Parhaat käytännöt sulfidipitoisten maa-ainesten kestävään stabilointiin ja hyötykäyttöön

2026

Eva Högfors-Rönnholm, Sten Engblom, Christian Maurice, Ramesh Kumar Thakur, Abdalla Saafan, Qi Jia, Erik Rosenbaum, Evelina Engman, Fredrik Lindberg, Mats Åström, Mark Dopson, Anders Johnson

Interreg Aurora
Co-funded by the European Union
Regional Council of Lapland
Region Norrbotten
region västerbotten
Yrkeshögskolan Novia
Novia University of Applied Sciences
Luleå University of Technology
Umeå Deponi & Avfallscenter
Linnæus University

Eva Högfors-Rönnholm, Sten Engblom (Yrkeshögskolan Novia), Christian Maurice, Ramesh Kumar Thakur, Abdalla Saafan, Qi Jia (Luleå tekniska universitet), Erik Rosenbaum, Evelina Engman, Fredrik Lindberg (Umeå deponi och avfallscenter AB), Mats Åström, Mark Dopson, Anders Johnson (Linnéuniversitetet).

Parhaat käytännöt sulfidipitoisten maa-ainesten kestävään stabilointiin ja hyötykäyttöön

Yrkeshögskolan Novia, Wolffintie 31, 65200 Vaasa, Suomi
© Yrkeshögskolan Novia ja Högfors-Rönnholm, Engblom, Maurice, Kumar Thakur, Saafan, Jia, Rosenbaum, Engman, Lindberg, Åström, Dopson, Johnson.

Kansikuva Christian Maurice.

Novia Publikation och produktion, serie R: Rapporter 19/2026

ISSN: 1799-4179

ISBN: 978-952-7526-89-7 (Online)

CC BY 4.0

Esipuhe

Vihreä siirtymä tuo mukanaan merkittäviä investointeja infrastruktuuriin, teollisuuteen ja yhdyskuntakehitykseen Pohjois-Suomessa ja Ruotsissa. Teiden, rautateiden, teollisuusalueiden ja muun yhteiskunnan kannalta tärkeän infrastruktuurin rakentaminen edellyttää suurten maamäärien kaivamista. Interreg Aurora -ohjelma-alueen rannikkoseuduilla tämä tarkoittaa usein sitä, että sulfidimaita kohdataan ja niitä on käsiteltävä ympäristön kannalta turvallisella ja kestävällä tavalla.

Parhaat käytännöt sulfidipitoisten maa-ainesten kestävään stabilointiin ja hyötykäyttöön (MinImpact) -hanke toteutettiin vuosina 2023–2026 yhteistyössä Suomessa toimivan korkeakoulun Yrkeshögskolan Novia sekä Ruotsissa toimivien organisaatioiden Luleå tekniska universitet, Umeå deponi och avfallscenter AB ja Linnéuniversitetet kanssa. Hankkeen pääasiallisena rahoittajana toimi Interreg Aurora. Lisäksi hanketta osarahoittivat Lapin liitto Suomessa sekä Region Norrbotten ja Region Västerbotten Ruotsissa.

Hankkeen lähtökohtana oli kasvava tarve yhteisille ja käytännössä hyödynnettäville menetelmille kaivettujen sulfidimaiden käsittelyssä. Perinteisesti nämä maa-ainekset on usein sijoitettu maankaatopaikoille, mikä voi aiheuttaa sekä korkeita kustannuksia että ympäristöhaasteita. Samalla on olemassa merkittävä potentiaali kehittää menetelmiä, jotka mahdollistavat maiden turvallisen uudelleenkäytön ja vähentävät siten kaatopaikkasijoituksen sekä uusien materiaalien käytön tarvetta.

Rajat ylittävän yhteistyön avulla hanke on lisännyt tietoa sulfidimaiden ominaisuuksista, riskeistä ja uudelleenkäyttömahdollisuuksista. Tulosten tavoitteena on tukea viranomaisia, konsultteja, urakoitsijoita ja muita toimijoita sulfidimaita sisältävien hankkeiden suunnittelussa, lupakäsittelyssä ja toteutuksessa.

Tämä raportti kokoaa yhteen hankkeen tärkeimmät kokemukset ja tulokset sekä esittelee suosituksia ja parhaita käytäntöjä sulfidimaiden kestävämpään käsittelyyn ja uudelleenkäyttöön. Tavoitteena on, että raportti toimii käytännön tukena tulevalle päätöksenteolle ja edistää alueen resurssitehokasta kehitystä ympäristövaikutukset mahdollisimman vähäisinä pitäen.

Eva Högfors-Rönnholm

Hankekoordinaattori

Yrkeshögskolan Novia

eva.hogfors-ronnholm@novia.fi

Sisällys

1 Johdanto 1

2 Usein kysyttyä sulfidimaasta 3

3 Sulfidimaamassojen käsittely läjityksissä ja kaatopaikoilla 5

3.1 Vedenalainen sijoittaminen 5

3.1.1 Periaate – menetelmän toimintatapa 5

3.1.2 Vedenalaisen loppusijoituksen arviointi 6

3.1.3 Tulokset 6

3.1.4 Johtopäätökset 7

3.2 Sulfidimaamassoista rakennetut läjitysalueet, meluvallit ja vastapenkereet 7

3.2.1 Periaate – käsittelemättömän sulfidimaan hyödyntäminen rakenteissa 7

3.2.2 Määrittävät tekijät – läjitysalueen sijoittuminen ja rakenteellinen toteutus 7

3.2.3 Materiaalien ominaisuuksien määrittäminen – laboratorio- ja kenttäkokeet 8

3.2.4 Dåva Norra -läjitysalueen kuvaus 10

3.2.5 Arviointi 13

3.2.6 Johtopäätökset 15

3.3 Sulfidimaan läjitys kuivatuissa olosuhteissa 16

3.3.1 Periaate – maaperän happamoitumisen ehkäiseminen 16

3.3.2 Neutralointimenetelmien arviointi 16

3.3.3 Tulokset 18

3.3.4 Johtopäätökset 19

4 Hapettuneen sulfidimaan uudelleenvettäminen (happaman sulfaattimaan käsittely) 22

4.1 Periaate – hapettuneen sulfidimaan palauttaminen sulfidimaaksi 22

4.2 Uudelleenvettämisen arviointi 22

4.3 Tulokset 24

4.4 Johtopäätökset 26

5 Sulfidimaan geotekninen stabilointi 27

5.1 Periaate – sulfidimaan ominaisuuksien parantaminen sideaineilla 27

5.2 Sideaineen valinta ja mitoitus 28

5.3 Sekoitusmenetelmä 29

5.4 Sideaineiden vaikutus geokemiaan ja mikrobiologiaan 30

5.5 Sideaineiden vaikutus lujuuteen 30

5.6 Johtopäätökset 32

6 Sulfidimaiden käsittelyyn liittyvä lainsäädäntö 35

6.1 Ruotsi 35

6.2 Suomi 38

7 Lähteet 40

1 Johdanto

Sulfidipitoisia hienorakeisia maita, pääasiassa savea ja silttiä, esiintyy yleisesti Pohjanlahden rannikkotasangoilla. Ne muodostuivat viime jääkauden jälkeen merenpohjissa hapettomissa olosuhteissa. Jääkauden jälkeisen maankohoamisen myötä nämä maat ovat vähitellen kohonneet merenpinnan yläpuolelle, ja niitä esiintyy nykyään jokilaaksoissa ja alavilla rannikkoalueilla, jotka ovat usein asutuksen ja infrastruktuurin kannalta erittäin merkittäviä (Åström & Björklund, 1997; Sohlenius ym., 2015). Useat suuret kaupungit Pohjois-Ruotsissa ja Suomessa sekä tärkeät liikenneväylät sijaitsevat sulfidipitoisten maiden alueilla, minkä vuoksi nämä maat vaikuttavat merkittävästi sekä nykyiseen että tulevaan yhdyskuntakehitykseen.

Niin kauan kuin sulfidipitoiset maakerrokset pysyvät veden kyllästäminä, niiden pH on yleensä lähellä neutraalia, eivätkä ne aiheuta merkittävää ympäristöriskiä. Ongelmia syntyy, kun maita kuivatetaan tai kaivetaan maa- ja metsätalouden, kaupunkirakentamisen, infrastruktuurihankkeiden tai ruoppauksen yhteydessä. Hapen vaikutuksesta sulfidimineraalit hapettuvat ja muodostavat rikkihappoa. Jos maalla ei ole puskurikykyä, tämä johtaa voimakkaaseen happamoitumiseen ja mahdollisesti myrkyllisten metallien, kuten alumiinin, mangaanin, kadmiumin, kuparin ja nikkelin, vapautumiseen (Nordmyr ym., 2008). Hapettunutta sulfidimaata kutsutaan tällöin happamaksi sulfaattimaaksi. Nämä happamoitumisprosessit voivat aiheuttaa vakavia haittoja pinta- ja pohjavesille sekä vaikeuttaa ympäristötavoitteiden, mukaan lukien EU:n vesipuitedirektiivin (2000/60/EY) tavoitteiden, saavuttamista.

Heikkojen geoteknisten ominaisuuksiensa vuoksi (alhainen kantavuus ja suuri muodonmuutos kuormituksessa) sulfidimaiden esiintyminen rakennus- ja infrarakentamishankkeissa on otettava huomioon, jotta vältetään infrastruktuuria vaurioittavien painumien, halkeamien ja muodonmuutosten riski. Yksi käytetty menetelmä on sulfidimaan lujittaminen *in situ* lisäämällä sideainetta pilareihin. Herkän infrastruktuurin, kuten teiden, rautateiden ja rakennusten, yhteydessä sulfidimaamassat on usein kaivettava pois rakentamisen mahdollistamiseksi. Tällöin syntyy suuria määriä materiaalia, joka on käsiteltävä asianmukaisesti. Kun nämä massat altistuvat ilman hapelle, hapettumisprosessi voi käynnistyä ja aiheuttaa ympäristöriskejä. Siksi kaivetut massat on käsiteltävä asianmukaisesti näiden riskien vähentämiseksi.

Sulfidimaiden mikrobiologiaa hallitsevat rikkiä ja rautaa muuntavat mikro-organismit. Luonnollisissa, vedellä kyllästyneissä ja hapettomissa olosuhteissa sulfaattia pelkistävät bakteerit pelkistävät sulfaatin sulfidiksi, mikä edistää sulfidimineraalien muodostumista ja stabiloitumista. Kun sulfidimaita kuivatetaan ja altistetaan hapelle, mikrobiyhteisön koostumus muuttuu ja rikkiä sekä rautaa hapettavat mikro-organismit aktivoituvat. Nämä mikro-organismit nopeuttavat sulfidien hapettumista, mikä johtaa happamoitumiseen ja metallien liikkeelle lähtöön. Sulfidien hapettuminen ei siis ole pelkästään kemiallinen prosessi, vaan myös mikrobien ohjaama.

Hapettumisnopeuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten sulfidimineraalin tyyppi, hapen saatavuus, vesipitoisuus ja lämpötila. Siksi aika hapelle altistumisesta hapettumisen vaikutusten ilmenemiseen voi vaihdella huomattavasti eri paikkojen ja olosuhteiden välillä. Seuraukset ilmenevät tavallisesti pH-arvon laskuna sekä sulfaatin ja metallien vapautumisena ja kiinteiden rauta-rikkimineraalisaostumien, kuten jarosiitin (keltainen) ja schwertmanniitin (ruosteen värinen), muodostumisena.

Yhdyskuntarakentamishankkeissa, joissa sulfidimaan esiintymistä ei ole ennakoitu ja määrät ovat pieniä, ei usein ole aikaa tai resursseja kehittää omia ratkaisuja. Tavallisin ratkaisu on kuljettaa kaivetut sulfidimaamassat laitoksiin, joilla on lupa ottaa niitä vastaan ja loppusijoittaa ne.

Suuremmissa hankkeissa, joissa ennakkosuunnittelu on hyvää ja resursseja on riittävästi, voidaan sen sijaan kehittää hankekohtaisia ratkaisuja, joissa massat hyödynnetään ja/tai käsitellään paikallisesti, sekä hakea valitun ratkaisun edellyttämät luvat. Ruotsin ja Suomen käytännöt eroavat tältä osin toisistaan, ja maiden sulfidimaiden käsittelyä koskeva lainsäädäntö on koottu tähän raporttiin.

Käsittelyvaihtoehdot voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: i) massojen sijoittaminen hapettomiin olosuhteisiin hapettumisen estämiseksi, ii) massojen käsittely pH:ta puskuroivilla aineilla happamoitumisen torjumiseksi ja iii) massojen käsittely sideaineilla niiden kantavuuden parantamiseksi ja hyödyntämiseksi rakennusmateriaalina.

Strategian valintaan vaikuttavat monet tekijät, kuten hyödyntämismahdollisuudet, rakennusmateriaalin tarve, massojen ominaisuudet, saatu ympäristölupa ja muut vastaavat seikat. Eri käsittelyvaihtoehtojen edellytykset ja rajoitukset kuvataan tässä raportissa.

2 Usein kysyttyä sulfidimaasta

1. Minkä väristä sulfidimaa on: onko se aina mustaa?

   Se on usein mustaa, mutta voi olla myös harmaata tai mustan ja harmaan kerroksellista vuorottelua. Rikkipitoisuutta ja happamoitumispotentiaalia ei myöskään voida arvioida värin perusteella. Sulfidimaa on siltti- tai savipitoinen pehmeä maalaji, jonka vesipitoisuus on suuri ja väri vaihtelee.

   Hapettunut sulfidimaa eli hapan sulfaattimaa on kuivempaa ja siinä on usein punaisia tai oransseja sävyjä. Se, aiheuttaako sulfaattimaa ympäristöriskin, riippuu sen pH-arvosta (joka voidaan mitata suoraan kentällä) ja maassa jäljellä olevan rikin määrästä.

2. Kuinka nopeasti sulfidimaa voi hapettua? Kuinka kauan sulfidimaa voi olla avoimena tai peittämättä aiheuttamatta riskiä?

   Olennainen kysymys ei ole se, milloin hapettuminen alkaa, vaan milloin maa voi alkaa aiheuttaa ympäristöongelmia. Inkubaatiokokeissa hapettumista nopeutetaan ja seurataan, laskeeko pH. Kokeet kestävät useita viikkoja olosuhteissa, jotka suosivat ohuen maakerroksen hapettumista. Tulokset osoittavat, että maakasan hapettuminen niin pitkälle, että sillä on vaikutusta valumaveden pH-arvoon, kestää kuukausia.

3. Onko sulfidimaa akuutisti myrkyllistä? Voiko pieni määrä, joka on useiden metrien peittokerroksen alla eikä ole kosketuksissa pohjaveteen, aiheuttaa riskin?

   Ei. Vesien laadulle pitkällä aikavälillä aiheutuva riski riippuu sulfidimineraalien määrästä (rikkipitoisuudesta) yhdessä sulfidimaan kokonaismäärän kanssa.

4. Voidaanko hapettunut sulfidimaa eli hapan sulfaattimaa pelkistää uudelleen sulfidimaaksi?

   Tässä hankkeessa tehdyssä kokeessa osoitettiin, että raudan pelkistyminen alkaa suhteellisen nopeasti, mutta rikin pelkistymistä ei voitu osoittaa kokeen aikana (ks. luku 4 Hapettuneen sulfidimaan uudelleenvettäminen (happaman sulfaattimaan käsittely)). Se on hyvin todennäköisesti mahdollista, mutta prosessi kestää pitkään ja siihen liittyy todennäköisesti merkittäviä sivuvaikutuksia.

5. Jos sulfidimaa peitetään, miten peittokerros tulee suunnitella (materiaali, kerrospaksuus jne.)?

   Peittokerros tulee suunnitella siten, että se säilyttää kosteuden ja estää hapen kulkeutumisen. Myös muut tekijät, kuten maa-aineksen siltti- ja

savipitoisuus sekä varastoalueen sijainti, vaikuttavat. Tätä kuvataan luvussa 3 Sulfidimaamassojen käsittely läjityksissä ja kaatopaikoilla.

