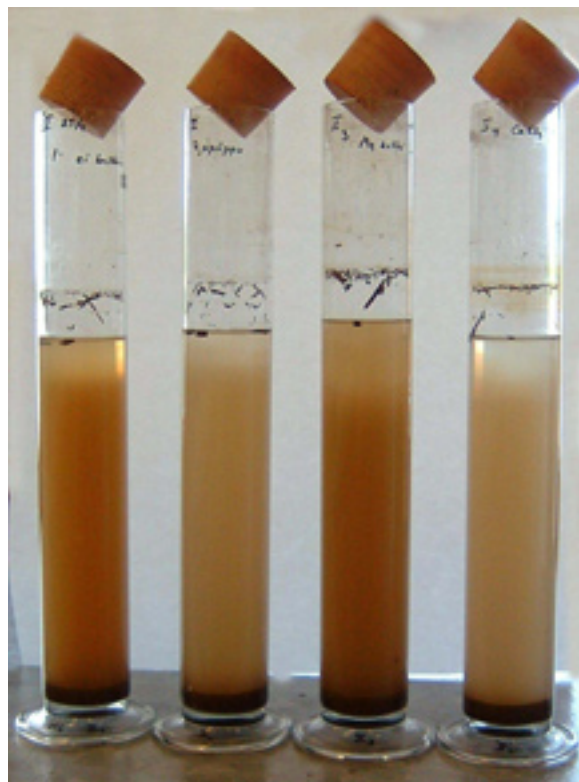


# Savimaiden eroosio

Erkki Aura, Katariina Saarela ja Mari Rätty



MTT:n selvityksiä 118  
32 s.

## **Savimaiden eroosio**

**Maa- ja metsätalousministeriön Maatalousosaston Tutkimus- ja  
neuvontayksikön rahoittama yhteistutkimushanke Dnro 3298/502/2002**

Erkki Aura, Katariina Saarela ja Mari Rätty

ISBN 952-487-039-8 (Verkkajulkaisu)

ISSN 1458-5103 (Verkkajulkaisu)

<http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts118.pdf>

Copyright

MTT

Kirjoittajat

Julkaisija ja kustantaja

MTT, 31600 Jokioinen

Jakelu ja myynti

MTT, Tietohallinto, 31600 Jokioinen

Puhelin (03) 4188 2327, telekopio (03) 4188 2339

sähköposti [julkaisut@mtt.fi](mailto:julkaisut@mtt.fi)

Julkaisuvuosi

2006

Kannen kuva

Risto T. Seppälä

# Savimaiden eroosio

Erkki Aura<sup>1)</sup>, Katariina Saarela<sup>1)</sup> ja Mari Rätty<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>MTT, Kasvintuotannon tutkimus, Maaperä ja kasvinravitseminen, 31600 Jokioinen, erkki.aura@mtt.fi

<sup>2)</sup>Helsingin yliopisto, soveltavan kemian ja mikrobiologian laitos, MMTDK, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto, mari.ratty@helsinki.fi

## Tiivistelmä

Valumisvesien kiinteiden hiukkasten merkitys vesistöjen kuormittajana voi olla paljon suurempi kuin vesiliukoisesta fosforista koitua kuormitus. Hapettomissa olosuhteissa jopa 35 – 60 % kiinteitten hiukkasten fosforista voi olla leville käyttökelpoista. Suomessa tärkeimmät eroosion mekanismit savimaissa ovat sadepisaroiden iskut maan pintaan ja saveshiukkasten diffuusio (lämpöliike) kiinteästä maasta maan veteen. Savimaan pinnan lietyminen ja kuorettuminen vähenevät maan jäykkyyden kasvaessa. Sen sijaan diffuusioeroosio kasvaa savespitoisuuden kohotessa. Diffuusioeroosion mekanismeihin ja torjuntaan on kiinnitetty tutkimuksissa vähän huomiota, vaikka se on maissamme ilmeisesti tärkein eroosion muoto. Tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää savimaittemme 1)eroosiomekanismeja, 2)eroosion voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä, 3)keinoja vähentää savimaittemme eroosiota ja 4)tutkia eroosion mallintamista oloissamme.

Maan fysikaalis-kemiallisesti aktiivisia komponentteja ovat savimineraalit, heikosti kiteytyneet alumiini- ja rautaoksidit ja humus. Nämä ainekset määräävät maan rakenteen kestävyden. Tutkimushankkeessa saatiin odotettu tulos: Maan kestävyys sadepisaroiden iskulle paranee maan savespitoisuuden kasvaessa. Sen sijaan kestävyys diffuusioeroosiolle heikenee savespitoisuuden noustessa. Humuspitoisuudelle ei saatu selvää vaikutusta. Humuksesta alle 10 % on lankamaisia tehokkaasti maahiukkasia liimaavia yhdisteitä. Ilmeisesti humuksen laatuun tulisi kiinnittää tarkempaa huomiota. Heikosti kiteytyneet rautaoksidit stabiloivat tunnetusti maan mururakennetta. Maan rautaoksidien stabiloiva vaikutus tuli esille myös suoritettussa hankkeessa.

Negatiivisesti varautuneet saveshiukkaset ovat ns. vaihtuvien kationien välityksellä kiinni toisissaan. Yleisin vaihtuva kationi on kalsium, joka flokkuloi maahiukkasia mikromuruiksi. Murujen synnyssä ovat mukana myös liimaavat nauhamaiset humusmolekyylit ja alumiini- ja rautaoksidit. Sadepisaroiden iskuja kestävä mururakenteen muodostuminen vaatii maan kuivumista välillä, jotta hiukkaset pääsevät riittävän lähelle toisiaan. Diffuusioeroosion torjumiseksi riittää kuitenkin vähäinkin yksittäisten hiukkasten yhteenliittyminen. Tämä voitiin hankkeessa osoittaa nojautumalla Einsteinin 1905 luomaan teoriaan pienten hiukkasten lämpöliikkeestä nesteessä. Laskennan mukaan hieno saves (läpimitä alle 0,2 mikrometriä) on altista diffuusiolle maan veteen epästabiilista huokospinnasta. Vähäinkin flokkulaation parantaminen estää diffuusion.

Muokkaus leikkaa maahan tuoreita pintoja, jotka eivät ole ehtineet stabiloitua minkään mekanismin avulla. Näistä tuoreista pinnoista saveshiukkaset diffundoituvat nopeasti maan veteen. Muokkauksen eroosiota lisäävä vaikutus tuli tässäkin hankkeessa esille. Tutkimus osoitti, että maanparannusaineilla voidaan parantaa hiukkasten flokkulaatiotaipumusta ja siten tehokkaasti vähentää eroosiota ja fosforikuormitusta vesille. Tällaisia tehokkaita aineita ovat teollisuuden sivutuotteet: ns. ”piippukalkki” hienojakoinen kalsiumkarbonaatti, puutavarateollisuuden sivutuote nollakuitu ja teollisuuden tuottama kipsi. Mielenkiintoinen on myös tulos, että maanparannusaineilla voidaan leikata korkeita liukoisen fosforin pitoisuuksia valumisvedessä. Tehokkaimmin voidaan torjua savimaan eroosiota yhdistämällä

maan parannusaineiden käyttö minimimuokkaukseen tai suorakylvöön. Hankkeessa tutkittiin eroosion estämisessä myös synteettisiä nauhamaisia liima-aineita, jotka muistuttavat luonnossa syntyviä maahiukkasia koossa pitäviä yhdisteitä, mutta hajoavat maassa hitaasti. Synteettiset kuidut osoittautuivat tehokkaiksi murujen muodostajiksi, mutta käytännön tekniikka ja taloudellisuuden arviointi puuttuu.

---

*Avainsanat: Eroosio, savimaa, mekanismit, maanparannusaineet, muokkaus, polymeerit, mallintaminen*

---

# Sisällysluettelo

I SAVIMAIDEN EROOSIO JA FOSFORIN HUUHTOUTUMISEN VÄHENTÄMINEN .....	6
1 Savimaiden eroosio.....	6
2 Eroosion mekanismeista .....	7
2.1 Sadepisaroitten iskut maan pintaan.....	7
2.2 Maahiukkasten diffuusio maan veteen.....	8
2.3 Hiukkasten sitoutuminen toisiinsa eroosiota estävästi.....	9
3 Tutkimus kalkituskokeiden maanäytteillä .....	9
3.1 Maanäytteet.....	10
3.2 Eroosioherkkyyden mittaus sadettamalla.....	10
3.3 Eroosion mittaus maa-vesi suspensiosta .....	11
3.3.1 Karbonaattikokeet.....	11
3.3.2 Kipsikokeet.....	11
3.4 Kalkitse mattomien maiden eroosioherkkyys .....	11
3.5 Kalkituksen vaikutus valumisveden laatuun sadesimulaatiossa .....	14
3.6 Kalkituksen vaikutus suspensioveden laatuun sylinterikokeissa .....	18
3.7 Kipsin vaikutus veden laatuun .....	20
4 Maanparannusaineet ja muokkaustapa .....	22
4.1 Muokkaustapa ja kalkitus sadesimulaatiossa .....	22
4.2 Muokkaustapa- ja nollakuitukokeen maanäytteiden sade-simulaatio.....	23
5 Kirjallisuusluettelo.....	25
II FLOKKULAATIOTUTKIMUS POLYAKRYYLIAMIDILLA .....	26
1 Johdanto.....	26
2 Materiaali ja menetelmät .....	27
3 Tulokset ja tarkastelu.....	28
4 Kirjallisuusluettelo.....	31

# I SAVIMAIKEN EROOSIO JA FOSFORIN HUUHTOUTUMISEN VÄHENTÄMINEN

## 1 Savimaiden eroosio

Suomessa sadanta ja sateen intensiteetti ovat pieniä ja todellinen vesieroosio, pahimmillaan uomaeroosio, on meillä harvinaista. Kuitenkin peltojen valumavesissä kulkeutuu vesistöihin huomattava määrä kiintoainesta, josta suurin osa on hyvin hienojakoista jopa silmin havaitsematonta. MTT:n mittauksen mukaan jäykkien savimaiden ojavedessä 100 % hiukkasista kuuluu savifraktioon, jossa hiukkasten läpimitta on alle 0,002 mm (julkaisematon aineisto).

Savimaita ei ole pidetty yhtä eroosioherkkänä kuin karkeampia lajittuneita maita saveksen voimakkaan murustumistaipumuksen (*aggregoitumistaipumuksen*) vuoksi. Hienon aineksen merkitykseen eroosiossa onkin kiinnitetty pitkään vähän huomiota. Hienoin maافرaktio on kemiallisesti aktiivisinta ja vaikuttaa vahvasti vesistöjen laatuun. Vesistöön joutuessaan se huonontaa järvi- ja jokivesien laatua. Pienten maahiukkasten mukana pellosto kulkeutuu pois leville käyttökelpoista fosforia suunnilleen yhtä paljon kuin vesiliukoisessa epäorgaanisessa muodossa ja hapettomissa olosuhteissa maahiukkasten merkitys voi olla fosforin lähteenä leville vesiliukoista suurempi (Uusitalo ym. 2003).

Eroosion määrä savimaassa on noin 1 - 2 tn/ha. Savimaiden eroosioyksymys on merkittävä, sillä noin kolmannes Suomen pelloista luokitellaan savimaiksi (savesta yli 30 % kivennäisaineesta). Erilaisin mittauksin on voitu osoittaa, että eroosioaines Suomessa on peräisin lähinnä ruokamultakerroksesta (Uusitalo ym. 2001). Saveksen irtoamista peltomaasta tapahtuu hiljaisinkin sateen aikana. Kun savihiukkanen on kerran irronnut maan huokosen seinämistä ja alkanut kulkeutua veden virtauksen mukana, ei hiukkanen enää helposti kiinnity huokosen seinämään takaisin. Maaperämme sisältää runsaasti heikosti kiteytyneitä alumiini- ja rautaoksidipolymeerejä, jotka sitovat voimakkaasti lannoitteena annettua fosforia. Nämä oksidit voivat olla irtonaisina maassa tai sitoutuneena savimineraaleihin ja humukseen. Oksidien ansiosta lannoitefosforia joudutaan yleensä levittämään peltoon enemmän kuin kasvit sitä ottavat. Pitkäaikainen runsas fosforilannoitus lisää oksidien pintaan kiinnittyneiden fosfaattimolekyylien määrää. Samalla maan kyllästysaste fosforin suhteen kasvaa. Oksidien pinnalla oleva fosfori on dynaamisessa tasapainossa maanesteen kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä suurempi maan fosforikyllästysaste on, sitä suurempaa fosforipitoisuutta maa ylläpitää nestefaasissa. Myös valumavesissä maahiukkasten pinnoilla oleva fosfori pyrkii tasapainoon veteen liunneen fosforin kanssa.

Liunneen fosforin lisäksi siis osa, ehkä noin 10 - 15 prosenttia hapellisissa oloissa, valumaveden kiinteän aineen fosforista on leville käyttökelpoista (Uusitalo ja Ekholm 2003). Hapettomissa olosuhteissa jopa 35 - 60 % kiinteitten hiukkasten fosforista voi olla leville käyttökelpoista (Uusitalo ym. 2003). Tällainen fosfori voi irrota maahiukkasista veteen ja rehevöittää vesistöjä. Toimenpiteet, jotka vähentävät eroosiota, pienentävät myös peltojen vesistöille aiheuttamaa fosforikuormitusta. Vaikka Suomessa hyvin rankat sateet ovat harvinaisia, silti sadepisaroiden pommittava vaikutus irrottaa maan pinnasta savesta. Pintamaan osittainkin peittäminen kasviaineksella vähentää eroosiota. Syksyinen pintamuokkaus tai muokkaamatta jättäminen vähentää eroosiota syyskynnettyyn paljaaseen maahan verrattuna (Puustinen ym. 2006).

Katteilla ja syyviljalla on samanlainen vaikutus, mutta pelkkä kate ei kuitenkaan riitä estämään eroosiota. Huokosten pinnalta irtoaa lämpöliikkeen vaikutuksesta maan veteen jatkuvasti savihiukkasia. Tämän vuoksi maan rakenteen kestävyydellä on mitä suurin merkitys. Muokkaus ja maan pitäminen avokesantona ovat pahimpia maan rakenteen pilaaajia. Muokkaus leikkaa maahan tuoreita pintoja, jotka eivät ole ehtineet stabiloitua mikrobien tuottamien liima-aineiden ja kuivumisen ansiosta. Näistä tuoreista pinnoista savihiukkaset diffundoituvat nopeasti huokosen veteen. Haitallisinta on veden jatkuva seisominen ruokamultakerroksessa. Erittäin vahingollisia ovat märät syksyt yhdistettynä lauhaan talveen, jolloin maa ei kunnolla routaannu (Puustinen ym. 2006). Kuivumisen aikana savihiukkaset puristuvat voimakkaasti toisiaan vasten tehden kemiallisen stabiloitumisen mahdolliseksi. Toimiva salaojitus vähentää pintavalumista ja lisää maan rakenteen kestävyyttä, mikä puolestaan vähentää eroosiota. Savimaissa saattaa kuitenkin huuhtoutua huomattavia määriä maa-ainesta ja fosforia salaojien kautta, mikä on tullut esille myös suomalaisissa kenttäkokeissa (Turtola ja Paajanen, 1995; Paasonen-Kivekäs ym. 2000; Uusitalo ym. 2001). Kiintoaineen pitoisuus salaojavedessä voi nousta jopa yli 3 grammaan litrassa vettä. Pintavesien vähentäminen ei poista eroosio-ongelmaa, vaan savimaan kestävyuden huomattava parantaminen. Eroosion torjumiseksi on tutkimuksissa pyrittävä tulevaisuudessa erityisesti pintamaan hyvään kestävyYTEEN.

