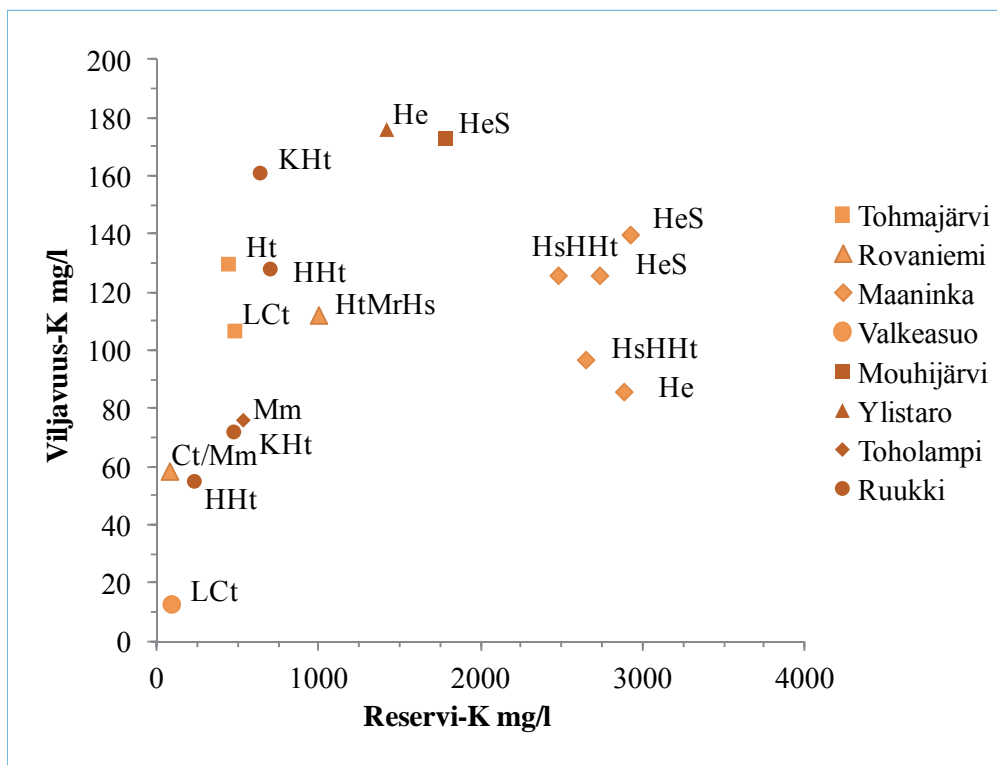
Kokeiden maaperätietojen yhteenveto on taulukossa 5. Viljavuuskaliumin pitoisuus on aineistossa verraten alhainen (maksimissaan välttävä/tydyttävä), mutta reservikalium ylittää parhaimmillaan selvästi viljavuusluokan 'hyvä' alarajan (Viljavuuspalvelu 2000). Havaittu savespitoisuuden maksimi 38% osoittaa että koeaineistossa oli myös hienojakoisia maita mukana. Kyntökerroksen reservikaliumin pitoisuus korreloi voimakkaasti sekä maan savespitoisuuden ($r=0,92$) että hienon hiesun pitoisuuden ($r=0,89$) kanssa, mutta karkean hiesun osuus selittää maan reservikaliumpitoisuutta selvästi heikommin ($r=0,66$; Liite 2). On esitetty, että hieno hiesu -fraktio muistuttaa paljon savesfraktiota ja sen laskeminen yhteen saveksen kanssa olisi hyvä maan ominaisuuksien kuvaaja. Tässä aineistossa pelkkä savespitoisuus selitti reservikaliumin pitoisuutta yhtä hyvin kuin saveksen ja hienon hiesun yhteissumma ($r=0,92$).

Maaperämuuttujien korrelaatiokertoimia tarkastellessa täytyy ottaa huomioon, että viljavuus- ja reservikaliumin (K_{AAc} ja K_{HCl}) osalta näytteet oli otettu osin eri vuosina, mikä heikentää hieman analyysin luotettavuutta. Näyttää kuitenkin siltä, että pintamaan viljavuuskalium (K_{AAc}) korreloi heikosti pintamaan reservikaliumin (K_{HCl}) kanssa ($r=0,38$; kuva 7), mutta voimakkaammin jankon reservikaliumin (K_{HCl}) kanssa ($r=0,66$).

Kyntökerroksen viljavuuskaliumin ja reservikaliumin yhteys oli tässä yhteenvedossa melko säännönmukainen, mutta Maaningan hiesu-, hiue-, ja hietamaat poikkesivat muiden paikkakuntien välisestä korrelaatiosta (Kuva 7). Mouhijärven ja Ylistaron hiue- ja hiesusavimailla sekä viljavuuskalium että reservikaliumpitoisuudet olivat korkeat. Täysin päinvastainen tilanne oli Valkeasuon saraturpeella.

Taulukko 5. Koeaineiston maaperämuuttujien kuvaus. K_{AAc} = viljavuuskalium, K_{HCl} = reservikalium. N = havaintojen lukumäärä.

Muuttuja	Keskiarvo	Minimi mg/l	Maksimi mg/l	N
K_{AAc} pinta	119	55	176	24
K_{HCl} pinta	1177	77	2920	24
K_{AAc} jankko	93	29	160	18
K_{HCl} jankko	1365	53	3260	24
Kivennäismaiden lajitekoostumus (%)				
Saves	20	2	38	17
Hieno Hiesu	15	2	28	17
Karkea hiesu	14	3	24	17
Hieno hieta	22	9	38	17
Karkea hieta	24	5	55	17



Kuva 7. Kyntökerroksen viljavuuskaliumin ja reservikaliumin pitoisuudet koepaikoittain. Lyhenne havaintopisteen vieressä kuvaa kokeen maalajia.

3.2 Maaperämuuttujien vaikutus satovasteeseen

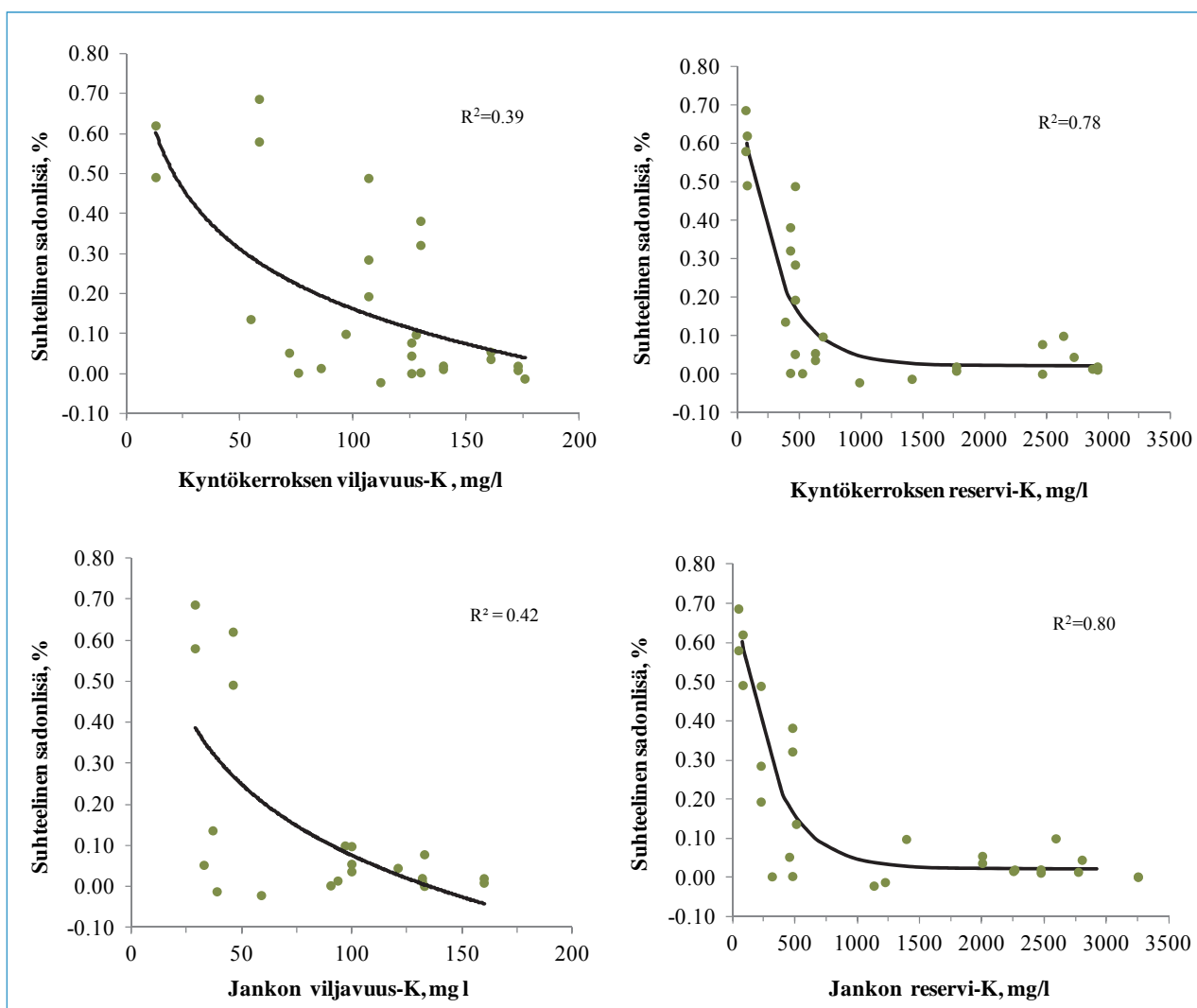
Maaperämuuttujien ja kaliumlannoituksella saadun sadonlisän yhteyttä tarkasteltiin 2. vuoden nurmessa, jota voidaan pitää ”keskimääräisenä” nurmivuotena (kuva 8). Aineiston keskisato toisen vuoden nurmien osalta oli noin 8500 kg ka/ha/vuosi, joten 1 %:n satovaste olisi noin 85 kg ka/ha/vuosi ja 0,1 %:n sadonlisä vastaavasti noin 8,5 kg ka/ha/vuosi. Kun otetaan huomioon pienten kaliumlannoitusten keskisatoa alentava vaikutus, voidaan satotasoa pitää riittävän ajanmukaisena verrattuna virallisten lajikekokeiden tuloksiin 2005–2012 (Kangas ym. 2012).

Kuvista nähdään, että maan viljavuuskalium selitti melko huonosti kaliumlannoituksella (50 → 51 kg/ha/vuosi) saatua sadonlisää ($r^2=0,39$), mikä oli tutkimuksen alkuasetelman perustella odotettua (mm. Saarela ym. 1998). Sen sijaan kyntökerroksen reservikalium selitti ilmiötä huomattavasti paremmin ($r^2=0,78$). Tulos on sikäli odotettu, että kotimaisten tutkimusten (Kähäri 1976, Saarela ym. 1998, Saarela & Mäntylähti 2002) lisäksi myös muut pohjoismaiset tutkimustulokset tukevat oletusta, että maan happoliukoinen kalium (HNO_3 , $\text{HCl} + \text{HNO}_3$ + kuningasvesi, XRBD, XRF, etikkahappo, kuningasvesi, XRF) on merkittävä nurmien kaliumin lähde (Lunnan & Haugen 1993, Øgaard ym. 2002, Andrist- Rangel ym. 2010, Öborn ym. 2010).

Jankon reservikalium näytti selittävän satoa yhtä hyvin tai hienoisesti paremmin kuin kyntökerroksen reservikalium ($r^2=0,80$). Jankon viljavuuskaliumin pitoisuutta ei ollut saatavissa kaikista kokeista, jonka vuoksi suora vertailu jankon viljavuuskaliumin korrelaatiokertoimeen ei ole tarkka. Toiseksi, pintamaan ja jankon reservikalium (K_{HCl}) korreloi voimakkaasti ($r=0,92$, $p < 0,001$), lukuun ottamatta kolmea koetta Ruukissa, joissa ero pintamaan ja jankon reservikaliumpitoisuudessa (K_{HCl}) oli suuri. Pohjamaalla on suuri merkitys maan kaliumtilaan, kun kyntökerros on esimerkiksi orgaanista, heikosti kaliumia pidättävää maata.

Jankon ravinnevarojen merkitykseen vaikuttaa luonnollisesti juuriston määrä eri maakerroksissa. Nurmi- kasvien - etenkin timotein - juuriston pääosa on maan pintaosassa (Sveinstrup & Haraldsen 1997, Bolinder ym. 2002). Silti timoteinkin maksimaalinen juurten syvyys on melko sama kuin muilla yleisillä heinäkaskasvialajeilla (n. 70–80 cm; Salonen 1949, Holmes 1989). Joy ym. (1973) johtopäätöksenä oli, että nurmien kaliuminotto jankosta on todennäköistä. Witter & Johansson (2001) arvioivat, että noin 40–50 % raiheinän ja puna-apilan sadon kaliumista oli peräisin jankosta. Sen sijaan Øgaard ym. (2002) pitivät jankosta otetun kalium merkitystä vähäisenä, mutta myöhemmässä tutkimuksessa arvioivat sen kuitenkin olevan merkittävä (Øgaard & Krogstad 2005). Saarela ym. (1998) huomauttaa, että esimerkiksi savimailla pitkä poutajakso

voi vaikeuttaa myös pohjamaiden kaliumvarojen käyttöä. Jankon merkitys korostui Saarelan ym. (1998) tutkimuksessa, missä koejaksojen lopussa jankon viljavuuskaliumpitoisuuden vaihtelu lannoitustason mukaan oli sitä vähäisempää mitä enemmän maassa oli reservikaliumia (Saarela ym. 1982, 1998).



Kuva 8. Kyntökerroksen reservikaliumin sekä viljavuuskaliumin ja suhteellisen sadonlisäyksen (d50) välinen yhteys kun kaliumlannoitusta nostetaan 50:stä 51:een kg/ha/vuosi. N = 27 paitsi jankon viljavuuskaliumin osalta n=21.

3.3 Satovasteiden ja maan reservikaliumin välinen yhteys

Koska alustavan tarkastelun perusteella reservikalium selitti parhaiten saatua sadonlisää, sovitettiin sen ja sadonlisän välille Mitscherlich –muotoinen funktio [2], ensin 2 v ”keskimääräisille” nurmille. Ensimmäiseksi käytettiin selittäjänä maan reservikaliumlukua (K_{HCl}) (mg/l) suoraan – joko pintamaasta tai jankosta tai näiden summaa. Toisessa vaiheessa tutkittiin, paraneeko mallin selitysaste, jos käytetään reservikaliumin (K_{HCl}) ja viljavuuskalium (K_{AAc}) erotusta, joka periaatteessa kuvaa tarkemmin reservikaliumin osuutta (Øgaard ym. 2002).

Yhtälöt selittivät satovastetta lähes yhtä hyvin (Taulukko 6). Koska ero selitysasteessa oli pieni, voidaan suositella pelkästään kyntökerroksen reservikaliumpitoisuuden (K_{HCl}) (mg/l maata) perustuvaa mallia sen yksinkertaisuuden vuoksi.

Taulukko 6. Suhteellisen satovasteen (Y) ja kaliumlannoituksen noston 50 kilosta 51 kiloon (x) satofunktion $Y = a + b(1 - e^{-cx})$ parametrien estimaatit ja estimaattien keskivirheet. Selittävänä tekijänä maan reservikalium (K_{HCl}) ja maan viljavuuskalium (K_{AAC}) ilmaistuna mg/l maata sekä näiden yhdistelmät. N=27.

Selittävä muuttuja	Parametri	a	b	c	r ²
Reservi-K	Estimaatti	0,775	-0,757	0,0032	0,78
	Keskivirhe	0,093	0,092	0,00072	
Jankon reservi-K	Estimaatti	0,780	-0,745	0,0043	0,80
	Keskivirhe	0,097	0,096	0,0010	
Reservi-K – Viljavuus-K	Estimaatti	0,703	-0,687	0,0038	0,79
	Keskivirhe	0,072	0,075	0,0022	
Kyntökerroksen reservi-K + Jankon reservi-K	Estimaatti	0,768	-0,743	0,0017	0,81
	Keskivirhe	0,086	0,086	0,00036	

Kun kyntökerroksen reservikaliumpitoisuuteen (K_{HCl}) perustuva yhtälö sijoitetaan alkuperäiseen aineistoon (kuva 9) nähdään, että nurmen kaliumlannoituksella on saatu sadonlisää lähinnä silloin, kun maan reservikalium on alle 600 mg/l. Kun maan reservikaliumin pitoisuus on luokkaa 500 mg/l, on satovasteen vaihtelu suurta. Sen sijaan alhaisilla reservikaliumin arvoilla (<400 mg/l) sadonlisä on lähes säännöllisesti huomattava.

Funktion student -jakaumalla normalisoituja residuaaleja tarkasteltiin sekä maalajeittain, koepaikoittain että nurmikausien pituuden perusteella. Ensimmäisessä tarkastelussa ilmeni, että satovasteet olivat selvästi ennustetta suurempia toisella ja kolmannella nurmijaksolla (Taulukko 7). Tämä on osoitus nurmien tehokasta kaliuminotosta. Jos maan kaliumvarat ovat niukat, käytetään ne verraten tarkasti jo kolmen ensimmäisen vuoden aikana (Koikkalainen ym. 1990, Saarela ym. 1998). Aineisto oli painottunut lyhytkestoisiin, viljan viljelyn välissä tehtyihin yhden nurmijakson (3–4 vuotta) kokeisiin, jotka näyttävät aliarvioivan nurmien kaliumlannoitustarvetta. Pitkäkestoisia, useamman nurmikierron kokeita ei ole Suomessa juurikaan tehty (poikkeuksena Koikkalainen ym. 1990, Virkajärvi & Huhta 1993), vaikka ne todennäköisesti vastaisivatkin paremmin nautakarjatilojen viljelykiertoa. Aineiston kokeet, joissa nurmijaksoja oli enemmän kuin yksi, painottuivat maan reservikaliumin osalta alhaiseen luokkaan ($K_{HCl} < 600$ mg/l). Poikkeuksena oli vain Mouhijärvellä tehty koesarja (K_{HCl} 1740 mg/l). Mouhijärven kokeessa satovaste oli molemmilla jaksoilla kutakuinkin samansuuruinen, mikä ilmentää maan kaliumvarojen riittävyyttä sellaisilla mailla, joilla reservikalium on korkea. Tarkemmin maan kaliumvarojen riittävyyttä tarkastellaan satofunktioiden yhteydessä kappaleessa 3.5

Taulukko 7. Reservikaliumiin perustuvan satovastemallin student -jakaumalla normalisoitujen residuaalien keskiarvo ja havaintojen lukumäärä (N) nurmijakson mukaan luokiteltuina. Malli: satovaste $Y = a + b(1 - e^{-cx})$; $x = K_{HCl}$

Nurmijakso	Keskiarvo	N
1	-0,34	21
2	1,25	4
3	1,07	2

Maalajien karkean ryhmittelyn mukaan orgaanisilla mailla havaittu vaste oli suurempi kuin mallin ennuste, kun taas karkeilla kivennäismailla havaittu vaste oli alhaisempi kuin ennuste (Taulukko 8).

Taulukko 8. Reservikaliumiin perustuvan satovastemallin student -jakaumalla normalisoitujen residuaalien keskiarvo ja havaintojen lukumäärä maalajiryhmän mukaan luokiteltuina. Malli: satovaste $Y = a + b(1 - e^{-cx})$; $x = K_{HCl}$.