6. Mikä voi mennä vikaan sulfidimaan varastoaluetta suunniteltaessa ja rakennettaessa?

   Kun sulfidimaata sijoitetaan varastoalueelle, päätavoitteena on estää hapen kulkeutuminen ja hapettuminen tai vähentää niitä olennaisesti. Siksi on keskeistä, että massat säilyttävät vesipitoisuutensa. Rakenteelliset virheet, jotka johtavat veden poistumiseen ja massojen hapettumisen alkamiseen, on vältettävä. Esimerkiksi sulfidimaan joukkoon sijoitettu läpäisevämpi materiaali voi muodostaa kuivatuskerroksen. Varastoalueen kuljetusreitit ja ajopinnoille levitetty sora, joka myöhemmin jää massojen sisään, ovat esimerkkejä mahdollisista virheistä.

7. Miksi sulfidimaa on usein kaivettava pois erilaisissa infrastruktuurihankkeissa?

   Sulfidimaa kaivetaan usein pois sen geoteknisten ominaisuuksien vuoksi. Alhainen kantavuus ja suuri routaherkkyys voivat aiheuttaa merkittäviä painumia ja routanousuja, jotka voivat vaurioittaa teitä, rautateitä, rakennuksia ja muuta infrastruktuuria.

8. Milloin sulfidimaata voidaan käyttää ja milloin sitä ei tulisi käyttää?

   Sulfidimaamassoja, joiden vesi- ja rikkipitoisuus on korkea, on vaikea stabiloida, koska stabilointi vaatisi paljon sideainetta. Asiaa käsitellään luvussa 5 Sulfidimaan geotekninen stabilointi.

9. Miten kaatopaikkaa voidaan seurata sen rakentamisen jälkeen?

   Tätä kysymystä käsitellään luvussa 3.2.4 Dåva Norran kaatopaikan kuvaus.

3 Sulfidimaamassojen käsittely läjityksissä ja kaatopaikoilla

Yleinen menetelmä hapettomien olosuhteiden ylläpitämiseksi on sijoittaa sulfidimaat erilaisiin läjitysrakenteisiin ja peittää ne toisella maakerroksella, mikä rajoittaa hapen pääsyä maamassoihin. Tässä vaihtoehdossa ei lisätä aineita, joiden tarkoituksena olisi muuttaa sulfidimaan ominaisuuksia. Menetelmän tehokkuuden edellytyksenä on, että sulfidimaan kosteuspitoisuus säilyy korkeana (yleensä kyllästysasteen tulee olla yli 85 %), jotta hapen kulkeutuminen ja hapettuminen voidaan minimoida. Peittokerroksessa käytettävän maan sekä itse sulfidimaan raekokojakauma, vedenpidätyskyky ja hydraulinen johtavuus vaikuttavat peittokerroksen toimivuuteen.

On edullista, että sulfidimaamassat ovat kosketuksissa pohjaveteen, vaikka koko massa ei sijaitsisikaan pohjaveden pinnan alapuolella. Tällöin vesi voi kulkeutua alhaalta kapillaarisesti ja ylläpitää maan vesipitoisuutta. Sulfidimaan hienorakeinen rakenne hidastaa myös sadeveden kulkeutumista maan läpi, mikä osaltaan ylläpitää tavoiteltua korkeaa kyllästysastetta. Tämän vuoksi olosuhteet ovat suotuisat korkean kyllästysasteen säilyttämiselle ja sulfidimaan turvalliselle varastoinnille. Peittokerros on välttämätön estämään pinnan kuivumista sekä hapettumista ja eroosiota. Peittokerroksen tehtävänä on:

- tukea kasvillisuutta
- mahdollistaa veden imeytyminen maahan
- estää eroosiota.

Sulfidimaamassoja voidaan varastoida erityyppisissä läjityksissä ja rakenteissa. Rakenteiden toteutus voi vaihdella, mutta tavoitteena on aina ylläpitää maamassojen korkeaa veden kyllästysastetta ja siten minimoida hapettumisriski. Soveltuvia rakenteita ovat esimerkiksi vedellä täytetyt kennot ympäröivän maanpinnan alapuolella, pengerryksillä rajatut läjitysalueet sekä vastapenkereet.

3.1 Vedenalainen sijoittaminen

3.1.1 Periaate – menetelmän toimintatapa

Riskien hallitsemiseksi kaivettuja sulfidimaamassoja on usein sijoitettu erityisille läjitys- tai loppusijoitusalueille tai veden alle. Vaikka tämä menetelmä voi vähentää välittömiä ympäristöriskejä, siihen liittyy useita haittoja. Kuljetusmatkat loppusijoitusalueille ovat usein pitkiä, mikä lisää kasvihuonekaasupäästöjä, ja suuria määriä maamassoja, jotka voitaisiin hyödyntää uudelleen, käsitellään sen sijaan jätteenä. Meneillään olevan vihreän siirtymän sekä resurssitehokkaiden ratkaisujen tarpeen vuoksi on kasvava tarve kehittää ja soveltaa parhaita käytäntöjä sulfidipitoisten maiden ympäristöturvalliseen stabilointiin ja uudelleenkäyttöön.

Hankkeen tavoitteena oli tutkia sulfidimaan pitkäaikaisen vedenalaisen sijoituksen vaikutuksia.

3.1.2 Vedenalaisen loppusijoituksen arviointi

Vanhaa läjitysaluetta Umeå deponi och avfallscenterin alueella, jossa vuosina 2015–2016 kaivettuja sulfidimaita oli sijoitettu pohjaveden pinnan alapuolelle ja peitetty stabiloidulla sulfidimaalla, jätevesilietteellä, turpeella ja kalkilla, tutkittiin. Näytteitä otettiin kerran läjitetystä sulfidimaasta kolmen ja neljän metrin syvyydeltä maanpinnasta, kolme rinnakkaisnäytettä kustakin syvyydestä (kuva 3.1). Läjitysalueen geokemiallisen kehityksen arvioimiseksi mitattiin maan pH-arvo ja redoxpotentiaali. Maassa olevan monosulfidin ja pyriitin määrät määritettiin myös sen selvittämiseksi, oliko hapettumista tapahtunut. Mikrobiologista koostumusta tutkittiin analysoimalla maan mikro-organismien DNA:ta.

Kuva 3.1. Näytteenotto Umeå deponi och avfallscenterin vanhalta sulfidimaan läjitysalueelta. Kuva: Fredrik Lindberg.

3.1.3 Tulokset

Läjitetyn sulfidimaan pH-arvot olivat noin 7 tai sitä korkeampia, redox-arvot olivat alhaisia (< 50 mV) ja sulfidimaa sisälsi noin 0,1 % monosulfideja sekä noin 0,2 % pyriittiä. Mikrobiyhteisö koostui pääasiassa sulfidimaille tyypillisistä lajeista. Näihin kuului bakteereja, jotka viihtyvät neutraalin pH:n ja vähähappisten olosuhteiden ympäristöissä sekä osallistuvat orgaanisen aineksen hajottamiseen ja maaperän rikin kiertoon. Tulokset osoittavat, että läjitysalue on onnistunut säilyttämään läjitetyn sulfidimaan pelkistyneessä tilassa noin kymmenen vuoden ajan, eikä merkittävää hapettumista ole tapahtunut.

3.1.4 Johtopäätökset

Sulfidimaan loppusijoitus on tehokas keino säilyttää maa pelkistyneessä tilassa, mutta se ei ole kustannustehokas ratkaisu silloin, kun infrastruktuurihankkeista peräisin olevia suuria sulfidimaamääriä joudutaan kuljettamaan pitkiä matkoja loppusijoitusalueille. Parempi vaihtoehto on mahdollisuuksien mukaan stabiloida sulfidimaa ja hyödyntää sitä resurssina (ks. luku 5 Sulfidimaan geotekninen stabilointi).

3.2 Sulfidimaamassoista rakennetut läjitysalueet, meluvallit ja vastapenkereet

3.2.1 Periaate – käsittelemättömän sulfidimaan hyödyntäminen rakenteissa

Vesitäytteiset kennot eivät yleensä ole kustannustehokas ratkaisu, koska niiden käytettävissä oleva tilavuus on pieni suhteessa niiden vaatimaan pinta-alaan. Tämän vuoksi meluvallien, vastapenkereiden ja pengerryksillä rajattujen läjitysalueiden rakentaminen on usein suositeltavampi ratkaisu (näistä käytetään seuraavissa luvuissa nimitystä läjitysalueet). Näille ratkaisuille yhteistä on, että käsittelemätön, geoteknisesti epävakaa sulfidimaamassa sijoitetaan rajattuun varastointitilaan, joka rakennetaan geoteknisesti vakaasta materiaalista, useimmiten moreenista. Samaa materiaalia käytetään myös sulfidimaamassan peittämiseen. Peittämisen tavoitteena on ylläpitää sulfidimaan pinnalla yli 85 prosentin veden kyllästysastetta myös silloin, kun massat sijaitsevat pohjaveden pinnan yläpuolella.

Nykyisen käytännön mukaan sulfidimaan läjitysalueet peitetään vähintään yhden metrin paksuisella maakerroksella, joka koostuu tavallisesti moreenista ja turpeesta. Samaa menetelmää käytetään usein riippumatta maamassojen ominaisuuksista tai läjitysalueen sijainnista ja rakenteesta. Sovittamalla sen sijaan läjitysalueen sijainti, rakenne ja peittokerroksen paksuus paikallisiin olosuhteisiin voidaan vähentää materiaalien ja muiden resurssien tarvetta sekä hallita ympäristöriskejä tehokkaasti.

3.2.2 Määrittävät tekijät – läjitysalueen sijoittuminen ja rakenteellinen toteutus

Etäisyys pohjaveden pintaan määrää, voiko pohjavesi nousta sulfidimaamassoihin kapillaarisesti. Edullisinta on, jos sulfidimaamassat sijaitsevat lähellä pohjaveden pintaa, jolloin korkea veden kyllästysaste voidaan ylläpitää kapillaarivoimien avulla. Veden nousukorkeus riippuu sulfidimaan vedenpidätysominaisuuksista. Hyvän vedenpidätyskyvyn omaavissa maissa suurempikin etäisyys pohjaveden pintaan voi olla toimiva, kun taas heikomman vedenpidätyskyvyn omaavissa maissa etäisyyden on oltava pienempi. Jos etäisyys pohjaveden pintaan ylittää maamassojen kapillaarisen nousukorkeuden, sateen aiheuttama infiltraatio jää järjestelmän ainoaksi vedenlähteeksi. Tämä voi olla riittämätöntä ja edellyttää paksumpaa peittokerrosta.

Läjitysalueen paksuus vaikuttaa siihen, kuinka suuri osa sulfidimaamassoista on kapillaarisen nousun vaikutusalueella. Jos sulfidimaakerroksen paksuus ylittää massojen kapillaarisen nousukorkeuden, ylimmät kerrokset kuivuvat, jolloin sadeveden infiltraatiosta tulee järjestelmän ainoa vedenlähde. Paksuuden lisääntyminen voi myös heikentää läjitysalueen vakautta, koska sulfidimaalla on yleensä heikot geotekniset ominaisuudet. Tämän vuoksi tällaiset läjitysalueet toteutetaan usein matalina rakenteina.

Peittokerroksen paksuus ja koostumus vaikuttavat veden ja hapen kulkeutumiseen. Tämän tyyppisissä läjitysalueissa käytetään Ruotsissa rutiininomaisesti yhden metrin paksuista peittokerrosta, joka on monissa tapauksissa ylimitoitettu. Vakiomitoituksen sijasta peittokerroksen paksuus tulisi sovittaa paikallisiin olosuhteisiin. Tärkeitä huomioon otettavia tekijöitä ovat etäisyys pohjaveden pintaan, läjitysalueen rakenne ja koko sekä peitemateriaalin ominaisuudet. Näin voidaan vähentää materiaalien kulutusta vaarantamatta rakenteen suojavaikutusta. Laboratorio- ja kenttämittausten avulla voidaan ennustaa läjitysalueen toimivuutta ja varmistaa riittävä veden kyllästysaste samalla, kun peittokerroksen materiaalitarve pidetään mahdollisimman vähäisenä.

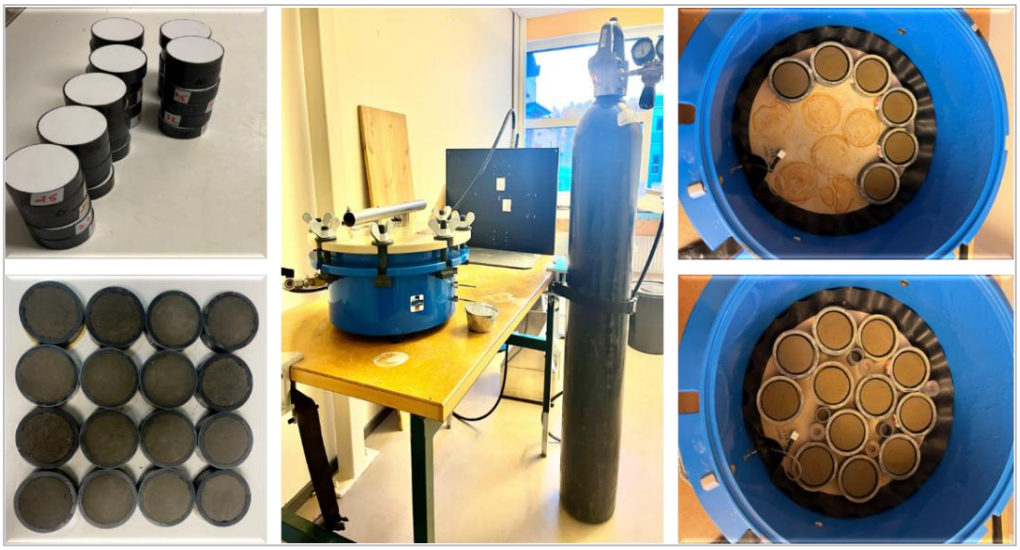
Maa, jonka läpäisevyys (kyllästyneen maan hydraulinen johtavuus) on alhainen ja jossa on runsaasti hienorakeista ainesta (esimerkiksi silttiä ja savea), parantaa vedenpidätyskykyä ja rajoittaa hapen tunkeutumista. Suuren läpäisevyyden omaavat maat sen sijaan edistävät kuivumista (haihtumista) kesäaikaan ja heikentävät rakenteen toimintaa. Läpäisevyyskertoimen $k = 10^{-8}$ m/s arvioidaan olevan useimmissa tilanteissa riittävä sekä tarjoavan konservatiivisen mitoitusperusteen suhteessa alla olevaan sulfidimaahan ja ympäröivään maaperään, joiden läpäisevyys on tavallisesti suurempi. Peitemateriaalin läpäisevyys ja vedenpidätyskyky ovat kaksi tärkeintä ominaisuutta tavoitellun toiminnan saavuttamiseksi.

Riski syntyy, jos sulfidimaan joukkoon sekoittuu karkearakeista materiaalia tai jos sulfidimaassa esiintyy karkearakeisia välikerroksia. Joskus löyhien sulfidimaamassojen päälle levitetään karkearakeista materiaalia, jotta läjitysalueen pinnalla voidaan liikkua työkoneilla ja päästä läjitysrintamalle. Tällainen kerros toimisi kuivattavana salaojakerroksena ja nopeuttaisi sulfidimaan hapettumista.