## 2 Eroosion mekanismeista

### 2.1 Sadepisaroitten iskut maan pintaan

Vanhastaan eroosiolla on tarkoitettu kokonaisten pintamaakerrosten huuhtoutumista rakan sateen aikana vesistöön. Suomessa kuitenkin tällainen eroosio rajoittuu hyvin pienelle alalle, koska meillä on vähän jyrkkiä rinteitä ja hyvin voimakkaat sateet ovat harvinaisia. Paljon tärkeämpi eroosion mekanismi on sadepisaroitten iskut maan pintaan. Sadepisaran iskun voimakkuus riippuu liikemäärästä  $mv$ , missä  $m$  on pisaran massa ja  $v$  pisaran nopeus. Liikemäärä purkautuu impulssina pintamaan hiukkasiin, jos maarakeita on erillisinä, kuten hieta- ja hiesumaassa. Pisaran pysähtyessä liikemäärä siirtyy maahiukkasiin ja lennättää niitä, jolloin maan pinta liettyy. Sadepisaran nopeus voi olla useita metrejä sekunnissa ja paino useita kymmeniä milligrammoja. Jos taasen maan pinnan hiukkaset ovat liittyneet toisiinsa, kuten tavallisesti savimaassa, pisaran liike-energia  $\frac{1}{2}mv^2$  purkaantuu veden äkillisenä voimakkaana hankauksena murun pintaan pisaran levitessä iskun seurauksena. Maan pinnalla oleva kasvusto tai kasvinjätteet pystyvät tehokkaasti vaimentamaan sadepisaroitten liikemäärän ja liike-energian siirtymisen maan pintaan ja siten vähentävät maan liettymistä ja kuorettumista. Suorakylvö ja syysviljojen viljely ovat tehokkaita keinoja eroosion torjunnassa.

Laboratoriossa sadesimulaattori jäljittelee luonnon sadetta ja on kätevä tapa tutkia maanäytteen kestävyyttä pisaroitten iskuille. Jos sadesimulaatiossa tutkitaan maaprofiileja, pintakerroksessa sadepisaroitten iskut hajottavat maata, mutta hitaassa veden virtauksessa maaprofiilin läpi voivat hiukkaset uudelleen liittyä yhteen. Jos maan ominaisuudet suosivat flokkuloitumista eli primäärihiukkasten liittymistä ryppäiksi, pintamaan rakenteen huononeminen sateen aikana ei välttämättä johda eroosioon. Maahiukkasten liittyminen uudelleen toisiinsa ehkäisee kiinteän aineksen kulkeutumista maaprofiilin läpi.



## 2.2 Maahiukkasten diffuusio maan veteen

Ulkomaisissa eroosiomalleissa usein maan savespitoisuutta pidetään eroosiota vähentävänä tekijänä. Kuitenkin kostean kesän jälkeen nimenomaan jäykkien savimaiden rakenne on huono ja salaojavedet ovat varsin sameita jo ensimmäisten syyssateiden aikana. Vaikka etenkin hienoa savesta (rakeen läpimitta  $< 0,0002$  mm) yleisesti pidetään maan rakennetta stabiloivana aineksena, hyvin jäykkienkin savimaiden ojavedet ovat Suomessa sameita. Selitys löytyy pienten savihiukkasten liikkumisessa lämpöliikkeessä maan veteen märkänä aikana. Jos maa on osittain kuiva, veden pintajännite ("imu") puristaa hiukkasia yhteen estäen näin maan hajaantumista. Märän maan routaantuessa syntyvät jääkiteet imevät vettä maan huokosista, jolloin maa väliaikaisesti ikään kuin kuivuu. Roudan sulaessa vesi imeytyy jääkiteistä huokosiin, jolloin maa palautuu märäksi. Tuhoisinta jäykän savimaan rakenteelle on maan oleminen vedellä kyllästetyssä tilassa pitkään. Lämpöliikkeessä hiukkasten keskimääräistä etenemisnopeutta tiettyyn suuntaan ilmaiseva diffuusiokerroin riippuu hiukkasten koosta ja saadaan lasketuksi Stokes – Einsteinin kaavalla (Einstein 1905):

$$D = (k T)/(6 \Pi \eta r) \quad (1)$$

missä  $k$  = Boltzman vakio  $1,3805 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>,  $T$  = lämpötila °K,  $\eta$  = veden viskositeetti  $1,005 \times 10^{-3}$  kg m<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup>,  $r$  = hiukkasen säde m. Hiukkasten keskimääräisesti kulkema matka  $s$  (m) diffuusiolla on:

$$s = (2Dt)^{1/2} \quad (2)$$

missä  $t$  = aika sekuntia. Diffuusion merkitystä voidaan arvioida vertaamalla hiukkasten keskimääräistä liikkumista diffuusiolla painovoiman vaikutukseen hiukkasiin. Jos painovoiman merkitys tulee hallitsevaksi verrattuna lämpöliikkeeseen, voidaan olettaa, että vedellä kyllästetyssä maassa veteen joutuneet hiukkaset juuttuvat maan mutkitteleviin huokosiin. Painovoiman ansiosta hiukkasen kulkema matka

$$s = v t \quad (3)$$

missä  $v$  on nopeus ja  $t$  on aika. Nopeus painovoimakiinetyvyyden  $g$  (ms<sup>-2</sup>) johdosta taasen saadaan suspensioanalyysissä yleisesti käytetystä kaavasta:

$$v = 2/9 (g r^2 (\rho_1 - \rho_2))/\eta \quad (4)$$

missä  $\rho_1$  = hiukkasen tiheys ja  $\rho_2$  = veden tiheys kg m<sup>-3</sup>. Kaavan (2) mukainen diffuusion matka asetetaan yhtä suureksi painovoiman ansiosta kulkeman matkan (3) kanssa ja sijoitetaan kaavat (1) ja (4). Tulokseksi saadaan, että diffuusion merkitys tulee painovoimaa tärkeämmäksi, kun hiukkasen säde suunnilleen alittaa 0,0002 mm eli nimenomaan hieno saven on altis diffuusiolle maan veteen, jos mikään mekanismi ei ole liimannut hienon saveksen hiukkasia yhteen.

Diffuusion merkitystä eroosion aiheuttajana tutkitaan pitämällä maa jatkuvasti hyvin märkänä ja tyhjentämällä välillä valuva vesi maasta hitaasti välttämällä liikkuvan veden aiheuttamaa hankauseroosiota maan suurissa huokosissa. Veteen lämpöliikkeessä joutuneiden hiukkasten pitoisuus on hyvä mitta eroosioalttiudelle. Äestetyin maan diffuusioeroosiota voidaan mitata sekoittamalla maata varovasti veteen ja sekoittamalla varovasti välillä suspensiota. Pienet savihiukkaset diffundoituvat muruista veteen ja pysyvät vedessä, kun sen

sijaan flokkuloituneet tai uudelleen flokkuloituvat hiukkaset painuvat astian pohjaan. Mittaamalla kiintoainesta vedessä saadaan selville maamurujen alttius diffuusioeroosiolle.

## 2.3 Hiukkasten sitoutuminen toisiinsa eroosiota estävästi

Maan fysikaalis-kemiallisesti aktiivisia komponentteja ovat savimineraalit, heikosti kiteytyneet alumiini- ja rautaoksidit ja humus. Nämä ainekset määräävät maan rakenteen kestävyuden. Suomalaisten maiden savimineraalit ovat lähinnä illiitti- ja vermikuliittityyppisiä (Sippola 1974). Koska smektiittityyppiset savimineraalit ovat vähemmistönä, savimaisamme ei esiinny sateen aikana äärimmäisen voimakasta paisumista, joka voisi olla rakennetta huonontava tekijä. Negatiivisesti varautuneet savihiukkaset ovat ns. vaihtuvien kationien välityksellä kiinni toisissaan. Yleisin vaihtuva kationi on kalsium. Liettymistä aiheuttavaa natriumia on vähän. Kaksiarvoisten kationien ( $\text{Ca}^{++}$ ) lisääminen maaveteen flokkuloi maahiukkasia mikromuruiksi. Aggregoituminen perustuu maahiukkasten pinnalla olevan sähköisen kaksoiskerroksen ohenemiseen, mikä tekee mahdolliseksi hiukkasten pääsyn lähelle toisiaan ja liittymisen toisiinsa erilaisin fysikaalis-kemiallisin sidoksin. Koska viljelymaamme eivät sisällä kalkkimineraaleja, kalsiumin alhainen pitoisuus maavedessä voi olla yksi syy maittemme alttiuteen savieroosioon.

Hyvin happamissa maissa esiintyy vaihtuvana kationina kolmiarvoista alumiinia, joka toimii tehokkaana siltana negatiivisesti varautuneiden maahiukkasten välillä. Tämän vuoksi hyvin happamien maiden ojavedet ovat kirkkaita. Maamme voivat sisältää hyvin runsaasti heikosti kiteytyneitä rautaoksideja, jopa yli prosentin maan painosta. Runsaalla rautaoksidipitoisuudella tiedetään olevan maan stabiilisuutta lisäävä vaikutus. Alumiinioksidien merkitys tässä suhteessa on epäselvempi johtuen ehkä alumiinioksidien pienemmästä pitoisuudesta rautaoksideihin verrattuna. Happamuuden lisääntyessä alumiinioksideista vapautuu kolmiarvoista stabiilisuutta lisäävää alumiinia.

Humuspitoisuuden kasvaessa maan murujen kestävyys yleensä paranee. Vanha tumma humus, jonka molekyylihuoto on pallomainen, ei kuitenkaan yksinään ilman rautaoksideja tai savimineraaleja ole tehokas dispersion estäjä. Sen sijaan nauhamaiset mikrobit, juuriston ja lierojen erittämät limamaiset liima-aineet sitovat saveshiukkaset sadetta kestäviksi muruiksi. Lima-aineet stabiloivat maan ns. biohuokosten eli lieron reikien ja juurikanavien seinämät vettä kestäviksi. Valitettavasti maan entsyymit hajottavat herkästi näitä liima-aineita, joten jatkuva mikrobiten ravinnon eli kasvijätteiden lisääminen maahan vasta estää maan muruja hajoamasta. Maahan voidaan lisätä synteettisiä nauhamaisia liima-aineita, jotka muistuttavat luonnon yhdisteitä, mutta hajoavat maassa hitaasti. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi maan stabilointiin paljon käytetyt polyakryyliamidit.

## 3 Tutkimus kalkituskokeiden maanäytteilä

Tutkimuksen tarkoituksena oli 1. selvittää savimaan ominaisuuksien vaikutusta eroosiotaipumukseen, 2. tutkia teollisuudesta saatavien halpojen maanparannusaineiden vaikutusta maahiukkasten liittymiseen toisiinsa ja samalla maan eroosion estokykyyn ja 3. selvittää maan muokkauksen vähentämisen merkitystä yhdistettynä maan parannusaineisiin eroosion torjunnassa. Eroosiotaipumusta tutkittiin kahdella tavalla: 1. käyttämällä sadesimulaatiota tai 2. tasapainottamalla maa – vesi suspensiota. Edellisessä menetelmässä korostuu maan pinnan kestävyys pisaroitten iskulle, jälkimmäinen menetelmä kuvaa lähinnä maan taipumusta dispersioon diffuusiomekanismilla.

### 3.1 Maanäytteet

Neljältätoista savimaan kalkituskokeesta eri puolilta Etelä – Suomea kerättiin maanäytteet sekä kalkituista että kalkitsemattomista koeruuduista 0 – 8 cm:n äestyskerroksesta. Kalkitusaineet on sekoitettu muokkauksella noin 0 – 25 cm:n kerrokseen. Koemaista määritettiin pH, orgaaninen hiili, vaihtuva  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$  ja  $\text{Al}^{+++}$ . Lisäksi määritettiin heikosti kiteytyneiden alumiini- ja rautaoksidien pitoisuus (oksalaattiuuttainen Al ja Fe), orgaaninen ja epäorgaaninen P. Sähkönjohtokyky mitattiin maa – vesilietteestä 1 : 2,5. Koemaiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 1.

### 3.2 Eroosioherkkyyden mittaus sadettamalla

Näytemaan rakenteen stabiilisuutta mitattiin laboratoriossa sadesimulaattorin avulla kahden tunnin ajan sateen voimakkuuden ollessa noin 5 mm tunnissa. Maa kostutettiin varovasti ennen sadetusta. Maasta ei kostumisessa valunut vettä, mutta varsinaisessa kokeessa valuminen alkoi välittömästi. Näytemaata pantiin 5 cm:n paksuinen kerros 40 cm x 50 cm laatikkoon. Maata ei jauhettu millään tavoin, ainoastaan suurimmat kokkareet murrettiin varovasti halkeamia pitkin pienemmiksi. Laatikon kallistuskulma oli 2,5 astetta ja pintavalumisvesi kerättiin näytepulloon. Näytteistä määritettiin haihdutusjäännös kiintoaineen estimoimiseksi, kokonaisfosfori ja vesiliukoinen epäorgaaninen fosfori. Lisäksi estimoitiin valumisvesisuspensiosta anioninvaihtajalla leville käyttökelpoinen fosfori. Haihduntajäännös antaa likiarvon kiinteän aineksen pitoisuudelle valumisvedessä, mutta haihdutusjäännös sisältää kiinteiden hiukkasten lisäksi liukoiset suolat. Valumisveden kiinteän aineksen fosfori on saatu vähentämällä kokonaisfosforista vesiliukoinen epäorgaaninen fosfori. Kiinteän aineen fosfori kuvastaa hyvin eroosion muutoksia kalkituksen ansiosta.

Talukko 1. Koepaikat, lajitekoostumus ja kalkitsemattomien maiden ominaispinta-ala, orgaaninen hiili, oksalaattiuuttainen Fe ja Al ja orgaaninen ja epäorgaaninen P. Happamuus 0,01 M  $\text{CaCl}_2$  suspensiossa kalkitsemattomassa ja kalkitussa maassa. Kalkitusaine koepaikoissa Perniö 2 – Perniö5  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (muurauskalkki), muissa kalsiumkarbonaatti (maatalouskalkki).

Paikka	Saves-% ( $< 2 \mu\text{m}$ )	Hiesu-% ( $2 - 60 \mu\text{m}$ )	Ominaispinta ( $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ )	C %	$\text{Al}_{\text{oks}}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	$\text{Fe}_{\text{oks}}$ ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Org. P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	Epäorg. P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	pH ei kalk.	pH kal k.
Jokioinen 1	59,3	33,4	112,6	3,06	2717	11543	361	438	5,4	6,7
Jokioinen 2	48,6	38,9	98,5	2,06	2406	11965	418	647	5,1	6,2
Jokioinen 3	39,9	43,2	94,3	2,98	1737	9588	393	1113	5,9	6,7
Mietoinen	66,1	26,7	98,4	2,05	1990	9798	500	791	5,2	6,3
Perniö 1	37,6	42,0	78,4	1,93	1454	8090	437	1059	5,8	6,8
Iitti	58,2	25,8	135,3	2,54	2445	10218	591	444	4,8	5,7
Punkalaidun	28,1	51,4	75,5	1,98	2106	9798	264	707	4,5	6,4
Koski TL	62,0	36,1	123,1	4,26	2830	6600	462	688	4,8	6,1
Sjökulla	46,7	43,7	97,0	2,68	2251	9120	439	668	5,5	5,9
Perniö 2	46,7	31,5	121,4	3,31	1917	10000	665	396	5,8	6,5
Perniö 3	41,9	41,5	75,3	1,46	1234	6600	181	1015	6,6	7,0
Perniö 4	38,1	39,7	76,5	1,70	1376	6953	307	871	6,5	6,8
Perniö 5	36,5	42,4	74,0	2,07	1529	7118	672	515	6,1	7,0

### 3.3 Eroosion mittaus maa-vesi suspensiosta

#### 3.3.1 Karbonaattikokeet

Laboratoriossa tutkittiin nopeasti vaikuttavien kalsiumkarbonaattilajien vaikutusta mikromurujen kokoon savimaiden suspensiovedessä. Kalkkimäärä vastasi kymmenen tonnin lisäystä hehtaarille, kun maata sekoitetaan minimimuokkauksella ainoastaan 0 – 5 cm:n kerroksessa. Koemat olivat kenttäkokeiden kalkitsemissä ruuduista.

