



SULFIDISAVEN TUNNISTAMINEN MAANVASTAANOTTOPAIKOILLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2024

Iida Laiho

Tarkastaja: Professori Ville Uusitalo

Ohjaaja: Nuorempi tutkija Laura Vartiainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Ympäristötekniikka

Iida Laiho

Sulfidisaven tunnistaminen maanvastaanottoaikoilla

Ympäristötekniikan kandidaatintyö

2024

42 sivua, 5 kuvaa, 3 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: Professori Ville Uusitalo

Ohjaaja: Nuorempi tutkija Laura Vartiainen

Avainsanat: Sulfidisavi, happamat sulfaattimaat, maanvastaanotto, pH-inkubaatio

Sulfidisavi on merkittävä ympäristöhaitta Suomessa. Maankäytön ja ilmastonmuutoksen takia sulfidisaven aiheuttamat ongelmat tulevat pahenemaan tulevaisuudessa. Sulfidisaven päästessä kosketuksiin hapen kanssa, se aiheuttaa vakavia ympäristöhaittoja, kuten vesistöjen happamoitumista

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan erilaisia sulfidisaven tunnistamismenetelmiä ja selvitetään kirjallisuudessa määriteltyjen kriteerien perusteella, mitkä menetelmät soveltuvat parhaiten maanvastaanottoaikoille. Työssä tarkastellaan seitsemää erilaista tunnistamismenetelmää. Työ tehdään kirjallisuuskatsauksena ja sen lisäksi toteutetaan asiantuntijahaastattelu kriteerien tärkeyden laatimista varten.

Tutkimuksessa ei löytynyt yksittäistä menetelmää, joka täyttäisi kaikki sulfidisaven tunnistamiselle asetetut vaatimukset maanvastaanottoaikoilla. Parhaaksi toimintatavaksi tunnistettiin kahden menetelmän yhdistäminen: ensin käytetään kenttäolosuhteisiin sopivaa seulontamenetelmää suurten maamassojen alustavaan tarkasteluun, mikä mahdollistaa sulfidisaven tunnistamisen nopeasti ja kustannustehokkaasti. Jos seulontavaiheessa havaitaan viitteitä sulfidisaven esiintymisestä, analyysiä jatketaan tarkemmalla laboratoriomenetelmällä, joka pystyy vahvistamaan epäilyt luotettavasti. Tämä yhdistelmä tarjoaa tehokkaan ja tarkastelukohteeseen soveltuvan ratkaisun sulfidisaven tunnistamiseen ja vähentää ympäristöriskien riskiä maanvastaanottoaikoilla.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Environmental Technology

Iida Laiho

Identification of sulfidic clay at soil reception sites

Bachelor's thesis

2024

42 pages, 5 figures, 3 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Ville Uusitalo

Supervisor: Junior researcher Laura Vartiainen

Keywords: Sulfidic clay, acid sulfate soils, soil reception, pH-incubation

Sulfidic clay is a significant environmental risk in Finland. Due to land use and climate change, the issues associated with sulfuric soil are expected to worsen in the future. When sulfuric soil comes into contact with oxygen, it causes severe environmental damage, such as the acidification of water bodies.

This bachelor's thesis investigates various methods for identifying sulfuric soil and examines which methods, based on criteria defined in the literature, are best suited for soil reception sites. The study reviews seven different identification methods. It is conducted as a literature review and supplemented by expert interviews to establish the importance of different criteria.

The study did not identify a single method that meets all the requirements for identifying sulfuric soil at soil reception sites. The best approach was found to be a combination of two methods: initially, a field-suitable screening method is used for a preliminary examination of large soil masses, enabling quick and cost-effective identification of sulfuric soil. If the screening phase suggests the presence of sulfuric soil, further analysis is conducted with a more precise laboratory method that can reliably confirm suspicions. This combination provides an efficient, site-appropriate solution for identifying sulfuric soil and reduces environmental risks at soil reception sites.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

1	Johdanto.....	6
2	Sulfidisavi.....	8
2.1	Sulfidisavi ja sen käsitteistö.....	8
2.2	Sulfidisaven esiintyminen Suomessa.....	10
2.3	Sulfidisaven syntyminen ja reagointi hapen kanssa.....	12
2.4	Sulfidisaven aiheuttamia negatiivisia vaikutuksia.....	13
2.4.1	Ympäristövaikutukset.....	13
2.4.2	Muut vaikutukset.....	15
3	Tutkimusmenetelmät.....	16
3.1	Kirjallisuuskatsaus.....	16
3.2	Haastattelu.....	16
4	Sulfidisaven tunnistaminen.....	18
4.1	Tunnistaminen kenttäolosuhteissa.....	18
4.1.1	Aistinvarainen tunnistaminen.....	18
4.1.2	pH:n mittaus.....	19
4.1.3	Rikkianalyysi maastossa.....	20
4.2	Tunnistaminen laboratoriossa.....	21
4.2.1	pH - inkubaatio.....	22
4.2.2	Nopeutettu pH- inkubaatio.....	24
4.2.3	Rikkianalyysi.....	24
4.2.4	Sähkönjohtavuus ja sulfaattipitoisuus.....	25
4.2.5	Muita tunnistamismenetelmiä.....	27
5	Sulfidisaven tunnistaminen maanvastaanottopaikoilla.....	28
5.1	Tunnistamisen kriteerit.....	28
5.1.1	Tulosnopeus.....	29
5.1.2	Kustannustehokkuus.....	30
5.1.3	Tarkkuus.....	31
5.1.4	Kenttäkäyttömahdollisuus.....	32
5.1.5	Helppokäyttöisyys ja koulutusaika.....	32
5.2	Parhaimmat tunnistamismenetelmät maanvastaanottopaikoille.....	32

6 Johtopäätökset.....	35
Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Lähteiden valintakriteerit

Liite 2. Haastattelukysymykset

1 Johdanto

Happamat sulfaattimaat, joihin sulfidisavi lukeutuu, ovat Suomessa merkittävä ympäristöhaitta. Tulevaisuudessa sulfaattimaiden aiheuttamat ongelmat saattavat pahentua ilmastonmuutoksen ja maankäytön muutosten myötä. (Geologian tutkimuskeskus 2022c) Sulfidisaven hapettuminen aiheuttaa vakavia ympäristövaikutuksia, kuten vesistöjen happamoitumista ja haitallisten metallien vapautumista, mikä vahingoittaa vesieliöitä ja heikentää ekosysteemin tasapainoa. (Sutela et al. 2012)

Rikkipitoinen sulfidisavi muodostui, kun vedessä hajonneet ja maatuneet kasvien jäänteet rikastuttivat vettä ravinteilla. Tämän seurauksena hapettomissa olosuhteissa merenpohjassa bakteerit alkoivat tuottaa rikkipitoisia yhdisteitä. (Temotek Oy 2018) Kun sulfidisavi joutuu kosketuksiin hapen kanssa, esimerkiksi pohjaveden tason laskiessa tai maan kaivamisen yhteydessä, nämä rikkiyhdisteet hapettuvat ja muodostavat rikkihappoa, joka liuottaa maaperän metalleja. Merkittävimpiä sulfidisaven aiheuttamia ympäristöongelmia ovat sedimenttien ja vesistöjen happamoituminen sekä metallipitoisuuksien nousu. (Sutela et al. 2012) Vesistöjen pH:n laskiessa alle kuuden, alkaa se vaikuttamaan eliöihin erittäin negatiivisesti. Esimerkiksi monet kalalajit sekä niiden mäti ovat erityisen herkkiä happamuudelle. (Hakala & Järvimäki 2003, 81) Euroopan suurimmat sulfidisaviesiintymät sijaitsevat Suomessa, ja laajimmat sulfidisavialueet löytyvät erityisesti Pohjanmaan rannikolta (Sutela et al. 2012).

Maanvastaanottoaikkojen merkittävä haaste on, että työmailta saatetaan tuoda sulfidisavea tunnistamatta sitä juuri sulfidisaveksi. Tämä voi johtaa vakaviin ympäristöongelmiin, mikäli sulfidisavi pääsee hapettumaan. Olisi tärkeää, että vastaanottoaikoilla osataan tunnistaa sulfidisavi, jotta sille voidaan tehdä tarvittavat toimenpiteet. Näihin kuuluu esimerkiksi sulfidisaven peittäminen maalla. Näin varmistetaan, ettei se pääse kosketuksiin hapen kanssa ja aiheuta ympäristöongelmia. Lisäksi rakennustyömaat eivät välttämättä itse huomaa sulfidisaven olemassaoloa, mikä voi johtaa esimerkiksi rakenteiden korroosio-ongelmiin. Sulfidisaven tunnistamisesta maanvastaanottoaikoilla voi siten olla merkittävä apu myös työmaiden ongelmien ennaltaehkäisyssä. (NCC Industry Oy 2024)

Sulfidisavea on tutkittu monien vuosikymmenten ajan ja esimerkiksi Geologian tutkimuskeskus (GTK) on tehnyt yleiskartoituksen, joka valmistui vuonna 2021 (Geologian tutkimuskeskus 2024). Ympäristöministeriö on myös laatinut ohjeita sulfidisaven käsittelyyn ja määrittämiseen (Autiola et al. 2022). Sulfidisaven tunnistamiseen maanvastaanoton näkökulmasta ei kuitenkaan ole vielä tehty tutkimusta.

Tässä kandidaatintyössä keskitytään sulfidisaven tunnistamiseen maanvastaanottoaikoilla. Työn tavoitteena on löytää sulfidisaven tunnistamismenetelmiä, jotka soveltuvat käytettäväksi maanvastaanottoaikoilla. Työssä esitellään erilaisia sulfidisaven tunnistamismenetelmiä ja arvioidaan niiden soveltuvuutta maanvastaanottoaikoilla kirjallisuudessa esitettyjen kriteerien pohjalta. Erityistä huomiota kiinnitetään menetelmiin, jotka ovat käytännöllisiä ja tehokkaita maanvastaanoton yhteydessä, jotta sulfidisavi voidaan käsitellä asianmukaisesti ympäristövaikutusten minimoimiseksi.

Tämän kandidaatintyön tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Miten sulfidisavea voidaan tunnistaa maanvastaanottoaikoilla?
- Mitkä olemassa olevat tunnistamismenetelmät ovat parhaita sulfidisaven havaitsemiseksi maanvastaanottoaikoilla?

Työ toteutetaan kvalitatiivisena tutkimuksena, jossa hyödynnetään olemassa olevaa kirjallisuutta sulfidisavesta ja sen tunnistamismenetelmistä. Työssä on teoreettinen osuus, jossa käsitellään sulfidisavea yleisesti, kuten sen esiintymistä ja ympäristöhaittoja. Teoreettisen osuuden jälkeen tarkastellaan työssä käytettyjä tutkimusmenetelmiä eli kirjallisuuskatsausta ja haastattelua. Haastattelun avulla selvitetään yrityksen edustajan näkemyksiä kirjallisuudessa määritettyjen kriteerien merkityksestä sulfidisaven tunnistamismenetelmille. Menetelmät osion jälkeen esitellään sulfidisaven tunnistamismenetelmiä ja sen jälkeen arvioidaan, mitkä tunnistamismenetelmistä sopisivat parhaiten maanvastaanottoaikoille. Lopuksi arvioidaan tunnistamismenetelmien soveltuvuutta, pohditaan parempia menetelmiä ja tehdään johtopäätöksiä tulosten perusteella.

2 Sulfidisavi

Sulfidisavi on merkittävä ympäristöhaaste erityisesti Suomen rannikkoseuduilla. Sulfidisaven päästessä reagoimaan hapen kanssa käynnistyy pitkä ketju kemiallisia ja biokemiallisia reaktioita, jotka johtavat rikkihapon muodostumiseen ja maaperän happamoitumiseen. Happamoituminen aiheuttaa esimerkiksi negatiivisia ympäristövaikutuksia sekä ongelmia rakentamisessa.

