

Korkeampi pohjaveden pinta ratkaisu happamien sulfaattimaiden päästöille?

Jaana Uusi-Kämpä¹⁾, Kari Ylivainio¹⁾, Kristiina Regina¹⁾, Peter Österholm²⁾, Rainer Rosendahl³⁾, Vincent Westberg⁴⁾, Merja Mäensivu⁴⁾, Seija Virtanen⁵⁾, Markku Yli-Halla⁵⁾ ja Eila Turtola¹⁾

¹⁾MTT, Kasvintuotannon tutkimus, 31600 Jokioinen, etunimi.sukunimi@mtt.fi

²⁾Åbo Akademi, Geologi och mineralogi, Tuomiokirkontori 1, 20500 Turku, etunimi.sukunimi@abo.fi

³⁾ProAgria Österbottens Svenska Lantbrukssällskap, Handelsplanaden 16D, 65100 Vaasa, etunimi.sukunimi@proagria.fi

⁴⁾Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus, PL 262, 65101 Vaasa, etunimi.sukunimi@ely-keskus.fi

⁵⁾Helsingin yliopisto, Maaperä- ja ympäristötiede, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto, etunimi.sukunimi@helsinki.fi

Tiivistelmä

Rannikkoalueidemme sulfidipitoiset maat ovat muinaiseen Itämereen kerrostuneita sedimenttejä. Meren pohjan hapettomiin oloihin vajonneesta kasvijätteestä ja meriveden sulfaatista syntyi bakteeritoiminnan ansiosta rikkiyhdisteitä, joista on muodostunut sulfidisavikerrostumia. Jos sulfidikerrostuma hapettuu, syntyy rikkihappoa, joka happamoittaa sekä maan että valumaveden, ja seurauksena voi olla esim. kalakuolemia. Happamuusongelman syntymistä on pyritty välttämään pitämällä sulfidisavet pohjaveden peitossa. Tasaisilla peltomailla pohjaveden korkeutta voidaan säätää säätösalaajituksen avulla. Säätösalaajituksessa pohjaveden korkeuden säätöä voitaneen tehostaa myös asentamalla pellon reunaan muovikalvo, joka estää veden valumista pellolta, sekä pumpaamalla salaojiin lisävetä. Söderfjärdenin pilottikentällä (18,5 ha) Vaasassa on seurattu kesäkuusta 2010 lähtien kolmea erilaista salaojitusta: 1) säätösalaajitus ja lisäveden pumppaus, 2) säätösalaajitus ja 3) normaali salaojitus. Tavoitteena on selvittää eri salaojitusmenetelmien vaikutuksia sulfidisaven hapettumiseen ja siitä aiheutuvaan happamuusongelmaan. Kentällä mitattiin mm. pohjaveden korkeus sekä salaojaveden pH, asiditeetti, sulfaatti- ja typpipitoisuudet, kasvihuonekaasupäästöjä (CO₂ ja N₂O) sekä maan ja kasvien ravinne- sekä metallipitoisuuksia.

Säätösalaajitus yhdistettynä lisäveden pumppaamiseen piti pohjaveden pinnan sulfidikerroksen yläpuolella melkein koko viljelylohkolla ympäri vuoden. Ainoastaan lohkon yläosassa elokuun lopulla sulfidisavea oli hapettumiselle alttiina. Suurin sulfidien hapettumisriski oli normaalissa salaojituksessa. Salaojavesissä ei kuitenkaan havaittu eroja eri ojitusmenetelmien välillä. Sen sijaan vuodenaika vaikutti vedenlaatuun. Salaojaveden alhaisimmat pH-luvut (3,8–4,1) ja suurimmat asiditeetit sekä sulfaatti- ja kokonaistyppipitoisuudet mitattiin syksyllä. Salaojaveden typpi oli pääasiassa nitraattimuodossa (6,7–31 mg l⁻¹). Kokonaisfosforipitoisuus (< 0,07 mg l⁻¹) oli pienempi kuin yleensä viljelysmailla. Kaikkien koejäsenien kasvihuonekaasupäästöistä typpioksiduuliemissiot (N₂O) olivat suuremmat kuin eloperäisillä mailla, joilla yleensä esiintyy suuria päästöjä.

Viljelymaan ja viljelykasvien ravinnepitoisuudet vastasivat tavanomaisilta mailta mitattuja pitoisuuksia. Vaikka viljelymaan happamuus liuottaa metalleja maaperästä, ohran jyivistä ja oljista mitatut raskasmetallipitoisuudet eivät olleet epätavallisen suuria eivätkä ylittäneet terveydelle haitallisia raja-arvoja. Viljelijöiden mukaan säätösalaajitus yhdistettynä muovikalvon asentamiseen ja lisäveden pumppaamiseen on toiminut hyvin.