Koejäsenet ja kalkitusaineet olivat:

1. Alkuperäinen kalkitsematon maa
2. Aktiivinen kalkkiteollisuuden sivutuote ns. ”piippukalkki”, lähinnä pehmeää kalsiumkarbonaattia
3. Hienoksi jauhettu magnesiumkalkki
4. Hienojakoinen saostettu kalsiumkarbonaatti

Magnesiumkalkki on otettu mukaan, koska on epäilyjä, että magnesiumkalkki saattaisi jopa huonontaa savimaiden mururakenteen kestävyyttä. Savimaata (18 g) ja kalkkia (0,36 g) lisättiin ensin tislattuun veteen (450 ml) ja suspensiota sekoitettiin muovisylinterissä koneen avulla puoli tuntia. Sitten seurattiin lisätyn kalkin liukenemista ja tasapainottumista pH-mittarin avulla. Kaksi kertaa viikossa suspensiota sekoitettiin varovasti käsin minuutin ajan. Kolmen ja puolen viikon kuluttua kokeen alkamisesta sekoitettiin käsin suspensiota vielä kerran ja sen annettiin seisoa vuorokauden. Tällöin maamurut painuivat koesylinterin pohjaan ja erilliset saveshiukkaset jäivät suspensioon. Suspensiosta sifonoitiin analyysiä varten ylin 200 ml, jolloin flokkuloitunut saves ei tule analyysiin mukaan. Sifonoidusta näytteestä määritettiin suspension nestefaasin kationit, johtokyky, totaalifosfori, vesiliukoinen fosfori ja leville käyttökelpoinen fosfori. Kiinteän aineen määrää ei suspensiosta määritetty, koska lienneet suolat ja hienojakoisen kalkin pienimmät hiukkaset häiritsevät määrittystä. Sifonoidun suspension kiinteän aineen sisältämä fosfori oli mittarina kalkituksen vaikutukselle.

#### 3.3.2 Kipsikokeet

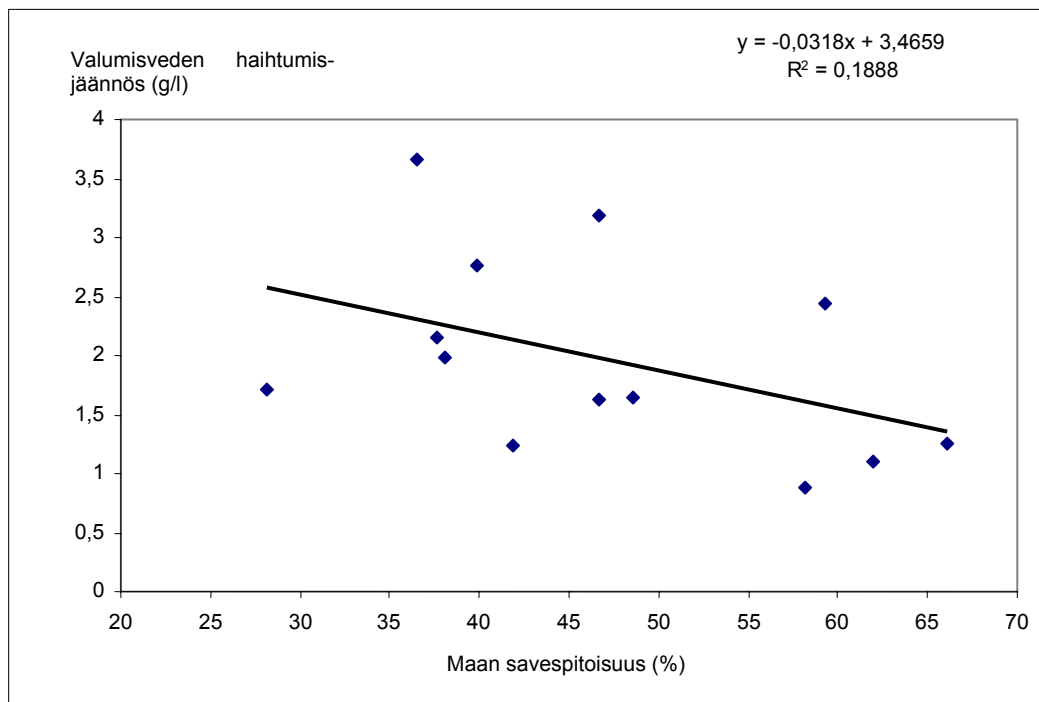
Kipsin lisääminen maahan lisää maanesteen kalsiumpitoisuutta, mutta ei kasvata maan negatiivista varaustiheyttä, kun taas kalkitus lisää sekä varaustiheyttä että kohottaa maanesteen kalsiumionipitoisuutta. Koejärjestely oli samanlainen kuin kontrolloiduissa kalkituskokeissa laboratoriossa eli sylinteriin lisättiin koemaata 18 g ja vettä 450 ml. Kokeet tehtiin neljän kalkituskokeen maalla ja kidevedellisellä ja kidevedettömällä kipsillä. Kidevedetöntä kipsiä lisättiin 0, 0,05, 0,1 ja 0,15 g. Kidevedellistä kipsiä lisättiin 0, 0,063, 0,095, 0,127 ja 0,189 g. Tasapainotusaika oli karbonaattikokeita vain 4 vuorokautta ensimmäisestä sekoituksesta suspension sifointiin.

### 3.4 Kalkitsemissä maiden eroosioherkkyys

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty kenttäkokeista otettujen kalkitsemissä maiden valumisveden haihtumisjäännöksen ja valumisveden kiinteitten hiukkasten sisältämän fosforin riippuvuus savespitoisuudesta. Sadesimulaation tuloksista käy esille, että haihtumisjäännös ja valu-

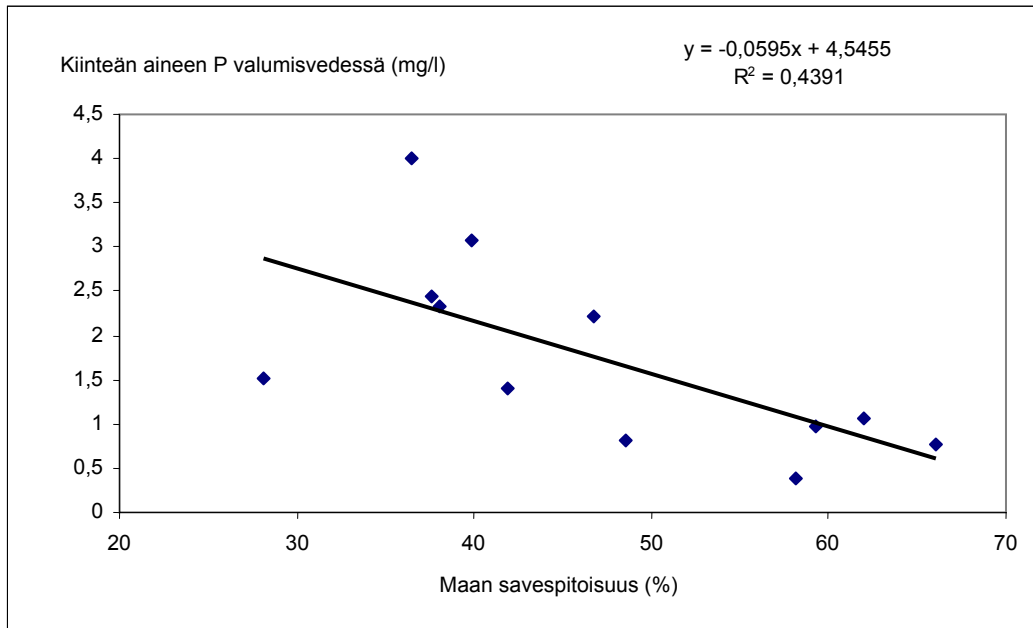
misvedessä maapartikkeleiden mukanaan kuljettama fosfori ovat negatiivisessa korrelaatioissa maan savespitoisuuden kanssa. Savimaan jäykkyyden kasvaessa paranee kestävyys pisaroiden pommitukselle eli kuorettumisalttius pienenee. Käytännön havainnot pellolla osoittavat, että nimenomaan kevyiden ja hiesuisten savien pinnan liettymisalttius on suuri.

Sylinterikokeissa on mitattu maan kestävyyttä veden liottavalle vaikutukselle. Koska maanäytteet otettiin keväällä äestyskerroksesta parin viikon sisällä kylvöstä, maan muruissa on paljon tuoreita leikkauspintoja, joista maahiukkaset helposti pääsevät hajaantumaan lämpöliikkeessä veteen. Kuvan 3 mukaan maan jäykkyyden kasvaessa suspensiossa olevien partikkeleiden sisältämän fosfori pitoisuus kasvaa. Tulosten mukaan savespitoisuus vaikuttaa päinvastaisella tavalla maan eroosioalttiuteen diffuusioeroosiossa kuin pommitettaessa sadepisaralla maata.

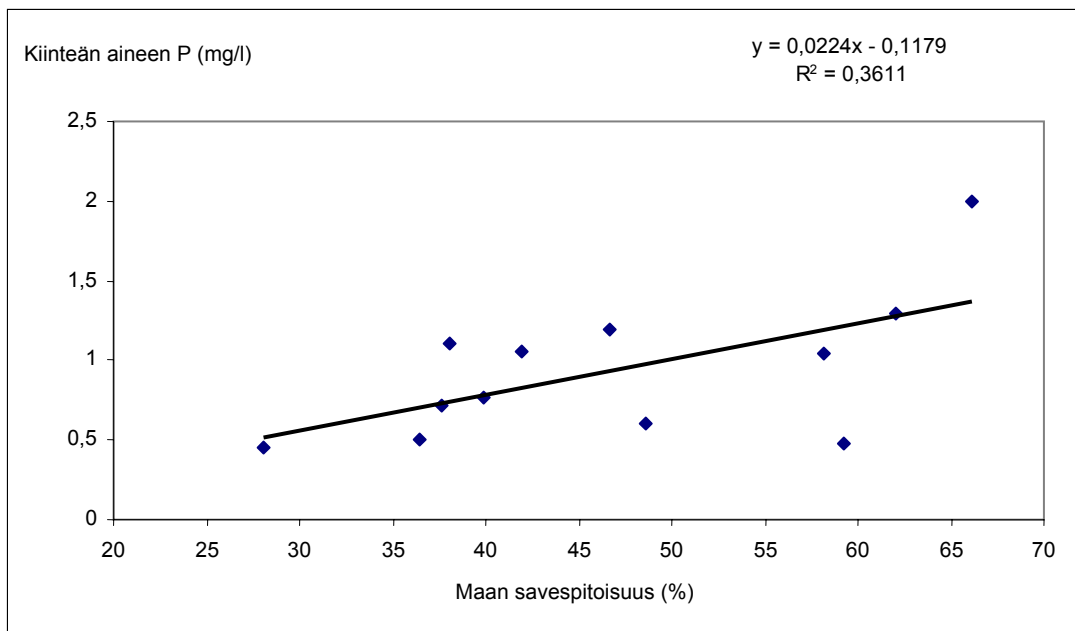


Kuva 1. Haihtumisjäännös sadesimulaation valumisvedessä ja koemaan savespitoisuus. Kalkitsemattomat maat.

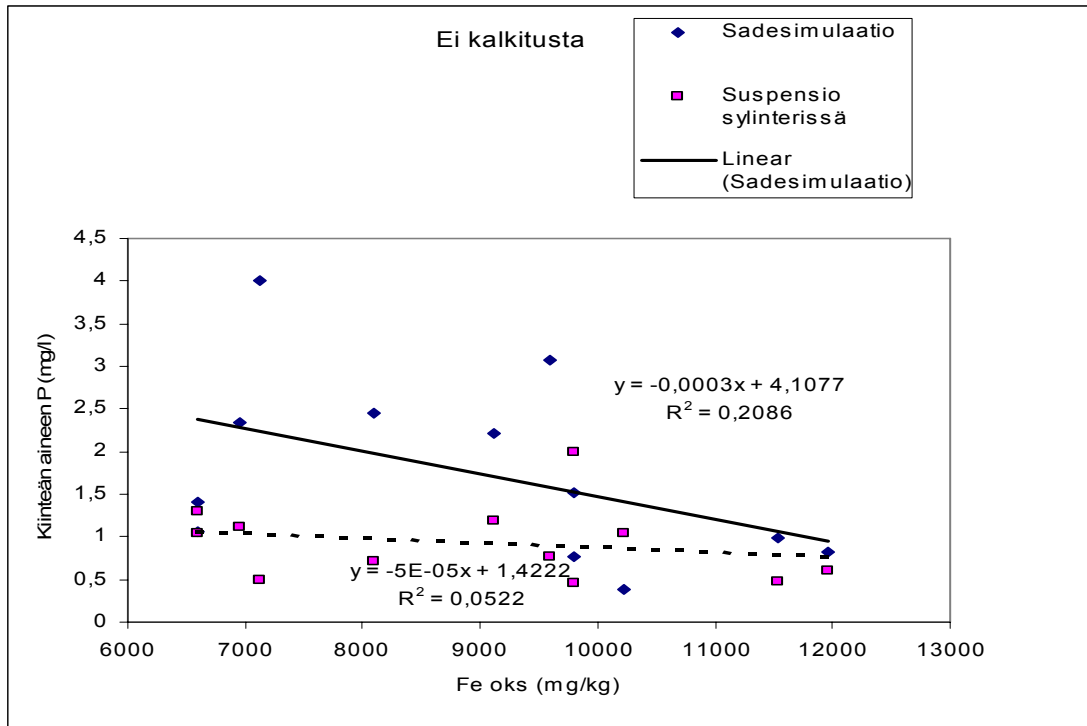
Savimaiden murujen kestävyys ei korreloinut maan orgaanisen hiilen kanssa. Kokonaisuhumuspitoisuus ei ehkä ole hyvä mitta orgaanisen aineksen merkitykselle. Nauhamaisten liima-aineiden selektiivinen uutto on ilmeisesti parempi tapa määrittää stabiloivaa orgaanista ainetta. Sen sijaan kuvan 4 mukaan heikosti kiteytyneet rautaoksidit stabiloivat maan rakennetta ja siten vähentävät eroosiota.



Kuva 2. Kiinteän aineen P sadesimulaation valumisvedessä ja ja koemaan savespitoisuus. Kalkitsemattomat maat.