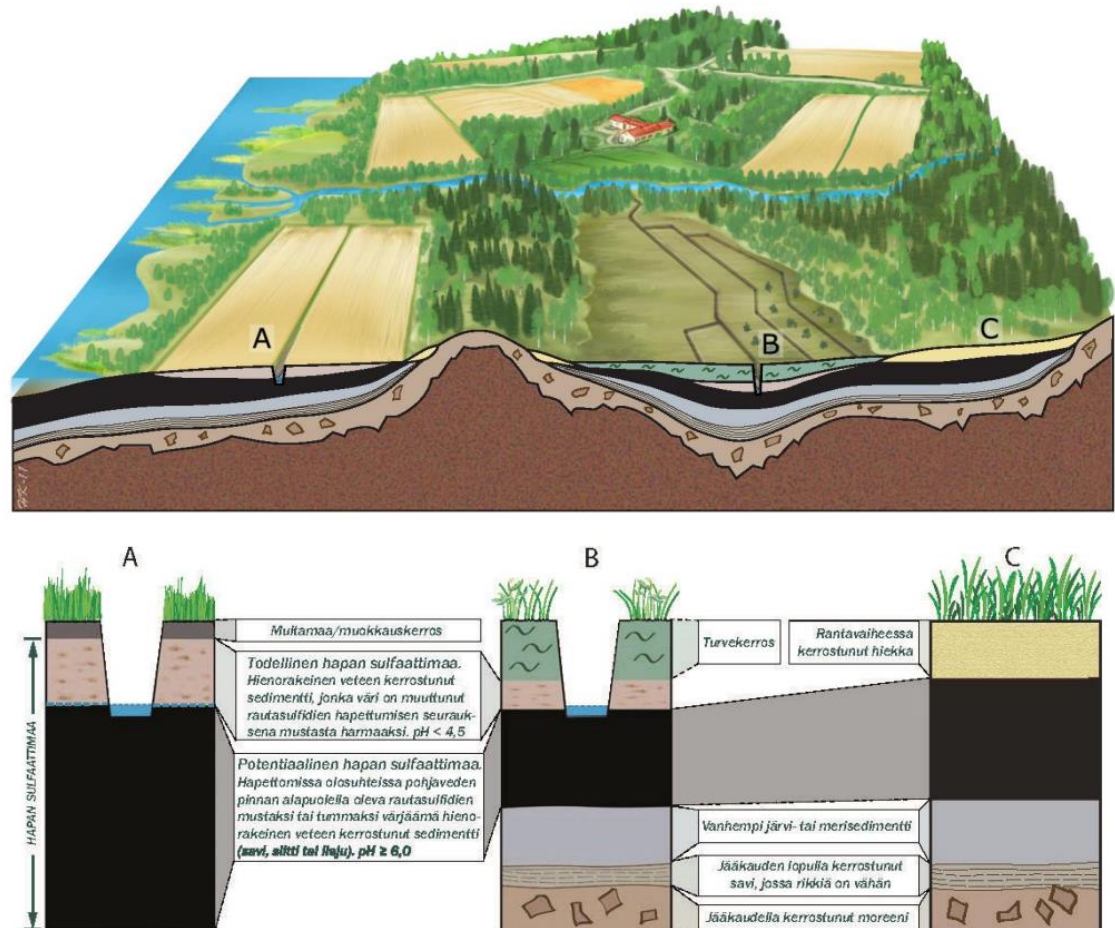
2.1 Sulfidisavi ja sen käsitteistö

Hapan sulfaattimaa on yleisnimitys maille, jotka sisältävät raudan sulfideja. Sulfidin altistuminen hapelle, joka johtuu maankohoamisen ja/ tai maankäytön muutoksista, kuten ojituksen, maiden kuivatuksen ja massanvaihdon seurauksena, johtaa rikkihapon muodostumiseen. (Autiola et al. 2022; Harmanen 2007) Kansainvälisesti happamaksi sulfaattimaaksi luokitellaan yleensä maaperä, jonka pH on laskenut tai voi laskea alle 4,0, johtuen sulfidien hapettumisesta tai rikkihapon muodostumisesta (Autiola et al. 2022; Estévez et al. 2024).

Sulfaattimaa käsitteenä sisältää niin potentiaalisen kuin todellisen happaman sulfaattimaan. Todellinen hapan sulfaattimaa tarkoittaa maata, jossa sulfidien hapettumisen seurauksena syntyy hapan horisontti tai happamia kerroksia. Potentiaaliset happamat sulfaattimaat ovat pohjaveden alapuolella olevia maita sisältäen sulfidia, joka ei ole vielä hapettunut. (Harmanen 2007) Fanning et al. (2017) mukaan Pons (1973), jota pidetään kansainvälisten happamien sulfaattimaiden konferenssien perustajana, antoi happamille sulfaattimaille määritelmän: ”kaikki maaperät, joissa rikkihappoa voi syntyä, syntyy tai on syntynyt määrinä, joilla on pysyvä vaikutus maaperän pääominaisuuksiin.” Tämä määritelmä kattaa potentiaaliset ja todelliset happamat sulfaattimaat (Fanning et al. 2017, s. 192). Näiden lisäksi käytetään termiä sulfidisavi, joka voi tarkoittaa kaikkia happamia sulfaattimaita tai vain kosteita, olomuodoltaan savimaisia sulfaattimaita (Kotro 2017). Kuvassa 1 nähdään, missä todellinen ja potentiaalinen hapan sulfaattimaa esiintyy.

Happamien sulfaattimaiden käsitteistö on vaihtelevaa. Esimerkiksi Suomessa ja Australiassa käytetään termiä sulfaattimaa, kun taas Ruotsissa käytetään termiä sulfidimaa (Kangas

2010). Harmasen (2007) mukaan happamat sulfaattimaat kattavat todelliset ja potentiaaliset happamat sulfaattimaat. Lisäksi Suomessa on käytetty nimityksiä alunamaa ja pikileerimaa (Kangas 2010).



Kuva 1. Todellisen ja potentiaalisen happaman sulfaattimaan esiintyminen. (Geologian tutkimuskeskus 2022a)

Tässä työssä käsitellään sulfidisaven tunnistamista maanvastaanottoaikoilla ja siinä yhteydessä käytetään usein termiä sulfidisavi. Sulfidisavea pidetään yhtenä happamien sulfaattimaiden ilmentymänä, joten termi happamat sulfaattimaat kattavat myös sulfidisaven. Tarkemmin sanottuna sulfidisavi on potentiaalista hapanta sulfaattimaata, joka kuuluu happamiin sulfaattimaihin. Näin ollen sulfidisavi ja happamat sulfaattimaat viittaavat tässä työssä

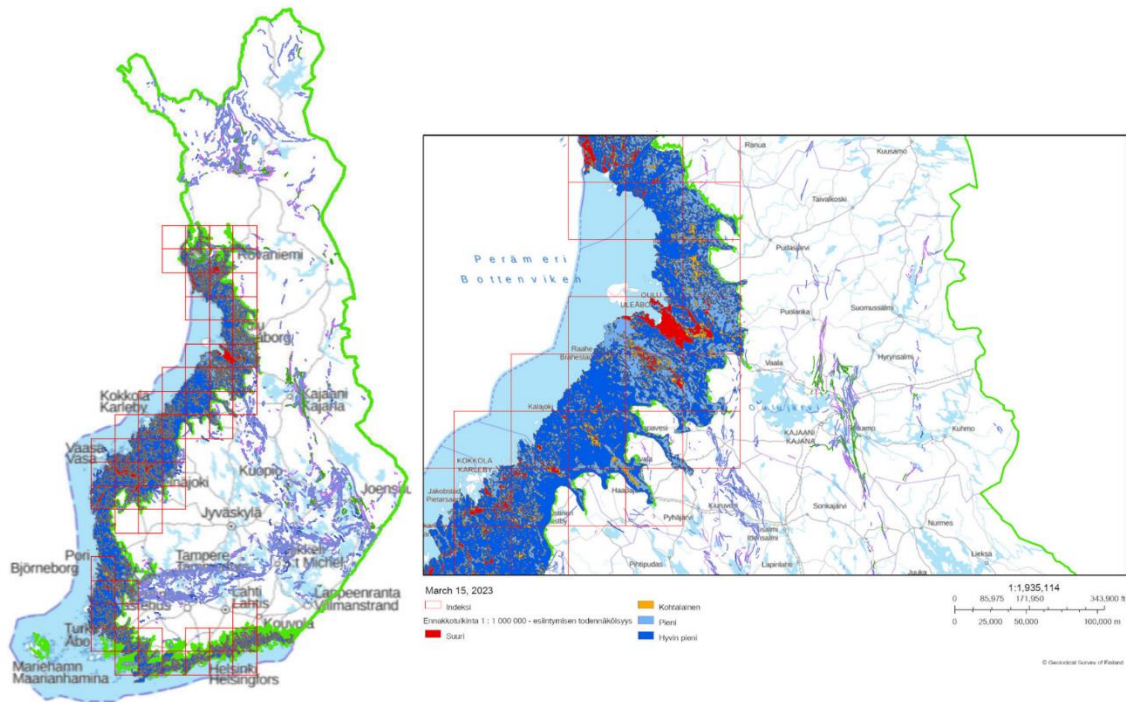
samaan maaperätyyppiin, mutta eroteltaessa potentiaalista ja todellista hapanta sulfaattimaata, sulfidisavi viittaa potentiaaliseen happamaan sulfaattimaahan.

2.2 Sulfidisaven esiintyminen Suomessa

Euroopan suurimmat sulfaattimaiden esiintymät ovat Suomessa (Estévez et al. 2024). Sulfaattimaat sijaitsevat lähes koko rannikkoseudulla Perämeren seudulta itäiselle Uudellemaalle. Pohjanmaan alavalla rannikkoseudulla sijaitsevat kaikkein laajimmat ja haastavimmat sulfaattimaa-alueet. Rannikkoseudun lisäksi poikkeuksellista happamuutta voi esiintyä mustaliuskeita sisältävillä alueilla. (Härkönen & Nieminen 2019)

Happamat sulfaattimaat sijaitsevat yleensä rannikon (Litorina-alue) laaksokohdissa tai jokien ympäristössä. Suomessa on arvioitu olevan noin 158 000 hehtaaria happamia sulfaattimaita (Edén et al. 2023). Tämä on kuitenkin vain arvio, koska Suomessa sulfaattimaiden määrä arvioidaan usein suuremmaksi kuin muualla, sillä niiden luokittelussa käytetään erilaisia kriteereitä. Täällä sulfaattimaiksi määritellään myös syvemmällä sijaitsevat maakerrokset, koska Suomen kuivatussyvyudet ovat yleensä suurempia. Kuivatussyvyys tarkoittaa syvyyttä, johon maaperästä johdetaan vesi pois, jotta maa on kuiva esimerkiksi rakennuskäyttöön tai viljelyyn. Tämän seurauksena maaperän sulfideja hapettuu syvemmällä kuin kansainvälisten kriteerien mukaisesti olisi tapana arvioida. (Maa- ja metsätalousministeriö 2009)

Valtaosa sulfaattimaista sijaitsee rannikkoalueilla 30–60 metrin korkeudella merenpinnasta, mutta lisäksi niitä esiintyy osittain alueilla, jotka kohoavat 70–100 metrin korkeuteen (Estévez et al. 2024). Todella happamia alueita ovat niin kutsutut järvikuivioalueet eli entiset kuivatut järvet (Maa- ja metsätalousministeriö 2009). Sulfidipitoiset sedimentit ovat tyypillisesti ylimmissä oloissa maaperän kerrossarjassa. Erityisesti sulfidipitoiset liejukerrokset voivat olla hyvinkin ohuita, kun taas jotkut kerrokset voivat olla useiden metrien paksuisia. (Visuri et al. 2021) Kuvassa 2 esitetään happamien sulfaattimaiden esiintyvyys Suomessa sekä, missä niiden esiintyvyys on todennäköisin.