3.2.3 Materiaalien ominaisuuksien määrittäminen – laboratorio- ja kenttäkokeet

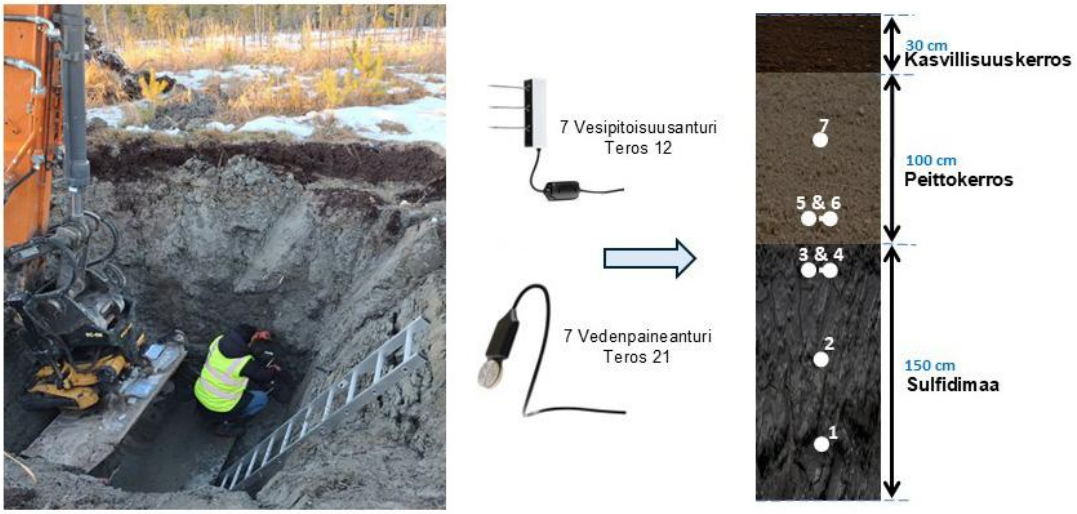
Hankkeen puitteissa tutkittiin erilaisia peitemateriaaleja sekä peittokerroksen rakennetta. Tutkimuksen tavoitteena oli vähentää materiaalitarvetta heikentämättä rakenteen toimivuutta sekä vertailla eri mahdollisia peitemateriaaleja. Työ toteutettiin laboratoriokokeiden ja kenttäkokeiden avulla.

Laboratoriossa tutkittiin sulfidimaan, moreenin, turpeen sekä stabiloidun sulfidimaan vedenpidätyskykyä (kuva 3.2) ja läpäisevyyttä, jotta voitiin ennustaa peittorakenteen toimintaa erilaisissa ilmasto-olosuhteissa.



Kuva 3.2. Maaperän vedenpidätyskyvyn määrittäminen. Vasemmalla näytetään koekappaleet ennen analyysiä. Keskellä näytetään painelevykammio, jota käytetään vedenpidätyskyvyn määrittämiseen eri painetasoilla. Oikealla näytetään kammioon mittausta varten asetetut koekappaleet. Kuva: Abdalla Saafan.

Samanaikaisesti toteutettiin kenttäkoe Umeå deponi och avfallscenter -alueella, jossa seurattiin vuoden ajan sulfidimaan läjitysaluetta nimeltä Dåva Norra tavoitteena lisätä tietoa siitä, miten vesipitoisuus vaihtelee todellisissa olosuhteissa. Kokeessa käytettiin läjitysalueeseen ja sen peittokerrokseen eri syvyyksille sijoitettuja antureita, jotka mittasivat vesipitoisuutta ja vedenpainetta (kuva 3.3). Mittaukset mahdollistivat vesipitoisuuden muutosten sekä veden liikkumisen jatkuvan seurannan eri maakerroksissa ajan kuluessa.



Kuva 3.3. Antureiden (vesipitoisuus ja huokosvedenpaine) asennus sulfidimaakennon peittokerrokseen Umeå deponi och avfallscenter -alueella (vasemmalla). Maaprofiilin havainnekuva (oikealla). Kuva: Ramesh Kumar Thakur.

Sulfidimaiden ominaisuuksien parantamismahdollisuuksien ja niiden hyödyntämisen peitemateriaalina selvittämiseksi tehtiin laboratoriokokeita sekä käsittelemättömillä että kalkkikäsitellyillä maanäytteillä. Kokeissa tutkittiin kahta kalkkikivityyppiä, karkearakeista ja erittäin hienorakeista, eri annostusmäärillä. Tavoitteena oli arvioida, voidaanko kalkkikäsittelyllä vähentää maan happamoitumisriskiä säilyttäen samalla sen soveltuvuus peitemateriaaliksi.

3.2.4 Dåva Norra -läjitysalueen kuvaus

Umeå deponi och avfallscenter on kunnallinen yhtiö, jonka tehtäviin kuuluu tarjota loppusijoituskapasiteettia infrastruktuurihankkeille Uumajan kunnassa. Koska Uumajan kunnan alueella, mukaan lukien kaupungin keskusta-alueilla ja sen reuna-alueilla, on useita maa-alueita, joilla esiintyy merkittäviä määriä sulfidimaata, on tarve sulfidimaan nopealle ja tehokkaalle käsittelylle suuri. Tällä pyritään ehkäisemään happamoitumista ja metallien huuhtoutumista infrastruktuuri- ja kiinteistörakentamisen yhteydessä.

3.2.4.1 Lupamenettely

Umeå deponi och avfallscenterin voimassa olevien vaarallisen ja tavanomaisen jätteen loppusijoitusta koskevien lupien lisäksi yhtiö haki 12. joulukuuta 2018 lupaa vastaanottaa ja loppusijoittaa vuosittain hapettumatonta sulfidimaata. Täydennettyjen asiakirjojen toimittamisen jälkeen 12. huhtikuuta 2019 lupa myönnettiin 28. elokuuta 2019 (laitosnumero 2480-126-33) seuraaville toiminnoille:

- vastaanottaa ja loppusijoittaa vuosittain enintään 100 000 tonnia sulfidimaata,

- vastaanottaa ja hyödyntää loppupeittorakenteissa jätettä, jonka pilaantumisriski on vähäistä pienempi,
- rakentaa toiminnan edellyttämät uudet rakennukset ja muut tarvittavat rakenteet ja laitokset.

3.2.4.2 Läjitysalueen kuvaus

Dåva Norra on ainoastaan sulfidimaalle tarkoitettu läjitysalue, joka sijaitsee kiinteistön Nyskogen 1:1 pohjoisimmassa osassa hieman Uumajan pohjoispuolella alueella, joka muodostuu moreeniselänteestä ja sitä ympäröivästä suoalueesta. Läjitysalueen tarkoituksena on vastaanottaa ainoastaan pilaantumattomia ja hapettumattomia sulfidimaamassoja. Läjitysalueella olemassa olevaa moreenia kaivetaan jatkuvasti, ja ylijäämämaat käytetään läjitetyn sulfidimaan peittämiseen. Läjityssolujen pohjat sijaitsevat pohjaveden pinnan alapuolella. Alapuolelta saatavilla oleva vesi yhdessä sulfidimaan kapillaarisen veden nousukyvyn sekä massojen asteittaisen peittämisen kanssa pitää maamassat veden kyllästäminä, mikä estää hapen pääsyn maahan ja ehkäisee hapettumista.

Sulfidimaan läjitysalueen käytön päätyttyä alueelle rakennetaan ylimääräinen peittorakenne, joka koostuu suojakerroksesta sekä nurmikasvillisuudelle soveltuvasta pintakerroksesta. Tämän jälkeen alueen kasvillisuuden annetaan kehittyä luontaisesti, eikä siihen istuteta metsää. Toiminta-alueen ympärille on rakennettu matalia, imeytykseen suunniteltuja ojia, joiden tarkoituksena on rajoittaa hallitsematonta pintavaluntaa toiminnan aikana. Ojien mitoituksessa ja toteutuksessa on huomioitu veden imeytyminen maaperään, jotta alueelta pois johdettavan veden määrää voidaan vähentää ja valumavesien hallintaa parantaa.

3.2.4.3 Läjitysalueen ja läjityssolujen rakenne

Läjitysalueen pinta-ala on noin 10 hehtaaria (600 × 165 m), ja se koostuu neljästä tai viidestä rinnakkaisesta läjityssolusta. Solujen seinämille pohjaveden pinnan yläpuolelle levitetään kalkkipitoista materiaalia. Kalkkikerros muodostaa puskuroivan suodatinvyöhykkeen, jossa mahdollisesti syntyvä hapan suotovesi voidaan neutraloida ja liukoiset metallit sitoa maaperään. Läjitysalueen kokonaiskapasiteetiksi arvioidaan noin 350 000 tonnia sulfidimaata.

Läjityssolujen likimääräiset mitat:

- kokonaispituus 600 m
- leveys 15 m
- syvyys alkuperäisen maanpinnan alapuolella 4 m
- solujen välinen etäisyys 10 m.

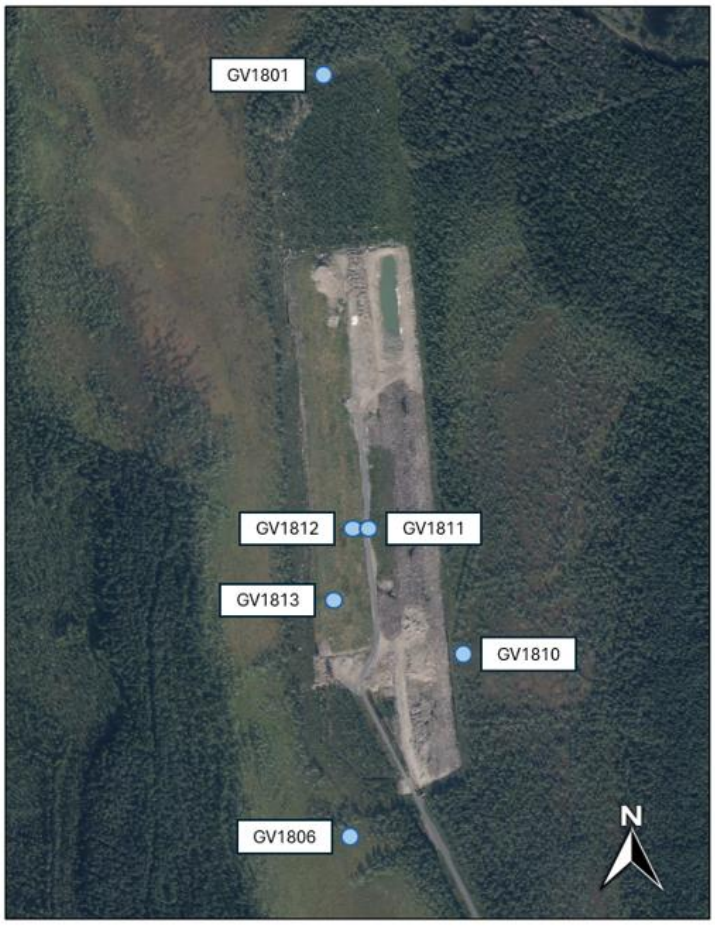
3.2.4.4 Sulfidimaan ennakkotarkastus

Ennen sulfidimaan loppusijoittamista maa-aineksen toimittajan on tehtävä maalle erityispiirteiden määrittely, johon sisältyvät muun muassa rikin, raudan ja pH:n

analyysit. Ennen vastaanottoa Umeå deponi och avfallscenter arvioi tutkimustulosten ja analyysien perusteella, täyttääkö sulfidimaa vastaanottokriteerit. Arviointi sisältää myös sulfidimaan happamoitumispotentiaalin tarkastelun.

3.2.4.5 Läjitysalueen jatkuva tarkkailu

Pohjavedestä otetaan näytteitä kaksi kertaa vuodessa useista tarkkailupisteistä sekä läjitysalueen sisältä että sen ulkopuolelta (kuva 3.4). Jäljempänä esitetään sulfaatin, raudan, nikkelin ja sinkin pitoisuuksien sekä pohjaveden pH-arvon keskiarvot (Taulukko 3.1). Nämä keskiarvot perustuvat vuosina 2018–2025 pohjavesiputkista saatuihin analyysituloksiin, jotka on kerätty pohjaveden virtaussuunnassa läjitysalueen ylä- ja alapuolisista tarkkailupisteistä sekä läjitysalueen sisältä.



Kuva 3.4. Dåva Norra -alueen kartta, johon on merkitty ne pohjavesiputket, joista näytteitä otetaan kaksi kertaa vuodessa. Veden virtaussuunnan on todettu olevan pohjoisesta etelään siten, että tarkkailupiste GV1801 sijaitsee virtaussuunnassa läjitysalueen yläpuolella, kun taas tarkkailupisteet GV1810 ja GV1806 sijaitsevat virtaussuunnassa läjitysalueen alapuolella.

Taulukko 3.1. Sulfaatin, raudan, nikkelin ja sinkin pitoisuuksien sekä pH-arvon keskiarvot. Arvot on mitattu kaksi kertaa vuodessa vuosina 2018–2025. Rivillä ”Ylävirran tarkkailupiste”

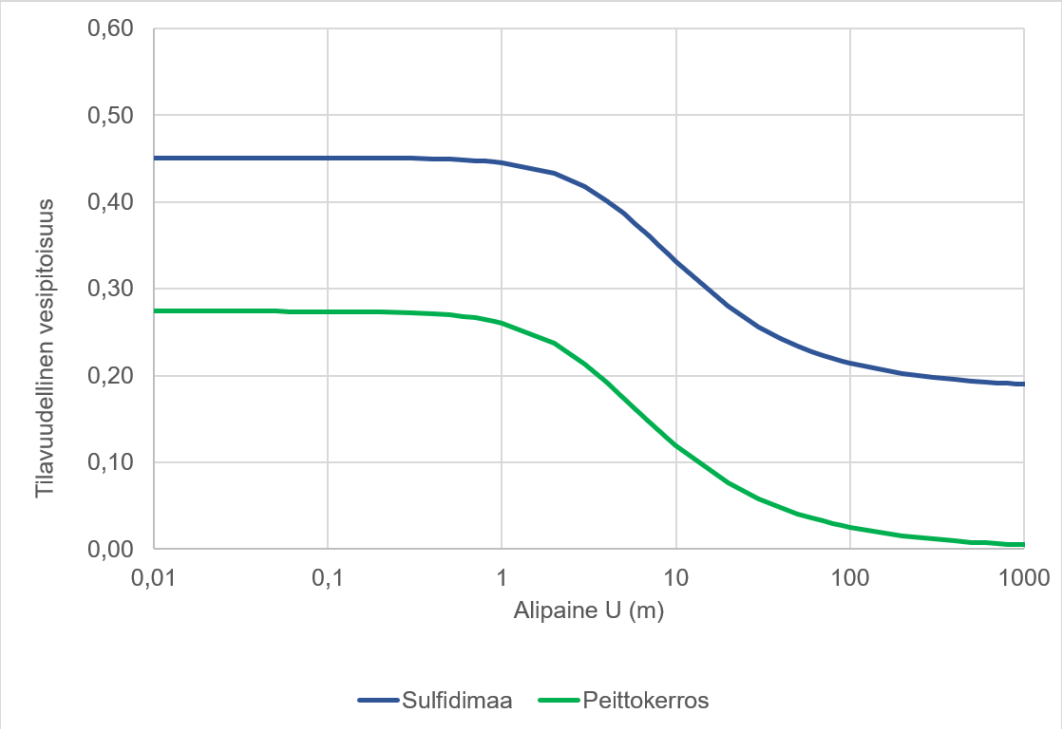
esitetään tarkkailupisteen GV1801 keskiarvot, rivillä ”Läjitysalueen sisällä” esitetään tarkkailupisteiden GV1811, GV1812 ja GV1813 keskiarvot, ja rivillä ”Alavirran tarkkailupiste” esitetään tarkkailupisteiden GV1810 ja GV1806 keskiarvot (ks. kuva 3.4).

Sijainti	Sulfaatti (mg/l)	Rauta (mg/l)	Nikkeli (µg/l)	Sinkki (µg/l)	pH
Ylävirran tarkkailupiste	5,0	3,0	2,1	4,3	6,8
Läjitysalueen sisällä	369	92	2,0	6,8	6,3
Alavirran tarkkailupiste	<1,0	3,0	2,8	18	4,8

3.2.5 Arviointi

Luvussa 3.2.3 kuvattujen kokeiden tuloksia käytettiin sulfidimaaläjityksen vesipitoisuuden mallintamiseen. Menetelmä koostuu kolmesta vaiheesta:

Laboratorio-ominaisuuksien määritys. Peittomateriaalin ja sen alla olevan sulfidimaan hydraulisia ominaisuuksia käytettiin numeerisen mallin lähtötietoina. Sulfidimaan ja peittomateriaalin ominaisuuksien määrityksen tulokset esitetään kuvassa 3.5 ja taulukossa 3.2. Näitä tuloksia käytetään seuraavassa vaiheessa peiterakenteen toiminnan mallintamiseen.



Kuva 3.5. Sulfidimaan ja peitemateriaalin vesipitoisuuden vaihtelu paineen funktiona. Käyrä kuvaa materiaalien kykyä pidättää vettä. Peitemateriaalin kuivuessa sulfidimaa säilyttää vettä myös suuren imupaineen (alipaineen) vallitessa.