Säätösalaajitus yhdistettynä lisäveden pumppaukseen näyttää alustavien tulosten mukaan pitävän pohjaveden korkeuden riittävän korkealla, jotta sulfidien hapettuminen kasvukauden aikana estyy. Toistaiseksi pohjaveden korkeudella ei todettu olevan vaikutusta valumaveden tai kasvien ravinne- ja metallipitoisuuksiin. Seuranta jatkuu vielä vuoden 2012.

Asiasanat: hapan sulfaattimaa, pH, pohjavedenkorkeus, huuhtoutuminen, typpi, metallit, kasvihuonekaasupäästöt

Johdanto

Happamat sulfaattimaat ovat peräisin tuhansien vuosien takaa Litorina-meren kaudelta, jolloin merenpohjan hapettomissa osissa maatuoneista kasvinosista ja meriveden sulfaattista muodostui bakteeritoiminnan ansiosta pelkistyneitä rikkiyhdisteitä (Geologian tutkimuskeskus 2009). Näistä syntyi vähitellen rikkipitoista sulfidisavea. Suomen rannikoilla sulfidisaviesiintymiä on arviolta 100 000–400 000 hehtaaria. Happamia sulfaattimaita on viljelyksessä 67 000–130 000 ha. Geologian tutkimuskeskuksen tekemien kartoitusten mukaan niitä esiintyy Suomen rannikkoalueilla pohjoisessa noin 100 metrin ja etelässä noin 40 metrin korkeuskäyrän alapuolella. Sulfidit ovat maakerrostumissa pysyviä niin kauan, kun ne ovat pohjaveden pinnan alapuolella. Maankohoaminen sekä kuivatus edistävät hapen pääsyä maakerrokseen, mistä seuraa sulfidien hapettumista. Rikkipitoisten mineraalien hajoamistuotteena muodostuu rikkihappoa, joka puolestaan liuottaa maaperästä metalleja. Vesistöissä happo- ja metallikuormituksesta aiheutuu mm. kalakuolemia. Happamilta sulfaattimailta voi vapautua huomattavia määriä myös kasvihuonekaasuja (Denmead ym. 2010).

Ilmastonmuutoksen seurauksena hydrologiset ääriolot yleistyvät (kesällä kuivempaa, syksyllä sateisempaa), mikä osaltaan saattaa lisätä päästöjä. Happamien sulfaattimaiden ympäristöriskien vähentäminen – sopeutumiskeinoja ilmastonmuutokseen (CATERMASS) -hankkeen tavoitteena on päästöjen vähentäminen pitämällä viljelysmaiden pohjavesi mahdollisimman korkealla säätösalaajituksen ja lisäveden pumppaamisen avulla sekä estämällä veden virtaus pelloilta valtaojaan tätä varten asennetun muovikalvon avulla (<http://www.ymparisto.fi/syke/catermass>). Pilottikentällä demonstroidaan, miten pelloilla voidaan ylläpitää korkeata pohjavedenpintaa, miten tämä sopii nykyisiin viljelykäytäntöihin ja voidaanko näin vähentää sulfaattimaiden aiheuttamia happamuusongelmia.

Koelue

Vaasaan perustettiin keväällä 2010 Söderfjärdenin pilottikenttä (18,5 ha), joka muodostuu kolmesta vierekkäisestä peltolohkosta. Yhdellä loholla on tavallinen salaajitus, jolloin pohjavesi saattaa laskea usean metrin syvyyteen kuivina kausina. Toisella loholla pohjaveden korkeutta voidaan säätää säätökaivojen avulla ns. säätösalaajituksena. Kolmannella loholla säätösalaajitusta on täydennetty mahdollisuudella pumpata lisävettä salaajiin (altakastelu) ja näin nostaa pohjaveden korkeutta. Ennen kokeen aloittamista kaikki kolme lohkoa eristettiin muovikalvolla, jonka tarkoituksena on estää veden virtaus kentän ulkopuolelle tai lohkolta toiselle (Kuva 1). Muovin alareuna on 1,8 m:n syvyydessä maan pinnasta. Muovin asennus tehtiin poistamalla ensin 30 cm:n ruokamultakerros, minkä jälkeen muovin asennus tehtiin salaojakaivantoon (1,5 m) salaojakoneeseen valmistetulla lisälaitteella.

Kunkin lohkon (Kuva 2) alareunaan asennettiin syys-lokakuun vaihteessa 2010 jatkuvatoimiset mittauslaitteet, joiden avulla seurataan salaojaveden virtausta, happamuutta ja sähkönjohtokykyä. Lisäksi mitataan pohjaveden korkeutta, sadantaa, maan ja ilman lämpötilaa sekä kosteutta. Reaali-