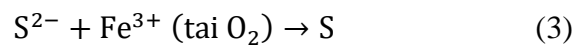
Kuva 2. Happamien sulfaattimaiden esiintyminen Suomessa. Värit kuvaavat happamien sulfaattimaiden esiintymisen todennäköisyyttä. Punainen tarkoittaa suurta, keltainen kohtalaista, vaalean sininen pientä ja tumman sininen hyvin pientä todennäköisyyttä. (Geologian tutkimuskeskus 2022a)

Kuvasta 2 havaitaan, että suurimmat esiintymät ovat Pohjanmaalla, erityisesti Oulun ja Kristiinankaupungin välillä. Yleensä sulfaattimaita havaitaan eniten vanhoilla vesijättömailla mereen laskevien jokien suistoissa. Maankohoamisilmiö nostaa jatkuvasti esiin uusia happamia sulfaattimaita meren pohjasta. Perämeren alueella maankohoaminen on voimakainta, mikä selittää, miksi suurin osa Suomen happamista sulfaattimaita sijaitsee Pohjanmaalla. Sen sijaan Selkämeren ja Suomenlahden rannikoilla maankohoaminen on vähäisempää, ja näiden alueiden maaperä on huuhtoutumisen ansiosta muuttunut neutraalimmaksi. (Sutela et al. 2012) Maankohoaminen ei ole kuitenkaan ainoa ongelma sulfaattimaiden päästessä kosketuksiin hapen kanssa. Maankäytöllä, kuten keinotekoisella kuivatuksella on myös suuri vaikutus sulfaattimaiden hapettumiselle. (Autiola et al. 2022) Happamien sulfaattimaiden pinta-ala vaihtelee vesistöittäin ja kattaa suurimmillaan yli 10 prosenttia valuma-alueista (Sutela et al. 2012).

2.3 Sulfidisaven syntyminen ja reagointi hapen kanssa

Happamien sulfaattimaiden esiaste, sulfiittimaat, alkoivat kehittyä Itämerelle ensisijaisesti litorinakauden aikana noin 7500–4000 vuotta sitten. Tuolloin meren vesi oli sekä lämpimämpää että suolaisempaa kuin nykyisin. Viimeisimmän jääkauden jälkeen Suomen länsiosat olivat veden alla, ja kasvimateriaalia kerrostui merenpohjaan, mikä on harvinaista Suomen olosuhteissa. Hapettomissa olosuhteissa bakteerit hajottivat kasviaineksia hyödyntäen meriveden sulfaatteja (SO_4^{2-}). Tämä prosessi sai aikaan sulfidien reagoimisen liukenevan raudan kanssa, mikä johti ferrosulfiitin (FeS), hydrotroliitin ($\text{FeS}\cdot\text{H}_2\text{O}$) ja pyriitin (FeS_2) muodostumiseen. Samalla bakteerit hyödynsivät orgaanista ainesta energianlähteenään. Näin muodostuivat maat, joita kutsumme rauta-sulfidimaiksi. (Maaseutuverkosto 2009, Kangas 2010)

Rautasulfidien muodostumisyhtälöt voidaan esittää seuraavasti (Kangas 2010):

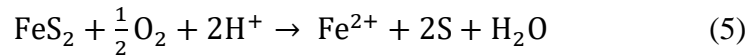


Suomessa ja muilla kosteilla alueilla yleisin rautasulfidin muoto happamissa maissa on rautamonosulfidi (FeS), kun taas trooppisilla ja kuivilla alueilla yleisemmin esiintyy pyriittiä eli rautadisulfidia (FeS_2). Kaikki happamat sulfaattimaat eivät ole samanlaisia. Ne reagoivat eri tavalla erilaisiin toimenpiteisiin sekä niillä esiintyvät ongelmat ovat luonteeltaan ja vakavuusasteeltaan erilaisia. (Harmanen 2007). Happamat sulfaattimaat koostuvat yleensä hienorakenteisista ($\leq 0,06$ mm) maalajeista eli savesta, siltistä ja liejusta, mutta myös karkearakeisimmissa ($> 0,06$ mm) maalajeissa eli hienossa hiekassa ja sitä karkeimmissa voi esiintyä happamuutta ja rikkipitoisuuksia (Autiola et al. 2022).

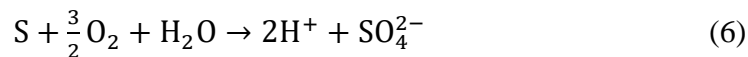
Kun sulfidimaakerros on pohjaveden tason alapuolella, se pysyy kemiallisesti vakaana ja neutraalina. Pohjaveden tason laskiessa maakerros altistuu hapelle, mikä käynnistää sarjan kemiallisia ja biokemiallisia reaktioita. Nämä reaktiot johtavat happamien sulfaattimaiden muodostumiseen (Maaseutuverkosto 2009). Bakteerien toiminta on riippuvainen maan

lämpötilasta, joten hapettumisprosessi pysähtyy syksyllä, kun maa jäätyy talveksi, ja alkaa taas keväällä, kun maa sulaa ja pohjaveden taso laskee. (Kangas 2010)

Potentiaalisen happaman sulfaattimaan hapettuminen alkaa, kun happi reagoi hitaasti pyriitin kanssa ja muodostaa raudasta ferro-ioneja ja alkuaine-rikkiä.



Rikki hapettuu sulfaateiksi, jotka aiheuttavat ympäristön happamoitumista, mikä puolestaan ylläpitää disulfidien hapettumisprosessia.



Kun reaktiot jatkuvat ja pH laskee bakteereille optimaaliselle tasolle, käynnistyy ketjureaktio. Sen lopullisena tuloksena muodostunut sulfaatti reagoi vety-ionien kanssa ja muodostaa syövyttävää rikkihappoa. (Kangas 2010, Kotro 2017)



2.4 Sulfidisaven aiheuttamia negatiivisia vaikutuksia

Tässä luvussa käydään läpi happamien sulfaattimaiden aiheuttamia ympäristövaikutuksia, kuten maaperään ja veteen aiheutuvaa haittaa. Ympäristövaikutusten lisäksi käsitellään happamien sulfaattimaiden muita negatiivisia vaikutuksia, kuten rakentamiseen sekä maa- ja metsätalouteen liittyviä ongelmia.

2.4.1 Ympäristövaikutukset

Happamat sulfaattimaat aiheuttavat useita erilaisia ympäristövaikutuksia. Mahdollisia happamien sulfaattimaiden aiheuttamia ongelmia ovat maaperän ja pohjaveden happamoituminen, pintavesien hapettomuus, huono veden laatu ja vesiekosysteemin heikentyminen. Lisäksi happamilla sulfaattimailla voi olla merkittäviä negatiivisia vaikutuksia kasvien ravinteiden ottoon, biodiversiteettiin ja kalastukseen. (Edén et al. 2023)

Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat happo- ja metallihuuhtoutumat esiintyvät usein yhtäkkisinä piikkeinä. Ne sisältävät muun muassa alumiinia, kadmiumia, kobolttia, kuparia,

nikkeliä, sinkkiä ja uraania. Happamuushaitat eivät kohdistu pelkästään vesistöihin, vaan pohjavesialueilla ne saattavat kohdistua myös pohjaveteen. Huuhtoutumisesta ja veden pH:n laskusta johtuen pintavesien ekologinen ja kemiallinen tila heikkenevät suuresti. Ekologisella luokituksella tarkoitetaan ihmistoiminnan vaikutusta vesistöön ja kemiallisessa luokittelussa tarkastellaan ympäristölle haitallisten prioriteettiaineiden pitoisuuksia. (Härkönen & Nieminen 2019; Edén et al. 2023)

Happamien sulfaattimaiden valumavedet voivat vahingoittaa vesiekosysteemejä ja niiden rakenteita sekä haitata yksittäisten eliölajien elinolosuhteita monilla tavoilla (Sutela et al. 2012). Näiden valumavesien pH voi pahimmillaan olla alle kolme (Härkönen & Nieminen 2019). Tyypillisiä vaikutuksia ovat heikentynyt kasvu yksilö- ja populaatiotasolla, lajiston köyhtyminen, lisääntynyt kuolleisuus sekä herkimpien lajien karsiutuminen ja korvautuminen kestävimmillä lajeilla. (Sutela et al. 2012) Lisäksi liian hapan ympäristö häiritsee vesieliöiden, kuten kalojen suolatasapainoa. Eliöitä rasittavat myös veteen liuenneet haitalliset aineet. Esimerkiksi veteen liuenneet alumiini ja rauta voivat haitata kalojen hengitystä. (Hakala et al. 2003, 81) Näiden kaikkien yhteisvaikutuksesta luonnon monimuotoisuus voi heiketä huomattavasti (Geologian tutkimuskeskus 2020).

Hapettumisreaktioissa vapautuu vetyioneja (H^+) sekä muodostuu rikkihappoa (H_2SO_4). Ne happamoittavat maaperää voimakkaasti. Happamuus maaperässä heikentää kasvien kasvamista sitomalla tai huuhtomalla ravinteita. (Ilonen 2021) Happamat sulfaattimaat aiheuttavat ongelmia maa- ja metsätaloudessa. Viljelyskäytössä olevat happamat sulfaattimaat täytyy kalkita voimakkaasti, jotta niillä pystytään viljelemään. Maanpinnan kalkitus neutraloi vaan muokkauskerroksen happamuutta, mutta ei paranna vesien laatua. (Härkönen & Nieminen 2019) Salaojituksen yleistymisen ja ojitusten ulottuminen sulfaattikerrokseen asti on lisännyt pelloilta tulevaa happamuus- ja metallikuormitusta. Kuivan kesän aikana voi sulfidien hapettuminen ulottua jopa 2–3 metrin syvyyteen. Happamuus- ja metallikuormitukset huuhtoutuvat vesistöihin ja aiheuttavat siten edellä mainittuja haittoja vesiekosysteemille. (Saarela et al. 2014) Metsätaloudessa on todettu taimien kasvuhäiriöitä, jotka johtuvat happamista sulfaattimaista (Härkönen & Nieminen 2019).

2.4.2 Muut vaikutukset

Happamat sulfaattimaat voivat aiheuttaa ongelmia rakentamisessa ja maankäytön suunnittelussa, kuten esimerkiksi nostaa rakennuskustannuksia ja aiheuttaa viivästyksiä rakennushankkeiden aikataulussa (Saresma et al. 2023). Happamien sulfaattimaiden korkea orgaanisen aineksen ja vesipitoisuus tekee materiaalista painuvan, löysän ja huonosti kantavan, mikä vaikeuttaa rakentamista (Visuri et al. 2021). Heikot geotekniset ominaisuudet voivat aiheuttaa suuria ongelmia teiden, rautateiden, siltojen ja talojen rakentamisessa. Tyypillisiä haasteita ovat sedimenttien heikko vakaus, puristusongelmat sekä kaivamisen ja rakentamisen aiheuttamat häiriöt. (Edén et al. 2023) Rakentaminen sulfidimaille saattaa edellyttää suurten maamassojen neutralointia tai vaihtamista sekä kalliimpien, happoa kestävien rakennusmateriaalien käyttöä. Kaivetuista sulfidimaista voi tulla happamia, joten massojen käsittelyssä ja sijoituspaikan valinnassa on otettava tarkasti huomioon sulfidimaiden erityisvaatimukset (Kangas 2010; Visuri et al. 2021).

Lisäksi happamien sulfaattimaiden syövyttävyyden on merkittävä ongelma. Niiltä pohja- ja pintavesiin kulkeutuva happamuus voi aiheuttaa korroosiota sekä maanpäällisille että vedenalaisille rauta- ja betonirakenteille (Betoniteollisuus ry 2017; Visuri et al. 2021). Tämän vuoksi on kiinnitettävä erityistä huomiota teräs- ja betonirakenteiden suunnitteluun alueilla, joissa on todettu happamia sulfaattimaita (Saresma et al. 2023).

Kaivostoiminnassa kohdataan samanlaisia haasteita rautasulfideja sisältävien kivien ja mineraalien kanssa kuin happamien sulfaattimaiden käsittelyssä. Sivukivien ja rikastushiekkojen läjitysalueilla muodostuu hapan valunta, jonka pääsy ympäristöön kaivosyhtiön on esitettävä. Kaivosyhtiöt tuottavat suuria määriä sivukiveä ja rikastushiekkaa, ja usein he hyödyntävät tätä materiaalia omiin tarpeisiinsa, kuten patorakenteiden rakentamiseen. Tällöin materiaali tulee osoittaa ympäristöä pilaamattomaksi. (Kangas 2010)

3 Tutkimusmenetelmät

Tämä työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa hyödynnettiin olemassa olevaa tietoa sulfidisavesta ja sen tunnistamismenetelmistä. Tutkimukseen sisältyi myös haastatteluosuus, jossa keskustellaan yrityksen edustajan kanssa kirjallisuudessa määritettyjen kriteerien merkityksestä tunnistamismenetelmille maanvastaanottoaikoilla.

