

**HAPPAMIEN SULFAATTIMOIDEN TUNNISTAMINEN
MAARAKENTAMISESSA**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Kestävä kehitys

Kevät 2022

Jaakko Routalaakso

Kestävä kehitys

Tiivistelmä

Tekijä Jaakko Routalaakso

Vuosi 2022

Työn nimi Happamien sulfaattimaiden tunnistaminen maarakentamisessa

Ohjaaja Maria Lehtimäki

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin erilaiset havainnointimenetelmät soveltuvat happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen maarakennustöiden aikana.

Tutkimuksessa on keskitytty erityisesti nopeiden, saman vuorokauden aikana suoritettavien menetelmien tarkasteluun. Keskeinen osa työtä oli tarkastella havainnointimenetelmien luotettavuutta ja mahdollisiin mittausepä tarkkuuksiin johtavia syitä.

Tutkimuksessa tarkasteltiin happamien sulfaattimaiden havainnointi- ja tutkimusmenetelmiä maarakentamisen näkökulmasta. Happamien sulfaattimaiden hallinta tulee olemaan enenevässä määrin osana tavanomaista kaivuutyötä, joten on tarpeen tarkastella havainnointikeinoja rakennusprojektin onnistumisen kannalta merkittävät seikat huomioon ottaen. Projektin onnistumisen kannalta keskeisimpinä näkökulmina ovat aikataulussa pysyminen, logistiikan hallinta ja ympäristönsuojelullisten ongelmien välttäminen. Tässä tutkimuksessa ei perehdytty kyseisten näkökulmien taloudellisiin vaikutuksiin. Voidaan kuitenkin olettaa, että aikataulun, logistiikan hallinnan tai ympäristönsuojelun laiminlyönnit aiheuttavat myös taloudellista haittaa.

Tutkimuksessa selvisi, että tarkasteltujen havainnointimenetelmien perusteella on mahdollista saavuttaa riittävän luotettavia tuloksia, jotta niiden perusteella voitaisiin tehdä karkeaa jaottelua maan jatkokäytön suunnittelussa. Havainnointimenetelmien avulla saadaan epävarmoissa tapauksissa viitteitä jatkotutkimustarpeen määrittämiseen.

Asianmukaisten tutkimusten ja maa-ainesten hallinnan kautta toimitaan taloudellisen kestävyuden lisäksi myös ekologisesti kestäväällä tavalla. Opinnäytetyö toteutettiin projektityönä Envineer Oy:ssä.

Avainsanat Happamoituminen, sulfaattimaat, maarakennus, Litorinameri

Sivut 34 sivua ja liitteitä 2 sivua

Degree Programme in Sustainable Development

Abstract

Author Jaakko Routalaakso

Year 2022

Subject Identification of Acid Sulfate Soils on Earthworks

Supervisor Maria Lehtimäki

The purpose of the study was to find out how well different observation methods are suitable for the identification of acid sulfate soils during earthwork. The study focused on the examination of rapid methods performed during the same day. The key part of the study was to examine the reliability of the detection methods and the causes leading to possible measurement inaccuracies.

In the process, attention was paid to identification and research methods of acid sulfate soils from the perspective of earthworks. The management of acid sulfate soils will increasingly be part of normal excavation work, so it is necessary to consider the means of observation, taking into account the factors relevant to the success of the construction project. The main aspects of the project's success were schedule adherence, managing logistics and avoiding environmental problems. This study did not examine the economic impacts of the aspects. However, it can be assumed that failures in schedule, logistics management or environmental protection also cause financial disadvantages.

The conclusion was that the observed methods provide sufficiently reliable results to be achieved allow rough breakdown in the planning of future land use. In case of doubt, observational methods can also be used as indications for the determination of the need for further research. Moreover, the operations can be secured through appropriate research and soil management, enhancing not only economic but also ecological sustainability. The thesis was carried out as project work at Envineer Oy.

Keywords Acidification, sulfate soils, earthworks, Littorina sea

Pages 34 pages and appendices 2 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Happamat sulfaattimaat.....	2
2.1	Happamien sulfaattimaiden synty	2
2.2	Happamien sulfaattimaiden nykytilanne	4
2.3	Happamien sulfaattimaiden tulevaisuus	6
3	Happamiin sulfaattimaihin liittyvät ongelmat.....	7
4	Happamien sulfaattimaiden tunnistaminen	11
4.1	Visuaaliset erityispiirteet	11
4.2	Näytteenoton toteuttaminen	12
5	Maa-ainesten hallinta ja tutkimukset	14
6	Tutkimusmenetelmät	15
6.1	Aistinvarainen havainnointi	16
6.2	Suolahappo	17
6.3	Inkubointi	17
6.4	Vetyperoksidihapetus	18
6.5	XRF-analysointilaitteisto	20
7	Tulokset ja tulosten tarkastelu	21
7.1	Näytteenottopiste X-21	22
7.2	Näytteenottopiste X-23	24
8	Menetelmien vertailu	28
9	Kestävän kehityksen näkökulma	29
10	Johtopäätökset	30
	Lähteet.....	32

Kuvat ja taulukot

Kuva 1. Litorinameren rannikko nykyiseen rantaviivaan suhteutettuna.

Kuva 2. Maankohoaminen vuodessa millimetreinä.

Kuva 3. Hapettunut pintakerros on muuttunut mustasta kuparinruskeaksi.

Kuva 4. Elektrodilla varustettu pH-mittari.

Kuva 5. Potentiaalisesti happaman sulfaattimaan hapettunut pintakerros.

Kuva 6. Maanäytteitä ennen vetyperoksidin lisäystä.

Kuva 7. Olympus Delta XRF-analysaattori.

Kuva 8. Maakerrostumien poikkileikkaus ja näytteenottokorkeudet kohteessa X-21.

Kuva 9. Maakerrostumien poikkileikkaus ja näytteenottokorkeudet kohteessa X-23.

Taulukko 1. Itämeren pohjan maa-ainesten kerrostuminen.

Taulukko 2. Näytteenottopisteen X-21 aistinvaraiset havainnot ja tutkimustulokset.

Taulukko 3. Näytteenottopisteen X-21 XRF-mittausten tulokset.

Taulukko 4. Näytteenottopisteen X-23 aistinvaraiset havainnot ja tutkimustulokset.

Taulukko 5. Näytteenottopisteen X-23 laboratoriotuloksien vertailu.

Taulukko 6. Näytteenottopisteen X-23 XRF-mittausten tulokset.

Liitteet

Liite 1 Tutkimustodistus 1/1

Liite 2 Tutkimustodistus 2/1

Yleisimmät käsitteet

Todellinen hapan sulfaattimaa = Hapen kanssa reagoanut rikkisulfaatteja (SO_4^{2-}) sisältävä maakerros. Hapettuessaan sulfideista (S^{2-}) on muodostunut metalleja syövyttäviä rikkisulfaatteja, ja tästä johtuen maan pH-arvo on laskenut. Happaman sulfaattimaan maastossa mitattu pH-arvo mineraalimaassa on $<4,0$.

Potentiaalinen hapan sulfaattimaa = Potentiaalisesti rikkisulfideja sisältävää maa-ainesta, jonka pH-arvo voi olla jopa hieman emäksinen. Ei ole vielä reagoanut hapen kanssa. Hapen kanssa reagoidessaan sulfideista muodostuu happamoitumista aiheuttavia sulfaattisuoloja. Maastossa mitattu pH-arvo yleensä $>6,0$. Vetyperoksidilla hapetetun mineraalimaanäytteen pH-arvo $<2,5$.

Inkubaatio = Tässä asiayhteydessä sulfaattimaanäytteen hapettaminen huoneenlämmössä useiden viikkojen ajan.

NAG-pH = Nettohapontuotto (Net Acid Generation) kuvaa maanäytteen maksimaalista happamoitumispotentiaalia. Hapetetusta näytteestä mitattu pH-arvo kuvaa happamuuden tasoa, minkä maanäyte voi äärimmillään saavuttaa. Happamoitumispotentiaali voidaan tuoda esiin hapettamalla näyte vetyperoksidilla (H_2O_2) ja mittaamalla tämän jälkeen näytteen pH-arvo.

1 Johdanto

Happamat sulfaattimaat ovat olleet vääjäämätön ongelma jo pitkään, emmekä me mahda mitään jääkauden jälkeiselle maankohoamiselle (Auri ym., 2018). Tämä ei kuitenkaan tarkoita sitä, ettemmekö olisi osallisia siitä aiheutuneisiin ongelmiin. Ihmistoiminnalla on ollut huomattava vaikutus siihen, missä ja kuinka suurina ongelmat ilmenevät. Happamia sulfaattimaita esiintyy erityisesti jääkauden jälkeisen Litorinameren alla sijainneilla alueilla, joita paljastuu jatkuvasti lisää maankohoamisesta johtuen. Happamien sulfaattimaiden tunnistusmenetelmien kehittämiseksi on kasvava tarve, sillä sulfaattimaat uhkaavat erityisesti rannikkoalueiden vesistöjen ja maaperän ekologista tilaa. (Hadzic, 2018)

Infrastruktuurin lisäys, asuinalueiden laajeneminen ja teollinen maankäyttö edellyttävät maanmuokkaustoimia, jolloin maaperän luonnollinen tila häiriintyy. Maarakennusprojektin aikana voi herätä epäily happamista sulfaattimaista, joiden todellisesta sulfaattipitoisuudesta tai hapontuottopotentialista ei ole tietoa. Projektin suunnitelmissa ei olla välttämättä osattu ennalta ottaa huomioon happamien sulfaattimaiden tutkimuksiin tai hallintaan liittyviä erityispiirteitä. Yllättäen tulleet muutokset massojen hallintaan ja aikataulutukseen voivat muodostua ongelmaksi hyvin nopeasti. Ongelmat voivat ilmetä aikataulullisina, taloudellisina sekä ympäristönsuojelullisina umpikujina. Tällöin herää tarve nopeille, että luotettaville keinoille selvittää, ovatko maa-ainekset luokiteltavissa happamiksi sulfaattimaiksi. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka hyvin erilaiset havainnointimenetelmät soveltuvat happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen maarakennustöiden aikana. Tarkasteltavana ovat sellaiset menetelmät, joiden suorittaminen on mahdollista toteuttaa kenttäolosuhteissa jo saman päivän aikana näytteenottohetkestä. Tutkimuksessa selvitetään, ovatko kyseiset kenttätutkimusmenetelmät luotettavia, ja saavutetaanko eri menetelmiä yhdistelemällä parempia tuloksia.

2 Happamat sulfaattimaat

Suomessa erityisesti Perämeren rannikoilla on runsaasti todellisia happamia sulfaattimaita ja potentiaalisia happamia sulfaattimaita, mutta niitä esiintyy paljon myös koko muun Itämeren rannikoilla. Jo happamoituneista, sulfaattia sisältävistä maista käytetään termiä todellinen hapan sulfaattimaa, mikäli maa on riittävän hapan. Sulfidia sisältävistä sulfidisedimenteistä puhuttaessa käytetään useimmiten termiä potentiaalinen hapan sulfaattimaa, sillä sen pH-arvo voi luonnollisissa hapettomissa olosuhteissaan olla neutraali tai jopa lievästi emäksinen. Kuitenkin niin potentiaalisista kuin todellisistakin happamista sulfaattimaista käytetään usein yhteisnimitystä hapan sulfaattimaa. (Boman, 2021)

Sulfidia sisältävä maa-aines ei itsessään ole vielä ympäristölle haitallista, mikäli sen hapettomat olosuhteet pysyvät muuttumattomina. Kuitenkin useimmissa rakennusprojekteissa vedenhallinta muodostuu ongelmaksi, jolloin pohjaveden pintaa joudutaan alentamaan. Pohjaveden pinnan alentaminen voi johtaa maaperän ja valumavesien happamoitumiseen, mikäli alue sijaitsee happamien sulfaattimaiden esiintymisalueella. Happamoitumista aiheuttavat maaperässä luontaisesti esiintyvät metallit, jotka rikkihapon (H_2SO_4) liuottamina kulkeutuvat valumavesien mukana lopulta vesistöihin. (Nieminen ym., 2016)

2.1 Happamien sulfaattimaiden synty

Itämeren alimpien maakerrostumien, moreenin ja jääkauden aikaisen glasiaalisaven päälle on kerrostunut jäätikön sulamisesta johtuvien erinäisten vaikutusten seurauksena useita erityyppisiä savikerrostumia (Taulukko 1, s. 3) Itämeren alueella vallinneen Yoldiamerivaiheen jälkeisen Ancylusjärvivaiheen (n. 10700–9000 vuotta sitten) alkupuolella alkoi muodostumaan Itämeren pohjaan homogeenista lustosavea jäätikön sulamisvesien määrän vähentyessä. Ancylusjärvivaihetta seurasi noin tuhat vuotta kestänyt Mastogloiamerivaihe, jonka aikana järvi muuttui hiljalleen mereksi suolaisen veden päästessä virtaamaan Pohjanmereltä. Mastogloiamerivaihe päättyi noin 8000 vuotta sitten, jonka jälkeen alkoi potentiaalisesti happamien sulfaattimaiden muodostumisen kannalta merkittävin vaihe, Litorinamerivaihe. Ancylusjärvivaiheen aikana pohjaan muodostuneen

