

Sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiä maankäyttömuodoittain – Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun

Suomen ympäristökeskus

Anssi Karppinen, Juha Riihimäki, Tiina Nokela ja Raimo Ihme

SISÄLLYS

1. Johdanto	3
2. Katsaus happamien sulfaattimaiden vesistökuormituksen vähentämistä koskeviin hankkeisiin	4
3. Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun happamilla sulfaattimailla	6
4. Sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiä	10
4.1 Sulfidihapettumisen vähentäminen.....	11
Pohja- ja putkipadot	13
Juoksutusjärjestelyt ja pumppaamojen käyttö.....	14
Kuivatusmenetelmän muutos, kuivatussyvyyden lisäämisen välttäminen	14
Viljelykasvin vaihtaminen ja pienempi kuivatussyvyys	15
4.2 Maaperän happamuuden neutralointi.....	15
Valuma-alueen kalkitus tai muun alkaloivan materiaalin käyttö	15
Kaivumassojen neutralointi.....	16
4.3 Happaman veden käsittely	16
Pato- ja suodinrakenteet	16
Kalkkisuodinoijat	16
Kalkkirouhepadot ja –pohjat sekä muut neutralointimateriaalit	16
Anaerobiset pohjapadot.....	18
Vesistöjen kalkitus	18
Kosteikot	19
Anaerobinen alkaliniteettia tuottava systeemi.....	19
Aerobinen rakennettu kosteikko.....	19
Anaerobinen rakennettu kompostikosteikko.....	19
Kalkkikivi- ja teräskuonaimetykskenttä.....	20
Aktiiviset menetelmät	20
Leijutuskolonne.....	21
Kippaava neutralointilaitteisto	22
Jatkuva neutralointi annostelulaitteella	23
5. Arvio eri menetelmien soveltuvuudesta maankäyttömuodoittain	24
6. Yhteenveto ja johtopäätökset	27

1. Johdanto

Viime jääkauden jälkeisen Itämeren Litorina -vaiheen aikana matalien ja runsastuottoisten merenlahtien pohjasedimentteihin kerrostui sulfidipitoisia sedimenttejä alueille, jotka ovat maankohoamisen seurauksena nykyisin merenpinnan yläpuolella. Näiden rannikkovyöhykkeellä sijaitsevien muinaisen Litorinameren ylimmän rantaviivan alapuolella tavattavien alueiden lisäksi Suomen kallioperässä on paikoitellen rikkiä sisältäviä kivilajia, mustaliusketta, jonka rapautuessa on maaperään joutunut sulfidipitoisia mineraaleja myös näillä alueilla ja niiden läheisyydessä.

Koskemattomassa ja hapettomassa maaperässä olevat sulfidimineraalit eivät tavallisesti ole ongelmallisia ympäristölle, mutta ne saattavat maankuivatuksen, maanrakennustöiden tai muun ihmistoiminnan tuloksena joutua kosketuksiin ilmakehän hapen kanssa. Hapettuneet rikkiä sisältävät mineraalit muodostavat maaperässä olevan veden kanssa reagoidessaan rikkihappoa, joka liuottaa maaperästä metalleja jopa niin paljon, että happamat ja metallipitoiset valumavedet ovat myrkyllisiä alapuolisten vesistöjen eliöstölle ja aiheuttavat haittaa vesien virkistys- ja talousvesikäytölle sekä infrastruktuurille.

Tämä selvitys on osa EU:n Euroopan aluekehitysrahaston Suomen rakennerahasto-ohjelman rahoittamaa ”Happamien sulfaattimaiden ympäristövaikutusten vähentäminen, esiselvitys” -hanketta. Kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli koota yhteenveto aikaisempien sulfaattimaiden vesistökuormituksen vähentämistä koskeneiden hankkeiden tuloksista keskittyen sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiin. Menetelmävalikoimaa täydennettiin myös kokoamalla tietoa happamien jo suljettujen kaivosten vesienkäsittelyyn käytettävistä passiivisista vesienkäsittelymenetelmistä. Samalla etsittiin myös tietoa eri maankäyttömuotojen happaman valumaveden laadun erityispiirteistä ja kartoitettiin eri maankäyttömuotojen vesienkäsittelymenetelmiin liittyviä tarpeita järjestämällä kaksi työpajaa sidosryhmille.

2. Katsaus happamien sulfaattimaiden vesistökuormituksen vähentämistä koskeviin hankkeisiin

Maa- ja metsätalousministeriön kokoamassa työryhmämuistiossa ”Kohti happamien sulfaattimaiden hallintaa - Ehdotus happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivoiksi” (Maa- ja metsätalousministeriö 2009) esitettiin laajasti tiedot happamien sulfaattimaiden esiintymisestä, haitoista ja haittojen torjuntakeinoista maa- ja metsätalousalueilla Suomessa. Työryhmämuistion valmistumisen jälkeen on toteutettu useita uusia hankkeita, joissa on pureuduttu happamien sulfaattimaiden aiheuttamiin ongelmiin ja happamien valumavesien ympäristöhaittojen vähentämiseen.

Tähän raporttiin on koottu tietoja useista jo päättyneistä hankkeista.

CATERMASS, ”Climate Change Adaptation Tools for Environmental Risk Mitigation of Acid Sulphate Soils / Happamien sulfaattimaiden ympäristöriskien vähentäminen - Sopeutumis-keinoja ilmastomuutokseen” (2010 – 2012) ja **BEFCASS**, ” Best Farming Methods for Cultivating on Acid Sulfate Soils / Maatalouden parhaiden viljelymenetelmien kehittämishanke happamilla sulfaattimailla” (2013-2015)

Suomen ympäristökeskuksen koordinoiman ja EU:n rahoittamaan LIFE+ ohjelmaan kuuluvan CATERMASS hankkeen tavoitteena oli etsiä keinoja happamien sulfaattimaiden vesiensuojelun parantamiseen. Hankkeessa kehitettiin menetelmiä happamien sulfaattimaiden ympäristöhaittojen vähentämiseksi sekä maankäytön ja vesiensuojelun sopeuttamiseksi muuttuvaan ilmastoon. Samalla koottiin tietoa myös ongelma-alueista, happamuus- ja metallialtistuksen kehityksestä, ympäristöriskien luonteesta ja prioriteettikohteista sekä käytettävissä olevista vesiensuojelumenetelmistä ja niiden toimivuudesta muuttuvassa ilmastossa (Riihimäki ym. 2013).

CATERMASS hankkeen demonstraatiokohteella testattiin uudenlaista tekniikkaa viljelykäytössä olevien happamalla sulfaattimaalla sijaitsevien säätösalaajittujen peltolohkojen pohjaveden pinnan säätelyyn. Kohteessa oli kolme lohkoa, joissa selvitettiin erilaisten ojitustapojen (altakastelu, säätösalaajitus ja tavanomainen salaajitus) vaikutusta pohjaveden tasoon, veteen ja ilmaan tulevaan kuormitukseen sekä viljasatoon. Koelohkot eristettiin sulfidikerrostumaan ulottuvalla muovikalvolla, jotta salaajaputkiston ja säätökaivon ohi maaperässä tapahtuva veden virtaus saatiin minimoitua (Uusi-Kämpä ym. 2013; Österholm ym. 2015).

CATERMASS -hankkeen Söderfjärdenin demonstraatiokentän infrastruktuurin ylläpitoa ja menetelmien vaikutusten seuranta vedenlaadun, kasvihuonekaasupäästöjen ja viljasatojen osalta jatkettiin hankkeen päätyttyä BEFCASS hankkeessa (Österholm ym. 2015; Virtanen ym. 2015a; Virtanen ym. 2015b).

SaKu, ” Kaupunki ja vesi - Sanginjoen virkistyskäyttöarvon parantaminen ja ekologinen kunnostus” (2008 – 2011)

SaKu – hankkeessa selvitettiin Oulujoen alimman sivujoen, Sanginjoen, ekologista, fysikaalis-kemiallista ja hydro-morfologista tilaa, happamuuden alkuperää ja esiintymistä sekä testattiin happamien huuhtoutumien ehkäisyyn ja neutralointiin soveltuvia menetelmiä (Tertsunen ym. 2012). Hankkeessa tarkasteltiin muun muassa mahdollisuuksia happamuushaittojen vähentämiseen tutkimalla turvetuotannosta poistuvien alueiden vesittämistä, sekä järvien vedenpinnan noston ja suo-ojien vedenpinnan nos-

ton vaikutuksia valumaveden happamuuteen. Myös kalkkisuodinpatojen, kalkkikynnysten, kalkituksen, masuunikuonan ja tuhkalannoituksen vaikutuksia tutkittiin erilaisissa ympäristöissä.

HaKu, ”Happaman vesistökuormituksen ehkäisy Siikajoki-Pyhäjoki -alueella 2009–2012” (2009 – 2012) ja **Hydro – Pohjanmaa** (2012 – 2014)

Siikajoen ja Pyhäjoen alueella toteutetussa HaKu –hankkeessa (Suomela 2014) selvitettiin alueen happamuutta aiheuttavien sulfaattimaiden sijaintia ja ominaisuuksia (Edén ym. 2014) ja testattiin erilaisia ojitusmenetelmiä happaman kuormituksen torjunnassa viljelykäytössä oleville peltolohkoille perustetulla koealueella (Honkakoski 2013; Suomela ym. 2014). Hankkeessa selvitettiin myös happaman kuormituksen vaikutusta alueen valumavesien laatuun (Saarinen ja Marttila 2014a) ja kalastoon (Huhmarniemi 2014) sekä happamalla sulfidimaalla sijaitsevien metsien kunnostusojituksen vaikutuksia vedenlaatuun. Kunnostusojituskohteilla tutkittiin DRAINMOD -mallinnuksella erilaisten ojitustapojen ja kokooajajaan asennettavan säätöpadon mahdollisuuksia sulfidien hapettumisen ehkäisyssä (Saarinen ym. 2013; Saarinen ja Marttila 2014b). Myös kosteikkojen neutralointimenetelmien käyttöä happamien valumavesien neutraloinnissa selvitettiin useilla kohteilla (Tertsunen 2014).

Pellon ojitusmenetelmäkoetta varten perustetun koealueen seurantaä jatkettiin hankkeen päätyttyä osana Hydro – Pohjanmaa -hanketta (Karhunen ym. 2014).

SuHE, ”Sulfaattimailla syntyvän happaman kuormituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät” (2011 – 2014)

SuHE – hankkeessa (Hadzic ym. 2014) kehitettiin lyhytkestoisten happamien valumavesipulssien havaitsemiseen soveltuvia menetelmiä turvetuotantoalueille sekä kehitettiin ja testattiin happaman kuormituksen neutralointiin käytettäviä menetelmiä ja neutralointimateriaaleja (Karjalainen 2014; Nilivaara-Koskela 2014). Hankkeessa selvitettiin myös maaperän kuivatuksen aiheuttamia riskejä valumaveden happamoitumiselle rannikon Litorina- ja mustaliuskealueilla sekä sisämaan mustaliuskealueilla. Lisäksi hankkeessa selvitettiin turvetuotantoalueiden jälkikäyttöön soveltuvia menetelmiä ympäristöhaitan pienentämiseksi sulfidipitoisilla ja jo happamoituneilla alueilla.

PRECIKEM, ”Kemisk precisionsbehandling av sura sulfatjordar för att förhindra uppkomsten av syra / Kemiallinen täsmäkäsittely haponmuodostuksen estämiseksi happamilla sulfaattimailla” (2010 – 2014)

Hankkeessa testattiin menetelmää, jossa salaojaputkistoon pumpattiin säätökaivojen kautta veteen sekoitettua hienojakoista kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) ja kalsiumhydroksidia (Ca(OH)_2). Veden mukana aineet kulkeutuvat maassa olevia rakoja ja huokosia pitkin neutraloiden huokosissa olevan hapon ja hidastaen happamissa oloissa olevien mikrobien toimintaa haponmuodostuksessa (Engblom ym. 2014).

CLOSEDURE, ” Mine Closure Technologies Resource – Closedure” (2013-2015)

Closedure projekti oli TEKESin Green Mining ohjelman rahoittama, VTT:n ja GTK:n toteuttama projekti, jonka ”Veden käsittely” -työpakettin yhtenä tuotoksena oli selvitys suljettavien kaivosten jälkihoidon soveltuvien passiivisten vedenkäsittelymenetelmien käyttökelpoisuudesta ja toiminnasta. Työpaketin tuloksia esitellään projektin tuottamalla ja GTK:n ylläpitämällä Wiki -sivustolla (Geologian tutkimuskeskus 2015). Wiki -sivustolla kuvattuja passiivisia vedenkäsittelymenetelmiä ovat aerobiset rakennetut kosteikot, anaerobiset rakennetut kompostikosteikot, kalkkikivi- ja teräskuonaimeytyskentät, avoimet kalkkikiviojat sekä pelkistävät ja alkaliniteettia tuottavat systeemit.

3. Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun happamalla sulfaattimailla

Kirjallisuuskatsauksen avulla selvitettiin eri sulfaattimailla sijaitsevien maankäyttömuotojen valumaveden laatua. Lisäksi otettiin vesinäytteitä sulfaattimailla, jotka sijaitsevat turvetuotannon, metsätalouden ja maatalouden yhteydessä. Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun happamalla sulfaattimailla ei ole ollut suoranaisesti yhdenkään kirjallisuuskatsauksessa käsitellyn tutkimuksen aiheena. Muutamissa tiettyihin maankäyttötyyppeihin keskittyvissä tutkimuksissa joitain maankäyttöön liittyviä huomioita on kuitenkin tuotu esille, joita on esitetty alla:

- Saarisen ym. (2013) tutkimuksessa todetaan, että tutkittujen valuma-alueiden tuloksissa erottuu kaksi erilaista valuma-aluetyyppiä: alueet, joiden vallitseva maankäyttö on ojitettua turvemetsät ja maatalousvaluma-alueet. Tutkituilla valuma-alueilla happamuuden, metallien ja sulfaatin huuhtoutuminen lisääntyy voimakkaasti maatalousmaan lisääntyessä (Saarinen ym. 2013).
- Suometsissä turvekerros on tavallisesti paksumpi, mutta tiheydeltään pienempi kuin maatalousalueella ja rikkiä sisältävät materiaalit ovat syvemmissä kerroksissa kuin maatalousalueella. Metsätalouden vaikutukset valumavesien laadussa ovat todennäköisesti maatalousalueita pienemmät johtuen osaltaan myös pienemmästä kuivatussyvyydestä (Saarinen ym. 2013).
- Sotkamon mustaliuskealueella ojavesien metallipitoisuuksissa ei ojitetuilla turvemetsillä päätehakkuun jälkeen ollut tilastollisesti merkitsevää eroa mustaliuskekallioperällä ja muulla kallioperällä sijaitsevien koealueiden välillä tutkimusjaksolla 2008-2010, vaikka sekä turpeen että ojaveden korkeimmat metallipitoisuudet havaittiin mustaliuskealueilla. Vaihtelu alueiden välillä oli suurta ja mustaliuske voi lisätä metallien pitoisuuksia ojavedessä joillakin kohteilla (Kiikkilä ym. 2014). Kuitenkin pitkällä seurantajaksolla (2008-2013) tilastollisia eroja on havaittavissa (Ukonmaanaho ym. 2013). Mustaliuskekallioperän vaikutus turpeen metallipitoisuuksiin sen sijaan on selkeä (Mäkilä ym. 2015).
- SuHE -hankkeen tulosten mukaan happamalla sulfaattimailla sijainneiden turvetuotantoalueiden sarkaojien veden pH ei ollut erityisen hapanta ja valumaveden sähkönjohtokykykin oli suhteellisen alhainen. Kuitenkin kokoojaojien vesien sulfaattipitoisuudet olivat moninkertaisesti normaalia korkeammat joskin selvästi alempia kuin happamalla sulfaattimailla sijaitsevilta maatalousalueilta tulevien vesien sulfaattipitoisuudet. Mustaliuskekohteiden turpeessa havaittiin olevan paljon rikkiä, joka aiheuttaa hapanta valuntaa (Hadzic ym. 2014).

Kirjallisuuskatsauksen mukaan yhteenvetona voidaan päätellä, että maatalous on usein aiheuttanut muuta maankäyttöä huomattavasti pahempia happamoitumis- ja metallienhuuhtoutumisongelmia. Myös kirjallisuudesta koostettu vedenlaatumateriaali tukee tätä päätelmää veden happamuuden ja varsinkin vesieläölle myrkyllisen alumiinin huuhtoutumisen osalta (taulukko 1). Lisäksi myös turvetuotannon yhteydessä on havaittu erittäin alhaisia valumaveden pH arvoja ja suuria valumaveden metallipitoisuuksia. Sulfaattimailla sijaitsevan metsätalouden vaikutus veden laatuun näyttäisi olevan käsitellyistä maankäyttömuodoista vähäisin. On kuitenkin muistettava, että metsätalouden osuus valuma-alueesta voi olla merkittävä ja siten sen vaikutus suuressa mittakaavassa merkittävä.

Tämän hankkeen vesinäytteenoton tulokset on esitetty taulukossa 2. Lisäksi sulfaattimaiden valumavesien vedenlaatua verrattiin kaivosten valumavesien vedenlaatuun, jotta pystyttiin arvioimaan myös kaivosten yhteydessä käytössä olevien vesienkäsittelymenetelmien soveltuvuutta eri tarkoituksiin. Kaivosteollisuuden osalta mukaan otettiin vain suljettujen kaivosten eri vesijakeita, koska tässä tutkimuksessa mukana olevien ratkaisujen oletetaan olevan sovellettavissa lähinnä suljettujen kaivosten vesille ja vesimäärille. Kaivosten valumavesien laatu voi vaihdella erittäin paljon riippuen louhittavasta malmista ja valumaveden alkuperästä (esim. rikastusprosessin eri sivujakeiden varastointialueet) (taulukko 1).

Vesienkäsittelyratkaisujen valinnan kannalta merkittävin ero vedenlaadussa on kaivosteollisuuden ja muiden maankäyttömuotojen valumavesien raudan ja muiden metallien määrässä sekä veden happamuudessa (taulukko 1). Muiden maankäyttömuotojen valumavesissä on rautaa ja muita metalleja merkittävästi suurempia määriä kuin suljettujen kaivosten valumavesissä. Rauta on tärkein yksittäinen metalli, joka voi saostua erilaisten passiivisten käsittelyratkaisujen pinnoille haitaten sen toimintaa. Rautaa on paljon erityisesti turvetuotannon ja metsätalouden valumavesissä. Voidaankin todeta, että suurta osaa kaivosteollisuuden ratkaisuihin ei voida suoraan siirtää sulfaattimailla sijaitsevan muun maankäytön vesienkäsittelyyn. Varsinkin hapellisissa oloissa toimivien ja hapekasta vettä käsittelevien ratkaisujen voidaan odottaa tukkeutuvan turvetuotannon, metsätalouden tai maatalouden valumavesien käsittelyssä. Edellä mainitusta ongelmasta on saatu havaintoja useissa eri hankkeissa (esim. Hadzic ym. 2014 ja Tertunen ym. 2012). Erilaisten anaerobisten vastaavien rakenteiden käyttöä tulisi kuitenkin tutkia, koska niiden yhteydessä saostumis- ja tukkeutumisongelmia pystytään hallitsemaan paremmin. Erityisesti turvetuotannon ja maatalouden valumavesien alhainen pH aiheuttaa haasteita valumaveden käsittelylle. Alempi valumaveden pH ja oletettavasti myös suurempi asiditeetti vaativat neutralointiratkaisuilta pitkää viipymää tai erittäin reaktiivisia neutralointimateriaaleja tyydyttäviin tuloksiin pääsemiseksi.

Hankkeen vesinäytteenoton tulokset ovat yhteneväisiä kirjallisuudesta löytyneiden tulosten kanssa (taulukko 2). Pieni näytteenotto- ja kohdemäärä vahvistavat, että kohteiden välillä on suurta vaihtelua, joka näkyy myös kirjallisuudesta löytyneiden arvojen suuresta vaihteluvälistä. Edellä mainitun vuoksi on erittäin tärkeää suunnitella vesienkäsittelyratkaisut aina kohdekohtaisesti ja vedenlaadun seurantatietoon perustuen.

Taulukko 1. Vedenlaatu happamilla sulfaattimailla ja kaivoksilla eri tutkimuksissa. Kaikki pitoisuudet on ilmoitettu yksikössä µg/l, pH arvoa lukuun ottamatta. Kaivosteollisuuden tulokset ovat suljettujen kaivoksien eri vesijakeiden tuloksien mediaaneja. Tulokset on koottu seuraavista tutkimuksista: Hadzic ym. 2014, Kiiikkilä ym. 2014, Saarinen ym. 2013 ja Wolkersdorfer ja Howell 2005. Taustapitoisuudet (Nikunen 2000) on määritetty suodatetuista näytteistä ja muut tulokset ovat suodattamattomista näytteistä, joten tulokset eivät ole keskenään täysin vertailukelpoisia. Merkinällä "X/X" on erotettu kahdesta eri lähteestä saadut vastaavat tiedot toisistaan.

Suure	Turvetuotanto		Kaivosteollisuus		Maatalous		Metsätalous		Taustapitoisuus (liukoinen) mediaani
	Vaihteluväli	Mediaani	Vaihteluväli	Mediaani	Vaihteluväli	Mediaani	Vaihteluväli	Mediaani	
Al	8 - 91 000	733	8,5 - 8900	224	3900 - 275619	40553	53 - 830	323/335	95
As	0,4 - 0,9	0,6			0,15 - 9,1	1,5			0,36
Cd	0,01 - 0,30	0,03			1,0 - 25	2,7			< 0,02
Co	0,39 - 51	12	0,5 - 652	21	74 - 718	177			0,17
Cr	0,5 - 11	0,8			1,3 - 121	6,5	0,85 - 2,16	1,7	0,5
Cu	0,43 - 17,7	1,4	0,7 - 1900	7,2	13 - 584	49	0,68 - 4,02	2,05	0,64
Fe	99 - 120 000	5780	0,4 - 1400	12,5	300 - 251000	2886	2200 - 5050	4125	680
Mn	19 - 11 000	340	14,1 - 8900	386	2600 - 121400	6490	175 - 360	280	29
Ni	0,53 - 79,6	7,4	5,8 - 1200	98	134- 1217	338	0,059 - 44,8	12	0,52
Pb	0,26 - 0,9	0,42			0,1 - 6,6	0,6			0,23
V	0,09 - 1,80	0,39			0,2 - 38	0,79			0,53
Zn	< 2 - 1700	38	12 - 43000	12	321 - 2500	710	2 - 139	3/58	3,6
pH	2,7 - 4,3	4,3	2,3 - 7,5	5,1	2,9 - 4,7	3,8	5 - 7	6	5,9

Taulukko 2. Hankkeessa tehdyn vedenlaadunseurannan tuloksien keskiarvot maankäyttömuodoittain. Tulokset ovat kahden näytteenottokerran keskiarvoja kahdelta kohteelta turvetuotannon osalta (Kuuhekamonneva ja Hangasneva) ja yhden kohteen osalta metsätalouden osalta (Kiimakorven koealue). Maatalouden osalta tulokset ovat yhden näytteenottokerran tuloksia yhdeltä kohteelta (Ruukin koealue).

Suure	Turvetuotanto	Metsätalous	Maatalous
Al	5353	700	4100
As	1,0	1,2	4
Cd	0,26	0,05	0,11
Co	29	6	12
Cr	1,185	0,915	8,8
Cu	3,0	0,9	14
Fe	1775	2750	57000
Mn	1569	690	3100
Ni	41,6	8,7	37
Pb	0,26	0,25	0,12
V	7,2	0,9	14
Zn	127	30,8	100
pH	4,2	5,3	5

4. Sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiä

Happamien valumavesien neutralointiin käytettävät menetelmät jaetaan yleensä aktiivisiin ja passiivisiin menetelmiin. Aktiiviset menetelmät tarvitsevat toimiakseen yleensä jatkuvaa kemikaalin annostelua tai ulkopuolista energiaa tai ylläpitoa kun taas passiivisille menetelmille riittää ajoittainen ylläpito. Passiiviset menetelmät ovat yleensä edullisempia toteuttaa, mutta niillä on merkittäviä käyttörajoitteita. Ne sopivat parhaiten pienen virtaaman ja alhaisen asiditeetin tilanteisiin. Aktiiviset menetelmät sitä vastoin voidaan suunnitella toimimaan lähes kaikissa happamuus- ja virtaamatilanteissa (Taylor ym. 2005).

Sulfaattimaiden ympäristöhaittojen ehkäisyyn soveltuvat menetelmät ja toimenpiteet voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan: 1) Sulfidihapettumisen vähentäminen 2) Maaperän happamuuden neutralointi ja 3) Happamien valumavesien käsittely (Österholm 2012).

Seuraavassa on esitelty myös yleisiä happamien kaivosvesien käsittelyssä käytettyjä passiivisia menetelmiä, jotka saattavat joissain tapauksissa sopia myös happamien sulfaattimaiden aiheuttaman happaman valumaveden käsittelyyn. Tarkemmat kuvaukset menetelmistä löytyvät CLOSEDURE projektin Wiki -sivuilta <http://wiki.gtk.fi/web/mine-closedure/wiki>.

