

➤ Happamat sulfaattimaat ja ojitus

Tiina Maileena Nieminen, Antti Ihalainen & Jaana Uusi-Kämpä

Tiina Maileena Nieminen, Luonnonvarakeskus, tiina.m.nieminen@luke.fi;

Antti Ihalainen, Luonnonvarakeskus;

Jaana Uusi-Kämpä, Luonnonvarakeskus, jaana.uusi-kamppa@luke.fi

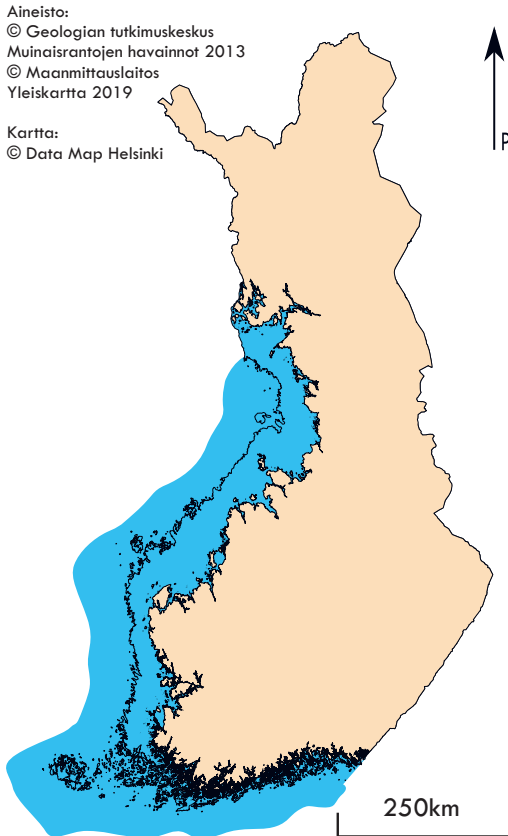
Rannikkoalueiden happamat sulfaattimaat

Suomen rannikkoalueilla esiintyy rikkipitoisia maakerroksia, joita kutsutaan happamiksi sulfaattimaiksi. Nämä rikkipitoiset maakerrokset ovat kerrostuneet muinaisen Litorinameren pohjalle hapettomissa oloissa (kuva 1). Maankohoamisen myötä merenpohjan rikkipitoisia kerrostumia on noussut meren pinnan yläpuolelle. Nykyisestä maa-alastamme on ollut Litorinameren peitossa noin 4,8 miljoonaa hehtaaria. Tästä alasta yli 10 % on alueilla, joilla happamien sulfaattimaiden esiintymisen todennäköisyys on Geologian Tutkimuskeskuksen (GTK) yleiskartoituksen perusteella suuri tai kohtalainen (Nieminen ym. 2016). Joutuessaan äkillisesti ojituksen seurauksena, rikkipitoiset maakerrokset muodostavat rikkihappoa. Maaperän happamoituminen johtaa metallien liukenemiseen ja happamoitavien yhdisteiden ja metallien huuhtoutumiseen vesistöihin.

Maankohoamisen myötä meren alta paljastunut maa metsitty luontaisesti rantaniittyvaiheen jälkeen. Syntyvät metsät ovat tyypillisesti harmaalepän vallitsemaa ja kehittyvät mahdollisen hieskoivuvälivaiheen kautta lähes puhtaiksi kuusikoiksi (Svenonius 1945, Appelroth 1948, Svensson ja Jeglum 2000). Lindroos ym. (2007) tutkivat Pohjanmaan rannikolla hyväkasvuisen kuusikon kivennäismaan alkuainepitoisuuksia. He luokittelivat tämän 300–400 vuotta sitten merestä paljas-