Mallin muodostaminen. Materiaalien ominaisuuksia käytetään lähtötietoina hydraulisessa mallissa ohjelmassa SEEP/W. Maaprofiilin vesipitoisuuden mallintamiseen käytetään Van Genuchtenin yhtälöä. Tätä varten tarvitaan joukko materiaaliparametreja, jotka on esitetty taulukossa 2. Malli simuloi veden kulkeutumista ja imeytymistä peittokerroksen sekä sen alla olevan sulfidimaan läpi käyttäen tarkasteltavan kohteen meteorologisia havaintoaineistoja.

Taulukko 3.2. Peittokerroksen toiminnan mallintamisessa tarvittavat parametrit.

Van Genuchtenin parametri	Selitys	Peitemateriaali	Sulfidimaa
α (1/m)	Ilman sisääntulopaineen käänteisarvo	0,189	0,300
θs	Kyllästynyt tilavuudellinen vesipitoisuus	0,451	0,274
θr	Jäännösvesipitoisuus (tilavuudellinen)	0,185	0,000
n	Huokoskokojakaumaa kuvaava muotoparametri	1,749	1,702
m	Muotoparametri	0,428	0,412

Kalibrointi kenttämittausten avulla. Malli kalibroitiin Dåva Norra-läjitysalueen mittausaseman aineiston perusteella. Tämän jälkeen mallia käytettiin arvioimaan, miten läjityksen erilaiset rakenteelliset ratkaisut sekä erilaiset sää- ja ilmasto-olosuhteet voivat vaikuttaa sen toimintaan. Kun malli on validoitu, sitä käytetään ennustamaan läjitysalueen toimintaa pitkällä aikavälillä.

Kenttäkokeen tulokset osoittavat, että Dåva Norra-läjitysalueen nykyinen peiterakenne on ylimitoitettu. Sekä peiterakenteen että sen alla olevan sulfidimaan kyllästysaste oli yli 85 % koko seurantajakson ajan. Nykyinen rakenne on siten mitoitettu riittävän varovaiseksi ja tarjoaa merkittävän turvallisuusmarginaalin.

Kokeiden tuloksia on kuvattu yksityiskohtaisemmin seuraavassa julkaisussa:

1. Ziagharib, A. (2025). Management of Excavated Sulfide soils: Enhancing Mechanical Stability and Maintaining Moisture Content. Väitöskirja, Luleå tekniska universitet. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-111009

Laboratoriotulokset osoittivat, että kalkkikäsittely ei muuttanut sulfidimaan ominaisuuksia merkittävästi. Raekokojakauma pysyi pääosin ennallaan, mikä viittaa siihen, ettei maan rakenteessa tapahtunut olennaisia muutoksia. Myöskään vedenpidätyskyvyssä tai hydraulisessa johtavuudessa ei havaittu merkittäviä eroja käsiteltyjen ja käsittelemättömien näytteiden välillä. Tämä tarkoittaa, että maa säilytti luontaiset ominaisuutensa, kuten hienorakeisen koostumuksensa, hyvän kosteudenpidätyskyvynsä ja alhaisen vedenläpäisevyytensä. Tulokset ovat merkittäviä, koska ne osoittavat, että kalkkikäsitelty sulfidimaa voi edelleen toimia tehokkaasti peitemateriaalina. Kalkkikäsitellyn sulfidimaan hyödyntäminen peiterakenteissa arvioidaan mahdolliseksi, ja se voi edistää tehokkaampaa materiaalien hallintaa vähentämällä läjitystarvetta sekä uusien materiaalien käyttöä.

3.2.6 Johtopäätökset

Sulfidimaaläjitysten peiterakenteet tulisi suunnitella kohdekohtaisiin olosuhteisiin perustuen eikä vakioratkaisujen pohjalta. Tämä koskee sekä läjitysalueen sijaintia ja rakenteellista toteutusta että peitemateriaalin valintaa. Tässä luvussa keskitytään erityisesti peitemateriaalin valintaan ja sen ominaisuuksiin.

Valitsemalla tarkoitukseen soveltuvat materiaalit, varmistamalla peitekerroksen korkea vesipitoisuus ja ottamalla huomioon paikalliset maaperäolosuhteet voidaan vähentää sekä materiaalien kulutusta että ympäristöriskejä. Kalkkikäsitelty sulfidimaa voi samalla toimia arvokkaana peitemateriaalina ja siten edistää kiertotaloutta sekä resurssitehokasta maa-ainesten hallintaa.

Sulfidimaaläjitysten suunnittelussa on huomioitava myös muita tekijöitä, kuten läjitysalueen ja luiskien geotekninen stabiliteetti sekä peitekerroksen routavaurioiden riski. Nämä tekijät ovat tärkeitä läjitysalueen pitkäaikaisen toimivuuden ja turvallisuuden varmistamiseksi.

Johtopäätös	Käytännön merkitys
Peitemateriaalin tulisi olla hyvin lajittunutta ja sisältää vähintään 25–30 % hienoainesta (savea ja silttiä).	Parantaa vedenpidätyskykyä ja vähentää sisäisen eroosion riskiä.
Tietty määrä orgaanista ainesta on eduksi.	Auttaa säilyttämään kosteuden peitekerroksessa.
Vedenläpäisevyyden (permeabiliteetin) ei tulisi ylittää arvoa 10^{-8} m/s.	Varmistaa, että peitekerros toimii suunnitellulla tavalla ja pidättää vettä tehokkaammin ja pidempään.
Kalkkikäsittely ei muuttanut sulfidimaan hydraulisia ominaisuuksia merkittävästi.	Maan vedenpidätyskyky ja alhainen vedenläpäisevyys säilyivät. Kalkkikäsitelty maa voi toimia peitemateriaalina.

Kalkkikäsitellyn sulfidimaan arvioidaan soveltuvan peitemateriaaliksi.	Voi vähentää läjitystarvetta sekä uusien peitemateriaalien, kuten moreenin, käyttöä.
Rakenteen suunnittelu tulisi mukauttaa paikallisiin olosuhteisiin, erityisesti pohjaveden pinnan tasoon.	Voi vähentää materiaalien kulutusta ja mahdollistaa resurssitehokkaamman ratkaisun.
Läjitysalueen rakenteellinen toteutus on vähintään yhtä tärkeä kuin peitekerroksen paksuus.	Rakenteen tulee edistää veden säilymistä ja rajoittaa hapen pääsyä läjitykseen.
Pohjaveden taso, massojen ominaisuudet ja mallinnustulokset tulee huomioida suunnittelussa.	Tarjoaa paremman perustan läjitysalueen ja peiterakenteen kohdekohtaiseen mitoitukseen.

3.3 Sulfidimaan läjitys kuivatuissa olosuhteissa

3.3.1 Periaate – maaperän happamoitumisen ehkäiseminen

Kaivetut sulfidimaat tai ruopatut sulfidipitoiset sedimentit aiheuttavat happamia ja metallipitoisia suotovesiä, jos ne jätetään käsittelemättä. Näiden materiaalien hyödyntäminen kuivatusolosuhteissa, esimerkiksi peitemateriaaleina tai kasvualustoina, edellyttää siksi neutraloivaa käsittelyä.

Hankkeen tavoitteena oli selvittää erilaisten menetelmien vaikutusta happamoitumiseen ja metallien huuhtoutumiseen. Kalkkikiveä on usein käytetty ympäristönsuojelutoimenpiteissä happamoitumisen ja siitä seuraavan metallien liukenemisen ehkäisemiseksi. Turpeella ei ole neutraloivaa vaikutusta, mutta se kykenee sitomaan jo liuenneita metalleja ja siten vähentämään metallien huuhtoutumista ympäristöön.

3.3.2 Neutralointimenetelmien arviointi

Kaksi ja puoli vuotta kestäneessä laboratoriokokeessa sekä neljä vuotta kestäneessä kenttäkokeessa arvioitiin erilaisten kalkkikivi- ja turvekäsittelyjen tehokkuutta happamuuden ja metallien päästöjen vähentämisessä, kun tämän tyyppisten maiden tai sedimenttien annettiin hapettua.

Tutkimuksessa käytetty sedimentti sisälsi noin 0,5 % sulfideja (kuivapainosta laskettuna), ja sen kuiva-ainepitoisuus oli noin 50 %. Sedimentti nostettiin pohjaveden pinnan alapuolelta rannikkoalueelta Länsi-Suomessa. Heti nostamisen jälkeen sedimentti sekoitettiin huolellisesti homogeenisen materiaalin aikaansaamiseksi: laboratoriokokeessa sekoittimella ja kenttäkokeessa betonimyllyllä. Tämän jälkeen sedimenttiin lisättiin erilaisia käsittelyaineita, kuten kalkkikiveä sekä karkeana (raekoko < 3,15 mm) että erittäin hienorakeisena kalkkikivenä (mediaaniraekoko = 2,5 μm), turvetta sekä näiden yhdistelmiä. Lisäysmäärät vastasivat joko sedimentin

happamoitumispotentiaalia (10 kg/m³) tai nelinkertaista määrää (40 kg/m³). Koe käsitti viisi sekoitettua käsittelyvaihtoehtoa, yhden kerroksittaisen kalkkikivikäsittelyn (ainoastaan kenttäkokeessa) sekä käsittelemättömän vertailunäytteen. Kaikki käsittelyt toteutettiin kolmena rinnakkaisnäytteenä. Valmiiksi sekoitetut sedimentit sijoitettiin erityisesti suunniteltuihin muovisäiliöihin, joita säilytettiin laboratoriossa noin 20 °C:n lämpötilassa ja kenttäkokeessa luonnollisissa sääolosuhteissa (kuva 3.6). Laboratoriossa sedimenttejä kasteltiin säännöllisesti määrällä, joka vastasi alueen sadantaa. Kenttäkokeessa säiliöt pidettiin peitettyinä veden määrän säätelemiseksi, mutta ne avattiin säännöllisin väliajoin, jotta sadevesi pääsi imeytymään sedimenttiin. Sedimentin läpi suotautunut vesi kerättiin talteen ja siitä otettiin näytteitä laboratoriokokeessa 1–2 kuukauden välein sekä kenttäkokeessa kaksi kertaa vuodessa. Näytteenottokertojen välillä sedimenttien annettiin kuivua, halkeilla ja altistua hapelle, mikä jäljitteli niitä olosuhteita, joita voi esiintyä maanpinnan yläpuolelle varastoiduissa sulfidimaissa.

Kuva 3.6. Tuoreeltaan sekoitettu sulfidipitoinen sedimentti erityisesti suunnitelluissa muovisäiliöissä (vasemmalla) sekä kenttäkokeessa kevyesti kuivuneet ja halkeilleet sedimentit (oikealla). Kuva: Eva Högfors-Rönnholm.

Sedimenttien läpi suotautunut vesi (kuva 3.7) analysoitiin. Analyyseissä määritettiin muun muassa pH, redoxpotentiaali, happamuus, sulfaattipitoisuus sekä liuenneiden metallien pitoisuudet. Näin voitiin seurata, kuinka paljon ympäristöä kuormittavia aineita huuhtoutui sedimentistä ajan kuluessa. Vesinäytteiden lisäksi itse sedimentistä otettiin näytteitä kokeen alussa ja lopussa. Näytteistä analysoitiin muun muassa orgaanisen aineksen pitoisuus, metallipitoisuudet sekä monosulfidin ja pyriitin määrät. Lisäksi sedimenttien mikrobiologista yhteisöä tutkittiin DNA-analyyseillä, jotta voitiin selvittää, miten eri käsittelyt vaikuttivat mikrobiyhteisöjen koostumukseen ja miten nämä muutokset olivat yhteydessä sedimenttien kemiallisiin ominaisuuksiin.

Kuva 3.7. Vesinäytteenotto kenttäkokeessa (vasemmalla) sekä pH:n mittaus sedimenttinäytteenoton yhteydessä kenttäkokeessa (oikealla). Kuva: Eva Högfors-Rönnholm.

3.3.3 Tulokset

Käsittelemätön vertailusedimentti happamoitui nopeasti sekä laboratorio- että kenttäkokeissa sulfidimineraalien hapettumisen seurauksena. Suotoveden pH laski jo ensimmäisen vuoden aikana alle arvon 4 ja pysyi happamana koko koejakson ajan. Tähän liittyi korkea redoxpotentiaali, erittäin suuri happamuus sekä erittäin korkeat sulfaatin ja liuenneen alumiinin pitoisuudet. Lähes puolet sedimentin alkuperäisestä rikkipitoisuudesta huuhtoutui pois. Vertailunäytteen mikrobiyhteisöä hallitsivat hapellisissa olosuhteissa menestyvät bakteerit (aerobiset bakteerit) sekä happamiin olosuhteisiin sopeutuneet bakteerit (asidofiiliset bakteerit), jotka ovat tyypillisiä happamille sulfaattimaille. Tämä kuvastaa vallinneita geokemiallisia olosuhteita.

Karkearakeisella kalkkikivellä toteutetut käsittelyt pienellä annostuksella (10 kg m^{-3}), mukaan lukien kerroksittainen levitys kenttäkokeessa, vähensivät happamuutta ja metallien huuhtoutumista verrattuna vertailunäytteeseen, mutta eivät estäneet happamoitumista. Käytännössä kaikki sulfidit hapettuivat kenttäkokeessa, kun taas laboratoriokokeessa osa pyriitistä säilyi. Näissä käsittelyissä kehittyneet mikrobiyhteisöt muistuttivat vertailunäytteen mikrobiyhteisöjä, mikä oli yhdenmukaista alhaisten pH-arvojen kanssa. Sen sijaan hienorakeinen kalkkikivi pienellä annostuksella sekä molemmat kalkkikivilaadut suurella annostuksella (40 kg m^{-3}) ylläpitivät lähes neutraalin pH:n sekä vesi- että kiinteässä faasissa koko koejakson ajan. Vaikka monosulfidit hapettuivat, pyriitin hapettuminen väheni merkittävästi, redoxolosuhteet säilyivät kohtalaisina ja rikin huuhtoutuminen väheni merkittävästi (kenttäkokeessa vain 9–12 % sedimentin kokonaisrikkimäärästä). Neutraali pH rajoitti merkittävästi muun muassa alumiinin ja raudan liikkuvuutta mekanismien kautta, joihin kuuluivat hapettumisen väheneminen, mineraalien saostumisen lisääntyminen sekä mineraalien hidas rapautuminen. Nämä käsittelyt johtivat selvästi erilaisiin mikrobiyhteisöihin, joita hallitsivat erilaiset neutrofiiliset bakteerit asidofiilisten bakteerien sijaan. Osa näistä neutrofiilisista lajeista kykenee

myös hapettamaan sulfideja, minkä vuoksi sulfaattia voi edelleen esiintyä suotovedessä. Kalkkikiven ja turpeen yhdistelmällä toteutettu käsittely osoitti suurta vaihtelua rinnakkaisnäytteiden välillä: osa pysyi neutraalina, kun taas osa happamoitui. Tämä viittaa siihen, että turvelisäys voi heikentää pitkäaikaista geokemiallista vakautta.

Kun sedimenttiä tutkittiin todellisissa kenttäolosuhteissa, sen rakenne muuttui verrattuna laboratorio-olosuhteisiin. Kentällä sedimentistä tuli rakeisempaa, mikä lisäsi niiden pintojen määrää, joilla kemiallisia reaktioita voi tapahtua. Tämä vaikutti rikin käyttäytymiseen järjestelmässä: yhtäältä sulfidimineraalit hapettuivat tehokkaammin, toisaalta suurempi osa muodostuneesta sulfaatista pidättyi sedimenttiin. Näistä kenttä- ja laboratorio-olosuhteiden välisistä eroista huolimatta tulokset osoittivat selvästi, että tietyt käsittelyt olivat tehokkaita molemmissa ympäristöissä. Hienorakeinen kalkkikivi, jota lisättiin sedimentin haponmuodostuspotentiaalin perusteella mitoitettu määrä, sekä ylimääräisenä annosteltu karkearakeinen kalkkikivi pystyivät molemmat pitämään pH:n lähellä neutraalia koko koejakson ajan. Kenttäkokeen aikana lämpötilat vaihtelivat voimakkaasti, mikä lisäsi mikro-organismien monimuotoisuutta ja suosi lajeja, jotka kestävät sekä kylmiä olosuhteita että nopeita lämpötilanvaihteluita.