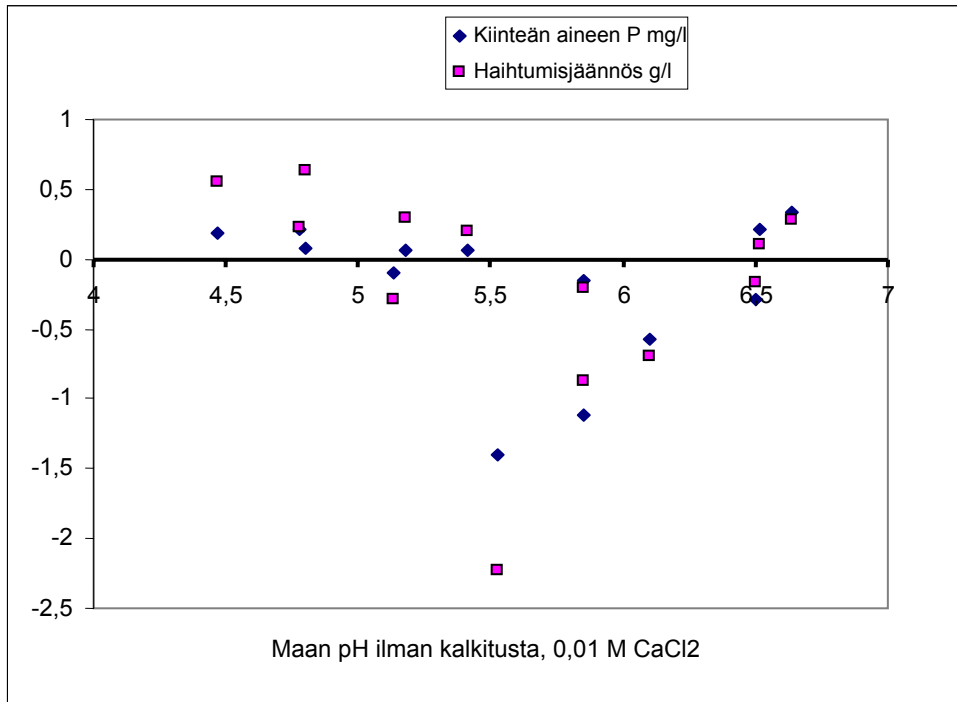
Kuva 3. Kiinteän aineen P suspensiossa sylintereissä ja koemaiden savespitoisuus. Kalkitsemattomat maat.



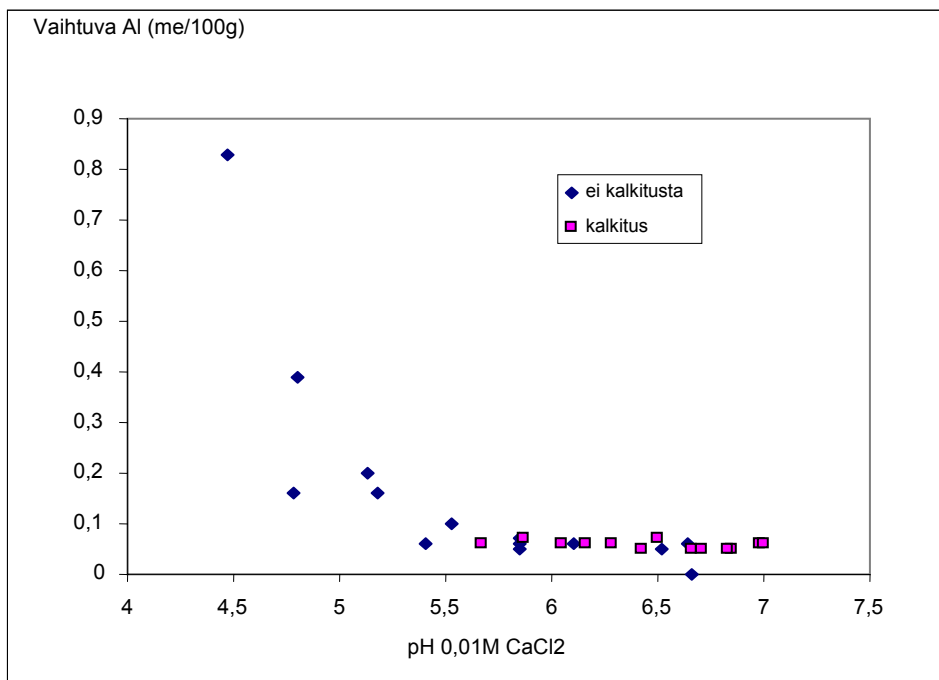
Kuva 4. Kiinteän aineen fosfori valumisvedessä (sadesimulaatio) ja suspensiovedessä (sylinteriko-keet) ja maan ammoniumoksalaatilla uutetuttu rauta.

### 3.5 Kalkituksen vaikutus valumisveden laatuun sadesimulaatiossa

Kuvassa 5 on esitetty kalkituksen vaikutus valumisveden haihduntajäännökseen ja valumisvedessä olevien kiinteiden hiukkasten sisältämän fosforin määrään. Tulokset osoittivat, että kun alkuperäinen maan pH (mitattuna 0,01 M CaCl<sub>2</sub> -liuoksessa) on alle 5,5, kalkitus on hiukan lisännyt eroosiota sadesimulaatiossa. Tämä on luonnollista, koska mittausten mukaan hyvin happamissa maissa on kuvan 6 mukaan kolmenarvoista alumiinia vaihtuvana. Kolmiarvoinen alumiini-ioni on tunnetusti tehokas veden kirkastaja. Tietenkään maiden pH arvoa ei voida pitää alle viiden, koska alumiini-ioni on myrkyä kasveille. Kun alkuperäinen pH on ollut 5,5 – 6,3, kalkitus on selvästi vähentänyt eroosiota ja fosforin huuhtoutumista. Syynä voi olla kuvan 7 mukaan maan johtokyvyn (liuenneiden suolojen pitoisuuden) suureneminen kalkituksella, kun kalkitsematon maa ei ole erityisen hapanta. Kun pH on ollut alun perin yli 6,5, kalkitus on lisännyt eroosiota. Tulosta voidaan pitää vielä epävarmana, koska kalkituksen vaikutus maan pH-arvoon on jäänyt pieneksi. Tuloksien mukaan hyvin happamia maita pitää kalkita kunnolla, jotta kalkituksen negatiiviselta vaikutukselta maan rakenteeseen välttyttäisiin. Taulukko 1 pH-arvot osoittavat, että kalkituissa ruuduissa happamuus on vaihdellut voimakkaasti. Hyvin happamat maat olisivat ilmeisesti tarvinneet annettua suuremman kalkkimäärän.

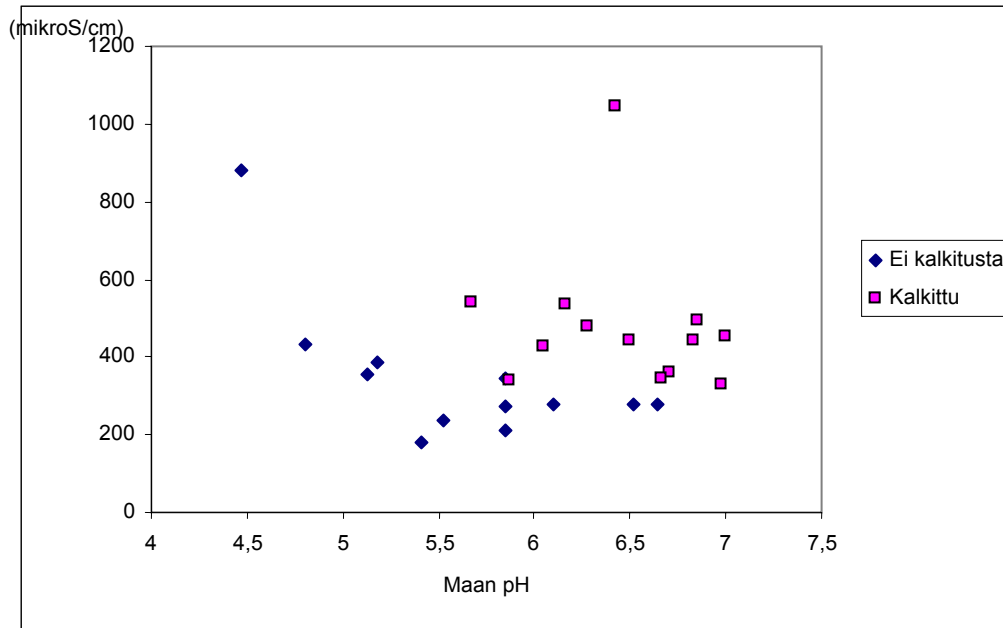


Kuva 5. Haihtumisjäännöksen ja kiinteän aineen P:n muutokset sadesimulaation valumavedessä kalkituksen seurauksena. Maanäytteet kenttäkokeista kalkitsemattomista ja kalkituista ruuduista. Eri toistoista otetut maat sekoitettu keskenään ennen sadesimulaatiota.

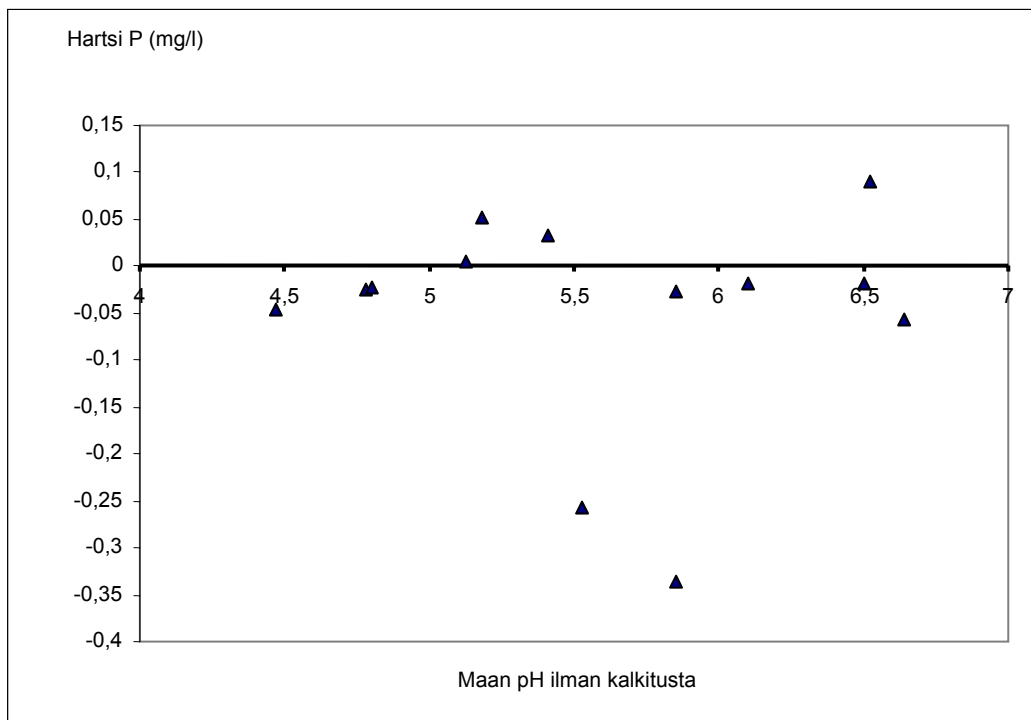


Kuva 6. Kaliumkloridiin vaihtuvan alumiinin ja pH:n (0,01M CaCl<sub>2</sub>) välinen riippuvuus. Maanäytteet kenttäkokeista kalkitsemattomista ja kalkituista maasta. Eri toistoista otetut maat sekoitettu keskenään ennen mittausta.

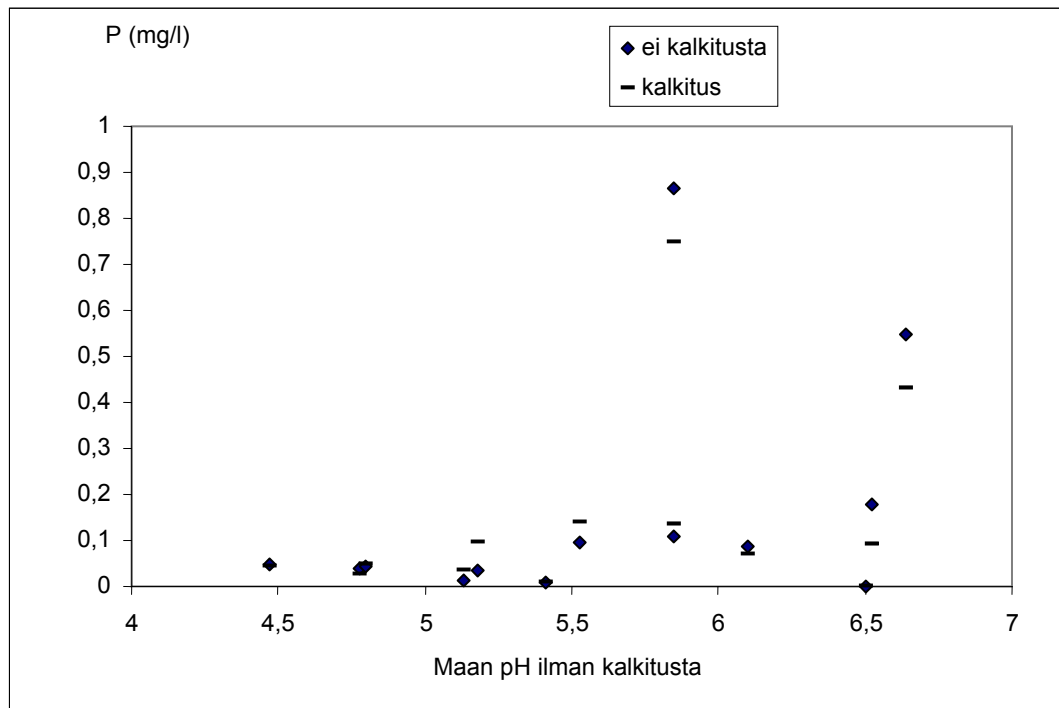




Kuva 7. Maan pH ja johtokyky maasuspensiossa 1:2,5. Maanäytteet kenttäkokeista kalkitsemattomista ja kalkituista ruuduista. Kerranteista otetut maat sekoitettu keskenään ennen mittausta.



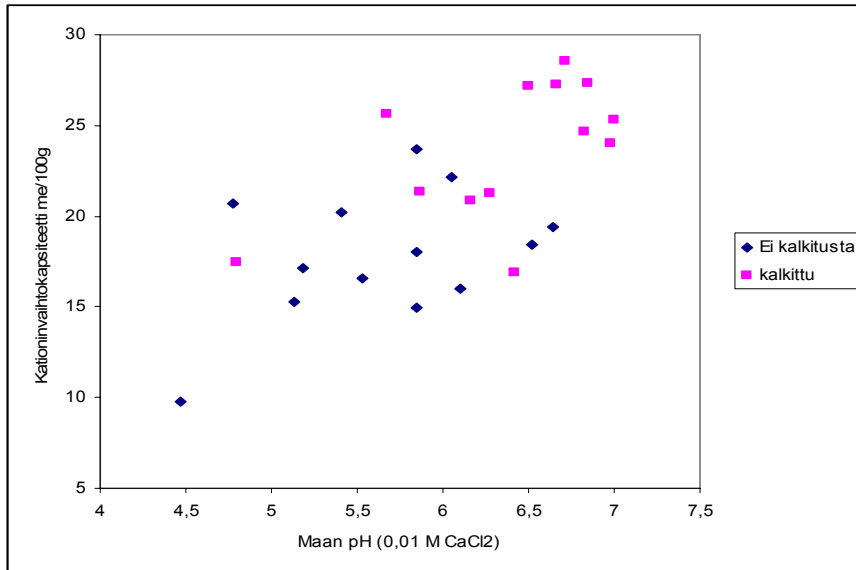
Kuva 8. Kalkitsemattoman maan pH ja hartsilla uuttuvan P:n muutos kalkituksella.