3.1 Kirjallisuuskatsaus

Työ toteutettiin integratiivisella kirjallisuuskatsauksella. Sillä voidaan tarkastella tietyn aiheen tilannetta hyödyntämällä sekä vertaisarvioituja tutkimuksia että ammatillisia käytäntöjä käsitteleviä materiaaleja. Integratiivinen kirjallisuuskatsaus tarjoaa kattavan kuvan kirjallisuudesta, mutta ei noudata yhtä tiukkoja kriteerejä aineiston valinnassa kuin systemaattinen katsaus. (Vilka 2023)

Kirjallisuuskatsaus aloitettiin hakemalla tietoa sulfidisavesta eri lähteistä. Tiedonhakuun tässä työssä on käytetty LUT Primoa, Scopusta, Google Scholaria sekä yrityksen toimittamia aineistoja. Hakuprosessin aikana on hyödynnetty monipuolisesti erilaisia hakusanoja, kuten "happamien sulfaattimaiden tunnistaminen" ja "sulfidisaven tunnistamismenetelmät". Lisäksi Scopuksessa hakuja on tehty englanninkielisillä termeillä, kuten "acid sulfate soils" ja "acid sulfate clay". Kaikissa hauissa ei ole aina käytetty suoraan sulfidisaveen viittaavia termejä, vaan tietoa on etsitty myös pelkästään eri tunnistamismenetelmien nimillä. Lähdeaineistojen valintakriteerit on esitetty liitteessä 1 olevassa taulukossa.

3.2 Haastattelu

Toisena tutkimusmenetelmänä käytetään haastattelua. Haastattelu on ennalta suunniteltu tiedonkeruumenetelmä, ja siitä on olemassa monia eri tyyppisiä. Tässä työssä käytetään puolistrukturoitua haastattelutyyppiä, jota kutsutaan myös esimerkiksi teemahaastatteluksi ja puolistandardoiduksi haastatteluksi. Puolistrukturoidussa haastattelussa kysymykset ovat etukäteen laadittuja, mutta vastaukset eivät ole sidottuja ennalta määriteltyihin

vaihtoehtoihin, vaan haastateltavat voivat vastata vapaasti omin sanoin. Puolistrukturoidulle haastattelulle ominaista on, että jokin näkökohta haastattelusta on lyöty lukkoon, mutta ei kaikkia. (Hirsijärvi & Hurme 2022)

Haastattelussa haastateltiin NCC Industry Oy:n aluepäällikköä Jan Hagmarkia, jolla on käytännön asiantuntemusta sulfidisavien vastaanottamisesta. Haastattelun avulla selvitettiin yrityksen näkemyksiä kirjallisuudessa määritettyjen kriteerien merkityksestä sulfidisaven tunnistamismenetelmille. Haastattelu toteutettiin lokakuussa 2024 Teams-puhelun välityksellä. Haastattelukysymykset löytyvät liitteestä 2. Haastattelukysymykset liittyvät ennalta kirjallisuudessa määritettyihin sulfidisaven tunnistamiskriteereihin.

4 Sulfidisaven tunnistaminen

Sulfidisaven tunnistaminen on haastavaa, koska pelkät pH-arvot ja rikki- ja rautapitoisuudet eivät aina anna tarpeeksi luotettavaa kuvaa maaperän happamoitumisriskistä. (Visuri et al. 2021). On selvää, ettei tällä hetkellä ole käytettävissä yksittäistä testiä, joka antaisi täysin varman tuloksen. Kuitenkin sekä maastossa että laboratorioissa tehtävät analyysit tarjoavat riittävästi tietoa, jotta sulfidisaven tunnistaminen on mahdollista. (Autiola et al. 2022)

4.1 Tunnistaminen kenttäolosuhteissa

Sulfidisaven tunnistamiseen maastossa on erilaisia menetelmiä. Aistinvarainen tunnistaminen on vaivattomin ja nopein menetelmä, mutta muutkin maastossa toteutettavat tunnistusmenetelmät ovat nopeita verrattuna laboratoriotutkimuksiin (Visuri et al. 2021).

4.1.1 Aistinvarainen tunnistaminen

Aistinvaraisessa tunnistamisessa kiinnitetään huomiota maan väriin, hajuun ja koostumukseen. Sulfidipitoisia maita tavataan yleisimmin hienorakeisissa, lajittuneissa ja liejuisissa sedimenteissä, kuten savessa. Potentiaalinen hapan sulfaattimaa on tyypillisesti mustaa (kuva 3), ja siinä voi havaita rikkivedyn aiheuttaman mädäntyneen kananmunan hajun. Rautamonosulfidit (FeS) värjäävät sedimentin mustaksi, kun taas pyriitti (FeS_2) tuo sedimenttiin vain kevyesti tumman sävyn. Todellinen hapan sulfaattimaa on tyypillisesti väriltään vaaleanharmaata tai ruskeaa, ja siinä saattaa esiintyä ruosteen sävyjä rautaoksidien muodostumisen seurauksena. Lisäksi siinä voi näkyä keltaista jarosiittia, joka on merkki hapettumisprosessista. (Visuri et al. 2021)



Kuva 3. Potentiaalinen hapan sulfaattimaa (Geologian tutkimuskeskus 2022b)

Jos maa on mustaa ja siinä on selkeä rikkivedyn haju, joka muistuttaa voimakasta mädäntyneen kananmunan hajua, voidaan olettaa, että savi on sulfidipitoista. Kuitenkin potentiaalinen hapan sulfaattimaa ei välttämättä näytä sille tyypillisiä merkkejä, kuten pahaa hajua, joten pelkkä aistinvarainen arviointi ei riitä luotettavaksi tunnistusmenetelmäksi. (Geologian tutkimuskeskus 2020; Visuri 2020) Happamia sulfaattimaita ei voida luotettavasti tunnistaa pelkästään aistinvaraisten havaintojen perusteella, mutta maalajin ominaisuuksien kirjaaminen on silti erittäin tärkeää (Visuri et al. 2021). Saven ollessa mustaa, voi siihen pipetoida laimeaa suolahappoa (HCl). Jos savessa on sulfaattia, sen hapettunut pinta voi vapauttaa rikkivetyä, jonka tunnusomainen haju eli mädäntyneen kananmunan haju osoittaa sulfidien läsnäolon. Suolahappoa ei saa käyttää sisätiloissa ja sitä käyttäessä pitää aina olla suojavausteet. (Nystrand 2020)

4.1.2 pH:n mittaus

Aistinvaraisen tunnistamisen lisäksi maastossa voidaan tehdä pH:n mittaus. Potentiaalisessa happamassa sulfaattimaassa pH on usein alle 6, kun taas todellisessa happamassa sulfaattimaassa pH on usein alle 4 tai alle 3. (Nystrand 2020) pH-mittauksen voi suorittaa kentällä esimerkiksi sähköisillä pH-antureilla. Kuitenkin maakerroksissa, joissa on voimakasta hapettumista, pH-mittaus ei ole alusta alkaen luotettava. Mittaustulos voi vaihdella ja alkuun saattaa tulla jopa emäksisiä tuloksia, mutta muutaman minuutin kuluttua tehdyissä uusintamittauksissa näytteen happamoituminen tulee esiin. Kenttäolosuhteisiin soveltuvat parhaiten

vapaat elektrodit, ja niiden välillä on tärkeää huolehtia niiden puhdistamisesta deionisoidulla vedellä. (Vertanen 2016) Hapettumattomista näytteistä pH tulisi mitata mahdollisimman pian näytteenoton jälkeen. Jos mittaus ei voida tehdä heti, näyte on säilytettävä ilmatiiviisti ja pH mitattava vuorokauden sisällä. Maanäytteen pH-arvo voidaan mitata kostuttamalla se deionisoidulla vedellä tai sekoittamalla näyte ja vesi suhteessa 1:1 ennen mittausta. Vaihtoehtoisesti pH voidaan mitata 1:5 veden ja maaperän seoksesta, mutta tämä voi aiheuttaa pienen laimenemisvirheen joidenkin näytteiden pH-arvossa. Rutiinimittauksissa käytetään usein CaCl_2 -liuosta veden sijaan, mutta sen on todettu hieman alentavan pH-arvoja verrattuna vesipohjaisiin seoksiin. (Visuri et al. 2021; Nystrand 2020)

Anturin lisäksi pH-arvon mittaamiseen voidaan käyttää vetyperoksidia. Tuoreesta näytteestä (2 ml) hapetetaan vetyperoksidin avulla (yhteensä 5 ml), mikä tapahtuu yli 1000 kertaa nopeammin kuin tavallisissa olosuhteissa. Kun näyte on jäähtynyt ja ei enää kupli merkittävästi, mitataan siitä pH. Jos pH on alle 2,5 kyseessä on todennäköisesti hapan sulfaattimaa. Tällä menetelmällä saa tuloksen maan pH:sta tunnin sisällä, mutta se ei ole yhtä varma menetelmä kuin laboratoriossa tehtävä inkubaatio. Jos maassa on runsaasti orgaanista ainesta, vetyperoksidi voi johtaa alhaiseen pH-arvoon, vaikka todellista happamoitumisriskiä ei olisi. Vetyperoksidihapetus soveltuu maaston lisäksi käytettäväksi myös laboratoriossa. (Visuri et al. 2021; Nystrand 2020)

Maanäytteiden pH-mittauksissa on tärkeää huomioida, että tulokset eivät yleensä ole kovin tarkkoja desimaalin tasolla. Esimerkiksi rinnakkaisnäytteissä 0,2 pH-yksikön ero on varsin tavallinen. Tulosten vaihteluun voivat vaikuttaa muun muassa näytteen epätasainen koostumus sekä mittauselektrodin ominaisuudet. (Visuri et al. 2021) Jos kenttäolosuhteissa ei voida mitata pH-tasoa, se tulee tehdä laboratoriossa mahdollisimman pian, mielellään 24 tunnin sisällä näytteenotosta. Tällöin näytteet on pakattava tiiviisti ja kuljetettava kylmälaukussa laboratorioon, jotta niiden hapettumista voidaan hidastaa. (Autiola et al. 2022)

4.1.3 Rikkianalyysi maastossa

Happamia sulfaattimaita voidaan tunnistaa maanäytteistä röntgenfluoresenssi eli XRF-analyysaattorilla. Useimmat kenttä- XRF- analyysaattoreista ovat energiadisersiivisiä analyysaattoreita eli ED-XRF- analyysaattoreita (kuva 4). Analyysaattoreilla voidaan analysoida kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia näytteitä. (Laine-Ylijoki et al. 2003, s. 17)



Kuva 4. Kenttäolosuhteissa toimiva XRF- analysaattori. (GWM engineering 2019)

Röntgenfluorenssimenetelmä tunnistaa alkuaineet säteilyttämällä niitä röntgen säteilyllä. Säteilystä poistaa atomin sisemmältä kuorelta, ja sen tilalle siirtyvä elektroni tuottaa alkuaineelle tyypillisen säteilyn. Alkuainepitoisuudet voidaan arvioida mittaamalla syntyvän säteilyn intensiteetti. (Laine-Ylijoki et al. 2003, s. 16) Happamien sulfaattimaiden tapauksessa alkuainepitoisuuksista keskitytään rikki- ja kuparipitoisuuteen. Analysaattorin avulla voidaan tunnistaa kokonaisrikkipitoisuus ja, jos se on koholla, voi maa olla hapanta. Rikki- ja kuparipitoisuus ei kuitenkaan riitä yksin arvioimaan maan happamoitumista luotettavasti. Röntgenfluorenssimenetelmää voidaan käyttää myös laboratorioissa. (Visuri et al. 2021, Auri et al. 2018)

4.2 Tunnistaminen laboratorioissa

Laboratorioissa tehtävät sulfidisaven tunnistamismenetelmät ovat yleensä aikaa vievempiä kuin maastossa suoritettavat testit, mutta niitä pidetään tarkempina ja luotettavampina. Tässä kappaleessa esitellään yleisimpiä laboratoriomenetelmiä.