Tuloksia on kuvattu yksityiskohtaisemmin seuraavissa julkaisuissa:

1. Kononova, L., Johnson, A., Engblom, S., Stén, P., Yu, C., Österholm, P., Kessler, V., Seisenbaeva, G., Dopson, M., Åström, M., & Högfors-Rönnholm, E. (2024). Geochemical and microbial responses to limestone and peat treatment of incubated hypermonosulfidic sediments. *European Journal of Soil Science* 76, e70024, https://doi.org/10.1111/ejss.70024.

2. Kononova, L., Åström, M., Johnson, A., Yu, S., Högfors-Rönnholm, E. & Engblom, S. Effects of limestone and peat amendments on trace element mobilization and retention in incubated hypermonosulfidic sediments. *Boreal Environment Research* (julkaistavaksi lähetetty käsikirjoitus).

3. Johnson, A., Kononova, L., Engblom, S., Dalhem, K., Åström, M., Högfors-Rönnholm, E. & Dopson, M. Geochemical and microbial responses to limestone amended sulfidic sediments in field incubations under large temperature fluctuations (valmistelussa oleva käsikirjoitus).

3.3.4 Johtopäätökset

Kokeet osoittivat, kuten aiemminkin on hyvin tunnettua, että käsittelemättömät sulfidimaat happamoituvat ja voivat aiheuttaa merkittäviä happo-, sulfaatti- ja metallipäästöjä. Hienorakeisella kalkkikivellä tehty käsittely sekä riittävän suurina

määrinä lisätty karkearakeinen kalkkikivi olivat tehokkaita menetelmiä lähes neutraalin pH:n ylläpitämiseksi sekä happamoitumisen ja metallien huuhtoutumisen merkittäväksi vähentämiseksi. Tulokset olivat yhdenmukaisia sekä laboratorio- että kenttäkokeissa, mikä osoittaa, että oikein mitoitettu kalkkikivikäsittely voi olla tehokas menetelmä sulfidimaiden käsittelyyn liittyvien ympäristöriskien vähentämisessä.

Immobilisaatiovaikutukset pH:n neutraloinnin jälkeen

Aineryhmä	Arviointi	Tarkennus
Sulfaatti	Sulfaatin täydellinen immobilisaatiota ei ole mahdollista pH:n neutraloinnin jälkeen.	Monosulfidit jatkavat hapettumistaan neutrofiilisten rikkiä hapettavien bakteerien vaikutuksesta. Immobilisaatiota edistää kuitenkin se, että pyriitti suojautuu hapettumiselta neutraloinnin jälkeen, ainakin kenttäkokeen keston ajan (neljä vuotta).
Metallit	Useiden alkuaineiden immobilisaatio on mahdollista pH:n neutraloinnin jälkeen.	Alumiinin, nikkelin, kadmiumin, sinkin ja kuparin liikkuvuuden havaittiin vähenevän.

Suositukset

Suositus	Tarkennus
Käytä karkearakeista kalkkikiveä vähintään kaksinkertainen määrä sedimentin happamoitumis-potentiaaliin nähden.	Kalkkikivi tulee sekoittaa huolellisesti sulfidimaahan riittävän neutralointivaikutuksen saavuttamiseksi.
Käytä hienorakeista kalkkikiveä pienempinä määrinä.	Hienorakeinen kalkkikivi on huomattavasti tehokkaampaa. Sedimentin happamoitumispotentiaaliin nähden suhteessa 1:1 lisätty määrä oli riittävä sekä laboratorio- että kenttäkokeissa, mutta

	käytännössä suositellaan annostusta, joka ylittää hieman suhteen 1:1.
Vältä kalkkikiven levittämistä kerroksittain.	Kerroksittainen levitys ei tuota riittävää neutralointivaikutusta, eikä sitä siksi suositella.

4 Hapettuneen sulfidimaan uudelleenvettäminen (happaman sulfaattimaan käsittely)

4.1 Periaate – hapettuneen sulfidimaan palauttaminen sulfidimaaksi

Maan kosteikkojen perustamisen, rannikkoalueiden ennallistamisen ja maankäytön muutosten yhteydessä syntyy usein tarve ymmärtää, miten hapettunut sulfidimaa eli hapan sulfaattimaa reagoi, kun se saatetaan uudelleen veden peittoon. Tätä koskeva tieto on tärkeää, jotta voidaan arvioida sekä toimenpiteen mahdollisia ympäristöhyötyjä että siihen liittyviä riskejä.

Tässä luvussa esitetään yhteenveto hankkeessa vuosina 2023–2026 toteutetun mesokosmikokeen tuloksista. Mesokosmikokeella tarkoitetaan ulko-olosuhteissa toteutettavaa koetta, jossa luonnonympäristöön sijoitettua suljettua järjestelmää tutkitaan hallituissa olosuhteissa. Koe suunniteltiin jäljittelemään olosuhteita, joita voi syntyä happaman sulfaattimaan jäädessä veden alle esimerkiksi kosteikon perustamisen tai luonnon ennallistamisen yhteydessä.

Tavoitteena oli seurata maaperän kemiallista ja biologista kehitystä sekä arvioida, voidaanko erilaisilla käsittelymenetelmillä nopeuttaa palautumista pelkistävämpiin olosuhteisiin. Erityistä huomiota kiinnitettiin sekä myönteisten vaikutusten, kuten metallien liikkuvuuden vähenemisen, että mahdollisten haitallisten sivuvaikutusten tunnistamiseen. Näitä olivat muun muassa ravinteiden ja hivenaineiden vapautuminen ympäristöön.

Raportissa esitettyjen kokemusten tarkoituksena on toimia ohjeistuksena viranomaisille, maanomistajille, konsulteille ja hanketoimijoille, jotka työskentelevät happamien sulfaattimaiden ennallistamisen ja vesitalouden hallinnan parissa.

4.2 Uudelleenvettämisen arviointi

Hapettuneen sulfidimaan uudelleenvettämisen vaikutusten arvioimiseksi toteutettiin mesokosmikoe Risöfladanilla Vaasan edustalla. Koealue koostuu entisistä merenpohjasedimenteistä, jotka ovat kuivattamisen seurauksena kehittyneet tyypilliseksi happamaksi sulfaattimaaksi.

Lokakuussa 2023 maahan asennettiin viisitoista mesokosmiputkea. Putket olivat kahden metrin pituisia, ja ne mitoitettiin siten, että ne sisälsivät koko tarkasteltavan maaprofiilin pintamaakerroksesta hapettuneen ja happamoituneen kerroksen kautta alla olevaan sulfidipitoiseen sedimenttiin saakka. Käsittelyjen toteuttamiseksi sekä vesinäytteiden ottamiseksi kuhunkin mesokosmiin asennettiin lisäksi erilliset injektioputket ja pohjavesiputket (kuva 4.1).

Kuva 4.1. Mesokosmiputkien asennus (vasemmalla). Valmis mesokosmiputki, jossa on kaksi injektioputkea (kierrekorkilliset) sekä yksi pohjavesiputki (valkoisella merkinnällä varustettu pyöreä korkki) (oikealla). Kuva: Eva Högfors-Rönnholm ja Sten Engblom.

Viittä erilaista käsittelyä testattiin siten, että kukin käsittely toteutettiin kolmessa rinnakkaisessa toistossa. Vertailukäsittelynä käytettiin vettä. Muut käsittelyt koostuivat turpeen suotovedestä, erittäin hienorakeisesta kalkkikivestä, kalkkikiven ja turpeen suotoveden yhdistelmästä sekä kipsin ja turpeen suotoveden yhdistelmästä. Käsittelyaineet injektoitiin maaprofiiliin kokeen alussa. Käsittelyjen jälkeen kaikki mesokosmiputket täytettiin vedellä siten, että maanpinta jäi veden peittoon. Tämän jälkeen putket suljettiin hapen pääsyn minimoimiseksi ja vedellä kyllästyneiden olosuhteiden aikaansaamiseksi.

Maavedestä otettiin näytteitä kahdeksan kertaa toukokuun 2024 ja elokuun 2026 välisenä aikana (kuva 4.2). Näytteet otettiin mesokosmeihin asennettujen pohjavesiputkien kautta, ja ne edustivat pääasiassa maaperän halkeamaverkostossa olevaa vettä. Jokaisella näytteenottokerralla mitattiin lämpötila, pH, sähkönjohtavuus, redoxpotentiaali ja ammoniumpitoisuus. Lisäksi analysoitiin muun muassa kaksiarvoisen raudan pitoisuus, titrattava happamuus, sulfaatti-, kloridi-, orgaanisen hiilen ja fosforin pitoisuudet sekä suuri joukko metalleja ja hivenaineita.

Vesikemiallisten tietojen täydentämiseksi tehtiin myös maaperätutkimuksia. Noin kahden vuoden veden peitossa olon jälkeen ensimmäiset mesokosmit nostettiin näytteenottoa varten. Maaprofiili paljastettiin (kuva 4.2), ja pH mitattiin koko profiilin matkalta. Eri syvyyksiltä kerättiin maaperänäytteitä geokemiallisia analyysejä, monosulfidin ja pyriitin määritystä sekä DNA-sekvensointiin perustuvia mikrobiologisia tutkimuksia varten.

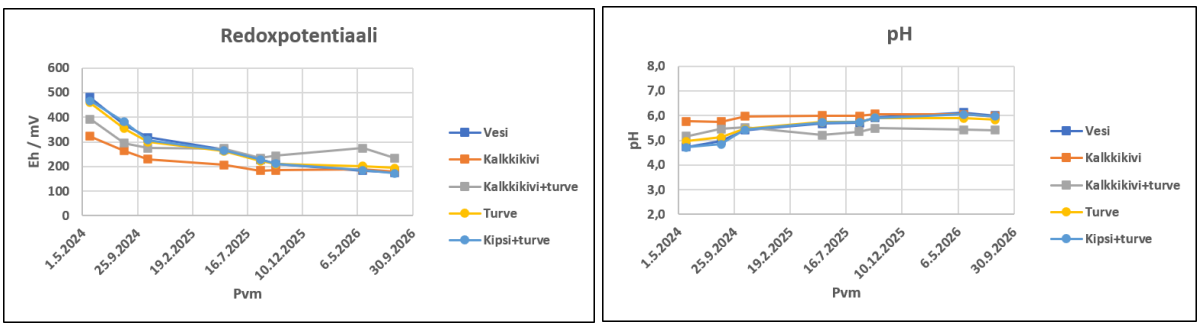
Menetelmäasetelma mahdollisti maaperässä ja vedessä tapahtuvien kemiallisten prosessien kehittymisen seurannan ajan myötä veden kyllästämissä olosuhteissa sekä eri käsittelyvaihtoehtojen vaikutusten arvioinnin.

Kuva 4.2. Maavesinäytteenotto (vasemmalla) ja paljastettu maaprofiili mesokosmiputken nostamisen jälkeen (oikealla). Kuva: Eva Högfors-Rönnholm.

4.3 Tulokset

Koska koe toteutettiin suljetussa järjestelmässä ilman virtausta, liuenneet aineet jäivät koejärjestelmään, mikä osaltaan johti niiden pitoisuuksien kasvuun ajan myötä. Tulokset osoittavat siten, millaisia prosesseja uudelleenvettämisen aikana voi tapahtua, mutta aineiden kulkeutumisen ja käyttäytymisen arvioimiseksi luonnollisissa olosuhteissa tarvitaan lisätutkimuksia kentällä.

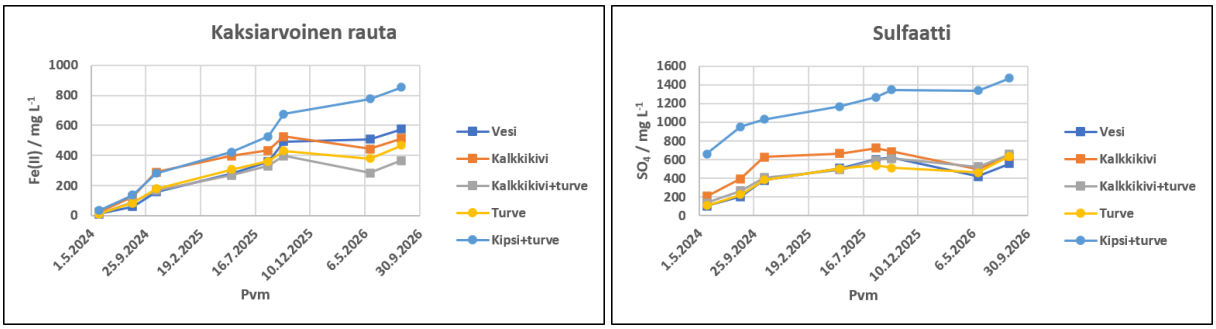
Uudelleenvettäminen johti redoxpotentiaalin asteittaiseen alenemiseen kaikissa käsittelyissä (kuva 4.3), mikä osoittaa hapen saatavuuden vähentyneen. Samanaikaisesti kaksiarvoisen raudan pitoisuudet kasvoivat voimakkaasti, mikä viittaa pelkistävien olosuhteiden muodostumiseen. Tästä huolimatta järjestelmä ei koejakson aikana saavuttanut tilaa, jossa sulfaatin pelkistymistä olisi voitu osoittaa.



Kuva 4.3. Mesokosmiputkien maavedestä mitatut redoxpotentiaali- ja pH-arvot.

Kaikissa käsittelyissä havaittiin pH:n vakiintuvan tasolle 5–6 (kuva 4.3). Käsittelyjen väliset erot olivat suhteellisen pieniä.

Kaksiarvoisen raudan pitoisuudet kasvoivat merkittävästi koko koejakson ajan. Myös sulfaattipitoisuudet nousivat kaikissa käsittelyissä (kuva 4.4). Tämä osoittaa, että maaperän halkeamaverkostossa olevat rauta- ja rikkimineraalit liukenivat vähitellen pelkistävissä olosuhteissa. Kalsiumkarbonaattia sisältäneissä käsittelyissä havaittiin yleisesti ottaen hieman korkeampia kaksiarvoisen raudan ja sulfaatin pitoisuuksia kuin muissa käsittelyissä.



Kuva 4.4. Mesokosmiputkien maavedestä analysoidut rauta(II)- ja sulfaattipitoisuudet.

Kokonaisorgaanisen hiilen pitoisuus kasvoi vähitellen kokeen aikana. Tulokset viittaavat siihen, että orgaanista ainesta vapautui maaperän halkeamapinnoilta ja että se samalla toimi energianlähteenä mikrobien pelkistysprosesseille. Osa orgaanisesta aineksesta on voinut olla peräisin myös pintamaakerroksesta.

Merkittävä myönteinen vaikutus oli useiden metallien, kuten alumiinin, nikkelin, kuparin ja sinkin, immobilisoituminen pelkistävissä olosuhteissa. Samanaikaisesti tunnistettiin kuitenkin myös huomattavia riskejä. Fosforin, arseenin ja vanadiinin pitoisuudet kasvoivat kaikissa käsittelyissä, mikä viittaa niiden liikkuvuuden lisääntymiseen ja kohonneeseen huuhtoutumisriskiin.

Maaperänäytteiden analyysit osoittivat, että uudelleenvettäminen vaikutti ensisijaisesti maaprofiilin yläosaan. Tässä kerroksessa pH nousi samalla kun redoxpotentiaali laski, mikä viittaa vähähappisten ja pelkistävien olosuhteiden kehittymiseen. Profiilin syvemmissä osissa pH oli edelleen alhainen ja redoxpotentiaali suhteellisen korkea, mikä osoittaa, että happea oli edelleen jäljellä eikä veden kyllästäminen ollut ulottunut koko happamoituneeseen maakerrokseen.

Kahdesta vuodesta veden peitossa huolimatta sulfaatin pelkistymisestä ei saatu selviä viitteitä. Monosulfidin ja pyriitin pitoisuudet olivat hyvin alhaisia kaikissa tutkituissa putkissa, mikä osoittaa, että maaperään ei ollut vielä muodostunut sulfidien uudelleenmuodostumiseen tarvittavia voimakkaasti pelkistäviä olosuhteita. Eri käsittelyt eivät myöskään aiheuttaneet maaperässä selviä geokemiallisia eroja.