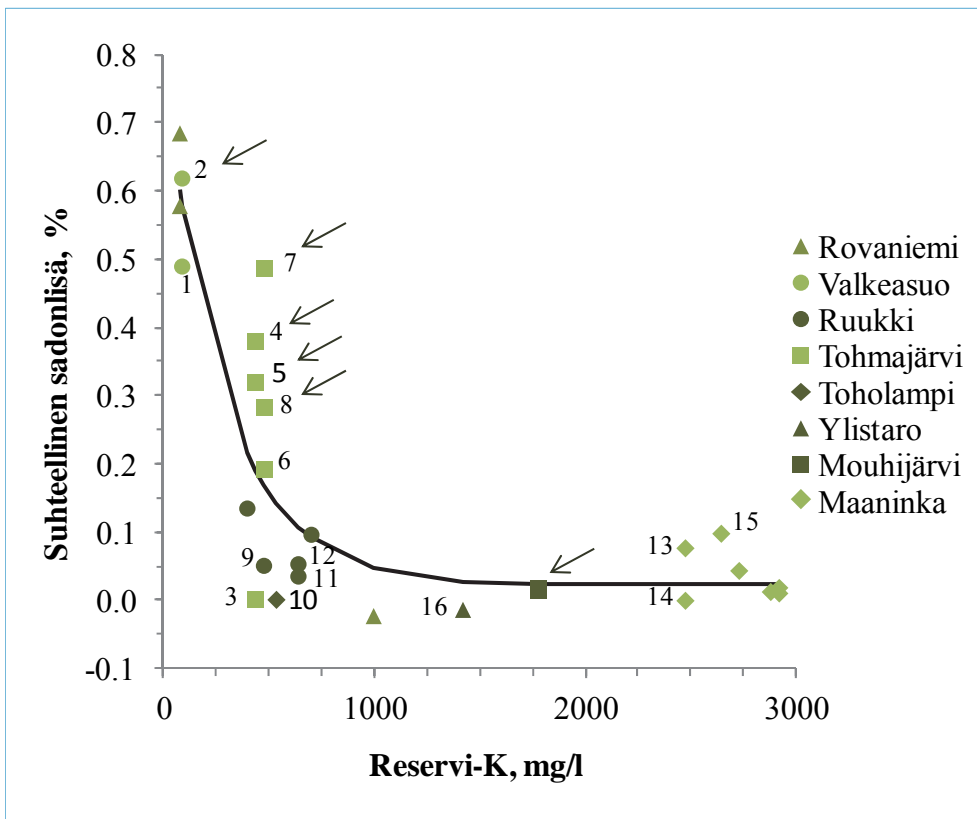
Maalaji	Keskiarvo	N
Orgaaniset maat	0,31	8
Savi ja hiue	-0,05	7
Karkeat kivennäismaat	-0,17	12

Paikkakunta- ja koekohtaisessa tarkastelussa ilmenee että Ruukissa ja Toholammilla kaliumlannoituksella saatu satovaste oli huomattavasti pienempi kuin malli antaisi odottaa. Vastaavasti Tohmajärvellä vaste oli suurempi. Poikkeavan suuri positiivinen poikkeama havaittiin myös Maaningalla kahdessa kokeessa, joista toinen oli nurminatanurmi ja toinen on erittäin kuivan vuoden (2006) timoteinurmi melko tiiviillä hiesu- maalla. Ruukissa saatiin ennustetta alhaisempi sadonlisä silloin, kun pohjamaan reservikaliumpitoisuus oli huomattavasti korkeampi kuin pintamaassa (3 koetta, liite 1), mikä on osoitus jankon merkityksestä ka- liumin saannissa (Witter & Johansson 2001, Øgaard & Krogstad 2005). Lisäksi kun satovastemalleihin lisättiin selittäväksi muuttujaksi myös pohjamaan reservikalium, residuaalit pienenevät oleellisesti Ruukin osalta.

Aineisto koostuu suhteellisen vähäisestä havaintomäärästä, joten poikkeamia yleisfunktioista voidaan tarkastella koekohtaisesti (Kuva 9). Pisteet 1 ja 2 ovat Tohmajärven Valkeasuon polttoturvesuolta (Koe 17), jossa piste 2:n vaste on todennäköisesti korkeampi siksi, että se on toisen nurmijakson havainto ja nurmi on jo käyttänyt sen kaliumin mikä perustamisessa on annettu tai mitä maaperä pystyy helposti luovuttamaan. Piste 3 on Tohmajärven hietamaan ensimmäinen nurmijakso (koe 13). Vaste nousee selvästi toisen ja kolmannen jakson aikana (pisteet 4 ja 5). Samoin käy Tohmajärven saraturvemaalla (Koe 14; piste 6 = ensimmäinen jakso, Piste 7 = toinen jakso ja 8 = kolmas nurmijakso). Suurimmillaan vaihtelu on silloin kun pintamaan reservikaliumpitoisuus on 400–700 mg/l (Kuva 9). Vaihtelua selittää osaltaan edellä mainittu nurmijaksojen erilainen kaliumlannoitusvaste.

Piste 9 on Ruukista karkealta hietamaalta (Koe 2), jonka alhaista vastetta voi selittää se, ettei kokeessa ollut 0-ruutua vaan vasteet jouduttiin arvioimaan 80 ja 160 kg K/ha/v lannoitustasojen perustella; jää siis epäselväksi olisiko vaste näkynyt alemmilla lannoitustasoilla. Sen sijaan Toholammin multamaalla (Koe 4, Piste 10) lannoitusvasteen puuttumista on vaikea selittää. Piste 11 (Koe 8, Nurminata) ja 12 (Koe 8, Timotei) ennustettua alhaisempaa vastetta selittää se, että kokeessa pintamaan reservikaliumin arvo oli vain 639 mg/l, mutta pohjamaan reservikaliumin pitoisuus 2010 mg/l.

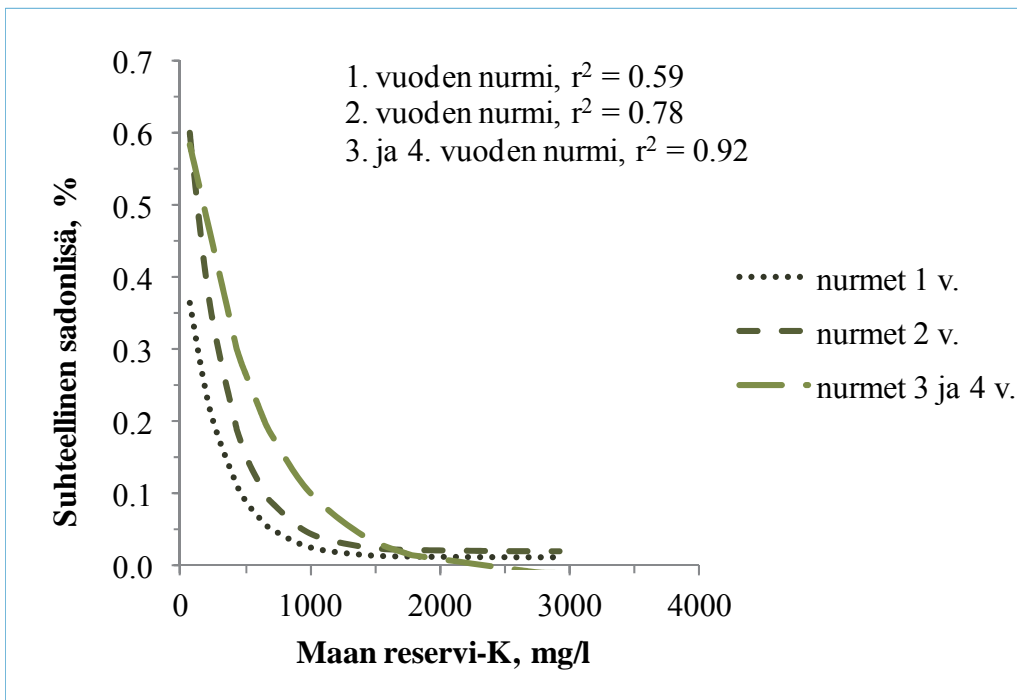
Aineistossa on myös havaintoja jolloin satovaste on ollut selvä, vaikka pintamaan reservikaliumpitoisuus on korkea. Molemmat havainnot tulevat Maaningan hietamailta, joista piste 13 on kokeen 6 nurminata- koejäsen ja piste 14 on saman kokeen timoteikoejäsen. Tästä olisi houkuttelevaa vetää johtopäätöksiä kasvi- lajien eroista, sillä nadat sisältävät enemmän kaliumia kuin timotei (Virkajärvi ym. 2012), mutta Ruukissa pisteet 11 ja 12 osoittivat juuri päinvastaista kasvilajiero. Piste 15 on niin ikään Maaningalta (Koe 5), mut- ta erittäin kuivana vuonna tiiviillä HsHHt-maalla kasvanut nurmi kärsi todennäköisesti kuivuudesta, joka rajoittaa kaliuminottoa (Saarela ym. 1998). Erityisesti 8 kg K/ha lannoitetun koejäsen sato oli pieni ja 118 kg K/ha/v saaneen koejäsenen sato olikin 12 % (800 kg/ha/v) suurempi (Pakarinen ym 2008). Satotaso oli yleisesti vuonna 2006 alhainen (6500–7200 kg ka/ha/v). Havainto viittaa siihen, että joissain olosuhteissa voidaan kaliumlannoituksella saada sadonlisää myös korkean reservikaliumin mailla, mutta vasteen suuruus oli kuitenkin pieni. Todettakoon, että kolmantena nurmivuonna 8 kg K/ha ja 108 kg K/ha välillä ei ollut satoeroa. Tässä kokeessa vain kahden lannoitustason käyttäminen tuo luonnollisesti epätarkkuutta satovas- teen estimointiin.



Kuva 9. Maan reservikaliumin pitoisuuden ja kaliumlannoituksella saadun suhteellisen sadonlisäyksen yhteys 2 vuoden nurmissa. Nuolet= 2 ja 3 nurmijakson kokeet.

Ylistaron havainto, (piste 16, koe 16) istui aineistoon varsin hyvin, mutta kyseisen kokeen osalta on syytä huomauttaa kaksi asiaa: ensimmäisenä vuonna kalium alensi satoa, toisena se ei vaikuttanut sadon määrään ja kolmantena vuonna kaliumlannoitus puolestaan nosti satoa (Saarela ym. 1998). Sadon alenemisen syyksi ensimmäisenä vuonna kirjoittajat mainitsevat lisätyn kaliumin aiheuttaman magnesiumin puutteen, koska timotein mg-pitoisuus oli huomattavan alhainen (Saarela ym. 1998). Nyt kerätyssä aineistossa ei ole maaperän eikä kasvien mg-pitoisuutta, joten ilmiötä ei voida tutkia tarkemmin eikä ravinnesuhteita voida tarkastella muutenkaan laajemmin. Toiseksi on syytä mainita, että kokeen satotaso toisena nurmivuonna oli varsin korkea, 15300–15900 kg ka/ha/v, joten magnesiumin puute ei rajoittanut nurmisadon tuottoa yleisesti.

Kuvasta 10 käy ilmi, että satovaste on sitä korkeampi, mitä vanhempi nurmi on kyseessä, mikä on myös yleisesti havaittu ilmiö (Suomessa: Peltomaa ym. 1979, Tähtinen 1979, Saarela 1983, Koikkalainen ym. 1990, Linna & Jansson 1994, Saarela ym. 1998; muissa Pohjoismaissa: Lunnan & Haugen 1993, Volden 1996, Øgaard ym. 2002 hietamaat, Öborn ym. 2010). Lisäksi kuvasta 10 näkyy, että kyntökerroksen reservikaliumiin perustuvan funktion selitysaste (r^2) on sitä parempi mitä vanhempi nurmi on kyseessä, mikä on yhtenevä havainto Saarelan & Mäntysaaren (2002) tulosten kanssa.



Kuva 10. Maan reservikaliumin pitoisuuden vaikutus kaliumlannoituksella saatuun sadonlisaan lisättäessä lannoitusta 50 kilosta 51 kiloon K/ha/v eri-ikäisissä nurmissa (kaikki nurmijaksot).

3.4 Kasvianalyysit kaliumtarpeen kuvaajina

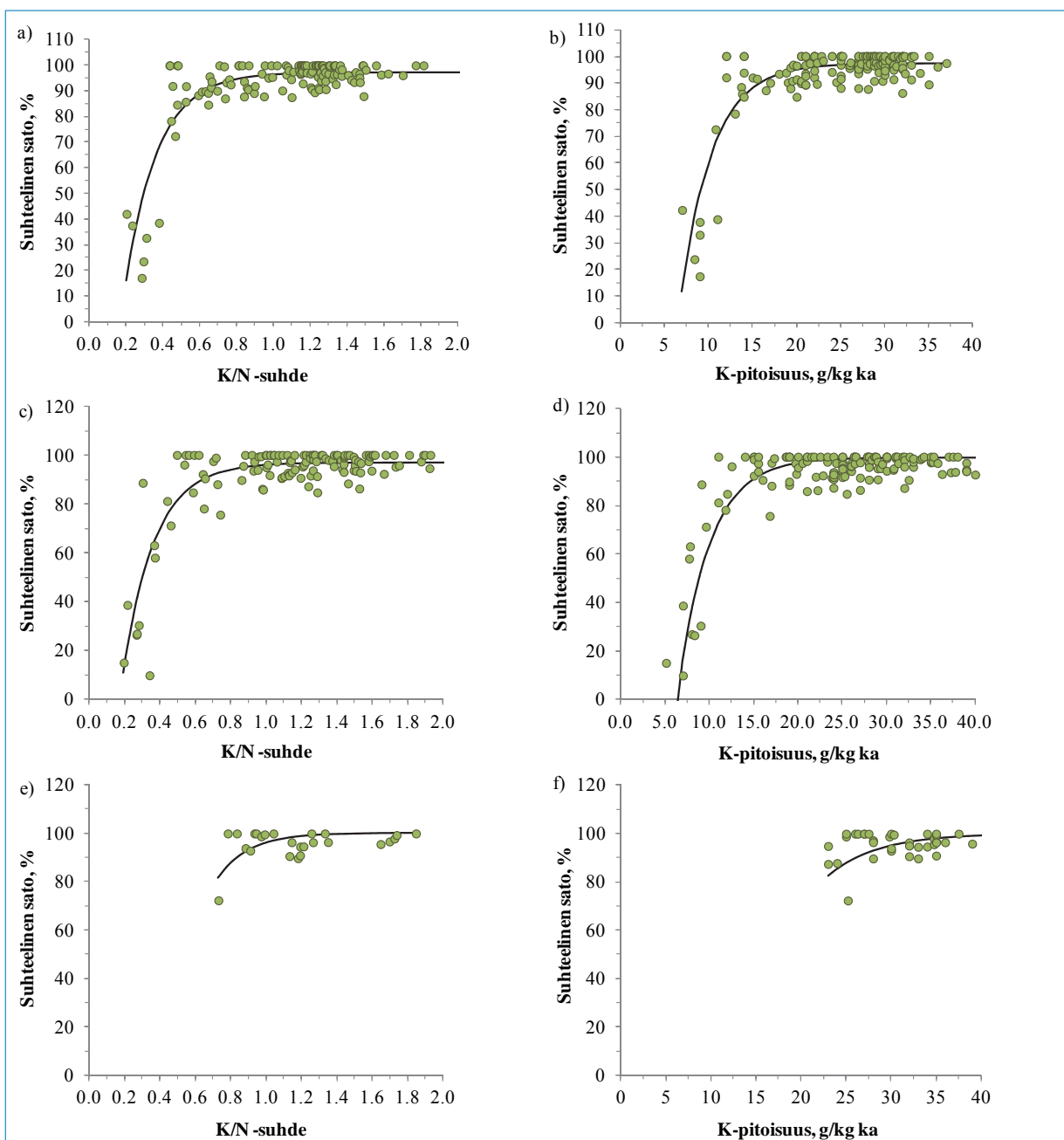
Kasvuston kaliumpitoisuus kuvaa kasvin kaliuminottoa tarkemmin kuin pelkkä kuiva-ainesato. Nurmikasvien kaliumpitoisuus alenee kasvuston kehitysvaiheen myötä (Pelletier ym. 2008, Virkajärvi ym. 2012), mikä johtuu etupäässä lehti-korsisuhteen muutoksista: lehtien fysiologinen kaliumintarve on huomattavasti suurempi kuin korsien (mm. turgoripaine, entsyymiaktivaattori fotosynteesissä sekä hengityksessä; Taiz & Zeiger 2010) ja siksi lehdet sisältävät huomattavasti enemmän kaliumia kuin korret (Medinta ym. 2013). Sama koskee myös kasvin tyypipitoisuutta (Bélanger & Ziadi 2008, Nissinen ym. 2010), vaikka typen ja kaliumin tehtävät kasvissa ovatkin erilaiset. Näin ollen on jo varhain esitetty ajatus, että kasvin K/N -suhde olisi parempi indikaattori kasvin kaliumtilan kuvaajana kuin pelkkä K (Saarela 1982, Koikkalainen ym. 1990, Théliér-Huche & Salette 1994).

Tässä aineistossa saatiin 95 % maksimisadosta, kun nurmen kaliumpitoisuus oli 17,5–20 g/kg ka (Taulukko 9, Kuva 11). Tämä vastaa hyvin valitsevaa käsitystä: Hopper & Clement (1966) esittivät raiheinälle kasvun raja-arvoksi 15 g K/kg ka ja 95 % maksimisadosta saatiin pitoisuudella 20 g K/kg ka (Clement & Hopper 1968). Suomessa timotei-nurminatanurmille on esitetty sadonlisan raja-arvoiksi 16–20 g K/kg ka (Saarela ym. 1998; alempi optimi alhaisen raakavalkuaispitoisuuden säilörehulle) ja 14–16 g K/kg ka (Virkajärvi & Huhta 1995). Toisaalta Andersson ym. (2007) esittivät 40 vuotta Ruotsissa jatkuneiden kenttäkokeiden perusteella kriittiseksi rajaksi niinkin alhaista pitoisuutta kuin 10–15 g K/kg ka.

Rehun K/N -suhde ja kaliumpitoisuus selittivät yhtä hyvin suhteellista satoa. (Taulukko 9, Kuva 11). Ilmiö oli sama sekä ensimmäisessä että toisessa niitossa. Kun K/N -suhde oli välillä 0,85–0,86, saavutettiin 95 % maksimisadosta, mikä vastaa aiempaa käsitystä (Saarela: noin 1; Virkajärvi & Huhta 1994: > 0,9). Kaikissa kokeissa käytettiin tyypillistä N-lannoitusta ja niittoaika pyrittiin myös optimoimaan säilörehuasteelle. Näin ollen aineistoon ei luotu ylimääräistä vaihtelua K/N -suhteelle, vaan ainoana vaihtelun lähteenä olivat K-lannoitus, maan kalium- ja typpivarat sekä vuosien kasvuolojen vaihtelu. Aineistossa, jossa kasvin kehitysvaihe ja N-lannoitus vaihtelisivat enemmän, voisi tulos olla erilainen.

Taulukko 9. Suhteellisen satovasteen ja ruohon kaliumpitoisuuden ja K/N-suhteen vaikutus suhteelliseen saatoon. Yhtälö muotoa ($Y = a + b(1 - e^{-cx})$). Parametrien estimaatit ja estimaattien keskivirheet sekä mallin selityssaste. n = havaintojen lukumäärä.