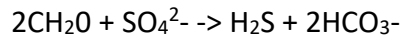
homogeenisen lustosaven päälle kerrostui Litorinamerivaiheen aikana suuria määriä orgaanista ainesta sisältävää mustaa sulfidisavea. Saven sulfidipitoisuus johtuu Itämeren pohjan silloisista hapettomista olosuhteista, jolloin orgaanisen aineksen hajoaminen oli heikompaa. Litorinamerivaiheen loppupuolella sulfidisaven päälle kerrostui lähes homogeenista sinertävän harmaata savea, joka voi sisältää rikkikiisu- tai markasiittikonkreetioita. Sinertävän harmaa savikerros voi siis myös olla potentiaalisesti rikkipitoinen maakerrostuma. (Kotilainen & Kohonen, 2005, s. 16) Ancyclusjärvivaihetta seuranneiden Mastogloiameren, Litorinameren ja Limneameren (n. 9000–1000 vuotta sitten) aikana sulfidi- ja rikkikiisupitoisten maakerrostumien päälle on muodostunut merialueilla useiden metrien paksuinen kerros liejusavea. Liejusavi on usein rikkipitoista suuresta orgaanisen aineen määrästä, ilmaston lämpenemisestä ja veden suolapitoisuudesta johtuen. Liejusavinen kerros ei tosin esiinny kaikkialla Itämeren edeltäneiden meri- ja järvivaiheiden alueilla. Maankohoamisesta ja luontaisista maanpinnan korkeuseroista johtuen ennen liejusaven muodostumista syntyneet savikerrostumat voivatkin olla kaikista ylimpiä maakerroksia tai niiden päälle on kerrostunut muita maalajeja, kuten turvetta tai hiekkaa. (Suomela ym., 2014, s. 12)

Taulukko 1. Itämeren pohjan maa-ainesten kerrostuminen (Kankaanpää & Kotilainen, 2008).

KERROSTUNUT MAA-AINES	VYÖHYKE/ METRIÄ	VUOSIA TAAKSEPÄIN	KEHITYS- VAIHE
Lieju ja liejusavi	0–1	1 000	Nykyinen Itämeri
Liejusavi	1–4	1 000–8 000	Limneameri ja Litorinameri
Liejusavi	4–5	8 000–9 000	Mastogloiameri
Savi	5–7	9 000–10 700	Ancyclusjärvi
Savi ja lustosavi	7–10	10 700–11 600	Yoldiameri
Lustosavi ja siltti	10–16	11 600–13 000	Baltian jääjärvi
Moreeni ja kallioperä	yli 16	yli 13 000	Varhaishistoria

Sedimenttiin päätynyt rikki (S) on saanut pääasiassa alkunsa kasvien huonosti hajonneesta jäännöksestä. Vähähappisissa olosuhteissa heikosti hajonnutta orgaanista ainesta on kasaantunut useiden metrien kerros nykyisen Itämeren ja sitä edeltävien järvi- ja merivaiheiden aikana, joita bakteerit ovat hajottaneet pelkistäen kasvien sisältämän

sulfaatin sulfidiksi. Kasvit pelkistävät maaperän sulfaattirikkiä juurillaan orgaaniseksi rikiksi ja lisäksi ne hyödyntävät ilmakehän sisältämää rikkidioksidia (SO₂). Rikin tehtävänä on toimia niin sanottuna välittäjäaineena muille kasvien tarvitsemille metalleille. (Pietilä ym., 2014, ss. 4–5) Sulfaatinpelkistysreaktion yksinkertaistettu kaava on seuraavanlainen (Borg, 2014):

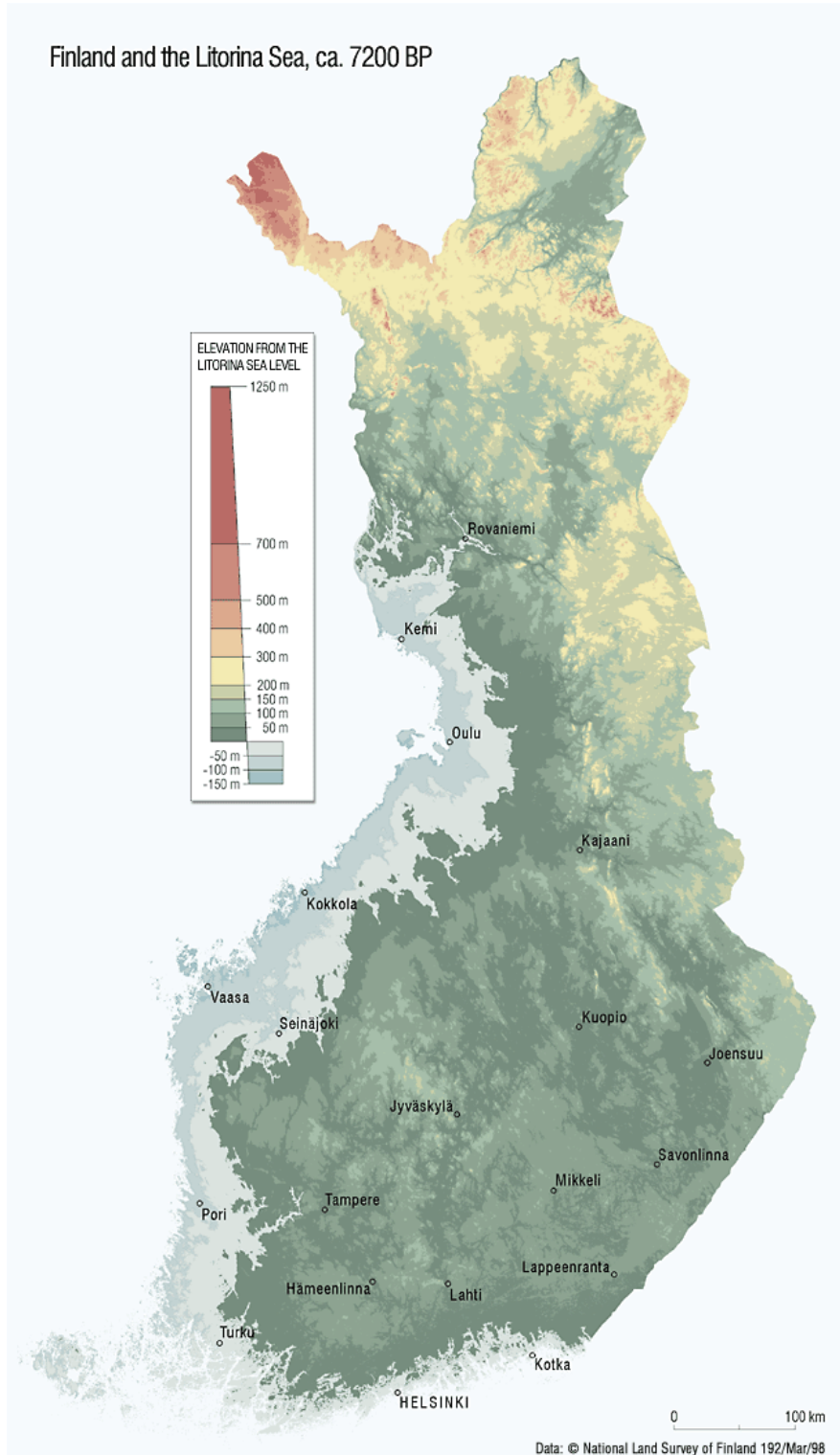


2.2 Happamien sulfaattimaiden nykytilanne

Nykyisen Itämeren alueella noin 4000-8000 vuotta sitten vallinneen Litorinamerivaiheen jälkeen maanpinta on kohonnut Suomen rannikoilla 30-100 metriä ja maankohoaminen jatkuu edelleen. Suomessa Litorinameren aikaista merenpohjaa on paljastunut noin 5 miljoonaa hehtaaria, josta sulfaattimaiden osuuden on arvioitu olevan 100 000-300 000 hehtaaria. (Geologian tutkimuskeskus, 2009) Suomen sulfaattimaiden esiintymien arvioidaan olevan Euroopan laajimmat. Sulfidimaita arvioidaan olevan Afrikassa noin 4,5 miljoonaa, Etelä-Amerikassa 2,8 miljoonaa, Aasiassa 6,5 miljoonaa ja Australiassa 3 miljoonaa hehtaaria. (Andriess & van Mensvoort, 2006, ss. 14–19)

Maankohoamisesta johtuen uutta sulfaattimaata paljastuu joka vuosi lisää. Litorinameren aikainen rannikko on vetäytynyt maankohoamisesta johtuen keskimäärin noin 50 kilometriä itään Suomen länsirannikolla. Etelärannikolla rannikon vetäytyminen on ollut huomattavasti vähäisempää. Kaikkialla, missä uutta rantaa paljastuu ei kuitenkaan esiinny happamia sulfaattimaita, mutta alueisiin tulisi lähtökohtaisesti suhtautua niin, että sulfaattimaiden esiintyminen on mahdollista tai jopa todennäköistä. (Kuva 1, s. 5)

Kuva 1. Litorinameren rannikko nykyiseen rantaviivaan suhteutettuna (Maanmittauslaitos, 1998).

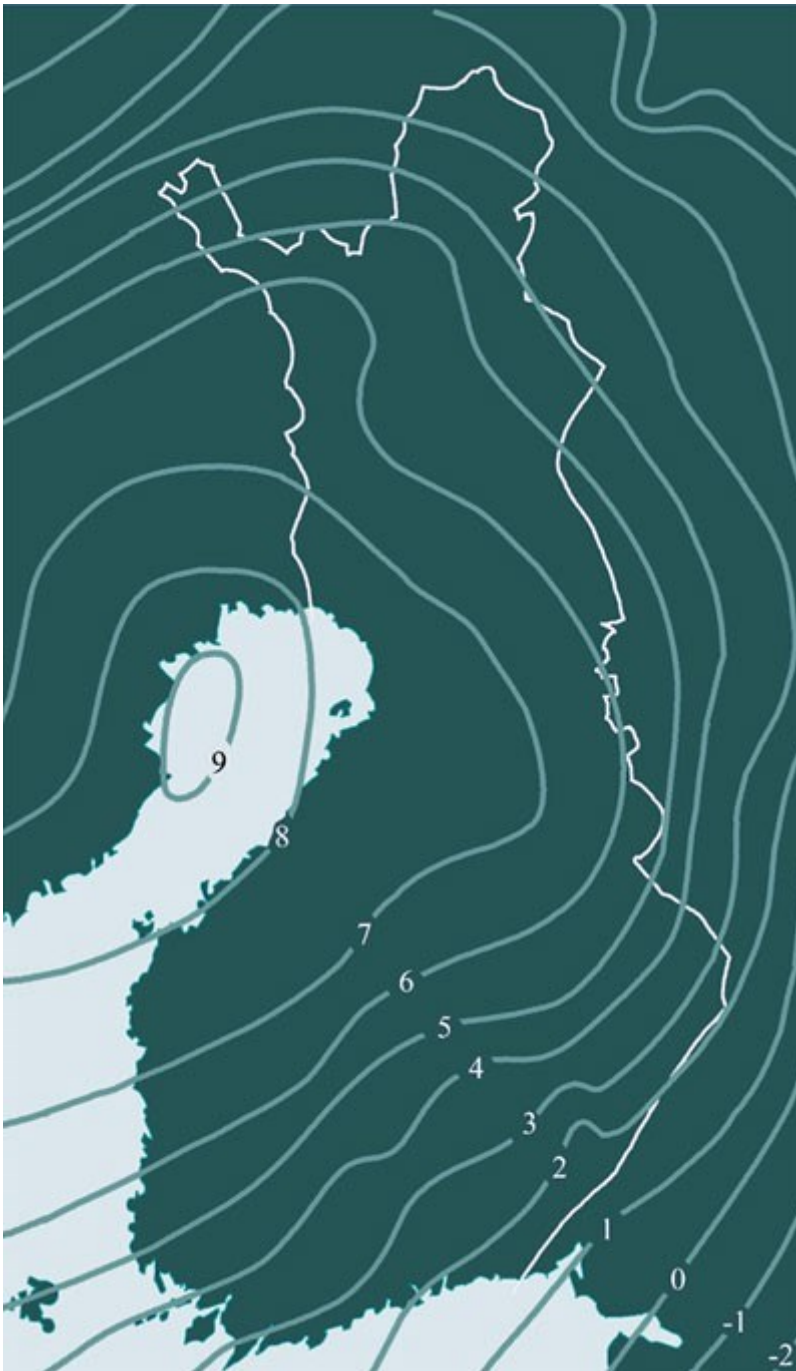


2.3 Happamien sulfaattimaiden esiintyvyys tulevaisuudessa

Jäämassojen aiheuttama painunta on ollut suurinta Perämeren alueella, jossa kohoamista tapahtuu noin 9 mm vuodessa. Kaakkoisimmassa osassa Suomea maankohoaminen on huomattavasti vähäisempää, ollen hieman alle 2 mm vuodessa. Globaali merenpinnan kohoaminen on tällä hetkellä 1,5 mm vuodessa, joten tämä hieman hillitsee maankohoamisesta johtuvaa rantaviivan vetäytymistä merelle päin. Merenpinnan kohoamisella on happamien sulfaattimaiden hallinnan kannalta positiivisia vaikutuksia, sillä uusien sulfaattimaaesiintymien nousu merenpinnan alapuolelta hidastuu. Vaikutus on yksinomaan visuaalinen, sillä meren- ja maanpinta kohoavat molemmat toisistaan riippumatta. Merenpinnan kohoamisen on ennustettu kiihtyvän ilmastonmuutoksesta johtuen, mihin on syynä jäätiköiden sulaminen ja meren lämpölaajeneminen. (Poutanen, n.d.)