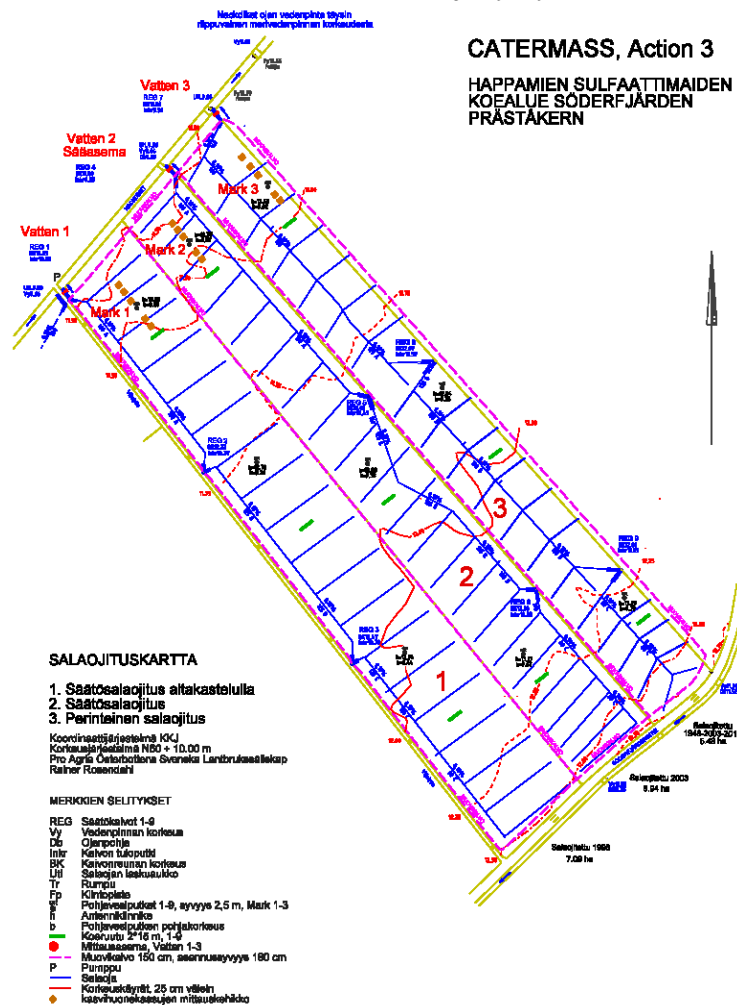
Kuva 1. Muovin asentaminen 1,8 m:n syvyyteen salaojakoneeseen rakennetun lisäosan avulla. Oikealla lisäveden pumppaus läheisestä ojasta. Kuvat: Rainer Rosendahl, ProAgria Österbottens Svenska Lantbrukssällskap

aikaiset mittaustulokset ovat nähtävillä Catermass-hankkeen kotisivuilla olevan linkin kautta tai osoitteessa <http://www.pnet.fi>. Tässä tekstissä esitetään 2–4 viikon välein salaojavedestä otettujen näytteiden pH- ja johtoluku, asiditeetti sekä nitraatti- (NO_3^- -N) ja ammoniumtyppi- (NH_4^+ -N) pitoisuudet. Kullakin lohkolla on kolme pohjavesikaivoa, joista voitiin manuaalisesti seurata pohjaveden korkeutta. Pellolla viljeltiin ohraa (vuonna 2010) ja vehnää (2011). Jyvien ja olkien sisältämät ravinnepitoisuudet analysoitiin pienruuduilta puiduista näytteistä. Lohkojen välisiä sato- ja kuormituseroja selvitettiin vuoden kestäneen kalibrintikauden aikana. Viljelymaan ravinnepitoisuudet (NO_3^- -N, NH_4^+ -N, K, Ca, Mg, P, S, kokonais-N) määritettiin kokeen alussa. Kasvihuonekaasupäästöjä mitattiin lohkojen alaosaan vuoden ajan lokakuusta 2010 lähtien. Kesäkuussa 2011 alkoi seuranta pohjaveden korkeuden vaikutuksista salaojaveden laatuun, kasvihuonekaasupäästöihin ja satoon. Seuranta jatkuu vuoden 2012 loppuun.