Niitto	Selittäjä	Parametri	a	b	c	r ²	n
1	K-pitoisuus	Estimaatti	-492,9	590,3	0,2759	0,736	151
		Keskivirhe	129,0	128,7	0,0247		
	K/N-suhde	Estimaatti	-161,0	258,6	5,75	0,731	131
		Keskivirhe	40,8	40,5	0,546		
2	K-pitoisuus	Estimaatti	-308,4	405,6	0,2729	0,776	148
		Keskivirhe	66,8	66,5	0,0229		
	K/N-suhde	Estimaatti	-159,0	256,1	5,61	0,764	128
		Keskivirhe	40,9	40,6	0,588		

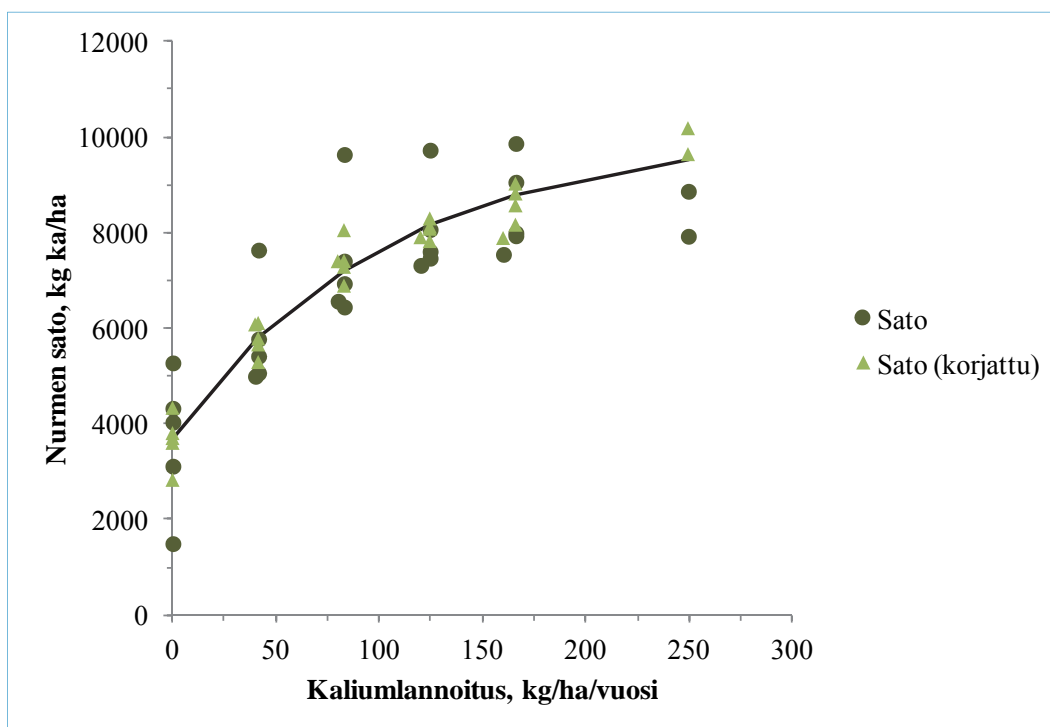


Kuva 11. Nurmen K/N-suhteen (a, c, e) ja K-pitoisuuden (g K/kg ka; b, d, f) yhteys suhteelliseen saatoon (%) ensimmäisessä (a,b), toisessa (c,d) ja kolmannessa (e,f) niitossa.

Kasvien kaliumpitoisuuden ja K/N -suhteen kriittiseen rajaan saattaa vaikuttaa myös se että eri nurmikasvilajit ottavat kaliumia maasta eri tehokkuudella (Raininko 1968, Linna & Jansson 1994, Pelletier ym. 2008b, Virkajärvi ym. 2012). Se, poikkeavatko eri nurmikasvilajien kriittiset K/N -suhteet toisistaan jää avoimeksi, koska sopivia aineistoja ei asian tarkastamiseksi ole.

3.5 Kaliumlannoituksen satofunktiot

Viimeisessä vaiheessa alkuperäinen satoaineisto jaettiin kahteen osaan: matalan ja korkean kaliumtilan maihin kuvan 9 perusteella. Matalan kaliumtilan maihin luettiin sellaiset kokeet, joissa sekä pintamaan että jankon reservikalium (K_{HCL}) oli alle 500 mg/l. Korkean kaliumtilan maissa joko pintamaa tai jankko sisälsi yli 600 mg /l reservikaliumia (K_{HCL}). Kummallekin ryhmälle estimoitiin satovasteyhtälöt nurmen iän mukaan satunnaiskertoimisen regressioanalyysin perusteella. Tässä analyysissä kunkin kokeen satotasoa katsotaan satunnaismuuttujaksi. Toisin sanoen kunkin kokeen perussatotasoa vaihtelee maan tuottokyvyn ja sääolojen perusteella ja varsinaisesti kaliumin satofunktio estimoidaan satotasolla korjattujen havaintojen perusteella (*adjusted* -havainnot). Esimerkkinä analysointitavasta on heikon kaliumtilan maiden satovasteen estimointi nurmijaksoilla 2 ja 3 kuvassa 12. Kuvasta nähdään, että satotasolla korjattujen *adjusted*-havaintojen vaihtelu on paljon pienempää kuin alkuperäisten havaintojen ja että korjatut havainnot osuvat varsin hyvin estimoidulle funktiolle.

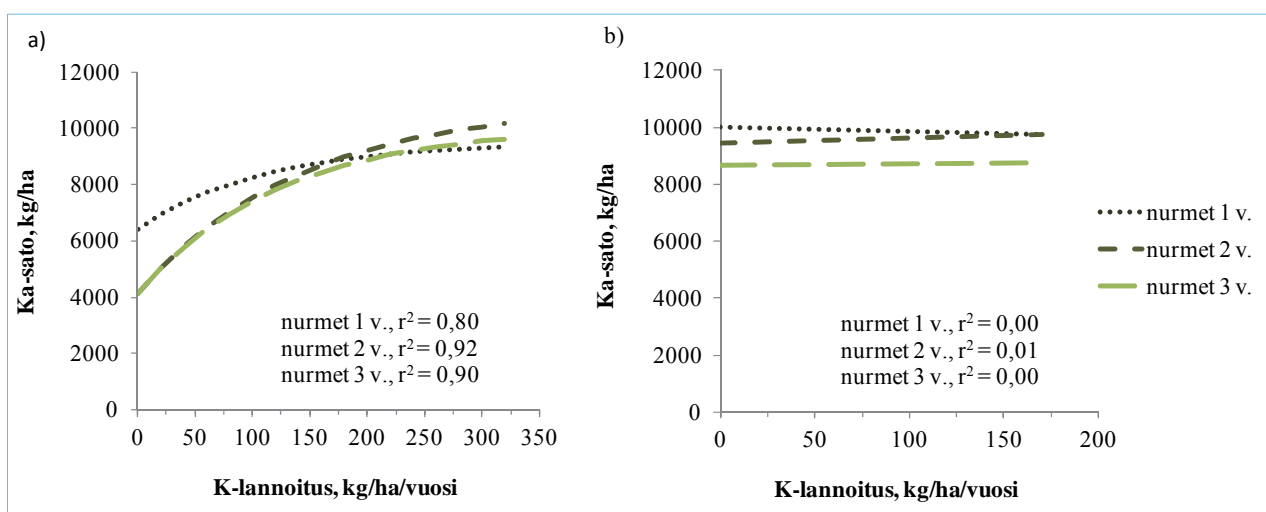


Kuva 12. Esimerkki satunnaiskertoimisen regressioanalyysin tuloksien tulkinnasta. Sato = alkuperäiset havainnot; Sato (korjattu) = havainnot korjattuna kunkin kokeen satotasotason perusteella. Kuvassa satofunktio on sovitettu korjattuihin arvoihin Mitscherlich-funktion mukaisesti.

Matalan kaliumtilan mailla kaliumlannoitus lisää satoa etenkin toisena ja kolmantena vuotena jopa tasolle 300 kg K/ha/ v asti (Taulukko 10 ja kuva 13) sekä selittää satotasokorjauksen jälkeen satovaihtelusta 80–92 %. Tämä kuvaa hyvin kaliumin merkitystä nurmien kasvinravinteena. Taulukon 10 yhtälöistä voidaan myös laskea, että kaliumlannoituksen ansiosta sato nousi 50–160 % nurmen iästä riippuen. Ero korkean kaliumtilan maihin on selvä: kaliumtilan ollessa hyvä kaliumlannoitus ei selitä satovaihteluita eikä sillä myöskään saada sadonlisää. Satovastetta ei havaita edes kolmantena nurmivuonna, vaikka kolmannen vuoden satotasoa on selvästi alhaisempi kuin ensimmäisen tai toisen vuoden nurmissa. On syytä huomauttaa, että korkean kaliumtilan mailla kokeissa käytettiin yleisesti alemmaa lannoitustasoa kuin matalan kaliumtilan mailla.

Taulukko 10. Reservikaliumpitoisuuteen perustuvan luokittelun satovaste ja ruohon kaliumpitoisuusfunktiot. Matala = sekä pintamaan että jankon reservikalium < 500 mg/l (K_{HCl}), Korkea = pintamaan tai jankon reservikalium > 600 mg/l (K_{HCl}). Nurmen ikä (vuosia), N kokeiden lukumäärä, a, b ja c yhtälöiden parametrit sekä niiden keskivirheet. SEE = ennusteen keskivirhe, R^2 mallin selitysaste. Yhtälö: M = Mitscherlich, Lin = lineaarinen yhtälö.

Kaliumtila	Ikä	N	Kuiva-ainesato, kg ka/ha/v			SEE	R^2	Yhtälö
			a	b	c			
Matala	1	9	6421 ± 154	3081 ± 532	0,009 ± 0,003	477	0,80	M
	2	11	4123 ± 161	6761 ± 695	0,007 ± 0,001	561	0,92	M
	3	8	4122 ± 204	5957 ± 758	0,008 ± 0,002	598	0,90	M
Korkea	1	14	10015 ± 322	-1,7 ± 3,5		1402	0,00	Lin
	2	15	9439 ± 359	1,8 ± 3,7		1479	0,01	Lin
	3	11	8650 ± 181	0,5 ± 1,9		634	0,00	Lin



Kuva 13. Kaliumlannoituksen vaikutus eri-ikäisten nurmien kuiva-ainesatoihin matalan (a) ja korkean (b) kaliumtilan mailla. Matala = sekä pintamaa että jankko < 500 mg/l (K_{HCl}), Korkea = pintamaa tai jankko > 600 mg/l (K_{HCl}).

Usea Pohjoismainen tutkimus on osoittanut maan reservikaliumin määrän vaikuttavan nurmen kaliumlannoitustarpeeseen (mm. Tähtinen ym. 1979, Saarela ym. 1982 ja 1998, Saarela 2001, Salomon 1995, Volden 1996, Ogaard ym. 2002). Lannoituksella ei ole ollut merkitystä, kun maan reservikaliumtila on ollut hyvä. Maalajista riippuen reservikaliumia voi vapautua muutamasta kilosta jopa 65–85 kg/ha/v (Holmqvist ym. 2003, Øgaard & Krogstad 2005). Johnsson (1986) arvioi vapautuvan kaliumin määräksi jopa yli 170 kg/ha.

Sen sijaan matalan reservikaliumin mailla kaliumlannoitus on nostanut sadon määrää huomattavasti. Saarelan ym. (1982, 1998) tutkimusaineisto sisälsi kahdeksan 2-4 -vuotista nurmijaksoa. Vaikka nurmikasvit käyttävät runsaasti kaliumia, kaliumlannoituksen puuttuminen heikensi nurmisatoa vain reservikaliumiltaan köyhillä mailla. Näillä mailla kaliumlannoitus nosti kuiva-ainesatoa 5 %:sta yli 80 %:iin maalajista riippuen. Tähtisen (1979) mukaan matalan reservikaliumin mailla kaliumlannoitus (100 kg K/ha) nosti kuiva-ainesatoa enimmillään noin 20 % (turvemaa). Tässä tutkimuksessa havaittu kaliumlannoituksen aiheuttama sadonlisä (50–160 %) on siis aiempia kotimaisia tuloksia suurempi, mikä voi osittain selittyä kokeiden sijoittumisella nurmiviljelyalueille, jossa erittäin heikon kaliumtilan maat painottuvat selkeästi (mm. Rovaniemi, Tohmajärven Valkeasuo). Luonnollisesti sadonlisään vaikuttavat muun muassa korkein käytetty kaliumlannoitus ja muiden ravinteiden riittävyys. Heikon kaliumtilan mailla kaliumin antama satovaste on siis huomattavasti suurempi ja merkityksellisempi kuin esimerkiksi fosforilannoituksen antama satovaste (fosforilannoituksen satovasteet: Saarela ym. 1998; Virkajärvi ym. 2009,) ja toisena ja kolmantena vuonna jopa 3/4 typpilannoituksen kivennäismailla antamasta satovasteesta (Salo ym. 2013).

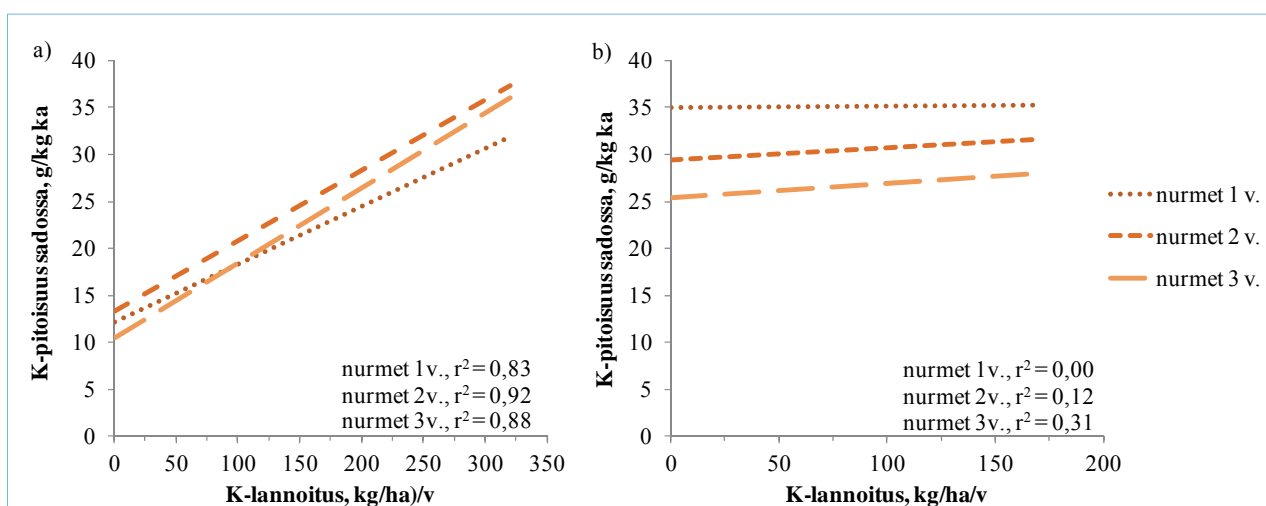
Tässä tutkimuksessa havaittiin kaliumlannoituksen suurempi satovaste nurmen ikääntyessä, mikä on todettu myös muissa tutkimuksissa (Hernes 1978, Koikkalainen ym. 1990, Lunnan & Haugen 1993, Volden 1996).

3.6 Kaliumlannoituksen vaikutus rehun kaliumpitoisuuteen

Nurmen kaliumpitoisuuden ja lannoituksen yhteys oli aineistossa selvä: matalan kaliумtilan mailla lannoitus selittää nurmen kaliumpitoisuutta hyvin ja ilman kaliумlannoitusta nurmen kaliumpitoisuus on huomattavan matala (Taulukko 11, Kuva 14). Korkean kaliумtilan mailla nurmen kaliumpitoisuus on lähtökohtaisesti paljon korkeampi (Taulukon 11 vakion a arvot). Nurmen kaliumpitoisuudella ja iällä havaitaan myös yhteys: ensimmäisen vuoden nurmilla rehun kaliumpitoisuus on korkea ja kaliумlannoituksen vaikutus pieni. Mitä vanhempi nurmi on kyseessä, sitä suurempi on lannoituksen vaikutus nurmen kaliumpitoisuuteen. Matalan kaliумtilan mailla vasta lannoitustasolla 250–300 kg/ha/v rehun kaliumpitoisuus nousee samalle tasolle kuin korkean kaliумtilan mailla ilman lannoitusta. Tämä riippuu kuitenkin nurmen iästä, sillä korkean kaliумtilan mailla ruohon kaliumpitoisuus alenee selvästi nurmen iän myötä eikä tätä alenemista pystytty kompensoimaan annetuilla kaliумlannoituksella. Matalan kaliумtilan mailla rehun kaliumpitoisuus ylittää märehittävän kannalta suositeltavan tason 30 g/kg ka vasta lannoituksen noustessa tasolle 220–290 kg K/ha/v, joten tämän perustella kaliумlannoituksen lisääminen on mahdollista.

Taulukko 11. Nurmen kaliumpitoisuus kaliумlannoituksen funktiona, kuun aineisto on ryhmitelty maan reservikaliumpitoisuuden mukaan. Matala = sekä pintamaa että jankko < 500 mg/l (K_{HCl}), Korkea = pintamaa tai jankko > 600 mg/l (K_{HCl}). Nurmen ikä (vuosia), N kokeiden lukumäärä, a, b ja c yhtälöiden parametrit sekä niiden keskivirheet. SEE = ennusteen keskivirhe, R^2 mallin selitysaste. Yhtälö: M = Mitscherlich, Lin = lineaarinen yhtälö.

Sadon K-pitoisuus, g/kg ka							
Kaliумtila	Ikä	N	a	b	SEE	R^2	Yhtälö
Matala	1	4	12,2 ± 0,8	0,062 ± 0,006	2,19	0,83	Lin
	2	8	13,3 ± 0,4	0,075 ± 0,004	1,79	0,92	Lin
	3	6	10,5 ± 0,6	0,080 ± 0,005	2,11	0,88	Lin
Korkea	1	4	35,0 ± 0,7	0,001 ± 0,007	1,84	0,00	Lin
	2	7	29,4 ± 0,8	0,013 ± 0,008	2,06	0,12	Lin
	3	4	25,4 ± 0,6	0,015 ± 0,006	1,33	0,31	Lin



Kuva 14. Kaliумlannoituksen vaikutus eri-ikäisten nurmien kaliumpitoisuuteen matalan ja korkean kaliумtilan mailla. Matala = sekä pintamaa että jankko < 500 mg/l (K_{HCl}), Korkea = pintamaa tai jankko > 600 mg/l (K_{HCl}).

Tutkimuksessa havaittu kaliумlannoituksen rehun kaliumpitoisuutta nostava vaikutus on osoitettu useissa aikaisemmissa tutkimuksissa (Tähtinen 1979, Koikkalainen ym. 1990, Saarela ym. 1998). Uutta ja merkittävää on se, että kasvin kaliumpitoisuuden nousu riippuu selvästi maaperän reservikaliumin määrästä ja että korkean kaliумtilan mailla on vaikea välttää lehmien kannalta korkeita kaliumpitoisuuksia, etenkin ensimmäisen ja toisen nurmivuoden nurmissa.