Itämerellä maanpinnan kohoaminen jatkuu vielä pitkään, sillä maankohoamista on arveltu olevan jäljellä vielä 100-150 metriä. Pohjanlahden ympäristössä merenranta on paikoin sijainnut 220 metriä nykyisen merenpinnan yläpuolella sijaitsevilla alueilla. Suomen Kansallisen Geologian Komitean (SKGK, 2018) tuottamassa kartassa (Kuva 2, s. 7) on havainnollistettu Suomessa tapahtuvan maankohoamisen määrää vuotta kohden. (Hakala, 2018)

Kuva 2. Maankohoaminen vuodessa millimetreinä (SKGK, 2018).



3 Happamiin sulfaattimaihin liittyvät ongelmat

Potentiaalisesti happamat sulfaattimaat muodostuvat ongelmaksi silloin, kun niiden tila häiriintyy. Häiriintymistä muodostuu kaivamisen yhteydessä, jolloin aiemmin hapettomissa tai vähähappisissa olosuhteissa olleet maa-ainekset joutuvat tekemisiin hapen kanssa ja

happamoituminen käynnistyy. Vastaavan ja usein paljon laajemman ongelman aiheuttaa pohjaveden pinnan alentaminen, joka aiheuttaa happamoitumista vedenpinnan yläpuolelle jääneissä sulfaattimaissa. (Boman ym., 2008, ss. 68–77)

Happamissa sulfaattimaissa hyvin yleisiä alkuaineita ovat rikki, rauta, alumiini ja mangaani. Luontaisesti maa voi sisältää laajan kirjon monia muitakin metalleja, kuten kadmiumia, sinkkiä, kobolttia, kuparia, nikkeliä ja uraania. Sulfaattimaan sisältämät rautasulfidit muodostavat hapen kanssa reagoituaan ensimmäisenä välituotteena alkuainerikkiä S, mikä hapettuu edelleen sulfaattirikiksi. Sulfaattirikki ei yksin aiheuta happamoitumista, vaan happamoitumista tapahtuu vasta kun se on reagoinut jonkin happaman kationin kanssa (Fe, Al, H). Rauta reagoi maan happamoitumiseen muodostamalla lukuisia eri ferri- ja ferrotyyppin rautayhdisteitä, jotka voivat edelleen hapettua tai pelkistyä muiksi yhdisteiksi kemiallisten reaktioiden ja/tai mikrobiologisen toiminnan kautta. (Hutka ym., 1996, ss. 7–8) Maaperän sisältämä alumiini on neutraaleissa tai lievästi happamissa olosuhteissa heikosti liukenevassa muodossa, mutta maan happamoiduttua siitä alkaa muodostumaan vesiliukoisia suoloja. Liunneen alumiinin määrä kasvaa eksponentiaalisesti pH-arvon laskiessa, joten happamissa olosuhteissa pienetkin pH-arvon muutokset voivat vaikuttaa suuresti vesiliukoisien alumiinin määrään maaperässä ja vesistöissä. (Soil Quality, n.d.) Sulfaattirikkiä pelkistävät bakteerit tuottavat maaperää ja vesistöä happamoittavaa rikkivetyä, mikä on luokiteltu terveydelle ja vesieliöstölle erittäin vaaralliseksi. Rikkivety (H_2S) on voimakkaasti mädäntyneelle kananmunalle haiseva väritön kaasu, jolla on metalleja korrodoiva ominaisuus. Se on hyvin vesiliukoista (4-6 g/l) ja voi kulkeutua pohjaveteen. (Työterveyslaitos, 2015)

Ympäristön kannalta happamat sulfaattimaat ovat ongelmallisia siitä syystä, että ne happamoiduttuaan liuottavat maaperässä luontaisesti esiintyviä puoli- ja raskasmetalleja. Jopa vähäinen happipitoisuuden muutos voi johtaa maan nopeaan happamoitumiseen, sillä jo alhaisissa happipitoisuuksissa voi käynnistyä bakteeritoiminta, mikä voi nopeuttaa hapettumisreaktiota moninkertaisesti. Rikkibakteerit voivat saostaa orgaanisen aineksen sisältämää rikkiä sulfideiksi, mistä syntyy reaktiotuloksena rikkivetyä ja hiilidioksidia. Tästä reaktiosta syntyy lisää sulfaattirikkiä, mikä lisää entisestään maan happokuormitusta. Sulfidit ovat syntyneet sulfaattibakteereiden pelkistämästä sulfaatista. Sulfidit ovat sulfaatin pelkistynyt muoto, mikä ei ole päässyt reagoimaan hapen kanssa. Hapen kanssa

reagoidessaan sulfideista muodostuu sulfaatteja, mitkä ovat rikkihapon suojoja. Sulfaateista muodostuu hapen ja veden kanssa reagoidessa erittäin syövyttävää rikkihappoa. (Pietilä ym., 2014, ss. 5–7) Sulfaatit ovat usein hyvin vesiliukoisia ja maaperässä kulkeutuvia, eikä näistä aiheutuvien ongelmien vaikutusalue useinkaan rajaudu yksinomaan päästölähteen läheisyyteen. Hapettuneesta runsaasti rikkiä sisältävästä maaperästä huuhtoutuu vesistöihin hyvin hapanta, metallipitoista vettä, mikä vesistöihin päädyttyään aiheuttaen siellä lukuisia ongelmia vesieliöstölle ja vedenlaadulle. Happamuutta aiheuttavat maaperässä luontaisesti esiintyvä rauta sekä muut edellä mainitut katioineina toimivat metallit. Hapan valuma on runsainta kuivan kauden jälkeisten rankkasateiden jälkeen, jolloin pohjaveden pinta on alhaalla ja kuivuneen maaperän kyky pidättää vettä on heikko. Tällöin syntyy happamuuspiikkejä, jolloin happaman valuman aiheuttama kuormitus vesistöön on suurinta. (Nieminen ym., 2016)

Kuva (Kuva 3, s. 10) havainnollistaa, mitä maaperän metalleille voi käydä niiden reagoidessa happaman sulfaattimaan kanssa. Kuvan tilanteessa on kulunut kaksi kuukautta maa-ainesten esiinkaivamisesta ja alueen pohjaveden pinnan alentamisesta. Pinnan maa-ainekset ovat osittain sekoittuneet ja vesi on alkusyksyn sateiden myötä jäänyt seisomaan alueelle.

Kuva 3. Hapettunut pintakerros on muuttunut mustasta kuparinruskeaksi.



Suuret happamuuspiikit aiheuttavat kalojen massakuolemia, mutta jo pienempikin kuormitus voi aiheuttaa haittaa kalakannoille heikentäen poikastuotantoa. Happamuuspiikkien kohdalla myös vesistöön kohdistuva metallikuormitus kasvaa ja vesieliöstölle aiheutuvat haitat ovat yleensä molempien yhteisvaikutuksesta johtuvia. Hapanta metallipitoista vettä sietävät vain harvat eliölajit. Rauta ja alumiini saostuvat

kalojen kiduksissa vaurioittaen kiduksia, jolloin kalojen hengittäminen vaikeutuu ja voi aiheuttaa tukehtumisen. Ne vesilieliölajit, jotka kestävät huonosti kuormitusta menettävät kykynsä lisääntyä ja kuolevat. Tämä johtaa lopulta vesieliöstön yksipuolistumiseen. (Lehtinen & Klingsted, 1993, ss. 93–102)

4 Happamien sulfaattimaiden tunnistaminen

Kaivettavan maa-aineksen poikkeava väryys tai koostumus voivat olla ensimmäisiä viitteitä siitä, että maa-ainekset ovat potentiaalisesti happamia sulfaattimaita, eikä niitä tulisi käsitellä tavanomaisin menetelmin. Tällöin maa-ainekset tulisi tutkia ja selvittää niiden todellinen tila, jotta myöhemmin ilmeneviltä rakenteisiin ja ympäristöön kohdistuvilta ongelmilta vältyttäisiin. Happamia sulfaattimaita esiintyy erityisesti jääkauden jälkeisen Litorinameren alueella, mikä peittäisi nykytilanteessa suurimman osan kaikesta Itämeren alueen rannikosta. Etelä-Suomessa kerrostumat ylettyvät enemmillään 20-40 metrin ja Pohjanmaalla 100 metrin korkeuteen nykyisestä merenpinnasta mitattuna. (Geologian tutkimuskeskus, 2020)

4.1 Visuaaliset erityispiirteet

Sulfidisavea syntyi Itämeren alueelle jääkauden jälkeisten vaiheiden aikana, jolloin Itämeri koki useaan otteeseen valtavia muutoksia sen vesimassojen fysikaalisissa ja kemiallisissa ominaisuuksissa. Jääkauden ja sen jälkeisten muutoksien aikana syntyivät myös muut sulfidisavea ympäröivät savikerrostumat, joiden ominaisuuksien tunteminen voi edesauttaa havainnointia. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2011) Happamat sulfaattimaat ovat useimmiten savea, mutta ne voivat olla myös muuta hienojakoista maa-ainesta, kuten silttiä ja hiekkaa. Hapan sulfaattimaa voi olla myös runsaasti orgaanista maa-ainesta sisältävää maalajia, kuten turvetta. Todelliset happamat sulfaattimaat esiintyvät hapettuneina useimmiten ruskean eri väri variaatioissa, eivätkä vielä ulkonäöllään välttämättä herätä epäilyksiä happamien sulfaattimaiden esiintymästä. Vaalean värisistä maa-aineksista voi erottua ruskeita sävyjä, jotka ovat syntyneet rautasulfidien sisältämän raudan hapettumisesta. Juuri hapettumistilassa oleva hiekka voi olla yhä harmaata tai mustaa. Musta väri on hyvin tyypillinen myös rikin värjäämälle sulfidisavelle ja useimmissa

tapauksissa sulfidisedimentti onkin väriltään mustaa. Hapettuessaan se muuttuu hyvin nopeasti pinnaltaan vaaleanharmaaksi. Sulfidipitoiset maat voivat kuitenkin olla väriltään kaikkea harmaan ja mustan väliltä, eikä pelkän värin perusteella vielä voida tehdä luotettavaa arviota maan sulfidipitoisuudesta. Sulfidisavea ulkoisesti muistuttavien tummien maakerrostumien erottaminen sulfidisavesta voi olla joskus hankalaa ilman apuvälineitä tai tietoa meren- tai pohjavedenpinnan korkeudesta kyseisellä paikalla, joten on hyvä olla tietoinen myös sulfidisaven ylä- ja alapuolisista maakerrostumista. Erityisesti potentiaalisesti happamien sulfaattimaiden tunnistuksessa on tarpeen huomioida, etteivät kaikki samaa maalajia edustavat maa-ainekset ole saman värisiä, sillä esimerkiksi savi voi esiintyä muun muassa harmaana, mustana, sinertävänä tai vihertävänä. (Suikkanen ym., 2018)