Mikrobiologiset analyysit vahvistivat geokemialliset tulokset. Maaprofiilin yläosassa bakteeriyhteisöjä hallitsivat anaerobiset ja fakultatiivisesti anaerobiset mikro-organismit, jotka ovat tyypillisiä vähähappisille ympäristöille ja osallistuvat

pelkistys- ja hajotusprosesseihin. Profiilin syvemmissä osissa esiintyi sen sijaan edelleen hapellisiin ja happamiin olosuhteisiin sopeutuneita bakteereja, mikä osoittaa, että alkuperäinen hapan sulfaattimaa ei ollut vielä palautunut täysin pelkistyneeseen tilaan. Eri käsittelyjen vaikutuksista bakteeriyhteisöjen koostumukseen ei havaittu selviä eroja.

4.4 Johtopäätökset

Mesokosmikoe osoitti, että uudelleenvettäminen suljetussa ja hallitussa järjestelmässä vähensi tehokkaasti hapen saatavuutta hapettuneissa happamissa sulfaattimaissa. Tämä loi edellytykset luonnollisille prosesseille, jotka kehittyvät vähähappisissa olosuhteissa. Tulokset osoittivat myös, että useat metallit sitoutuivat uudelleenvettämisen jälkeen voimakkaammin maaperään, mikä viittaa siihen, että niiden liikkuvuus voi tällaisissa olosuhteissa vähentyä.

Samalla koe osoitti, että palautuminen on hidas prosessi. Kahden vuoden veden peitossa olon jälkeen sulfaatin pelkistymistä ei ollut vielä havaittavissa, mikä viittaa siihen, että vakaampien pelkistävien olosuhteiden kehittyminen voi edellyttää pidempää aikaa.

Kokeen aikana myös raudan, fosforin, arseenin ja vanadiinin pitoisuudet maavedessä kasvoivat. Tämä osoittaa, että uudelleenvettäminen voi vaikuttaa aineiden liikkuvuuteen maaperässä. Koska koe toteutettiin suljetussa järjestelmässä, tuloksia ei kuitenkaan voida suoraan yleistää kenttäolosuhteisiin, joissa veden vaihtuvuus, laimeneminen ja kulkeutumisprosessit vaikuttavat todellisiin ympäristövaikutuksiin. Tuloksia tulisi siksi pitää osoituksena mahdollisista prosesseista ja vaikutuksista pikemminkin kuin suorana kuvauksena siitä, mitä luonnollisissa ympäristöissä tapahtuu uudelleenvettämisen yhteydessä.

Uudelleenvettämishankkeissa on tärkeää seurata vedenlaadun kehittymistä pitkällä aikavälillä, jotta toimenpiteen todellisia vaikutuksia voidaan arvioida paikallisissa olosuhteissa.

Johtopäätös	Käytännön merkitys
Uudelleenvettäminen vähensi hapen saatavuutta ja loi edellytykset maaperän luonnollisille prosesseille.	Uudelleenvettäminen voi olla tehokas menetelmä happamien sulfaattimaiden ennallistamiseen.
Useat metallit sitoutuivat voimakkaammin maaperään, mutta samalla joidenkin aineiden pitoisuudet kasvoivat maavedessä.	Vedenlaatua tulee seurata uudelleenvettämishankkeiden yhteydessä.
Palautuminen oli hidasta, ja tulokset perustuvat suljetussa järjestelmässä tehtyyn kokeeseen.	Pitkäaikainen seuranta ja tulosten varmentaminen kenttäolosuhteissa ovat tarpeen.

5 Sulfidimaan geotekninen stabilointi

Sulfidimaan kaivamisen ja käsittelyn tarpeen taustalla on sen painuma-alttius. Sulfidimaalla on korkea vesipitoisuus, eikä se ole konsolidoitunut. Sideaineita, kuten sementtiä, käytetään löyhien maiden ja sedimenttien lujittamiseen sekä niiden luonnollisella sijaintipaikalla (*in situ*) että kaivamisen jälkeen.

Tämän luvun tavoitteena on ollut kehittää strategia kaivettujen sulfidimaamassojen geotekniseen stabilointiin, jotta niitä voitaisiin hyödyntää rakenteissa, joiden tekniset vaatimukset ovat alhaisemmat kuin teiden ja rautateiden rakentamisessa.

5.1 Periaate – sulfidimaan ominaisuuksien parantaminen sideaineilla

Sopivan strategian valitsemiseksi kaivettujen maamassojen käsittelyyn on tutkittava useita keskeisiä maaperäparametreja, jotta stabilointi voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti ja onnistuneesti. Arvioitavat keskeiset parametrit esitetään alla.

- Geotekniset parametrit (vesipitoisuus ja raekokojakauma).
- Geokemialliset parametrit (rikkipitoisuus sekä orgaanisen aineksen määrä hehkutushäviönä (loss on ignition, LOI)).

Erilaiset sulfidimaat voidaan ryhmitellä näiden geoteknisten ja geokemiallisten ominaisuuksien perusteella, sillä eri maalajit edellyttävät erilaisia käsittely- ja hallintastrategioita. Näiden parametrien perusteella maa voidaan luokitella seuraavasti:

Ryhmä	Luokka	Maaperän ominaisuudet
1	Soveltuu stabiloitavaksi	• Keskisuuri tai alhainen rikkipitoisuus (0,2 – 0,5 %) • Keskisuuri tai korkea kuiva- ainepitoisuus (>60 %) • Hienorakeinen maa • Alhainen happamoitumispotentiaali • Alhainen hehkutushäviö (LOI < 5 %)
2	Soveltuvuus stabilointiin epävarma	• Vaihteleva rikkipitoisuus (0,2–1,0 %) • Alhainen kuiva-ainepitoisuus (50 – 60 %) • Edellyttää esikäsittelyä (kuivatus, vedenpoisto, sekoitus tai lajittelu)
3	Ei sovellu stabiloitavaksi	• Korkea rikkipitoisuus (>1,0 %) • Korkea happamoitumispotentiaali • Hyvin alhainen kuiva-ainepitoisuus (<50 %) • Korkea hehkutushäviö (LOI > 6 %)

Stabilointi ja uudelleenkäyttö arvioidaan soveltuvaksi vaihtoehdoksi ryhmän 1 maille. Ryhmän 2 maat voivat tietyin edellytyksin soveltua stabiloitaviksi. Tämä voi kuitenkin

edellyttää lisäkäsittelyä ja ylimääräisiä resursseja ennen stabiloinnin toteuttamista, mikä voi lisätä kustannuksia merkittävästi. Ryhmän 3 maita ei suositella stabiloitaviksi, koska niiden käsittely vaatisi suuren määrän sideainetta ilman varmuutta siitä, että riittävä suorituskyky saavutetaan. Tämän vuoksi suositellaan, että nämä maat sijoitetaan läjitysalueille tai rakenteisiin ilman käsittelyä (ks. luku 3.2).

Sementin lisäksi voidaan käyttää myös muita sideaineita joko yhdessä sementin kanssa tai sellaisenaan käsittelyn ympäristövaikutusten vähentämiseksi.

5.2 Sideaineen valinta ja mitoitus

Kenttäkoe toteutettiin Umeå deponi och avfallscenter -alueella, jossa sulfidimaata sekoitettiin eri määriin sideaineita. Kaivettua sulfidimaata, jonka rikkipitoisuus oli 0,5 % (5 000 mg/kg KA), kuiva-ainepitoisuus 79 % ja LOI 2 %, käsiteltiin kolmella eri sideainevaihtoehdolla (laskettuna prosentteina maan ja sideaineen yhteenlasketusta kuivapainosta): 4 % Multicem (4MC), 8 % Meesa (8M) sekä yhdistelmä 2 % Multicem + 6 % Meesa (2MC6M). Multicem on sementtipohjainen sideaine (50 % sementtiä + 50 % sementtiuunipölyä), kun taas Meesa on sellu- ja paperiteollisuuden sivutuote. Sideaineet sekoitettiin maahan kahdesti Allu Transformer -sekoituskauhalla, mallia DS 4-23 (kuva 5.1). Myös käsittelemätöntä maata tutkittiin vertailunäytteenä.

Kuva 5.1. Sideaineiden sekoittaminen sulfidimaahan Allu Transformer -sekoituskauhalla, mallia DS 4-23 (vasemmalla), sekä sekoitetun maan näytteenotto geoteknisiä analyysejä varten (oikealla). Kuva: Eva Högfors-Rönnholm.

Yksiaksiaalisia puristuslujuuskokeita (engl. unconfined compressive strength, UCS) tehtiin sekä kentällä että laboratoriossa sekoitetuille näytteille eri kovettumisaikojen jälkeen (7, 28 ja 180 vuorokautta), jotta voitiin arvioida sideaineiden vaikutusta maan lujuuteen lyhyellä ja pitkällä aikavälillä.

Kenttäkokeen geokemiallisen kehityksen arvioimiseksi maan pH mitattiin välittömästi sekoituksen jälkeen sekä kuuden kuukauden kuluttua. Maasta määritettiin myös

monosulfidin ja pyriitin määrät hapettumisen etenemisen selvittämiseksi. Mikrobiologista kehitystä arvioitiin analysoimalla maan mikro-organismien DNA:ta. Tavoitteena oli selvittää, miten erilaiset sideaineet vaikuttivat mikrobiyhteisöihin ajan kuluessa ja miten nämä muutokset olivat yhteydessä maan geokemiallisiin ominaisuuksiin.

5.3 Sekoitusmenetelmä

Sideaineen tasainen jakautuminen maahan on ratkaisevan tärkeää tehokkaan stabiloinnin kannalta. Sekoituksen laatu vaikuttaa suoraan käsitellyn maan lopulliseen suorituskykyyn.

Laboratoriossa valmistetaan pieniä koekappaleita, minkä vuoksi homogeenisen seoksen aikaansaaminen on helpompaa (kuva 5.2). Kenttäsekoitus on sen sijaan haastavampaa suurempien käsiteltävien massojen ja käytettävän kaluston rajoitteiden vuoksi, mikä voi johtaa siihen, ettei sideaine sekoitu maahan riittävän tasaisesti.

Kuva 5.2. Näytteiden valmistelu laboratoriossa. Maan ja sideaineen sekoitus (vasemmalla). Koesylinterit (oikealla, ylhäällä), joille tehdään puristuskoe lujuuden määrittämiseksi (oikealla, alhaalla). Kuva: Ramesh Kumar Thakur.

Laboratoriossa sekoitetut näytteet saavuttivat sementillä käsitellyssä maassa 4–5 kertaa suuremman lujuuden kuin kentällä sekoitetut näytteet. Tämä osoittaa, että sekoituksen laatu on merkittävämpi tekijä kuin sideainetyyppien väliset erot. Tämän vuoksi kenttäsekoitus edellyttää sekä tehokasta sekoituskalustoa että huolellisesti suunniteltua työmenetelmää, joka voi tarvittaessa sisältää useita sekoitusvaiheita

tasaisen käsittelyn varmistamiseksi. Mikäli kenttäsekoituksen laatu jää puutteelliseksi, stabiloinnin vaikutus voi olla vähäinen riippumatta käytetystä sideaineesta.

5.4 Sideaineiden vaikutus geokemiaan ja mikrobiologiaan

Kokeen alkaessa maan mikrobiyhteisö oli hyvin samankaltainen käsittelystä riippumatta, vaikka maan pH vaihteli noin arvosta 7 käsittelemättömässä vertailunäytteessä noin arvoon 12 maassa, johon oli sekoitettu 4 % Multicem-sideainetta. Tämä osoittaa, että mikrobiologiset muutokset tapahtuvat hitaammin kuin kemialliset muutokset. Kokeen alussa mikrobiyhteisöä hallitsivat sulfidimaille tyypilliset lajit, kuten neutrofiiliset ja anaerobiset mikro-organismit, joilla on raudan ja rikin hapetukseen, rikin pelkistykseen, hiilen ja typen kiertoon sekä orgaanisen aineksen hajotukseen ja fermentaatioon liittyviä toimintoja. Kokeen alkaessa sulfidimaa sisälsi 0,05 % monosulfideja ja 0,61 % pyriittiä.

Kuuden kuukauden kuluttua käsittelyjen mikrobiyhteisöt olivat kuitenkin muuttuneet täysin verrattuna lähtötilanteeseen, ja ne erosivat myös toisistaan. Käsittelemättömän vertailunäytteen mikrobiyhteisö, jossa pH oli tuolloin noin 3, oli kehittynyt happamalle sulfaattimaalle tyypilliseksi yhteisöksi. Sitä hallitsivat asidofiiliset ja happamia olosuhteita sietävät lajit, joilla on raudan ja rikin hapetukseen liittyviä toimintoja. Tässä käsittelyssä kaikki monosulfidi oli hapettunut, ja pyriittiä oli jäljellä enää 0,03 %. Mikrobiyhteisöt sulfidimaassa, joka oli stabiloitu 4 % Multicem-sideaineella (pH noin 9) tai yhdistelmällä 2 % Multicem + 6 % Meesa (pH noin 8), olivat kehittyneet samankaltaisesti. Näissä yhteisöjä hallitsivat neutrofiiliset lajit, joiden toiminta liittyi pääasiassa rikin hapetukseen ja orgaanisen aineksen hajotukseen. 8 % Meesa-sideaineella stabiloidun sulfidimaan mikrobiyhteisö (pH 7,5) muistutti eniten käsittelemättömän vertailunäytteen yhteisöä. Sitä hallitsivat raudan ja rikin hapetukseen osallistuvat bakteerit, joista osa oli myös asidofiilisia tai happamia olosuhteita sietäviä lajeja. Stabiloiduissa kasoissa kaikki monosulfidi oli hapettunut, mutta pyriitti oli osittain suojautunut hapettumiselta, ja noin puolet siitä oli edelleen jäljellä kuuden kuukauden kuluttua.

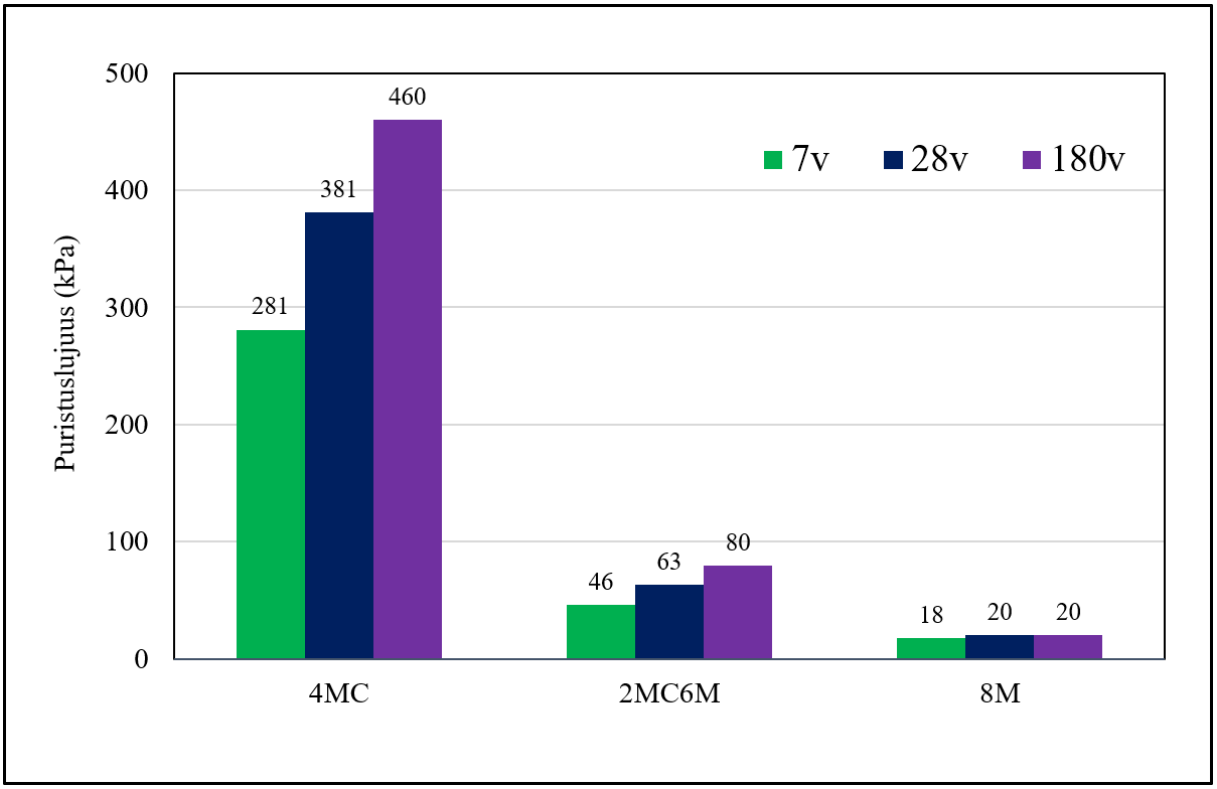
Käsitellyn maan pH mitattiin uudelleen kahdentoista kuukauden kuluttua. pH ei ollut muuttunut verrattuna kuuden kuukauden mittauksiin, vaan se oli pysynyt vakaana. Myös maan monosulfidi- ja pyriittipitoisuudet määritettiin kahdentoista kuukauden kuluttua. Nekään eivät olleet muuttuneet verrattuna kuuden kuukauden tuloksiin, vaan pitoisuudet olivat säilyneet samalla tasolla.