Kuten luvussa 1.5 esitettiin, on kaliumilla kaksi pääasiallista vaikutusta lehmän sairastuvuusriskiin: korkea kaliumpitoisuus lisää sekä laidunhalvaus- että poikimahalvausriskiä ja siksi korkeaa kaliumpitoisuutta rehussa tulee pääsääntöisesti välttää. Kirjallisuuden perustella tiedetään, että eri nurmikasvilajit ottavat kaliumia maasta eri tehokkuudella. Esimerkiksi kun heinäkasveja ja apilaa kasvatetaan seoksena ja maanesteessä on riittävästi kaliumia kasvien tarpeisiin, niiden kaliumpitoisuus on usein samaa luokkaa. Sen sijaan kilpailutilanteessa heinäkasvit ottavat kaliumia apilaa tehokkaammin (Follet & Wilkinson 1995). Ero johtuu ilmeisesti juuriston rakenteesta ja niiden kationivaihtokapasiteetista (Woodward y. 1984). Lisäksi nurmi-palkokasvit sisältävät huomattavasti enemmän mm. kalsiumia, mikä parantaa yleisesti rehun K/Mg+Ca – suhdetta). Myös nurmiheinälajien välillä on eroavaisuuksia: esimerkiksi hyvän kaliumtilan mailla viljellyn ruokonadan K-pitoisuus on ollut selvästi korkeampi kuin timotein (ensimmäisessä niitossa keskimäärin 30,6 vs. 24,6 ja toisessa 29,7 vs. 21,8 g K/kg ka) (Taulukko 12). Tämä on epäilemättä yhteydessä siihen, että ruokonatakasvustossa lehtien osuus on korkea, ja lehdissä puolestaan on huomattavasti enemmän kivennäisiä kuin korressa (Virkajärvi ym. 2012).

Suoria vertailuja eri heinäkasvilajien välillä on niukasti, mutta karkeasti heinälajit voidaan jaotella kolmeen ryhmään (Taulukko 12). Italianraiheinä ja koiranheinä ottavat usein tehokkaasti kaliumia ja niiden kaliumpitoisuus on korkea silloin, kun kaliumia on paljon saatavilla (Joy ym. 1973, Rinne ym. 1974, Linna & Jansson 1994). Ruokonata ja englanninraiheinä ovat kaliumpitoisuuksiltaan keskimääräisiä (Pelletier ym. 2008b). Timotein ja nurminadan ero ei ole kovin suuri. Vähäisten vertailujen perustella näyttäisi, että kun kaliumia on runsaasti saatavilla, on nurminadan kaliumpitoisuus korkeampi. Eron suuruus riippuu niitosta ja kasvuolosuhteista (Raininko 1968, Nissinen ym. 2003) ja saattaa hyvinkin heijastella eroja kasvilajien lehtevyydessä (Virkajärvi ym. 2012).

Yleisesti ottaen heinäkasvit ovat apilaa tehokkaampia myös reservikaliumin hyödyntämisessä (Mengel & Steffans 1985). Kasvilajien välisen eron suuruus riippuu kuitenkin myös kasvuolosuhteista (Raininko 1968, Rinne ym. 1978, Pelletier ym. 2008b). Koska nyt osoitettiin maan reservikaliumtilan suuri vaikutus rehun kaliumpitoisuuteen, on todennäköisesti eduksi viljellä puna-apilaa tai timoteita korkean kaliumtilan mailla ja välttää italianraiheinän ja koiranheinän viljelyä, erityisesti jos laidun- tai poikimahalvauksia on esiintynyt tavallista enemmän.

Taulukko 12. Eri heinäkasvilajien kaliumpitoisuus silloin kun kaliumia on riittävästi käytettävissä

Kasvin kaliumpitoisuus/ kaliuminotto	Matala	Keskimääräinen	Korkea
Kasvilaji	Timotei (Nurminata)	Nurminata Englanninraiheinä Ruokonata	Italianraiheinä Koiranheinä

Typpilannoituksen määrällä on kahdenlaisia vaikutuksia kasvin kaliumpitoisuuteen. Kun kaliumia on runsaasti saatavilla, typpilannoituksen lisääminen edistää myös kaliumin ottoa. Mutta jos kaliumia on heikosti kasvien saatavilla, voi kasvien kaliumpitoisuus alentua. Yleensä näin käy nurmen esimerkiksi vanhetessa (Rinne ym. 1978, Tähtinen 1979). Tähtisen (1979) mukaan sadon kaliumpitoisuuden ja typpilannoituksen yhteys oli selvempi ensimmäisenä nurmivuonna, jolloin kaliumlannoituksen määrällä (100 tai 200 kg/ha) ei ollut vaikutusta sadon kaliumpitoisuuteen. Kolmantena vuonna sadon kaliumpitoisuus laski typpilannoituksen noustessa, vaikka kasvin kaliumin otto maasta lisääntyi.

Nurmien lannoitteissa kalium on yleensä kaliumkloridina, joten ne sisältävät lähes yhtä paljon klooria kuin kaliumia (Saarijärvi 2013). Tämä on rehun kationi-anionitasapainon kannalta hyvä asia, sillä lisätty kloori edesauttaa kationi-anionitasapainon ylläpitämistä ja vähentää siten poikimahalvauksen riskiä (Pelletier ym. 2008a). MTT:n uudessa koesarjassa kolmen koepaikan ja kahden vuoden keskimääräinen Cl-pitoisuus nousi kymmenkertaiseksi kaliumpitoisuuden noustessa enimmillään vain kaksinkertaiseksi lannoitusvälillä 0–200 kg K/ha/vuosi (Hyvärinen & Pehkonen 2014). Koska kaliumlannoituksen kloori kompensoi täysin lannoituksen aiheuttamaa kaliumpitoisuuden nousun, on kaliumlannoitus kaliumkloridina siten edullinen rehun kationi-anioni –suhteen ja nautojen poikimahalvausriskin kannalta.

Rehujen korkea K-pitoisuus häiritsee myös magnesiumin imeytymistä. Toisin sanoen rehussa voi olla riittävästi magnesiumia, mutta jos myös sen kaliumpitoisuus on korkea, lehmä voi kärsiä Mg-puutoksesta (Goff 2007). Tässä tarkastelussa ei voitu huomioida sadon kivennäissuhteita, koska aineistoon ei ollut saatavissa riittävästi sadon eri kivennäisten pitoisuuksia. Tämä on otettava huomioon tulosten tulkinnessa ja

käytäntöön soveltamisessa. Sinänsä tiedetään että kaliumlannoitus nostaa K/ (Ca+Mg) ekvivalenttisuhdetta joka lisää laidunhalvausriskiä (Koikkalainen ym. 1990; Hyvärinen & Pehkonen 2014).

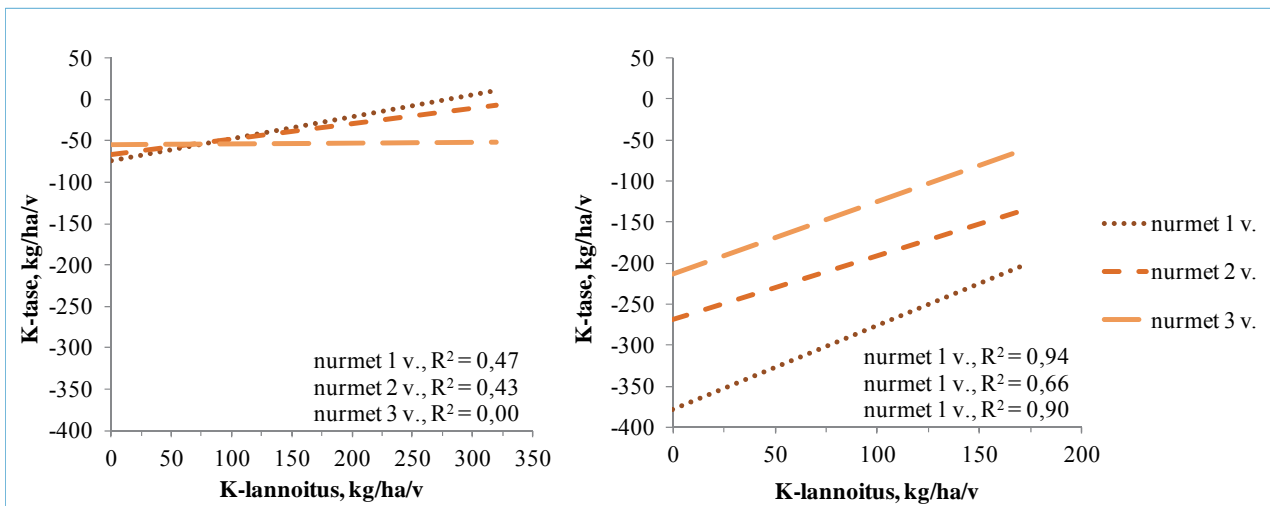
Kaliumin ei yleisesti ajatella vaikuttavan rehun sulavuuteen itsessään. Pakarisen ym. 2008 mukaan väkilannoitekalium alensi nurmen D-arvoa verrattuna biotiittina annettuun lannoitukseen noin 15–18 g/kg ka. Vielä selvempi lasku on havaittu MTT:n uudessa koesarjassa, jossa kolmen koepaikan ja kahden vuoden keskimääräinen D-arvon alentuminen oli 21,5 g/kg ka lannoituksen noustessa 0:sta 200 kiloon kaliumia/ha/vuosi (Hyvärinen & Pehkonen 2014). Ilmiötä selittää rehun tuhkapitoisuuden nousu kaliumpitoisuuden nousun myötä. Huhtasen ym. (2000) mukaan KCl-lannoitus alensi heikon kaliumtilan mailla kasvaneen timotein orgaanisen aineen in vitro -sulavuutta ja D-arvoa, mutta paransi silti sen kuiva-aineen pötsisulavuutta. Kalium siis vaikuttaa nurmirehun kemialliseen tai laskennalliseen D-arvoon, mutta sen lopullinen vaikutus eläimen saamaan energia-arvoon ei ehkä ole näin yksiselitteinen eikä sen vaikutusta ole pyritty arvioimaan lannoitussuosituksien laskennassa.

3.7 Kaliumlannoituksen vaikutus nurmen kaliumtaseeseen

Ravinnetase lasketaan kasville lannoitteesta annetun ravinnemäärän ja sadon mukana poistuneen määrän erotuksena. Kun tase on negatiivinen, ravinteita poistuu pellolta enemmän kuin mitä sinne lannoituksen mukana annetaan. Tässä tutkimuksessa nurmen kaliumtaseen ja lannoituksen yhteys riippui voimakkaasti maan kaliumtilasta (Taulukko 13). Matalan kaliumtilan mailla kaliumtase oli vain lievästi negatiivinen, ja ensimmäisenä sekä toisena nurmivuonna lannoitus hieman pienensi taseen negatiivisuutta (Kuva 15). Kolmantena nurmivuonna lannoituksella ei ollut taseeseen enää vaikutusta. Korkean kaliumtilan mailla nurmen kaliumtase oli voimakkaasti negatiivinen ja sitä enemmän negatiivinen mitä nuorempi nurmi oli kyseessä. Kolmannen vuoden nurmilla tase oli vähemmän negatiivinen, mikä johtui sekä alentuneesta satotasosta että rehun alemmasta K-pitoisuudesta. Kaikissa ikäluokissa nurmen negatiivista kaliumtasetta pystyttiin pienentämään lannoituksella mutta mikään käytetyistä lannoitustasoista ei pystynyt korvaamaan täysin sadon mukana poistunutta kaliumia.

Taulukko 13. Nurmen kaliumtase kaliumlannoituksen funktiona, kun aineisto on ryhmitelty maan reservikaliumpitoisuuden mukaan. Matala = sekä pintamaa että jankko < 500 mg/l (K_{HCl}), Korkea = pintamaa tai jankko > 600 mg/l (K_{HCl}). Nurmen ikä (vuosia), N kokeiden lukumäärä, a, b ja c yhtälöiden parametrit sekä niiden keskivirheet. SEE = ennusteen keskivirhe, R² mallin selitysaste. Yhtälö: M = Mitscherlich, Lin = lineaarinen yhtälö.

Sadon K-tase, kg/ha/v							
Kaliumtila	Ikä	N	a	b	SEE	R ²	Yhtälö
Matala	1	4	-73,8 ± 7,7	0,263 ± 0,063	21,7	0,47	Lin
	2	8	-66,0 ± 4,2	0,183 ± 0,033	16,8	0,43	Lin
	3	6	-55,0 ± 4,1	0,010 ± 0,035	13,8	0,00	Lin
Korkea	1	4	-378 ± 6,6	1,023 ± 0,068	17,4	0,94	Lin
	2	7	-269 ± 12,6	0,776 ± 0,127	33,8	0,66	Lin
	3	4	-213 ± 8,2	0,883 ± 0,080	16,8	0,90	Lin



Kuva 15. Kaliumlannoituksen vaikutus eri-ikäisten nurmien kaliumtaseeseen matalan ja korkean kaliumtilan mailla. Matala = sekä pintamaa että jankko < 500 mg/l (K_{HCl}), Korkea = pintamaa tai jankko > 600 mg/l (K_{HCl}).

On tunnettua että nurmisadon mukana poistuu huomattavia määriä kaliumia, tyypillisesti 150–250 kg/ha/v, koska niistä korjataan vegetatiiviset kasviosat 2–3 kertaa kasvukaudessa (Saarela ym. 1998, Pakarinen ym. 2008). Poistuma on luonnollisesti sitä suurempi ja vastaavasti tase negatiivisempi silloin, kun maan kaliumvarat ovat suuret, koska nurmikasvit ottavat maasta kaliumia yli tarpeen (Hopper & Clement 1967). Koska kaliumpoistuma sadon mukana on suuri, huuhtoutuminen jää yleensä vähäiseksi. Kayserin ja Isselsteinin (2005) yhteenvedon mukaan huuhtoumat niitonurmilla olivat välillä 2–31 kg/ha/v paitsi jos lietelantaa käytettiin myöhään syksyllä, mikä lisää huuhtoumaa huomattavasti. Suomessa laitumelta mitattu huuhtouma vaihteli laidunvuosina välillä 7–18 kg/ha/v, mutta nurmen uusimisvuonna huuhtouma oli huomattavasti suurempi, 35–42 kg/ha/v (Järvenranta ym. 2014). Lohkotasolla kaliumin jatkuva negatiivinen tase voi johtaa kaliumin puutteeseen maassa ja sitä kautta sadon alentumiseen ja palkokasvien osuuden alentumiseen (Whitehead 2000, Kayser ja Isselstein 2005). Sen sijaan tyypillisen eurooppalaisen lypsykarjatilan porttitase on yleensä positiivinen (luokkaa 15–140 kg/ha/v; ks tarkemmin Kayser & Isselstein 2005).

Lannoituksen yhtenä peruseriaatteena on ollut, että lannoituksessa korvataan sadon mukana poistuneet ravinteet, mikä teoriassa estää maaperän köyhtymisen ja ns. ryöstöviljelyn. Lannoitustarve ei kuitenkaan ole välttämätön, niin kauan kuin maasta luontaisesti vapautuu kyseistä kasvinravinnetta riittävä määrä kasvien käyttöön (Jaakkola 1992).

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan poistuneen kaliumin määrä on niin suuri, että 0-tase saavutetaan vasta lannoitusmäärillä 240–370 kg K/ha/v (poislukien 3v nurmet matalan kaliumtilan mailla). Etenkään korkean kaliumtilan mailla ei korvaamiseen ole taloudellisia mahdollisuuksia, koska lannoituksen nosto ei lisäisi satoa lainkaan, mutta sitä vastoin nostaisi entisestään nurmen muutenkin haitallisen korkeata kaliumpitoisuutta. Viime vuosina kaliumin hinta lannoitteessa on ollut luokkaa 2 €/kg, joten taseen säilyttäminen lähellä 0-tasoa olisi hyvin kallista. Niinpä hyvän kaliumtilan mailla voidaan säästää kaliumlannoituksessa, eikä negatiivinen kaliumtase ole ongelma. Tässä kokeessa ei pystytty tutkimaan maan reservikaliumin tai yleisemmin maan kaliumvarojen riittävyttä koesarjojen lyhyiden ja osin myös maa-analyysien puutteellisuuden vuoksi. Happokäsittelyn biotiitin käyttöarvoa selvittävässä kokeessa (Pakarinen ym. 2008) korkean kaliumtilan maalla ilman kaliumlannoitusta viljellyn koejäsenen reservikaliumin pitoisuus maassa laski neljän vuoden aikana tasolta 2685 ± 122 mg/l tasolle 2384 ± 184 mg/l ($P = 0,007$). Matalan kaliumtilan maalla muutosta ei havaittu (Alussa 510 ± 114 mg/l, lopussa 517 ± 129 mg/l). Alku- ja lopputilanteessa maan reservikaliumpitoisuuksissa ei ollut eroja eri lannoitusvaihtoehtojen välillä kummallakaan koepaikalla.

Pohjoismaissa on tehty muutamia pitkäaikaisia koesarjoja tai laskettu potentiaalisia kaliumvaroja (Andersson ym. 2007, Andrist-Rangel ym. 2006, Öbord ym. 2010). Öbord:in ym. (2010) kolmikymmenvuotisessa kokeessa (kaksi lannoitustasoa 0 ja 65 kg/ha/v) raiheinän sato laski, kun sadon kaliumpitoisuus laski 1 %:in tietämille. Kasvuston kaliumpitoisuus laski ilman lannoitusta noin 0,5–0,7 %:iin. Sadon mukana poistuvan kaliumin määrä kasvoi lannoitustasoa nostaessa. Tase oli negatiivinen kummassakin käsittelyssä: ilman kaliumlannoitusta -47 kg/ha/v ja kaliumlannoituksen kanssa -56 kg/ha/v. Hyvän kaliumtilanmailla ravinne-reservien on arvioitu riittävän 40–200 vuotta (Andersson ym. 2007, Öborn ym. 2010).

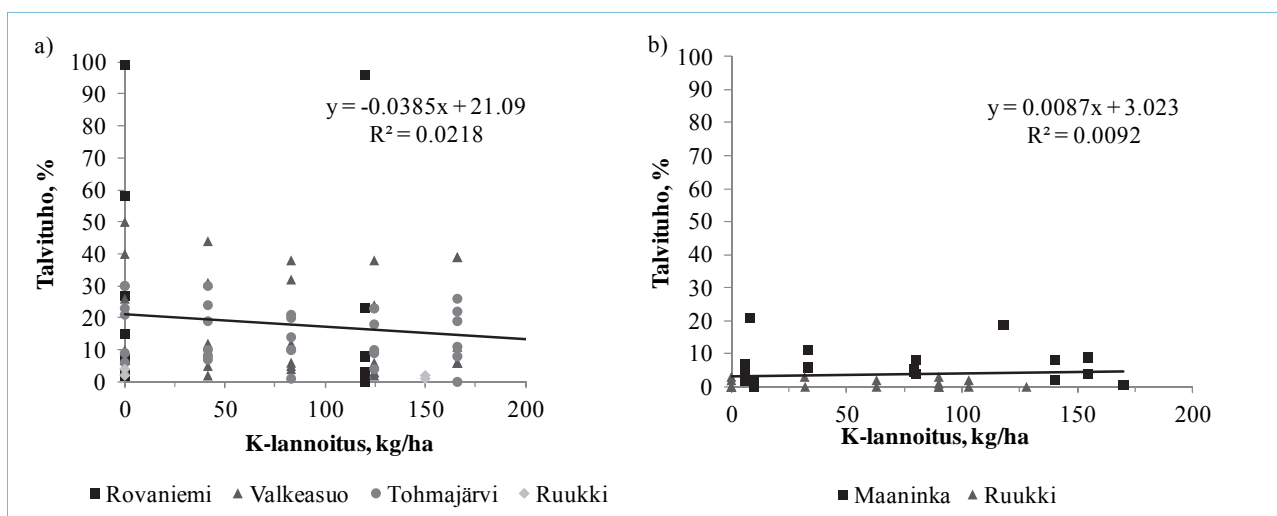
3.8 Kaliumlannoituksen vaikutus nurmen talvehtimiseen

Kalium yhdistetään usein myös kasvien karaistumiseen ja kylmänkestävyyteen sen suolatasapainon säätelyyn sekä hiilihydraattimetaboliaan liittyvien roolien takia. Erityisesti joidenkin lämpimämmässä ilmastossa kasvavien lajien kylmänkestävyyden on havaittu paranevan kaliumlisan jälkeen (Webster & Ebdon 2005, Broschat 2010). Myös suomalaisissa oppaissa on toisinaan painotettu kaliumlannoituksen talvehtimistä tai kylmänkestävyyttä parantavaa vaikutusta, etenkin suhteessa voimakkaan typpilannoituksen aiheuttaman talvituhoriskin lisääntymiseen (Marjanen ym. 1979, Pulli 1986, Seppänen ja Yli-Halla 2008, Virkajärvi ym. 2007).