4.2 Näytteenoton toteuttaminen

Mikäli kaivuuta toteutetaan rannikkoalueella, jossa mahdollisesti esiintyy happamia sulfaattimaita, on ennakkoinnin kannalta hyvä tiedostaa, kuinka lähelle merenpinnan tasoa kaivuusyvyys ulottuu. Merenpinnan korkoa lähestyttäessä mahdollisuudet kohdata happamia sulfaattimaita kasvaa, sillä Itämeren rannikkoalueilla happamien sulfaattimaiden esiintyvyys on suurta. (Hadzic, 2018) Merenpinnan korkeutta voidaan käyttää lähtökorkona näytteenotolle varsinkin rannikkoalueilla kaivettaessa, sillä usein juuri merenpinnan korkeudesta alkaa vaihettumisvyöhyke, jossa potentiaalinen hapan sulfaattimaa muuttuu todelliseksi happamaksi sulfaattimaksi merenpinnan yläpuolella sijaitsevissa maakerroksissa. Mikäli kaivettava alue ei sijaitse meren välittömässä läheisyydessä, voi pohjaveden pinnankorkeuden tietämyksellä olla hyvinkin paljon merkitystä, sillä pohjaveden kyllästävä maaperä säilöo potentiaalisesti happamia sulfaattimaita merenpintaa selvästi korkeammalla sijaitsevilla alueilla. Tällöin pohjaveden pinnan korkeutta voitaisiin käyttää lähtökorkona näytteenotolle. Tämä olisi hyvä tiedostaa jo ennen pohjavedenpinnan alentamista, jotta happamien valumavesien syntyä voitaisiin vähentää ja ehkäistä. Pohjaveden pinnankorkeuden tuntemisella voidaan kartoittaa kaivuualuetta ja sitä ympäröivien maa-alueiden happamoitumisriski maanalaisen happipitoisuuden muuttuessa. Mikäli pohjaveden pinnan korkeutta on säädetty ja kaivuualue sijaitsee todennäköisellä happamien sulfaattimaiden esiintymisalueella selvästi merenpintaa korkeammalla, ainoaksi keinoksi ennakoida esiintymiä on tehdä alueelle esitutkimuksia. (Suonperä, 2019, s. 6)

Näytteenotossa on sovellettu GTK:n laatimaa ohjetta sulfaattimaiden oikeaoppiseen käsittelyyn (Auri ym., 2018). Ohjeiden soveltamisen perustana ovat rakennusprojektin erityispiirteiden huomioiminen sekä geologinen samankaltaisuus tutkimuskohteiden välillä. Sulfaattimaanäytteet on otettu lähtökohtaisesti 0,5 m välein, mutta tästä on voitu poiketa maalajin vaihtuessa tai jos maalaji on selkeästi samaa aistinvaraisten havaintojen ja maanpinnasta suoraan mitatun pH-arvon perusteella. Vaihettumisvyöhykkeen yläpuolisista maakerroksista voi tapauskohtaisesti olla aiheellista ottaa näytteitä tiheämminkin. Vaihettumisvyöhyke, eli maakerros, jossa happamoitumista alkaa muodostumaan on tyypillisesti hyvin kapea. Usein vaihettumisvyöhykkeen alapuoliset maakerrokset ovat paksuja, jopa useiden metrien vahvuisia homogeenisia eli tasakoosteisia siltti- tai savikerrostumia, joiden pH-arvo pysyy liki muuttumattomana metrien matkan. Näissä kerrostumissa näytteenottotiheyttä voidaan tapauskohtaisesti harkita toteutettavan 1,0 m välein. Tutkimuksessa tehdyt pH-arvon mittaukset on toteutettu kuvassa (Kuva 4, s. 14) esitetyllä VWR PH 20 pH-mittarilla, joka soveltuu nesteiden ja maa-ainesten mittauksiin.

Kuva 4. Elektrodilla varustettu pH-mittari.



5 Maa-ainesten hallinta ja tutkimukset

Happamien sulfaattimaiden välitön havainnointi ja nopean testituloksen saaminen edistävät maa-ainesten hallintaa, jolloin maa-ainesten välivarastoimiselta voidaan välttyä. Happamien sulfaattimaiden välitöntä jatkokäyttöä rajoittaa niiden kyky syövyttää terästä ja betonia, joista rakennusten perustukset usein valmistetaan (Kettunen, 2018). Maa-ainesten varastointi voi muodostua hyvin nopeasti suureksi logistiseksi ongelmaksi, mikäli niille ei olla ennalta suunniteltu asianmukaista välivarastointi- tai loppusijoituspaikkaa. Välivarastointi voi myös aiheuttaa ympäristölle pilaantumisen riskin, mikäli tutkimustuloksia joudutaan odottamaan pitkän aikaa, eikä välivarastoinnissa olla otettu huomioon happamien sulfaattimaiden erityispiirteitä. Happamilla sulfaattimailla on kyky liuottaa maaperässä luontaisesti esiintyviä metalleja, joiden kulkeutuminen vesistöön aiheuttaa vesistöissä happamoitumista (Karppinen ym., n.d.).

Happamien sulfaattimaiden esiintymisalueella maan happamuus muuttuu eri maakerroksien välillä, johtuen osin maalajista ja osin maanpinnan alla vallitsevasta vedenpinnan korkeudesta. Mikäli maata on kaivettu niin, että eri kerroksien maa-ainekset ovat päässeet sekoittumaan keskenään, muodostuu haaste tutkia happamaksi epäillyn maa-aineksen laatu luotettavalla tavalla. (Pousette, 2010, ss. 72–74) Lajittelemattomasta kaivuusta johtuen eri maakerroksien eri happamoitumistilassa olevat maakerrokset sekoittuvat, muuntumatta kuitenkaan homogeeniseksi maa-ainekseksi. Savi- ja silttipitoiset maat ovat hyvin kiinteitä ja niiden rakeet ovat toisiinsa sitoutuneina, eikä ylemmissä maakerroksissa oleva hiekka tai muu karkeampi aines pääse siihen kunnolla sekoittumaan. (Ronkainen, 2012) Kaivuun yhteydessä syntyneestä eri maalajien sekoituksesta erottuvat eri kokoiset savi- ja silttikokkareet ovat kuitenkin usein teknisesti vaikeita erotella, eikä sen tekeminen ole kustannustehokasta tai ajankäytöllisesti järkevää. Heikosti sekoittuneista maa-aineksista koko kasaa edustavan näytteen ottaminen ja sen happamuuden analysointi onkin näistä syistä haasteellista.

6 Tutkimusmenetelmät

Tutkittaessa happamia ja potentiaalisesti happamia sulfaattimaita on otettava huomioon niiden erityispiirteet. Happamien sulfaattimaiden tutkimuksissa on hyödynnetty usein tavanomaisia pilaantuneiden maiden tutkimuksissa käytettäviä havainnointi- ja tutkimusmenetelmiä, joita ovat muun muassa aistinvarainen havainnointi ja maaperän metallipitoisuuksien mittaaminen XRF-analysaattorilla. Sulfaattimaiden havainnoinnin tueksi on kehitetty muutamia menetelmiä, joiden toimivuutta ja soveltuvuutta nopeaa reagointia edellyttäviin tilanteisiin testataan tässä tutkimuksissa. Tutkimuksessa on perehdytty happamoitumispotentiaalin selvittämiseen vetyperoksidihapetukseen perustuvalla menetelmällä, rikkipitoisuuden mittaamiseen XRF-analysaattorilla sekä erilaisten aistinvaraisten havainnointikeinojen hyödyntämiseen kenttätutkimuksien tukena. Tutkittujen maanäytteiden maalajiarvio sekä aistinvaraiset havainnot on kirjattu analyysituloksien tarkastelun tueksi. Edellä on kuvattu tarkemmin tutkimusmenetelmiä, joiden soveltuvuutta selvitettiin nopeaa reagointia edellyttäviin tilanteisiin. Havainnointimenetelmien laaduntarkkailua on pidetty yllä teettämällä tarvittavia analyysijä ulkopuolisen akkreditoitun laboratorion toimesta.

6.1 Aistinvarainen havainnointi

Lähtökohtaisesti olisi hyvä noudattaa esimerkiksi Suomen ympäristökeskuksen tuottaman oppaan mukaisia käytäntöjä, jotka on tuotettu erityisesti pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksien tueksi (Lepistö ym., 2014). Maanäytteistä kirjataan ylös geologisen GEO-luokituksen (Korhonen ym., 1974) mukaan maalaji, väri, haju, maastossa mitattu pH-arvo, sijainti ja näytteenottokorko pohjavedenpinnasta mahdollisuuksien mukaan. Kaivannon leikkauspinnasta otetaan valokuvia, josta erottuu selkeästi maalajien kerrostuneisuus ja kuvattavien maalajikerrostumien väri ja koostumus. Kuvasta (Kuva 5) havaittava värimuutos on tapahtunut potentiaalisesti happamassa sulfaattimaassa.

Kuva 5. Potentiaalisesti happaman sulfaattimaan hapettunut pintakerros.



Pelkkä pintapuolinen tarkastelu ei riitä, vaan kohdetta on tarkasteltava aina pintaa syvemältä. On tärkeää, että jokaisen sulfaattimaanäytteen pH-arvo mitataan pinnalta,

mikä ei ole vielä ehtinyt reagoida hapen kanssa. Esiin kaivetun oletetun sulfidimaan pintaa tulee aina kuoria, jotta maa-aineksen todellinen väri tulee esiin ja tutkittavana on hapettumatonta maa-ainesta. Musta sulfidipitoinen maa-aines muuttaa väriään radikaalisti hapettumisen myötä. Lisäksi hapettumattoman maan esiin kaivaminen parantaa dokumentoinnin laatua, jos valokuvasta pystytään erottamaan selkeät kerrostuneisuudet aitojen värien perusteella.

6.2 Suolahappo

Suolahappoa (HCl) eli kloorivetyhappoa saadaan liuottamalla vetykloridia veteen.

Suolahappo on erittäin hapanta (350 mg HCl/l => pH = 2), pistävänhajuista ja terveydelle haitallista, eikä sitä tulisi käyttää ilman asianmukaista suojaruustusta. Hapon joutumista silmiin ja käsiin tulee välttää erityistä huomiota noudattaen. (Työterveyslaitos, 2021)

Suolahapon käyttö happamien sulfaattimaiden tunnistuksessa perustuu siihen, että suolahappo voi tuoda esiin maaperän rikkipitoisuudesta kieliviä hajuja. Suolahappoa ruiskutetaan suoraan näytteen pinnalle, missä se reagoi mahdollisten sulfidien kanssa muodostaen voimakkaan hajuista rikkihappoa. Sen oikeaoppinen käyttö ei aiheuta ympäristölle vaaraa, sillä se haihtuu pintamaasta välittömästi. Testauksissa sovellettiin Liikenneviraston julkaisemaa ohjetta (Liikennevirasto, 2017), jossa maanäytteeseen lisättiin muutama tippa laimeaa suolahappoa. Tutkimustuloksissa (Taulukko 2, s. 22 ja Taulukko 4, s. 26) esitetyissä hajun määrittelyissä ei ole käytetty apuna suolahappoa, sillä suolahapon soveltuvuuden selvittämisen jatkamista tähän tutkimukseen päätyneiden näytteiden kohdalla ei pidetty mielekkäänä.

6.3 Inkubointi

Maa-aineksen happamoitumispotentialiaali voidaan tuoda esiin hapettamalla se pääasiassa kahdella eri tavalla, joita ovat inkubointi ja vetyperoksidin avulla tuotettu pikahapetus. Molemmat menetelmät perustuvat näytteen hapettumiseen, mutta käytännössä menetelmät eroavat tyystin toisistaan. Maanäytteen inkuboinnissa ei käytetä apuna lainkaan hapettimia, vaan näyte hapettuu hapellisissa olosuhteissa itsekseen. Tässä tutkimuksessa ei

kuitenkaan toteutettu maanäytteiden inkubointia, sillä tutkimus perustuu yksinomaan nopeiden havainnointimenetelmien kehittämiseen. (Auri ym., 2012, s. 8)

Inkubointi oli aiemmin suosittu ja myös varsin luotettavia tuloksia tuottava menetelmä tutkia maa-aineksen happamoitumispotentiaalia, mutta menetelmä on varsin hidas ja kallis. Tuloksien saamiseksi on odotettava 8-16 viikon ajan, minkä aikana näytteitä tulee sekoitella ja huolehtia näytteen riittävästä kosteudesta, jotta hapettumiselle suotuisat olosuhteet säilyvät. Tulosten vertailukelpoisuutta vaikeuttaa kuitenkin inkubointimenetelmien eroavaisuudet, sillä yhtä ainutta vakiintunutta käytäntöä toimenpiteen suorittamiseen ei ole. Inkubointi voidaan toteuttaa erilaisissa näyteastioissa, kerrospaksuuksissa, lämpötiloissa ja kosteuspitoisuuksissa, jotka kaikki vaikuttavat osaltaan saatuun lopputulokseen. (Mäki, 2016, s. 23)

6.4 Vetyperoksidihapetus

Vetyperoksidihapetuksella toteutettavan happamoitumispotentiaalin selvittämisessä on käytetty Food and Agriculture Organization of the United Nationsin (FAO) tuottaman oppaan mukaista ohjetta. Ohjeen mukaan näytteen pH-arvo mitataan ennen näytteen hapettamista. Tässä tutkimuksessa jokaisesta näytteestä on mitattu pH-arvo maastossa, että vetyperoksidikäsitteilyn jälkeen. Vetyperoksidikäsitteilyt toteutettiin kahden tunnin kuluessa näytteenotosta. Testin suorittamiseen tarvitaan 10 mg maanäytettä ja 50 ml 30 % vetyperoksidia (H_2O_2), joiden reagoinnin päättymisen jälkeen mitataan pH-arvo uudelleen (IUSS Working Group WRB, 2015, s. 80). Maanäytteet ja vetyperoksidi lisättiin hyvin lämpöä kestäviin 250 ml kokosiin lasipulloihin (Kuva 6, s. 19). Lasipulloja ei suljettu, sillä oli odotettavissa, että reaktion aikana voi muodostua kaasuja. Vetyperoksidilla toteutettua hapetusmenetelmää on testattu muun muassa Liikenneviraston vuonna 2015 julkaistussa Geotekniset tutkimukset ja mittaukset-ohjeessa (Liikennevirasto, 2015, s. 91).