Tässä raportissa menetelmät on jaoteltu seuraavasti:

- 1) Sulfidihapettumisen vähentäminen
 - a) Säättösalaojitus ja säätökastelu (altakastelu)
 - b) Pohja- ja putkipadot
 - c) Juokutusjärjestelyt ja pumppaamojen käyttö
 - d) Kuivatusmenetelmän muutos, kuivatussyvyyden lisäämisen välttäminen
 - e) Viljelykasvin vaihtaminen ja pienempi kuivatussyvyys

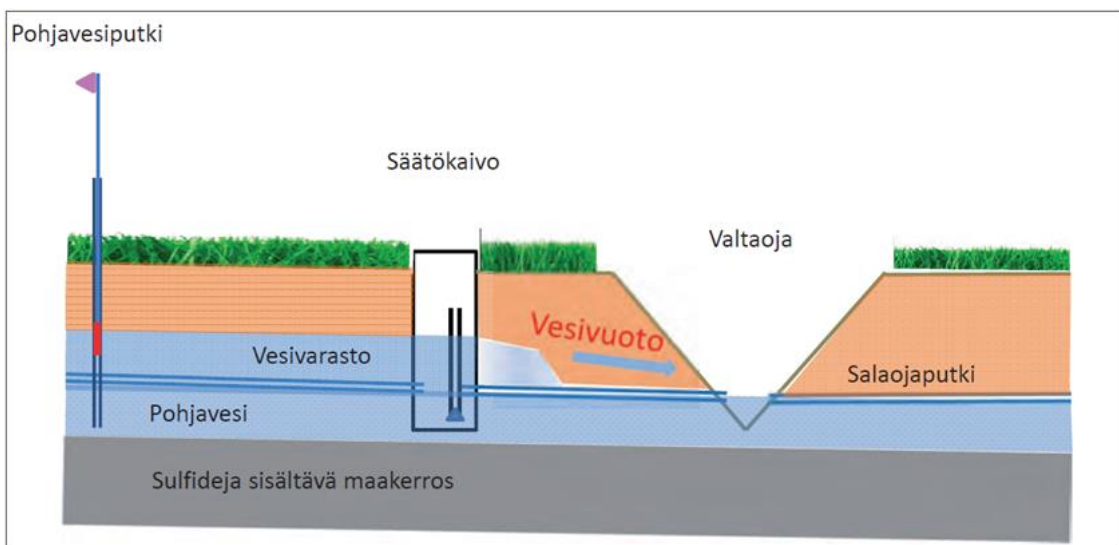
- 2) Maaperän happamuuden neutralointi
 - a) Valuma-alueen kalkitus
 - b) Kaivumassojen neutralointi

- 3) Happaman veden käsittely
 - a) Kalkkisuodinojat
 - b) Kalkkirouhepadot ja -pohjat
 - c) Anaerobiset pohjapadot
 - d) Vesistöjen kalkitus
 - e) Kosteikot
 - f) Aktiiviset menetelmät

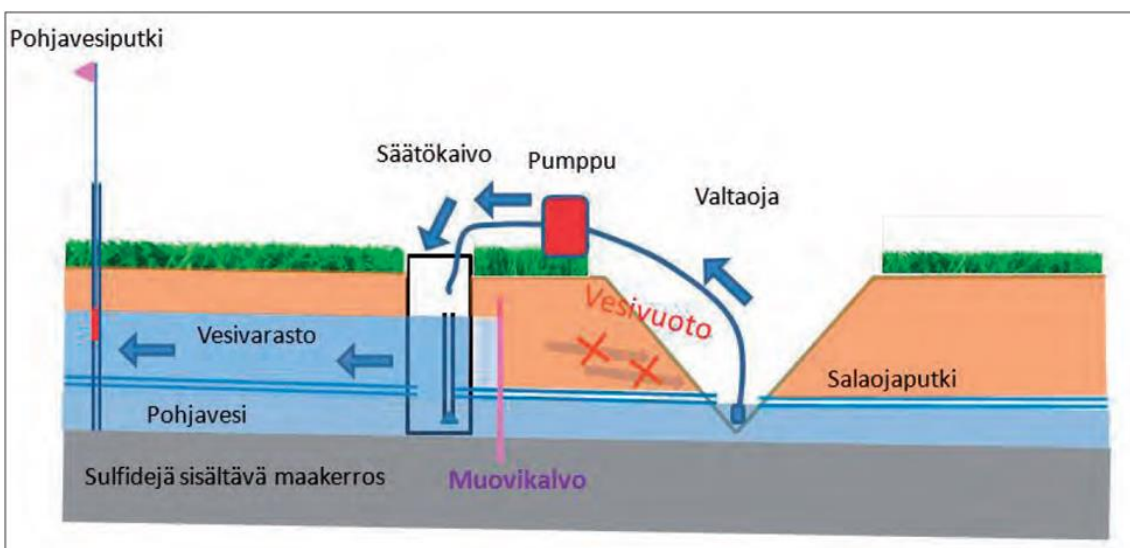
4.1 Sulfidihapettumisen vähentäminen

Säätösalaojitus ja säätökastelu

Säätösalaojituksessa salaojavalunta johdetaan salaojitetun alueen kokoojajojassa olevaan säätökaivoon, jonka padotuslaitteilla voidaan säätää pohjavedenpintaa (kuva 1). Tavoitteena on pitää pohjavedenpinta viljelyn kannalta optimaalisella tasolla. Säätösalaojituksella voidaan vähentää sulfidikerrosten hapettumista kuivan kauden aikana nostamalla padotuskorkeutta kevättöiden jälkeen ja varastoimalla vettä kasvukauden ajaksi. Mikäli säätösalaojitetun pellon läheisyydessä on saatavissa kasteluvettä, voidaan kuivina kausina säätökaivojen kautta pumpata vettä salaojaputkistoon. Tällöin puhutaan säätökastelusta tai altakastelusta (kuva 2). Säätökastelun tehoa voidaan parantaa myös eristämällä salaojitettu lohko kokonaan tai vain valtaojan puoleiselta sivultaan maahan upotettavalla muovikalvolla, joka vähentää maaperästä suoraan valtaojaan tapahtuvaa valuntaa (kuva 2).



Kuva 1. Periaatekuva säätösalaojituksesta ja tavanomaisesta salaojituksesta. Kuva: Rainer Rosendahl (Uusi-Kämpä ym. 2013).



Kuva 2. Periaatekuva säätökastelusta ja muovikalvon sijoittamisesta. Kuva: Rainer Rosendahl (Uusi-Kämpä ym. 2013).

Mustasaaren Söderfjärdenin alueelle perustetulla CATERMASS -hankkeen demonstraatiokohteella havaittiin säätösalaajitetun, muovikalvolla eristetyn lohkon kesäaikaisen pohjavedenpinnan laskevan hitaammin ja pysyvän noin 10 – 20 cm normaalia salaajitusta korkeammalla tasolla, pysyen myös pidemmän ajan kriittisen sulfidikerroksen yläpuolella. Vastaavasti säätökastellulla lohkolle pohjavedenpinta pysyi noin 30 cm normaalia salaajitusta korkeammalla ja koko ajan kriittisen sulfidikerroksen yläpuolella (Österholm ym. 2015; Virtanen ym. 2015a). Veden pumppaus säätökastellulle lohkolle ei ollut jatkuvaa vaan kastelujaksot olivat kertaluonteisia. Muovieristyksellä oli suuri merkitys pohjaveden korkeuden pysymisessä halutulla tasolla säätökastelulohkolla. Todennäköisesti vuotoa avo-ojiin kuitenkin tapahtui jonkin verran (Österholm ym. 2015). Kuivina kesinä pelkkä säätösalaajitus ei riitä pitämään pohjavedenpintaa sulfidikerroksen yläpuolella (Virtanen ym. 2015b).

Salaojaveden pH -arvoissa ei havaittu eroja käytettäessä eri kuivatustapoja vuosien 2010–2012 aikana, mutta salaojaveden asiditeetti- ja alumiinipitoisuudet olivat pienemmät säätökastelualueella ja suurimmat tavanomaisella salaajitusalueella. Valumaveden asiditeetti oli keväisin pienempi kuin syksyllä. Syksyisin valumaveden asiditeetti oli kaikkina tutkimusvuosina alhaisin säätökastelulohkolla ja korkein tavanomaisesti salaajitetulla lohkolle (Virtanen ym. 2015a). Kasvihuonekaasujen päästöjen suuruuteen ei käytetyllä ojitustekniikalla tai pohjaveden pinnan korkeudella ollut vaikutusta (Uusi-Kämpä ym. 2013).

Säätökastelun ja säätösalaajituksen käyttö on yksinkertaista ja niiden avulla on mahdollista estää sulfidien hapettumista. Käytön tueksi tarvitaan kuitenkin tietoa pellon pohjavedenpinnan vaihtelusta. Kohhteessa käytetyt kelluvat pohjavesiantennit osoittautuivat helppokäyttöisiksi ja luotettaviksi pohjavedenpinnan korkeuden seurannassa, joten niiden käyttöä suositellaan säätösalaajituksen yhteydessä (Österholm ym. 2015).

HaKu -hankkeen Ruukin koepellolla säätösalaajituksen, säätökastelun ja tavanomaisen salaajituksen lohkoja ei eristetty muovikalvolla ja säätökastelu oli lähes jatkuvaa ja pohjavedenpinta pidettiin selvästi sulfidikerroksen yläpuolella (Suomela ym. 2014). Säätösalaajitus ja kastelu auttoivat pitämään pelto-lohkojen pohjaveden pinnan riittävän korkealla ojitussyvyyden yläpuolella ja estämään sulfidien hapettumisen.

Menetelmien erojen luotettava todentaminen Ruukin koealueella ei ollut mahdollista lyhyen seuranta-jakson vuoksi ja myös koelohkojen erot vaikuttivat tulokseen, sillä tavanomaisesti salaajitetun alueen valumavesi oli laadultaan muiden alueiden valumavettä parempaa sisältäen vähän tai ei lainkaan sulfideja. Ajoittain saatiin kuitenkin viitteitä säätökastelun positiivisista vaikutuksista valumaveden laatuun, esimerkiksi valumaveden alkaliniteetin, asiditeetin ja metallipitoisuuksien osalta (Suomela ym. 2014). Säätökastelu näytti toimivan paremmin kuin säätösalaajitus erittäin pitkäkestoisina kuivina ajanjaksoina (Karhunen ym. 2014).

Säätökastelun järjestäminen vaatii tasaisen lohkon ja tiheän säätösalaajituksen lisäksi mahdollisuuden jatkuvan tai kertaluonteisen kastelun järjestämiseen, kasteluvesilähteen ja mahdollisuuden kastelun tarpeen seurantaan sekä tarvittaviin huoltotoimenpiteisiin (Suomela ym. 2014).

Ruukin koealueella säätökaivoihin kertyvä ruoste vaikeutti säätölaitteiston käyttämistä ja esti vedenpinnan tarkan säätämisen (Suomela ym. 2014). Järjestelmän toimintakyvyn säilyttämiseksi säätökaivot onkin hyvä avata syystöiden jälkeen muutamaksi päiväksi, jotta salaajaputkiin kertynyt liete ja ruostesakka huuhtoutuvat pois (Uusi-Kämpä ym. 2013).

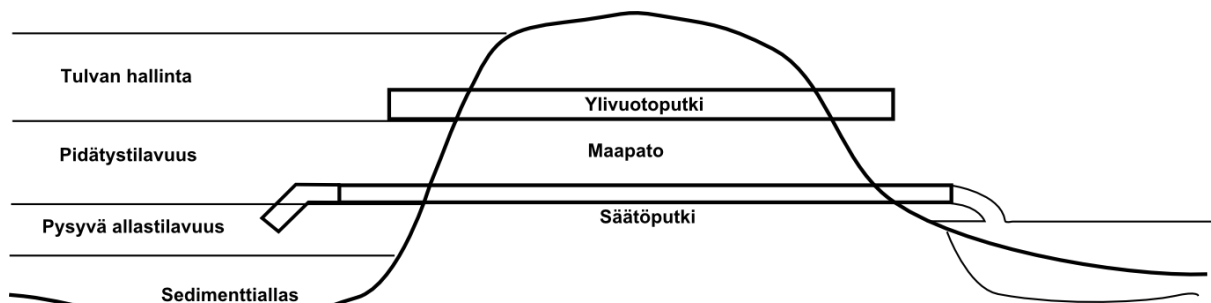
Söderfjärdenin alueella arvioitu kastelun tuoma lisäkustannus oli vuodessa 95 – 195 €/ha (Uusi-Kämpä ym. 2013), kun taas Ruukissa kustannukset olivat 1,2 -550 €/ha tutkimusvuosina (Karhunen ym. 2014). Ruukin kustannusten suuri hajonta johtui eroista pumpatun veden määrissä ja käyttötarkoituksen suhteen liian tehokkaasta sekä paljon energiaa kuluttavasta pumpusta. Laskennallisesti kustannus voisi olla noin 35 - 70 €/ha kasteluvesien määrästä tai käytetyistä pumpuista riippuen (Suomela ym. 2014). Kus-

tannuksissa ei ole huomioitu pumpun hankintahintaa. Muovieristyksen kustannus, sisältäen materiaalin ja asentamisen, on noin 5 €/juoksumetri (Uusi-Kämpä ym. 2013).