Kuva 9. Kalkitsemattoman maan pH ja vesiliukoinen fosfaatti sadesimulaation valumisvedessä.

Anioninvaihtaja imee maasuspensiosta liuenneen fosforin ja maahiukkasten pinnoilta ns. labiilin eli helposti liikkeelle lähtevän fosforin estimoiden näin leville käyttökelpoista fosforia. Enimmäkseen kalkitus on vähentänyt leville käyttökelpoista fosforia valumisvedessä (kuva 8). Kuvan 9 mukaan kalkitus ei ole kohottanut valumisvedessä epäorgaanisen liukoisin fosforin pitoisuutta, jos liukoisin fosforin pitoisuus on ollut hyvin pieni. Jos liukoisin fosforin pitoisuus on ollut korkea, kalkitus on alentanut pitoisuutta. Tulos on sopusoinnussa Hartikaisen (1983) tutkimuksen kanssa. Kalkituksella voidaan leikata korkeita vesiliukoisin fosforin pitoisuuksia.

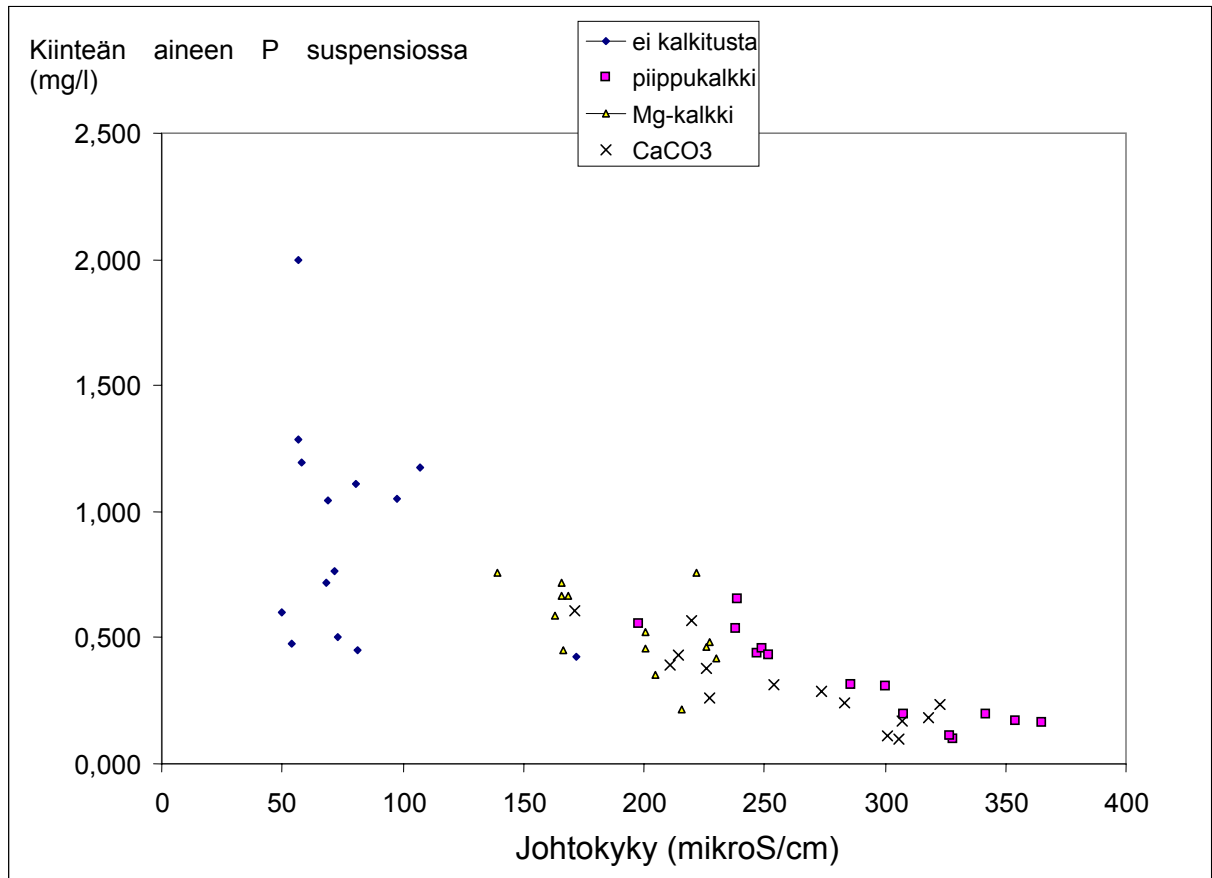
Summaamalla määritetyt vaihtuvat kationit ekvivalentteina saadaan koemaille kationinvaihtokapasiteetti maan painoyksikköä kohden. Vaihtokapasiteetti tunnetusti korreloi positiivisesti savespitoisuuden ja humuspitoisuuden kanssa. Kun vaihtokapasiteetti jaetaan maa-aineksen ominaispinta-alalla (usein ilmaistuna neliömetreinä maagrammaa kohden), on tuloksena negatiivisten varausten tiheys maassa. Kalkitus ei muuttanut kenttäkoemaiden ominaispinta-alaa. Sen sijaan kalkitus lisäsi huomattavasti maan toimivaa vaihtokapasiteettia (kuva 10) ja siten pinnan keskimääräistä negatiivista varaustiheyttä.



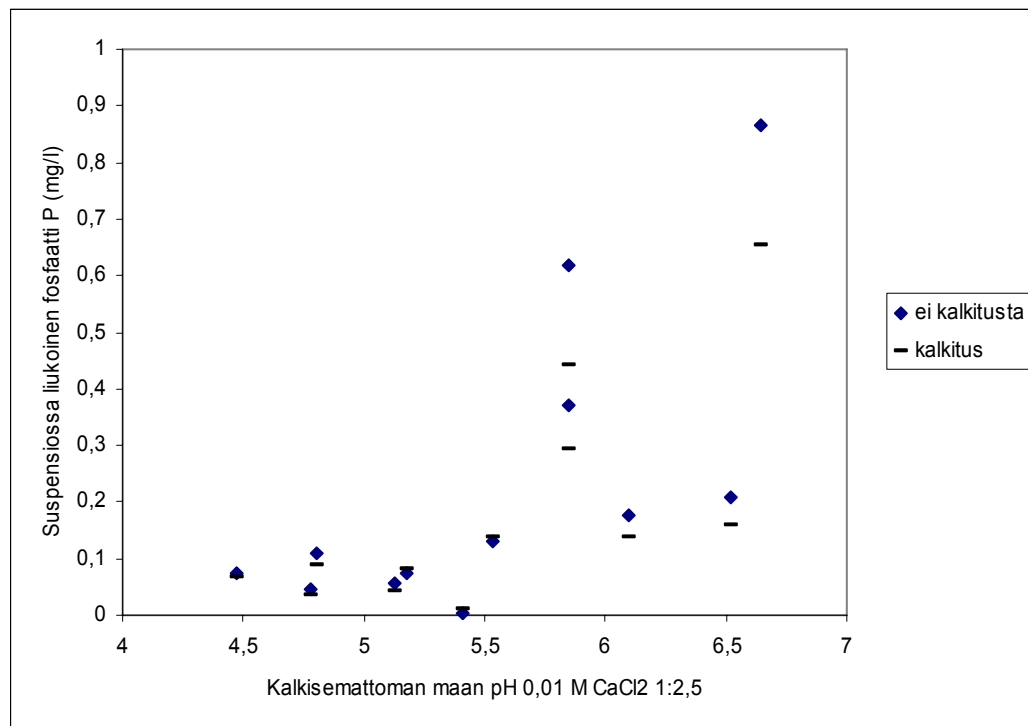
Kuva 10. Kationinvaihtokapasiteetti kalkitsemattomissa ja kalkituissa kenttäkoemaissa.

### 3.6 Kalkituksen vaikutus suspensioveden laatuun sylinterikoikeissa

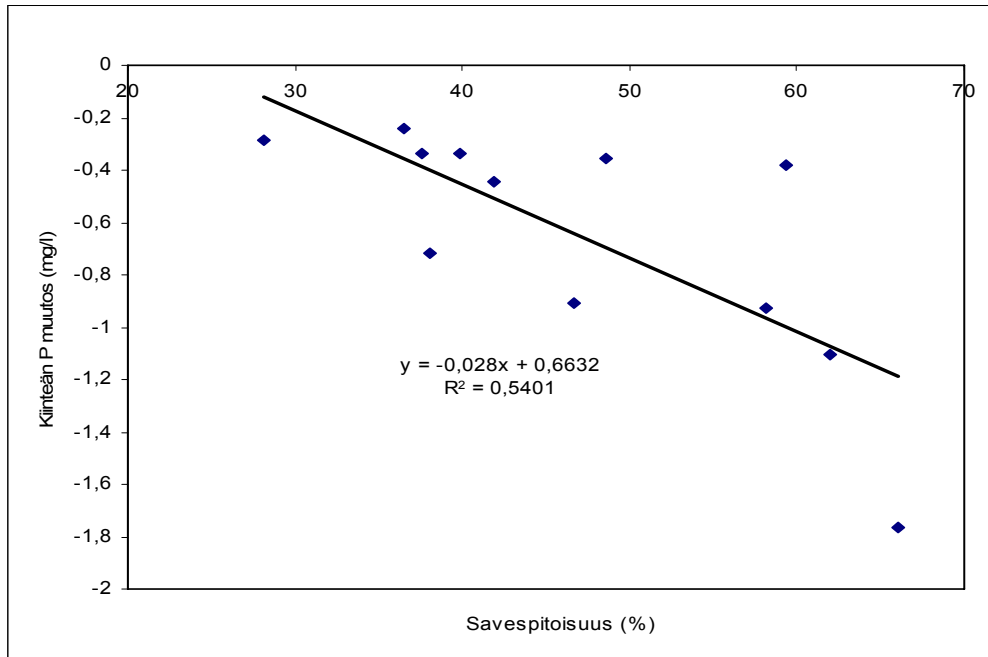
Kaikki kalkkilajit vähensivät voimakkaasti partikkelimaista eroosiofosforia kaikissa maissa. Saostetulla kalsiumkarbonaatilla ja ”piippukalkilla” maasuspension pH nousi välille 7,4 – 8,5. Hapen puute on kalkin lisäksi voinut olla pH-arvoja kohottava tekijä. Kalkitus nosti suspensioiden sähkönjohtokykyä huomattavasti. Koska koeaika oli lyhyt, tulokset osoittivat lähinnä kalkituksen puhtaan fysikaalis-kemiallisen vaikutuksen. Kuvassa 11 on esitetty suspensioveden maahiukkasten fosforin ja johtokyvyn välinen riippuvuus. Kalkitus ei lisännyt suspensiovedessä vesiliukoisen epäorgaanisen fosforin pitoisuutta (kuva 12). Kalkitus päinvastoin alensi korkeimpia liukoisen fosforin pitoisuuksia. Piippukalkki ja saostettu kalsiumkarbonaatti lisäsivät huomattavasti suspensiovedessä kalsiumionien pitoisuutta. Kohonnut kalsiumionipitoisuus nesteessä pakottaa fosfaatti-anioneja adsorboitumaan maahiukkasten pinnoille, jolloin valumisvedessä olevan liukoisen fosforin pitoisuus voi kalkituksen ansiosta jopa pienentyä. Mg-kalkki kohotti veden Ca- ja Mg-ionipitoisuutta suunnilleen yhtä paljon. Piippukalkilla oli suunnilleen sama teho eroosion pienentämisessä kuin puhtaalla kalsiumkarbonaatilla. Sen sijaan Mg-kalkki torjui vähemmän eroosiota kuin kalsiumkarbonaatti, mutta vaikutti kuitenkin eroosiota pienentävästi ja samalla alensi leville käyttökelpoisen fosforin konsentraatiota. Kuten kuva 13 osoittaa, kalkituksen suspension partikkelifosforia alentava vaikutus oli sitä voimakkaampi, mitä korkeampi oli maan sa-vepitoisuus.



Kuva 11. Sylinterisuspensioiden sähkönjohtokyky ja kiinteän aineen P.



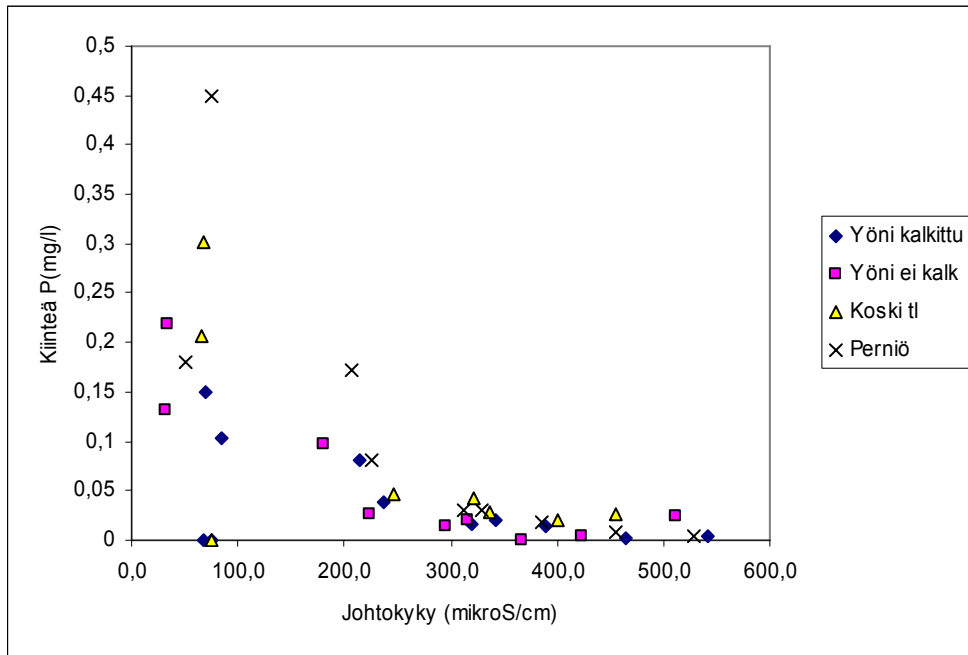
Kuva 12. Kalkitsemattoman maan pH 0,01 M CaCl<sub>2</sub> ja suspension liukoinen P sylintereissä. Saostetun kalsiumkarbonaatin vaikutus.



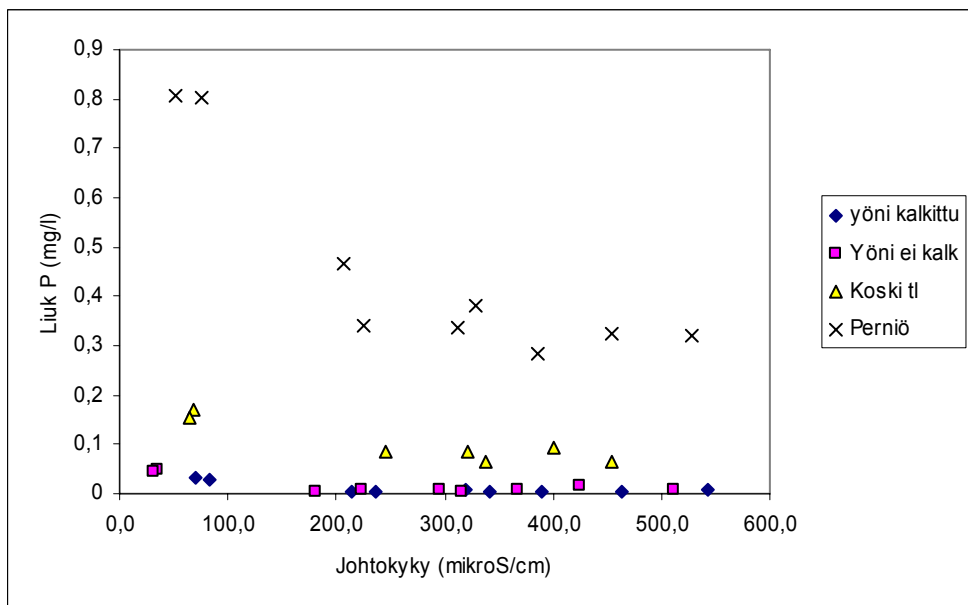
Kuva 13. Saostetulla kalsiumkarbonaatilla saatu partikkeleiden P:n alenema sylinterisuspensiossa ja koemaan savespitoisuus.