Tässä aineistossa kaliumlannoitus ei vaikuttanut yleisesti nurmien talvihuoihin edes alhaisen reservikaliumin mailla (Kuva 16). Poikkeuksena yleissäännöstä on Rovaniemellä tehdyt havainnot, joissa kaliumlannoitus näyttää alentaneen joissain tapauksissa talvihuojia. Yleisesti ottaen talvihuojen määrä näyttää olevan enemmän kiinni lumipeiteajan pituudesta ja maalajista kuin kaliumlannoituksesta.

Suomalaisissa tutkimuksissa on itse asiassa vain vähän suoria havaintoja siitä, että kaliumlannoitus olisi yhteydessä parempaan talvehtimiseen. Päinvastoin, Valmarin (1978) ja Tähtisen (1979) mukaan kaliumin vuotuislannoituksen määrällä on ollut hyvin vähän vaikutusta talvehtimiseen edes korkean talvituhoriskin alueella. Koikkalainen ym. (1990) mukaan täysin ilman kaliumlannoitusta jääneiden koejäsenten talvihuot olivat muita suuremmat nimenomaan 3–4 vuoden nurmissa, vaikka yleistä vaikutusta on vaikea aineistosta havaita – positiivinen vaikutus esiintyi n. 2-4 koevuotena 13:ta, ja yleensä alin kaliumlannoitustaso (41,5 kg/ha/v) talvehti yhtä hyvin kuin korkeammatkin kaliumlannoitustasot. Saman ilmiön havaitsivat Virkajärvi ja Huhta (1993) sekä Vuorinen (1989): ilman kaliumia jääneet ruudut talvehtivat huonommin kuin muut. Nissinen ym. 2003 mukaan joko toiselle sadolle tai erikseen viimeisen sadonkorjuun jälkeen annettu pieni kaliumlannoitus vähensi nurminadan talvihuojia merkittävästi yhtenä koevuonna kuudesta.

Tulos on sikäli ymmärrettävä, että nurmien onnistunut talvehtiminen on monisyinen tapahtuma (Nissinen 1996). Pelkästään talvihuojen pääasiallisia syitä on kolme: kylmyysstressi, kasvitaudit, sekä jää- ja routavauriot. Näiden merkitys talvihuojen syntyyn muuttuu muun muassa niin, että pohjoisimmassa Suomessa talvihuosien merkitys korostuu ja abioottisten tekijöiden osuus pienenee (Nissinen 1996). Lannoituksen lisäksi talvehtimisen onnistumiseen vaikuttavat nurmilajikkeen perinnölliset ominaisuudet, ilmasto- ja maaperätekijät – erityisesti syksyn karaistumisot - sekä viljelytekniikka kokonaisuudessaan. Etenkin Pohjois-Suomessa kaliumlannoitusta tärkeämpi tekijä karaistumisen kannalta ovat syksyn kasvuolosuhteet, sillä rehevä kasvu syksyllä ja pitkään jatkuva lämmin sää vaarantavat talvehtimisen kaliumpitoisuudesta huolimatta (Valmari 1978). Siten ei ole yllättävää, että kaliumlannoituksen vaikutus tulee näkyviin vain satunnaisesti, ja silloinkin lähinnä heikon kaliumtilan mailla, jotka ovat jääneet täysin tai lähes täysin ilman kaliumlannoitusta. Alhainen kaliumlannoitus, etenkin yhdessä korkean typpilannoituksen kanssa lisää talvihuojen riskiä alhaisen reservikaliumin mailla ankaran/pitkän talven alueella. Se, miten riski realisoituu, on kiinni muista tekijöistä. Tässä esitetyt tulokset perustuvat lähinnä timotei- ja nurminatavaltaisiin nurmiin. Talvihuojille arkojen kasvilajien suhtautumisesta tietoja on liian vähän saatavilla. Riskin suuruutta tai kaliumlannoituksen merkitystä ei kuitenkaan ole aihetta liioitella.



Kuva 16. Kaliumlannoituksen vaikutus nurmien talvihuoihin a) matalan ja b) korkean kaliumtilan mailla. Matala = sekä pintamaa että jankko < 500 mg/l K_{HCl}, Korkea = pintamaa tai jankko > 600 mg/l K_{HCl}.

3.9 Kaliumlannoitussuosituksien tarkastelu

Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan laskea ohjeelliset lannoitussuositukset käyttämällä taulukon 10 sato-funktioita ja huomioimalla lannoituksen vaikutus rehun kaliumpitoisuuteen taulukon 10 mukaan. Tämän lisäksi lannoituksen taloudellinen optimointi tarvitsee lähtötiedoikseen rehun ja lannoitekaliumin hintatiedot, jotka ovat ajankohtaan sidottuja. Nurmien lannoituksen kannattavuuslaskelmia hankaloittaa se, ettei nurmirehuilla ole markkinahintaa vaan sadon arvo syntyy vasta eläintuotteita myytäessä. Yksi keino tarkastella taloudellisesti kannattavaa lannoitusta on verrata lannoituksella saatujen rehuyksiköiden kustannusta tilan nykyiseen keskimääräiseen rehukustannukseen tai valtakunnalliseen arvoon.

Taloudellisen optimin vallitessa rajahyöty on rajakustannus, joten hinnat voidaan sijoittaa satofunktioiden derivaattojen yhtälöihin [3] ja [4]. Esimerkiksi, jos rehun hinnaksi hyväksytään 0,2 €/kg ka ja kaliumin hinta seoslannoitteessa on 2 €/kg K, saadaan taloudellisen lannoituksen rajaksi taulukon 14 mukaiset lannoitusmäärät.

Taulukko 14. Viitteelliset kaliumlannoituksen suositukset perustuen biologiseen tai tämän hetkisen taloudelliseen optimiin matalan ja korkean kaliumtilan mailla.

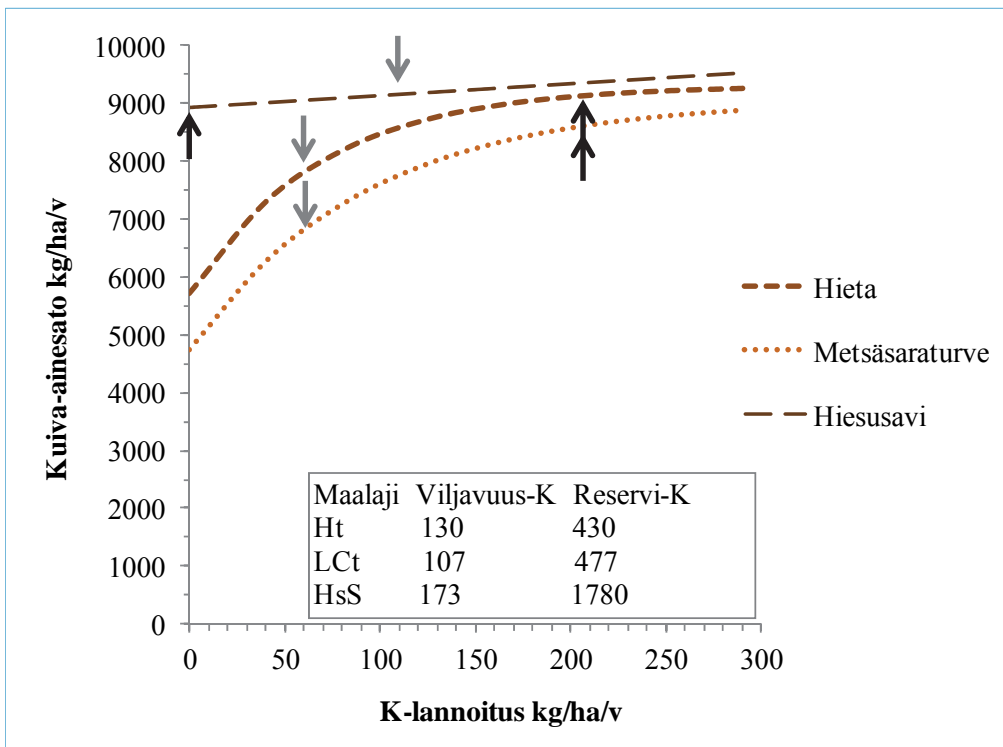
Nurmi- vuosi	Matalan kaliumtilan maat		Korkean kaliumtilan maat	
	Sato 90 % maksimista	Taloudellinen optimi	Sato 90 % maksimista	Taloudellinen optimi
1	130	120	– ²⁾	0
2	260 ¹⁾	226	– ²⁾	0
3	220	200	– ²⁾	0

1) rehun arvioitu kaliumpitoisuus 33 g/kg ka

2) Maksimisatoa ei voi estimoida

Uusien suositusten vaikutus rehun kaliumpitoisuuteen voidaan arvioida taulukon 10 yhtälöiden avulla. Tulosten perusteella 220 kg K/ha/v on raja, jonka jälkeen rehun K-pitoisuudella on riski nousta yli 30 g/kg ka, mitä pidetään suosituksen ylärajana. Karkearehun korkea kaliumpitoisuus ei kuitenkaan ole aina negatiivinen asia vaan eläimen terveydelle ratkaisevaa on koko dieetin kivennäistasapaino (katso tarkemmin luku 3.6).

Muutosta on havainnollistettu sijoittamalla lannoitusoptimit kuvaan yhdessä nykyisten suositusten kanssa (Kuva 17). Kuvasta näkyy, että valituissa kolmessa kokeessa uudet suositukset sopivat loogisemmin sato-funktioihin kuin nykyiset viljavuuskaliumiin perustuvat suositukset. Tämä oli odotettua, koska tutkimuksen keskeisenä lähtökohtana olivat havainnot viljavuuskaliumin heikosta soveltuvuudesta nurmien kaliumlannoitussuosituksien pohjaksi. Heikko soveltuvuus perustuu siihen, että nurmikasvit käyttävät myös reservikaliumia (ks luku 3.3; Joy ym 1973, Saarela 2001, Saarela ja Mäntylähti 2002). Viljavuuskaliumin määrä maassa voi myös laskea nopeasti nurmen runsaan kaliumin oton vuoksi, jonka vuoksi maa-analyysin tulos on epätarkka (Koikkalainen ym. 1990, Saarela ym. 1998, Saarela 2001).



Kuva 17. Kaliumlannoituksen vaikutus nurmen kokonaissatoon kolmessa kokeessa (Koikkalainen ym 1990, Saarela ym. 1998). Harmaat nuolet esittävät nykyisten kaliumlannoitussuosituksen mukaisia suosituksia, mustat nuolet uusia suosituksia

Uudet suositukset poikkeavat selkeästi aikaisemmista siinä, että maaperän ominaisuuksien perustella kokeet voidaan jakaa vain kahteen luokkaan. Tätä havaintoa puoltaa myös Saarelan (2001) 56 maaeran astiakoe, jossa tutkittiin viljavuuskaliumin ja kylmähappouuton sekä näiden erotuksen kykyä selittää viljojen ja nurmien kaliuminottoa. Tulosten mukaan kriittinen alue, jossa kaliumin saanti vaihtui niukasta riittävään, tapahtui hyvin kapealla pitoisuusalueella – vyöhyke oli vain 1/10 osa koko aineiston vaihteluvälistä. Tämän tutkimuksen aineistossa kriittisen vyöhykkeen 500–1000 mg/l (K_{HCl}) havainnoissa oli juuri sellaisia kokeita, jossa jankon K_{HCl} reservit olivat korkeat (Liite 1), minkä vuoksi jako matalan ja korkean kaliumtilan maihin oli jyrkkä. Lisää aineistoja kaivattaisiin mailta, joiden reservikaliumpitoisuus on välillä 400–700 mg/l (K_{HCl}) sekä pinta- että pohjamaassa.

Uusien suositusten perusteena käytettiin sekä kyntökerroksen että jankon kaliumpitoisuuden yhdistettyä vaikutusta säilörehunurmen satotasoon. Maatiloilla jankon kaliumpitoisuus ei yleensä ole tiedossa, mikä vaikeuttaa lannoitussuosituksen käyttöä, jos kyntökerroksen kaliumpitoisuus osuu lannoitussuositusluokkien välimaastoon. Näissä tapauksissa on syytä harkita kannattaisiko kyseinen lohko lannoittaa ns. varmuuden vuoksi esimerkiksi puolella matalan luokan suosituksesta. Jos lohkolta on käytettävissä aiempia rehu-analyysin kivennäispitoisuuksia, lannoitustarvetta voi arvioida myös niiden perusteella. Mikäli pintamaan kaliumtila on huono ja pohjamaa on selvästi erilaista kuin pintamaa (erityisesti ohutturpeiset turve- ja multamaat) on järkevää ottaa näyte myös jankosta.

Koska juuriston hyvät kasvuedellytykset ovat ravinteiden oton kannalta tärkeä asia, on hyvä huomioida, että rakenteeltaan heikkokuntoisilla mailla (esimerkiksi jotkut hiesut) kaliumlannoituksen satovaste voi olla parempi mitä tämän tutkimukset satofunktiot antavat olettaa, vaikka mailla sinänsä olisikin runsaasti reservikaliumia. Tällaisilta mailta tutkimusaineistoa ei juurikaan ole ja siten niiden huomioiminen lannoitussuosituksissa on vaikeaa. Esimerkiksi poudanaroilla, helposti tiivistyvillä ja kuorettuvilla hiesumailta juuriston kasvuolosuhteet voivat rajoittaa kaliuminottoa. Tällaisilla lohkoilla on erityisen tärkeää huolehtia maan rakenteesta ja toisaalta tarpeen mukaan lisätä kaliumlannoitusta suosituksia korkeammaksi, jos kasvusto tuntuu kärsivän kaliumin puutteesta.

Uudet suositukset ovat heikon kaliumtilan mailla selvästi korkeampia kuin nykyiset viljavuuskaliumiin perustuvat suositukset, kun taas korkean kaliumtilan mailla suositukset alenevat selvästi. Tällä hetkellä voimassa olevat suositukset on koottu taulukkoon 15.

Taulukko 15. Nykyiset nurmien kaliumlannoitussuositukset eri viljavuusluokissa (Yara 2012).

		Viljavuusluokka					
		huono	huononlainen	välttävä	tydyttävä	hyvä	korkea
Säilörehunurmet, 3 satoa	kevätleivitys	50	40	30	10		
	2. sadolle	60	60	50	40		
	3. sadolle	60	60	50	40		
	yht.	170	160	130	90	50	
Säilörehunurmet, 2 satoa	kevätleivitys	70	50	40	10		
	2. sadolle	90	80	70	50	30	
	yht.	160	130	110	60	30	
laidunnurmi	3 levitys-kertaa	140	120	100	70	40	
	4 levitys-kertaa	150	130	100	80	40	10

*Yaran lannoitusopas suosittelee lisäämään 20 kg K/ha kolmannen vuoden ja sitä vanhemmille nurmille

Suomalaisista kaliumlannoitustutkimuksista koottujen lannoitusuositusten perusteella vähän kaliumia sisältävällä orgaanisilla mailla K-lannoitustarve on noin 160–175 kg/ha/v (Koikkalainen ym. 1990, Saarela ym. 1998) ja hietamaalla noin 150 kg/ha/v (Peltomaa ym. 1979 Saarelan ym. 1998 mukaan). Nyt esitetty suositus ylittää aiemmat toisen vuoden nurmien osalta. Kolmannen vuoden nurmien satopotentiaali oli tässä tutkimuksessa selvästi alhaisempi kuin toisen vuoden nurmien. Tämän vuoksi kaliumlannoituksen kannattava määrä oli kolmantena vuonna toista nurmivuotta alhaisempi, mikä on vastoin nykyistä käsitystä kolmannen vuoden nurmien korkeasta kaliumlannoitustarpeesta. Tässä aineistossa kolmannen vuoden nurmien runsas kaliumlannoitus ei nostanut satoa toisen vuoden nurmien tasolle. Kolmannen vuoden lannoitusoptimi jäi näin ollen hieman toisen vuoden optimia pienemmäksi (kuva 13).

Vertailun vuoksi Ruotsin ja Norjan vastaavat kaliumlannoitussuositukset löytyvät liitteistä 4–8. Ruotsalaisessa nurmioppaassa K-lannoitussuositukset perustuvat maan helppoliukoisen kaliumin pitoisuuteen ja kaliumluokkiin (taulukko 9). Luokittelu on viisiportainen ja satotasoksi on määritetty 6000 kg/ha ja sadon mukana poistuvan kaliumin määräksi 150 kg/ha. Norjassa lannoitevalmistaja Yaran suosituksissa otetaan huomioon maan kaliumreservit (Liite 7) (Yara 2013b). Kaliumlannoitus perustuu maan reservikaliumiin. Norjassa on määritetty, että n. 100 kg:n satolisää kohti tulisi kaliumlannoitusta lisätä 15 kg/ha.

Norjassa on tutkittu paljon kaliumlannoitusta ja maan kaliumreservien merkitystä nurmien kaliumsaantiin. Voldenin (1996) tutkimuksessa kaliumlannoitus nosti satoa sitä enemmän (sadonlisän vaihteluväli 7–120 %) mitä vähemmän maassa oli reservikaliumia (K_{HNO_3} 10–142 mg/kg). Kun maan reservikaliumin pitoisuus oli > 400 mg/kg, kaliumlannoituksella ei saatu sadonlisää (savimaa). Erittäin vähän reservikaliumia sisältävillä mailla lannoitustarve oli selvä: kun reservikalium (K_{HNO_3}) alitti 20 mg/kg, lannoitustarve oli yli 165 kg/ha (orgaaninen maa). Lannoitusvaste oli pienin ensimmäisen vuoden nurmissa ja se oli sitä suurempi mitä vanhempi nurmi oli kyseessä (Lunnan & Haugen 1993, Volden 1996). Lunnan & Haugen (1993) mukaan koiranheinä hyötyi timotei ja rehkattaraa enemmän sekä kalium- että typpilannoituksesta. Edelleen, Øgaard ym (2002) osoitti ettei helppoliukoinen kalium (K_{AL}) kerro kaliumlannoituksen satovasteesta. Kyseisessä tutkimuksessa kaliumlannoitus lisäsi satoa vain sellaisilla karkeilla kivennäismailla, joiden reservikalium on matala (K_{HNO_3} 80–240 mg/kg). Tältä osin norjalaiset tulokset tukevat nyt havaittuja tuloksia ja niihin perustuvia suosituksia, vaikka eroa on maaperän lisäksi myös kasvuoloissa ja reservikaliumin määrittämismenetelmissä kuten myös suositellun lannoituksen määrässä.

Myös maan ravinnesuhteet voivat vaikuttaa kaliumlannoituksen tehoon. Useimmin mainitaan maan K/Mg-suhde, joka kertoo mm. maan ylisuurista kaliummääristä suhteessa magnesiumiin (Saarela ym 1998), mikä voi rajoittaa kasvin magnesiumin ottoa ja siten kaliumlannoituksen antamaa satovastetta. Tähtisen (1997) aineistossa maan viljavuuskaliumin pitoisuus (45–272 mg/l) selitti kaliumilla saatua satovastetta yhtä hyvin kuin K/Mg suhde (0,1–4, 9). Ruotsissa käytetään maan viljavuusanalyysin K/Mg –suhdetta apuna sopivan kaliumlannoituksen suunnittelussa. Myös kaliumin osuus vaihtuvista kationeista voi olla suuri, mutta sen merkitys riippuu myös maan savespitoisuudesta (Saarela ym. 1998).