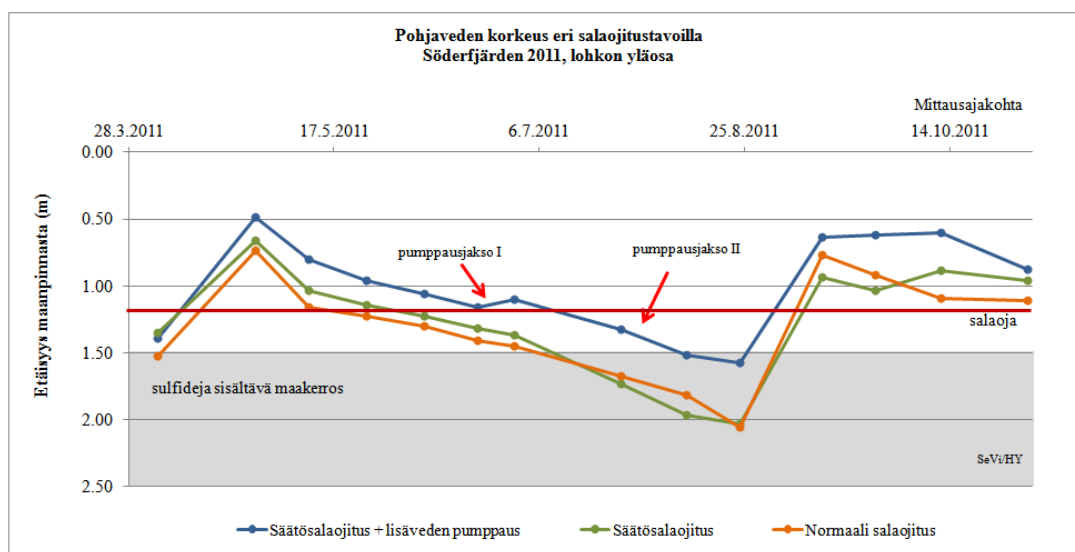
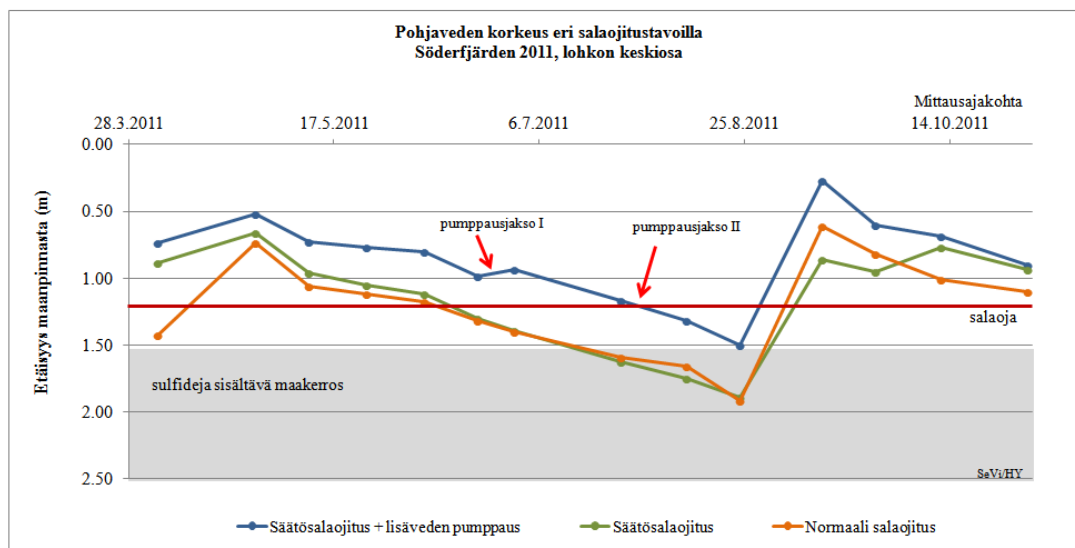
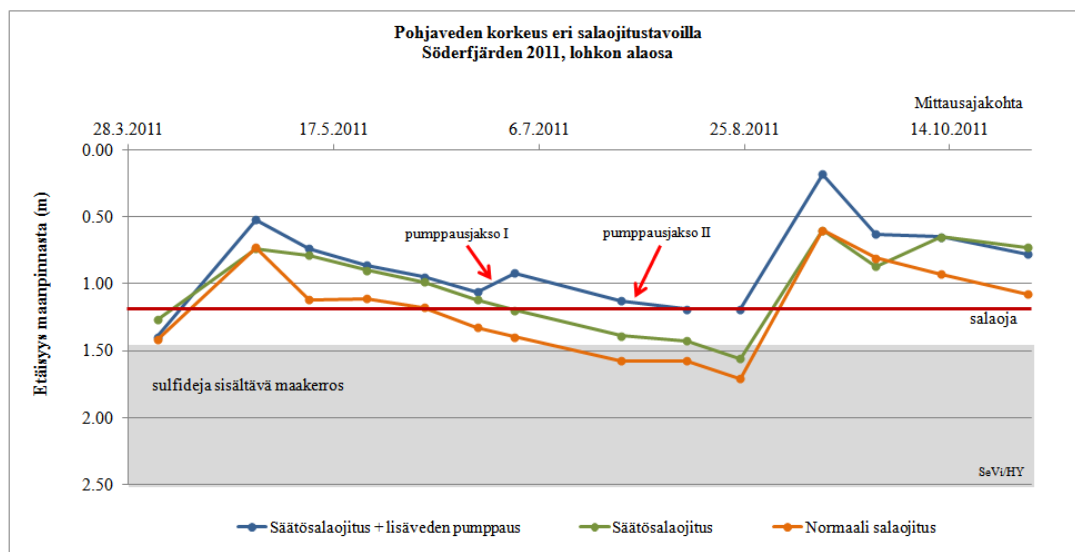
Tulokset ja tulosten tarkastelu