### 3.7 Kipsin vaikutus veden laatuun

Tulokset osoittivat (kuvat 14 ja 15), että pieni määrä kipsiä alentaa maa – vesisuspensiossa tehokkaasti maapartikkeleista vapautuvan fosforin pitoisuutta, mikä perustuu kipsin maa-hiukkasia flokkuloivaan vaikutukseen suolapitoisuuden (kalsiumionipitoisuuden) nousun johdosta. Lisäksi kipsi alensi liukoisen fosforin pitoisuutta. Kidevedettömän ja kidevedellisen kipsin välillä ei ollut oleellista eroa tehokkuudessa. Koska kipsiä on runsaasti teollisuuden sivutuotteena ja Suomessa on kipsille ollut vaikea löytää laajaa käyttöä, kipsi eroosion torjunnassa on jatkotutkimuksissa varsin varteen otettava tehoaine. Johtokyky 200 mikroS/cm kuvissa vastaa kipsimäärää noin 1,5 tonnia hehtaarille 0 – 5 cm:n kerrokseen sekoitettuna.



Kuva 14. Suspension johtokyky kipsikokeissa ja suspension partikkeleiden sisältämä P.



Kuva 15. Suspension johtokyky kipsikokeissa ja suspension liukoinen fosfaatti P.

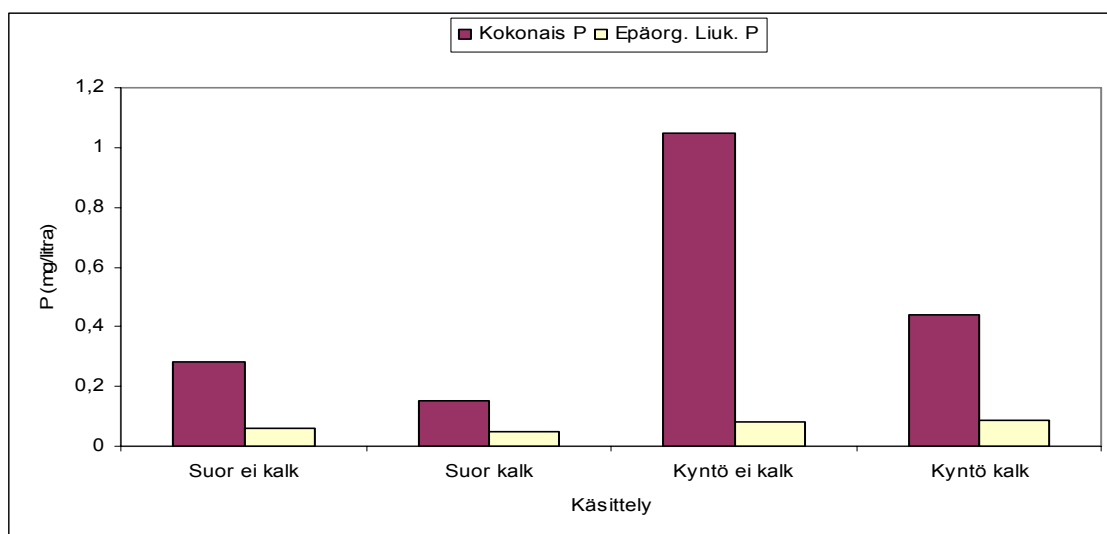
Toisin kuin kalsium- tai magnesiumkarbonaatit kipsi ei suurena voimakkaasti vaihtuvien kationien perusteella laskettua maan vaihtokapasiteettia, mutta kohottaa Suomen oloissa huomattavasti maaveden sähkönjohtokykyä. Tulosten mukaan kipsi on tehokas maahiukkasten flokkuloija. Näyttää siltä, että maanparannusaineiden vaikutus perustuu lähinnä maaveden kalsiumsuolapitoisuuden ja samalla johtokyvyn kohoamiseen. Kationinvaihtokapasiteetin ja samalla varaustiheyden muutoksella lienee vähäinen merkitys.

## 4 Maanparannusaineet ja muokkaustapa

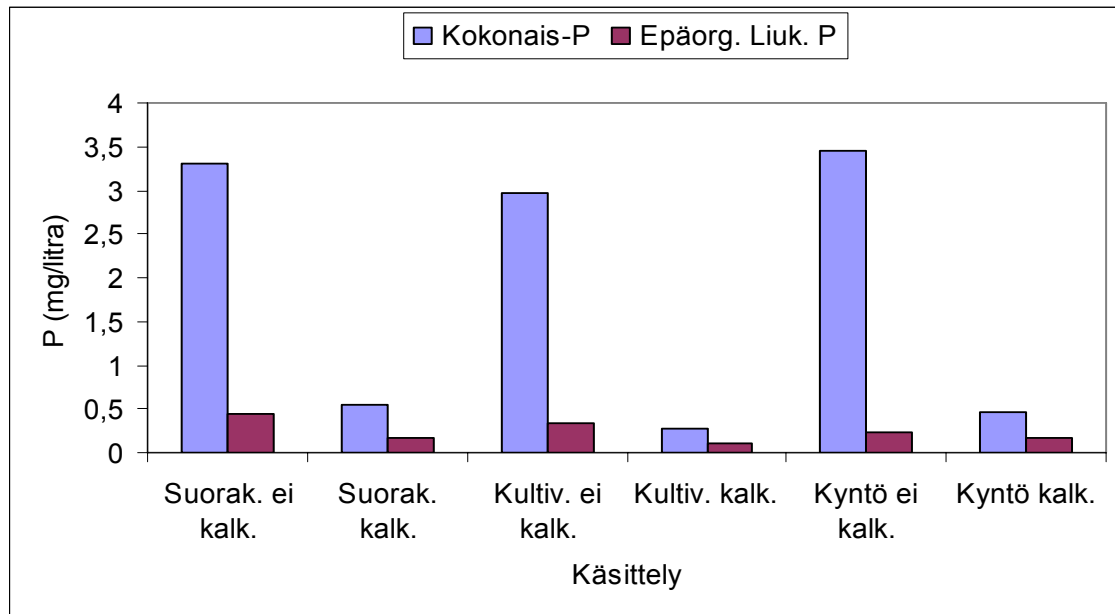
### 4.1 Muokkaustapa ja kalkitus sadesimulaatiossa

Tunnetusti muokkauksen minimoiminen ja suorakylvö pienentävät savimaan eroosiota. Koska nopeasti reagoiva kalsiumkarbonaatti estää savimaan eroosiota, maan rakenteen säilyttävien sylinterinäytteiden avulla tutkittiin, kuinka tällainen karbonaatti (piippukalkki) vaikuttaa eri tavoin muokatuissa maissa. Mittaukset tehtiin Suomen Ympäristökeskuksen Aurajoen savimaakentältä, jossa koejäsenenä olivat normaalikyntö ja suorakylvö. Muokauskokeista otetuista maanäytteistä mitattiin niiden eroosiotaipumusta laboratoriossa sadesimulaatiota käyttäen. Näytteenottohetkellä kokeen ikä oli viisi vuotta. Sadesimulaatiossa maan pinnalle levitettiin nopeasti vaikuttavaa kalkkia (5 tn/ha). Sadesimulaatio osoitti, että nopeasti reagoiva kalkki vähentää tehokkaasti kynnetyn maan eroosiota ja yllättäen se vähensi eroosiota myös suorakylvetyllä maalla. Kuten oli odotettavissa, suorakylvetyt maan eroosiotaipumus oli paljon alhaisempi kuin kynnetyn (kuva 16).

Aurajoen kentän tuloksista ei voitu osoittaa kalkituksen vaikutusta valumisveden liukoisen fosforin pitoisuuteen. Muokkaustavan ja nopeasti reagoivan kalkin yhteisvaikutuksen tutkimista jatkettiin ottamalla rakenteen säilyttävät sylinterinäytteet myös Jokioisten muokauskokeesta, jossa koejäsenenä oli normaalikyntö, syyskultivointi ja suorakylvö. Näytteenottohetkellä kokeen ikä oli 5 vuotta. Muokkaustavasta riippumatta nopeasti vaikuttava kalkki alensi voimakkaasti maan pintaveden totaalifosforipitoisuutta ja myös liukoisen epäorgaanisen fosforin pitoisuutta (kuva 17).



Kuva 16. Piippukalkin 5 tn/ha vaikutus kynnetyn ja suorakylvetyt maan läpi valuneen veden totaalija liukoisen fosforin pitoisuuksiin. Maan rakenteen säilyttävät näytteet on otettu Suomen Ympäristökeskuksen Aurajoen savimaakentältä. Näytteenottohetkellä kokeen ikä 5 vuotta. Tulokset keskiarvoja neljästä kerranteesta. Kolme sadetusta ennen pintakalkitusta ja kolme sadetusta kalkituksen jälkeen. Yksi sadetuskerta 15 mm. Simulaatiossa ei kerääntynyt pintavettä. Maanäytteet 0 – 35 cm:n kerroksesta. Näytteen läpimitta 15 cm.

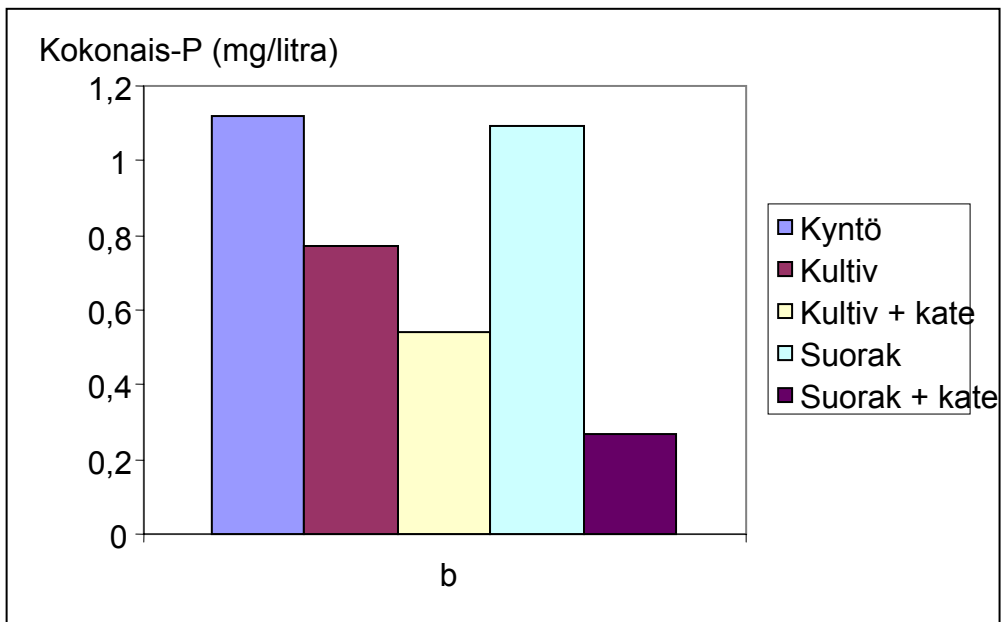
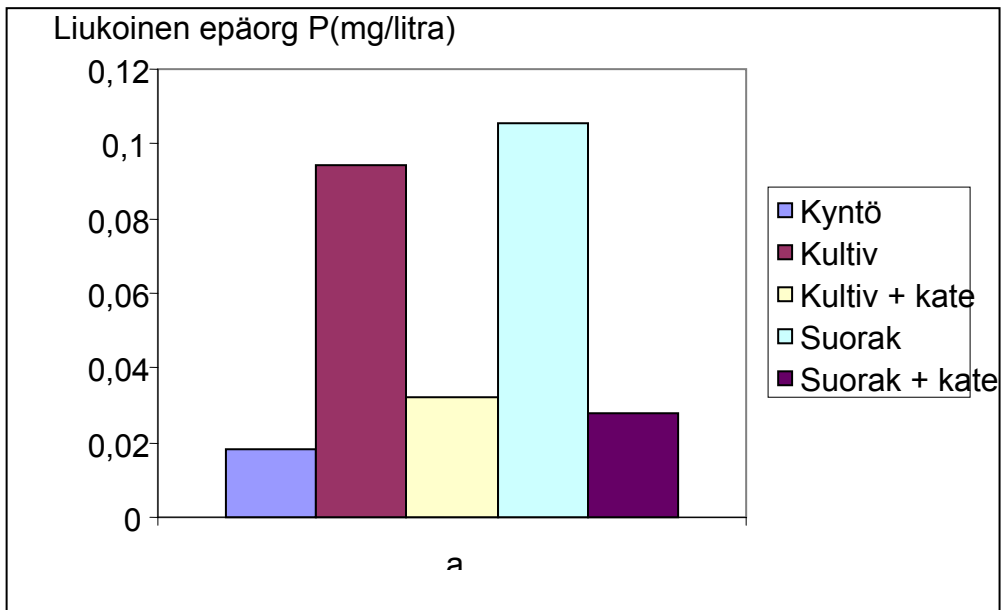


Kuva 17. Piippukalkin 5 tn/ha vaikutus kynnetyn, kultivoidun ja suorakylvetyn maan pinnalle sadesimulaatiossa kerääntyneen veden totaali- ja liukoisen fosforin pitoisuuksiin. Maan rakenteen säilyttävät näytteet otettu Jokioisilta MTT:n savimaakentältä. Näytteenottohetkellä kokeen ikä 5 vuotta. Tulokset keskiarvoja neljästä kerranteesta. Kolme sadetusta ennen pintakalkitusta ja kolme sadetusta kalkituksen jälkeen. Yksi sadetuskerta oli 15 mm. Näytteet eivät juurikaan läpäisseet vettä ja simulaatiossa sadetettu vesi kertyi näytteiden pinnalle. Maan näytteet 0 – 50 cm:n profiileita. Näytteen läpimitta 15 cm. Maan savespitoisuus: 0 – 20 cm 61,7 % ja 20 – 40 % 80,8 %. Orgaanista hiiltä vastaavasti 2,7 % ja 1,0 %.

## 4.2 Muokkaustapa- ja nollakuitukokeen maanäytteiden sadesimulaatio

Syksyllä 2005 otettiin vielä maan rakenteen säilyttävät sylinterinäytteet Jokioisten 5 vuotta sitten perustetulta nollakuitukokeesta. Toisena koetekijänä on muokkaustapa: kyntö, syyskultivointi ilman kyntöä ja suorakylvö. Toisena koetekijänä nollakuitu: ilman kuitua ja kuitua lisätty 60 tn/ha. Levitetty kuitumäärä sisältää 20 tn kuiva-ainetta /ha, josta puolet on ligniiniin, selluloosan ja hemiselluloosan seosta ja puolet eli 10 tn/ha kalsiumkarbonaattia. Kuitu on teollisuuden sivutuote, jota syntyy mekaanisessa paperikuidun valmistuksessa. Saadut tulokset osoittavat (kuvat 18a ja 18b), että nollakuidun valumisveden laatua parantava vaikutus säilyy maassa hyvin voimakkaana vähintään 5 vuotta.