Säätökastelun tehoa maaperässä tapahtuvan haponmuodostuksen estämiseksi on tehostettu myös lisäämällä salaojaputkiin pumpattavaan kasteluveteen kalsiumkarbonaattia ja kalsiumhydroksidia (Engblom ym. 2015). Neutralointimateriaalilla käsitellyillä koealueilla valumavesien asiditeetti pieneni ja valumaveden pH kohosi riippuen annostuksesta (Röning 2014; Engblom ym. 2015). Vaikutus valumaveden laatuun oli havaittavissa ainakin vuoden ajan. Kalsiumkarbonaattikäsitelyllä valumaveden alumiinipitoisuus pieneni kahdeskymmenesosaan. Käsitelyn vaikutusta maaperän geokemiaan ei kuitenkaan pystytty todentamaan koekenttien maanäytteistä (Dalhem 2014), eikä pohjavesiputkista otetuista vesinäytteistä (Röning 2014), joten neutralointiaineet eivät todennäköisesti leviä kovin kauas salaojaputkista. Neutralointimateriaalin leviämistä arvioitiin muutamassa paikassa myös silmämääräisesti kaivamalla salaojaputket esiin, jolloin havaittiin kalsiumkarbonaatin levineen jopa neljän metrin etäisyydelle salaojaputkesta (Engblom ym. 2015).

Pohja- ja putkipadot

Pohjapatojen ja putkipatojen (kuva 3) avulla säädetään vedenpinnan korkeutta ojissa ja voidaan jossain määrin vaikuttaa vedenpinnan vähimmäiskorkeuteen kesäaikana (Maa- ja metsätalousministeriö 2009). Putkipadoilla pyritään leikkaamaan tulvahuippuja ja lisäämään veden viipymää ojastossa. Veden pidättäminen vähentää sulfidipitoisten maakerrosten hapettumista ja hidastaa happamuuspiikkien syntymistä ja vähentää niiden voimakkuutta (Hadzic ym. 2014).



Kuva 3. Putkipadon toimintaperiaate. Kuva: Juha Riihimäki (Marttila ja Kløve 2010 mukaan).

Sanginjoen valuma-alueella tehdyssä vertailututkimuksessa verrattiin putkipatokohteen ja normaalin metsäojituskohteen vesimääriä ja vedenlaatua. Putkipadolla ei vesinäytteiden perusteella näyttänyt olevan vaikutusta valumaveden happamuuteen kunnostusojitusalueella, joskin jatkuvatoimisten mittareiden tuloksissa näkyi äkillisten virtaamahuippujen aikana toisinaan putkipatoalueen mittauksissa hiukan korkeampia veden pH arvoja (Tertsunen ym. 2012).

Kunnostusojituksen yhteydessä rakennettavien putkipatojen laajemman käytön vaikutuksia arvioitiin myös teoreettisesti laskemalla paikkatietojen ja karttatarkastelun avulla sopiviin paikkoihin sijoitettavien putkipatojen vaikutusta viipymään osavaluma-alueille simuloitujen valuma- ja virtaamatietojen ja laskennallisten ojatilavuuksien perusteella. Tällä laskennallisesti tehdyllä pidätyksen lisäyksellä ei ollut merkittävää vaikutusta Sanginjoen virtaamiin tai happamaan huuhtoumaan, eikä putkipatojen käyttöä alhaisten veden pH -arvojen ehkäisyyn suositella (Tertsunen ym. 2012).

Happamien sulfaattimaiden alueella sijaitsevan kunnostusojitetun alueen kokoojaojaan asennettavan säätöpadoon vaikutusta pohjavedenpinnan korkeuteen mallinnettiin DRAINMOD -mallilla käyttäen läh-

tötietona alueen sääolosuhteita, maaperätietoja ja kuivatusolosuhteita. Säätopadon vaikutuksia simuloitiin hyvin kuivana vuotena 2006. Tulosten mukaan pohjaveden pinta oli padotetulla alueella turvekerroksen alapuolella noin kuukauden lyhyemmän ajan kuin ilman patoa (Saarinen ja Marttila 2014b; Saarinen ym. 2013).

Juoksutusjärjestelyt ja pumppaamojen käyttö

Poikkeustapauksissa happamuuden haittoja voidaan vähentää säännöstellyissä vesistöissä käyttämällä juoksutusjärjestelyjä ja pumppaamoja siten, että happamuuspiikit laimenevat tai siirtyvät eliöstön kannalta vähemmän haitalliseen ajankohtaan. Happamia vesiä voidaan myös johtaa alueille, joilla niistä aiheutuu vähemmän haittaa. Juoksutusjärjestelyjen ja pumppausten käyttöön soveltuvien pengerrytetyjen alueiden osuus on pieni ja happaman veden tehokas pumppaaminen saattaa aiheuttaa paikallisia happamuusongelmia (Maa- ja metsätalousministeriö 2011).

Kuivatusmenetelmän muutos, kuivatussyvyyden lisäämisen välttäminen

Metsäalueen kunnostusojituksen ojasyvyyksien ja ojienvälisten etäisyyksien vaikutuksia pohjavedenpintaan happamalla sulfidimaalla mallinnettiin HaKu -hankkeen metsäojituskohteessa DRAIN-MOD -mallilla. Mallin sovellusalueella ojien syvyys on noin 1 m ja ojien välinen etäisyys noin 40 m. Tehdyn seurannan mukaan pohjaveden pinta ei laskenut turvekerroksen alapuolelle seuranta-aikana. Mallitarkastelulla laskettiin pohjavedenpinnan teoreettisia vaihteluita taaksepäin vuoteen 1960 saakka ja havaittiin, että hyvin kuivina kesinä saattaa pohjavedenpinta laskea mineraalimaahan ja aiheuttaa sulfidien hapettumista (Saarinen ja Marttila 2014b). Ojatiheyden tai ojasyvyyden kasvaessa lisääntyy myös riski, että pohjavedenpinta laskee sulfidikerrokseen. Nykysuositusten mukainen ojitus tarkastelun alueen kaltaisissa olosuhteissa vähentää kuitenkin riskiä pohjaveden pinnan laskemisesta sulfidikerrokseen (Saarinen ym. 2013). Pohjaveden pinnan kontrollointi on tärkeää happamien valuntapiikkien välttämiseksi ja tähän voidaan päästä välttämällä alkuperäisen ojitusyvyiden kasvattamista kunnostusojituksen yhteydessä tai ojaverkoston purkukohtiin rakennettavilla padoilla (Saarinen ym. 2013).

Viljelykasvin vaihtaminen ja pienempi kuivatussyvyys

Kuivatussyvyyden muutoksen ekologisia ja taloudellisia vaikutuksia tarkasteltiin laskennallisesti Kyronjoen valuma-alueella ja todettiin, että toimenpiteiden keskittäminen alueille, joilla sulfidikerros on lähellä maanpintaa, ei ole sen tehokkaampi kuin muillakaan alueilla vaan kuivatustilan rajoittaminen kannattaa soveltaa alueille, joilla se on maatilatalouden kannalta järkevä vaihtoehto (Saarikoski ym. 2014).

4.2 Maaperän happamuuden neutralointi

Valuma-alueen kalkitus tai muun alkaloivan materiaalin käyttö

Valuma-alueelta tulevan veden laatuun voidaan vaikuttaa kalkitsemalla valuma-alueella sijaitsevia kosteikoita ja muita alueita, joissa vesi tulee lähelle maanpintaa. Ruotsissa valuma-aluekalkitusta on käytetty virtavesiin ja lyhytviipymäisiin järviin, joissa suoraan vesistöön tehtävä kalkitus ei ole ollut tehokasta. Merkittävän vaikutuksen aikaansaamiseksi on käsiteltävän alueen oltava vähintään 1 - 2 % valuma-alueen pinta-alasta ja yli puolet kalkittavan vesistön valumavesistä tulee virrata käsiteltävän kosteikon kautta (Weppling ja Iivonen 2005). Kalkitus voidaan kohdentaa koko valuma-alueeseen tai vain jokien reuna-alueisiin tai kosteikoihin (Tertsunen ym. 2012).

Sanginjoen valuma-alueella olevan Karvasojan vanhan uoman läheiselle ajoittain tulvivalle alueelle levitetty (20 t/ha) masuunikuona näytti vaikuttavan jonkin verran valumaveden pH -arvoihin, joskin lyhyt seuranta-aika ei riittänyt kuonan käytön vaikutusten toteamiseen. Valumaveden pH -arvot olivat käsitellyn alueen alapuolella 0,1 – 0,3 yksikköä korkeammat kuin käsitellyn alueen yläpuolella tilanteissa, jolloin virtaama kasvoi. Rakeisen kuonan liukeneminen on hidasta ja pidempiaikainen seuranta on tarpeen. Myös alueen potentiaalisten kosteikkoneutralointikohteiden tarkempaa kartoittamista suositellaan (Tertsunen ym. 2012).

Ojitetun turvemaan tuhkalannoituksen (5 t/ha) vaikutuksia seurattiin Sanginjoen valuma-alueella Pahanotkon kunnostusojitusalueella. Käsitely nosti valumavesien pH -arvoja 0,2 – 1,3 yksikköä ja valumaveden alkaliniteettia 0,02 – 0,2 mmol/l verrattuna käsittelemättömän alueen vastaaviin arvoihin. Alueiden erot valumaveden pH -arvoissa kuitenkin kasvoivat seurannan edetessä ja valuntojen kasvaessa sekä tuhkan liukenemisen jatkuessa. Vertailua kuitenkin vaikeutti vertailtujen alueiden erilaisuus, lyhyt seuranta-aika ja suunnitelmasta poikkeavat ojitukset, jonka vuoksi tulokset ovat vain suuntaa antavia. Myös ennakkotarkailun tarve tuodaan esille ja seurannan jatkamisen tärkeyttä painotetaan tuhkalannoituksen suorien ja erityisesti välillisten vesikemiallisten ja biologisten vaikutusten selvittämiseksi (Tertsunen ym. 2012).

Raahen eteläpuolisen Järvelänjärven valuma-alueella sijaitsevan Pusanjärven osittain avovesialueinen järvi kuivuu käsiteltiin teräskuonalla levitysmäärän ollessa 25 t/ha. Neutraloinnin vaikutuksia vedenlaatuun seurattiin käsitellyn alueen ylä- ja alapuolisesta näytestä. Kosteikkokäsittelyn vaikutuksesta valumaveden pH nousi enimmillään 0,9 yksikkö ja voimakkaammin suuremmilla virtaamilla ja tulevan veden pH:n ollessa korkeintaan 5,5. Käsitelyn vaikutus oli havaittavissa koko kahden vuoden seuranta-jakson ajan. Vaikutukset näkyivät valumaveden asiditeetin ja alumiinipitoisuuden laskuna sekä valumaveden alkaliniteetin nousuna (Tertsunen 2014).

Kosteikkoalueelle levitetyn dolomiittikalkin ja teräskuonan vaikutuksia verrattiin Luohuanjokeen laskevan Rukkisenjoen valuma-alueella sijaitsevalla Nälkänevalla. Kolmen hehtaarin kokoiselle lohkolle levitettiin dolomiittikalkkia ja toiselle samankokoiselle lohkolle levitettiin teräskuonaa, molemmille

lohkoille saman verran (25 t/ha). Valumavesien tarkkailu tehtiin molemmille käsittelyille alueille. Menetelmien vaikutusten selvittämiseksi asennettiin kummallekin lohkolle kuusi pohjavesiputkea, joista otettiin huokosvesinäytteitä vedenlaadun määrittämiseksi. Huokosvesinäytteiden perusteella teräskuona kohotti huokosveden pH -arvoja ja alkaliniteettia enemmän kuin dolomiittikalkki (Tertsunen 2014).

Niemelänrämeen kosteikkoneutraloinnissa testattiin dolomiittikalkin levityksen (25 t/ha) vaikutuksia Pyhäjokeen laskevan Talusojan valuma-alueella. Kalkitusalueen vedet laskevat Vähäojaan, jonka vedenlaatuun toimenpiteellä ei vesinäytteiden perusteella ollut vaikutusta. Neutralointialueen laskuojan valumaveden pH kuitenkin kohosi kalkituksen vaikutuksesta (Tertsunen 2014).

Kaivumassojen neutralointi

Maaperän kaivamisen tai ruoppauksen yhteydessä ilmakehän hapen kanssa kosketuksiin pääsevät sulfidipitoiset kaivumassat hapettuvat nopeasti ja voivat aiheuttaa paikallisia ja nopeita happamuuspiikkejä.

Maalle läjittämisen haittavaikutuksia voidaan vähentää kalkitsemalla ruoppausmassat lisäämällä kalkkia neutraloimisen tehostamiseksi kerroksittain, noin 10–30 kg/m³ ruopattua massaa. Mahdollisuuksien mukaan hapettumista voidaan estää myös läjittämällä sulfidipitoinen massa sopivaan paikkaan pohjavesipinnan alapuolelle (Ympäristöministeriö 2015).

4.3 Happaman veden käsittely

Pato- ja suodinrakenteet

Kalkkisuodinojat

Salaojan rakentamisen yhteydessä voidaan kaivannon täyttömaahan sekoittaa 3–10 % poltettua kalkkia (CaO). Tällaista salaojaa kutsutaan kalkkisuodinojaksi. Täyttömaan kalkkilisäyksellä aikaansaadun emäksisen vyöhykkeen vedenläpäisevyys paranee ja sen läpi salaojaputkeen kulkevat happamat vedet neutraloituvat ja kulkeutuvat purkuvesistöön. Kalkkisuodinojituksen teho heikkenee muutamassa vuodessa, mutta yhdistettynä säätösalaajitukseen tehokas toiminta-aika saattaa olla pidempi, mutta tämä vaatisi lisätutkimuksia (Maa- ja metsätalousministeriö 2011). Kalkkisuodinojan kustannustason on vuonna 2007 arvioitu olevan noin 5-8 €/m (Maa- ja metsätalousministeriö 2009).