Kuva 6. Maanäytteitä ennen vetyperoksidin lisäystä.



Hapetuksen luotettavuuteen liittyviä ongelmia on listattu vuonna 1986 tehdyssä laajassa tutkimuksessa, joista ensimmäisenä mainitaan maan luontainen puskurointikyky, jota pikaisesti toteutettu hapettamismenetelmä ei ota huomioon. Toinen ongelma on, että potentiaalisesti hapanta rikkidioksidia (SO_2) vapautuu kaasuna ilmaan hapetuksen yhteydessä ja hapetetun maanäytteen rikkipitoisuus pienenee. Kolmantena mainitaan, että näytteen sisältämän kokonaisrikkipitoisuuden ja potentiaalisen happamuuden suhteet voivat sekoittua hapettumisen aikana, sillä vety-, alumiini- ja rautayhdisteet sekä sulfaatti voivat kulkeutua näytteessä. Neljäntenä ongelmana mainitaan, ettei myöskään kaikki maanäytteen sisältämä pyriitti (FeS_2) eli rikkikiisu välttämättä hapetu täysin, ja tämä korostuu erityisesti orgaanista ainesta sisältävien maanäytteiden kohdalla. Mitä suurempi orgaanisen aineksen osuus on, sitä epäluotettavampia tuloksia saadaan hapetuksen avulla. (Konsten & Brinkman, 1986, ss. 108–113)

Kentällä toteutetun vetyperoksiditestauksen laadunvalvontaa tarkkailtiin teettämällä osalle näytteistä vetyperoksidihapetukseen perustuvia analyysejä akkreditoitun laboratorion toimesta laadun varmistamiseksi. Lisätutkimuksena on voitu selvittää maanäytteen kokonaisrikkipitoisuus. Palvelun tarjoajana toimi SGS Finland Oy.

6.5 XRF-analysaattori

Maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnissa on käytetty maan raskasainepitoisuuksia mittaavaa röntgenfluoresenssianalysaattoria eli XRF-analysaattoria, jolla voidaan analysoida kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia näytteitä. Näyte muodostuu usein useammasta osanäytteestä, sillä osanäytteistä koostuva kokoomanäyte edustaa parhaiten tutkittavien maa-ainesten laadun keskiarvoa. Tässä tutkimuksessa näytteiden rikkipitoisuudet mitattiin XRF-analysaattorilla saman päivän aikana.

Analysoitava näyte tulee homogenisoida huolellisesti, sillä analysointi tehdään näytteen pinnalta ja saatu tulos edustaa koko näytettä. Maa-ainekset voivat sisältää suurempia raskasmetallipitoisia partikkeleita, mikä tulee ottaa huomioon jos laite havaitsee mittauskerroilla selvästi toisista poikkeavia lukemia. Tällöin voi olla aiheellista toistaa mittaukset eri kohdista näytettä. Myös näytteen korkealla vesipitoisuudella voi olla vaikutuksia tuloksiin. Näytteen sisältämä vesi heikentää mittaussingaalin voimakkuutta ja vesipitoisuuden kasvaessa myös mittausepävarmuus kasvaa. Korkean vesipitoisuuden omaava näyte on lisäksi heikosti vertailukelpoinen laboratoriotuloksien kanssa, sillä laboratoriotulokset ilmoitetaan kuivapainosta mitattuina pitoisuuksina. (Hatakka ym., 2015)

Mittaukset suoritettiin Olympus Delta XRF-analysaattorilla (Kuva 7, s. 21), jossa oli päällä niin sanotut PIMA-asetukset, jotka soveltuvat erityisesti maaperän raskasmetallien pitoisuuksien havaitsemiseen. Analysaattori mittaa sille asetetun mittaisen keston näytteen metallipitoisuuksia. Testauksissa käytettiin kahden 30 sekunnin pituisen mittausjakson keskiarvoa. Kahden 60 sekunnin pituisen mittausjakson ei havaittu parantavan analysoinnin mittaustarkkuutta epämetalli rikin kohdalla.

Kuva 7. Olympus Delta XRF-analysaattori.



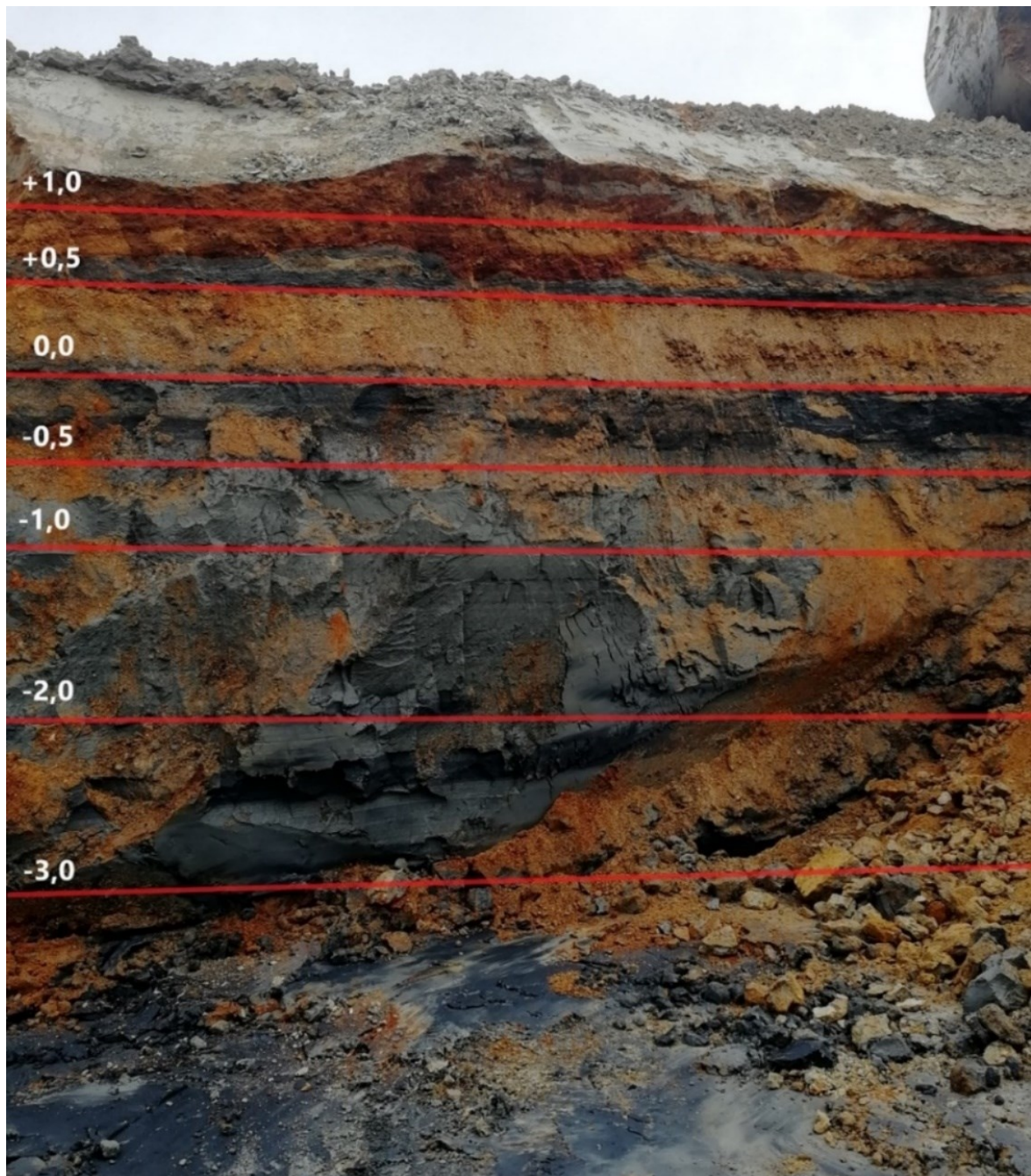
7 Tulokset ja tulosten tarkastelu

Tutkimuksia toteutettiin Perämeren rannikkoalueella, jossa happamien sulfaattimaiden esiintyvyys on ennakkotietojen mukaan suurta. Tutkimusalueilla on ihmisasutusta ja julkista infrastruktuuria, mistä johtuen pohjaveden pintaa on alennettu. Molemmissa tutkimuksen näytteenottopisteissä luonnontilaiset hapettomat olosuhteet ovat häiriintyneet pohjaveden pinnan alentamisen myötä, mutta niiden maakerrokset ovat edelleen visuaalisesti hyvin havaittavissa. Tarkasteltavissa tutkimuskohteissa näytteenottosyvyyden on määrittänyt rakentamisen edellyttämä kaivuusyvyys. Näytteenotto on aloitettu määrittämällä meren- tai pohjaveden pinnankorkeus, jossa vaihtumisvyöhyke pääasiallisesti esiintyy. Näytteenottoa on jatkettu tästä korkeudesta alas- ja ylöspäin alkaen 0,5 m tiheydellä harventuen 1,0 m näytteenottotiheyteen. Näytteenottotiheyden on vaikuttanut aistinvarainen arvio maakerroksen laadusta. Näytteet ovat kokoomanäytteitä, jotka on muodostettu useista samasta maakerroksesta otetuista osanäytteistä. Näytteet otettiin suoraan kaasutiiviisiin Rilsan pusseihin, jotka suljettiin tiukasti nippusiteillä.

7.1 Näytteenottopiste X-21

Näytteenottopiste X-21 sijaitsee meren läheisyydessä, noin 50 metrin etäisyydellä rannasta. Kaivannosta otettu poikkileikkauskuva (Kuva 8) havainnollistaa, kuinka pohjaveden pinnankorkeuden muutokset ovat vaikuttaneet maaperään. Pohjaveden pinnankorkeuden laskiessa maa-ainekset ovat muuttaneet väriään reagoituaan hapen kanssa.

Kuva 8. Maakerrostumien poikkileikkaus ja näytteenottokorkeudet kohteessa X-21.



Maakerroksien väri oli pintamaakerroksesta alkaen punertavan ruskeaa muuttuen yhä tummemman harmaaksi mentäessä syvemmälle merenpinnan alapuolelle. Korkeuden -2,0 mp alapuolella maa muuttui mustaksi, massiiviseksi saveksi. Savi oli herkästi tahraavaa. Maalaji pysyi muuttumattomana korkeudesta -2,0 mp alkaen lopulliseen kaivuusyvytyteen (-6,0 mp) asti, jossa maa oli edelleen potentiaalisesti happamaksi sulfaattimaaksi luokiteltavaa.

Taulukoissa (Taulukko 2) ja (Taulukko 4, s. 26) on esitetty näytteenottopisteiden X-21 ja X-23 maanäytteistä kirjatut aistinvaraiset havainnot, maalaji, syvyys merenpinnasta mitattuna sekä pH-arvo ennen ja jälkeen vetyperoksidikäsittelyn. Määrittelyssä on käytetty happamille sulfaattimaille asetettuja pH-arvo kriteerejä, jotka ovat <4,0 ennen ja <2,50 jälkeen vetyperoksidikäsittelyn. Ollakseen hapan sulfaattimaa, näytteen pH-arvon on alitettava vähintään toinen raja-arvoista. (Visuri, 2020)

Taulukko 2. Näytteenottopisteen X-21 aistinvaraiset havainnot ja tutkimustulokset.