tuneen maan poikkeuksellisen suurien vaihtuvan rikin, sinkin ja nikkelin pitoisuuksien perusteella happamaksi sulfaattimaaksi. Luonnontilaisina tällaiset nuoren maaperän kasvupaikat ovat ajoittain korkean pohjavedenpinnan vuoksi metsä- ja maatalouden näkökulmasta katsottuna veden vaivaamia, soistuneita tai soistumiselle alttiita metsiä. Soistumista tapahtuu myös merenlahtien ja niistä maankohoamisen myötä kuroutuvien fladojen ja kluuvijärvien umpeenkasvun seurauksena. Tällainen soistumiskehitys on hidasta, esimerkiksi Siikajoella, noin 26 metriä meren pinnan yläpuolella sijaitsevan luonnontilaisen rämeen 1,5–2,5 metrin paksuisen turvekerroksen muodostumiseen on kulunut 2 500–3 000 vuotta. Nykyistä puustoista rämevaihetta on edeltänyt puuton nevvaihe (Tuittila ym. 2013).

Nykyisin suuri osa rannikkoalueidemme soistuneista kankaista ja niin ohutturpeisista kuin paksuturpeisistakin soista on ojitettu joko maa- tai metsätalouden tarpeisiin. Suhteellisin matalin avo-ojin toteutetun metsäojituksen oletetaan vaikuttaneen rikkijhdisteiden hapettumiseen paljon lievemmin kuin maatalousmaan tehokkaan salaajituksen (maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö 2011). Koska rikkipitoiset maakerrokset ovat kivennäismaassa, paksu turvekerros suojaa niitä hapettumiselta. Metsätalouden mailla suurin happamoitumisen riski onkin kivennäismailla ja ohutturpeisilla soilla. Rehevillä metsäojitetuilla soilla ja erityisesti turvemaapelloilla ojitus johtaa turpeen hävikkiin (ks. Ojitus ja kasvihuonekaasupäästöt, s. 173). Turpeen



Kuva 1. Happamia sulfaattimaita esiintyy muinaista merenpohjaa olevilla rannikkoalueella. Kuvassa on esitetty sinisellä Litorinameren laajin vaihe. Nykyinen rantaviiva on kuvattu mereen piirrettynä rajauksena.

tiivistymisen ja hävikin seurauksena maan pinta painuu ja alun perin paksuturpeisellakin suolla kuivatuksen ylläpito ojia syventämällä johtaa vähitellen rikkipitoisen kivennäismaan hapettumiseen ja happamoitumiseen. Myös karuilla soilla metsäojitus voi pintaturpeen tiivistyessä johtaa turpeen pinnan painumiseen kymmeniä senttejä (Minkkinen ja Laine 1998). Tällöinkin ojien kunnostus hapettaa aiempaa syvempiä kerroksia.

Suometsien ala happaman sulfaattimaan suuren ja kohtalaisen esiintymisen todennäköisyyksien luokkien alueella on 125 000 hehtaaria ja vastaava kangasmetsien ala 95 000 hehtaaria (Nieminen ym. 2016). Luonnontilaisia soita ei enää ojiteta merkittävässä määrin metsätaloutta varten, mutta kivennäismaiden ojitus sekä van-



Kuva 2. Rikkipitoisten maakerrosten kuivatuksen seurauksena muodostunut hapan sulfaattimaa -profiili pelto- maassa. Ylimpänä näkyvän muokkauskerroksen alla on paksu hapettunut kerros, jossa näkyy ruosteenvärisiä saostumia. Syvemmällä, pohjaveden pinnan alapuolella on muuttumatonta tummanharmaata rikkipitoista maata. Kuva: Markku Yli-Halla.

hojen metsäojitusalueiden ojaston kunnostaminen soilla ja kivennäismailla aiheuttavat merkittävän riskin alapuolisten vesistöjen eliöstölle happamilla sulfaattimailta toimittaessa. Valtakunnan metsien 11. inventoinnissa (VMI11; 2009–2013) arvioitiin, että muinaisen Litorinameren peitossa olleella rannikkoalueellamme sijaitsevista ojitetuista metsämaan kankaista on 52 000 hehtaaria ojituksen tai ojien kunnostuksen tarpeessa. Alueen soilla oli ojien kunnostustarvetta 222 000 hehtaaria – luonnontilaisten soiden ojituksia ei VMI:ssä enää ehdoteta. Päätehakkuita oli Litorina-alueella tehty vuodessa noin 5 000 hehtaarin alalla ja maanmuok- kausta noin 3 000 hehtaarin alalla (VMI11).