Ruotsissa ja Norjassa kaliumlannoitusta suositellaan annettavaksi heikon kaliumtilan mailla nykyisiä suomalaisia suosituksia enemmän. Ruotsissa heikoimmassa kaliumluokassa oleville maille maksimilannoitusta on nostettu tasolta 180 kg/ha/v (Höglind 1990) tasolle 260 kg/ha/v (Yara 2013a). Korotus on melko yhdenmukainen tämän raportin tulosten kanssa. Norjassa korkein suositus on 145 kg/ha/v, johon tehdään tarvittaessa korjaus +60 kg K/ha reservikaliumin mukaan. Mikäli reservikalium on korkea, lannoitusta voidaan vastaavasti vähentää (Liite 7).

Käytännössä kaliumlannoituksen säätö tapahtuu eri tavalla kuin kenttäkokeissa. Suurin osa myytävistä lannoitteista on seoslannoitteita, joten lannoituksen muuttaminen tapahtuu yleensä vaihtamalla lannoittelajia. Esimerkiksi, jos tyyppiä käytetään 100 kg/ha/niitto, tulee kaliumia hehtaaria kohti seuraavasti:

- NY1 (20-3-5) → 25 kg/ha K
- NK1 (25-0-7) → 28 kg/ha K
- NK2 (22-0-12) → 54 kg/ha K

Kahden niiton systeemissä kaliumia pystytään antamaan väkilannoitteissa enintään 50–80 kg/ha ja vastaavasti kolmen niiton systeemissä enintään 133 kg/ha vuodessa. Tämä on selvästi vähemmän kuin tämän tutkimuksen perustella heikon kaliumtilan maille suositeltava määrä.

Nurmille käytetään lähes poikkeuksetta karjanlantaa. Naudan lietelannassa on kaliumia noin 2,8 kg/tn lietettä (ks luku 1.4). Tyypillisen levitysmäärän yhteydessä (30 tn/ha) kaliumia tulee noin 84 kg/ha. Jos nurmen koko lannoitus annetaan lietelantana, nitraattidirektiivin (VNA 931/2000) sallimalla maksimiannoksella (n. 56 tn/ha) kaliumia tulee noin 155–160 kg/ha/v. Lietelannan kalium on kasveille täysin käyttökelpoista (Kempainen 1989). Joissakin eurooppalaisissa, voimakkaasti kaliumia pidättävillä mailla tehdyissä tutkimuksissa karjanlanta on ollut jopa väkilannoitekaliumia tehokkaampi kaliumin lähde, mikä johtuu karjanlannan kationinvaihtokapasiteettia (KVK) nostavasta vaikutuksesta (Blake ym. 1999).

Biotiitin käyttö lisää maan hidasliukoisia kaliumvaroja, joten sen vaikutus näkyy lähinnä nurmen kasvussa ja kaliumpitoisuudessa mutta maan viljavuuskaliumpitoisuus ei juuri nouse (Linna & Jansson 1994; Pakarinen ym. 2007). Biotiitin sisältämän kaliumin saatavuuden on arvioitu olevan noin 2/3 väkilannoitekaliumin saatavuudesta (Saarela 2001; Pakarinen ym. 2008). Biotiitillä on myös lievä pH:ta nostava vaikutus ja lisäksi se sisältää runsaasti magnesiumia (n. 5–10 %) (Linna & Jansson 1994, Pakarinen ym. 2008). Myös magnesium on hidasliukoisessa muodossa, joten biotiitti nostaa maan viljavuusanalyysin magnesiumlukua vain hieman (Linna & Jansson 1994, Pakarinen ym. 2008). Biotiitti on useissa tutkimuksissa osoittautunut hyväksi nurmen kaliumlannoitteeksi, mutta käyttöä rajoittavia tekijöitä ovat tuotteen pitkät kuljetusmatkat ja käytön taloudellisuus.

4 Käytännön sovellutukset

4.1 Miksi kalium on tärkeä ravinne nurmenviljelyssä?

Kalium vaikuttaa voimakkaasti nurmen kasvuun, eläinten terveyteen ja tuotannon taloudellisuuteen. Kalium on kallis ravinne ja senkin vuoksi kaliumlannoituksen mitoittaminen tarpeen mukaiseksi on tärkeää.

Kaliumlannoitusta kannattaa muuttaa jos:

- nurmi ei kasva odotetusti suhteessa annettuun typpilannoitukseen ja muihin kasvuedellytyksiin (kaliumin puute)
- karjassa esiintyy laidun- tai poikimahalvauksia (kaliumin ylimäärä)
- rehun kaliumpitoisuus on aina korkea (kaliumin ylimäärä)

4.2 Miten määritän nurmen kaliumtarpeen?

Lähtökohtana on viljelylohkon kyntökerroksen maa-analyysi, mutta viljavuusanalyysin kaliumluku tai -luokka ei ole paras mahdollinen analyysi, vaan maan reservikalium osoittaa nurmen kaliumtarpeen selvästi paremmin. Runsaasti reservikaliumia sisältäviin maihin kuuluvat savi- ja savespitoiset maat, joilla yleensä on myös korkea viljavuuskaliumpitoisuus. Reservikalium on yleensä korkea myös kiilleperäisillä hienoilla hiedoilla. Myös eloperäistä ainesta sisältävät kivennäismaat voivat kuulua tähän ryhmään, esimerkiksi osa Etelä-Suomen multamaista. Sitä vastoin reservikaliumia on yleensä vähän paksaturpeisilla mailla, karuilla hieta-, hiekka- ja moreenimailla eikä näillä mailla viljavuuskaliumkaan ole luontaisesti korkea.

Hyvän kaliumtilan maita esiintyy eniten rannikolla sekä Satakunnasta Pirkanmaalle ulottuvalla vyöhykkeellä. Lisäksi runsaasti reservikaliumia sisältäviä maita löytyy esimerkiksi Pohjois-Savosta ja Pohjanmaalta sekä paikoin Sotkamosta ja Pohjois-Karjalasta. Muualla Pohjois- ja Itä Suomessa ne eivät ole yleisiä.

Lopullinen mittari kasvien kaliumin saannista on rehun kaliumpitoisuus. Kasvinäytteen heikkous lannoitesuunnittelussa on se, että myös kasvin kehitysvaihe ja kasvukauden sää vaikuttavat kasvin kaliumpitoisuuteen. Lisäksi rehunäyte sisältää useiden kasvulohkojen rehua. Rehun kaliumpitoisuus kannattaa analysoida erikseen sellaisilta lohkoilta, joiden kaliumvaroista ei ole selvää tietoa. Koska kalium on kallis ravinne, rehun kivennäisanalyysi on siihen nähden edullinen.

4.3 Miten määritän reservikaliumin maasta?

Reservikaliumin määrä riippuu ennen kaikkea maan lähtömineraaleista. Samalla kun otat tavalliset viljavuusnäytteet, yhdistä yksi näyte sellaisista kasvulohkoista, jotka ovat mielestäsi samantyyppisiä maita. Ota jokaisesta rasiasta hieman maata, kokoa niistä oma purkillinen ja nimeä näyte erikseen. Näyte voi sisältää hyvinkin suuria yhtenäisiä peltoaukeita, esimerkiksi 5–50 ha/näyte, kunhan näyte edustaa samankaltaista peltomaata. Tilaa näytteestä reservikalium, joka löytyy yleensä hinnastosta yksittäisenä määrityksenä. Reservikaliummääritys sisältyy myös pakettiin ”ravinnereservit”, joka voi myös olla tilattavissa pakettina eikä ole kovin paljon pelkkää reservikaliumia kalliimpi. Se sisältää kaliumin lisäksi fosforin, kalsiumin ja magnesiumin reservit. Reservikaliumanalyysi on edullinen, etenkin kun ottaa huomioon, että sen tulos on voimassa 10–20 vuotta.

Mikäli pintamaan kaliumtila on huono ja pohjamaa on selvästi erilaista kuin pintamaa (erityisesti ohutterpeiset turve- ja multamaat) on järkevää ottaa erillinen näyte myös jankosta. Yleensä riittää kun näyte otetaan 20–40 välisestä profiilista, mutta se voi ulottua syvemmällekin (esim. 20–60 cm).

4.4 Miten säädän nurmen kaliumlannoitusta?

	Matala viljavuuskalium	Korkea viljavuuskalium
Matala reservikalium	<p>Todennäköisesti rehun K-pitoisuus on alhainen (< 17 g /kg ka). Jos myös sato on huono, lisää K-lannoitusta etenkin 2 v nurmilla (ks luku 3.6).</p> <p>Jos rehun K-pitoisuus on korkea, analysoi jankon ravinnetila (20–40 cm vähintään, mutta voi analysoida 60 cm asti). Jos se on korkea, älä lisää K-lannoitusta.</p>	<p>Rehun K-pitoisuus ratkaisee. Jos rehun K-pitoisuus < 17 g/kg ka, lisää kaliumlannoitusta (ks luku 3.6).</p> <p>Jos rehun K-pitoisuus on > 30 g/kg ka, vähennä lannoitusta.</p>
Korkea reservikalium	<p>Rehun K-pitoisuus ratkaisee. Jos rehun K-pitoisuus on < 17 g/kg ka, lisää kaliumlannoitusta (ks luku 3.6).</p> <p>Jos rehun K-pitoisuus > 30 g/kg ka, vähennä lannoitusta. Viljely onnistuu todennäköisesti myös ilman kaliumlannoitusta.</p>	<p>Vähennä kaliumlannoitusta maltillisesti ja seuraa sadon K-pitoisuutta ja satotasoa. Katso luvusta 3.6 kuinka voit vaikuttaa eläinten terveyteen mm. kasvilajivalinnoilla ja kalkituksella. Viljely onnistuu todennäköisesti myös ilman kaliumlannoitusta.</p>

4.5 Miten kauan maan kaliumvarat riittävät?

Tämän raportin kokeet painottuivat lyhyisiin koesarjoihin (vain yksi nurmijakso), joten aineistosta ei voi laskea kuinka kauan maan kaliumvarat riittäisivät varsinkaan tilanteessa, jossa merkittävä osa kaliumlannoituksesta annettaisiin karjanlannassa. Ulkomaisten lähteiden mukaan kaliumtilaltaan hyvien maiden kaliumvarat voivat riittää 40–200 vuotta. Arvio riippuu ennen kaikkea maan mineralogiasta (mm. kiilteet vs. maasälvät), maan lajitekoostumuksesta (hienojakoiset savimaat vs. karkeat kivennäismaat), orgaanisen aineksen määrästä, juuriston syvyydestä sekä käytetystä kasvilajista.

4.6 Miten alentaa eläinten kannalta haitallisia kivennäissuhteita korkean kaliumtilan mailla?

Jos rehun korkea kaliumpitoisuus on ollut ongelma (tilalla esiintyy laidun- ja poikimahalvauksia) ja maassa on runsaasti reservikaliumia, rehun kaliumpitoisuuden vähentämiseen tai sen vaikutuksen lievittämiseen on joitain mahdollisuuksia. Näistä ensimmäinen on kaliumlannoituksen vähentäminen (luvut 3.6). Toiseksi, puna-apila tai timotei soveltuvat korkean kaliumtilan maille paremmin kuin italianraiheinä tai koiranheinä. Kolmanneksi, korkean kaliumtilan maiden kalkitus parantaa rehun kivennäissuhteita ainakin jonkin verran. Maan magnesiumtila on syytä tarkistaa ja maan Ca/Mg -suhteen ollessa yli 13 kannattaa valita Mg-pitoinen kalkitusaine. Lopuksi, koko dieetin kivennäistasapaino ratkaisee eli väki- ja lisärehujen määrää ja koostumusta muuttamalla voidaan korjata karkearehun epäedullista kivennäisainekoostumusta paremmaksi. Kivennäissuhteita voi parantaa myös sopivilla kivennäisillä erityisesti tunnutuskaudella.

Laitumilla nautan rehun mukana syömästä kaliumista yli 90 % palautuu virtsassa maahan. Jos lohkojen kaliumvarat ovat hyvät (korkea viljavuuskalium tai reservikalium), keväällä on suositeltavaa käyttää vain typpilannoitusta, sillä yleensä myös fosforia on laidunmailla riittävästi. Keväisin maan kalsium ja magnesium ovat heikommin kasvien saatavilla kuin keskikesällä. Jos maan kaliumpitoisuus on samaan aikaan korkea, johtaa se helposti laidunheinän vaarallisen korkeaan kaliumpitoisuuteen suhteessa kalsium- ja magnesiumpitoisuuksiin (rehun K/(Ca+Mg) ekvivalenttisuhte), mikä lisää laidunhalvausriskiä. Rehun magnesium ja kalsiumpitoisuutta voidaan jonkin verran nostaa magnesiumpitoisilla kalkitusaineilla, joten laitumien kalkitus on varsin suositeltavaa.

4.7 Miten kannattavaa kaliumlannoitus on?

Kalium on nurmen sadonmuodostuksessa tärkein ravinne heti typen jälkeen. Kuten luvussa 3.5 osoitetaan kaliumlannoitus lisää nurmen satoa huomattavasti, jos maassa ei ole riittävästi kaliumia saatavilla. Viime vuosina säilörehun tuotantokustannus on vaihdellut välillä 19,9–23,7 snt/ry (Peltonen 2010). Hintasuhteella 23 snt/ry ja 2,03 €/kg K kannattavan kaliumlannoituksen yläraja, heikon kaliumtilan mailla, sijoittuisi ensimmäisenä satovuonna 100–120 kg/ha/v tasolle ja siitä eteenpäin noin 220–240 kg/ha/v tasolle silloin, kun pyritään korkeaan satotasoon. Rehun kaliumpitoisuus jäisi edelleen ruokintaa ajatellen hyväksyttävälle tasolle. Tämä on selvästi aikaisempia suosituksia enemmän eikä näin korkeita määriä ole mahdollista antaa tämän hetken seoslannoitteilla. Kuten ennenkin kaliumlannoitus tulee jakaa jokaiselle sadolle erikseen, hieman syyspainotteisesti.

Korkean kaliumtilan mailla kaliumlannoitusta ei kannata käyttää jos nurmen juuriston kasvumahdollisuudet ovat hyvät.

4.8 Miten karjanlanta vaikuttaa nurmen kaliumtarpeeseen?

Lietelannan kalium on täysin väkilannoitekaliumin veroista. Lietteenkään kalium ei kuitenkaan pidäty maahan, jos maan reservikaliumtila on heikko ja pidättymispaikkoja kaliumille on vähän. Jos taas reservikaliumpitoisuus on korkea, lietteen kalium voi pidätyä. Tavallisesti tämän tyyppisillä mailla nurmet ottavat enemmän kaliumia kuin lannoitteissa annetaan, jolloin kumuloitumista maahan ei pääse tapahtumaan ellei satotaso ole kovin alhainen. Hyvin karkeilla mailla lietteen käytön tai laiduntamisen seurauksena orgaanisen aineksen määrän lisääntyminen voi mahdollistaa myös maan viljavuuskaliumpitoisuuden nousun.

5 Yhteenveto

Nurmien kaliumlannoitussuosituksia tulisi uudistaa. Maan lähtöaineksen mineraalikoostumus on avainasemassa maan kaliumvarojen riittävyyden kannalta. Nurmialueella tulisi suosia maan reservikaliumanalyysiä (K_{HCl}) etenkin, jos rehun kaliumpitoisuus on korkea, mutta maan viljavuuskalium osoittaa lannoitustarvetta. Kyntökerroksen lisäksi myös jankon kaliumvarat osoittautuivat tärkeiksi. Käytössä ollut tutkimusaineisto voitiin jakaa kahteen toisistaan poikkeavaan ryhmään maan reservikaliumpitoisuuden perustella ja jako oli varsin jyrkkäräinen.

Alhaisen reservikaliumin mailla ($< 500 \text{ mg } K_{HCl}/l$ maata sekä pintamaassa että jankossa) kaliumlannoituksella on merkittävä vaikutus nurmen sadonmuodostukseen, mikä korostuu jatkuvassa nurmenviljelyssä entisestään. Karjanlannan kalium ei riitä kasvien tarpeeseen, jos satotaso on korkea. Eloperäisillä mailla kaliumlannoitus on erityisen tärkeää, ellei jankko ole viljavaa kivennäismaata. Alhaisen reservikaliumin mailla kaliumlannoitus nosti selvästi myös rehun kaliumpitoisuutta, mutta kaliumpitoisuus ei juurikaan ylittänyt ohjeellista 30 g/kg ka pitoisuutta suuriakaan kaliummääriä käytettäessä. Kaliumtase oli yleensä lievästi negatiivinen eikä siihen voinut lannoituksella juurikaan vaikuttaa.

Jos reservikaliumpitoisuus on korkea ($> 600 \text{ mg } K_{HCl}/l$) joko pintamaassa, jankossa tai molemmissa, alhainen viljavuuskaliumin pitoisuus maassa ei ole ongelma ja kaliumlannoituksen hyöty näyttää olevan satunnainen. Kuivuus ja tiivis maa sekä vaikea talvi suurentavat yleensä nurmen satovastetta. Lisäksi kaliumlannoituksesta riippumatta rehun kaliumpitoisuudella on selvä taipumus olla korkea, mikä vaikuttaa märehitjän kannalta tärkeisiin kivennäissuhteisiin yleensä epäedullisesti (mm. laidun- ja poikimahalvaus). Korkean reservikaliumin mailla nurmenviljelykokeissa on lähes mahdotonta välttää voimakkaan negatiivisia kaliumtaseita, erityisesti silloin, kun halutaan välttää märehitjän kannalta liian korkeita kaliumpitoisuuksia. Ulkomaisiin tutkimuksiin perustuvien laskelmien perusteella voidaan olettaa että näillä mailla maan luontaiset kaliumvarat riittävät 40–200 vuotta.

Yleisesti kaliumin vaikutus nurmien talvehtimiseen oli vähäinen lukuun ottamatta alhaisen reservikaliumin maita, alueilla joilla vallitsee pitkä talvi. Näillä alueilla täysin ilman kaliumlannoitusta viljeltyjen nurmien talvituhot olivat suuremmat kuin kaliumlannoitusta saaneilla koejäsenillä, mutta näissäkin tapauksissa pienikin kaliumlannoitus riitti parantamaan talvehtimistä eikä runsailla lannoitusmäärillä saavutettu merkittävästi parempaa talvehtimistä.

Rehunäytteen K-pitoisuus ja K/N -suhde kertovat kasvin todellisen kaliumsaannin. Sadonmuodostuksen kannalta riittävä kaliumpitoisuus timotei-nurminatanurmessa on $16\text{--}20 \text{ g/kg}$ ka ja K/N -suhde 0,85. Kasvilajeilla on kuitenkin eroa kaliumpitoisuudessa, ja yleensä korkea kaliumpitoisuus liittyy korkeaan lehtien osuuteen kasvustossa.

Koska lannoitusvaste näyttää olevan sitä suurempi mitä useampi nurmijakso loholla on viljelty, olisi syytä tutkia maan kaliumvarojen riittävyyttä ja kaliumlannoitusta nimenomaan pitkäaikaisessa tyypillisen nurmi-monokulttuurin viljelykierrrossa. Karjanlanta tulisi ehdottomasti sisällyttää koejärjestelyihin. Suurin mielenkiinto kohdistuu maihin, joiden reservikaliumpitoisuus on välillä $400\text{--}700 \text{ mg } K_{HCl}/l$.