Pohjavedenpinnan korkeus

Koko mittauskaudella (maaliskuu–lokakuu 2011) säätösalaajitus lisäpumpkauksella on pitänyt pohjaveden keskimäärin 17 cm korkeammalla normaaliin salaajitukseen verrattuna, kun säätösalaajituksen keskimääräinen korkeusero normaaliin salaajitukseen oli pienempi, noin 12 cm (Kuva 3). Sulfidien hapettumisen kannalta oleellista on kuitenkin kuivin ajankohta, jolloin pohjavesi laskee syvälle. Alhaisimmillaan pohjavesi oli 25.8.2011, ja silloin se oli lisänettä saaneella lohkolla 47 ± 6 cm korkeammalla kuin normaalin salaajituksen lohkolla; normaalin salaajituksen ja säätösalaajituksen välinen ero oli vain 7 ± 3 cm. Keväällä ja syksyllä kentällä oli tulva, jolloin tulva-



Kuva 2. Söderfjärdenin 3-lohkoinen pilottikenttä. Jatkuvatoimisten dataloggerien paikat (Vatten 1–3 ja Mark 1–3) ja kasvihuonekaasupäästöjen mittauspaikat (■) näkyvät yläkulmassa. Pohjavesiputket (9 kpl, merkitty mustalla kirjoituksella) ja satoruudut (—) 9 kpl ovat kentän eri osissa. (Kartta: Rainer Rosendahl, ProAgria Östertbottens Svenska Lantbrukssällskap)



Kuva 3. Pohjaveden korkeus lohkon eri osissa eri salaojitustavoilla vuonna 2011.

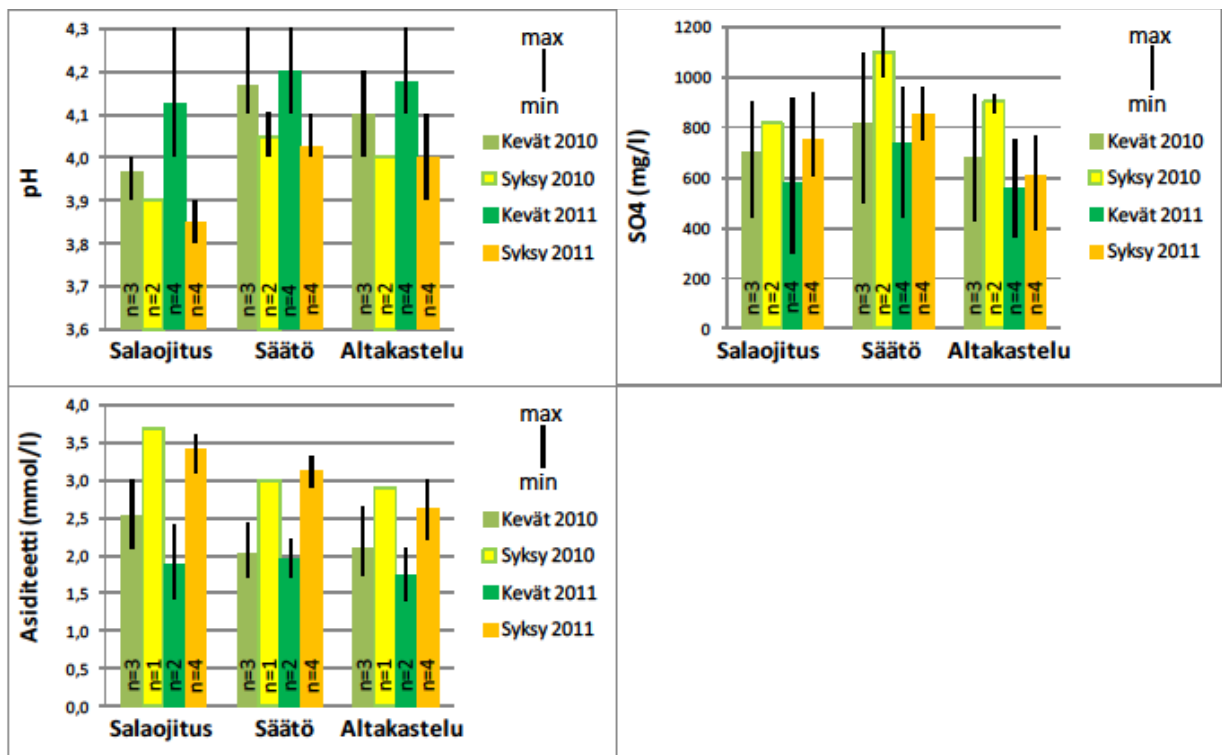
vesi pääsi työntymään putkistoa ja maanpintaa pitkin kentälle. Syyskuun runsaiden sateiden aikana altakastelulohkon alin säätökaivo piti avata muutamaksi päiväksi, kun pintamaa kyllästyi liikaa ja kantavuus oli huono.