Sadan viime vuoden aikana rikkipitoisia sedi- menttejä sisältäviä joutomaita on otettu myös



Kuva 3 vasen) Metsäoja, jossa on erotettavissa happettumisen seurauksena muodostuneita vaaleankeltaisia rikkisaostumia. Kuva: Aimo Jokela, Luke. oikea) Vanhaa ojankaivumaata metsänuudistusalalla. Kuva Ismo Kyngäs, Luonnonvarakeskus.

maanviljelykäyttöön ojittamalla ja johtamalla valumavesiä lähivesistöihin. Peltoviljelyssä olevien happamien sulfaattimaiden pinta-ala vaihtelee eri arvioiden mukaan 130 000 ja 336 000 hehtaarin välillä (Puustinen ym. 1994, Yli-Halla ym. 1999).

Maankäytöstä aiheutuu Suomessa happamoitumista ja vesistöongelmia rannikkoalueiden happamien sulfaattimaiden lisäksi myös mustaliuskejakojen alueilla. Mustaliuskeita esiintyy kallioperässä sekä sisämaassa että rannikkoalueilla (Loukola-Ruskeeniemi 1992).

Happaman sulfaattimaan tunnistaminen

Salaojitetussa maatalousmaassa hapettuminen ulottuu usein noin kahden metrin syvyyteen, vaikka ojasyyvyys on vain reilun metrin (Joukainen ja Yli-Halla 2003). Happaman sulfaattimaan tapauksessa hapettuneessa kerroksessa muodostuu rikkihappoa ja muita hapettumistuotteita. Ne näkyvät maaperässä tyypillisesti ruoste- tai kellanruskeina täplinä ja viiruina (kuva 2). Hyvin happamassa maassa voi näkyä myös oljenkeltaista saostumaa. Koska metsäojien hapettava vaikutus ei ojien välitöntä läheisyyttä lukuun

ottamatta ulotu kovin syväälle, turpeen alaiset kivennäismaakerrokset ovat usein säilyneet veden kyllästämänä muuttumattomassa tilassa. Tällöin maakerrosten rikkijhdisteet eivät ole hapettuneet eikä niissä siten ole havaittavissa värillisiä hapettumistuotteitakaan, vaikka kyseessä olisikin hapan sulfaattimaa. Saostuneita, näkyviä hapettumistuotteita voi sen sijaan löytää ojaluiskista, vanhoista kivennäismaakaivumassoista tai kairattaessa kivennäismaahan asti ulottuvia näyhteitä ojien välittömästä läheisyydestä (kuva 3).

Veden kyllästämänä säilynyt rikkipitoinen maakerros ei ole hapan vaan lähes neutraali. Sen hapettuessa käynnistyvä pitkäkestoinen hapon muodostus johtaa voimakkaaseen happamoitumiseen ja haitallisiin vesistöhuuhtoumiin. Vanhojen metsäojien kunnostus voi johtaa tällaisten veden kyllästämien kerrosten äkilliseen hapettumiseen ja vakaviin happamuushaittoihin, jos kaivussyvyys ulottuu kivennäismaahan ja alkuperäistä ojasyyvyttä syvemmälle. Toisinaan kaivun paljastama muuttumattomassa tilassa ollut rikkipitoinen maakerros voidaan tunnistaa happamaksi sulfaattimaaksi tummanharmaasta tai jopa mustasta väristä, joka hapelle altistumisen jälkeen alkaa nopeasti vaalentua (kuva 4). Useimmiten