Näyttenumero	pH	NAG-pH	Haju	Väri	Syvyys	Maalaji	Sulfaattimaa
X-21/1	7,36	3,24	Ei hajua	Ruskea	+1,0mp	Hiekka	Ei
X-21/2	6,53	3,37	Ei hajua	Ruskea	+0,5mp	Hiekka	Ei
X-21/3	6,17	3,33	Ei hajua	Tum.ruskea	0,0mp	Hiekka	Ei
X-21/4	6,54	2,02	Ei hajua	Harmaa	-0,5mp	Siltti	Kyllä
X-21/5	6,82	2,09	Ei hajua	Tum. Harmaa	-1,0mp	Savi	Kyllä
X-21/6	7,36	2,16	Ei hajua	Musta	-2,0mp	Savi	Kyllä
X-21/7	7,33	2,16	Ei hajua	Musta	-3,0mp	Savi	Kyllä
	pH=pH maastossa mitattuna						
	NAG-pH=pH vetyperoksidikäsittelyn jälkeen						
	Syvyys=Merenpinnasta mitattuna						

Vedenpinnan yläpuolisissa maakerroksissa X-21/1-3 sulfaattien voidaan olettaa hapettuneen ja metallien huuhtoutuneen ajan myötä. Maakerroksissa piilee edelleen potentiaalia happamoitumiselle hapettamisesta verrattain alas laskeneesta pH-arvosta päätellen. Todennäköisesti happamoitumispotentiaali ei kuitenkaan luonnonolosuhteissa tule konkretisoitumaan, sillä maastossa mitattu pH-arvo on pintamaakerrosta kohden nousussa, ollen jo lievästi emäksisen puolella näytteessä X-21/1. Päällimmäinen maakerros on ollut alueen maankohoamisvauhdin, joka on 7-8 mm vuodessa, mukaan laskettuna merenpinnan

alapuolella viimeksi 125-142 vuotta sitten. Näytteissä ei havaittu sulfaattimaihini viittaavaa mädän kananmunan hajua.

Taulukossa (Taulukko 3) on esitetty näytteistä analysoidut rikki- ja sulfapitoisuudet. XRF-analysaattori havaitsi rikkipitoisuuksia ainoastaan näytteessä X-21/4, joka kaikkien alle merenpinnankorkeudelta otettujen näytteiden tavoin määriteltiin potentiaalisesti happamaksi maakerrokseksi. XRF-analysaattori havaitsee suurimman nettohapontuottokyvyn omaavan näytteen rikkipitoisuuden, mutta muista näytteistä se ei kyennyt analysoimaan rikkipitoisuutta. Näytteelle X-21/4 saadun tuloksen 1,04 % (10400 ppm) virhemarginaali on huomattavan suuri +/- 0,23 %, mikä vastaa noin neljännestä havaitusta rikkimäärästä.

Taulukko 3. Näytteenottopisteen X-21 XRF-mittausten tulokset.

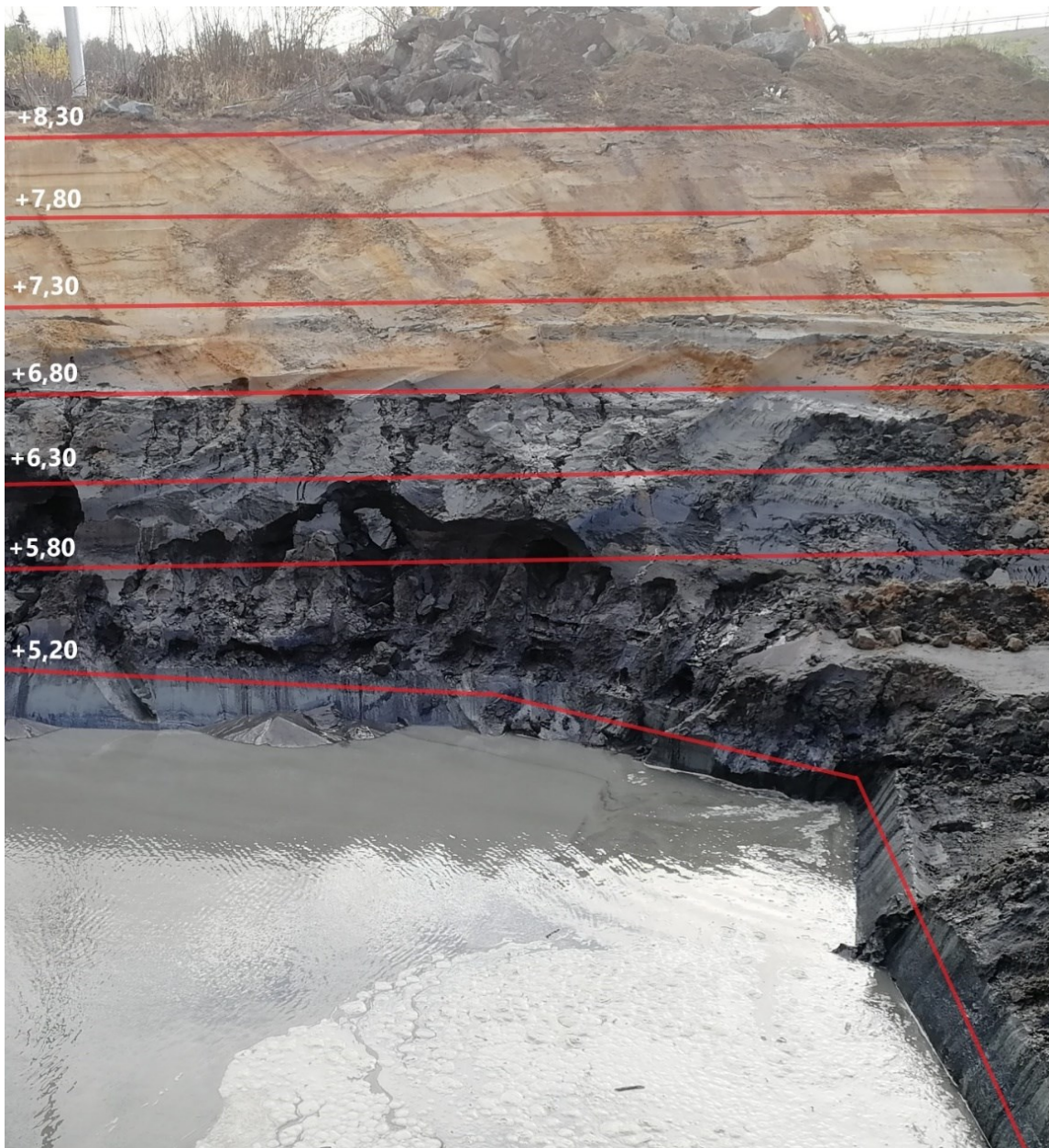
Näyttenumero	pH	NAG-pH	XRF S (ppm)	Sulfaattimaa
X-21/1	7,36	3,24	Ei havaittu	Ei
X-21/2	6,53	3,37	Ei havaittu	Ei
X-21/3	6,17	3,33	Ei havaittu	Ei
X-21/4	6,54	2,02	1,04% +/-0,23	Kyllä
X-21/5	6,82	2,09	Ei havaittu	Kyllä
X-21/6	7,36	2,16	Ei havaittu	Kyllä
X-21/7	7,33	2,16	Ei havaittu	Kyllä

Maakerroksissa ei ollut todellisia happamia sulfaattimaita. Potentiaalisia happamia sulfaattimaita esiintyi kaikissa merenpinnan alapuolisissa maakerroksissa. Näytteille X-21/1-7 ei tehty kokonaisrikkipitoisuusanalyysiä.

7.2 Näytteenottopiste X-23

Näytteenottopiste X-23 sijaitsee noin kilometrin etäisyydellä merenrannasta. Kaivannosta otetusta poikkileikkauksista (Kuva 9, s. 25) voidaan jo silmämääräisesti arvioida alueella vallinneen pohjaveden pinnankorkeus. Pohjaveden pinnankorkeuden laskiessa maa-ainesten väri on muuttunut ja veden alla sijainneet hienojakeiset maa-ainekset ovat säilyneet luontaisessa olomuodossaan.

Kuva 9. Maakerrostumien poikkileikkaus ja näytteenottokorkeudet kohteessa X-23.



Kaivantovesien pinnankorkeus ei kuvasta alueen luonnonmukaista pohjaveden pinnankorkeutta vaan todellinen pohjaveden pinnankorkeus oli 6,80 metriä merenpinnan yläpuolella. Alimmassa näytekerroksessa maa-aines oli rakenteeltaan massiivista, pääasiallisesti mustaa savea, jossa esiintyi ohuita harmaita savikerrostumia. Maakerrokset oli helposti eroteltavissa toisistaan niiden selvästi toisistaan poikkeavasta ulkonäöstä johtuen. Vaikkakin maalaji muuttui tyystin saveksi +6,30 mp tasolla jatkuen kaivannon pohjalle

saakka, oli saven rakenteessa huomattava ero +5,20 mp ja sitä ylempien savikerrostumien välillä.

Taulukko 4. Näytteenottopisteen X-23 aistinvaraiset havainnot ja tutkimustulokset.

Näyttenumero	pH	NAG-pH	Haju	Väri	Syvyys	Maalaji	Luokka
X-23/1	6,54	3,13	Ei hajua	Ruskea	+8,30mp	Hiekka	Ei
X-23/2	6,74	3,65	Ei hajua	Ruskea	+7,80mp	Hiekka	Ei
X-23/3	6,37	3,48	Ei hajua	Ruskea	+7,30mp	Hiekka	Ei
X-23/4	6,10	2,08	Ei hajua	Tum. harmaa	+6,80mp	Siltti	Kyllä
X-23/5	6,34	1,92	Ei hajua	Musta	+6,30mp	Savi	Kyllä
X-23/6	6,65	2,24	Ei hajua	Musta*	+5,80mp	Savi	Kyllä
X-23/7	6,71	3,00	Ei hajua	Musta*	+5,20mp	Savi	Ei
pH=pH maastossa mitattuna				*Mustan saven seassa ohuita harmaita savikerroksia			
NAG-pH=pH vetyperoksidikäsittelyn jälkeen							
Syvyys=Merenpinnasta mitattuna							

Näytteenottopisteen X-23 maakerroksissa ei esiintynyt todellisia happamia sulfaattimaita. Sen sijaan potentiaalisesti happamia maakerrostumia esiintyi näytteiden X-23/4-6 edustamissa syvyyksissä. Kentällä toteutetuissa tutkimuksissa näytteen X-23/5 NAG-pH arvo alitti selvästi tutkimuksissa käytetyn 2,50 raja-arvon. Kaikille näytteille teetettiin laboratoriossa kenttätutkimuksia vastaavat vetyperoksidihapetukseen perustuvat analyysit. Tutkimuksessa ja laboratoriossa saatuja tuloksia on vertailtu taulukossa (Taulukko 5). Näytteissä ei havaittu sulfaattimaihien viittaavaa hajua.

Taulukko 5. Näytteenottopisteen X-23 laboriotuloksien vertailu.

Näyttenumero	pH	NAG-pH	NAG-pH (laboratorio)	Poikkeama
X-23/1	6,54	3,13	4,0	0,87
X-23/2	6,74	3,65	4,9	1,25
X-23/3	6,37	3,48	5,6	2,12
X-23/4	6,10	2,08	2,7	0,62
X-23/5	6,34	1,92	2,4	0,48
X-23/6	6,65	2,24	3,0	0,76
X-23/7	6,71	3,00	3,4	0,40
pH=pH maastossa mitattuna				
NAG-pH=pH vetyperoksidikäsittelyn jälkeen				
NAG-pH=pH laboratoriossa toteutetun vetyperoksidikäsittelyn jälkeen				

Näytteenoton ja laboratoriotutkimuksien valmistumisen välillä on kulunut aikaa noin kaksi vuorokautta. Kontaminaatioiden välttämiseksi näytteenoton aikana ja näytteiden asianmukaisesta käsittelystä huolimatta näytteenoton jälkeen näytteissä on voinut käynnistyä happamoitumista aiheuttavia reaktioita, jotka osaltaan vaikuttavat poikkeamaan kentällä ja laboratoriossa saaduissa tuloksissa. Testeissä käytettävissä menetelmissä voi myös olla joitain eroavaisuuksia. Erot olivat suurimmat vähiten rikkiä sisältävissä näytteissä X-23/1-3, jotka eivät kummankaan suorittamien vetyperoksiditestauksien perusteella olleet luokiteltavissa happamiksi sulfaattimaiksi. Huomioitavaa on myös se, että kyseiset näytteet on otettu oletetun pohjavedenpinnan yläpuolelta ja ne ovat karkeampirakeisempaa maalajia kuin alemmat maakerrokset.

XRF-analysaattori havaitsi kolmen eri näytteen rikkipitoisuuden, joista yksi edustaa hiekaista pintamaakerrosta ja kaksi muuta syvemmillä esiintyvää savikerrosta eri syvyyksiltä. Kuten tulokset osoittavat (Taulukko 6), XRF-analysaattori on kyennyt havainnoimaan näytteen X-23/1 verrattain matalan rikkipitoisuuden, mutta ei vastaavasti suuremman kokonaisrikkipitoisuuden omaavien näytteiden X-23/4 ja X-23/7 rikkipitoisuuksia.

Taulukko 6. Näytteenottopisteen X-23 XRF-mittausten tulokset.