4.2.1 pH - inkubaatio

Happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen käytetään usein pH- inkubaatiota. Inkubaatiomenetelmää pidetään usein parempana ja luotettavampana muihin happamien sulfaattimaiden tunnistamismenetelmiin verrattuna, koska menetelmän avulla maaperä ”kertoo itse” ominaisuuksistaan. Inkubaatiolla on kuitenkin myös haittoja. Se on työläs, koska maaperänäytteen kosteustilannetta on seurattava säännöllisesti, jotta kosteus pysyy optimaalisella tasolla. Lisäksi menetelmä on aikaa vievää, koska näytteen täydellinen hapettuminen vaatii pitkän ajanjakson. (Creeper et al. 2012)

Tavallisesti pH-inkubointi kestää 9–19 viikkoa, ja se perustuu pääasiassa maaperän yksinkertaistettuihin näytteisiin. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että usein jo 8–10 viikon inkubointi antaa luotettavan arvion happamoitumisprosessista. Tästä syystä lyhyempää inkubointiaikaa on käytetty tilanteissa, joissa tutkimukselle on ollut tiukka aikaraja. Jos näytteen pH-arvo on pysynyt vakiona useiden viikkojen ajan, inkubointiaikaa voidaan lyhentää ja lopettaa ennen 19 viikon enimmäisajan täyttymistä. Inkubaation pH-arvo heijastaa maaperän luonnollisten hapettumisprosessien aikaansaamia pH-muutoksia ja ottaa huomioon maaperän puskurikapasiteetin, johon vaikuttavat muun muassa karbonaattimineraalien, orgaanisen aineksen ja saven määrä. (Visuri et al. 2021)

Inkubaatio aloitetaan keräämällä maastossa noin 20 g edustava maanäyte, joka asetetaan nimettyyn chip-tray-lokeroon (kuva 5) (Creeper et al. 2012). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pieniä kannellisia muovipurkkeja, mutta chip-tray-lokerot ovat erityisen käteviä (Visuri et al. 2021). Ennen näytteen ottoa homogenisoidaan ensin yli 500 g maata erillisessä muovipussissa, josta otetaan edustava 20 g näyte. Lokeron täyttö tehdään kolmannekseen, jolloin näytteestä muodostuu noin 10 mm paksu kerros. Jos näytteet ovat kuivia kerättäessä, ne kostutetaan deionisoidulla vedellä (Creeper et al. 2021). On kuitenkin tärkeää varmistaa, ettei vettä lisätä liikaa, jotta näyte ei vettyisi, sillä silloin hapettuminen ei tapahdu toivotulla tavalla. Näytteen alkuperäinen pH on mitattava näytteenoton yhteydessä (Visuri et al. 2021). Chip-tray-lokerot tulee kääriä kelmuun ennen laboratoriokuljetusta, jotta näytteet eivät kuivu tai vuoda (Creeper et al. 2012).



Kuva 5. Chip- tray lokeroissa olevat maanäytteet. (Creeper et al. 2012)

Laboratoriossa maanäytteiden vesipitoisuus arvioidaan, jotta se olisi optimaalinen inkubointia varten. Näytteet, joiden vesipitoisuus on lähellä kenttäkapasiteettia, ovat valmiita inkubointiin. Jos näyte on kuiva, se kostutetaan lähelle kenttäkapasiteettia ennen inkubointia ja liiallinen vesi poistetaan haihduttamalla jättämällä chip-tray- lokeron kannen auki huoneenlämpöön yön ajaksi. Vesipitoisuuden ollessa optimaalisella tasolla, näytteet varastoidaan ja niiden annetaan inkuboida aerobisissa olosuhteissa. Inkubaation aikana näytteiden vesitilannetta seurataan noin kerran tai kahdesti kuukaudessa ja sitä säädetään tarpeen mukaan. (Creeper et al. 2012)

Maan pH mitataan suoraan chip-tray-lokeroista. Maanäyte homogenisoidaan sekoittamalla sitä lasisauvalla, ja siihen lisätään vähimmäismäärä deionisoitua vettä, kunnes pH- elektrodin ja maavesiliuoksen välinen vakaa yhteys saavutetaan. Homogenisointi ennen pH- mitausta auttaa poistamaan mahdollisen hapettumisen aiheuttaman epätasaisuuden, joka on saattanut tapahtua inkubaation aikana. Taulukon 1 avulla voidaan tehdä pH-inkubaation tulosten tulkinta. (Creeper et al. 2012)

Taulukko 1. pH- inkubaation tulosten arviointi.

Aika (vko)	pH	Inkubaation tulos	Sulfidisavi
9	< 4	Näyte sisältää sulfideja	Kyllä
9	> 6,5	Näyte ei sisällä tarpeeksi sulfideja	Ei
9	$4 \leq \text{pH} \leq 6,5$	Näytettä inkuboidaan vielä 10 vko	Ei
19	< 4	Näyte sisältää sulfideja	Kyllä

Taulukossa 1 on esitetty inkubaatioon käytetty aika viikkoina vasemmalla, jonka jälkeen näkyy sulfidisaven pH-arvo inkubaation jälkeen, inkubaation tulos sanallisesti kuvattuna ja oikealla ilmoitetaan, onko kyseessä sulfidisavi vai ei. Kolmannessa kohdassa taulukossa todetaan, että riittääkö yhdeksän viikon inkubaatioaika tuloksen saamiseen vai inkuboidaanko näytettä vielä kymmenen viikkoa lisää. Jos pH-arvo on alle 4, kyseessä on sulfidisavi.

4.2.2 Nopeutettu pH- inkubaatio

Perinteistä inkubointimenetelmää, joka kestää noin 9–19 viikkoa, voidaan tehostaa säätämällä useita tekijöitä, kuten inkubaation lämpötilaa, näytemäärää ja sekoitustiheyttä. Ympäristöministeriön (2022) tunnistusprojektin kokeiden perusteella havaittiin, että optimaalinen lämpötila inkuboinnilla on noin 30–40 astetta. Lisäksi näytteen paksuuden asettaminen 2–3 millimetriin sekä näytteiden sekoittaminen kaksi kertaa viikossa ovat olleet hyödyllisiä. Näiden muutosten ansiosta hapettumisaika on saatu lyhenemään alle viiteen viikkoon. (Autiola et al. 2022; Visuri et al. 2021)

Nopeutettu inkubointiaika on päättynyt, kun pH-arvo laskee mineraalimaissa alle 4 ja orgaanisissa materiaaleissa alle 3. Vaihtoehtoisesti inkuboinnin voidaan katsoa päättyneen, jos pH on vakiintunut. Tällöin voidaan todeta, että inkubointi on saavuttanut tavoitteensa ja näytteet ovat reagoineet toivottavalla tavalla. (Autiola et al. 2022; Visuri et al. 2021)

4.2.3 Rikkianalyysi

Kokonaisrikkipitoisuus on yleensä yhteydessä sulfidipitoisuuteen hapettumattomassa maaperässä, ja Suomessa sitä on hyödynnetty happaman sulfaattimaan tunnistamiseen. Lisäksi

kokonaisrikkipitoisuutta on käytetty riskiluokittelussa, erityisesti happamuuden arvioinnissa. Kuitenkin pelkästään kokonaisrikkipitoisuuden perusteella ei voida luotettavasti arvioida maan happamoitumista. (Visuri et al. 2021) Joissakin maaperätyypeissä, kuten liejussa, rikillä voi olla usein orgaaninen muoto. Tämä orgaaninen rikki ei kuitenkaan aiheuta samaa happamoitumista, joten pelkkä rikkipitoisuus ei riitä arvioimaan maan happamoitumista luotettavasti. (Auri et al. 2018)

Maanäytteistä rikki voidaan analysoida ICP-OES tekniikalla eli kuningasvesiliuotuksella. Kokonaisrikkipitoisuus voidaan mitata myös energiadiispersiivisellä röntgenfluoresensilla joko maastossa tai laboratoriossa. (Visuri et al. 2021) Rikkipitoisuusanalyysissä sulfidipitoisuuden (TRS) määrittäminen tarjoaa parhaan käsityksen happamuuspotentiaalista. Kuitenkin sen analysointi laboratoriossa (rikkispesiaatio) vaatii erityisosaamista, ja menetelmää ei yleisesti ole saatavilla kaupallisissa laboratorioissa. Sulfidipitoisuutta on analysoitu laboratorioissa myös polttomenetelmällä, mutta tämä menetelmä on todettu antavan virheellisiä tuloksia, sillä se mittaa todellisuudessa lähinnä kokonaisrikkipitoisuutta. (Autiola et al. 2022) Näiden menetelmien lisäksi rikkispesiaatiomenetelmällä pystytään analysoimaan pieniä pitoisuuksia pyriittiä (FeS_2), rautamonosulfideja (FeS) ja alkuainerikkiä (S^0). Ensiksi määritetään rautamonosulfidi ja pyriitti samasta maanäytteestä. Tämän jälkeen ne lasketaan yhteen ja niiden summasta saadaan määritettyä kokonaissulfidi. (Visuri et al. 2021)

4.2.4 Sähkönjohtavuus ja sulfaattipitoisuus

Sulfidien hapettuessa maaperässä syntyy sulfaattia (rikkihappoa), mikä lisää maaperän sähkönjohtavuutta. Tästä syystä hapetetun näytteen sähkönjohtavuuden mittausta voidaan käyttää happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen. Happaman sulfaattimaan tunnistaminen sulfaattipitoisuuden avulla perustuu kokonaisrikkipitoisuuden laskemiseen sulfaattipitoisuuden perusteella. Tämä kokonaisrikkipitoisuus on todettu olevan hyvin yhteydessä kuningasvesiliuotuksella analysoituihin pitoisuuksiin. Nämä menetelmät ovat erityisen hyödyllisiä potentiaalisen happaman sulfaattimaamateriaalin tunnistamiseen. (Autiola et al. 2022)

Mitattuja sulfaatti- ja sähkönjohtavuusarvoja tulkittaessa on tärkeää ottaa huomioon näytteen maalaji ja sen puskurikyky. Erityisesti sähkönjohtavuuden osalta on huomioita mahdollinen meriveden vaikutus. (Autiola et al. 2022) Merivedessä sulfaattipitoisuus ja sähkönjohtavuus ovat yleensä suuria. Maaperässä näiden vaikutukset ilmenevät korkeana

kloridipitoisuutena ja suurena SO₄/Cl-suhteena, mikä viittaa meriveden läsnäoloon. (Beucher et al. 2015)

Sulfaattipitoisuus ja sähkönjohtavuus eivät suoraan indikoi happamuusriskistä, vaan niiden tulokset on yhdistettävä pH-mittauksiin. Korkeat sulfaatti- ja johtolukuarvot voivat kuitenkin viitata korkeaan hapontuottopotentiaaliin ja olla hyödyllisiä riskinarviossa. (Visuri et al. 2021) Korroosiotutkimuksissa on määritetty sulfaattipitoisuudelle raja-arvot, jotka ovat 200 mg/l tai 500 mg/kg (Liikennevirasto 2023). Sen sijaan yleisesti hyväksytyjä rajoja sulfaattipitoisuuksille happamien sulfaattimaiden tunnistamiseksi tai luokittelemiseksi ei ole (Visuri et al. 2021). Sähkönjohtavuudesta pystytään laskemaan johtoluku, joka on erityisen hyödyllinen pelloilla vesiliukoisten suolojen pitoisuuden arvioimiseen maaperässä. Johtoluku saadaan jakamalla sähkönjohtavuus (μS/cm) sadalla. Jos johtoluku on korkea voi viitata happamiin sulfaattimaihin, joissa ravinteet ja pH-arvot ovat matalia. Tyypillisesti johtoluku on alle 2,5, ja jos se ylittää 10, on syytä tutkia syytä tarkemmin. Tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon, että sulfaatti saattaa olla huuhtoutunut maaperästä, ja syvemmissä sulfidikerroksissa saattaa olla jäljellä sulfaattituotannon potentiaalia. (Autiola et al. 2022)