Kuva 4 Kaivurin kauhan ojan pohjan alta paljastamaa vielä mustana erottuvaa rikkiä sisältävää maata. Kuva: Mats Willner, Kokkolan kaupunki.

veden kyllästämä muuttumattomassa tilassa säilynyt rikkiäinen maakerros ei kuitenkaan tuoreenakaan ole poikkeavan värinen, jolloin se ei silmämääräisesti ole tunnistettavissa happamaksi sulfaattimaaksi.

Ainut varma keino happaman sulfaattimaan tunnistamiseen on maanäytteiden otto ja niiden analysointi laboratoriossa. Suomessa tällä hetkellä käytetyin, luotettava menetelmä happaman sulfaattimaan tunnistamiseksi on niin sanottu pH-inkubaatio. Siinä määritetään maanäytteiden happamuudessa tapahtuva muutos, kun niitä säilytetään 8–16 viikkoa kenttäkosteudessa happellisissa oloissa. Edullisempia ja nopeampia tunnistamismenetelmiä kehitetään parhaillaan Suomen ympäristökeskuksen koordinoimassa

Tunnistus-hankkeessa (<https://www.syke.fi/hankkeet/tunnistus>).

Haitat vesistöille

Happamat metallipitoiset huuhtoumat heikentävät alapuolisten vesistöjen laatua (Roos ja Åström 2006, Vuori ym. 2009). Ne aiheuttavat haittoja vesikasvillisuudelle sekä paikallisille ja alueellisille pohjaeläin- ja kalakannoille (Lehtinen ja Klingstedt 1983, Meriläinen 1989, Hudd 2000, Sutela ym. 2012). Suurimmat happo- ja metallihuuhtoumat muodostuvat silloin, kun pitkään kestänyttä kuivuusjaksoa ja pohjavedenpinnan laskua seuraa runsaita sateita. Eniten suuren yleisön huomiota saavat kaloihin kohdistuvat haitat.

Pitkäkestoinen tai hyvin äkillinen muutos happamuudessa voi näkyä laajoina kalakuolemina. Niitä havaittiin Pohjanmaalla sateisena syystalvena 2006 poikkeuksellisen kuivan kesän jälkeen. Pohjavedenpinta oli laskenut kesällä erityisen syvälle, jolloin tavallisesti veden kyllästäminä olevat maakerrokset olivat päässeet hapettumaan ja happamoitumaan. Talven 2019–2020 leudot, sateiset olosuhteet ovat niin ikään aiheuttaneet hyvin happamia, metallipitoisia valumia ja muun muassa Luodon-Öjanjärven pohjanmaalla on havaittu kalakuolemia.

EU:n vesipuitteidirektiivin ympäristötavoitteiden saavuttamisen aikarajaa on usean Pohjanmaan jokivesistön kohdalla jouduttu pidentämään vuodesta 2015 vuoteen 2027. Jokien huono ekologinen tila johtuu pääsääntöisesti happamuuden ja metallien, kuten kadmiumin ja nikkelin suurista pitoisuuksista (Keskisarja ym. 2018).

Myös typpikuormitus voi olla suurta rannikkoalueen happamilta sulfaattimailta. Luonnonvarakeskuksen peltomaiden kemiallisen tilan valtakunnallisessa seurantatutkimuksessa (Valse) havaittiin happamien sulfaattimaiden muokkauskerroksesta otetuissa maanäytteissä jopa 40 % suurempia kokonaistypen ja 56 % suurempia hiilen pitoisuuksia kuin vastaavissa muista maaperistä otetuissa näytteissä (Uusi-Kämpä ym. 2019). Maan suuret typpipitoisuudet saattavat olla osasy Vaasan lähellä sijaitsevan Söderfjärdenin kentän salaojavesistä mitattuihin suuriin nitraattityppipitoisuuksiin (5–30 mg/l; Yli-Halla ym. 2020). Samaisella kentällä havaittiin myös suuria typpioksiduulipäästöjä ilmakehään.