Kuvat 18a ja 18b. Profiilinäytteet 0 – 40 cm otettu kokeesta, jossa kuitu 60 tn/ha levitetty 5 vuotta aikaisemmin maan pinnalle. Näytteen läpimitta 15 cm. Profiilinäytteiden alkuperäinen kosteus vastasi suunnilleen kenttäkapasiteettia. Sadetus tunnin aikana 5 mm. Liukoisen epäorgaanisen fosforin ja totaalifosforin pitoisuudet profiilien läpi tulleesta vedestä. Tulokset 4 profiilin keskiarvoja. Maan savespitoisuus: 0 – 20 cm 46,1 % ja 20 – 40 cm 54,7 %. Orgaanista hiiltä vastaavasti 2,5 ja 1,2 %.

## 5 Kirjallisuusluettelo

- Einstein, A. 1905. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik* 17: 549 – 193.
- Hartikainen, H. 1983. Effect of liming on phosphorus in two soils of different organic matter content. II Changes in the availability of phosphorus to turnip rape (*Brassica campestris*). *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 55: 355 – 362.
- Paasonen-Kivekäs, M., Karvonen, T. & Vakkilainen, P. 2000. Vesitalouden säädön vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen. *Salaojituksen Tutkimusyhdistys ry:n tiedote* 25: 8 – 40.
- Puustinen, M., Tattari, S., Koskiaho, J. & Linjama, J. 2006. Influence of seasonal and annual hydrological variations on erosion and phosphorus transport from arable areas in Finland. *Soil & Tillage Research*. In press.
- Sippola, J. 1974. Mineral composition and its relation to texture and to some chemical properties in Finnish subsoils. *Annales Agriculturae Fenniae* 13: 169 – 234.
- Turtola, E. & Paajanen, A. 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management* 28: 295-310.
- Uusitalo, R. & Ekholm, P. 2003. Phosphorus in runoff assessed by anion exchange resin extraction and an algal assay. *Journal of Environmental Quality* 32: 633-641.
- Uusitalo, R., Turtola, E., Kauppila, T. & Lilja, T. 2001. Particulate phosphorus and sediment in surface runoff and drainflow from clayey soils. *Journal of Environmental Quality* 30: 589-595.
- Uusitalo, R., Turtola, E., Puustinen, M., Paasonen-Kivekäs, M. & Uusikämpä, J. 2003. Contribution of particulate phosphorus to runoff phosphorus bioavailability. *Journal of Environmental Quality* 32: 2007-2016.

## II FLOKKULAATIO TUTKIMUS POLYAKRYYLIAMIDILLA

### 1 Johdanto

Koska maan kolloidinen fraktio ( $< 1 \mu\text{m}$ ) omaa erittäin suuren ominaispinta-alan ja sähkövarauksen, se on osallisena maan keskeisissä prosesseissa kuten adsorptiossa, flokkulaatiossa, dispersiossa, paisumisessa ja kulkeutumisessa. Flokkulaatio on prosessi, jossa yksittäiset maahiukkaset kiinnittyvät toisiinsa. Tämän vastakohtaa kutsutaan dispersioksi (esim. Goldberg ym. 2000). Hogg (2000) jaottelee flokkulaatioilmiön kolmeen seuraavaan vaiheeseen i) hienojakoista maa-ainesta sisältävässä suspensiossa vallitsee epätasapaino ii) flokkien muodostuminen ja kasvu, ja iii) flokkien kestävyys heikkenee tai tapahtuu mekaanista murtumista. Synteettisten orgaanisten polymeerien avulla voidaan vaikuttaa saveishiukkasten välisiin vuorovaikutuksiin. Polymeeri-maa -vuorovaikutukset ovat riippuvaisia polymeerin pintavarauksesta ja molekyyliarakenteesta, molekyyli-massasta ja -koosta. Vuorovaikutusta sääteleviä keskeisempiä maan ominaisuuksia ovat taas saveksen määrä, mineralogia, maanesteen pH sekä sen ionivahvuus ja koostumus (Seibold 1984).

Polyakryyliamidit (PAM) ovat synteettisiä polymeerejä, jotka on valmistettu akryyliamidista (AMD) kemiallisen polymerointiprosessin kautta. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki rakenteen periaatteesta. Sähköisiltä ominaisuuksiltaan PAM-yhdisteet voivat olla joko varauksettomia, anionisia tai kationisia. Yhdisteiden varustiheys vaihtelee suuresti, ja ne voidaan luokitella sekä ei-ionisiin ( $< 1\text{--}2\%$ ), pienen ( $< 10\%$ ), keskisuuren ( $10\text{--}30\%$ ) tai suuren ( $> 30\%$ ) varaustiheyden omaaviin. Varaustiheys muuttuu hydrolyysin (vedellä hajottamisen) seurauksena, jolloin polymeerin  $\text{NH}_2$ -ryhmiä korvataan  $\text{OH}$ -ryhmillä. Vastaavasti molekyyli-massan mukaan yhdisteet jaotellaan pieniin ( $< 10^5 \text{ g mol}^{-1}$ ), keskisuuriin ( $10^5\text{--}10^6 \text{ g mol}^{-1}$ ), suuriin ( $1\text{--}5 \cdot 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ ) ja erittäin suuriin ( $> 5 \cdot 10^6 \text{ g mol}^{-1}$ ) (Barvenik 1994).

Koska PAM-yhdisteet ovat vesiliukoisia, pitkäketjuisia, joustavia, polyfunktionaalisia ja niissä on erityyppisiä alueita, ne voivat kiinnittyä saveishiukkasten pinnoille lukuisten eri mekanismien avulla. Ei-ionisen PAM-yhdisteen sitoutuminen tapahtuu pääasiallisesti varsin heikkojen sähköstaattisten vetovoimien avulla (van der Waalsin voimat). Myös kationiset PAM-yhdisteet sitoutuvat negatiivisesti varattujen saveishiukkasten pinnoille pääasiallisesti sähköstaattisten vuorovaikutusten kautta. Kationisen PAM:n sitoutuessa trimetyyliammonium syrjäyttää saveksen varauspinnoilta epäorgaanisia kationeja. Useampiarvoiset kationit toimivat siltoina anionisten PAM-yhdisteiden ja saveishiukkasten välillä edistäen näiden sitoutumista. Anioninen PAM voi myös pidäytyä spesifisesti hydratoituneiden Al- ja Fe- oksidien pinnoille saman ns. ligandinvaihtomekanismin avulla, jolla myös fosfatanionit sitoutuvat maahiukkasiin. PAM:n karboksyyli-ryhmä tunkeutuu oksidien pinnoilla olevien Al- ja Fe -atomien koordinaatiokehään, syrjäyttää  $\text{H}_2\text{O}$ - tai  $\text{OH}$ - ligandin ja liittyy metalliatomiin (Theng 1982).

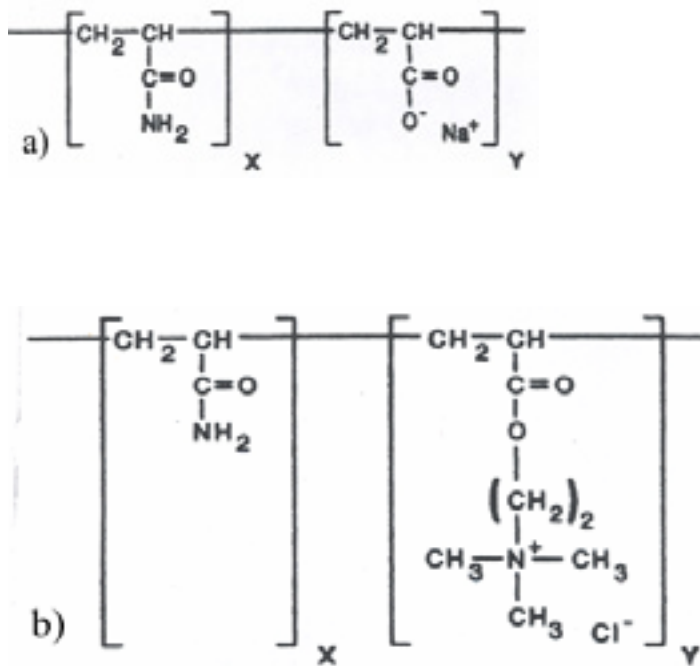
Suurimolekyyllisiä PAM-yhdisteitä hyödynnetään niin kemianteollisuudessa kuin maataloudessakin. Maataloudessa PAM-teknologia on ollut käytössä jo 1950-luvulta lähtien, ja sen käyttökohteita ovat etenkin eroosioalttiit sadetus- ja vakokasteluviljelykset. PAM-yhdisteiden käyttö maan parannusaineina perustuu niiden kykyyn lisätä maan mekaanista lujuutta ja aggregaattien vesikestävyttä (Theng 1982). Jos maan huokosrakenne ei ole tuhoutunut, PAM-käsittelyjen on havaittu lisäävän infiltraatiota (veden imeytymistä) ja vähentävän pintavaluntaa (Sojka ym. 1998). Lukuisten tutkimusten mukaan suurimolekyylliset anioniset PAM-yhdisteet vähentävät tehokkaasti etenkin kastelun aiheuttamaa eroosiota ja valumavesien kokonaisfosforipitoisuutta (esim. Lentz ym. 1992 ja 2001). Po-

lysakkaridien ja PAM:n sitoutumistehokkuuden on havaittu vähenevän seuraavasti: kationinen > ei-ioninen > anioninen (Aly ja Letey 1988). Kationisen PAM:n on osoitettu flokkuloivan suspendoitunutta kiintoainesta tehokkaasti (Mason ym. 2005), mutta sillä saattaa olla joitakin vesieliöille haitallisia ominaisuuksia (Barnevik 1994).

Saveksen muodostamien murujen hajoaminen vedessä (dispergoituminen) saattaa heikentää maan fysikaalisia ominaisuuksia sekä lisätä maan eroosioherkkyyttä ja pintavesiin kohdistuvaa P-kuormitusta. Dispergoituva saves (WDC, water dispersible clay) on yhdistetty maan erodoituvuuteen (Brubaker ym. 1992). Tämän flokkulaatiokokeen tarkoituksena oli tarkastella, miten flokkulantin määrä, ravisteluaika (1 ja 24 tuntia) ja lämpötila (5 °C ja 20 °C) vaikuttaa anionisen ja kationisen PAM-yhdisteen flokkulaatiotehokkuuteen ja syntyvien flokkien kestävyuteen. Lisäksi tarkasteltiin, onko lisääntyneen flokkien muodostumisen avulla mahdollista vaikuttaa maasuspensioiden P-pitoisuuksiin.

## 2 Materiaali ja menetelmät

Flokkulaatiokokeessa käytettiin anionista ja kationista polyakryyliamidia (PAM), tuotenimiltään Fennopol A 305 ja Fennopol K 504 (Kemira Chemicals Oy) (kuva 1).



Kuva 1. Anionisen (a) ja kationisen (b) polyakryyliamidin rakenne (Barnevik 1994).

Testiin valitut maat olivat kalkituskokeissa erilaisesti käyttäytyneet Sjökulla ja Perniö (ks. Luku I, kappale 3.1). Niiden ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Maan pH määritettiin 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-suspensiosta maa/liuos suhteella 1:2,5. Orgaaninen C analysoitiin Leco CHN 900 -autoanalysaattorilla. Maan epäorgaanisen P:n määrää tutkittiin modifioidulla Changin ja Jacksonin (1957) fraktiointimenetelmällä (Hartikainen 1979). Sentrifuugiputkisiin punnittiin 1 g maata (uunikuivaa maata kohti) ja lisättiin 50 ml NH<sub>4</sub>Cl-, NH<sub>4</sub>F-, NaOH- ja H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-liuoksia. NH<sub>4</sub>Cl-fraktio uuttaa kaikkein helppoliukoisimman P:n. NH<sub>4</sub>F-liuoksella uutetaan fraktio, jonka katsotaan edustavan Al-oksidiin ja -hydroksidiin sitomaa

P:a, kun taas NaOH-liuoksella uutuvan P:n katsotaan olevan Fe-oksidiin sitoutunutta. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-liuoksella uutetaan Ca:n sitoma P. Fraktioiden P-pitoisuudet määritettiin stannokloridimenetelmällä ja mitattiin spektrofotometrillä 720 nm aallonpituudella. Oksalaattiuutosten Al:n ja Fe:n pitoisuudet uutettiin Schwertmannin (1964) menetelmällä ja mitattiin ICP-AES:lla.

Taulukko 1. Koemaiden ominaisuudet.

	saves- %	siltti- %	pH	C-%	Al <sub>oks</sub> mg kg <sup>-1</sup>	Fe <sub>oks</sub> mg kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> Cl-P mg kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> F-P mg kg <sup>-1</sup>	NaOH-P mg kg <sup>-1</sup>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -P mg kg <sup>-1</sup>
Sjökulla	47	44	5,5	2,68	2251	9120	3,8	119	302	203
Perniö	37	42	6,1	2,07	1529	7118	2,7	77	215	147

Kokeessa käytettiin seuraavia käsittelyliuoksia :

Kontrolli: H<sub>2</sub>O

Kationinen PAM: Fennopol K504 (kolme pitoisuutta)

Anioninen PAM: Fennopol A305 (kolme pitoisuutta)

Kaikissa käsittelyissä oli neljä rinnakkaista. Kokeet tehtiin kaikkine vaiheineen tasalämpöhuoneessa joko 5 °C:ssa tai 20 °C:ssa ja ravisteluaajat (250 kierrosta minuutissa) olivat 1 h ja 24 h. Maasuspensiot valmistettiin punnitsemalla 1 g uunikuivaa maata ja lisäämällä joko 50 ml H<sub>2</sub>O tai synteettistä flokkulanttiliuosta. PAM-liuokset valmistettiin liuottamalla litraan H<sub>2</sub>O joko 10 mg, 25 mg tai 50 mg kationista K504- tai anionista A305-yhdistettä. Liuosten lämpötilan annettiin tasaantua tasalämpöhuoneissa 1 vuorokausi.