Säätösalaajitus lisäveden pumppauksella pystyi pitämään pohjaveden sulfidikerrosten yläpuolella lohkon alaosassa, mutta ylempänä lohkolla pohjavesi laski sulfidikerroksen tasolle kesän kuivimpana aikana. Muilla ojitustavoilla pohjavesi laski tällöin selvästi sulfidikerrokseen. Sulfidien hapettuminen oli mittausten perusteella mahdollista normaalilla salaajituksella heinäkuun alusta elokuun loppuun suurimmalla osalla lohkoa (keski- ja yläosa). Säätösalaajituksella ajanjakso näyttäisi tulosten perusteella olevan hieman lyhyempi. Säätösalaajituksella ja lisäveden pumppauksella hapettumiselle alttiina näyttäisi olleen vain lohkon yläosan sulfidikerros noin kahden viikon ajan, mutta lohkon alemmilla osilla sulfidikerros näyttäisi pysyneen pohjaveden alapuolella koko kesän.

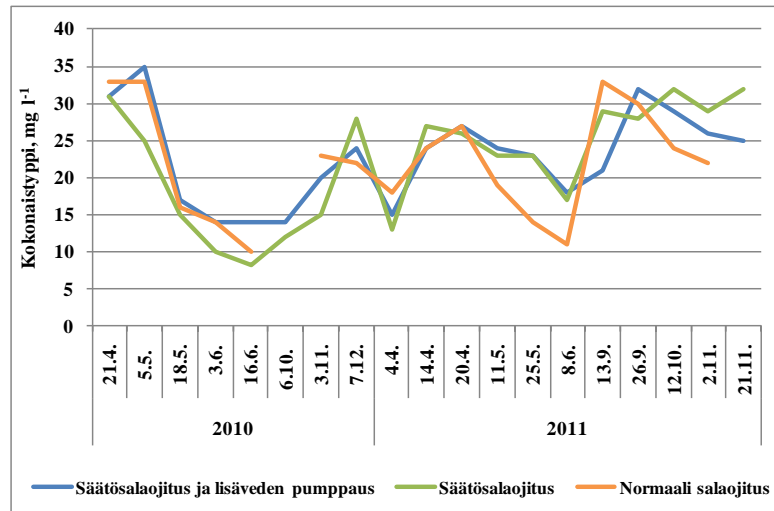
Salaajaveden laatu

Salaajavesi oli kaikilla salaajitustavoilla hyvin hapanta, keskimäärin pH oli 3,75–4,2. Manuaalisesti otettujen vesinäytteiden sähkönjohtavuudet ($100\text{--}350\text{ mS m}^{-1}$) sekä sulfaattipitoisuudet (SO_4 ; $300\text{--}1600\text{ mg l}^{-1}$) olivat suuria erityisesti syksyllä (Kuva 4). Metallipitoisuudet olivat sulfaattimaille tyypillisesti erittäin korkeat ja samalla tasolla kaikissa kolmessa lohossa: $\text{Al} > 10\text{ mg l}^{-1}$, $\text{Cd} > 2\text{ }\mu\text{g l}^{-1}$, $\text{Ni} > 400\text{ }\mu\text{g l}^{-1}$ ja $\text{Co} > 150\text{ }\mu\text{g l}^{-1}$. Myös $\text{NO}_3\text{-N}$:n ($6,7\text{--}27\text{ mg l}^{-1}$) ja kokonaistypen ($7\text{--}35\text{ mg l}^{-1}$) pitoisuudet olivat suuria (Kuva 5). Sen sijaan $\text{NH}_4\text{-N}$:n ($< 0,50\text{ mg l}^{-1}$) pitoisuudet olivat vain sadasosa $\text{NO}_3\text{-N}$ -pitoisuuksista. Kokonaisfosforin ($< 0,07\text{ mg l}^{-1}$) pitoisuudet salaajavedessä olivat pieniä verrattuna yleensä viljelymailla mitattuihin pitoisuuksiin. Vaikka typpipitoisuudet vaihtelivat ajan suhteen, koejäsenien välillä ei ollut suuria eroja.

Pohjavesihavaintojen perusteella lisävetä saaneen lohkon olisi voinut olettaa erottuvan muista sulfaattipitoisuuden suhteen, mutta käsittely ei kuitenkaan selkeästi pienentänyt huuhtoutuneen sulfaatin kokonaismäärää. Vedenlaatu vaihtelut olivat kohtalaisen suuret syksyn ja kevään välillä, ja vedenlaatu oli kaikilla kentillä huonoin syksyisin (Kuva 4). Syksyllä 2011 sulfaattipitoisuus ja asiditeetti olivat laskeneet hieman edelliseen syksyyn verrattuna ja olivat alhaisimmat lisävetä saaneella säätösalaajituslohkolla (altakastelu). Tuloksista ei voida vielä tehdä johtopäätöksiä säätösalaajituksen tai lisäveden pumppauksen vaikutuksista vedenlaatuun, sillä erot olivat pieniä verrattuna luonnolliseen vaihteluun, ja tähänastinen tarkastelujakso on varsin lyhyt.