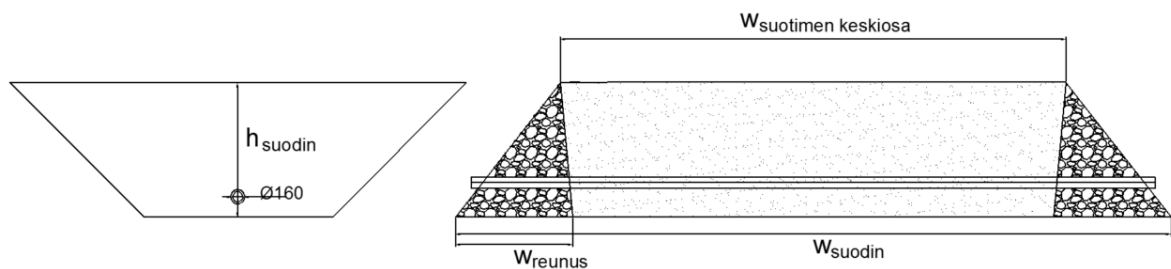
Kalkkirouhepatot ja –pohjat sekä muut neutralointimateriaalit

Avoimien uomien reunat ja pohja voidaan vuorata kalkkikivimurskeella tai uomaan voidaan rakentaa vettä läpäisevä pato murskeesta. Kalkkirouhepatoja on aiemmin käytetty pieneten purojen kalataloudellisissa kunnostuksissa ja tavoitteena on veden pH:n noston lisäksi ollut vedenpinnan nosto (Maa- ja metsätalousministeriö 2011).

Sanginjoen Pajuojaan kunnostusojituskohteella kokeiltiin alivirtaamaputkella varustetun kalkkisuodinpadon vaikutusta kolmella happamalla sarkaojalla, joiden valuma-alueet olivat kooltaan 10,5 ha (oja 1) ja 2,5 ha (ojat 2 ja 3). Kalkkisuodinpadot nostivat veden pH -arvoja ja puskurikykyä sekä laskevat veden asiditeettia. Mineraalimaan päälle rakennetuissa padoissa neutraloiva vaikutus korostui suurimpien virtaamien aikana. Kokeen aikaisten havaintojen mukaan patomateriaalin likaantumisen johduttua tehon heikkenemistä voidaan jossain määrin palauttaa pinnan puhdistusharauksella. Yhden kalkkisuodinpadon kustannukset kokekohteella olivat noin 1000 €. Menetelmän kehittämistä tulee jatkaa ja keskittyä kyseisessä tutkimuksessa tehtyjä kokeita suurempien valuma-alueiden ojien suunnitteluun. (Tertsunen ym. 2012).

Sanginjoen valuma-alueella Karvasojalla testattiin kalkkimurskeesta muotoiltujen kolmen peräkkäisen ja loivan kalkkikynnyksen toimintaa. Vaikutus vedenlaatuun oli kokekohteilla vähäinen ja lyhytaikainen. Syynä esitetään leikkauksen riittämätöntä leveyttä ja liian karkeaa kynnyksen materiaalia. Materiaalin kulumisen ja kalkkipintojen tukkeutumisen estämiseksi vastaavissa rakenteissa tulisi käyttää alivirtaama-aukkoja. Myös hienojakoisemman materiaalin käyttöä suositellaan neutralointitehon parantamiseksi (Tertsunen ym. 2012).

Turvetuotantoalueen ojiin rakennettujen alivirtaamaputkella varustettujen kalkkikivisuodinpadon ja teräskuonasuodinpadon toimintaa testattiin Laukkuvuoman turvetuotantoalueella. Suodinpadot olivat pituudeltaan noin 15 metriä ja korkeudeltaan noin 70 cm. Padon keskiosaa oli hienojakoisempaa materiaalia ja reunoilla käytettiin karkeampaa materiaalia tukemaan rakennetta (kuva 4).



Kuva 4. Suodinpatojen rakennepiirrokset. Kuva: Minna Arola (Hadzic ym. 2014)

Kalkkikivisuodinpadon neutralointiteho oli heikko ja todennäköisesti alivirtaamaputki tukkeutui padottaen vettä ja se jouduttiin tästä syystä purkamaan. Pato oli ilmeisesti liian tiivis, eikä vesi päässyt virtaamaan sen läpi. Teräskuonasuodinpadon neutralointiteho sen sijaan säilyi koko kahden vuoden tutkimusjakson ajan (Hadzic ym. 2014) valumaveden pH -arvojen nousun ollessa keskimäärin 0,7 yksikköä kesällä 2012 ja 1,3 yksikköä kesällä 2013 (Karjalainen 2014).

Niemenrämeen kosteikkoneutralointikohteen alapuoliseen Vähäojaan rakennettiin alivirtaamaputkella varustettu kalkkimurskepato neutraloimaan alueen peruskuivatustöiden aikana paljastuneiden sulfidikerrosten aiheuttamaa happamuutta. Valumaveden pH nousi käsittelyssä keskimäärin 0,5 yksikköä (Tertsunen 2014).

Karkeasta kalkkikivimurskeesta tai kalkkikivilohkareista rakennettuja kalkkikivipohjia käytetään erityisesti happamien kaivosvesien käsittelyyn. Tällaisia rakenteita kutsutaan usein avoimiksi kalkkikiviojiksi (Open Limestone Channel, OLC). Rakenteen suunnittelussa on huomioitava veden virtausnopeus, uoman kaltevuus ja veden happamuus. Virtausnopeuden ollessa liian pieni, pinnoittuu kalkkikiven pinta

saostuvista metalleista ja liian nopeassa virtauksessa happaman veden ja kalkkikiven kontakti jää liian lyhytaikaiseksi (Turunen ja Hämäläinen 2015). Avoimet kalkkikiviojat toimivat parhaiten kun uoman kaltevuus on yli 20 % jolloin virtausnopeus pitää metallihydroksidit suspendoituneena (Ziemkiewicz ym. 1997).

Anaerobiset pohjapadot

Anaerobiset pohjapadot (tai anoksiset/hapettomat kalkkikiviojat) ovat erityisesti kaivosvesien neutraloinnissa käytetty menetelmä, jossa hapan käsiteltävä vesi johdetaan ilmakehän hapesta eristetyn kalkkikivikerroksen läpi esimerkiksi ojassa, joka on peitetty tiiviillä maakerroksella. Käsiteltävän veden tulee olla hapetonta tai lähes hapetonta ja metallien pitoisuuden tulee olla alhainen, jotta metallihydroksidit eivät saostu ja tuki systeemiä.

Vesistöjen kalkitus

Vesistöjen kalkituksen tavoitteena on hoitaa happamoitumisesta aiheutuneita haittoja ja turvata vesistöjen ekologinen toimivuus (Weppling ja Livonen 2005). Kalkitustapana voidaan käyttää esimerkiksi suoraa järvikalkitusta, valuma-alueen kosteikkojen kalkitusta tai jatkuvatoimista kalkitusta tai jotain näiden yhdistelmää (Weppling ja Livonen 2005). Vesistöjen kalkitusten vaikutuksia, joita on selvitetty useissa toteutetuissa kotimaisissa kunnostushankkeissa, esitellään maa- ja metsätalousministeriön työryhmämuistiossa (Maa- ja metsätalousministeriö 2009). Laajan vesistöjen kalkitusta käsittelevän katsauksen ulkomaisiin vesistöalkitustutkimuksiin on koontanut Tertsunen ym. (2012).

Sanginjoen valuma-alueella sijaitseva Pirttijärvi kuivattiin vuosina 2005 – 2006 järven kunnostustoimenpiteenä. Uudelleen vesittäminen jälkeen järvi happamoitui voimakkaasti todennäköisesti kuivatuksen aiheuttamien hapetusreaktioiden vuoksi. Järven jäälle levitettiin 35 tonnia dolomiittikalkkia keväällä 2010. Yhden avovesikauden mittaisen seuranta-ajan tulosten mukaan Pirttijärven tila saatiin parantumaan jään päälle tehdyllä kalkituksella. Veden pH -arvot kohosivat selvästi ja myös veden alkaliniteetti kohosi. Veden alumiinipitoisuus laski kymmenesosaan ja myös veden asiditeetti oli alhainen (Tertsunen ym. 2012).

Merijärven Jahtavisnevan turvetuotantoalueen tuotannosta poistuneelle lohkolle vuonna 2010 kaivettu happamuudesta kärsivä tekojärvi kalkittiin noin 10 tonnilla kalsiittista kalsiumkarbonaattia. Jahvislammen veden pH kohosi epähuomiossa tehdyn suunniteltua voimakkaamman kalkituksen vuoksi yli tavoitetason (tasolta 3,7 välille 7,2-8,2) ja myös muissa vedenlaatumuuttujissa oli merkittäviä muutoksia. Lammen vedenlaadun seuranta oli harvaa, joten vedenlaadun ajallisesta vaihtelusta ei saatu tarkkaa kuvaa. Lammen veden pH:n tarkkailua suositellaan (Tertsunen 2014).

Kosteikot

Anaerobinen alkaliniteettia tuottava systeemi

Anaerobinen alkaliniteettia tuottava systeemi (successive alkalinity producing system, SAPS / reducing and alkalinity producing system, RAPS) on kaksivaiheinen yhdistelmä, joka koostuu rakennetusta anaerobisesta kosteikosta ja hapettomasta kalkkikiviojasta. Hapan vesi virtaa vertikaalisesti orgaanista materiaalia sisältävän kompostiosan läpi, jossa tapahtuvat biologiset prosessit kuluttavat vedessä olevan liuenneen hapen ja ferrirauta Fe^{3+} pelkistyy ferroraudaksi Fe^{2+} . Samalla anaerobinen mikrobitoiminta tuottaa veteen bikarbonaatti-ioneja lisäten alkaliniteettia, jonka vuoksi alumiini saostuu alumiinihydroksidiksi ja pidättyy orgaanisen aineen kerrokseen. Orgaanisen aineen kerroksesta hapeton vesi virtaa hapettoman kalkkikivikerroksen läpi. Kalkkikivi liukenee ja kohottaa veden alkaliniteettia ilman, että rauta saostuisi kalkkikiven pintaan ja anaerobinen mikrobitoiminta pelkistää sulfaatin vetysulfidiksi, joka edelleen reagoi mm. vedessä olevan raudan ja muiden aineiden kanssa muodostaen mono- ja disulfideja. Systeemistä ulostuleva vesi hapettuu, jolloin rauta ja muut aineet saostuvat (Turunen 2015c). Yllä esiteltujen käsittelyjen jälkeen tarvitaan oikein mitoitettu laskeutusallas, jotta metallien saostuminen ja sedimentoituminen ehtii tapahtua.

Rintalan alueella testattiin anaerobisen alkaliniteettia tuottavan systeemin toimintaa maatalousalueen happamien valumavesien neutraloinnissa (Kustula ym. 2005). Kokeessa testattiin kalkkikivimurskekerroksen päälle lisätyn kompostin ja komposti-/kipsiseoksen neutralointikykyä. Sitä verrattiin pelkällä kalkkikivimurskeella aikaansaatuun neutralointikykyyn. Käsittelystä poistuvan veden laadussa ei ollut eroja käytettäessä kompostia tai komposti-/kipsiseosta. Kompostia käytettäessä pH -arvot kohosivat merkitsevästi valumaveden pH -arvon nousu ollessa noin yksi yksikkö. Pelkkää kalkkikivimursketta käytettäessä valumaveden pH -arvon nousu oli noin kaksi yksikköä.

Tutkimuksen johtopäätöksissä todetaan, että systeemi ei ollut riittävän tehokas verrattuna pelkkään kalkkikivimurskeella aikaansaatuun tulokseen. Jatkossa vastaavia systeemejä käytettäessä tulisi varmistaa käsiteltävän veden riittävän pitkä kontakti kalkkikivimurskeen kanssa. Myös systeemiin tulevien vesimäärien, lämpötilan ja veden laadun vaihtelu voi aiheuttaa ongelmia. Lisäksi peltoympäristössä ongelmaksi koettiin rakenteen vaatima tila.

Aerobinen rakennettu kosteikko

Rakennetut kosteikot ovat allasmaisia muusta maaperästä eristettyjä rakenteita, joissa erilaisilla rakenteilla ohjataan veden virtausta, pidättymistä ja vedenpinnan korkeutta ja niissä on maa-ainesta kasvillisuuden juurtumisalustana. Vesi voi virrata kosteikon pinnalla vapaana vesipintana tai se voi virrata kosteikon maaperässä joko horisontaalisesti tai vertikaalisesti. Aerobiset kosteikot ovat tehokkaita rautapitoisten kaivosvesien käsittelyssä, mutta eivät pysty neutraloimaan happamuutta tehokkaasti (Turunen 2015a).