Sähkönjohtavuuden ja sulfaattipitoisuuden analyysi voidaan tehdä eri tyyppisistä näytteistä, kuten inkuboidusta, laboratorio-olosuhteissa hapetetusta tai kentällä hapettuneesta näytteestä. Jos käytetään kentällä hapettunutta näytettä, on tärkeää huomioida, että pintakerroksen sulfaatti on voinut huuhtoutua. Tällöin alempana olevassa sulfidikerroksessa voi yhä olla merkittävästi sulfaattituotantopotentiaalia. Lisäksi visuaalisesti hapettuneessa maakerroksessa voi silti olla jäljellä hapettumatonta sulfidia, ja hapettuneen kerroksen sähkönjohtavuus voi tästä syystä olla matalampi kuin vetyperoksidilla hapetetussa näytteessä. (Autiola et al. 2022)

Sähkönjohtavuutta ja sulfaattipitoisuutta voidaan mitata myös maastossa. Sulfaattipitoisuutta voidaan mitata fotometrisesti maastoon sopivalla analysaattorilla. Tämä analyysimenetelmä perustuu sulfaatin saostumiseen bariumkloridin kanssa vesiliuoksessa. Lisäksi maanäytteen sähkönjohtavuus voidaan määrittää vesiliuoksesta johtokykykymittarilla (Autiola et al. 2022)

4.2.5 Muita tunnistamismenetelmiä

Happamia sulfaattimaita voidaan tunnistaa edellä mainittujen menetelmien lisäksi myös käyttämällä erilaisia kemiallisia analyysimenetelmiä, kuten hapontuottopotentiaalin ja Sobekin neutralointipotentiaalin mittausta. Hapontuottopotentiaali arvioi maan kykyä tuottaa happoja, kun taas Sobekin neutralointipotentiaali mittaa maan kykyä neutraloida happamuutta. Näiden menetelmien avulla voidaan arvioida happamien sulfaattimaiden ominaisuuksia tarkemmin ja saada lisätietoa siitä, miten ne käyttäytyvät eri ympäristöolosuhteissa. (Autiola et al. 2022; Kangas 2010)

Happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen on siis olemassa monia menetelmiä, jotka soveltuvat eri käyttötilanteisiin. Osa menetelmistä on kehitetty kenttäolosuhteisiin, joissa tunnistamisen tulee olla nopeaa ja kustannustehokasta, kun taas osa menetelmistä vaatii laboratoriolaitteistoa ja mahdollistaa tarkemmat analyysit. Näiden lisäksi tutkimus- ja kehitystyö jatkuu, ja uusia tunnistamismenetelmiä kehitetään jatkuvasti vastaamaan erityisesti teollisuuden ja ympäristönsuojelun tarpeita. (Autiola et al. 2022)

Tässä luvussa esiteltiin yleisimmät menetelmät, joita käytetään happamien sulfaattimaiden tunnistamiseen sekä maastossa että laboratoriossa. Näiden menetelmien valinta perustuu siihen, että ne ovat yleisimmin käytettyjä, niiden toimivuus on osoitettu tutkimuksissa, ja ne täyttävät tärkeät kriteerit, kuten tulospopeuden ja tarkkuuden. Lisäksi nämä menetelmät on valittu, koska ne ovat todettu käyttökelpoisiksi maanvastaanottoaikoilla.

5 Sulfidisaven tunnistaminen maanvastaanottopaikoilla

Tässä luvussa esitellään kirjallisuuteen perustuvat kriteerit, joita yrityksen edustaja on arvioinut tärkeydeltään viiden eri vaihtoehdon asteikolla. Jokainen kriteeri käsitellään erikseen, ja niiden kohdalla tarkastellaan niihin parhaiten sopivia tunnistamismenetelmiä.

5.1 Tunnistamisen kriteerit

Taulukko 2 esittelee haastattelun pohjalta sulfidisaven tunnistamismenetelmien käyttöönottoon vaikuttavat keskeisimmät tekijät. Nämä tekijät ovat määritetty kirjallisuudesta, mutta niiden tärkeys on arvioitu yrityksen haastattelussa. Keskeisimmät tekijät ovat tulonopeus (Visuri et al. 2021), kustannustehokkuus (Kangas 2010), tarkkuus (Visuri et al. 2021), kenttäkäyttömahdollisuus (Geologian tutkimuskeskus 2022b) ja nopea koulutusaika (Maa- ja metsätalousministeriö 2009).

Taulukko 2. Yrityksen edustajan mukaan määritetty tärkeys tunnistamismenetelmille.

Kriteeri	Tärkeys	Kuvaus
Tulonopeus	Tärkeä	Mitä nopeampi, sen parempi
Kustannukset	Melko tärkeä	Hinta vaikuttaa tunnistamisen kannattavuuteen
Tarkkuus	Vähän tärkeä	Kaikki tieto arvokasta. Epätarkemilla ja nopeammilla voidaan seuloa isoja massoja ja sen jälkeen tehdä tarkempia testejä
Kenttäkäyttömahdollisuus	Melko tärkeä	Kenttämenetelmät nopeuttavat prosessia
Helppokäyttöisyys ja koulutusaika	Ei tärkeä	Yrityksen työurat pitkiä, joten työntekijän kouluttaminen kannattaa

Haastattelun tulokset luokiteltiin vastauksien pohjalta viiden eri vaihtoehdon välillä. Vaihtoehdot ovat ”ei tärkeä”, ”vähän tärkeä”, ”melko tärkeä”, ”tärkeä” ja ”todella tärkeä”. Haastattelun kysymykset, joiden pohjalta taulukko on tehty löytyvät liitteestä 2.

5.1.1 Tulonopeus

Edellä mainittujen kriteerien perusteella tulonopeus on paras aistinvaraisessa tunnistamisessa, pH:n mittaamisessa vetyperoksidin avulla ja kokonaisrikkipitoisuuden mittaamisessa XRF-analysointorilla. Näissä kaikissa menetelmissä tulos saadaan heti tai viimeistään tunnin kuluessa (Visuri et al. 2021; Autiola et al. 2022). Aistinvarainen tunnistaminen maanvastaanottoaikoilla on nopein ja helpoin menetelmä aloittaa sulfidisaven tunnistus. Maan värin ja hajun arviointi tarjoaa nopean tavan tehdä arviointi tilanteesta, sillä musta väri ja rikkivedyn haju viittaavat usein sulfidisaviin (Geologian tutkimuskeskus 2020; Visuri et al. 2021). Tätä menetelmää voidaan tehostaa käyttämällä laimeaa suolahappoa mustan saven tunnistamisessa (Nystrand 2020).

Aistinvarainen tunnistaminen ei kuitenkaan yksinään riitä varmaksi menetelmäksi, koska sillä ei pystytä tarkasti erottamaan kaikkiin tilanteisiin liittyvää sulfidisavea eikä se anna riittäviä tietoja maaperän happamoitumisriskistä (Visuri et al. 2021). Tämä koituu ongelmaksi maanvastaanottoaikoilla, joissa käsitellään suuria määriä maa-aineksia. Aistinvarainen tunnistaminen onkin jo käytössä maanvastaanottoaikoilla, mutta se ei ole ollut yksistään tarpeeksi luotettava. Tarvitaan siis luotettavampi seulontamenetelmä joko korvaamaan aistinvaraisen tunnistuksen tai tukemaan sitä.

pH:n mittaaminen vetyperoksidin avulla on myös nopea tunnistamismenetelmä. Tämä menetelmä tuottaa nopeasti tuloksen, yleensä tunnin kuluessa, mikä tekee siitä käytännöllisen kenttäolosuhteissa (Visuri et al. 2021). Lisäksi sen tarkkuus on riittävä kenttätyöhön, vaikkakin se ei ole aivan yhtä tarkka kuin laboratoriossa tehtävät inkubaatiotestit. Vetyperoksidin käyttö pH-mittauksessa on jonkin verran työläämpi kuin aistinvarainen tunnistaminen, mutta se tarjoaa huomattavasti tarkemman tuloksen.

Menetelmällä on kuitenkin yksi merkittävä haittapuoli: jos maassa on runsaasti orgaanista ainesta, vetyperoksidin käyttö voi aiheuttaa pH:n laskun, vaikka todellista happamoitumisriskiä ei olisi. (Visuri et al 2021; Nystrand 2020). Tästä huolimatta pH-mittaus vetyperoksidilla on nopea menetelmä, joka soveltuu hyvin maanvastaanottoaikojen tarpeisiin.

Kokonaisrikkipitoisuuden mittaaminen XRF-analysointorilla tuottaa nopean tuloksen ja soveltuu myös kenttäkäyttöön. Vaikka XRF-analysointorin hinta on korkea, yrityksellä on jo laite käytössä, joten sen hankinnasta ei aiheudu lisäkustannuksia. Rikkipitoisuuden

mittaaminen ei kuitenkaan yksinään riitä luotettavaan maaperän happamoitumisriskin arviointiin, mutta se toimii tehokkaana alustavana kartoitusmenetelmänä (Auri et al. 2018).

Tämä menetelmä on hyödyllinen maanvastaanottoaikoilla, erityisesti silloin, kun maamassoja saapuu samalta työmaalta suuria määriä nopealla aikataululla. XRF-analyysin avulla maa-ainekset voidaan erotella ennalta valmiustoimenpiteitä varten. Kun tarkemmat analyysitulokset ovat saatavilla, voidaan tehdä tarvittavat toimenpiteet niiden perusteella. Tämä ennakoiva lähestymistapa auttaa hallitsemaan riskejä ja sujuvoittaa toimintaa maanvastaanottoaikoilla.

5.1.2 Kustannustehokkuus

Kustannustehokkaisiin menetelmiin kuuluvat erityisesti aistinvarainen tunnistus ja pH-mittaaminen kenttäolosuhteissa, sillä nämä menetelmät eivät vaadi suuria laiteinvestointeja tai pitkiä analyysiaikoja. Aistinvarainen tunnistus voidaan tehdä nopeasti havaitsemalla sulfidisavelle tyypillisiä piirteitä, kuten värimuutoksia ja hajua (Visuri et al. 2021). Kenttä-pH-mittauksilla taas saadaan nopeasti tietoa maan happamuudesta, mikä on yksi keskeisimmistä tunnistuskriteereistä happamien sulfaattimaiden tunnistamisessa (Autiola et al. 2022). Molemmat menetelmät ovat joustavia ja soveltuvat hyvin paikan päällä tehtäviin arviointeihin, mikä tekee niistä taloudellisesti houkuttelevia erityisesti maanvastaanottoaikoilla.

Laboratoriossa tehtävät analyysit ovat yleensä kentätunnistusta kalliimpia, mutta niiden avulla voidaan saavuttaa suurempi tarkkuus ja luotettavuus. Laboratoriomenetelmistä kustannustehokkain on nopeutettu pH-inkubaatio, jossa maanäytteen pH-muutosta seurataan tietyn ajan kuluessa. Nopeutetun inkubaation etuna on sen lyhyt analyysiaika, sillä pH-muutos happamien sulfaattimaiden kohdalla voi näkyä jo muutaman päivän sisällä (Visuri et al. 2021). Tämä menetelmä mahdollistaa kustannusten ja ajankäytön optimoinnin laboratorioolosuhteissa, mikä tekee siitä hyvän vaihtoehdon silloin, kun tarvitaan tarkempaa tietoa sulfaattipitoisuuksista ja maan happamuuspotentiaalista.

Maanvastaanottoaikailla on jo käytössä XRF-analyysaattori, joten myös se voidaan tässä tapauksessa luokitella kustannustehokkaaksi menetelmäksi. Vaikka laitetta ei alun perin hankittu erityisesti sulfidisaven tunnistamiseen, se osoittautuu hyödylliseksi myös tässä tarkoituksessa. Näin ollen XRF-analyysaattorin käyttö sulfidisaven tunnistamiseen tuo lisäarvoa

ilman erillisiä laitehankintakustannuksia, mikä tukee taloudellista ja toiminnallista tehokkuutta.