5.5 Sideaineiden vaikutus lujuuteen

Eri sideaineiden tehokkuus vaihtelee. Kuvassa 5.3 esitetään yhteenveto siitä, miten sideaineet vaikuttivat laboratoriossa stabiloidun maan lujuuteen.

- 4 % Multicem (4MC) lisäsi maan lujuutta.
- 2 % Multicem + 6 % Meesa (2MC6M) tuotti pienemmän lujuuden kuin pelkkä Multicem.

- 8 % Meesa (8M) ei parantanut maan lujuutta.



Kuva 5.3. Laboratoriossa stabiloidun sulfidimaan puristuslujuus eri kovettumisaikojen (7, 28 ja 180 vuorokautta) jälkeen. Käytetyt sideaineet olivat 4 % Multicem (4MC), 2 % Multicem + 6 % Meesa (2MC6M) sekä 8 % Meesa (8M).

Tutkimus osoitti, että sementtipohjaiset sideaineet, kuten Multicem ja Portland-sementti, soveltuvat hyvin sellaisen maan lujuuden parantamiseen, jonka rikkipitoisuus on alhainen tai kohtalainen (enintään 1 %) ja vesipitoisuus hallittavissa (enintään 50 %). Tällaisissa maissa stabilointi on sekä teknisesti että ympäristön kannalta toteuttamiskelpoinen ratkaisu. Meesaa ei suositella lujuuden parantamiseen, mutta se voi soveltua maamassojen happamoitumispotentiaalin neutralointiin. Tämän jälkeen maamassoja voidaan hyödyntää käsittelemättömän sulfidimaan läjitysalueiden peittorakenteissa. Parhaillaan tutkitaan muita lisäaineita, joilla meesa voitaisiin korvata osittain tai kokonaan sementin korvaajana. Soveltuvien sideainereseptien löytämiseksi suositellaan laboratoriokokeiden tekemistä ennen menetelmän käyttöönottoa.

Kokeiden tuloksia kuvataan yksityiskohtaisemmin seuraavissa julkaisuissa:

1. Ziagharib, A., Macsik, J., Jia, Q., & Maurice, C. (2026). Factors influencing the effectiveness of acid sulfate soil stabilization with cement-based binders. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 85, https://doi.org/10.1007/s10064-026-04784-8.
2. Ziagharib, A., Jia, Q., Macsik, J., Laue, J., & Maurice, C. (2024). Predictive pattern of undrained shear strength in stabilized sulfur rich silty soil based on binder and initial mixing water content. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42, 5033–5050, https://doi.org/10.1007/s10706-024-02828-y.
3. Ziagharib, A., Maurice, C., Macsik, J., Jia, Q., & Laue, J. (2023). Performance of excavated sulfur-rich soil stabilized with binder: A field study of mixing efficiency. *Advances in Civil Engineering*, 5446332, https://doi.org/10.1155/2023/5446332.
4. Thakur, R. K., Maurice, C., Jia, Q., Do, T., & Macsik, J. (2026). Factors affecting the strength of cement stabilized sulfide soil. *Proceedings of the 21st ICSMGE, Vienna, Austria, 14 – 19 June 2026*, https://doi.org/10.53243/ICSMGE2026-1127.
5. Thakur, R. K. (2026). Mechanical stabilization of sulfide soils: Influence of soil properties and oxidation on strength development. Lisensiaatintutkielma, Luleå tekniska universitet, https://ltu.divaportal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A2066466&dswid=3326.

5.6 Johtopäätökset

Tulokset osoittavat, että kaivettuja sulfidimaita voidaan monissa tapauksissa stabiloida sideaineilla ja hyödyntää uudelleen erilaisissa maarakennuskohteissa. Samalla maiden ominaisuudet ovat ratkaisevassa asemassa lopputuloksen kannalta, minkä vuoksi jokaista hanketta tulee edeltää huolellinen materiaalien karakterisointi sekä laboratoriokokeet.

Aihealue	Johtopäätös	Suositus
Sulfidimaan uudelleenkäyttö	Sulfidimaita voidaan sopivissa olosuhteissa stabiloida sideaineilla, jolloin ne voivat saavuttaa riittävän lujuuden käytettäviksi uudelleen rakenteissa, joihin kohdistuu vähäinen tai kohtalainen kuormitus.	Harkitse stabiloitujen massojen hyödyntämistä esimerkiksi meluvallien, vastapenkereiden, jalankulku- ja pyöräteiden sekä pysäköintialueiden rakentamisessa.

Peittomateriaali	Stabiloitua maata, jonka lujuus on alhaisempi, voidaan käyttää käsittelemättömän sulfidimaan peittomateriaalina.	Sovita käyttökohde saavutetun lujuustason mukaan.
Sulfidimaan ominaisuudet	Sulfidimaiden koostumus vaihtelee huomattavasti, mikä vaikuttaa stabiloinnin tuloksiin. Suuret vesi-, rikki- ja orgaanisen aineksen pitoisuudet heikentävät yleensä lujuuden kehittymistä.	Karakterisoi maamassat ennen toimenpiteiden suunnittelua ja varaudu käyttämään suurempia sideainemääriä vaativammissa maissa.
Sideaineen valinta	Sementtipohjaiset sideaineet osoittivat hyvää kykyä parantaa erityyppisten sulfidimaiden lujuutta.	Varmista tulokset laboratoriokokeilla. Sementtipohjaiset sideaineet (esimerkiksi Multicem) ovat tehokkaita. Tutkimusta tehdään parhaillaan sementin osittaiseksi tai täydelliseksi korvaamiseksi muilla lisäaineilla.
Laadunvarmistus	Stabiloinnin onnistuminen riippuu suuresti sekoituksen laadusta ja vesipitoisuuden hallinnasta.	Varmista huolellinen kenttäsekoitus ja noudata laadittua reseptiä koko toteutuksen ajan.
Kokeet ja varmentaminen	Sulfidimaiden suuri vaihtelu tekee tulosten ennustamisesta vaikeaa ilman testauksia.	Toteuta aina laboratoriokokeet ennen laajamittaista stabilointia sopivan sideainemitoituksen määrittämiseksi.
Vaihtoehtoiset ratkaisut	Osa sulfidimaista voi olla teknisesti haastavia tai vaatia stabilointiin huomattavia resursseja.	Harkitse paikallisia läjitysratkaisuja tai sijoittamista läjitysalueelle, mikäli stabilointia ei arvioida realistiseksi vaihtoehdoksi.

Sulfidimaamassojen tehokkaan hallinnan varmistamiseksi suositellaan seuraavaa toimintamallia:

1. Määritä ja luokittele maamassat niiden geoteknisten ja geokemiallisten ominaisuuksien perusteella.
2. Priorisoi stabilointiin maamassat, joiden vesi-, rikki- ja orgaanisen aineksen pitoisuudet ovat alhaisemmat.
3. Toteuta laboratoriokokeet sopivan reseptin ja sideainemitoituksen määrittämiseksi.
4. Varmista kenttäsekoituksen hyvä laatu ja seuraa vesipitoisuutta työn toteutuksen aikana.
5. Arvioi vaihtoehtoisia käsittelymenetelmiä maille, joiden stabilointi on teknisesti epävarmaa tai kustannuksiltaan korkeaa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että Multicemillä ja muilla sementtipohjaisilla sideaineilla toteutettava stabilointi on monille sulfidimaille teknisesti toteuttamiskelpoinen ja taloudellisesti houkutteleva ratkaisu. Stabiloinnin onnistuminen riippuu kuitenkin ensisijaisesti maiden geokemiallisista ominaisuuksista sekä kenttäsekoituksen laadusta, eikä pelkästään käytetyn sideaineen valinnasta.

6 Sulfidimaiden käsittelyyn liittyvä lainsäädäntö

6.1 Ruotsi

Sulfidimaiden käsittelyä tai sijoittamista ei säädellä Ruotsissa erillisellä lailla. Euroopan unionin direktiivit ja asetukset muodostavat kuitenkin tärkeän perustan jätteiden käsittelylle ja loppusijoittamiselle Ruotsissa. Direktiiveissä määritellään jäsenvaltioita koskevat vaatimukset, mutta kukin jäsenvaltio saattaa ne osaksi kansallista lainsäädäntöään omalla tavallaan (Avfall Sverige, 2021). Asetukset puolestaan ovat sellaisenaan sitovia ja niitä sovelletaan yhdenmukaisesti kaikissa EU:n jäsenvaltioissa.

EU:n jätepuitedirektiivissä (2008/98/EY) säädetään jätehuollon perusperiaatteista Euroopan unionissa. Direktiivi sisältää muun muassa jätehierarkiaa, hyödyntämistä ja loppukäsittelyä koskevia yleisiä vaatimuksia sekä muita jätehuollon keskeisiä periaatteita (Avfall Sverige, 2021). Direktiivi on saatettu osaksi Ruotsin kansallista lainsäädäntöä muun muassa seuraavien säädösten kautta: miljöbalken (1998:808), avfallsförordningen (2020:614), förordningen om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd (1998:899), miljöprövningsförordningen (2013:251) sekä förordningen om deponering av avfall (2001:512).

Vesiympäristön suojelua säädellään EU:n vesipuitedirektiivillä (2000/60/EY). Direktiivin tavoitteena on varmistaa pinta- ja pohjavesien hyvä tila koko Euroopan unionin alueella. Vesipuitedirektiivi ja sen nojalla annetut tytärdirektiivit on saatettu osaksi Ruotsin lainsäädäntöä pääasiassa säädösten Miljöbalken ja Vattenförvaltningsförordningen (2004:660) kautta sekä lisäksi viranomaisten Havs- och vattenmyndigheten ja Sveriges geologiska undersökning pinta- ja pohjavesien ympäristönlaatunormeja koskevien määräysten avulla. Nämä säädökset ovat tärkeitä sulfidimaiden käsittelyn ja läjittämisen kannalta, sillä virheellinen käsittely voi johtaa maan hapettumiseen ja muuttumiseen happamaksi sulfaattimaaksi. Tällöin seurauksena voi olla ympäristön happamoitumista sekä metallien vapautumista, mikä voi vaikuttaa haitallisesti ympäröiviin maa- ja vesiympäristöihin (Länsstyrelsen Västerbotten, 2017).

Kaatopaikka katsotaan Miljöbalken-lain 9 luvun mukaiseksi ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavaksi toiminnaksi, ja kaatopaikan perustaminen sekä toiminta edellyttävät lupaa. Säädöksessä Miljöprövningsförordningen (2013:251) määritellään, edellyttääkö toiminta tai toimenpide lupaa vai ilmoitusta Miljöbalken-lain 9 luvun 6 §:n mukaisesti (Avfall Sverige, 2021). Toiminnat luokitellaan A-, B- ja C-toiminnoiksi niiden arvioidun ympäristövaikutuksen perusteella. Jätteiden kaatopaikat ovat yleensä luvanvaraisia, ja ne luokitellaan A- tai B-toiminnoiksi. Tällöin lupaa on haettava joko Mark- och miljödomstolen -tuomioistuimelta tai Miljöprövningsdelegationen -toimielimeltä, joka toimii Länsstyrelsen-viranomaisen yhteydessä (Länsstyrelsen Västra Götaland, 2025). Lisäksi määritellään, onko toiminta teollisuuspäästötoiminta (merkintä ”-i”) ja sovelletaanko siihen asetusta

Industriutsläppsförordningen (2013:250). Ruotsin teollisuuspäästöjä koskeva sääntely perustuu EU:n teollisuuspäästödirektiiviin (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU teollisuuden päästöistä), jonka kansalliseen täytäntöönpanoon kuuluu muun muassa Industriutsläppsförordningen. Direktiivin yleisenä tavoitteena on rajoittaa päästöjä ilmaan, veteen ja maaperään sekä vähentää syntyvän jätteen määrää (Avfall Sverige, 2021). Direktiivin tavoitteena on myös ehkäistä ja vähentää teollisen toiminnan aiheuttamaa pilaantumista, ja se edellyttää parhaan käyttökelpoisen tekniikan (BAT) käyttöä. Kaatopaikkoja eivät kuitenkaan koske BAT-päätelmät. Sen sijaan asetus edellyttää, että lupahakemuksen yhteydessä toimitetaan perustilaselvitys (statusrapport), jossa kuvataan maaperän ja pohjaveden lähtötilanne (Länsstyrelsen Västerbotten, 2019).

Kun sulfidimaa kaivetaan ja sitä ei voida hyödyntää uudelleen, sitä pidetään Miljöbalken-lain (MB) 15 luvun 1 §:n mukaisesti jätteenä. Tällöin sovelletaan myös säädöstä Avfallsförordningen (SFS 2020:614), jossa säädetään jätteen luokittelusta ja käsittelystä. Mikäli tiettyä jätelajia koskevaa erityissääntelyä ei ole, sovelletaan Avfallsförordningen-asetuksen yleisiä säännöksiä (Avfall Sverige, 2021).

Jätteiden kaatopaikkasijoittamista koskeva sääntely perustuu EU:n kaatopaikkadirektiiviin (Neuvoston direktiivi 1999/31/EY jätteiden kaatopaikoista). Ruotsissa direktiivi on pantu täytäntöön pääasiassa säädöksillä Förordningen om deponering av avfall (2001:512) sekä Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall (NFS 2004:10). Sääntelyn mukaan kaatopaikat on suunniteltava, rakennettava ja niitä on käytettävä siten, että maaperän, pintavesien, pohjaveden ja ilman pilaantumisriski minimoidaan. Tämä voi tarkoittaa esimerkiksi pohjarakenteiden tiivistämistä, eristävien suojarakenteiden käyttöä sekä suotovesien keräystä ja seurantaa. Sääntelyyn sisältyy lisäksi vaatimuksia kaatopaikan tarkkailusta sekä toiminnan aikana että sen sulkemisen jälkeen (Avfall Sverige, 2021).

Ruotsissa sulfidimaata sijoittavat kaatopaikoille niin kunnalliset, yksityiset kuin valtiollisetkin toimijat. Dåva Norra on yksi Pohjois-Ruotsin suurimmista kunnallisista sulfidimaan kaatopaikoista, ja sen toiminta kuuluu Miljöbalken-lain mukaisen ympäristöluvan piiriin. Kaatopaikan lupa on myönnetty Miljöprövningsdelegationen-toimielimen toimesta Länsstyrelsen Västerbotten -viranomaisen yhteydessä, ja lupa säätelee muun muassa kaatopaikan sijaintia, suunnittelua, käyttöä, tarkkailua ja jälkihoitoa (Länsstyrelsen Västerbotten, 2019). Luvassa määritellään ne puitteet ja ehdot, joiden mukaisesti toimintaa voidaan harjoittaa. Tavoitteena on ehkäistä ja rajoittaa ihmisten terveydelle ja ympäristölle aiheutuvia haitallisia vaikutuksia. Tämän vuoksi sulfidimaa pidetään vesikylläisenä erityisesti suunnitelluissa soluissa hapettumisen estämiseksi ja siten happamoitumisen sekä metallien huuhtoutumisen riskin vähentämiseksi (ks. luku 3.2.4 Dåva Norra -läjitysalueen kuvaus).