Tulosten pohjalta voidaan luoda uudet lannoitussuositukset, jotka perustuvat maan reservikaliummääritykseen. Kannattavan kaliumlannoituksen yläraja heikon kaliumtilan mailla sijoittuisi ensimmäisenä satovuonna $100\text{--}120 \text{ kg K/ha/v}$ tasolle ja siitä eteenpäin noin $220\text{--}240 \text{ kg K/ha/v}$ tasolle silloin kun pyritään korkeaan satotasoon. Rehun kaliumpitoisuus jäisi edelleen ruokintaa ajatellen hyväksyttävälle tasolle. Tämä on selvästi aikaisempia suosituksia enemmän eikä näin korkeita määriä ole mahdollista antaa tämän hetken seoslannoitteilla. Korkean kaliumtilan mailla kaliumlannoitusta ei kannata käyttää, jos nurmen juuriston kasvumahdollisuudet ovat hyvät. Käytännössä on syytä seurata myös rehun kaliumpitoisuutta, joka kertoo viime kädessä lannoituksen onnistumisen.

- Andersson, S. Simonsson, M., Mattson, L., Edwards, A.C. & Öborn, I. 2007. Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil Use and Management* 23:10–19.
- Andrist-Rangel, Y. 2008. Quantifying mineral sources of potassium in agricultural soils. Doctoral Thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. 105 s + 19 liitesivua.
- Andrist-Rangel, Y., Simonsson, M., Andersson, S., Öborn, I. & Hillier, S. 2006. Mineralogical budgeting of potassium in soil: A basis for understanding standard measures of reserve potassium. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169: 605–615.
- Andrist-Rangel, Y., Hillier, S., Öborn, I., Lilly, A., Towers, W., Edwards, A.C. & Peterson, E. 2010. Assessing potassium reserves in northern temperate grassland soil: A perspective based on quantitative mineralogical analysis and *aqua-regia* extractable potassium. *Geoderma* 158: 303–314.
- Barnes, R.F., Nelson, C.R., Moore, K.J. & Collins, M. 2007. Forages, Vol II. *The Science of Grassland Agriculture*. 6th Edition. Blackwell Publishing Asia. Australia.
- Barraclough, P. & Leigh, R. 1993. Grass yield in relation to potassium supply and the concentration of cations in tissue water. *Journal of Agricultural Science*. 121: 157–168.
- Bélanger, G. & Ziadi, N. 2008. Phosphorus and nitrogen relationships during spring growth of an aging timothy sward. *Agronomy Journal* 100:1757–1762.
- Blake, L. Mercik, S., Koerschens, M., Goulding, K.W.T., Stempen, S., Weigel, A., Poulton, P.R. & Powlson, D.S. 1999. Potassium content in soil uptake in plants and the potassium balance in three European long-term field experiments. *Plant and Soil* 216: 1–14.
- Blevins, D.G. & Barker, D.J. 2007. Nutrients and water in forage crop. Teoksessa: Barnes, R.F., Nelson, C.J, Moore K.J. & Collins, M. (toim.). Forages. *The science of grassland agriculture Vol 2*. Blackwell Publishing, Asia.
- Broschat, T.K. 2010. Fertilization Improves Cold Tolerance in Coconut Palm. *HortTechnology* 20 (5): 852–855.
- Bolland, M.D.A., Guthridge, I.F. & Blineow, G. 2011. Response of intensively grazed ryegrass dairy pastures to fertiliser phosphorus and potassium. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 90(2): 281–298.
- Bolinder, M.M., Angers, D.A., Bélanger, G., Michaud, R. & Laverdiere, M.R. 2002. Root biomass and shoot to root ratios of perennial forage crops in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science* 82: 731–737.
- Clement C.R. & Hopper M.J. 1968. The supply of potassium to high yielding cut grass. *National Agricultural Advisory Service, Quarterly Review* 79: 101–108.
- Cook, T.W. & Duff, D.T. 1976. Effects of K fertilization on freezing tolerance and carbohydrate content of *Festuca arundinacea* Schreb. maintained as turf. *Agronomy Journal* 68(1): 116–119.
- Dampney, P.M.R. 1992. The effect of timing and rate of potash application on the yield and herbage composition of grass grown for silage. *Grass and Forage Science* 47: 280–289.
- Egnér, H., Riehm, H. & Domingo, W.R. 1960. An investigation into chemical soil analyses as a basis for soil nutrient determination. II Chemical extraction methods for determining phosphorus and potassium. *Kungl. Lantbr. Högsk. Ann.* 26: 199–215. (In German)
- Elonen, P. 1971. Particle-size analysis of soil. *Acta Agralia Fennica* 122: 1–122.
- Follet, J.R. & Wilkinson, P.J. 1995. Nutrient management of foreges. s. 55–82. Teoksessa: Barnes, R.F., Miller, D.A. & Nelson, C.J. (toim.). Forages, Vol. II. *The Science of Grasslands Agriculture*. 5th Edition. Blackwell Publishing Asia. Australia.
- Goff, J. 2006. Major advances in our understanding of nutritional influences on bovine health. *Journal of Dairy Science* 89: 1292–1301.
- Goff, J.P. 2007. The monitoring, prevention, and treatment of milk fever and subclinical hypocalcemia in dairy cows. *The Veterinary Journal* 176: 50–57.
- Hahlin, M. 1980. The effect of potassium fertilizing in relation to balance between potassium and magnesium. Raport 131. 19 pp. Swedish University of Agricultural Sciences, Division of Soil Fertility, Uppsala. (In Swedish, English summary).
- Hahlin, M. & Ericsson, J. 1984. Potassium and potassium fertilizing. *Aktuellt från lantsbruksuniversitet* 333. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala. (in Swedish)
- Harrison J., White R., Kincaid R., Block E., Jenkins T. & St-Pierre N. 2012. Effectiveness of potassium carbonate sesquihydrate to increase dietary cation-anion difference in early lactation cows. *Journal of Dairy Science* 95: 3919–3925.
- Hartikainen, H. 1992. Maaperä. s. 9–89. Teoksessa: Heinonen, R. (toim.). *Maa, viljely ja ympäristö*. Werner Söderström Osakeyhtiö, Helsinki. 334 s.

- Hartikainen, H. 2009a. Maa-aineksen koostumus. s. 31–39. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. 452 s.
- Hartikainen, H. 2009b. Maaperän reaktiot. s. 114–139. Teoksessa: Paasonen-Kivekäs, M., Peltomaa, R., Vakkilainen, P. & Äijö, H. (toim.). Maan vesi- ja ravinnetalous. Ojitus, kastelu ja ympäristö. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. 452 s.
- Hernes, O. 1978. Increasing amounts of potassium and nitrogen to grassland. *Forskning og Forsok I Landbruket* 29 (6): 533–543. (in Norwegian, English summary)
- Hogh-Jensen, H. & Schjoerring, J.K. 2010. Interactions between nitrogen, phosphorus and potassium determine growth and N₂-fixation in white clover and ryegrass leys. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 87(3): 327–338.
- Holmes, W. 1989. Grass: Its production and utilization. 2nd edition. 306 s. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Holmqvist, J., Øgaard, A.F., Oborn, I., Edwards, A.C., Mattson, L. & Sverdrup, H. 2003. Application of the profile model to estimate potassium release from mineral weathering in Northern European agricultural soils. *European Journal of Agronomy* 20:149–163.
- Hopper, M.J. & Clement, C.R. 1966. The supply of potassium to grassland: An integration of field, pot and laboratory investigations. *Transactions of the Commission II and IV International Society of Soil Science, Aberdeen*. s. 237–246.
- Huang, P.M. 2005. Chemistry of potassium in soils. Teoksessa: Tabatabai, M. A. & Sparks, D.L. (toim.). Chemical processes in soils. Soil Science Society of America; Inc. Madison, Wisconsin, USA. s. 227–292. 723 s.
- Huhtanen, P., Ahvenjärvi, S. & Heikkilä, T. 2000. Effects of sodium sulphate and potassium chloride fertilizers on the nutritive value of timothy grown on different soils. *Agricultural and Food Science* 9:105–119.
- Höglind, M. 1990. Vallodling. Teoksessa: Belotti, C. (toim.) Vallboken. s: 5–26. Sveriges Lantbruksuniversitet. Speciella skrifter 40. Uppsala. 74 s. (belotti, C. vallboken)
- IFA (International fertilizer association) 2014. Fertilizer Outlook 2014–2018. 82nd IFA Annual Conference Sydney (Australia), 26–28 May 2014. 7 s.
- Isolahti, M. & Virkajärvi, P. 2005. Muokattu biotiitti nurmen perustamisen yhteydessä (Kem N3). s. 55–63. Julkaisussa: Issakainen, P. (toim.). Lannoitus- ja kasvinsuojelukokeiden tuloksia 2004.
- Jaakkola, A. 1992. Kasvinravitseminen. s. 173–254. Teoksessa: Heinonen, R. (toim.). Maa, viljely ja ympäristö. Werner Söderström Osakeyhtiö, Helsinki. 334 s.
- Johnston, A.E. 1986. Potassium fertilization to maintain a K-balance under various farming systems. s. 199–226. Teoksessa: Nutrient balances and the need for potassium. Proceedings of the 13th IPI-Congres. International Potash Institute IPI, Worblaufen-Bern, Switzerland.
- Joy, P., Lakanen, E. & Sillanpää M. 1973. Effects of heavy nitrogen dressings upon release of potassium from soils cropped with ley grasses. *Annales Agriculturae Fenniae. Seria Agrogeologia et -Chimica* 12(64): 172–184.
- Järvenranta, K., Virkajärvi, P. & Heinonen-Tanski, H. 2014. The flows and balances of P, K, Ca and Mg on intensively managed Boreal high input grass and low input grass-clover pasture. *Agricultural and Food Science* 23: 106–117.
- Kaila, A. 1965a. Fixation of potassium in Finnish soils. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 37: 116–126.
- Kaila, A. 1965b. Fixation of potassium by soil samples under various conditions. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 37: 195–206.
- Kaila, A. 1967. Release of nonexchangeable potassium from Finnish mineral soils. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 39: 107–118.
- Kangas, A., Högnäsbacka, M., Kujala, M., Laine, A., Niskanen, M., Jauhiainen, L. & Nikander, H. 2012. Virallisten lajikekokeiden tulokset 2005–2012. MTT Raportti 75.
- Kayser, M. & Isselstein, J. 2005. Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass and Forage Science* 60: 213–224.
- Keady, T.W.J & O’Kiely, P.O. 1998. An evaluation of potassium and nitrogen fertilization of grassland, and date of harvest, on fermentation, effluent production, dry-matter recovery and predicted feeding value of silage. *Grass and Forage Science* 53: 326–337.
- Kemppainen, E. 1989. Nutrient content and fertilizer value of livestock manure with special reference to cow manure. *Annales Agriculturae Fenniae* 28:163–284.
- Kemppainen, R. 1995. Biotiitti ja raakafosfori apilanurmen lannoitteena. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 10/95. 21 s.
- Kochian, L.V. & Lucas, W.J. 1988. Potassium transport in roots. *Advances in Botanical Research* 15: 93–178.
- Koikkalainen, K., Huhta, H., Virkajärvi, P. & Heikkilä, R. 1990. Pitkäaikaisen säilörehunurmen kaliumlannoitus heikosti kaliumia pidättävillä mailla. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 9/90: 59 s.

- Kuchenbuch, R., Claassen, N. & Jungk, A. 1986. Potassium availability in relation to soil moisture. *Plant and Soil* 95: 221–243.
- Kähäri, J. 1976. Hiue-, hiesu- ja hiesusavimaiden kaliumin käyttökelpoisuudesta kasvelle. Lisensiaattityö.
- Lean, I., DeGaris, P., McNeil, D. & Block, E. 2006. Hypocalcemia in dairy cows: Meta-analysis and dietary cation anion difference theory revisited. *Journal of Dairy Science* 89: 669–684.
- Leigh, R.A. 1989. Potassium concentrations in whole plants and cells in relation to growth. s. 117–126. Julkaisussa: *Methods of K-research in plants. Proceedings of the 21st Colloquium of the International Potash Institute held at Louvain-la-Neuve/Belgium, 19–21 June 1989. International Potash Institute, Worblaufen-Bern/Switzerland.* 336 s.
- Leonhard-Marek, S. & Martens, H. 1996. Effects of potassium on magnesium transport across rumen epithelium. *American Journal of Physiology* 271: G1034–1038.
- Linna, P. & Jansson, H. 1994. Biotiitti nurmen kaliumlannoitteena. Maatalouden tutkimuskeskuksen tiedote 1/94.
- Lunnan, T. & Haugen, L.E. 1993. Nitrogen and potassium fertilizer treatments to timothy brome grass and cocksfoot in southeastern Norway. *Norsk landsbruksforskning* 7: 65–75. (in Norwegian. English summary)
- Lunnan, T. 1993. Grass yield response to potassium fertilization on mineral soils in the inland of southern Norway. *Norwegian Journal of Agricultural Science* 7: 345–357.
- Marjanen, H., Soini, S. & Sippola, J. 1979. Timotei Pohjois-Suomen nurmikasvina. Teoksessa: *Nurmituhoista tuottavaan viljelyyn*: s. 5–64. Paikalliskoetointi Tiedote N:o 11. 88 s.
- Mattila, P.K., Joki-Tokola, E. & Tanni, R. 2003. Effect of treatment and application technique of cattle slurry on its utilization by ley: II. Recovery of nitrogen and composition of herbage yield. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 65 (3): 231–242.
- Mavi. 2009. Opas ympäristötuen ehtojen mukaiseen lannoitukseen 2007–2013. [verkkojulkaisu] Saatavana: <http://www.mavi.fi/fi/opaat-ja-lomak-keet/viljelija/Documents/Opas%20ymp%C3%A4rist%C3%B6tuen%20ehtojen%20mukaiseen%20lannoitukseen%202007-2013.pdf> . Viitattu 18,7,2014
- McKenzie, R.H., Bremer, E., Piffner, P.G., Middleton, A.B., Dow, T., Oba, M., Efetha, A. & Hohm, R. 2009. Yield and quality responses of irrigated timothy to fertilizer application in southern Alberta. *Canadian Journal of Plant Science* 89(2): 247–255.
- McDonald, P., Edwards, R.A. & Greenhalgh, J.F.D. (toim.) 1988. *Animal Nutrition*. 4th edition, s. 90–116 and 388–403. Longman Scientific & Technical, Longman Group Limited UK.
- Medinta, N.H., Branco, M.L.T., Guazzelli da Silveira, M.A. & Santos, R.B.S. 2013. Dynamic distribution of potassium in sugarcane. *Journal of Environmental Radioactivity* 156: 172–175.
- Mengel, K. & Steffens, D. 1985. Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters. *Biology Fertility of Soils* 1: 53–58.
- Miller, G. & Dickens, R. 1996. Potassium fertilization related to cold resistance in bermudagrass. *Crop Science* 36 (5): 1290–1295.
- Mäntylähti, V. 2003. Suomen peltojen viljavuus 1986 - 1990, 1991 - 1995, 1996 - 2000. Viljavuuspalvelu Oy. 27 s. [verkkojulkaisu] Saatavana: http://www.viljavuustutkimus.fi/user_files/files/Tilastoja/Suomen_peltojen_viljavuus_1986-2000.doc.
- Nissinen, O. 1996. Analyses of climatic factors affecting snow mould injury in first-year timothy (*Phleum pratense* L.) with special reference to *Sclerotinia borealis*. *Acta Universitatis Ouluensis*. A 289.
- Nissinen, O., Isolahti, M. & Virkajärvi, P. 2003. Syksyn kaliumporraskoe nurmille. Lannoitus ja kasvisuojelukokeiden tuloksia 2003. s. 59–75. MTT/alueellinen yksikkö. Tutkimusraportti.
- Nissinen, O., Kallinen, P. & Jauhiainen, L. 2010. Development of yield and nutritive value of timothy in primary growth and regrowth in northern growing conditions. *Agricultural and Food Science* 19: 252–268.
- Pakarinen, K., Virkajärvi, P., Luoma, S. & Keränen, O. 2008. Muokattu biotiitti nurmen perustamisen yhteydessä: s. 32–50. Lannoitus ja kasvisuojelukokeiden tuloksia 2007. Kuopio.
- Pelletier, S., Belanger, G., Tremblay, G.F., Virkajärvi, P. and Allard, G. 2008a. Timothy mineral concentration and derived indices related to cattle metabolic disorders: A review. *Canadian Journal of Plant Science* 88(6): 1043–1055.
- Pelletier, S., Simpson, R.J., Culvenor, R.A., Belanger, G., Tremblay, G.F., Allard, G., Braschkat, J. & Randall, P.J. 2008b. Dietary cation-anion differences in some pasture species, changes during the season and effects of soil acidity and lime amendment. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48(8): 1143–1153.
- Peltomaa, R., Pohjanheimo, O. & Huokuna, E. 1979. Pintakalkituksen ja K-lannoituksen vaikutus nurmen satoon ja sen N-, P-, K-, Ca- ja Mg-pitoisuuteen. Maatalouden tutkimuskeskus, maantutkimuslaitos, Tiedote 6. Vantaa: Maatalouden tutkimuskeskus. 24 s.
- Peltonen, S. 2010. Säilörehun tuotantokustannusten hallinta. Maataloustieteen Päivät 2010. www.smts.fi. 4 s.
- Piispanen, R. & Tuisku, P. 1997. Mineralogian perusteet. Kidetieteen ja mineralogian oppikirja. ISBN 952-9727-04-6. [verkkojulkaisu] Saatavana: <http://cc.oulu.fi/~geolwww/dokumentit/mineral1laserprint.pdf> <http://cc.oulu.fi/~geolwww/dokumentit/mineral2laserprint.pdf>