5.1.3 Tarkkuus

Tarkimpia menetelmiä ovat yleisesti laboratoriossa tehtävät menetelmät. Näitä ovat perinteinen pH-inkubaatio, nopeutettu pH-inkubaatio, rikkianalyysi sekä sähkönjohtavuuden ja sulfaattipitoisuuden selvittäminen. Näistä tarkimmat ovat perinteinen pH-inkubaatio ja kokonaisrikkipitoisuuden määrittäminen, koska niihin perustuu tämän hetkiset happamien sulfaattimaiden luokitukset (Visuri et al. 2021; Creeper et al. 2012). pH-inkubaatiota voidaan käyttää, kun tarvitaan erittäin tarkkaa analyysiä, esimerkiksi tieteellisissä tutkimuksissa tai silloin, kun maaperän happamoitumisprosessi halutaan ymmärtää perusteellisesti ja pitkäaikaisesti. Tämä menetelmä on erityisen hyödyllinen silloin, kun epäillään, että maaperän happamoituminen tapahtuu hitaasti tai kun kenttätestien perusteella maaperän puskurikapasiteetti on suuri.

Nopeutetun pH-inkubaation on todettu olevan lähes yhtä tarkka kuin perinteisen pH-inkubaation. Nopeutetulla inkubaatiolla voidaan saavuttaa luotettavia tuloksia huomattavasti lyhyemmässä ajassa verrattuna perinteiseen pH-inkubointiin, joka kestää tavallisesti 9–19 viikkoa. (Visuri et al. 2021) Kokonaisrikkipitoisuus on myös tarkka menetelmä sulfidisaven tunnistamiseen, koska maanäytteen rikkipitoisuus vastaa hyvin siinä olevaa sulfidipitoisuutta ja hapontuottopotentiaalia (Autiola et al. 2022). Tämä sopisi myös tarkkuuden kannalta hyvin maanvastaanottoaikoille. Happaman sulfaattimaan selvityksen lisäksi kokonaisrikkipitoisuuden selvittämisellä voidaan saada tietoa myös maanäytteiden rautamono-sulfidi- ja pyriittipitoisuuksia (Visuri et al. 2021). Rikkipitoisuuden määrittäminen on siis tarkkuutensa puolesta todella hyvä menetelmä happamien sulfaattimaiden selvittämiseen.

Sähkönjohtavuuden ja sulfaattipitoisuuden mittaukset voivat myös toimia hyvin tukena, kun halutaan varmistaa kenttätestien tulosten luotettavuus. Nämä menetelmät voivat antaa nopeasti lisätietoa maaperän sulfaattipitoisuudesta ja sähkönjohtavuudesta, jotka molemmat ovat tärkeitä indikaattoreita sulfidisavien happamoitumisprosessissa. Ne voivat auttaa arvioimaan, kuinka nopeasti maaperä reagoi hapettumiseen ja miten sen pH kehittyy ajan mittaan (Visuri et al. 2021).

5.1.4 Kenttäkäyttömahdollisuus

Kenttäkäyttömahdollisuus on olennaista kaikissa maastossa tehtävissä menetelmissä, kuten aistinvaraisessa tunnistamisessa, pH-mittauksessa ja rikkipitoisuuden analysoinnissa XRF-analysaattorin avulla. Näiden menetelmien etuna on, että ne voidaan suorittaa paikan päällä ilman, että näytteitä täytyy lähettää laboratorioon analysoitaviksi. Tämä vähentää kustannuksia ja säästää aikaa, mikä tekee kenttämenetelmistä erityisen houkuttelevia nopeaa päätöksentekoa vaativissa tilanteissa, kuten maanvastaanotto- paikoilla.

5.1.5 Helppokäyttöisyys ja koulutusaika

Vaikka helppokäyttöisyys ja koulutusaika eivät olleet yrityksen ensisijaisia kriteerejä menetelmien valinnassa, näiden tekijöiden huomioiminen voi olla hyödyllistä arvioitaessa menetelmien soveltuvuutta eri työympäristöihin. Kenttäolosuhteissa helppokäyttöisimmät menetelmät ovat aistinvarainen tunnistus, pH-mittaus ja XRF-analysaattori. Nämä menetelmät ovat nopeasti omaksuttavissa ja mahdollistavat analyysien tekemisen paikan päällä ilman erityiskoulutusta.

Koska helppokäyttöisyys ei ollut yritykselle ensisijainen kriteeri, myös laboratoriomenetelmiä voidaan pitää soveltuvina vaihtoehtoina. Laboratoriomenetelmät tarjoavat korkeaa tarkkuutta, mutta ne ovat usein monimutkaisempia ja edellyttävät erikoisosaamista sekä laitteistoa (Autiola et al. 2022). On kuitenkin syytä huomata, että laboratoriomenetelmät ulkoistetaan usein muille toimijoille, jolloin yrityksen henkilökunnan ei tarvitse hallita niitä itse. Tämä ulkoistus mahdollistaa yritykselle tarvittavat tarkat tulokset ilman lisäkoulutusta tai laboratoriolaitteistoon investoimista.

5.2 Parhaimmat tunnistamismenetelmät maanvastaanotto- paikoille

On vaikea todeta parhaiten sopivia tunnistamismenetelmiä sulfidisavelle maanvastaanotto- paikoilla, koska jokaisessa menetelmässä on omat plussat ja miinukset. Taulukossa 3 nähdään, miten eri tunnistamismenetelmät täyttävät kirjallisuudesta määritetyt kriteerit. Kriteerit ovat järjestetty yrityksen mukaan tärkeyden perusteella. Vasemmalla on tärkein kriteeri ja oikealla vähiten tärkein.

Taulukko 3. Tunnistamismenetelmien kriteerien täyttäminen.

Menetelmät/ kriteerit	Tulosno- peus	Kustannustehok- kuus	Kenttäkäyttömah- dollisuus	Tarkkuus	Helppokäyttöi- syys
Aistinvarainen tunnistaminen	x	x	x		x
pH-mittaus	x	x	x		x
XRF-analysaat- tori	x		x		x
pH-inkubaatio				x	
Nopeutettu pH- inkubaatio		x		x	
Rikkianalyysi				x	
Sähkönjohta- vuus ja sulfaat- tipitoisuus				x	

Taulukossa 3 esitettävät kriteerit on määritelty työn kirjoittajan kirjallisuuteen perustuvan arvioinnin pohjalta. Esimerkiksi taulukossa tulosnopeus tarkoittaa, että tuloksen saa tunnin kuluessa näytteenotosta. Kustannustehokkuus on määritelty siten, että menetelmän käytön kustannukset pysyvät maltillisina; esimerkiksi laboratoriomenetelmät ovat kalliimpia, koska ne vievät aikaa ja vaativat ulkopuolisen laboratorion palveluita. Kenttäkäyttömahdollisuus tarkoittaa, voiko tunnistusmenetelmää käyttää suoraan maastossa vai onko näyte lähetettävä laboratorioon. Tarkkuus määrittelee, voidaanko menetelmän tuloksiin luottaa itsenäisesti ilman lisävarmistuksia. Helppokäyttöisyys puolestaan kuvaa sitä, kuinka vaivattomasti

henkilökunta voidaan kouluttaa käyttämään menetelmää ja kuinka yksinkertainen sen käyttö on. Laboratoriomenetelmät eivät usein ole helppokäyttöisiä, sillä niiden suorittaminen edellyttää erityisesti koulutettua henkilöstöä.

Taulukon 3 perusteella aistinvarainen tunnistaminen ja pH-mittaus täyttävät useimmat kriteerit, mutta tämä ei tarkoita, että ne olisivat tunnistamisen kannalta parhaat mahdolliset menetelmät. Toisaalta pH-inkubaatio ja rikkianalyysi ovat tarkimpia menetelmiä, vaikka ne eivät täytäkään kaikkia muita arviointikriteerejä. Tämä ei kuitenkaan heikennä niiden arvoa tunnistusmenetelminä. Voidaankin päätellä, että pelkän taulukon perusteella ei ole mahdollista arvioida tunnistusmenetelmien kokonaisvaltaista sopivuutta maanvastaanottoaikoille.

Tehokas tapa tunnistaa sulfidisavi on yhdistää kaksi eri menetelmää. Aluksi käytetään kenttämenetelmää seulontaan, ja tämän jälkeen tulokset vahvistetaan laboratoriomenetelmällä. Näin muodostuu ensiarvio sulfidisaven olemassaolosta, ja lopullinen tunnistus tarkentuu myöhemmin laboratoriossa. Joissakin tapauksissa myös kahden kenttämenetelmän yhdistelmä voi riittää antamaan riittävän tarkan käsityksen sulfidisaven olemassaolosta. Prosessin tehostamiseksi tarvitaan myös uusia, nopeampia ja tarkempia menetelmiä, sillä nykyiset menetelmät eivät vielä täytä kaikkia tunnistamisen vaatimuksia maanvastaanottoaikoilla.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa selvitettiin erilaisia sulfidisaven tunnistamismenetelmiä ja perehdyttiin tarkemmin yleisimmin käytettyihin menetelmiin. Lisäksi kartoitettiin, mitkä menetelmät soveltuivat parhaiten maanvastaanottoaikoille, missä sulfidisaven luotettava tunnistaminen on erityisen tärkeää. Vaikka sulfidisaven tutkimus on ollut laajaa, sitä ei ole aiemmin käsitelty maanvastaanoton näkökulmasta, mikä on tämän työn uutuusarvo ja tavoite.

Tämän työn tulokset antavat vahvan pohjan tuleville tutkimuksille ja käytännönsovelluksille sulfidisaven tunnistamiseen liittyen. Tulokset osoittivat, että yksittäistä, kaikilta osin parasta tunnistamismenetelmää ei löytynyt. Jokaisella menetelmällä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa, eivätkä ne yksinään täytä kaikkia tunnistamisen kriteereitä. Kenttäkäyttöön soveltuvat seulontamenetelmät ovat hyödyllisiä suurten maamassojen nopeaan tarkasteluun, vaikka niiden tarkkuus jää laboratoriomenetelmiä heikommaksi. Parhaan tuloksen saavuttamiseksi tulee käyttää kahta erilaista menetelmää: kenttämenetelmää seulontavaiheessa alustavien havaintojen tekemiseen ja laboratoriomenetelmää varmistamaan sulfidisaven esiintyminen tarkemmin. Näin saadaan suhteellisen nopeasti kokonaiskuva maamassojen laadusta ja voidaan tarvittaessa tehdä lisäanalyyssejä. Lisäksi työ toi esiin tarpeen kehittää uusia, nykyisiä nopeampia ja tarkempia menetelmiä, jotka täyttäisivät kaikki sulfidisaven tunnistamiselle asetetut kriteerit ja sopisivat käytettäviksi myös rakennusprojektien alkuvaiheessa.

Työssä esiintyi termistöongelmia, sillä sulfidisavella ja happamilla sulfaattimailla on useita erilaisia merkityksiä. Eri lähteet käyttivät vaihtelevaa terminologiaa, ja samaa termiä saatettiin käyttää eri asiayhteyksissä. Tästä syystä työssä viitataan usein happamiin sulfaattimaihin sen sijaan, että käytettäisiin termiä sulfidisavi. Kuitenkin useiden lähteiden perusteella sulfidisavi kuuluu happamiin sulfaattimaihin. Termistöongelman vuoksi kaikkia lähteitä ei voinut käyttää, koska ei ollut varmuutta puhutaanko niissä sulfidisavesta vai esimerkiksi todellisista happamista sulfaattimaista. Termistöongelman lisäksi tutkimusta rajoitti se, että kaikkiin tieteellisiin artikkeleihin ei päässyt ilmaiseksi käsiksi tai niitä ei enää löytynyt internetistä eikä yliopiston kirjastosta. Nämä jouduttiin jättämään työn ulkopuolelle, joten ei välttämättä saatu niin kattavaa tietoa kuin olisi haluttu.

Työssä käytetyillä tutkimusmenetelmillä, eli kirjallisuuskatsauksella ja asiantuntijahaastatteluilla, saatiin kattava yleiskuva sulfidisavesta ja sen tunnistamisesta. Kirjallisuuskatsauksen avulla koottiin olemassa oleva tieto aiheesta, kun taas asiantuntijahaastattelu toi esiin käytännön näkökulmia sulfidisaven tunnistamisen kriteerien tärkeydestä maanvastaanoton kannalta. Lisää ja enemmän tietoa sulfidisaven tunnistamisesta olisi saanut, jos olisi tehnyt asiantuntijahaastatteluja enemmän.