Ravistelun jälkeen suspensiota kaadettiin välittömästi kyvetiin (Ø 1 cm), ja absorbanssilukemat mitattiin 5 min:n, 30 min:n ja 60 min:n laskeutumisaikojen jälkeen aallonpituudella 500 nm (Perkin-Elmer Lambda 15 UV/VIS). Käsittelyjen vaikutusten kvantifioimiseksi ja vertailemiseksi absorbansseista laskettiin flokkulaatioindeksi (FI):

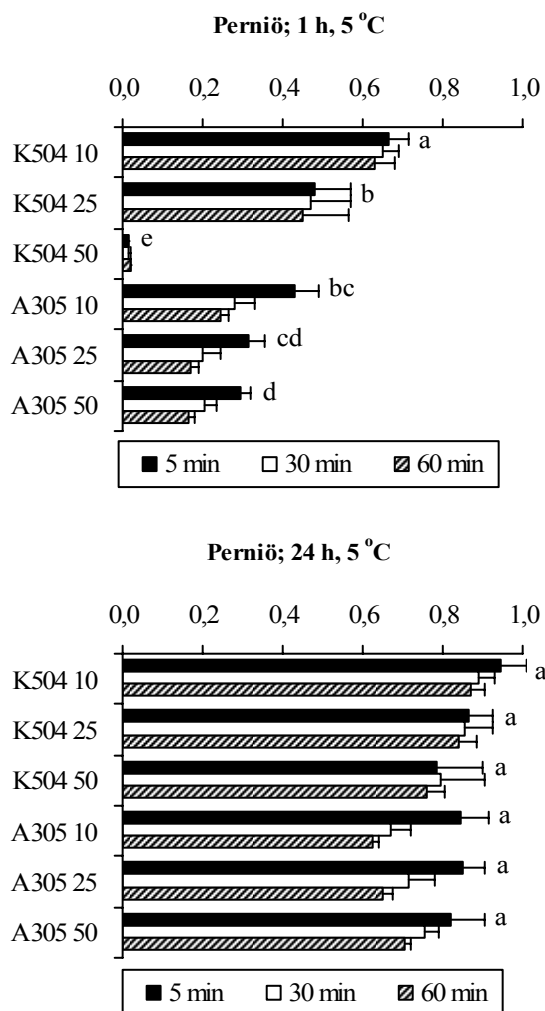
$$FI = A_i/A_0, \text{ missä}$$

A<sub>i</sub> on PAM:lla käsitellyn näytteen absorbanssi ja A<sub>0</sub> on saman, mutta pelkän veden kanssa käsitellyn näytteen absorbanssi (kontrolli). Lairdin (1997) mukaan FI on suhteellinen mitta sille, kuinka tehokkaasti PAM flokkuloi erilaisia maasuspensioita. Jos FI = 1, PAM:lla käsitelty näyte ei eroa kontrollista. Jos taas FI = 0, PAM flokkuloi kaiken maa-aineksen, ja se on sedimentoitunut kyvetin pohjalle. FI-indeksin mittaukseen käytetystä suspensiosta osa suodatettiin imusuodattimella membraanisuolettimen läpi PO<sub>4</sub>-P ja NO<sub>3</sub>-N mittauksia varten. PAM-käsittelyjen välisiä eroja tarkasteltiin SAS-ohjelmiston Tukeyn testillä.

### 3 Tulokset ja tarkastelu

Sjökullan ja Perniön suspensioiden FI-arvot vaihtelivat välillä 0,01–0,98. Lyhyessä 1 tunnin ravistelussa kationisen PAM-yhdisteen (K504) suurin lisäys (50 mg l<sup>-1</sup>) flokkuloi erittäin tehokkaasti lähes kaiken suspensioissa olleen maa-aineksen. Suspensioiden sameus väheni kontrolliin verrattu 5 °C:ssa jopa 99 % ja 20 °C:ssa 89 % (Kuva 2). Anioninen A305 oli kuitenkin keskimäärin kationista tehokkaampi flokkulanti. Vaikka sen FI:n minimiarvo olikin huomattavasti kationista korkeampi, se pienemmillä lisäystasysoilla FI-arvot olivat pienempiä kuin kationisella yhdisteellä saadut. Pitkässä 24 tunnin ravistelussa flokit hajosivat, suspensiot dispergoituivat uudelleen ja käsittelyjen väliset erot hävisivät. Tär-

keimmäksi flokkien hajoamisen syyksi on esitetty H-sidosten purkautumista (Taylor ym. 2002). Kuvasta 2 kuitenkin nähdään, että käytettäessä etenkin pientä määrää anionista flokkulanttia flokinmuodostus alkoi uudelleen, kun suspensio sai seisoa mittausten välillä: FI-indeksi 60 minuutin seisotuksen jälkeen oli selvästi pienempi kuin 5 minuutin jälkeen. Lämpötilalla ei ollut kovin merkittävää vaikutusta FI-arvoihin.



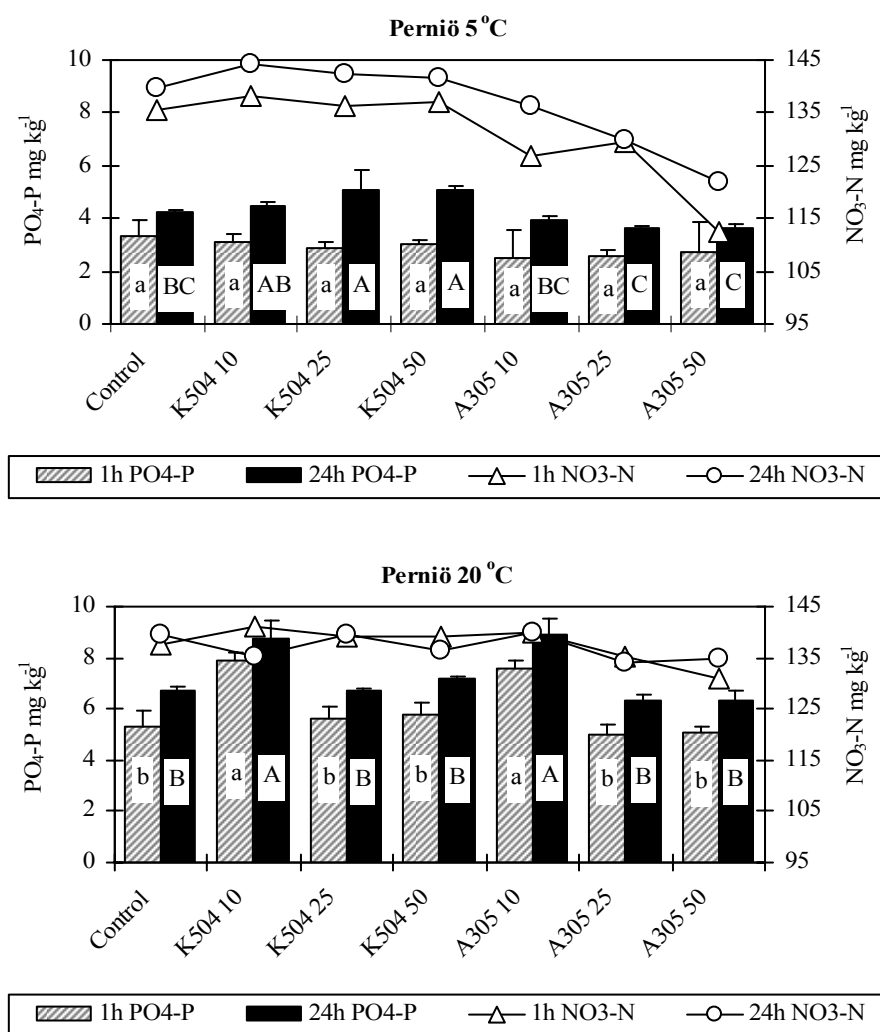
Kuva 2. Flokkulaatioindeksit (FI) ravisteluajan ja lämpötilan suhteen. Esimerkkinä Perniö.

Pääasiallinen ero maiden välillä oli, että Sjökullan maasuspensiot flokkuloituivat Perniön maanäytettä hieman paremmin, poikkeuksena K504 50 mg l<sup>-1</sup>. On esitetty, että anionisen PAM:n pidättyminen lisääntyy maan hienojakoisen aineksen osuuden ja siten ominaispinta-alan lisääntyessä sekä orgaanisen aineksen määrän vähentyessä (Lu ym. 2002). Orgaaninen aines sitoo maan epäorgaanisia ainesosia aggregaateiksi ja vähentää käytettävissä olevan aktiivisen pinnan pinta-alaa. Toisaalta kyse voi olla yksinkertaisesti siitä, että ominaispinta-alan nousu on kytkennässä savespitoisuuteen ja sitä kautta kasvavaan oksidipitoisuuteen, jolloin anioniselle PAM-yhdisteelle sopiva pidätyspinta kasvaa. Maan orgaaninen aines kilpailee muiden anionisten yhdisteiden kanssa oksidipintojen pidätyspaikoista, mikä selittää havainnon, että anionisten PAM-yhdisteiden flokkulointitehokkuus paranee maan orgaanisen aineksen vähetessä. Sjökullan maassa oli enemmän savesta ja hiiltä kuin Perniön maassa (taulukko 1). Suurin ero maiden välillä oli kuitenkin se, että Sjökullassa oli huomattavasti enemmän alumiinin ja raudan oksideja kuin Perniön maassa. Tämä todennä-

köisesti selittää myös anionisen PAM:n pidättymisen ligandinvaihtomekanismin kautta ja siten sen flokkulaatiotehokkuuden lisääntymisen.

PAM-käsittelyillä ei ollut niin suurta vaikutusta  $\text{PO}_4\text{-P}$ :n uuttuvuuteen kuin lämpötilalla ja ravisteluajalla (kuva 3). Sekä lämpötilan nousu että ravisteluajan pidentäminen lisäsivät liukoisen fosforin pitoisuutta kaikissa käsittelyissä. Mielenkiintoista on todeta, että pienimmällä lisäyстasolla sekä anioninen että kationinen PAM-yhdiste edelleen lisäsi liukoisen fosforin pitoisuutta korkeammassa lämpötilassa ravisteluajasta riippumatta. Matalammassa lämpötilassa pieniä eroja tuli näkyviin vasta uuttoajan pidetessä: kationinen PAM lisäsi hieman fosforin uuttuvuutta korkeimmilla lisäyстasoilla. Tulos on yllättävä kahdella tavalla. Teorian mukaan olisi voitu odottaa,

että erityisesti anioninen flokkulanti olisi edistänyt fosforin uuttumista kilpaillessaan fosforin kanssa samoista pidättymispaikoista. Toiseksi olisi voitu olettaa, että parhain flokin muodostaja olisi vähentänyt fosforin uuttumista sulkemalla fosforia murujen sisään. Näin ei kuitenkaan näyttänyt tapahtuvan. Tältä osin tulos näyttäisi olevan erilainen kuin kalkituskokeissa saatu (Luvut 3.5 ja 3.6). Nitraatin kohdalla näkyy, että anioninen flokkulanti on vähentänyt sitä



Kuva 3.  $\text{PO}_4\text{-P}$  ja  $\text{NO}_3\text{-N}$  pitoisuudet ravisteluajan ja lämpötilan suhteen. Esimerkinä Pernio.

## 4 Kirjallisuusluettelo

- Aly, S. M. and Letey, J. 1988. Polymer and water quality effects on flocculation of montmorillonite. *Soil Science Society of America Journal* 52: 1453–1458.
- Barvenik, F. W. 1994. Polyacrylamide characteristics related to soil applications. *Soil Science* 158: 235–243.
- Brubaker, S. C., Holzhey, C. S. and Brasher, B. R. 1992. Estimating the water-dispersible clay content of soils. *Soil Science Society of America Journal* 56: 1227–1232.
- Chang, S. C. and Jackson, M. L. 1957. Fractionation of soil phosphorus. *Soil Science* 84: 133–144.
- Goldberg, S., Lebron, I. and Suarez, D. L. 2000. Soil colloidal behavior. Chapter 6. p. B-195–B-240. In Sumner, M. E. (ed.) *Handbook of Soil Science*. CRC Press, USA.
- Hartikainen, H. 1979. Phosphorus and its reactions in terrestrial soils and lake sediments. *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland* 51: 537–624.
- Laird, D. A. 1997. Bondind between polyacrylamide and clay mineral surfaces. *Soil Science* 162: 826–832.
- Lentz, R. D., Shainberg, I., Sojka, R. E. and Carter, D. L. 1992. Preventing irrigation furrow erosion with small applications of polymers. *Soil Science Society of America Journal* 56:1926–1932.
- Lentz, R. D., Sojka, R. E., Robbins, C. W., Kincaid, D. C. and Westermann, D. T. 2001. Polyacrylamide for surface irrigation to increase nutrient-use efficiency and protect water quality. *Commun. SoilSci.Plant Anal.* 32: 1203–1220.
- Lu, J. H., Wu, L. and Letey, J. 2002. Effects of soil and water properties on anionic polyacrylamide sorption. *Soil Science Society of America Journal* 66: 578–584.
- Mason, L. B., Amrhein, C., Goodson, C.C., Matsumoto, M. R. and Anderson, M. A. 2005. Reducing sediment and phosphorus in tributary waters with alum and polyacrylamide. *Journal of Environmental Quality* 34: 1998–2004.
- Schwertmann, U. 1964. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 105: 194–202.
- Sojka, R. E., Lentz, R. D. and Westermann, D. T. 1998. Water and erosion management with multiple applications of polyacrylamide in furrow irrigation. *Soil Science Society of America Journal* 62: 1672–1680.
- Taylor, M. L., Morris, G. E., Self, P. G. and Smart, R. St. C. 2002. Kinetics of adsorption of high molecular weight anionic polyacrylamide onto kaolinite: The flocculation process. *Journal of Colloid and Interface Science* 250: 28–36.
- Theng, B. K. G. 1982. Clay-polymer interactions: Summary and perspectives. *Clays and Clay Minerals* 30: 1–10.



## MTT:n selvityksiä –sarjan ympäristö -teemassa ilmestyneitä julkaisuja

- 118 Savimaiden eroosio. *Aura, Saarela & Rätty*. 32 s. Verkkojulkaisu osoitteessa <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts118.pdf>.
- 114 Suomen maannostietokanta. Maannoskartta 1:250 000 ja maaperän ominaisuuksia. *Lilja, Uusitalo, Yli-Halla, Nevalainen, Väänänen & Tamminen*. 70 s. Hinta 20 euroa.
- 102 Kenestä erikoiskasviviljelijäksi? Erikoiskasviviljelyn omaksujatyypit ja omaksu-  
misen taustalla vaikuttavat tekijät. *Vuorio, Soini & Arsi Ikonen*. 68 s. Verkkojul-  
kaisu osoitteessa <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts102.pdf>.
- 89 Maaseudun uusiutuvien energiamuotojenkartoitus. Esitutkimus. 2005. *Nyholm,  
Risku-Norja & Kapuinen*. 33 s. Verkkojulkaisu osoitteessa  
<http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts89.pdf>.
- 82 Rural LIFE Design – Maaseutuyritysten ympäristöarvoja tuotteistamassa. 2004.  
*Seppänen & Pesonen. (toim.)*. 55 s. Verkkojulkaisu osoitteessa  
<http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts82.pdf>.
- 70 Laitoskompostien laadun parantaminen kypsytystä tehostamalla. 2004. *Halinen &  
Tontti*. 62 s. Hinta 20 euroa.
- 69 Ympäristöystävällinen elintarvike - palvikinkun ja kurkun tuotantoketjujen toimi-  
joiden näkemyksiä. 2004. *Seppälä, A.* 56 s. Verkkojulkaisu osoitteessa  
<http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts69.pdf>.
- 51 Elinkaariarvioinnin ja elinkaarikustannuslaskennan soveltaminen maaseudun  
pienyrittäjiin. 2003. *Pesonen, I.* 69 s. Hinta 20 euroa.
- 49 PeltoGIS - MTT:n peltotietojärjestelmän suunnittelu ja toteutus. Talkkari, A. ym.  
2003. 37 s. Hinta 15 euroa.
- 41 Vesistökuormituskartoitus Etelä-Pirkanmaan alueella. Närvänen, A. ym. 2003. 28  
s. Hinta 15 euroa.
- 44 Numeerinen Suomen maannostietokanta mittakaavassa 1:250 000 pilottihanke.  
Yli-Halla, M. ym. 2003. 52 s. Hinta 20 euroa.
- 28 Jokihelmisimpukan suojelua edistävät viljelytoimet Pirkanmaalla . Nykänen, A.  
2002. 22 s. Verkkojulkaisu osoitteessa: <http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts28.pdf>
- 11 Ympäristö ja eettisyys elintarviketuotannossa - todentamisen ja tuotteistamisen  
haasteet. Seppälä, A. ym. 2002. 72 s. Hinta 20 euroa.

Verkkojulkaisut osoitteessa <http://www.mtt.fi/julkaisut/mtts.html>