Anaerobinen rakennettu kompostikosteikko

Anaerobinen kosteikko eroaa aerobisesta kosteikosta siten, että orgaanisen aineksen paksuus on suurempi (0,3-0,6 m) ja vapaa vesipinta on ohut (0-8 cm) (Hedin ym. 1994, Skousen ym. 2000, Turunen 2015b). Orgaanisen aineen lähteenä tulee käyttää jotain vedenläpäisykyvyltään riittävää ja helposti hajavaa alkalista materiaalia, joka toimii mikrobien hiilen lähteenä. Veden kulkiessa orgaanisen kompostikerroksen läpi mikrobitoiminta pelkistää sulfaattia tuottaen alkaliniteettia ja happamuuden neutraloitu-

essa metallit saostuvat pääosin sulfideiksi (Turunen 2015b).

Kalkkikivi- ja teräskuonaimetyksenttä

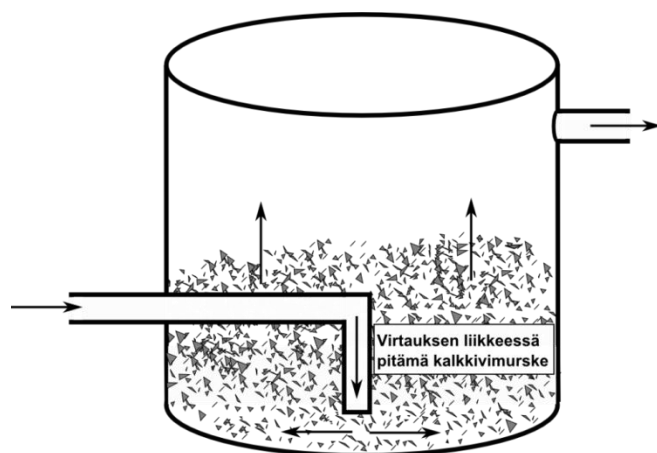
Alkalisten imeytyskenttien käyttö on yksi tehokkaimmista passiivisista menetelmistä happamien kaisvosvesien käsittelyyn (Ziemkiewicz ym. 2003). Kentälle tulevan vesi neutraloituu imeytyessään kentän materiaalin läpi ja vedessä olevat metallit saostuvat. Koska kenttään saostuvat metallit voivat haitata kentän toimintaa, suositellaan menetelmää käytettäväksi vain, jos käsiteltävän veden metallikonsentraatiot ovat pieniä (Zipper ja Skousen 2010).

Aktiiviset menetelmät

SuHe -hankkeessa (Hadzic ym. 2014) kokeiltiin ja kehitettiin pilottimittakaavassa erilaisia aktiivisia menetelmiä, joista seuraavassa kuvataan kolme toimivinta menetelmää.

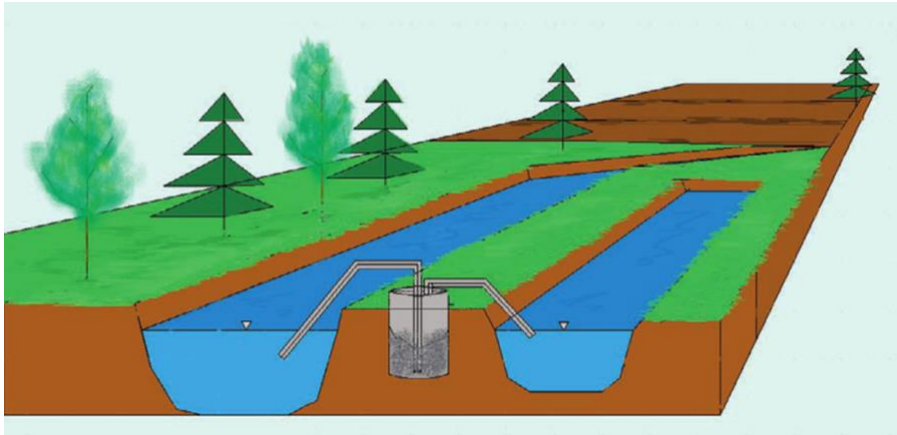
Neutralointikaivo

Neutralointikaivo (kuva 5) on menetelmä, jossa hapan vesi tuodaan putkella osittain kalkkikivirouheella täytetyn kaivon pohjalle, jolloin veden virtaus saa kalkkikivirouheen liikkeelle ja hapan vesi neutraloituu (Hadzic ym. 2014).



Kuva 5. Neutralointikaivon periaate. Kuva Juha Riihimäki.

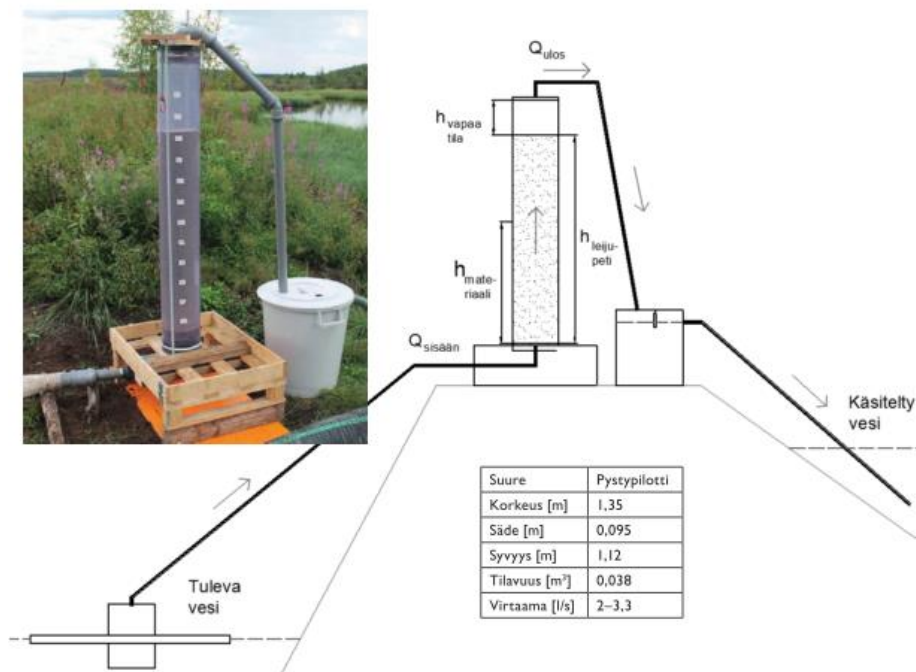
SuHe -hankkeen Hangasnevan turvetuotantoalueella tehdyssä pilottikokeessa neutralointikaivo toimi valumavesien käsittelyssä nostaen veden pH:ta 1-2 yksikköä. Veden tavoitearvoa pH 5,5 ei saavutettu jatkuvasti ja todennäköisesti syynä oli liian lyhyt viipymä. Oikea mitoitus halutulle virtaamalle on tärkeää. Neutralointikaivon jälkeen suositellaan rakennettavan laskeutusallas tai -ojasto (kuva 6). Käytettäessä kalkkikiveä neutralointimateriaalina raaka-aine on melko edullinen, eikä yliannosteluvaaraa ole. Menetelmä on yksinkertaisuutensa vuoksi myös toimintavarma ja voidaan toteuttaa myös passiivisena ilman pumppausta, mikäli toimintaan riittävä hydraulinen paine saadaan muuten aikaan. (Hadzic ym. 2014).



Kuva 6. Neutralointikaivon mahdollinen sijoitus. Kuva: Minna Arola (Hadzic ym. 2014).

Leijutuskolonne

Hangasnevalla testattiin myös toimintaperiaatteeltaan neutralointikaivon kanssa samankaltaista pys-
tysuoraa leijutuskolonna (kuva 7) pilottimittakaavassa. Leijutuskolonne nosti granuloitua kalsiumhyd-
roksidia käytettäessä valumaveden pH:n jopa arvoon 12 (Hadzic ym. 2014). Hangasnevan kokoluokkaa
olevan turvetuotantoalueen valumavesien käsittelyyn ei leijutuskolonne ole käyttökelpoinen ratkaisu
johtuen käsiteltävien vesien suuresta määrästä, mutta mikäli happamia vesiä tulee vain yhden tai kahden
lohkon alueelta on rakenne tähän paremmin soveltuva (Karjalainen 2014). Menetelmä vaatii kuitenkin
pumppaamista ja suhteellisen usein tapahtuvaa huoltoa ja lisäksi tulee käyttää erillistä laskeutusallasta
tai -ojastoa menetelmän jälkeen, jotta metallit ehtivät saostua (Karjalainen 2014).

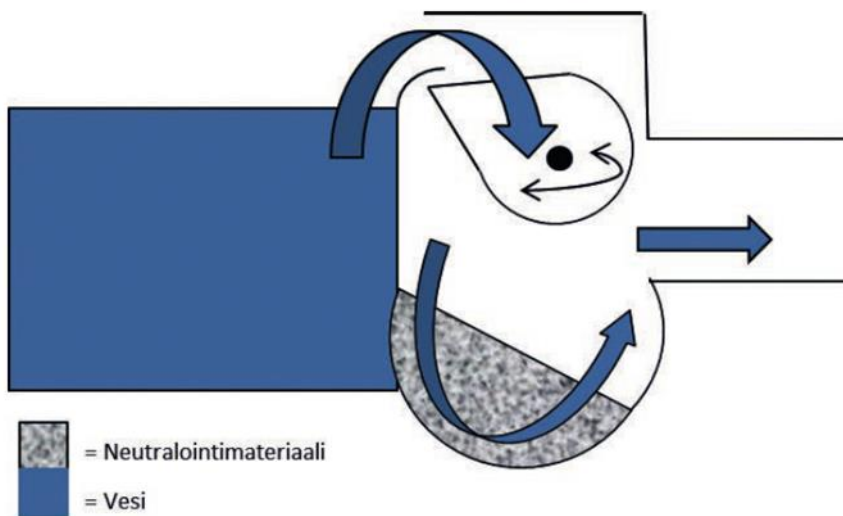


Kuva 7. Leijutuskolonnin pilottikoe. Kuva: Minna Arola, Valokuva: Toni Karjalainen (Hadzic ym. 2014)

SuHe -hankkeen kolonnikokeissa testattiin kalsiumhydroksidin, Mahtikalkin ja Aito Kalsiittimurskeen ominaisuuksia neutralointimateriaaleina. Testeissä havaittiin enemmän tukkeutumisongelmia käytettäessä granuloitua kalsiumhydroksidia ja Mahtikalkkia kuin Aito Kalsiittimursketta käytettäessä, eikä niitä näin ollen suositella käytettäväksi liikkumattomiin suodinratkaisuihin. Edellisiä käytettäessä käsitellyn veden pH nousi tasolle 10–11 ja jälkimmäisessä pH nousi lähelle arvoa 8 (Hadzic ym. 2014).

Kippaava neutralointilaitteisto

Hangasnevalla testattu pienen mittakaavan kippaava neutralointilaitteisto (kuva 8) toimi käytettäessä granuloitua kalsiumhydroksidia nostaa valumaveden pH -arvon tasolle 10-12. Tällainen ylineutraloitu vesi tulee johtaa ilmastuksen jälkeen saostusaltaaseen, jonne metallihydroksidit saostuvat ja pidätyvät (Nilivaara-Koskela 2014). Kalkkikiveä käytettäessä veden virtausvoima ei riittänyt saamaan materiaalia liikkeelle ja koska kalkkikivi liukenee hitaammin, on käsiteltävän veden viipymä oltava pitempi tätä materiaalia käytettäessä. Kokeessa ei kalkkikivellä saatu aikaiseksi riittävää pH:n nousua (Hadzic ym. 2014). Kalkkikiven käyttö kippaavan neutralointilaitteen neutralointimateriaalina vaatii kuitenkin jatkotutkimuksia käyttäen valumavesiä, joiden pH on korkeampi ja asiditeetti alhaisempi kuin toteutetussa kokeessa (Nilivaara-Koskela 2014). Neutralointimateriaalia kuluu käytön aikana, joten sitä on välillä lisättävä. Laitteiston rakentamiseen käytetyn materiaalin on oltava haponkestävää, esimerkiksi muovia, jolloin myös pakkasenkestävyys tulee varmistaa (Hadzic ym. 2014; Nilivaara-Koskela 2014).



Kuva 8. Kippaavan neutralointilaitteiston periaatekuva. (Nilivaara-Koskela 2014).

Muita Hangasnevalla testattuja menetelmiä olivat neutralointisukka, pyörivä rumpu ja vaakasuora neutralointipilotti, mutta niitä ei saatu hankkeen aikana kehitettyä tyydyttävästi toimiviksi ratkaisuisiksi (Hadzic ym. 2014).

Jatkuva neutralointi annostelulaitteella

Kalkitusasemia on testattu Suomessa ainakin kahdessa eri tutkimuksessa 1980- ja 1990 luvuilla (Rantala ym. 1991 ja Rekilä 1988). Molemmissa tutkimuksissa todettiin annostelun olevan tehokas keino neutraloida happamoituneita vesiä. Myös tämän ratkaisun yhteydessä tulee kuitenkin ottaa huomioon oikein mitoitettu laskeutusallas tai muu rakenne käsittelyssä syntyvän sakan talteenottoa varten. Erilaisten kalkitusasemien perustamiskustannukset ja käyttökulut ovat suuret ja ne sopivat parhaiten vesistöihin, joissa on kohtalainen sulfaattimaiden vaikutus ja/tai vähäinen virtaama. Tällainen vesistöjen suora kalkitus tulee kyseeseen ainoastaan erikoistapauksissa (Maa- ja metsätalousministeriö 2011). Vesistöjen kalkitsemista voidaan kuitenkin suositella merkittävän happamuushaitan nopeaan korjaamiseen esimerkiksi laskuojan perkaamisen yhteydessä (Maa- ja metsätalousministeriö 2009).