Jatkotutkimuksessa voisi keskittyä kehittämään uusia, nopeampia ja tarkempia tunnistamismenetelmiä, jotka täyttäsivät yleisimmät tunnistamiskriteerit. Tällaisista menetelmistä olisi hyötyä paitsi maanvastaanottoaikoilla, myös erilaisissa rakennushankkeissa, joissa sulfidisavi on tärkeää tunnistaa jo varhaisessa vaiheessa. Lisäksi sulfidisaven tunnistamista olisi hyödyllistä tarkastella yhtenäisemmin määritellyn terminologian avulla, mikä parantaisi tutkimusten vertailtavuutta ja mahdollistaisi kattavamman käsityksen eri tunnistamismenetelmien tehokkuudesta.

Lähteet

- Auri et al. 2018. Opas happamien sulfaattimaiden kartoitukseen turvetuotantoalueilla. [verkkodokumentti]. [viitattu 24.10.2024]. Saatavissa: <https://www.syke.fi/download/no-name/%7B24F8EF50-DB7D-40CE-9FD7-870C8494D937%7D/135567>
- Autiola, M. et al. 2022. Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.10.2024]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163782/YM_2022_3.pdf
- Betoniteollisuus ry. 2017. Betoniset viemäri- ja hulevesijärjestelmät- suunnittelu ja toteutus. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.9.2024]. Saatavissa: https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/04/Betoniset_viemari_ja_hulevesijarjestelmat.pdf
- Beucher, A. et al. 2015. Assessment of acid sulfate soil mapping utilizing chemical indicators in recipient waters. Bulletin of the Geological Society of Finland 87, s. 5-23.
- Creeper, N., Fitzpatrick, R. Shand, P. 2012. A simplified incubation method using chip-trays as incubation vessels to identify sulphidic materials in acid sulphate soils. Soil use and management. British Society of soil Science, s. 1–7.
- Edén, P. et al. 2023. Mapping, impacts, characterization and extent of acid sulfate soils in Finland. Bulletin of the geological society of Finland 95, s. 135–160.
- Estévez, V. et al. 2024. Acid sulfate soil mapping in western Finland: How to work with imbalanced datasets and machine learning. Geoderma 447.
- Fanning, D.S. Rabenhorst, M.C. Fitzpatrick, R.W. 2017. Historical developments in the understanding of acid sulfate soils. Geoderma 308, s. 191–206.
- Geologian tutkimuskeskus. 2024. Vastuullisuus. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.11.2024]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/gtk/vastuullisuus/>
- Geologian tutkimuskeskus. 2022a. Happamat sulfaattimaat. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.9.2024]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/wp-content/uploads/2021/09/HasuDigi-YleisHasu-Oulungeologia-J-Raisanen.pdf>

Geologian tutkimuskeskus. 2022b. Happamat sulfaattimaat- karttapalvelu. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.10.2024]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/palvelut/aineistot-ja-verkkopalvelut/karttapalvelut/>

Geologian tutkimuskeskus. 2022c. Yleiskartoituksesta riskienhallintaan- sulfaattimaat ovat Suomen sitkein ympäristöhaitta, mutta vaikutuksia ehkäistään tutkimuksen avulla. [artikkeli]. [viitattu 14.9.2024]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/ajankohtaista/yleiskartoituksesta-riskienhallintaan-sulfaattimaat-ovat-suomen-sitkein-ymparistohaitta-mutta-vaikutuksia-ehkaistaan-tutkimuksen-avulla/>

Geologian tutkimuskeskus. 2020. Happamien sulfaattimaiden kartoitukset rannikkoseudulla kesällä 2020. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.9.2024]. Saatavissa: <https://www.gtk.fi/ajankohtaista/happamien-sulfaattimaiden-kartoitukset-rannikkoseudulla-kesalla-2020/>

Hagmark, J. 2024. Aluepäällikkö, NCC Industry Oy. Etelä- ja Itä-Suomi. Henkilöhaastattelu 10.10.2024.

Harmanen, H. 2007. Sulfaattimaat ja seleeni. Helsingin yliopiston Maatalous- metsätieteellinen tiedekunta. Licensiaatintutkimus. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.9.2024]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/1975/7633/4/Acr36.tmp.pdf>

Hakala, H. Välimäki, J. 2003. Ympäristön tila ja suojele Suomessa. 2. painos. Helsinki: Gaudeamus. ISBN 951-662-875-3

Hirsijärvi, S. Hurme, H. 2022. Tutkimushaastattelu: teemahaastattelun teoria ja käytäntö. 2. painos. Helsinki: Gaudeamus. ISBN 978-952-345-812-3

Härkönen, L. Nieminen, T. 2019. Mitä ovat happamat sulfaattimaat? [verkkodokumentti]. [viitattu 22.9.2024]. Saatavissa: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2019/10/Mita_ovat_happamat_sulfaattimaat-Harkonen_ja_Nieminen-1.pdf

Ilonen, E. 2021. Happamien sulfaattimaiden hapettuminen. Reaktioihin vaikuttavat tekijät, tutkimusmenetelmät ja ympäristöriskien hallinta. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.9.2024]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/505159>

Kangas, J. 2010. Happamien sulfaattimaiden luokitus. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.10.2024]. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/10024/123377/4/opin_2016-07_978-952-317-259-3.pdf

- Laine-Ylijoki, J. Syrjä, J-J. Wahlström, M. 2003. Röntgenfluorenssimenetelmät kierrätyspolttoaineiden pikalaatuvalvonnassa. Espoo: Otamedia Oy. ISBN 951-38-6184-8
- Liikennevirasto. 2023. Eurokoodin soveltamisohje- Geotekninen suunnittelu- NCCI 7. Liikenneviraston ohjeita 14/2023. Liite 5.
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2009. Kohti happamien sulfaattimaiden hallintaa. Ehdotus happamien sulfaattimaiden aiheuttamien haittojen vähentämisen suuntaviivoiksi. [verkkodokumentti]. [viitattu 26.10.2024]. Saatavissa: https://mmm.fi/documents/1410837/1790801/trm2009_8.pdf/aafbec0-b099-4ba5-8b90-39648f807763/trm2009_8.pdf
- Maaseutuverkosto. 2009. Happamat sulfaattimaat [verkkodokumentti]. [viitattu 14.9.2024]. Saatavissa: <https://www.salaojayhdistys.fi/2022/03/happamat-sulfaattimaat-2/>
- NCC Industry Oy. 2024. NCC Industry Oy:n sisäinen dokumentti. [verkkodokumentti]. [viitattu 5.11.2024].
- Nystrand, M. 2020. Happamien sulfaattimaiden tunnistaminen ja riskinarviointi pikamenetelmin- Kenttädemon vaiheiden läpikäynti. [verkkodokumentti]. [viitattu 20.9.2024]. Saatavissa: <https://www.syke.fi/download/noname/%7B7CD358EE-84AE-4255-BD2B-D38C9EA0FAEE%7D/161837>
- Olympus. 2019. Fast, affordable material ID with Vanta Element XRF. [verkkodokumentti]. [viitattu 11.10.2024]. Saatavissa: https://www.olympus.fi/company/en/news/press-releases/2019-09-11t13-26-16/press-release-detail-page_23361.html
- Saarela, A. Harmanen, H. Tuorila, J. 2014. Happamien sulfaattimaiden huomioiminen tilusjärjestelyissä. [verkkodokumentti]. [viitattu 22.9.2024]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/87306/B97.pdf?sequence=1>
- Saresma, M. et al. 2023. Statistical approach to identify variables predicting sulphide clay occurrence in southern Finland. Bulletin of engineering geology and the environment.
- Sutela et al. 2012. Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat vesistövaikutukset ja kalakuolemat Suomessa. [verkkodokumentti]. [viitattu 14.9.2024]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/items/71157ded-37f2-43f3-8970-3234874f8ea3>

Temotek Oy. 2018. Sulfaattimaaselvitys. [verkkodokumentti]. [viitattu 18.9.2024]. Saatavissa: [https://www.oukapalvelut.fi/tekninen/Suunnitelmat/Nayta_Liite.asp?ID=10079&Liite=564-2266%20\(Raja-Taskila\)%20Sulfaattimaaselvitys%20liitteineen%2021.2.2018%20saav.pdf](https://www.oukapalvelut.fi/tekninen/Suunnitelmat/Nayta_Liite.asp?ID=10079&Liite=564-2266%20(Raja-Taskila)%20Sulfaattimaaselvitys%20liitteineen%2021.2.2018%20saav.pdf)

Vilka, H. 2023. Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina. Helsinki: Art House. ISBN 978-951-884-944-8

Vertanen, E. 2016. Sulfaattimaiden tunnistaminen, riskienhallinta ja käsittely väylähankkeissa. [verkkodokumentti]. [viitattu 25.9.2024]. Saatavissa: <https://www.doria.fi/handle/10024/123377>

Visuri, M. 2020. Happamien sulfaattimaiden tunnistaminen ja riskien arviointi. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.9.2024]. Saatavissa: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/11/Sulfaattimaiden-tunnistus_Mirkka_Visuri_6.11.2020.pdf

Visuri, M. et al. 2021. Maastokäyttöisten tunnistusmenetelmien kehittäminen happamille sulfaattimaille. Tunnistushankkeen loppuraportti. [verkkodokumentti]. [viitattu 30.10.2024] Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/items/50683c00-c65a-47d8-9574-4a6d9bb1c055>

Liite 1. Lähteiden valintakriteerit

Lähdetyyppi/ kriteeri	Luotettavuus	Julkaisuvuosi	Lähdeviitteet	Asiantuntemus	Kohdeyleisö
Tieteelliset artikkelit	x	x	x	x	x
Kirjat	x		x	x	
Tutkimukset	x	x		x	
Opinnäytetyöt		x	x		x
Muut lähteet	x	x		x	

Tässä taulukossa on esitetty kandidaatintyössä käytetyt lähteet vasemmalla ja niiden arviointikriteerit ylhäällä. Kriteerit kuvaavat syitä, joiden perusteella nämä lähteet on valittu. Luotettavuus tarkoittaa, että kirjoittajana olen arvioinut lähteen ja siinä esitetyn tiedon paikkansapitäväksi ja luotettavaksi. Julkaisuvuosi varmistaa, että lähteet ovat riittävän uusia ja ajantasaisia, eivätkä esimerkiksi kymmeniä vuosia vanhoja. Lähdeviitteet osoittavat, että lähteissä on viitattu muihin tutkimuksiin tai julkaisuihin, mikä lisää niiden uskottavuutta. Asiantuntemus tarkoittaa, että lähteiden kirjoittajina on ollut happamien sulfaattimaiden asiantuntijoita, mikä parantaa tietojen luotettavuutta ja syvällisyyttä. Kohdeyleisö viittaa siihen, että tieto on suunnattu lukijoille, joilla on jonkin verran ymmärrystä happamista sulfaattimaista. Näiden kriteerien perusteella taulukossa näkyvät lähteet ovat valittu tähän kirjallisuuskatsaukseen.

Liite 2. Haastattelukysymykset

1. Kuinka tärkeää on saada tulos maanäytteistä nopeasti?
2. Mikä on hyväksyttävä aikaraja tuloksen saamiselle?
3. Kuinka paljon menetelmän hinta vaikuttaa päätökseen käyttää menetelmää? Rajoitavatko kustannukset menetelmän valintaa?
4. Kuinka tärkeä kustannustehokkuus on tunnistamismenetelmissä? Miten se vertautuu tarkkuuden tai nopeuden tärkeyteen?
5. Kuinka tarkka tunnistusmenetelmän tulee olla? Mikä on riittävä tarkkuustaso?
6. Voidaanko tunnistamiseen käyttää nopeampia, mutta vähemmän tarkkoja menetelmiä?
7. Kuinka tärkeää on, että tunnistusmenetelmä toimii kenttäolosuhteissa?
8. Onko helppokäyttöisyys ja lyhyt koulutusaika menetelmän käyttöön tärkeää?