Näyttenumero	pH	NAG-pH	XRF S (ppm)	Kokonais S (mg/kg)	Sulfaattimaa
X-23/1	6,54	3,13	2044	100	Ei
X-23/2	6,74	3,65	Ei havaittu	<100	Ei
X-23/3	6,37	3,48	Ei havaittu	<100	Ei
X-23/4	6,10	2,08	Ei havaittu	360	Kyllä
X-23/5	6,34	1,92	6094	610	Kyllä
X-23/6	6,65	2,24	4146	3300	Kyllä
X-23/7	6,71	3,00	Ei havaittu	2500	Ei

Näytteiden kokonaisrikkipitoisuuden määrittäminen tehtiin SGS:n akkreditoitun laboratorion toimesta, jonka tarkemmat tutkimustulokset lisäanalyysineen löytyvät liitteistä 1/1 ja 2/1. Laboratoriossa tehdyssä kokonaisrikkipitoisuuden määrittämisessä selvästi korkeimmat rikkipitoisuudet havaittiin olevan näytteissä X-23/6 ja X-23/7, joista viimeisimmässä XRF-analysaattori ei havainnut rikkipitoisuuksia. Vastaavanlainen epäkohta tapahtui näytteen X-23/5 kohdalla, jossa XRF-analysaattori havaitsi selvästi korkeimmat rikkipitoisuudet (6094).

Laboratoriossa tehdyn tutkimuksen mukaan rikkipitoisuus oli kuitenkin vain kymmenesosa (610) XRF-analysaattorin mittaamasta tuloksesta.

8 Menetelmien vertailu

Tutkimuksen perusteella todellisten happamien sulfaattimaiden tunnistaminen silmämääräisesti voi olla erittäin haasteellista. Tunnistamista voivat vaikeuttaa alueelle aiemmin tehdyt massanvaihdot, maiden pilaantuminen tai pohjavedenkorkeuden muutokset. Happamien sulfaattimaiden monimuotoisuus muodostaa haastavat lähtökohdat visuaalisen havainnoinnin luotettavuudelle, eikä pelkän ulkonäön perusteella maaperän laatua voida arvioida luotettavalla tavalla. Visuaalinen havainnointi voi silti antaa selkeitä viitteitä siitä, onko jatkotutkimuksille tarvetta. Happamien sulfaattimaiden havainnoinnissa tulisi aina käyttää apuna pH-mittaria visuaalisen havainnoinnin tukena. Maasta mitattu pH-arvo kertoo välittömästi sen tämänhetkisen happamuustilan, mutta se ei kuitenkaan kerro vielä mitään sen potentiaalista happamoitua.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin voimakkaasti hapettavan vetyperoksidin soveltuvuutta hapontuottopotentialin tutkimiseen. Tämän tutkimuksen tuloksien valossa maa-aines tulkitaan todennäköisemmin potentiaalisesti happamaksi sulfaattimaaksi kuin siitä luonnontilassa olisi sellaista muodostunut. Testeissä käytettävän vetyperoksidin pH-arvo voi suosituksen mukaan olla mitä vain 4,5-6 välillä, mikä voi olla merkittävin syy omien tutkimuksien ja laboratoriotuloksien kesken havaittuihin poikkeamiin. Poikkeamat vetyperoksidin pH-arvossa johtuvat joidenkin valmistajien lisäämästä fosforihaposta, jolla on vetyperoksidin säilyvyyttä parantava vaikutus. (Suikkanen ym. 2018, s. 18)

Vetyperoksidihapetuksen antama tulos ei siten yksinään ole täysin aukoton menetelmä todentamaan maan hapontuottopotentialia. Vetyperoksidihapetus antaa kuitenkin vahvasti suuntaa siitä, onko maa-aineksissa potentiaalia muodostua todelliseksi happamaksi sulfaattimaaksi.

XRF-analysaattorilla toteutettavalla rikkipitoisuuden mittauksella ei tässä tutkimuksessa havaittu olevan yhteneväisyyksiä pH-arvon, NAG-pH-arvon tai kokonaisrikkipitoisuuden kanssa, eikä sen antama tulos anna tutkimuksen perusteella mitään viitteitä maan

todellisesta rikkipitoisuudesta. Maanäytteiden XRF-analysaattorilla mitattavia rikkipitoisuuksia on seurattu myös muiden maaperätutkimuksien yhteydessä, eivätkä tutkimuksissa saadut tulokset ole poikenneet tässä tutkimuksessa saaduista tuloksista. Useimmissa tapauksissa XRF-analysaattori ei kyennyt havaitsemaan näytteessä lainkaan rikkiä, vaikka laboratoriotuloksien perusteella näyte sisältikin sitä runsaasti. Niissä tapauksissa joissa rikkipitoisuuksia havaittiin, oli laitteen antama mittausepävarmuus huomattava tai saattoi olla ristiriidassa laboratoriossa mitatun rikkipitoisuuden kanssa. Tähän on syynä oletettavasti laitteen asetukset, joita ei ollut muutettu tehtävään soveltuville taajuuksille tai säteiden heikko epämetallien havainnointikyky. Laitteen soveltuvuus raskasmetallien pitoisuuksien mittaamiseen on todettu olevan erinomainen ja tarkkuuden riittävä osoittamaan valtioneuvoston asetuksen 214/2007 (PIMA-asetus) mukaiset maaperän raskasmetallipitoisuudet ja mahdollisen tarpeen jatkotutkimuksille. Kaikkien edellä mainittujen havaintojen perusteella XRF-analysaattori soveltuu huonosti rikin pitoisuuksien mittaamiseen raskasmetallien tunnistamiseen tarkoitetuilla asetuksilla.

Suolahappoa on suositeltavaa käyttää ainoastaan ulkona reaktiossa syntyvien rikkivetykaasujen vuoksi, jotka ovat terveydelle haitallisia ja suurina määrinä hengitettynä hengenvaarallisia. Rikkivetykaasujen mädän kananmunan haju syntyy vetyionien ja sulfidien yhdistyessä. Suolahapon voimakas ominaishaju peittää sulfidipitoisen maan muodostaman mädäntyneen kananmunan hajun tehokkaasti ja hajujen erottaminen toisistaan on haastavaa. Suolahapon hyödyntämistä havainnoinnin apuvälineenä haittaa lisäksi ulkoilmassa tapahtuva hajun hälveneminen. Haju on hyvin paikallinen ja häviää nopeasti. Reaktio kestää vain sekunteja, eikä reaktiosta syntyneiden kaasujen hengittäminen ole suotavaa ja se voi tuntua nenässä tai nielussa erittäin epämiellyttävältä. Suolahapon ruiskuttaminen suoraan maanäytteeseen siten ei anna kovinkaan varmoja signaaleja siitä, onko kyseessä potentiaalisesti hapen sulfaattimaa.

9 Kestävän kehityksen näkökulma

Maarakentamisessa taloudellisten hyötyjen tavoittelu johtaa huomaamatta myös päästöjen vähentämiseen. Kuljetusmatkojen minimointi ja vajaille kuormilla ajon välttäminen ovat kenties selkeimpiä säästökohteita, joihin urakoitsijan tulisi pyrkiä. Kuljetusmatkoista

muodostuu osa rakennusprojektin kokonaiskuluista ja päästöistä, joten oikeanlaisella kuljetuksien ja maa-ainesten hallinnan suunnittelulla voidaan toimia taloudellisesti, että ekologisesti kestäväällä tavalla. Lähtökohtaisesti kaivettuja maa-aineksia tulisi pyrkiä hyödyntämään mahdollisuuksien mukaan paikan päällä. Ympäristöministeriön tekemän oppaan (Ympäristöministeriö, 2014, s. 16) mukaan ”maa-ainesten hyödyntämisellä tarkoitetaan suunnitelmallista toimintaa, jossa kaivetuilla maa-aineksilla – joko niiden syntypaikalla tai muualla – korvataan muita materiaaleja, joita olisi muutoin käytettävä kyseiseen tarkoitukseen.” Mikäli kaivetaan sulfaattimaiden esiintymisalueella tai muuten herää epäily sulfaattimaiden olemassaolosta, tulisi tällöin selvittää maa-ainesten laatu, sillä sulfaattipitoisudet maa-ainekset eivät välttämättä kelpaa paikan päällä hyödynnettäviksi. Maa-ainestutkimuksilla voidaan vaikuttaa siihen, millä tavoin kaivetut maa-ainekset tullaan lajittelemaan ja kuinka niiden jatkokäyttöä voidaan toteuttaa. Tutkimusten myötä voidaan välttää tarpeetonta maa-ainesten kaivamista, siirtelyä ja varastointia, joista kaikista muodostuu ylimääräisiä kuluja sekä haitallisia ilmasto- ja ympäristövaikutuksia.

10 Johtopäätökset

Optimaalisinta olisi, ettei maankäsittelyä edellyttävää rakennusprojektia aloitettaisi ennen kuin maa-ainesten todellinen laatu on selvitetty, mutta tämä ei aina ole mahdollista puutteellisista lähtötiedoista johtuen. Maarakennustöissä maa-ainesten hallinnalla on suuri merkitys ja lähtökohtaisesti pyritään hyödyntämään alueen omia resursseja, jotta maa-ainesten kuljettaminen voitaisiin minimoida. Tällöin on tärkeää tietää, minkälaista maata kaivetaan, ja mitä vaikutuksia sillä voi olla rakennusprojektille. Hyvistäkin lähtötiedoista huolimatta voi kuitenkin tulla vastaan tilanteita, jolloin kaivettaessa esiin paljastuu ennalta odottamattomasti sellaisia maa-aineksia, joiden hyödyntäminen rakennusteknisistä tai ympäristönsuojelullisista syistä ei paikan päällä ole enää mahdollista.

Ennen kaivuutöiden aloittamista tulisi selvittää alueen potentiaali sulfaattimaiden esiintymiselle Geologian tutkimuskeskuksen tuottamasta karttapalvelusta, josta voi löytää hyvinkin yksityiskohtaista tietoa alueen sulfaattimaaesiintymistä kairauksien ja maankorkomallien pohjalta tuotetusta aineistosta. Mahdollisimman kattavien lähtötietojen hankinta auttaa maa-ainesten hallinnassa ja kaivu- ja rakennussuunnitelmien

toteuttamisessa. Ikäviltä yllätyksiltä voidaan näin välttyä ja riskikohteet tunnistamalla kyetään ennakoimaan rakennus- ja kaivuuteknisesti haastavat sulfaattimaesiintymät. Aina lähtötietoja ei ole lainkaan saatavilla, vaikka kansallinen sulfaattimaiden esiintyvyyssalueita kuvaava aineisto onkin jo varsin kattava. Tällöin ennakoivat maaperätutkimukset nostavat merkitystään ja voivat olla projektin onnistumisen kannalta erittäin merkittävässä asemassa. Alueelle olisi suositeltavaa tehdä maaperätutkimuksia esimerkiksi kairaamalla tai tekemällä koekuoppia jo ennen varsinaisen kaivuuprojektin aloittamista. Mikäli näin ei ole toimittu, voidaan selkeästi eri maalajia edustavat maakerrokset kaivaa omiin kasoihinsa ja ottaa niistä näytteet pikimmiten. Epäselvissä tapauksissa, joissa maaperän luonnollinen tila on selvästi häiriintynyt, voidaan tunnistamista lähestyä toteamalla ensin potentiaalisesti happaman sulfaattimaakerroksen olemassaolo häiriintymättömästä maakerroksesta. Koska ennakointi ei aina onnistu tai siihen ei syystä tai toisesta pyritä, tilanteet edellyttävät nopeaa reagointia. Perusteet maa-ainesten hallintaan liittyville toimenpiteille tulisi hankkia tutkimuksissa saatuihin tietoihin pohjautuen.

Tutkimuksen keskiössä olleiden havainnointimenetelmien käyttö edellyttää käyttäjältään perehtyneisyyttä happamien sulfaattimaiden erityispiirteisiin sekä kykyä selvittää myös potentiaalisesti happamien, eli happamoitumattomien maa-ainesten hapontuottopotentiaali. Aihealueesta on laaja joukko niin kotimaisia kuin kansainvälisiäkin julkaisuja, mutta haasteena onkin löytää omaa tutkimuskohdetta vastaavaa aineistoa. Kansainväliset julkaisut eivät tuo välttämättä merkittävää lisäarvoa asiaan perehtyvälle, sillä Suomen ympäristöolosuhteissa tehdyt tutkimukset voivat poiketa monin tavoin eri puolella maapalloa tehdyistä tutkimuksista. Tutkitun tiedon avoimuus edesauttaa jatkotutkimuksien toteuttamisessa ja lisää kaikkien asiasta kiinnostuneiden tietopääomaa. Hyvällä suunnittelulla, ennakoivilla maaperätutkimuksilla ja valistuneilla havainnointimenetelmillä kykenemme minimoimaan happamista sulfaattimaista aiheutuvat ongelmat ympäristölle.

Lähteet

Andriessse, W., & van Mensvoort, M.E.F. (2006). *Acid sulphate soils: distribution and extent*. Encyclopedia of Soil Science.

Auri, J., Boman, A., Hadzic, M. & Nystrand, M. (2018). *Opas happamien sulfaattimaiden kartoitukseen turvetuotantoalueilla*.