Ympäristöluvan saamisen edellytyksenä Miljöbalken-lain mukaiselle ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavalle toiminnalle on, että toiminnanharjoittaja järjestää

ennen lupahakemuksen jättämistä kuulemismenettelyn (samråd) Miljöbalken-lain 6 luvun 28 §:n mukaisesti riippumatta siitä, luokitellaanko toiminta A- vai B-toiminnaksi (Avfall Sverige, 2021; Länsstyrelsen Västra Götaland, 2025). Kuulemismenettelyn tarkoituksena, jota säätelee muun muassa Miljöbedömningsförordningen (2017:966), on kerätä lupakäsittelyn kannalta merkityksellistä tietoa sekä tarjota vaikutuspiiriin kuuluville tahoille, kuten lähialueen asukkaille, kunnalle ja viranomaisille, mahdollisuus esittää näkemyksiään hankkeesta (Länsstyrelsen Västra Götaland, 2025). Lupahakemukseen on liitettävä ympäristövaikutusten arviointiselostus (YVA-selostus, miljökonsekvensbeskrivning, MKB), ja kuulemismenettelyn on oltava päättynyt ennen kuin lupahakemus voidaan ottaa käsiteltäväksi. Lupahakemuksen sisältöä koskevat yleiset vaatimukset esitetään Miljöbalken-lain 22 luvun 1 §:ssä.

Asetuksessa Förordningen om deponering av avfall (2001:512) edellytetään, että kaatopaikka sijoitetaan ja suunnitellaan siten, ettei siitä aiheudu merkittävää vaaraa ympäristölle. Asetuksessa asetetaan myös vaatimuksia teknisille suojarakenteille, kuten eristys- ja tiivistysrakenteille, joilla on tärkeä merkitys maaperään ja vesiin kohdistuvan haitta-aineiden leviämisen ehkäisemisessä. Tapauksissa, joissa Förordningen om deponering av avfall (2001:512)-asetuksen yksittäisten säännösten ei katsota soveltuvan kyseiseen toimintaan, voidaan myöntää poikkeuksia, edellyttäen että ne perustellaan lupahakemuksessa ja hyväksytään lupapäätöksessä. Dåva Norra-kaatopaikan osalta Miljöprövningsdelegationen on hyväksynyt poikkeuksia useista kaatopaikka-asetuksen teknisistä vaatimuksista.

Poikkeus voidaan myöntää asetuksen Förordningen om deponering av avfall 19–22 §:ssä säädetyistä geologista estettä, keinotekoista geologista estettä, tulvasuojausta ja pohjatiivistystä koskevista vaatimuksista sekä loppupeittorakenteita koskevista vaatimuksista. Nämä vaatimukset ovat muutoin keskeisiä tavanomaisilla kaatopaikoilla, joilla tavoitteena on rajoittaa jätteen kosketusta sade- ja pohjaveden kanssa ja siten ehkäistä haitta-aineiden leviämistä ympäristöön. Poikkeuksia perustellaan sillä, että sulfidimaan ominaisuudet ja valittu kaatopaikkatekniikka perustuvat materiaalin sijoittamiseen vesikylläisissä olosuhteissa hapettumisen estämiseksi (Länsstyrelsen Västerbotten, 2019).

Kaatopaikkatoimintaa harjoittaville toimijoille asetetaan erityisiä vaatimuksia taloudellisen vakuuden osalta. Miljöbalken-lain 15 luvun 35 §:n mukaan jätteen kaatopaikkasijoittamista koskeva lupa voidaan myöntää ainoastaan, jos taloudellinen vakuus varmistaa toiminnanharjoittajan lupaehtojen mukaisten velvoitteiden täyttämisen (Avfall Sverige, 2021; Länsstyrelsen Västerbotten, 2019). Vakuudesta säädetään Miljöbalken-lain 16 luvun 3 §:ssä, ja sen tarkoituksena on kattaa ympäristövahinkojen korjaamisesta sekä muista toiminnan mahdollisesti edellyttämistä ennallistamis- ja kunnostustoimenpiteistä aiheutuvat kustannukset.

6.2 Suomi

Kuten Ruotsissakaan, Suomessa ei ole erityistä lainsäädäntöä, joka koskisi nimenomaisesti sulfidimaiden käsittelyä tai sijoittamista. Sääntely perustuu sen sijaan EU-direktiiveihin, jotka on saatettu osaksi kansallista ympäristö-, vesi- ja jätelainsäädäntöä. Lainsäädännössä ei myöskään erikseen huomioida sulfidimaita tai happamia sulfaattimaita rakennushankkeissa, vaan niiden käsittelyä arvioidaan voimassa olevan yleisen lainsäädännön puitteissa (Ympäristöministeriö, 2022).

Keskeinen kansallinen ympäristölainsäädäntö, joka vastaa Ruotsin Miljöbalken-lakia, on ympäristönsuojelulaki (527/2014). Lain tavoitteena on ehkäistä ympäristön pilaantumista ja torjua siitä aiheutuvia haittoja. Lain 6 §:n mukaan toiminnanharjoittajan on oltava riittävästi selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista ja ryhdyttävä tarpeellisiin toimenpiteisiin haitallisten vaikutusten ehkäisemiseksi. Lain 16 §:ssä säädetään maaperän pilaamiskiellosta ja 17 §:ssä pohjaveden pilaamiskiellosta. Näiden säännösten tarkoituksena on ehkäistä ympäristön pilaantumista sekä suojella maaperää ja pohjavesiä haitallisilta päästöiltä ja muilta ympäristövaikutuksilta.

Ympäristönsuojelulaissa säädetään myös ympäristöluvanvaraisista toiminnoista. Toiminnan laajuudesta riippuen lupaviranomaisena toimii joko Lupa- ja valvontavirasto tai kunnan ympäristönsuojeluviranomainen (Suomen ympäristöhallinto, 2026). Pilaantuneiden maa-ainesten loppusijoittaminen on ympäristön pilaantumisen vaaraa aiheuttavaa toimintaa ja siten ympäristöluvanvaraista. Jos toiminnalla voi lisäksi olla vaikutuksia pohjaveteen, hankkeelle voidaan tarvita myös vesilain (587/2011) mukainen lupa (Nordmyr, 2025). Esimerkiksi hankkeet, joihin liittyy pohjaveden pinnan alentamista tai merkittävää vedenottoa, voivat vaikutuksistaan riippuen edellyttää vesilain mukaista lupaa tai ilmoitusmenettelyä toimivaltaiselle viranomaiselle (Ympäristöministeriö, 2022).

Jätelainsäädäntö perustuu EU:n jätepuitedirektiiviin, ja Suomessa se on pantu täytäntöön pääasiassa jätelailla (646/2011). Kaivettuja maa-aineksia, kuten sulfidimaita, ei yleensä luokitella jätteeksi, jos ne ovat pilaantumattomia ja niiden hyödyntäminen on varmistettu (Toivonen, 2025). Näiden maiden käsittelyyn voi kuitenkin liittyä ympäristöriskejä niiden happoa tuottavan potentiaalin vuoksi, sillä hapelle altistuminen voi lisätä metallien liukoisuutta ja vapautumista ympäristöön. Ympäristönsuojelulain (527/2014) mukaan toiminnanharjoittajan on ehkäistävä ympäristön pilaantumista ja oltava riittävästi selvillä toimintansa ympäristövaikutuksista sekä niihin liittyvistä riskeistä (Ympäristöministeriö, 2022).

Kaatopaikkatoiminnan sääntely perustuu Ruotsin tavoin EU:n kaatopaikkadirektiiviin, ja Suomessa se on pantu täytäntöön muun muassa jätelailla (646/2011) sekä valtioneuvoston asetuksella kaatopaikoista (331/2013). Asetuksessa säädetään kaatopaikkojen sijaintia, rakenteita, käyttöä, tarkkailua ja jälkihoitoa koskevista vaatimuksista tavoitteena ehkäistä pinta- ja pohjavesien, maaperän sekä ilman pilaantumista. Toiminnanharjoittaja vastaa lisäksi toiminnan ympäristövaikutuksista,

toiminnan lopettamiseen liittyvistä toimenpiteistä sekä mahdollisten ympäristövahinkojen ehkäisemisestä ja korjaamisesta voimassa olevan ympäristö- ja jätelainsäädännön mukaisesti.

Suomessa on vain vähän esimerkkejä erityisesti sulfidimaita varten rakennetuista kaatopaikoista. Mikäli sulfidimaiden sijoittaminen on tarpeen, massat käsitellään yleensä olemassa olevilla maa-aines- tai jätekaatopaikoilla. Tällöin maa stabiloidaan esimerkiksi kalkilla tai sekoitetaan vähärikkiseen maahan ennen loppusijoittamista. Joissakin suurissa infrastruktuurihankkeissa on rakennettu erillisiä sijoitusalueita sulfidimaille, esimerkiksi tiehankkeiden yhteydessä (Juslin, 2025). Ruotsin tavoin myös Suomessa sulfidimaita stabiloidaan kalkilla, minkä jälkeen niitä voidaan hyödyntää rakenteissa tai kaatopaikkojen pintarakenteissa ja loppupeittorakenteissa (Serenius, 2024).

Vaihtoehtona loppusijoittamiselle voidaan hyödyntää maamassoja esimerkiksi erilaisissa maarakenteissa tai meluvalleissa edellyttäen, että massat stabiloidaan tai suojataan siten, että happamoitumisriski pysyy hallinnassa. Joissakin tapauksissa massoja voidaan hyödyntää myös maatalouskäytössä tai sijoittaa pysyvästi vedenpinnan alapuolelle, esimerkiksi altaisiin tai käytöstä poistettuihin maa-ainesten ottopaikkoihin. Tällaisten ratkaisujen toteuttaminen edellyttää tapauskohtaista arviointia, ja ne voivat vaatia luvan tai muun viranomaishyväksynnän (Ympäristöministeriö, 2022).

Käytännössä sulfidimaiden käsittely poikkeaa jossain määrin Ruotsissa sovellettavista menetelmistä. Yleisenä käytäntönä on käsitellä sulfidimaat niiden syntypaikalla kalkitsemalla maamassat (Serenius, 2024; Bagge, 2025). Kalkituksen tavoitteena on vähentää sulfidimaiden haitallisia ympäristövaikutuksia ja happamoitumisriskiä (Ympäristöministeriö, 2022). Mikäli neutralointiin käytetään kaupallisia kalkkituotteita, toimenpidettä ei yleensä pidetä jätteen hyödyntämisenä. Jos neutralointi sen sijaan toteutetaan jätteeksi luokiteltavilla materiaaleilla, kuten lentotuhkalla, hankkeeseen voi liittyä ympäristölainsäädännön mukaisia lupa- tai muita viranomaismenettelyjä (Ympäristöministeriö, 2022).

Työmailla tapahtuva maa-ainesten lyhytaikainen välivarastointi ei yleensä edellytä erillistä lupaa. Tämä kuitenkin edellyttää, että toiminnanharjoittaja on riittävästi selvillä toiminnan ympäristövaikutuksista ja ryhtyy tarvittaviin toimenpiteisiin maaperän ja pohjaveden pilaantumisen ehkäisemiseksi. Mikäli varastointi jatkuu pitkään tai toiminta muuten rinnastuu maa-ainesten pysyvämpään käsittelyyn tai sijoittamiseen, se voi edellyttää ympäristölupaa tai muita viranomaismenettelyjä. Luvantarve arvioidaan tapauskohtaisesti toiminnan laajuuden, maa-ainesten ominaisuuksien ja ympäristövaikutusten perusteella (Ympäristöministeriö, 2022).

7 Lähteet

Avfall Sverige. 2021. Avfall Sveriges Deponihandbok: Reviderad handbok för deponering – en del av morgondagens avfallshantering. Rapport 2021:06. ISSN: 1103–4092.

Bagge, M. 2025. Vöyrin kunnan ympäristötarkastaja. Henkilökohtainen tiedonanto (sähköposti), 9. 6.2025.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2000/60/EY, annettu 23 päivänä lokakuuta 2000, yhteisön vesipolitiikan puitteista. EUVL L 327, 22.12.2000, s. 1–73.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2008/98/EY, annettu 19 päivänä marraskuuta 2008, jätteistä ja tiettyjen direktiivien kumoamisesta. EUVL L 312, 22.11.2008, s. 3–30.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU, annettu 24 päivänä marraskuuta 2010, teollisuuden päästöistä (teollisuuden päästöjen ehkäisemisen ja vähentämisen yhtenäistämiseksi). EUVL L 334, 17.12.2010, s. 17–119.

Juslin, N. 2025. Ympäristötarkastaja, Hangon kaupungin Tekninen ja ympäristövirasto. Henkilökohtainen tiedonanto (sähköposti), 9.6.2025.

Länsstyrelsen Västerbotten. 2017. Miljöproblemet sura sulfatjordar – Ett kunskapsunderlag och en beskrivning av Länsstyrelsen Västerbottens och Länsstyrelsen Norrbottens strategiska arbete. Umeå.

Länsstyrelsen Västerbotten. 2019. Tillstånd till sulfidjordsdeponi för Dåva Deponi och Avfallscenter i Umeå AB på fastigheten Nyskogen 1:1 Umeå Kommun. Ärende 551-11476-2018 (2019-08-29).

Länsstyrelsen Västra Götaland. 2025. Att söka tillstånd till miljöfarlig verksamhet – Information till dig som ansöker. Rapport 2025:22. ISSN:1403-168X.

Naturvårdsverket. 2004. Naturvårdsverkets föreskrifter om deponering, kriterier och förfaranden för mottagning av avfall vid anläggningar för deponering av avfall (NFS 2004:10).

Neuvoston direktiivi 1999/31/EY, annettu 26 päivänä huhtikuuta 1999, jätteiden kaatopaikoista. EUVL L 182, 16.7.1999, s. 1–19.

Nordmyr, L. 2025. Ympäristö- ja terveystarkastaja, Länsirannikon ympäristöyksikkö, Närpiö. Henkilökohtainen tiedonanto (sähköposti), 6.6.2025.

Nordmyr, L., Åström, M. & Peltola, P. (2008). Metal pollution of estuarine sediments caused by acid sulphate soils. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76, 832–840.

Serenius, K. 2024. Ympäristöpäällikkö, Helsingin kaupunki. Henkilökohtainen tiedonanto (haastattelu), 24.9.2024.

Sohlenius, G., Aroka, N., Wåhlén, H., Uhlbäck, J. & Persson, L. (2015). Sulfidjordar och sura sulfatjordar i Västerbotten och Norrbotten. Sveriges geologiska undersökning, SGU-rapport 2015:26, 93 s.

Suomen säädöskokoelma 527/2014. Ympäristönsuojelulaki.

Suomen säädöskokoelma 587/2011. Vesilaki.

Suomen säädöskokoelma 646/2011. Jätelaki.

Suomen ympäristöhallinto. 2026. Ympäristölupa. Viitattu 11.2.2026 osoitteessa https://www.ymparisto.fi/fi/luvat-ja-velvoitteet/ymparistolupa

Svensk författningssamling 1998:808. Miljöbalk.

Svensk författningssamling 1998:899. Förordningen om miljöfarlig verksamhet och hälsoskydd.

Svensk författningssamling 2001:512. Förordningen om deponering av avfall.

Svensk författningssamling 2004:660. Vattenförvaltningsförordningen.

Svensk författningssamling 2013:250. Industriutsläppsförordningen.

Svensk författningssamling 2013:251. Miljöprövningsförordningen.

Svensk författningssamling 2017:966. Miljöbedömningsförordningen.

Svensk författningssamling 2020:614. Avfallsförordningen.

Toivonen, J. 2025. Ympäristötarkastaja, Uusikaarlepyyn kaupunki. Henkilökohtainen tiedonanto (sähköposti), 5.6.2025.

Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013.

Ympäristöministeriö. 2022. Happamien sulfaattimaiden kansallinen opas rakennushankkeisiin: Opas happamien sulfaattimaiden huomioimiseen ja vaikutusten hallintaan. Ympäristöministeriön julkaisuja 2022:3. ISSN 2490-1024.

Åström, M. & Björklund, A. (1997). Geochemistry and acidity of sulphide-rich postglacial sediments of western Finland. Environmental Geochemistry and Health, 19, 155–164.