Haittojen torjunta metsä- ja maataloudessa

Metsänhoitotoimenpiteistä happamilta sulfaattimailta aiheutuvien vesistöhaittojen torjumiseksi tulisi niiden mahdollinen esiintyminen selvittää aina, kun toimitaan rannikon Litorina-alueella. Tämä edellyttää tavanomaista tarkemman maaperätiedon hankkimista. Avoimessa Hapamat sulfaattimaat -karttapalvelussa on saatavilla Geologian tutkimuskeskuksen tuottamaa kartoitustietoa happamien sulfaattimaiden esiintymisestä ja ominaisuuksista (<https://gtkdata.gtk.fi/hasu/>). Palvelussa tarjotaan sekä alueellista tietoa happamien

sulfaattimaiden esiintymisen todennäköisyydestä että pistemäistä tietoa kairaus- ja analyysituloksista Litorina-alueella. Kartoitustieto ei kuitenkaan anna täyttä varmuutta siitä, esiintyykö happamia sulfaattimaita tietyssä kohteessa. Kun toimitaan alueilla, joilla esiintymisen todennäköisyys on suuri (yli 90 %) tai kohtalainen (yli 50 %), happamista sulfaattimaista aiheutuvat riskit on otettava huomioon metsätaloudessa. On myös syytä tiedostaa, että happamia sulfaattimaita voi esiintyä pienen ja erittäin pienen esiintymisen todennäköisyyksien alueillakin. Ojaverkoston kunnostaminen sekä metsänuudistaminen ja siihen liittyvää maanmuokkaus käynnistävät happamoitumisen, jos rikkipitoisia kerroksia altistuu hapelle. Maaperän voimakas happamoituminen ja metallien liukeneminen voivat vesistöhaittojen ohella aiheuttaa myös vakavia kasvuhäiriöitä taimille. Happamilla sulfaattimailta taimien kasvu on merkittävästi hitaampaa ja taimien kuolleisuus suurempaa kuin muussa muokatussa metsämaassa (Kubin 1999).

Kivennäismaata hapettavia, maata rikkovia toimenpiteitä, kuten ojien kunnostusta ja maanmuokkausta, sekä toisaalta myös syviä vesien-suojelurakenteita, kuten lietealtaita, tulisi happamilla sulfaattimailta välttää. Jos ojien kunnostus kuitenkin arvioidaan tarkoituksenmukaiseksi, tulee suunnittelussa ottaa huomioon rikkipitoisten kerrosten esiintymissyvyys ja mahdollisten laikkumaisten esiintymien tarkka sijainti. Silloin voidaan välttää kaivun ulottumista niihin. Ojitusalueiden kuivatustehoa voidaan tarvittaessa parantaa tavanomaista tiheimmin kaivettujen matalien täydennysojien avulla, mikäli turpeen paksuus kohteella on ojitusyvyyyttä suurempi (Hannila ym. 2015). Ojituksissa ja maanmuokkauksissa läjitetyt, kivennäismaata sisältävät kaivumassat sijoitetaan kauaksi ojista ja peitetään turpeella hapettumisen hidastamiseksi. Liettealtaiden sijaan vesien-suojeluratkaisuinä hyödynnetään kaivu- ja perkauskatkoja, pohja- ja putkipatoja ja pintavalutusta (Nieminen ym. 2016).