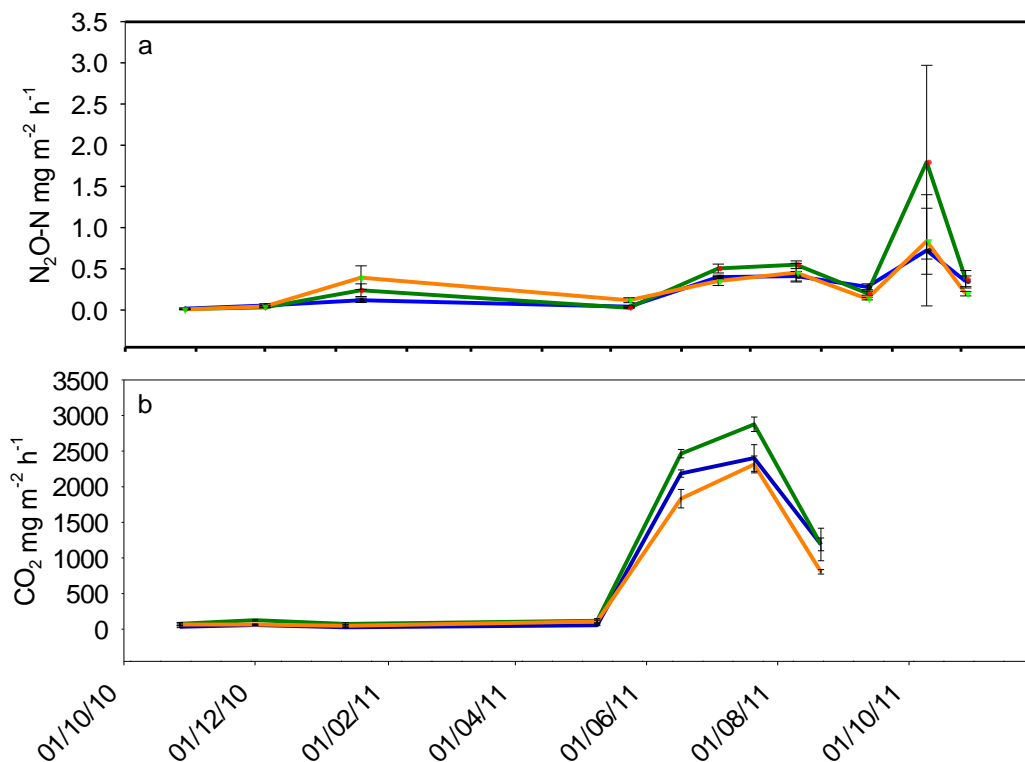
Kuva 4. Keskimääräinen pH, sulfaattipitoisuus (SO_4) ja asiditeetti salaajavesissä kevät- ja syysvalunnan aikana vuosina 2010 ja 2011.



Kuva 5. Kokonaistyyppien pitoisuuksia erilailla salaajitettujen lohkojen salaajavedessä.

Kasvihuonekaasupäästöt

Typpioksiduulin (N_2O) päästöt peltolohkoilta olivat korkeita verrattuna kivennäismailta saatuihin tuloksiin, ja korkeita jopa verrattuna eloperäisiltä mailta mitattuihin päästöihin. On viitteitä, että N_2O :n päästöt sulfaattimailta olisivat erityisen korkeita (Denmead ym. 2010). Sulfaattimailta on havaittu korkeita mineraalityypen pitoisuuksia varsinkin pohjamaassa (Paasonen-Kivekäs ym. 2005, Šimek ym. 2011). Tässä tutkimuksessa mitatut maan mineraalityypen pitoisuudet eivät kuitenkaan ole erityisen korkeita, mutta pohjamaan typpipitoisuuksia ei ole vielä määritetty. Myös mikrobitoiminta saattaa olla yllättävän voimakasta maaperän syvissä kerroksissa (Šimek ym. 2011). Nämä tekijät saattavat osaltaan selittää isot N_2O :n päästöt, ja lisäksi matala pH estää N_2O :n pelkistymistä N_2 -muotoon (Thomsen ym. 1994), mikä nostaa N_2O :n suhteellista osuutta denitrifikaation lopputuotteissa. Käsittelyjen välillä ei ollut merkittävää eroa N_2O :n tuotossa (Kuva 6a). Kokeen lopussa säätösalaajitetulta lohkolta tuli erityisen iso päästö, mutta se johtui vain yhden mittauspisteen poikkeavasta tuloksesta.



Kuva 6. Dityppioksidin (a) ja hiilidioksidin (b) tuotto säätösalaajituksessa + lisäveden pumppauksessa (sininen), säätösalaajituksessa (vihreä) ja normaalissa salaajituksessa (oranssi).