- Prins, W.H., Den Boerd, J. & Van Burg, P.F.J. 1985. Requirements for phosphorus, potassium and other nutrients for grassland in relation to nitrogen usage. Teoksessa: Cooper J.P. & Raymond W.F. (toim.) Grassland Manuring: 28-45 Occasional Symposium No, 20, British grassland Society.
- Pulli, S. 1986. Nurmien talvehtiminen. Teoksessa: Nurmen viljelytekniikka: s. 97-104. Tietoa tuottamaan 38. Maatalouskeskusten liiton julkaisu N:o 731.
- Raininko, K. 1968. The effects of nitrogen fertilization, irrigation and number of harvestings upon leys established with various seed mixtures. Acta Agraria Fennica 112.
- Rinne, S-L., Sillanpää, M. Huokuna, E. & Hiivola, S-L. 1978. Effect of heavy nitrogen fertilization on potassium, calcium, magnesium and phosphorus content in ley grasses. Annales Agriculturae Fenniae 13 (2): 96-108.
- Saarela, I. 1982. Kaliumlannoituksen porraskokeet 1977-1981. Maatalouden tutkimuskeskus, Maanviljelyskemian- ja fysiikanlaitoksen Tiedote 16. 57 s.
- Saarela, I. 1983. Response of timothy to increasing rates of potassium. Journal of Agricultural Society of Finland 55: 163-178.
- Saarela. 2001. Maan kaliumvarojen käyttökelpoisuus nurmikasveille. Nurmitutkimusten satoa - tuloksia lannoituksesta, palkokasveista, luomunurmista, laitumista, ruokonadasta. Seminaari 30.3.2001. Säätöyhtiö, Helsinki. 107 s. ISBN 951-98252-3-1.
- Saarela, I., Huhta, H., Salo, Y., Sippola, J., Vuorinen, M. 1998. Kaliumlannoituksen porraskokeet 1977-1994. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 42: 41 s.
- Saarela, I. & Mäntylähti, V. 2002. Kiillepitoisten karkeiden maiden kaliumin vapautuminen kasveille. Julkaisussa: Pietola, L. & Esala, M. (toim.). Maa, josta elämme. II Maaperätieteiden päivien laajennetut abstraktit. Pro Terra 15. s. 140-142.
- Saarijärvi, K. & Kananen, M. 2013. Säilörehujen kivennäispitoisuuksissa on suuria eroja : Umpikaudelle oikea rehu. KMMet 18 (3): 28-30.
- Salo, T., Turtola, E., Virkajärvi, P., Saarijärvi, K., Kuisma, P., Tuomisto, J., Muurunen, S. & Turakainen, M. 2013. Nitrogen fertilizer rates, N balance, and related risk of N leaching in Finnish agriculture. MTT Raport 102.
- Salomon, E. 1995. Long-term effects of potassium application on yield and soil from three experimental fields in Sweden. Swedish Journal of Agricultural Research 25: 119-127.
- Salonen, M. 1949. Tutkimuksia viljelykasvien juurten sijainnista Suomen maalajeilla. Acta Agriculrae Fennica 70 (1): 1-91.
- Schumann, W. 1993. Kivet ja mineraalit värikuvina. Kustannusosakeyhtiö Otavan painolaitokset, Keuruu 1993. 221 s.
- Seppänen, M. & Ylihalla, M. 2008. Nurmet ja nurmipalkokasvit. s. 87-106. Teoksessa: Seppänen, M. (toim.), Mäkelä, P., Yli-Halla, M., Helenius, J., Kallela, M., Stoddard, F. & Teeri, T. Peltokasvien tuotanto: Vammalan kirjapaino Oy. 204 s.
- Sippola, J. 1974. Mineral composition and its relation to texture and to some chemical properties in Finnish subsoils. Annales Agriculturae Fenniae 13: 169-234.
- Sippola, J. 1980. The dependence of yield increases obtained with phosphorus and potassium fertilization on soil test values and soil pH. Annales Agriculturae Fenniae 19: 100-107.
- Smith, K.A. & Van Dijk, T.A.. 1987 Utilization of phosphorus and potassium from animal manures on grassland and forage crops. Teoksessa: Van der Meer, H.G., Unwin, R.J., van Dijk, T.A. & Ennik, G.C. (toim.). Animal manures on grassland and fodder crops: Fertilizer or waste: s. 87-102. Martinus Nijhoff, Dordrech.
- Sparks, D. L. 2000. Bioavailability of soil potassium. D-38-D-52. Teoksessa: Sumner, M. E. (toim.). Handbook of soil science. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Sveinstrup, T.E. & Haraldsen, T.K. 1997. Effects of soil compaction on root development of perennial grass leys in northern Norway. Grass and Forage Science 52: 381-387.
- Taiz, L. & Zeiger, E. 2010. Plant physiology. Fifth edition. Sinauer Associates Inc., Publishers Sunderland. Massachusetts U.S.A.
- Talibudeen, O., Page, M.B. & Mitchell, J.D.D. 1976. The interaction of nitrogen and potassium nutrition on dry matter and nitrogen yields of the gramineae: Perennial ryegrass (Lolium perenne). Journal of Science of Food Agriculture 29: 999-1004.
- Tauriainen, S. 2001. Dietary cation-anion balance and calcium and magnesium intake of the dairy cow. PhD thesis. University of Helsinki, Department of animal Science Publication 37. 54 s.
- Thélier-Huché, L. & Salatte, J. 1994. The assessment of potassium nutrition status of tall fescue and its effect on production. Proceedings of the general meeting -European grassland federation; s. 219-223 Grassland and society 15th General meeting, Grassland and society.
- Tremblay, G.F., Brassard, H., Bélanger, G., Seguin, P., Drapeau, R., Brégar, A., Michaud, R. & Allard, G. 2006. Dietary Cation Anion Difference of Five Cool-Season Grasses. American Society of Agronomy 98: 339-348.
- Tähtinen, H. 1979. The effect of nitrogen fertilizer on the potassium requirement of grassland for silage. Annales Agriculturae Fenniae 18 (4): 231-245.

- Webster, D.E. & Ebdon, J.S. 2005. Effects of nitrogen and potassium fertilization on perennial ryegrass cold tolerance during deacclimation in late winter and early spring. *Horticultural Science* 40(3): 842–849.
- Valmari, A. 1978. Pohjois-Suomen nurmien tuotannon varmistaminen. Teoksessa: Nurmituhoista tuottavaan viljelyyn: s. 5–64. Lapin koeaseman tiedote N:o 4. 88 s.
- Virkajärvi, P., Huhta, H. 1994. Nurmen viljely polttoturvovesoiden jättöalueilla: timoteinurmen kaliumlannoitus Tohmajärven Valkeasuolla. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 13/94: 23 s.
- Virkajärvi, P., Sihto, U. & Isoahti, M. 2007. Maan reservikaliumin merkitys nurmenviljelyssä. s. 22–24. Teoksessa: Heikkinen, A-M., Pakarinen, K., Punkki, P., Rossi, A., Puurunen, T., Sairanen, A. & Virkajärvi, P. (toim.). Pohjois-Savon nurmiopas. Tavoitteena valtakunnan parhaat nurmet. Pelto tuottamaan - Pohjois-Savoon valtakunnan parhaat nurmet -hanke. 49 s.
- Virkajärvi, P., Saarijärvi, K. & Nykänen, A. 2009. Lannoitus. s. 58- 70. Teoksessa: Nurmirehujen tuotanto ja käyttö-. Tietoa tuottamaan 132. 98 s.
- Virkajärvi, P., Pakarinen, K., Hyrkäs, M., Lemettinen, J.P., Rinne, M. & Seppänen, M. 2012. Nurmen kasvu- ja kehitysprosessit. MTT Raportti 56. 120 s.
- Viljavuuspalvelu 2000. Viljavuustutkimuksen tulkinta peltoviljelyssä. 31 s.
- Volden, B. 1996. Nitrogen and potassium fertiliation on leys in northern Norway. I Yield and soil analysis. *Norsk landbruksforskning* 10: 283–300.
- Vuorinen, M. 1989. Turvemaan kaliumlannoitus. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 3/89. Jokioinen.
- Vuorinen, J. & Mäkitie, O. 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agrogeological Publications* 63:1–44.
- Webster, D.E. & Ebdon, J.S. 2005. Effects of Nitrogen and Potassium Fertilization on Perennial Ryegrass Cold Tolerance During Deacclimation in Late Winter and Early Spring. *HortScience* 40(3): 842–849.
- Whitehead, D.C. 2000. Macronutrient Cations: potassium, sodium, calcium and magnesium. s. 181–219. Teoksessa: Nutrient elements on grassland. Soil –plant –animal relationship. CABI publishing. UK. 303 s.
- Witter, E. & Johansson, G. 2001. Potassium uptake from the subsoil by green manure crops. *Biological Agriculture and Horticulture*. 19:127–141.
- Woodward, R.A., Harper, K.T. & Tiedemann, A.R. 1984. An ecological consideration of the significance of cation-exchange capacity of roots of some Utah range plants. *Plant and Soil* 79: 169–180.
- Yara. 2012. Lannoiteopas 2012–2013.
- Yara 2013a. Slättervall [verkkojulkaisu]. Saatavana: http://www.yara.se/fertilizer/crop_advice/agriculture/grassland/index.aspx Viitattu 22.11.2013 .Viitattu 22.11.2013.
- Yara 2013b. Jordbruk [verkkojulkaisu] Saatavana: http://www.yara.no/fertilizer/crop_advice/agriculture/grassland_pastures.aspx Viitattu 22.11.2013.
- Ylärinta, T., Uusi-Kämpä, J. & Jaakkola, A. 1996. Leaching of phosphorus, calcium, magnesium and potassium in barley, grass and fallow lysimeters. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B – Soil & Plant Science* 46: 9–17.
- Öborn, I., Edwards, A.C. & Hillier, S. 2010. Quantifying uptake rate of potassium from soil in a long-term grass rotation experiment. *Plant and Soil* 335: 3–19
- Øgaard, A.F. & Krogstad, T. 2005. Release of interlayer potassium in Norwegian grassland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Sciences* 168: 80–88.
- Øgaard, A.F. Krogstad, T. & Lunnan, T. 2002. Ability of some Norwegian soils to supply grass with potassium(K) – soil analyses as predictors of K supply from soil. *Soil Use and Management* 18:412–420.

LIITE 1. Aineiston kuvaus: toisen vuoden nurmet järjestettynä reservikaliumin mukaan nousevaan järjestykseen. Funktio = satovastefunktion muoto, K_{HCl} = reservikaliium, K_{AAC} = viljavuuskaliium, Maalajikoostumus vain kivennäisistä $dy(50)$ = suhteellisen sadon (%) satovaste kalliulanhoitustasolla 50 kg/ha/v, $dy(100)$ = satovaste kalliulanhoitustasolla 100 kg/ha/v.

No	Paikkakunta	Koenro	Koenimi	Nurmi- jakso	Nurmen ikä	Maalaji	Funktio	K_{HCl} - tökerros	kyn- tökerros	K_{AAC} - tökerros	kyn- tökerros	K_{HCl} - jankko	K_{AAC} - jankko	Maalajikoostumus %										Satovaste	
														S	HHs	KHs	HHT	KHt	HHk	KHk	HSr	KSr	OrgC	$dy(50)$	$dy(100)$
7	Rovaniemi	381	KEM N4	1	2	CT/Mm	lin	77	59	59	53	29	40	0.684	0.684										
7	Rovaniemi	380	KEM N4	1	2	CT/Mm	lin	77	59	59	53	29	40	0.578	0.578										
17	Tohmajärvi, VS ^a	214	1)	1	99 ^b	LCt	exp	88	13	13	88	46		0.489	0.198										
17	Tohmajärvi, VS ^a	214	1)	2	99 ^b	LCt	exp	88	13	13	88	46		0.618	0.227										
9	Ruukki	45	KEM N4a	1	2	HHT	lin	397	55	55	516	37	7	4	5	38	45	1	0	0	0	0.134	0.134		
14	Tohmajärvi	112	2)	1	2	Ht	exp	438	130	130	486	-	2	4	10	38	45	1	0	0	0	0.001	0		
14	Tohmajärvi	112	2)	2	2	Ht	exp	438	130	130	486	-	2	4	10	38	45	1	0	0	0	0.38	0.146		
14	Tohmajärvi	112	2)	3	2	Ht	exp	438	130	130	486	-	2	4	10	38	45	1	0	0	0	0.319	0.08		
2	Ruukki	641	K&Na	1	2	KHt	lin	476	72	72	461	33	4	2	3	10	55	25	1	0	0	0.05	0.05		
13	Tohmajärvi	111	2)	1	2	LCt	exp	477	107	107	233	-										0.191	0.045		
13	Tohmajärvi	111	2)	2	2	LCt	exp	477	107	107	233	-										0.487	0.299		
13	Tohmajärvi	111	2)	3	2	LCt	exp	477	107	107	233	-										0.283	0.198		
4	Toholampi	33	K&Na&Mg	1	2	Mm	exp	535	76	76	322	91										0	0		
8	Ruukki	106	KEM N4	1	2	KHt	lin	639	161	161	2010	100										0.053	0.0526		
8	Ruukki	106	KEM N4	1	2	KHt	lin	639	161	161	2010	100										0.035	0.0346		
12	Ruukki	46	KEM N5	1	2	HHT	lin	701	128	128	1400	100	10	7	12	30	38	3	0	0	0	0.096	0.0958		
11	Rovaniemi	402	KEM N5	1	2	HMT Hs	lin	996	112	112	1140	59	21	19	24	16	10	5	0	0	0	-0.023	-0.023		
16	Ylistaro	20232	3)	1	2	He	lin	1420	176	176	1230	39	25	16	23	26	9	1	0	0	12.5	-0.014	-0.014		
15	Mouhijärvi	25428	3)	1	2	HeS	lin	1780	173	173	2260	160	32	28	19	9	5	4	3	0	0	2.9	0.007	0.007	
15	Mouhijärvi	25428	3)	2	2	HeS	lin	1780	173	173	2270	160	32	28	19	9	5	4	3	0	0	2.9	0.018	0.018	
6	Maaninka	490	KEM N4	1	2	hsHt	lin	2475	126	126	3260	133	27	21	13	16	16	7	0	0	0	-0.001	-0.001		
6	Maaninka	490	KEM N4	1	2	hsHt	lin	2475	126	126	3260	133	27	21	13	16	16	7	0	0	0	0.076	0.076		
5	Maaninka	244	KEM N3	1	2	hsHt	lin	2645	97	97	2600	97	18	12	11	18	26	9	4	2	0	0.097	0.097		
1	Maaninka	435	K&Na	1	2	HeS	lin	2730	126	126	2810	121	38	23	13	14	9	2	0	0	1	0.043	0.043		
10	Maaninka	539	KEM N5	1	2	He	lin	2880	86	86	2780	94	24	26	13	17	16	4	0	0	0	0.012	0.012		
3	Maaninka	392	K&Na&Mg	1	2	HeS	exp	2920	140	140	2480	132	34	22	16	17	10	1	0	0	0	0.018	0.004		
3	Maaninka	392	K&Na&Mg	1	2	HeS	lin	2920	140	140	2480	132	34	22	16	17	10	1	0	0	0	0.01	0.01		

a) VS = Valkeason turvejätöalue, 1) Virkkajärvi & Huhta (1994), 2) Koikkalainen ym. (1990), 3) Saarela ym. (1997), b = aineistossa vuodet ilmoitettu nurmijakson keskiarvona

LIITE 2. Maaperämuuttujien Pearson-korrelaatiomatriisi. Korrelaatiokerroin, kertoimen p-arvo ja havaintojen lukumäärä. Huom. Kaikkien maanäytteiden ottopäivämäärä ei ole sama.

	K _{HCl}	K _{AAc}	K _{HCl, jankko}	K _{AA, jankko}	Saves	HHs	KHs	S + HHs
K _{HCl}	1,00	0,42	0,89	0,72	0,89	0,83	0,56	0,87
		0,04	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,01	<0,001
	24	24	24	18	24	24	24	24
K _{AAc}	0,42	1	0,56	0,67	0,59	0,57	0,62	0,59
	0,04		<0,01	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	24	24	24	18	24	24	24	24
K _{HCl, jankko}	0,89	0,56	1	0,84	0,83	0,77	0,54	0,82
	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	24	24	24	18	24	24	24	24
K _{AA, jankko}	0,72	0,67	0,84	1	0,71	0,72	0,38	0,73
	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
	18	18	18	18	18	18	18	18
Saves	0,89	0,59	0,83	0,72	1	0,96	0,78	0,99
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001	<0,001
	24	24	24	18	24	24	24	24
HHs	0,83	0,57	0,77	0,72	0,96	1	0,83	0,99
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001		<0,001	<0,001
	24	24	24	18	24	24	24	24
KHs	0,56	0,62	0,54	0,38	0,78	0,83	1	0,81
	<0,001	<0,001	<0,001	0,11	<0,001	<0,001		<0,001
	24	24	24	18	24	24	24	24
Saves + HHs	0,87	0,59	0,82	0,73	0,99	0,98	0,81	1
	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	
	24	24	24	18	24	24	24	24

LIITE 3. Nurmisadon mukana poistuneen kaliumin määrä (kg/ha/v) niitoittain ja yhteensä. N = havaintojen lukumäärä.

Niitto	n	Keskiarvo	Keskihajonta	Minimi	Maksimi
Niitto 1	159	104,6	46,9	0	208,6
Niitto 2	156	91,1	44,5	0	167,9
Niitto 3	47	67,1	26,0	15,9	115,8
Yhteensä	201	175,3	113,2	0	411,6

LIITE 4. Yara Oy:n Ruotsissa antamat lannoitusosuudet eri viljavuusluokissa (kg/ha) (Yara 2013a) Luokka I = heikoin kaliumtila, luokka = V korkein kaliumtila.

	Sato kg/ha	K-luokka	Luokka					
			I	II	III	IV-V		
			0-4	4-8	8-12	12-16	16- 20	>20
1.vuosi	6000		180	120	50	0	0	0
	8000		220	160	80	0	0	0
	10000		260	200	110	20	0	0
2. vuosi	6000		180	130	100	50	0	0
	8000		220	180	140	80	0	0
	10000			230	180	110	20	0
3. vuosi	6000		180	150	130	100	50	0
	8000		220	200	180	140	80	0
	10000			250	230	180	110	0
Laidunnummi			90	60	30	0	0	0

*Ruotsin lannoitusosuus, kun sadon oletetaan olevan 6000 kg/ha ja sadon kaliumpitoisuuden 150 kg/ha (25 g/kg ka), sadon noustessa tai laskiessa voidaan kaliumlannoitusta lisätä tai vähentää 25 kg/sato

**Noin 1000 kg nurmea käyttää 25 kg kaliumia, siten 8000 kg:n sato tarvitsee 200–240 kg K

LIITE 5. Ruotsalaisen nurmioppaan antamat kaliumlannoitusosuudet maan kaliumluokkien mukaan (Höglind, 1990). Luokka I = heikoin kaliumtila, luokka V = korkein kaliumtila.

Säilörehunurmet*	Maan kaliumluokka (K _{AL})				
	I	II	III	IV	V
	180	140	100	60	20

LIITE 6. Yara Oy:n Norjassa antamat lannoitussuositukset (Yara 2012b)*. Suosituslannoituksen vaihteluväli suluissa.

	tavoite FE _m /ha**	K kg/ha
1 niitto	4000	70 (50 -100)
2 niittoa	6000	115 (100 -200)
3 niittoa	7000	145 (120 -200)

*Suosituksen vastaavat Itä-Norjaa sekä Länsi-Norjaa maan keskiosassa

**Norjalainen rehuyksikkö, vastaa lähes kg ka/ha, Yksi yksikkö vastaa 1 kg:sta ohraa saatavaa käyttökelpoista energiaa, 550 kg lehmä, joka lypsää 30 kg maitoa/vrk tarvitsee 4,8 FE_m elintoimintojen ylläpitoon ja 13,3 FE_m maidontuotantoon, Energy requirements (FEm per day) = 0,0424 x live weight^{0,75} + 0,44 x ECM + 0,0007293 x ECM²

LIITE 7. Norjalainen suositus kaliumlannoituksen tarkentamisesta (kg/ha/v) maan eri kaliumreservien perusteella (mg/kg maata) (Yara2013b).

	100	300	500	700	900	1300	2100
Maan K-HNO ₃ mg/kg	100	300	500	700	900	1300	2100
Maan K-AL mg/kg	100	100	100	100	100	100	100
Maan reservi-K mg/kg	0	200	400	600	800	1200	2000
Normilannoituksen korjaus, kg/ha K	60	30	0	-30	-60	-120	-240

LIITE 8. Tavoitteellinen K/Mg -suhde Ruotsissa (Yara Sverige). Luokka I = alhaisin kaliumtila, luokka V = korkein kaliumtila (Yara 2013a). Jos K/Mg -suhde ylittää raja-arvon, suositellaan Mg-lannoitusta.

K-AL -luokka	I-II	III	IV-V
K/Mg -suhde	2,5	2	1,5

MTT TEKEE TIETEESTÄ ELINVOIMAA

MTT RAPORTTI

www.mtt.fi/julkaisut

MTT Raportti -julkaisusarjassa julkaistaan maatalous -ja elintarviketutkimusta sekä maatalouden ympäristötutkimusta käsitteleviä tutkimusraportteja. Lukijoille tarjotaan tietoa MTT:n kaikilta tutkimusaloilta eli biologiasta, teknologiasta ja taloudesta.

MTT, 31600 Jokioinen.