Metsänuudistamisessa tulisi happamilla sulfaattimailta suosia luontaista uudistamista ja kuusialikasvosten hyödyntämistä (Nieminen ym. 2020). Maanmuokkauksessa on suosittava mahdollisimman kevyttä menetelmää etenkin ohuturpeisilla soilla ja kangasmailla, joilla muokkaus



Kuva 5 ylhäällä) Metsänuudistamiskohteella Lounais-Suomessa todettiin hapanta sulfaattimaata ojan pohjassa. alhaalla) Ojan kunnostuksen yhteydessä nostettua pohjamaata on kasattu istutusmättäiksi. Kuvat: Timo Silver, Suomen metsäkeskus.

ulottuu kivennäismaahan. Ojitusmätästyksen turvauduttaessa on vältettävä ojien pohjamaan kasaamista istutusmättäiksi taimikuolemien ja kasvuhäiriöiden ehkäisemiseksi (kuva 5). Tapijon koordinoimassa HaSuMetsä-hankkeessa tutkitaan metsänuudistamisen yhteydessä annetun tuhkalannoituksen vaikutusta happamien valumavesien muodostumiseen ja istutustaimien menestykseen (<https://tapio.fi/luonnonmukainen-valuma-ja-maavesien-kasittelymenetelma-happamien-sulfaattimaiden-metsänuudistamisaloilla-hasumetsa/>).

Happamien sulfaattimaiden kalkitseminen on mahdollistanut niiden käytön peltoviljelyssä. Pohjanmaan rannikkoalueella onkin erittäin hyväntuottoisia peltoja. Vaikka muokkauskerros saadaan kalkittua viljelyyn sopivaksi (pH 6–7), niin alempien maakerrosten happamuus (pH < 4)

saattaa aiheuttaa haittoja ympäröivissä vesistöissä. Sen takia tulisikin estää rikkiyhdisteiden hapettuminen myös muokkauskerroksen alapuolisissa maakerroksissa. Tämä onnistuu parhaiten pitämällä pohjavedenpintaa tavanomaista korkeammalla. Silloin pelkistyneet rikkipitoiset kerrokset eivät pääse kosketuksiin ilman hapen kanssa. Matala ojasyvyys sekä riittävän pieni ojaväli ovat tässä tärkeitä tekijöitä. Vaikka Geologian tutkimuskeskuksen karttapalvelusta saa tietoa happamien sulfaattimaiden todennäköisestä sijainnista, viljelijällä ei välttämättä ole tietoa oman peltonsa rikkipitoisista maakerroksista. Siksi myös maatalousmaidien osalta tulisi korostaa happamien sulfaattimaiden riskialueet ja viedä ne paikkatiedostoihin mm. vesienhoidon toimenpiteiden suunnittelun tueksi (Ympäristöministeriö 2020).

Säätösalaajituksessa pohjavedenpinnan korkeutta voidaan säätää kaivojen avulla. Pohjaveden pintaa lasketaan viljelytoimenpiteiden ajaksi keväällä ja syksyllä. Muulloin se pyritään pitämään korkealla, mutta pohjaveden korkeuden ylläpito on haasteellista etenkin pitkien kuivuusjaksojen aikana. Salaajastoon voidaan myös pumpata lisävettä kasvukauden vähäsateisina kuukausina, ja siten estää pohjavedenpinnan alenemista (Österholm ym. 2015). Tällainen säätökastelu onnistuu, jos säätökaivojen läheisyydessä on saatavilla kasteluun sopivaa vettä esimerkiksi ojista tai joesta. Pellon alareunaan voidaan myös kaivaa salaajakoneen avulla lähes kahden metrin syvyyteen ulottuva muovikalvo, jonka tehtävänä on estää veden valumista pelloilta vesistöön (Österholm ym. 2015). Koeluonteisesti on myös kokeiltu kalkkiseoksen pumppaamista salaajastoon, jolloin tavoitteena on ollut estää rikkiyhdisteiden mikrobiologista hapettumista. Matalajuurisia kasveja, kuten nurmikasveja suositellaan viljelykseen happamille sulfaattimaille, jos pohjavedenpintaa pidetään jatkuvasti korkealla.