5. Arvio eri menetelmien soveltuvuudesta maankäyttömuodoittain

Tässä kappaleessa esitetään arvio sulfaattimaiden valumaveden neutralointiin käytettävissä olevista menetelmien käytettävyydestä maankäyttömuodoittain (taulukko 3) pohjautuen osin aiempiin arvioihin (Maa- ja metsätalousministeriö 2009; Österholm 2012; Hadzic ym. 2014). Taulukkoa voidaan käyttää tehtäessä ennakoarviota siitä mitä ratkaisuja kohteen valumaveden neutraloinnissa voitaisiin hyödyntää, mutta arviota on aina syytä tarkentaa vesinäytteiden tuloksia analysoimalla.

- Säättösalaajitus ja säättökastelu on suunniteltu erityisesti maatalouden olosuhteisiin ja niiden jo olemassa oleviin rakenteisiin liitettäväksi menetelmäksi. Tämän vuoksi näitä menetelmiä ei voida suositella käytettäväksi muiden maankäyttömuotojen kanssa. Menetelmiä voisi kuitenkin periaatteessa soveltaa erilaisten infrastruktuurirakenteiden yhteydessä, joissa muutenkin käytetään pumppua. Tällaisia sovelluskohteita voisivat olla esimerkiksi tiet tai rautatiet alittavat alikulkurakenteet ja niiden yhteydessä olevat kuivatusjärjestelyt.
- Pohja- ja putkipatoja voidaan käyttää kaikkien maankäyttömuotojen yhteydessä ottaen kuitenkin huomioon esimerkiksi turvetuotannon ja metsätalouden maankuivatuksen tarpeen.
- Juoksutusjärjestelyitä ja pumppaamoiden käyttöä voidaan suositella käytettäväksi kohteissa, joissa on saatavilla sähköä ja pumppu. Lisäksi tulee olla saatavilla alueita vesien väliaikaiseen varastointiin.
- Kuivatusmenetelmän muutos, kuivatussyvyyden lisäämisen välttäminen, pienempi kuivatussyvyys tai viljelykasvin vaihtaminen tulevat kysymykseen maataloudessa tai soveltuvin osin metsätaloudessa. Periaatetta voitaneen hyödyntää kuitenkin myös metsätaloudessa metsänkasvatukseen vaatimat olosuhteet huomioon ottaen.
- Valuma-alueen neutralointia voidaan soveltaa erityisesti metsä- ja maataloudessa. Turvetuotannossa laaja-alaisen neutralointimateriaalin levityksen oletetaan haittaavan tuotantoprosessia sekä vaikuttavan turpeen poltto-ominaisuuksiin.
- Kaivumassojen kalkitusta voidaan hyödyntää kaikkien käsiteltyjen maankäyttömuotojen yhteydessä. Lisäksi kaivumassojen neutralointia voidaan tarvittaessa hyödyntää kaiken maanrakennuksen ja kuivatustöiden yhteydessä.
- Kalkkisuodinojia voidaan hyödyntää vain maataloudessa, koska niiden käyttäminen edellyttää salaajitusta. Menetelmää voidaan tarvittaessa soveltaa myös tehtäessä muuta salaajitusta happamille sulfaattimaille.
- Kalkkirouhepatoja ja – pohjia voidaan hyödyntää kaikissa maankäyttömuodoissa ja myös muilla toimialoilla. Kalkkisuodinojia käytettäessä on muistettava, etteivät ne sovellu paljon metalleja sisältävien vesien käsittelyyn sen vuoksi, että veden pH:n noustessa metallit saostuvat suotiin ja tukkivat sen.
- Vesistöjen kalkituksella voidaan neutraloida happamoitunutta vesimuodostumaa, mutta jos hapan valuma vesimuodostuman valuma-alueelta jatkuu, eivät muutokset ole pysyviä. Tämä menetelmä ei ole riippuvainen valuma-alueen maankäytöstä.
- Neutralointikaivo, leijutuskolonni ja kippaava neutralointilaitteisto ovat menetelmiä, joita voitaisiin käyttää kohteissa, joissa on käytössä pumppu. ja sähköä. Näin ollen sopivia sovelluskoh-

teita olisivat turvetuotanto ja mahdollisesti maatalous. Kippaava neutralointilaitteisto ja neutralointikaivo voidaan saada toimimaan myös ilman pumppua, mutta tällöin alueella on oltava riittävät korkeuserot. Näiden ratkaisujen käyttöönotto vaatii tutkimuksia ratkaisujen toimivuudesta täydessä mittakaavassa.

- Jatkuva valumaveden neutralointi annostelijalla sopii turvetuotannon ja maatalouden valumavesien käsittelyyn. Sen edellytyksenä on sähkön saanti ja tarpeeksi hyvä tiestö materiaalin toimittamiseksi paikalle. Laitteisto vaatii huoltoa ja riippuen annostelumäärästä ja käsiteltävän veden määrästä ajoittaista neutralointimateriaalin lisäämistä.
- Anaerobisia pohjapatoja voidaan käyttää kaivosten lisäksi oletettavasti myös maataloudessa ja mahdollisesti muiden maankäyttömuotojen yhteydessä, koska niiden pitäisi olla vähemmän herkkiä metallien saostumiselle.
- Anaerobinen alkaliniteettia tuottava systeemi (SAPS) on järjestelmä, jolla on edellytykset toimia kaikkien käsiteltävien maankäyttömuotojen valumavesien käsittelyssä. Sitä on kuitenkin kehitetty vain maataloudessa eikä silloin muodostunut eroja perinteiseen kalkkikiviojaan verrattuna. On kuitenkin mahdollista, että erot tulevat esille vasta pidemmän käyttöajan jälkeen.
- Aerobinen rakennettu kosteikko soveltuu raudan vähentämiseen kaikilla maankäyttömuodoilla. Sen avulla ei voida kuitenkaan neutraloida tehokkaasti käsiteltäviä valumavesiä. Kosteikko vaatii myös tilaa.
- Anaerobinen rakennettu kompostikosteikko pystyy neutraloimaan valumavettä sekä poistamaan siitä metalleja ja sulfaattia. Menetelmää on testattu vain kaivosvesien käsittelyssä, mutta sillä pitäisi olla edellytykset toimia myös muiden maankäyttömuotojen yhteydessä. Myös anaerobinen kosteikko vaatii lisäksi tilaa.
- Kalkkikivi- ja teräskuonaimetykskenttää voidaan suositella käytettäväksi vain kaivosten valumavesien käsittelyssä tai jos muiden maankäyttömuotojen valumavesissä on vain vähäisiä määriä metalleja.

Taulukko 3. Arvio menetelmien soveltuvuudesta eri toimialoille. Tumman harmaa väri osoittaa ratkaisun soveltuvan kyseisen maankäyttömuodon käyttöön ja vaalean harmaa väri mahdollisen soveltuvuuden.

		Mahdolliset sovellusalueet				Tarkennukset
		Turve- tuotanto	Metsä- talous	Maa- talous	Kaivos- teollisuus	
	Sulfidihapettumisen vähentäminen	Toimenpide				
		Säätösalaajitus				
		Säätökastelu (alatakastelu)				
		Pohja- ja putkipadot				
		Juokutusjärjestelyt ja pumppaamojen käyttö				
		Kuivatusmenetelmän muutos, kuivatussyvyyden lisäämisen välttäminen				
	Viljelykasvin vaihtaminen ja pienempi kuivatussyvyys					
	Maaperän happamuuden neutralointi	Valuma-alueen neutralointi				
		Kaivumassojen neutralointi				Maanrakennus- ja kuivatustöiden yhteydessä
	Valumavesien käsittely	Passiiviset menetelmät	Kalkkisuodinoijat			
Kalkkirouhepadot ja -pohjat						Voidaan hyödyntää myös muissa kohteissa, jos käsiteltävässä vedessä vähäinen määrä metalleja
Vesistöjen kalkitus						Ei liity suoraan maankäyttömuotoon
Aktiiviset menetelmät		Neutralointikaivo, Leijutuskolonni ja kippaava neutralointilaitteisto				Ei vielä kokemuksia täyden mittakaavan testeistä. Edellyttää sähkönsaantia
		Jatkuva neutralointi annostelulaitteella				Edellyttää sähkönsaantia
Kaivosvesien käsittelyssä käytettyjä menetelmiä		Anaerobiset pohjapadot				Voidaan hyödyntää myös muissa kohteissa, jos käsiteltävässä vedessä vähäinen määrä metalleja
		Anaerobinen alkaliniteettia tuottava systeemi				Käytön edellytyksiä maatalouden, metsätalouden ja turvetuotannon osalta edelleen tutkittava
		Aerobinen rakennettu kosteikko				Käytön edellytyksiä maatalouden, metsätalouden ja turvetuotannon osalta edelleen tutkittava
		Anaerobinen rakennettu kompostikosteikko				Käytön edellytyksiä maatalouden, metsätalouden ja turvetuotannon osalta edelleen tutkittava
		Kalkki kivi- ja teräskuonaimetykenttä				Voidaan hyödyntää myös muissa kohteissa, jos käsiteltävässä vedessä vähäinen määrä metalleja

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiä maankäyttömuodoittain – Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun -selvitys on toteutettu osana EU:n Euroopan aluekehitysrahaston Suomen rakennerahasto-ohjelman rahoittamaa ”Happamien sulfaattimaiden ympäristövaikutusten vähentäminen, esiselvitys” -hanketta.

Maatalouden, metsätalouden ja turvetuotannon aiheuttamien happaman valumaveden laatua ja happamien valumavesien syntyminen estämiseen tai jo syntyneiden vesien käsittelyyn soveltuvia menetelmiä on viimeisten vuosien aikana testattu useissa eri hankkeissa. Happamalla sulfaattimaalla sijaitsevalla maankäyttömuodolla havaittiin olevan vaikutusta alueen valumaveden laatuun.

Tehdyn kirjallisuuskatsauksen ja sitä tukevan vesinäytteenoton perusteella maankäyttömuodolla on vaikutusta sulfaattimailta tulevan valumaveden laatuun. Kaivosvedet (suljettujen kaivosten) sisältävät vähemmän metalleja kuin turvetuotannon tai maa- ja metsätalouden valumavedet. Kaivosten valumavesien laaduissa on kuitenkin erittäin suuria eroja riippuen valumavesien lähteestä ja louhitusta malmista.

Eniten metalleja ja alhaisimpia pH-arvoja havaittiin sulfaattimailla sijaitsevien maatalousalueiden alapuolisessa valumavedessä. Myös turvetuotannon alapuolisissa vesissä havaittiin välillä erittäin happamia vesiä ja suuria metallipitoisuuksia, mutta paljon harvemmin kuin maatalousvaltaisten alueiden alapuolella. Turvetuotannon valumaveden keskimääräiset metallipitoisuudet olivat kuitenkin pienempiä ja veden pH korkeampi kuin maatalousalueilla. Metsätalous ei näyttäisi vertailun perusteella aiheuttavan yhtä hapanta valuntaa tai yhtä suuria metallipitoisuuksia valumaveteen kuin muut maankäyttömuodot. Rautaa esiintyi eniten turvetuotannon ja metsätalouden valumavesissä.

Tässä selvityksessä on koottu yhteen eri maankäyttömuotojen käytössä olevia menetelmiä sulfaattimaiden happamuusongelmien ratkaisemiseksi ja ensimmäistä kertaa myös suljettujen kaivosten valumavesien käsittelyssä käytettyjä menetelmiä. Useat tietyille maankäyttömuodolle suunnitellut ratkaisut ovat sovellettavissa myös muille maankäyttömuodoille, mutta niiden soveltamisessa on huomioitava kyseisen maankäyttömuodon ja kohteen vedenlaadun mahdolliset vaikutukset menetelmän toiminnalle.

Koska metallit usein saostuvat veden pH:n noustessa, on muiden kuin kaivosvesien (tai vähän metalleja sisältävien vesien) käsittelyssä kiinnitettävä erityisesti huomiota neutralointiratkaisun toimintakyvyn säilymiseen. Saostuvat metallit heikentävät neutralointimateriaalin kontaktia käsiteltävän veden kanssa ja vähentävät ratkaisun tehokkuutta ja käyttöikää. Toimintakyvyn voidaan odottaa säilyvän pidempään ratkaisuisissa, joissa neutraloiva materiaali on liikkeessä tai sitä annostellaan jatkuvasti. Kaivosten valumavesien neutraloinnissa käytössä olevia kaikkia menetelmiä ei voida näin ollen suoraan siirtää muiden maankäyttömuotojen käyttöön, mutta passiivisilla anaerobisilla ratkaisuilla on mahdollisuus toimia myös muiden maankäyttömuotojen valumavesien käsittelyssä, mutta niiden toimintaa em. maankäyttömuotojen yhteydessä ei ole vielä juurikaan tutkittu.