Mitatut hiilidioksidin (CO₂) päästöt kuvastavat ekosysteemihengitystä, jossa on mukana maahengityksen lisäksi kasvien pimeähengitys. Hiilidioksidivuo oli samalla tasolla kuin kivennäismaista aiemmin mitatut arvot (Lohila ym. 2004), mutta käytetty mittaamenetelmä (45 minuutin näytteenottoaika) aliarvioi tätä vuota. Säättösalaajitetulta lohkolta hiilidioksidia tuli hieman enemmän kuin muilta (Kuva 6b).

Maan ja kasvien ravinne- ja metallipitoisuuksia

Viljelysmaan pH oli 6,7–7,0 pintakerroksessa (0–25 cm) ja 5,8–6,2 sen alapuolella (25–40 cm). Maassa (0–40 cm) oli NO₃⁻-tyyppiä 24–35 kg ha⁻¹ ja NH₄⁺-tyyppiä 10–16 kg ha⁻¹. Säättösalaajituslohkoilla oli kasveille käyttökelpoista fosforia 22 mg l⁻¹ (viljavuusluokka hyvä), kun normaalisti salaajitetulla lohkolta sitä oli 9 mg l⁻¹ (Taulukko 1). Pintamaakerroksen alapuolella pitoisuudet olivat keskimäärin 12 mg l⁻¹ säättösalaajituksessa ja lisäveden pumppauksessa, 9 mg l⁻¹ säättösalaajituksessa ja 6 mg l⁻¹ normaalissa salaajituksessa. Aikaisemmalla viljelyhistorialla oli todennäköisesti vaikutusta muokkauskerroksen ravinnepitoisuuksiin. Suuret helppoliukoisien fosforin pitoisuudet säättösalaajituslohkoilla selittynevät sillä, että ko. lohkoilla oli aiemmin viljelty sokerijuurikasta. Ohrasta mitatut hivenravinne- ja metallipitoisuudet olivat normaaleja peltoviljelyssä tavattavia.

Taulukko 1. Ravinne- ja hiilipitoisuuksia sekä pH maassa (0–25 cm) keväällä 2010.

Käsittely	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	Ca	K	Mg	P	S	C	pH
	mg l ⁻¹							%	
Säättösalaajitus ja lisäveden pumppaus	5,8	6,7	2400	149	190	23	28	2,11	6,8
Säättösalaajitus	7,1	11,7	2400	175	240	22	28	2,10	7,0
Normaali salaajitus	7,5	8,0	1800	185	266	9	30	1,99	6,7

Johtopäätökset

Koekentiltä saatujen alustavien tulosten perusteella näyttää siltä, että sulfidikerroksen hapettumisen estäminen onnistuu pohjaveden korkeutta nostamalla, jos säättösalaajitetulle lohkolle voidaan pumpata lisävetä kesän kuivimpina aikoina. Jos kuluneena kesänä lisävetä olisi pumpattu vielä elokuun puolivälissä, olisi pohjavesi todennäköisesti pysynyt sulfidikerroksen yläpuolella koko kesän. Pellolle asennettu virtauksen valtaojaan estävä muovi on todennäköisesti ollut myös hyvin ratkaisevassa asemassa säädön onnistumisen kannalta. Pohjaveden korkeuden nostaminen ei näkynyt kuitenkaan vielä salaajaveden laadun parantumisena. Tähän on todennäköisesti syynä maahan aiempina vuosina kumuloitunut happamuus, jonka neutraloituminen kestää kauan, vaikka lisää rikkihappoa ei maassa enää muodostuisikaan.

Kirjallisuus

- Denmead, O.T., Macdonald, B.C.T., Bryant, G., Naylor, T., Wilson, S., Griffith, D.W.T., Wang, W.J., Salter, B., White, I. & Moody, P.W.** 2010. Emissions of methane and nitrous oxide from Australian sugarcane soils. *Agric. For. Meteorol.* 150: 748–756.
- Geologian tutkimuskeskus.** 2009. Happamien sulfaattimaiden haitat hallintaan. *Geofoorumi* 2/2009. 4 s.
- Lohila, A., Aurela, M., Regina, K. & Laurila, T.** 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant Soil* 251: 303–317.
- Paasonen-Kivekäs, M. & Yli-Halla, M.** 2005. A comparison of nitrogen and carbon reserves in acid sulphate and non acid sulphate soils in western Finland. *Agric. Food Sci. Finland* 14: 57–69.
- Šimek, M., Virtanen, S., Krištufek, V., Simojoki, A. & Yli-Halla, M.** 2011. Evidence of rich microbial communities in the subsoil of a boreal acid sulphate soil conducive to greenhouse gas emissions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 140: 113–122.
- Thomsen, J.K., Geest, T. & Cox, R.P.** 1994. Mass spectrometric studies of the effect of pH on the accumulation of intermediates in denitrification by *Paracoccus denitrificans*. *Appl. Environ. Microbiol.* 60:536–541.