Kommentoineet: Hannu Marttila, Pirkko Kortelainen, Pekka Punttila, Sakari Sarkkola

Kirjallisuus

- Appelroth, E. 1948. Några av landhöjningens betingade skogliga särdrag inom den österbottniska skärgården, Teoksessa: Cederhvarf, P. (toim.). Skärgårdsboken. Nordensjöld Samfundet i Finland, Helsinki, s. 292-304.
- Hannila, J., Willner, M., Sundsten, K. & Nieminen, T.M. 2015. Metsien kunnostusojitus happamien sulfaattimaiden esiintymisalueella. Perhonojen happamuuden hallinta (PAHA)-projekti. Kokkolan kaupunki, Ympäristöpalvelut. 7 s.
- Hudd, R. 2000. Springtime episodic acidification as a regulatory factor of estuary spawning fish recruitment. Julkaisussa: Verhandlungen. Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie 27(1), Vaasa, 42 s.
- Joukainen, S. & Yli-Halla, M. 2003. Environmental impacts and acid loads from deep sulfidic layers of two well-drained acid sulfate soils in western Finland. Agriculture, Ecosystems and Environment 95: 297–309. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00094-4)
- Keskisarja, V., Salminen, E. & Westberg, V. (toim.) 2018. Happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivat vuoteen 2020. Väliraportti. Maa- ja metsätalousministeriön työryhmämuistio. 48 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-453-975-3>
- Kubin, E. 1999 Maankohoamisrannikon sulfidivimaiden metsittäminen. Teoksessa: Karlsson, K. (toim.). Metsät Pohjanmaan rannikolla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 723: 50–58. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1669-6>
- Lehtinen, K.J. & Klingstedt, G. 1983. X-ray microanalysis in the scanning electron microscope on fish gills affected by acidic heavy metal containing industrial effluents. Aquatic Toxicology 3: 93–102. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/0166-445X\(83\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0166-445X(83)90031-0)
- Lindroos, A.-J., Derome, J., Raitio, H. & Rautio, P. 2007. Heavy metal concentrations in soil solution, soil and needles in a Norway spruce stand on an acid sulphate forest soil. Water, Air, and Soil Pollution 180(1): 155–170. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9258-z>
- Loukola-Ruskeeniemi, K. 1992. Geochemistry of Proterozoic Metamorphosed Black Shales in Eastern Finland, with Implications for Exploration and Environmental Studies. Väitöskirja, Helsingin yliopisto, Geologian tutkimuskeskus. 86 s. Saatavissa: https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_009.pdf
- Maa- ja metsätalousministeriö, ympäristöministeriö 2011. Happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivat vuoteen 2020. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja 1/2011. 26 s. Saatavissa: <https://mmm.fi/julkaisut/julkaisusarja>
- Meriläinen, J. 1989. Impact of an acid, polyhumic river on estuarine zoobenthos and vegetation in the Baltic Sea, Finland. Biology Research Reports, University of Jyväskylä 13: 3–48.
- Minkkinen, K. & Laine, J. 1998. Long-term effect of forest drainage on the peat carbon stores of pine mires in Finland. Canadian Journal of Forest research 28: 1267–1275.