KIRJALLISUUS

Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2

- Wolkersdorfer, C., Bowell, R., 2005, "Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, Part 2", *Mine Water and the Environment* (2005) 24: 2–37 © IMWA Springer-Verlag
- Dalhem, K., 2014. Effekter av kemisk precisionsbehandling på markgeokemin i sura sulfatjordar.
- Edén, P., Auri, J., Boman, A., Rankonen, E., 2014. "Happamien sulfaattimaiden kartoitus (1:250 000) ja ominaisuudet." Teoksessa *Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella*, toimittanut Raija Suomela, 12–36. MTT Raportteja 132. MTT Jokioinen.
- Engblom, S., Lall, K-E., Rosendahl, R., Sten, P., Österholm, P., 2014. "PRECIKEM-projektissa kehitetään happamien sulfaattimaiden kemiallista täsmäkäsittelyä." *Salaajyhdistys* 1/2014: 25–27.
- Engblom, S., Lall, K-E., Rosendahl, R., Stén, P., Österholm, P., "Kalkin lisääminen happamien sulfaattimaiden altakasteluveetien." Teoksessa *Pro Terra 67/2015 - VIII Maaperätieteen päivien abstraktit*, toimittanut Jaana Leppälampi-Kujansuu, Taina Pennanen, Katri Rankinen, Tapio Salo, Helena Soinne, ja Pekka Hänninen, 15–16. Pro Terra. Suomen maaperätieteiden seura, Helsingin yliopisto, Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitos.
- Geologian tutkimuskeskus. 2015. "Cosedure projekti." *Mine Closure Wiki*. <http://wiki.gtk.fi/web/mine-closedure/wiki>.
- Hadzic, M., Postila, H., Nystrand, M., Pahkakangas, S., Karppinen, A., Arola, M., Nilivaara-Koskela, R., Saukkoriipi, J., 2014. "Sulfaattimailla syntyvän happaman kuormituksen ennakointi- ja hallintamenetelmät." 17. Suomen ympäristökeskuksen raportteja. Suomen ympäristökesku (SYKE).
- Honkakoski, M., 2013. "Sulfaattimaan valumavesien hallintakeinot Siikajoen valuma-alueella. Opinnäytetyö." OAMK.
- Huhmarniemi, A., 2014. "Tutkimusalueen virtavesien kalataloudellinen tila." Teoksessa *Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella*, toimittanut Raija Suomela, 53–64. MTT Raportteja 132. MTT Jokioinen.
- Karhunen, K., Ventelä, S., Saarela, A., Suomela, R., Laurinen, O., Kosamo, J., Uusitalo, J., Spoof, J., Karhu L., Lampela, E. 2014. "Happamat sulfaattimaat ja eloperäiset maat - ympäristöriskit ja niiden hallintakeinot Etelä- ja Pohjois-Pohjanmaalla." *Hydro -Pohjanmaa -Hankkeen loppujulkaisu* 2.
- Karjalainen, T., 2014. "Neutraloimismenetelmiä happamilla sulfaattimailla sijaitsevilta turvetuotantoalueilta lähtevien valumavesien käsittelyyn Diplomityö." Oulun yliopisto.
- Kiikkilä, O., Nieminen T.M., Starr, M., Mäkilä, M., Loukola-Ruskeeniemi, K., Ukonmaanaho, L., 2014. "Leaching of Dissolved Organic Carbon and Trace Elements After Stem-Only and Whole-Tree Clear-cut on Boreal Peatland." *Water, Air, & Soil Pollution* 225 (2): 1767. doi:10.1007/s11270-013-1767-y.
- Kustula, V., Witick A., Meriläinen J.J., 2005. "Successive alkalinity producing system for the treatment of acid sulphate soil runoff: preliminary results of a field trial." *Agricultural and Food Science* 14 (1): 112–21. doi:10.2137/1459606054224129.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2009. "Kohti happamien sulfaattimaiden hallintaa." Toimittanut Eeva Nuotio, Liisa Maria Rautio, ja Sofia Zित्रa-Bärsund. Työryhmämuistio.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2011. "Happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivat vuoteen 2020." 2/2011.
- Marttila, H., Kløve, B., 2010. "Managing runoff, water quality and erosion in peatland forestry by peak runoff control." *Ecological Engineering* 36: 900–911. doi:10.1016/j.ecoleng.2010.04.002.
- Mäkilä, M., Nieminen, T.M., Säävuori, H., Loukola-Ruskeeniemi K., Ukonmaanaho, L., 2015. "Does underlying bedrock affect the geochemistry of drained peatlands?" *Geoderma* 239-240: 280–92. doi:10.1016/j.geoderma.2014.11.002.
- Nilivaara-Koskela, R., 2014. "Turvetuotannon valumavesien lyhytkestoisten happamien valuntojen ennakointi- ja hallintamenetelmien kehittäminen Diplomityö." Oulun yliopisto.
- Rantala, Aulis. 1991. "Vesistöjen kalkitus happamien sulfaattimaiden vaikutusalueella". *Vesi- ja ympäristöhallitus*. Helsinki
- Rekilä, Kari. 1988. "Sundominlahden happamuushaitan vähentäminen". Diplomityö. *Vesi- ja ympäristöhallitus*. Helsinki.
- Riihimäki, J., Edén P., Uusi-Kämpä J., Leppänen M., Karjalainen A., Tattari S., Kosunen M., Saarikoski H., 2013. "Happamien sulfaattimaiden ympäristöriskien vähentäminen : sopeutumiskeinoja ilmastomuutokseen."

http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE09_ENV_FIN_000609_LAYMAN_FIN.pdf.

- Röning, H., 2014. Effekter av kemisk precisionsbehandling på vattenkvaliteten i sura sulfatjordar.
- Saarikoski, H., Riihimäki, J., Österholm, P., Miettinen, A., Vehanen, T., Leppänen, M., Wallin J., ym. 2014. "Happamien sulfaattimaiden vesiensuojelumenetelmien ekologiset, taloudelliset ja sosiaaliset vaikutukset Kyrönjoen valuma-alueella." Ympäristö ja Terveys-lehti, nro 1.
- Saarinen, T, Celebi, A., Kløve, B., 2013. "Links between river water acidity, land use and hydrology." Boreal Environment Research 18 (5): 359–72.
- Saarinen, T., Marttila, H., 2014a. "Hankealueen virtavesien vesikemiallinen tila." Teoksessa Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella, toimittanut Raija Suomela, 37–52. MTT Raportteja 132. MTT Jokioinen.
- Saarinen, T., Marttila, H., 2014b. "Kunnostusojitukset metsäalueilla." Teoksessa Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella, toimittanut Raija Suomela, 91–100. MTT Raportteja 132. MTT Jokioinen.
- Saarinen, T., Mohämmädighavam, S., Marttila, H., Kløve, B., 2013. "Forest Ecology and Management Impact of peatland forestry on runoff water quality in areas with sulphide-bearing sediments ; how to prevent acid surges." Forest Ecology and Management 293: 17–28. doi:10.1016/j.foreco.2012.12.029.
- Suomela, R., toim. 2014. Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueilla. MTT Raportti 132. MTT Jokioinen.
- Suomela, R., Yli-Halla, M., Auri, J., Joki-Tokola, E., Luoma, S., 2014. "Säätökastelun ja säätösalaajituksen mahdollisuudet alunamailta tulevan happaman vesistökuormituksen hillitsemiseen Pohjois-Pohjanmaalla." Teoksessa Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella, toimittanut Raija Suomela, 65–90. MTT Raportteja 132. MTT Jokioinen.
- Taylor, J., Pape S., Murphy, N., 2005. "A Summary of Passive and Active Treatment Technologies for Acid and Metalliferous Drainage (AMD)." Proceedings of the 5th Australian Workshop on Acid Drainage, nro 29.
- Tertsunen, J., 2014. "Pienvesien neutralointikoheet." Teoksessa Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella, toimittanut Raija Suomela, 101–26. MTT Raportteja 132. MTT Jokioinen.
- Tertsunen, J., Martinmäki, K., Heikkinen, K., Marttila, H., Saukkoriipi, J., Tammela, S., Saarinen, T., Tolkkinen, M., Hyvärinen, M., Ihme, R., Yrjänä, T., Kløve, B. 2012. "Happamuuden aiheuttamat vesistöhaitat ja niiden torjuntakeinot Sanginjoella." Suomen ympäristö. Vsk. 37.
- Turunen, K., 2015a. "Aerobic constructed wetlands - Wiki - GTK." Viitattu 12.11.2015. <http://wiki.gtk.fi/web/mine-closure/wiki/-/wiki/Wiki/Aerobic+constructed+wetlands>.
- Turunen, K., 2015b. "Anaerobic constructed compost wetlands - Wiki - GTK." Viitattu 12.11.2015. <http://wiki.gtk.fi/web/mine-closure/wiki/-/wiki/Wiki/Anaerobic+constructed+compost+wetlands>.
- Turunen, K., 2015c. "Reducing and alkalinity producing systems (RAPS/SAPS) - Wiki - GTK." Viitattu marraskuuta 11. <http://wiki.gtk.fi/web/mine-closure/wiki/-/wiki/Wiki/Reducing+and+alkalinity+producing+systems+%28RAPS%252FSAPS%29>.
- Turunen, K., Hämäläinen, E., 2015. "Open limestone channel - Wiki - GTK." Viitattu marraskuuta 5. wiki.gtk.fi/web/mine-closure/wiki/-/wiki/Wiki/Open+limestone+channel.
- Ukonmaanaho, L., Starr, M., Kantola, M., Nieminen, M., Piispanen, J., Lauren, A., Heikkinen, J., ym. 2013. "Impact of whole-tree harvesting on water quality and quantity from drained peatland forests in Finland." Poster.
- Uusi-Kämpä, J., Virtanen, S., Rosendahl, R., Österholm, P., Mäensivu, M., Westberg, V., Regina, K., ym. 2013. "Ympäristöriskien vähentäminen happamilla sulfaattimailla – Opas pohjaveden pinnan säätämiseksi." 74. MTT Raportti. Vsk. 74. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-487-422-9>.
- Weppling, K., Iivonen, P., 2005. "Kalkitus." Teoksessa Järvien kunnostus, toimittanut Teemu Ulvi ja Esko Lakso, 271–86. Ympäristöopas 114. Helsinki: Edita & Suomen ympäristökeskus. <http://hdl.handle.net/10138/41746>.
- Virtanen, S., Uusi-Kämpä, J., Ylivainio, K., Österholm, P., Yli-Halla, M., 2015a. "Sub-irrigation and controlled drainage increase yields and mitigate acid loading in Finnish cultivated acid sulfate soils." Teoksessa Workshop: Future of drainage under challenges and emerging technologies, 1–4. Montpellier: International Commission on Irrigation and Drainage 26th Euro-mediterranean Regional Conference and Workshops « Innovate to improve Irrigation performances » 12-15 October 2015.

- Virtanen, S., Uusi-Kämpä, J., Österholm, P., Yli-Halla, M., 2015b. ”Pohjaveden säädön vaikutus pellon valumaveden happamuuteen happamilla sulfaattimailla.” Teoksessa Pro Terra 67/2015 - VIII Maaperätieteen päivien abstraktit, toimittanut Jaana Leppälampi-Kujansuu, Taina Pennanen, Katri Rankinen, Tapio Salo, Helena Soinne, ja Pekka Hänninen, 17–18. Pro Terra. Suomen maaperätieteiden seura, Helsingin yliopisto, Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitos.
- Ympäristöministeriö. 2015. ”Sedimenttien ruoppaus- ja läjitysohje.” Ympäristöhallinnon ohjeita 1/2015.
- Ziemkiewicz, P. F., J. G. Skousen, D. L. Brant, P. L. Sterner, ja R. J. Lovett. 1997. ”Acid Mine Drainage Treatment with Armored Limestone in Open Limestone Channels.” *Journal of Environment Quality* 26 (4). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America: 1017. doi:10.2134/jeq1997.00472425002600040013x.
- Ziemkiewicz, P. F., J. G. Skousen, ja J. Simmons. 2003. ”Long-term Performance of Passive Acid Mine Drainage Treatment Systems.” *Mine Water and the Environment* 22 (3): 118–29. doi:10.1007/s10230-003-0012-0.
- Zipper, C E, ja J G Skousen. 2010. ”Influent Water Quality Affects Performance of Passive Treatment Systems for Acid Mine Drainage.” *Mine Water and the Environment* 29 (2): 135–43. doi:10.1007/s10230-010-0101-9.
- Österholm, P., 2012. ”Miljömetoder på sura sulfatjordar.” Report for EU LIFE + CATERMASS project.
- Österholm, P., Virtanen, S., Rosendahl, R., Uusi-Kämpä, J., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Mäensivu, M., Turtola, E., 2015. ”Groundwater management of acid sulfate soils using controlled drainage, by-pass flow prevention, and subsurface irrigation on a boreal farmland.” *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 65 (sup1): 110–20. doi:10.1080/09064710.2014.997787.