Auri, J., Edén, P., Martinkauppi, A. & Rankonen, E. (2012). *Työohje happamien sulfaattimaiden kartoitukseen*. Geologian tutkimuskeskus.

Boman, A. (2021). *Happamat sulfaattimaat ja niiden luokittelu*. Suomen ympäristökeskus. <https://www.syke.fi/hankkeet/tunnistus>

Boman, A., Åström, M. & Fröjdö, S. (2008). Sulfur dynamics in boreal acid sulfate soils rich in metastable iron sulfide.

Borg, S. (2014). *Kaivoksen suotovesien käsittely sulfaatinpelkistäjäorganismeilla*. [diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto]. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22395/Borg.pdf?sequence=3>

Geologian tutkimuskeskus. (2020). *Happamien sulfaattimaiden kartoitukset rannikkoseudulla kesällä 2020*. <https://www.gtk.fi/happamien-sulfaattimaiden-kartoitukset-rannikkoseudulla-kesalla-2020/>

Geologian tutkimuskeskus. (2009). *Happamien sulfaattimaiden haitat hallintaan*. Geofoorumi 2/2009. <https://www.yumpu.com/fi/document/read/6703452/happamien-sulfaattimaiden-haitat-hallintaan-geologian->

IUSS Working Group WRB (2015). World reference base for soil resources 2014. FAO. <https://www.fao.org/3/i3794en/i3794en.pdf>

Hadzic, M. (2018). *Happamat sulfaattimaat ja niiden tunnistaminen*. Suomen ympäristökeskus.

Hakala, A. (2018). *Maankohoaminen ja vesistöjen muutokset*. Suomen Kansallisen Geologian Komitea. <https://www.geologia.fi/2018/06/03/maankohoaminen-ja-vesistöjen-muutokset/>

Hakala, A. (2018). *Maankohoaminen vuodessa millimetreinä* [kuva 2]. Maankohoaminen ja vesistöjen muutokset. Suomen Kansallisen Geologian Komitea. <https://www.geologia.fi/2018/06/03/maankohoaminen-ja-vesistöjen-muutokset/>

Hatakka, T., Nuottimäki, K., Sarala, P., Taivalkoski, A. & Tarviainen, T. (2015). *Kenttä-XRF-analysoittorin soveltuvuus geokemiallisiin taustapitoisuustutkimuksiin*. Geologian tutkimuskeskus. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/97_2015.pdf

Hutka, R., Laitinen, T., Holmberg, M., Maunula, M. & Schultz, T. (1996). *Happamien sulfaattimaiden ionivirtausmalli (HAPSU)*. Suomen ympäristökeskus. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/182247>

Kankaanpää, H. & Kotilainen, A. (2008). *Itämeren maa-aines kerrostumat* [taulukko 1]. Itämeri kaikuu historiansa kuviksi.

Karppinen, A., Riihimäki, J., Nokela, T. & Ihme, R. (n.d.). *Sulfidimaiden hapettumisen estämis- ja happamien valumavesien neutralointimenetelmiä maankäyttömuodoittain – Maankäytön vaikutus valumaveden laatuun*. Suomen ympäristökeskus.

Konsten, C.J.M. & Brinkman, R. (1986). *A field laboratory method to determine total potential and actual acidity in acid sulphate soils*.

Kettunen, T. (2018). *Betonin kemikaalikestävyys ja suojaaminen kemikaaleilta teollisuusrakentamisessa*. [diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto].

Korhonen, K.-H., Gardemeister, R. & Tammirinne, M. (1974). *Geotekninen maaluokitus*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Kotilainen, A. & Kohonen, T. (2005). *Ympäristön tila Lounais-Suomessa 4. Miten voit, Selkämeri?* Lounais-Suomen Ympäristökeskus. <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/134924/YT4%20Miten%20voit%20Selk%c3%a4meri.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Lehtinen, K.-J. & Klingstedt, G. (1983). *Aquatic Toxicology 3. X-ray microanalysis in the scanning electron microscope on fish gills affected by acidic heavy metal containing industrial effluents*.

Lepistö, J., Westerholm, H., Schultz, E., Uljas, J. & Björklöf K. (2014). *Hyvät käytännöt pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksissa*. Suomen ympäristökeskus. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/42681>

Liikennevirasto. (2015). *Geotekniset tutkimukset ja mittaukset*. Liite 7. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2015-10_geotekniset_tutkimukset_web.pdf

Liikennevirasto. (2017). *Eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet 21.4.2017*. Liite 5/4 (8). https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf

Maa- ja metsätalousministeriö. (2011). *Happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivat vuoteen 2020*. https://mmm.fi/documents/1410837/1721026/mmmjulkaisu2011_2.pdf/596d9bbe-2889-4c8b-9806-d5a316cdd96b

Maanmittauslaitos. (1998). *Litorinameren rannikko nykyiseen rantaviivaan suhteutettuna* [kuva 1]. Itämeren vaiheet: Litorinameri.

Mäki, A. (2016). *Sedimentin inkubaatiomenetelmien vertailu*. Geologian tutkimuskeskus. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201602162287>

Nieminen, T.M., Hökkä, H., Ihalainen, A. & Finér, L. (2016). *Metsänhoito happamilla sulfaattimailla*. Luonnonvarakeskus.

Pietilä, R., Eloranta, T., Räisänen, M., Tornivaara, A., Törmänen, T. & Väisänen, U. (2014). *Rikkiyhdisteiden vaikutusten arviointi – Sulka-hankkeen loppuraportti*. Geologian tutkimuskeskus. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/10_2015.pdf

Pousette, K. (2010). *Miljöteknisk bedömning och hantering av sulfidjordsmassor*. Luleå Tekniska Universitet.

Poutanen, M. (n.d.). *Maannousu*.

Maanmittauslaitos. <https://www.maanmittauslaitos.fi/tutkimus/teematietoa/maannousu>

Ronkainen, N. (2012). *Suomen maalajien ominaisuuksia*. Suomen ympäristökeskus.

Suikkanen, T., Lindroos, N., Autiola, M., Napari, M., Taipale, T., Laine, J., Forsman, J., Auri, J. & Boman, A. (2018). *Esiselvitys happamien sulfaattimaiden kartoitusmenetelmistä ja suosituksia toimenpiteiksi infrahankkeissa pääkaupunkiseudulla*. Ramboll Oy.

Suomela, R., Edén, P., Huhmarniemi, A., Saarinen, T., Tertsunen, J., Auri, J., Marttila, H., Yli-Halla, M., Boman, A., Joki-Tokola, E., Luoma, S. & Rankonen, E. (2014). *MTT Raportti 132. Happamat sulfaattimaat ja niistä aiheutuvan vesistökuormituksen hillitseminen Siika- ja Pyhäjoen valuma-alueella*. MTT.

<https://iukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/482160/mttraportti132.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Suonperä, E. (2019). *Hartaanselän alueen sulfidimaaselvitys*. Ramboll Oy.

https://www.oukapalvelut.fi/tekninen/Suunnitelmat/Projektikortti_2019.asp?ID=1280%20

Soil Quality. (n.d.) *Soil acidity*. <https://soilquality.org.au/factsheets/soil-acidity>

Työterveyslaitos. (2015). *OVA-ohje: Rikkivety*. <https://www.ttl.fi/ova/rikkivet.html>

Työterveyslaitos. (2021). *OVA-ohje: Kloorivety ja suolahappo*.

<https://www.ttl.fi/ova/kloovety.html>

Visuri, M. (2020). *Happamien sulfaattimaiden tunnistaminen ja riskien arviointi*. Suomen ympäristökeskus. <https://docplayer.fi/203401974-Happamien-sulfaattimaiden-tunnistaminen-ja-riskien-arviointi.html>

Ympäristöministeriö. (2014). *Maa-ainesten hyödyntäminen - opas kaivettujen maa-ainesten luokittelusta jätteeksi ja hyödyntämiskelpoisuuden arvioinnissa*.

Liite 1: Tutkimustodistus 1/1

Näytetunnus		21MN 6295	21MN 6296	21MN 6297	21MN 6298	21MN 6299	
Näytteen nimi		EN-X-23/1	EN-X-23/2	EN-X-23/3	EN-X-23/4	EN-X-23/5	
Näytteen ottaja		JRo	JRo	JRo	JRo	JRo	
Ottopäivä		06.10.2021	06.10.2021	06.10.2021	06.10.2021	06.10.2021	
Näytteen saapumispäivä		07.10.2021	07.10.2021	07.10.2021	07.10.2021	07.10.2021	
Näytteen aloituspäivä		07.10.2021	07.10.2021	07.10.2021	07.10.2021	07.10.2021	
Näytteen valmistuspäivä		08.10.2021	08.10.2021	08.10.2021	08.10.2021	08.10.2021	
Määrytykset							
Kuiva-aine	%	84,1	83,2	89,9	92,6	81,5	Sis. men. 010*
Rikki, kokonais (S)	mg/kg	100	< 100	< 100	360	610	Sis. men. 068, ICP- OES
Arseeni, kokonais (As)	mg/kg	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	Sis. men. 068, ICP- OES*
Kadmium, kokonais (Cd)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	Sis. men. 068, ICP- OES*
Koboltti, kokonais (Co)	mg/kg	1,5	3,2	1,7	1,7	2,4	Sis. men. 068, ICP- OES*
Kromi, kokonais (Cr)	mg/kg	7,8	15	11	5,9	9,9	Sis. men. 068, ICP- OES*
Kupari, kokonais (Cu)	mg/kg	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	Sis. men. 068, ICP- OES*
Elohopea, kokonais (Hg)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	Sis. men. 068, ICP- OES*
Nikkeli, kokonais (Ni)	mg/kg	< 4,0	6,8	< 4,0	< 4,0	4,9	Sis. men. 068, ICP- OES*
Lyijy, kokonais (Pb)	mg/kg	6,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	< 2,0	Sis. men. 068, ICP- OES*

		21MN 6295	21MN 6296	21MN 6297	21MN 6298	21MN 6299	
		EN-X-23/1	EN-X-23/2	EN-X-23/3	EN-X-23/4	EN-X-23/5	
Antimoni, kokonais (Sb)	mg/kg	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	< 1,5	Sis. men. 068, ICP- OES*
Vanadiini, kokonais (V)	mg/kg	9,1	15	16	7,6	12	Sis. men. 068, ICP- OES*
Sinkki, kokonais (Zn)	mg/kg	< 20	< 20	< 20	< 20	< 20	Sis. men. 068, ICP- OES*
NAG pH		4,0	4,9	5,6	2,7	2,4	Sis. men. 127
Hapon nettotuotto, NAG (titraus pH-arvoon 4,5)	kg H2SO4/tn	0,31	< 0,1	< 0,1	0,52	1,1	Sis. men. 127

Liite 2: Tutkimustodistus 1/2

Näytetunnus		21MN 6300	21MN 6301				
Näytteen nimi		EN-X-23/6	EN-X-23/7				
Näytteen ottaja		JRo	JRo				
Ottopäivä		06.10.2021	06.10.2021				
Näytteen saapumispäivä		07.10.2021	07.10.2021				
Näytteen aloituspäivä		07.10.2021	07.10.2021				
Näytteen valmistuspäivä		08.10.2021	08.10.2021				
Määritykset							
Kuiva-aine	%	60,5	59,1				Sis. men. 010*
Rikki, kokonais (S)	mg/kg	3300	2500				Sis. men. 068, ICP- OES
Arseeni, kokonais (As)	mg/kg	8,1	7,7				Sis. men. 068, ICP- OES*
Kadmium, kokonais (Cd)	mg/kg	< 0,50	< 0,50				Sis. men. 068, ICP- OES*
Koboltti, kokonais (Co)	mg/kg	18	17				Sis. men. 068, ICP- OES*
Kromi, kokonais (Cr)	mg/kg	56	54				Sis. men. 068, ICP- OES*
Kupari, kokonais (Cu)	mg/kg	34	35				Sis. men. 068, ICP- OES*
Elohopea, kokonais (Hg)	mg/kg	< 0,50	< 0,50				Sis. men. 068, ICP- OES*
Nikkeli, kokonais (Ni)	mg/kg	37	34				Sis. men. 068, ICP- OES*
Lyijy, kokonais (Pb)	mg/kg	9,3	8,7				Sis. men. 068, ICP- OES*

		21MN 6300	21MN 6301				
		EN-X-23/6	EN-X-23/7				
Antimoni, kokonais (Sb)	mg/kg	2,1	1,9				Sis. men. 068, ICP- OES*
Vanadiini, kokonais (V)	mg/kg	63	58				Sis. men. 068, ICP- OES*
Sinkki, kokonais (Zn)	mg/kg	100	93				Sis. men. 068, ICP- OES*
NAG pH		3,0	3,4				Sis. men. 127
Hapon nettotuotto, NAG (titraus pH-arvoon 4,5)	kg H2SO4/tn	1,7	1,0				Sis. men. 127