- Nieminen, T. M., Hökkä, H., Ihalainen, A. & Finér, L., 2016. Metsänhoito happamilla sulfaattimailla. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 1/2016, 40 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-190-7>
- Nieminen, T. M., Silver, T., Boman, A., Ilvesniemi, H., Joensuu, S. & Härkönen, L. 2020. Geologian tutkimuskeskuksen happamien sulfaattimaiden yleiskartoituksen hyödyntäminen metsätaloudessa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 21/2020. 28 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-939-2>
- Puustinen, M., Merilä, E., Palko, J. & Seuna, P. 1994. Kuivatustila, viljelykäytäntö ja vesistökuormitukseen vaikuttavat ominaisuudet Suomen pelloilla. National Board of Waters and Environment, Research report A 196. 323 s.
- Roos, M. & Åström, M. 2006. Gulf of Bothnia receives high concentrations of potentially toxic metals from acid sulphate soils. *Boreal Environmental Research* 11: 383–388. Saatavissa: <http://www.borenav.net/>
- Sutela, T., Vuori, K-M, Louhi, P., Hovila, K., Jokela, S., Karjalainen, S.M., Keinänen, M., Rask, M., Teppo, A., Urho, L., Vehanen, T., Vuorinen, P.J. & Österholm, P. 2012. Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat vesistövaikutukset ja kalakuolemat Suomessa. Suomen ympäristö 14. 50 s. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/38771>
- Svenonius, H. 1945. Gråalen som strandväxt vid Bottniska viken. *Botaniska Notiser* 166–169.
- Svensson, J.S, & Jeglum, J.K. 2000. Primary succession and dynamics of Norway spruce coastal forests on land-uplift ground moraine. *Studia Forestalia Suecica* 209. 32 s. Saatavissa: <https://pub.epsilon.slu.se/3020/>
- Tuittila, E. S., Juutinen, S., Frolking, S., Väiliranta, M., Laine, A. M., Miettinen, A., Marja-Liisa Seväkivi, M.L., Quillet, A. & Merilä, P. 2013. Wetland chronosequence as a model of peatland development: Vegetation succession, peat and carbon accumulation. *The Holocene*, 23(1): 25–35. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177%2F0959683612450197>
- Uusi-Kämppe, J., Keskinen, R., Heikkinen, J., Guagliardi, I. & Nuutinen, V. 2019. A map-based comparison of chemical characteristics in the surface horizon of arable acid and non-acid sulfate soils in coastal areas of Finland. *Journal of Geochemical Exploration* 200: 193–200. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.02.001>
- Valtakunnan metsien 11. inventointi (VMI11). Maastotyön ohjeet 2013. Koko Suomi ml. Ahvenanmaa. Metsäntutkimuslaitos. Vantaa 2013. Moniste. 191 s.
- Vuori, K.-M., Bäck, S., Hellsten, S., Holopainen, A.-L., Järvinen, M., Kauppila, P., Kuoppala, M., Lax, H-G., Lepistö, L., Marttunen, M., Mitikka, S., Mykrä, H., Niemi, J., Olin, M., Perus, J., Pilke, A., Rask, M., Ruuskanen, A., Vehanen, T. & Westberg V. 2009. OSA I. Vertailuolot ja luokan määrittäminen. Teoksessa: Vuori, K. M., Mitikka, S. ja Vuoristo, H. (Toim). Pintavesien ekologisen tilan luokittelu. Ympäristöhallinnon ohjeita 3. Suomen ympäristökeskus, Helsinki. 123 s. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10138/41785>
- Yli-Halla, M., Puustinen, M. & Koskiaho, J. 1999. Area of cultivated acid sulfate soils in Finland. *Soil Use and Management* 15: 62–67. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1999.tb00065.x>
- Yli-Halla, M., Virtanen, S., Regina, K., Österholm, P., Ehnvall, B. & Uusi-Kämppe, J. 2020. Nitrogen stocks and flows in an acid sulfate soil. *Environmental Monitoring and Assessment* 192: 751. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08697-1>
- Ympäristöministeriö 2020. Vesienhoidon toimenpiteiden suunnittelu vuosille 2022–2027. Maatalous, turkistuotanto ja happamuuden torjunta. Maataloustiimin loppuraportti 19.2.2020. 57 s.
- Österholm, P., Virtanen, S., Rosendahl, R., Uusi-Kämppe, J., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Mäensivu, M. & Turtola, E. 2015. Groundwater management of sulfide bearing farmlands using by-pass flow prevention and subsurface irrigation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B, Plant and Soil Sciences* 65, Supplement 1: 110–120. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/09064710.2014.997787>